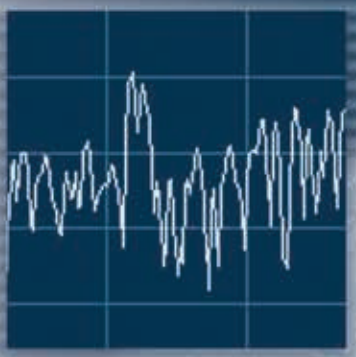
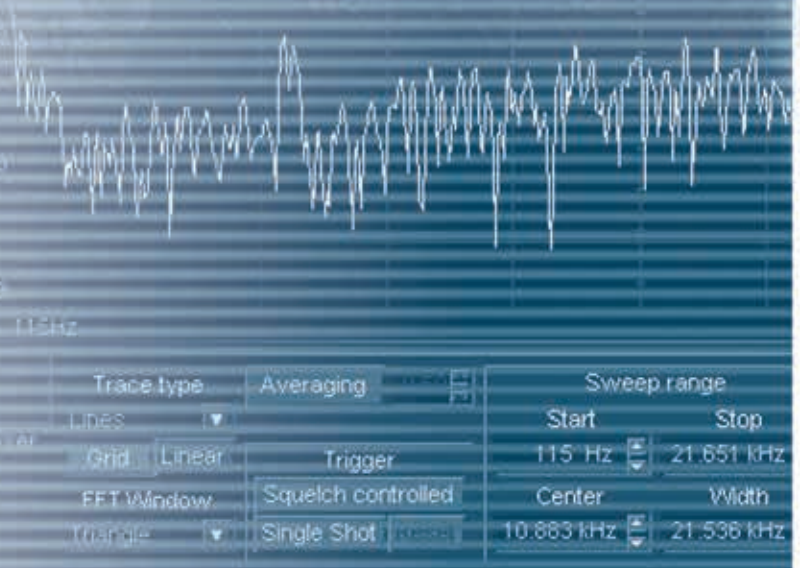
Unión Internacional de Telecomunicaciones



Manual

COMPROBACIÓN TÉCNICA DEL ESPECTRO



Oficina de Radiocomunicaciones

EL SECTOR DE RADIOCOMUNICACIONES DE LA UIT

El Sector de Radiocomunicaciones tiene como cometido garantizar la utilización racional, equitativa, eficaz y económica del espectro de frecuencias radioeléctricas por todos los servicios de radiocomunicaciones, incluidos los servicios por satélite, y realizar, sin limitación de gamas de frecuencias, estudios que sirvan de base para la adopción de las Recomendaciones UIT-R.

Las Conferencias Mundiales y Regionales de Radiocomunicaciones y las Asambleas de Radiocomunicaciones, con la colaboración de las Comisiones de Estudio, cumplen las funciones reglamentarias y políticas del Sector de Radiocomunicaciones.

Para toda información sobre asuntos de radiocomunicaciones

Póngase en contacto con:

UIT
Oficina de Radiocomunicaciones
Place des Nations
CH-1211 Ginebra 20
Suiza

Teléfono:	+41 22 730 5800
Telefax:	+41 22 730 5785
E-mail:	brmail@itu.int
Web:	www.itu.int/itu-r

Para solicitar las publicaciones de la UIT

Sírvase tomar nota que no podemos admitir pedidos por teléfono. En cambio, pueden enviarse por escrito

UIT
División de Ventas y Comercialización
Place des Nations
CH-1211 Ginebra 20
Suiza

Telefax:	**+41 22 730 5194**
E-mail:	**sales@itu.int**

La Librería electrónica de la UIT: **www.itu.int/publications**

© UIT 2011

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse por ningún procedimiento sin previa autorización escrita por parte de la UIT.

MANUAL

COMPROBACIÓN TÉCNICA DEL ESPECTRO

Edición 2011
Oficina de Radiocomunicaciones

PREFACIO

En 2006, la Comisión de Estudio 1 del Sector de Radiocomunicaciones (UIT-R) acordó con el Grupo de Trabajo 1C la revisión de algunas partes del Manual de Comprobación Técnica del Espectro (edición de 2002) teniendo en cuenta los últimos avances en sistemas de radiocomunicaciones digitales y las necesidades de las autoridades reglamentarias responsables de la gestión del espectro, en particular las de los países en desarrollo.

El trabajo de un primer Grupo de Expertos tuvo como resultado la publicación en 2008 de un Suplemento al Manual que supuso una revisión completa y autónoma de los siguientes Capítulos del Manual: Capítulo 3 (Equipos de comprobación técnica y automatización de las operaciones de comprobación técnica), sección 5.1 (Comprobación técnica de las emisiones de vehículos espaciales) del Capítulo 5, y Anexo 1 (Planificación y licitación de sistemas de comprobación técnica).

En 2008, la Comisión de Estudio1 1del Sector de Radiocomunicaciones acordó con el Grupo de Trabajo 1C la revisión de las restantes partes del Manual y le solicitó la preparación y aprobación de la siguiente edición completa incluyendo las modificaciones necesarias de las partes publicadas en el Suplemento.

Se estableció un segundo Grupo de Expertos para preparar esta quinta edición del Manual, que contiene la última información disponible sobre todos los aspectos relacionados con la Comprobación Técnica del Espectro, y que representa un valioso manual de referencia para la comunidad responsable de la comprobación técnica del espectro.

Las versiones actualizadas de los seis capítulos y del Anexo 1 describen con detalle los elementos fundamentales de la comprobación técnica del espectro y su relación con la gestión del espectro. Además, el Manual contiene muchas referencias que pueden consultarse para obtener información adicional.

El Manual de Comprobación Técnica del Espectro tiene por objetivo ser utilizado por las administraciones de países en desarrollo y de países desarrollados y por la Oficina de Radiocomunicaciones. El Manual será asimismo de utilidad para ingenieros de radiocomunicación de todo el mundo.

François Rancy
Director de la Oficina de Radiocomunicaciones

ÍNDICE

Página

PREFACIO iii

ÍNDICE v

PREÁMBULO vii

AGRADECIMIENTOS ix

INTRODUCCIÓIN POR EL RELATOR xi

CAPÍTULO 1 – LA COMPROBACIÓN TÉCNICA DEL ESPECTRO COMO FUNCIÓN ESENCIAL DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DEL ESPECTRO 1

CAPÍTULO 2 – ORGANIZACIÓN, ESTRUCTURAS FÍSICAS Y PERSONAL 27

CAPÍTULO 3 – EQUIPO DE COMPROBACIÓN TÉCNICA Y AUTOMATIZACIÓN DE LAS OPERACIONES DE COMPROBACIÓN TÉCNICA 103

CAPÍTULO 4 – MEDICIONES 207

CAPÍTULO 5 – SISTEMAS Y PROCEDIMIENTOS ESPECÍFICOS DE COMPROBACIÓN TÉCNICA 419

CAPÍTULO 6 – FUNDAMENTOS Y HERRAMIENTAS DE APOYO 612

ANEXO 1 AL MANUAL – PLANIFICACIÓN Y LICITACIÓN DE LOS SISTEMAS DE COMPROBACIÓN TÉCNICA DEL ESPECTRO 705

PREÁMBULO

Debido a la cada vez mayor demanda de espectro de radiofrecuencias, es muy importante que las técnicas de comprobación técnica del espectro estén alineadas con los avances de la tecnología de radiocomunicaciones y que la información tenga una difusión mundial. Desde la edición de este Manual en 2002, se han producido avances significativos en las técnicas de comprobación técnica del espectro. En consecuencia, la Comisión de Estudio 1 del Sector de Radiocomunicaciones encargó al Grupo de Trabajo 1C (GT 1C) la tarea de revisar el Manual de Comprobación Técnica del Espectro en beneficio de los países en desarrollo y desarrollados.

El espectro de radiofrecuencias constituye un recurso natural limitado y es fundamental que se utilice de la forma más eficaz y eficiente posible por los usuarios de los servicios de radiocomunicaciones de todo el mundo, de manera que las diversas redes de radiocomunicaciones puedan funcionar en un entorno radioeléctrico libre de interferencia. La tecnología de radiocomunicaciones avanza a un ritmo rápido. Con la aparición de nuevas tecnologías y el enorme crecimiento de los servicios de radiocomunicación, las necesidades de espectro de radiofrecuencias y de la órbita de los satélites geoestacionarios están aumentando a una velocidad astronómica. La gestión eficaz y eficiente del espectro es el elemento esencial para garantizar la coexistencia de las diversas redes de radiocomunicaciones sin que se produzcan interferencias entre ellas

La comprobación técnica del espectro es una de las herramientas esenciales para la gestión del espectro. Las técnicas de comprobación técnica del espectro han sido desarrolladas para asegurar la conformidad con los parámetros y normas técnicas establecidas para los sistemas de radiocomunicaciones. Además, la comprobación técnica del espectro contribuye a promover una utilización eficaz del espectro de radiofrecuencias y de la órbita de los satélites geoestacionarios. Para la comprobación técnica del espectro se utilizan métodos distintos de los aplicados en las redes de radiocomunicaciones puesto que se llevan a cabo en situaciones desfavorables y en un entorno desconocido.

La elaboración de este Manual abarca todos los aspectos esenciales de las técnicas y actividades de la comprobación técnica del espectro, incluido el establecimiento de instalaciones dedicadas a la comprobación técnica. Cabe esperar que el Manual tenga un gran valor para las administraciones y los organismos de comprobación técnica del espectro y se considera que será valioso para países en desarrollo y para países desarrollados.

Deseamos expresar nuestro más profundo agradecimiento al Sr. Trautmann (Alemania), Presidente del Grupo de Relatores del GT 1C responsable de la revisión completa del Manual, al Sr. Alain Jacquet (Francia), Presidente del Grupo de Relatores del GT 1C responsable de la elaboración del Suplemento a la edición de 2002 del Manual, a los subcoordinadores, a todos los que han contribuido, a los participantes y a todas aquellas personas cuya contribución ha sido decisiva para la elaboración del Manual, sin cuyos esfuerzos no habría podido hacerse realidad. Deseamos manifestar un especial agradecimiento al Sr. Philippe Aubineau, Consejero de la Oficina de Radiocomunicaciones que ha jugado un papel esencial en la elaboración del Manual.

Esperamos que el Manual sea de gran utilidad en los campos de la gestión y la comprobación técnica del espectro para el establecimiento y explotación de las instalaciones de comprobación. Debe proporcionar las herramientas esenciales para la gestión del espectro y para lograr una calidad en el funcionamiento adecuada de las redes de telecomunicaciones en un entorno libre de interferencias.

Rob Haines

Presidente de la Comisión de Estudio 1
Gestión del Espectro

Jan Verduijn

Vicepresidente de la Comisión de Estudio 1
Presidente del Grupo de Trabajo 1C
Técnicas de Comprobación Técnica del Espectro

AGRADECIMIENTOS

Deseamos agradecer a los Estados Miembros de la UIT, Miembros del Sector y empresas por su apoyo en la elaboración de este Manual mediante contribuciones, participación y organización de reuniones.

Deseamos agradecer a las personas siguientes, nombradas por orden alfabético, sus contribuciones a la nueva edición del Manual de Comprobación Técnica del Espectro y al Suplemento a la edición de 2002 del mismo, y que han sido incluidas en la presente edición. Los Capítulos y Secciones para los que los autores aceptaron la responsabilidad como Relator figuran entre paréntesis.

Sr. Mubarak Al-Sawafi, Omán (Capítulo 5); Sr. Uzi Ben-Yakov, Tadiran Electronic Systems (Sección 2.7); Sr. Robert Cutler, Agilent Technologies, Inc; Sr. Francois Delaveau, Thales; Sr. Saad Dera, Arabia Saudita (Capítulo 1); Sr. Pierre-Jean Dumay, Francia; Sr. Tamas Egri, Hungría; Sr. Thomas Hasenpusch, Alemania (Secciones 4.9, 5.3, 5.7); Sr. Roland Heister, Alemania; Sr. James Higgins, Estados Unidos de América (Secciones 2.4, 2.6); Sr. Alain Jacquet, Francia (Suplemento), Sr. Sungmoon Kim, República de Corea; Sr. Fryderyk Lewicki, Telekomunikacja Polska; Sr. Zhuoran Liu, China (Sección 5.1); Sr. Yvon Livran, Thales; Sr. Fabio Santos Lobao, Brasil (Secciones 5.2, 5.6); Sr. Haim Mazar, Israel, (Capítulo 2 y Secciones 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.11); Sr. Klaus Mecher, Alemania; Sr. Philippe Mege, Thales; Sr. Makoto Miyazono, Japón; Sra. Soon Hee Park, República de Corea; Sr. David Pasquereau, Thales (Sección 4.7); Sr. Alexander Pavlyuk, Federación de Rusia (Capítulo 6); Sr. Olivier Pellay, France (Capítulo 4 y Sección 6.9); Sr. Ulrich Pennig, Alemania (Sección 4.10); Sr. Christof Rohner, Rohde & Schwarz; Ms. Mi-Kyung Suk, República de Corea; Sr. Peter Tomka, Hungría (Anexo 1); Sr. Erik van Maanen, Países Bajos; Sr. Zhixin Wang, China (Sección 2.5); Sr. Roy B. Woolsey, TCI International, Inc. (Capítulo 3).

También deseamos agradecer la tarea de a muchas otras personas que han contribuido a este Manual participando en reuniones y proporcionando recomendaciones y comentarios de gran utilidad.

INTRODUCTION

Elaboración de esta edición...

La última edición de este Manual sobre Comprobación Técnica del Espectro se publicó en 2002. Debido a los avances en las tecnologías de radiocomunicación y de comprobación técnica, el Grupo de Trabajo 1C (GT 1C) decidió en su reunión de octubre de 2006 crear un Grupo de Relatores (GR) presididos por el Sr. Alain Jacquet (Francia) para la revisión de partes de dicho Manual. En su reunión de junio de 2008, el GT 1C aprobó nuevos textos del Capítulo 3 sobre equipos de comprobación técnica y la automatización de operaciones de comprobación técnica, la Sección 5.1 sobre comprobación técnica de las emisiones de vehículos espaciales y el Anexo 1 sobre Planificación y licitación de sistemas de comprobación técnica, que fueron publicados como un Suplemento a la edición de 2002 del Manual de Comprobación Técnica del Espectro

Con el objetivo de revisar las restantes partes del Manual de 2002, el GT 1C creó un Nuevo Grupo de Relatores presidido por el Sr. Ralf Trautmann (Alemania). El objetivo de este nuevo GR era la publicación de una nueva edición íntegra del Manual, incluyendo el texto del Suplemento y finalizar sus trabajos antes de la reunión de 2010 del GT 1C para la aprobación de la edición completa del Manual en dicha reunión.

Para organizar sus trabajos, el GR celebró 4 reuniones, del 25 de febrero al 4 de marzo de 2009 en Seúl, 16-23 de septiembre de 2009 en Ginebra, 1-10 de febrero de 2010 en Ginebra y 3-9 de junio de 2010 en Mainz.

Los estados Miembros, Miembros del Sector y Asociados a la CE 1 (por ejemplo, fabricantes de equipos), remitieron 165 documentos que dieron lugar a modificaciones y revisiones de las secciones existentes y a nuevas secciones del Manual. Estas contribuciones dieron lugar a su vez a propuestas para la modificación y mejora de la estructura del Manual. Debido a esta interdependencia, la estructura del Manual se modificó en sucesivas iteraciones. Como resultado de todo ello, el GR mejoró sustancialmente el texto del Manual y, en particular, la lógica de la delimitación entre los distintos capítulos.

El texto del presente Manual fue aprobado por el GT 1C en su reunión celebrada en septiembre de 2010 en Amsterdam.

El Manual consta de las partes siguientes, indicándose a la derecha los Relatores de cada Capítulo:

Capítulo 1	La comprobación técnica del espectro como función esencial de un sistema de gestión del espectro	Sr. Saad Dera (Arabia Saudita)
Capítulo 2	Organización, estructuras físicas y personal	Dr. H. Mazar (Israel)
Capítulo 3	Equipos	Dr. Roy B. Woolsey (TCI International, Inc)
Capítulo 4	Mediciones	Sr. O. Pellay (Francia)
Capítulo 5	Sistemas y procedimientos específicos de comprobación técnica	Sr. M. Al-Sawafi (Omán)
Capítulo 6	Fundamentos y herramientas de apoyo	Dr. A. Pavlyuk (Federación de Rusia)
Anexo 1	Planificación y licitación de los sistemas de comprobación técnica del espectro	Sr. P. Tomka (Hungría)

Breve retrospectiva histórica...

El CCIR publicó la primera edición del Manual de Estaciones de Comprobación Técnica en 1968 (con un suplemento publicado en 1971). La siguiente edición se publicó veinte años más tarde, en 1988. Algunos años después, en 1995, fue necesaria la publicación de una nueva edición con una revisión sustancial de la estructura del Manual. Dicha edición no incluía una separación clara entre las secciones relativas a equipos y a procedimientos de medida. Dicho problema fue inicialmente resuelto en la edición de 2002. La estructura de dicha edición es aún la base de la nueva edición. En esta nueva edición se ha mejorado la separación entre los distintos capítulos. Se ha actualizado el material antiguo y se ha incorporado gran cantidad de material nuevo, como por ejemplo, la introducción de técnicas de las mediciones de señales radar y la medición de diferencias de tiempos de llegada.

Finalidad de este Manual...

El espectro radioeléctrico es utilizado por todo el mundo. En nuestro entorno personal existen numerosas aplicaciones como alarmas antirrobo, auriculares y micrófonos inalámbricos, LAN radioeléctricas, llaves de apertura a distancia, conmutadores a distancia y otros dispositivos de control a distancia. Algunos usuarios pueden no ser conscientes de que se trata de aplicaciones radioeléctricas y que la degradación del servicio de dichas aplicaciones puede ser percibida como un funcionamiento indebido en lugar de como interferencia radioeléctrica. Otras aplicaciones como los sistemas celulares, de radiodifusión y operaciones radioeléctricas como las de la policía, ambulancias, control de tráfico aéreo y fuerzas armadas, se relacionan de forma más intuitiva con los sistemas radioeléctricos. En cualquier caso, la importancia fundamental del espectro radioeléctrico para la sociedad moderna se ha analizado extensamente en muchos ámbitos y es comúnmente aceptada y entendida.

Por el contrario, la comprobación técnica radioeléctrica exige muchas más explicaciones. El objetivo de la comprobación técnica del espectro es apoyar los procesos de gestión del espectro en general y solucionar los problemas debidos a las interferencias. Además, debe señalarse claramente que la comprobación técnica del espectro no tiene nada que ver con la vigilancia radioeléctrica. En la comprobación técnica del espectro el contenido de una emisión puede utilizarse para identificar una estación radioeléctrica o para determinar la calidad de servicio. Sin embargo, el mensaje en sí mismo no tiene interés alguno.

El objetivo de este Manual es proporcionar información y ofrecer orientaciones a quienes participan en los procesos de comprobación técnica del espectro: gestores, operadores, personal de mantenimiento, instructores y responsables de la gestión de compras.

A tal fin, los Capítulos incluyen lo siguiente...

El Capítulo 1 de este Manual describe la relación entre la comprobación técnica del espectro y la gestión del espectro y su integración en el sistema de comprobación técnica internacional. El Capítulo 2 describe las tareas de un servicio de comprobación técnica del espectro, su estructura y organización y los diversos tipos de estaciones de comprobación técnica que de ello se derivan, incluyendo el personal de operación y mantenimiento. Estos dos Capítulos son los más importantes para quienes se dedican al diseño y gestión de sistemas de comprobación técnica del espectro.

El Capítulo 3 describe el equipamiento necesario para realizar las mediciones descritas en el Capítulo 4. Ambos Capítulos son principalmente de interés para operadores de comprobación técnica y personal responsable de la adquisición de equipos.

El Capítulo 5 describe sistemas y procedimientos de comprobación técnica específicos que normalmente no se incluyen en todas las estaciones de comprobación técnica del espectro. Este Capítulo es de espacial interés para quienes están involucrados en dichas áreas de actividad, como por ejemplo, la comprobación técnica de emisiones de vehículos espaciales, la comprobación técnica de sistemas de radiodifusión y de sistemas celulares.

El Capítulo 6 contiene mucha información básica y complementaria sobre diversas cuestiones, como mapas, modulación, transformada rápida de Fourier y la documentación requerida. Este capítulo es particularmente útil para los operadores de comprobación técnica.

Por último, pero no menos importante, el Anexo 1, relativo a la planificación y licitación de sistemas de comprobación técnica del espectro complementa al Capítulo 3. El Anexo 1 es esencial para quienes están involucrados en el proceso de adquisición de equipos.

Conclusión...

Teniendo en cuenta la existencia de puntos de vista e intereses divergentes de las distintas partes que han participado en los trabajos del Grupo de Relatores, el texto del Manual refleja un elevado nivel de compromiso. El nuevo texto del Manual se ha considerado adecuado para atender la demanda durante los próximos años de lectores de países en desarrollo y desarrollados que deseen disponer de una recopilación de información actualizada sobre la organización, equipamiento y técnicas de medición de los servicios de comprobación técnica del espectro.

Quisiera agradecer a todos los relatores de Capítulos y de Secciones, a todos los que han contribuido y participado en las diversas reuniones y al Presidente del GT 1C por sus valiosas contribuciones, comentarios y recomendaciones. Por último, pero no menos importante, quisiera agradecer el apoyo del Sr. Philippe Aubineau, Consejero de la CE 1 del UIT-R. Sin su increíble precisión y rapidez en la identificación de inconsistencias el Manual no habría estado disponible en un plazo tan breve y con tanta calidad.

Ralf Trautmann
Relator del GR sobre el
Manual de Comprobación Técnica del Espectro

CAPÍTULO 1

La comprobación técnica del espectro como función esencial de un sistema de gestión del espectro

		Página
1.1	Gestión del espectro	3
1.1.1	Descripción de la gestión del espectro	3
1.1.2	Comprobación técnica del espectro	4
1.1.2.1	Finalidad de la gestión técnica del espectro	4
1.1.2.2	Relaciones entre comprobación técnica y gestión del espectro	4
1.1.3	Bases de datos	5
1.1.4	Software	5
1.1.5	Fundamento legal y regulatorio de un sistema de gestión nacional del espectro	5
1.1.6	Planificación y atribución del espectro	6
1.1.7	Ingeniería del espectro	7
1.1.8	Normas, reglamentos y patrones asociados	7
1.1.9	Coordinación y notificación de frecuencias	7
1.1.10	Concesión de licencias, asignación y facturación	8
1.1.11	Inspección de las instalaciones radioeléctricas	8
1.1.12	Cumplimiento de la ley	9
1.2	Consideraciones sobre la gestión del espectro	9
1.2.1	Utilización eficaz del espectro	9
1.2.2	Compartición del espectro	9
1.2.3	Aspectos económicos	10
1.3	Objetivos de comprobación técnica nacionales	10
1.3.1	Comprobación técnica relativa a la observancia de las reglas nacionales	11
1.3.1.1	Verificación de los parámetros técnicos y de explotación	11
1.3.1.2	Resolución de interferencias e identificación de transmisores no autorizados	11
1.3.2	La comprobación técnica en ayuda de la gestión del espectro	12
1.3.2.1	Datos de utilización (ocupación) del espectro	12
1.3.2.2	Ayuda a las nuevas asignaciones	13
1.3.2.3	Ayuda al desarrollo de mejores modelos de gestión	13
1.3.2.4	Ayuda a la atención de reclamaciones y consultas	13
1.3.2.5	Ayuda para clasificar e interpretar la interferencia y los efectos de propagación	13

Página

1.3.2.6 Ayuda a la compartición del espectro 13
1.3.2.7 Funciones de comprobación técnica del espectro en un sistema de gestión del espectro 14
1.3.2.8 Flujo de actividades y consideraciones sobre la base de datos 15
1.3.2.9 Verificación y corrección de la base de datos 17
1.4 Comprobación técnica internacional 17
1.4.1 Sistema de comprobación técnica internacional 17
1.4.2 Misión coordinadora de la Oficina de Radiocomunicaciones de la UIT 18
1.4.3 Utilización de la información de comprobación técnica internacional por la Oficina de Radiocomunicaciones 18
1.4.3.1 Asistencia para la supresión de operaciones no autorizadas o fuera de banda 19
1.4.3.2 Asistencia a las administraciones en caso de interferencia perjudicial 19
1.4.3.3 Orientación a las administraciones en la selección de frecuencias 20
1.4.3.4 Preparación de las conferencias de radiocomunicaciones 20
1.4.4 Programas internacionales de comprobación técnica de las emisiones 20
1.4.4.1 El programa regular 20
1.4.4.2 Programas especiales 21
1.4.5 Cobertura mundial de la comprobación técnica 21
1.5 Colaboración entre las estaciones de comprobación técnica de diferentes países 22
1.5.1 Colaboración por debajo de 30 MHz 22
1.5.2 Colaboración por encima de 30 MHz 22
Anexo 1 al Capítulo 1 – Acuerdo de cooperación directa entre estaciones de comprobación técnica radioeléctrica 222

1.1 Gestión del espectro

La finalidad de esta sección es proporcionar una breve panorámica del proceso de gestión del espectro y de la función esencial de la comprobación técnica del espectro en el ámbito más general de la gestión del espectro. En los párrafos siguientes se ofrece una visión general de los sistemas de gestión nacionales del espectro (NSMS) que se sintetiza en la Fig. 1.1-1.

FIGURA 1.1-1

Sistema simplificado de gestión nacional del espectro



Los Manuales de la UIT sobre Gestión Nacional del Espectro (edición de 2005) y sobre Técnicas Informatizadas para la Gestión del Espectro (CAT) (edición de 2005), así como los Informes UIT-R SM.2012, UIT-R SM.2015, UIT-R SM.2093, UIT-R SM.2130 y la Resolución 9 del UIT-D (Rev. Doha, 2006) ofrecen información adicional sobre aspectos relacionados con la gestión del espectro, y a ellos se remite al lector.

1.1.1 Descripción de la gestión del espectro

La gestión del espectro es la combinación de procedimientos administrativos, científicos y técnicos necesarios para garantizar una explotación eficaz del equipo y los servicios de radiocomunicación sin producir interferencia. Dicho simplemente, la gestión del espectro es el proceso general de regular y administrar la utilización del espectro de frecuencias radioeléctrico. La finalidad de la gestión del espectro es

maximizar la eficacia de utilización del espectro, minimizar la interferencia y eliminar las utilizaciones no autorizadas e inadecuadas del espectro. Las normas y reglamentos basados en la legislación pertinente constituyen una base reglamentaria y legal para el proceso de gestión del espectro. Las bases de datos de información, que contienen detalles de todos los usuarios autorizados del espectro, proporcionan la base administrativa y técnica para el proceso. El análisis de la información de estas bases de datos facilita el proceso de gestión del espectro cuyos resultados son las decisiones de atribución de espectro, asignaciones de frecuencia y concesión de licencias en el espectro. La comprobación técnica del espectro, la inspección y la imposición legal aportan los medios necesarios para mantener la integridad del proceso de gestión del espectro.

1.1.2 Comprobación técnica del espectro

1.1.2.1 Finalidad de la gestión técnica del espectro

La comprobación técnica viene a ser los ojos y los oídos del proceso de gestión del espectro. En la práctica es necesaria puesto que, en realidad, la autorización para uso del espectro no garantiza que éste se utilice como se ha previsto. La causa puede estar en la complejidad del equipo, en su interacción con otros equipos, anomalías funcionales o manipulación mal intencionada. El problema se ha agravado por la veloz proliferación de los sistemas inalámbricos terrenales y de satélite así como de equipos capaces de crear interferencias, como los computadores y otras fuentes de radiación no deliberada. El sistema de comprobación técnica proporciona un método de verificación y "cierra el bucle" del proceso de gestión del espectro.

El espectro se está utilizando de forma permanente durante todo el año, ya sea en el ámbito local, regional o mundial. De modo análogo, la función de comprobación técnica del espectro debe tener un carácter continuo si se quiere cumplir adecuadamente los objetivos y fines de dicha comprobación.

La finalidad de la comprobación técnica de las emisiones es dar soporte al proceso general de gestión del espectro, incluidas las funciones de asignación de frecuencias y de planificación del espectro. En términos concretos, los objetivos de la comprobación técnica (no necesariamente en ese orden de prioridad) son:

– ayudar a resolver las interferencias en el espectro electromagnético, ya sea a escala local, regional o mundial, de manera que los servicios y estaciones radioeléctricas puedan coexistir de un modo compatible, reduciendo y llevando al mínimo los recursos asociados con la instalación y explotación de estos servicios de telecomunicación, al tiempo que se proporcionan ventajas económicas a la infraestructura del país ofreciendo acceso a servicios de telecomunicación libres de interferencias y asequibles;

– ayudar a garantizar una calidad aceptable de la recepción de radio y televisión por el público general;

– proporcionar datos de comprobación técnica valiosos para el proceso de gestión del espectro radioeléctrico de una administración en lo que concierne a la utilización real de frecuencias y bandas (por ejemplo, la ocupación de canales y la congestión de bandas), la verificación de las características técnicas y operativas correctas de las señales transmitidas (cumplimiento de las condiciones de la licencia), la detección e identificación de transmisores ilegales y fuentes de interferencia potenciales y la verificación de registros de frecuencia.

– proporcionar información de comprobación técnica valiosa para los programas organizados por la Oficina de Radiocomunicaciones de la UIT, por ejemplo, en la preparación de informes para las conferencias de radiocomunicaciones, recabando una asistencia especial de las administraciones para eliminar la interferencia perjudicial y suprimir las operaciones fuera de banda, o ayudando a las administraciones a encontrar frecuencias adecuadas.

1.1.2.2 Relaciones entre comprobación técnica y gestión del espectro

Existe una estrecha relación entre las funciones de comprobación técnica del espectro y de gestión del espectro. La vinculación de estas funciones a través de un sistema de computador integrado puede acrecentar notablemente la eficacia y el rendimiento económico de ambas. En la realización de un sistema de gestión del espectro es sumamente importante desarrollar primero una estructura de sistema que mantenga la

integridad del proceso y una base de datos que comprenda toda la información pertinente de apoyo del proceso. En el caso de una base de datos inadecuada, pueden combinarse eficazmente las técnicas de comprobación técnica y de imposición legal para obtener informaciones críticas y de ese modo ayudar a perfeccionar la base de datos y el proceso general de gestión del espectro.

La comprobación técnica está íntimamente asociada a la inspección y al obligado cumplimiento, en cuanto que permite la identificación y la medición de la utilización del espectro y las fuentes de interferencia, la verificación de las características técnicas y de explotación correctas de las señales radiadas, y la detección e identificación de los transmisores ilegales, proporcionando datos sobre la eficacia de las políticas de gestión del espectro.

La comprobación técnica presta además soporte al trabajo general de gestión del espectro al proporcionar una medición general de la utilización de canales y bandas, incluyendo las estadísticas de carácter técnico y de explotación sobre la disponibilidad de canales, con lo que da una medida de la ocupación del espectro. Es asimismo útil a efectos de planificación, ya que puede servir a los responsables de la gestión del espectro para comprender mejor el nivel de utilización del mismo comparado con las asignaciones que están registradas en ficheros de papel o de datos. Un sistema de comprobación y medición puede ayudar en algunos casos en los que la solución de un problema requiera más que un simple conocimiento de las características autorizadas o de diseño de los sistemas radioeléctricos. Estos sistemas obtienen además información sobre el funcionamiento de las estaciones individuales a los efectos de reglamentación, cumplimiento legal y observancia, y pueden ser utilizados para establecer la localización y la identidad de las estaciones que producen interferencia.

En términos generales, la comprobación técnica informa a la gestión del espectro de que la utilización del espectro en la práctica se ajusta o no a la política nacional. La comprobación técnica puede también señalar la necesidad de exigir nuevos requisitos a los funcionarios que gestionan el espectro. En este caso, la comprobación técnica aporta información útil a futuro para la gestión del espectro.

1.1.3 Bases de datos

Un componente esencial de la gestión del espectro es la capacidad de almacenar, mantener y acceder a información relativa a cada sistema de comunicaciones individual. Esta información constituye una de las bases de datos del sistema de gestión del espectro, en la que se describen todos los parámetros pertinentes de los sistemas de comunicación radioeléctricos individuales. Esta base de datos permite que la entidad de gobierno lleve a cabo diversos análisis de ingeniería y dirección para garantizar el uso eficaz del espectro, el cumplimiento operativo de las normas y reglamentos técnicos y un funcionamiento libre de interferencia entre los sistemas. Sin unos registros exactos en la base de datos, la integridad del proceso de gestión del espectro puede verse comprometida.

El servicio de comprobación técnica del espectro debe tener acceso a la base de datos central completa de los usuarios autorizados. Esto ofrece un medio para comprobar las condiciones de concesión de licencia y asignación e identificar las utilizaciones no autorizadas del espectro. El servicio de comprobación técnica puede también crear sus propias bases de datos de la actividad de transmisión supervisada y características medidas. Esta información puede utilizarse para el registro de eventos que más tarde serán correlacionados con las bases de datos centralizadas.

1.1.4 Software

Los sistemas de gestión del espectro y de comprobación técnica de las emisiones pueden incluir un extenso soporte lógico para automatizar las tareas de recopilación, procesamiento y evaluación de datos y de análisis de interferencias. El empleo de soporte lógico para guardar en bases de datos relacionales los resultados de la comprobación técnica del espectro y correlacionar esta información con la base de datos central de usuarios autorizados puede ahorrar un tiempo de investigación apreciable, a la par que se incrementa la exactitud.

1.1.5 Fundamento legal y regulatorio de un sistema de gestión nacional del espectro

Debido al rápido avance de la tecnología radioeléctrica y al papel esencial que desempeña la tecnología en la vida de una nación, las leyes que regulan el espectro como recurso están adquiriendo tanta importancia como las que rigen el uso de la tierra y del agua. Por consiguiente, la utilización de las radiocomunicaciones y su

reglamentación habrán de formar parte del ordenamiento legal de cada país. La ley de las radiocomunicaciones es un documento básico que establece conceptos, autoridades, responsabilidades, metas y objetivos amplios, pero que no debe descender a describir en detalle reglamentos y procedimientos. Esta ley deberá reconocer el hecho de que el espectro radioeléctrico es un recurso nacional, y que es necesario administrarlo en interés de todos los ciudadanos. Establecerá, por tanto, el derecho del gobierno de la nación a regular el uso de las radiocomunicaciones, incluyendo la autorización para dicho uso y la observancia de las normas de gestión del espectro, fundamentalmente controladas mediante comprobación técnica e inspección. A fin de ejercer tales funciones, habrá que conceder a los responsables de la gestión del espectro autoridad para identificar las fuentes de interferencia y exigir que sean desactivadas o confiscadas con arreglo a mecanismos legales adecuados. Deberán además especificarse los límites de esa autoridad.

La ley de las radiocomunicaciones deberá establecer el derecho, tanto de los ciudadanos como del gobierno, a poseer y explotar equipos de radiocomunicación. Los organismos de gobierno nacional, regional o local pueden explotar mejor ciertos sistemas de comunicación, que en la mayoría de los casos dan soporte a las misiones de esos mismos organismos. No obstante, muchas de las necesidades de la sociedad pueden ser atendidas por empresas comerciales o individuos, y la calidad y disponibilidad de los servicios de comunicaciones puede guardar una estrecha relación con los tipos de actividad y el nivel de libertad que se conceda a los proveedores de los servicios.

También deben contemplarse dentro de la ley nacional de las radiocomunicaciones los requisitos impuestos al acceso del público a procesos de decisión sobre gestión del espectro y a la receptividad del gobierno ante las aportaciones del público. Es posible describir en otro lugar los procesos concretos que sigue el público para presentar a la autoridad gestora sus necesidades de espectro o su posición sobre cuestiones relacionadas con el espectro, pero el derecho al acceso y cualesquiera límites aplicables al mismo pueden ser establecidos en la ley. Partiendo de la base de que la misión fundamental del gestor consiste en administrar la utilización del espectro con arreglo al interés nacional, resulta esencial responder a las solicitudes del público. En consecuencia, la ley de las radiocomunicaciones deberá exigir que la autoridad gestora del espectro proporcione al público información sobre sus decisiones, incluyendo una explicación por escrito de las bases en que se apoyan. La ley deberá además ofrecer un proceso de revisión y apelación de las decisiones de conformidad con los criterios y procedimientos establecidos.

El instrumento primario habitual de la gestión del espectro es el conjunto de reglamentos y procedimientos promulgados y adoptados por la autoridad gestora nacional. Los reglamentos sirven de base para la utilización habitual de las radiocomunicaciones y permiten a los usuarios del espectro entender de qué manera se gobiernan sus operaciones. También proporcionan un método de interacción con la autoridad de gestión del espectro. Estos reglamentos y procedimientos deberán cubrir materias como los procedimientos de obtención y renovación de licencia, normas de emisión, procedimientos de autorización de equipos, planes de disposición de canales y requisitos de explotación así como procedimientos para la comprobación técnica del espectro, la inspección y la adopción de medidas para su cumplimiento.

1.1.6 Planificación y atribución del espectro

La atribución del espectro es el proceso de distribuir el espectro de frecuencias radioeléctricas entre los diferentes servicios radioeléctricos, ya sea a título exclusivo o compartido y en su clasificación como primaria o secundaria. A nivel internacional, esta atribución está gobernada por las Conferencias Mundiales de R (CMR) y se refleja en el Artículo **5** del Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT. Con base en este Cuadro de Atribución de Frecuencias Internacional, las administraciones pueden establecer un cuadro de atribución de frecuencias nacional, atribuir bandas de frecuencias a los servicios de radiocomunicación y autorizar sistemas específicos.

Para utilizar el espectro eficazmente es esencial atribuir bandas de frecuencias que satisfagan los requisitos de propagación del servicio propuesto. Por ejemplo, a los servicios que típicamente se les exige proporcionar cobertura omnidireccional sobre una zona extensa, como el de la radiodifusión de televisión, se les atribuyen bandas de frecuencias que ocupan posiciones relativamente bajas en el espectro; se atribuyen bandas de frecuencias en ondas métricas o decimétricas a los servicios radioeléctricos móviles privados para garantizar una cobertura local limitada, y bandas de frecuencias en ondas decamétricas a los servicios mundiales aeronáuticos y marítimos que requieren una cobertura mundial. Estas atribuciones a veces se subdividen en

planes de canales para asegurar que se cumplen los requisitos específicos de carga y de reutilización de frecuencias y canales.

En respuesta a las peticiones de usuarios particulares, las administraciones se ajustarán a estos cuadros de atribución para asignar frecuencias adecuadas al sistema radioeléctrico que se necesite, conceder las licencias pertinentes y producir los oportunos registros de la base de datos. Los procedimientos técnicos de asignación de frecuencias deberán permitir unos requisitos efectivos de reutilización de canales y frecuencias basados en los conceptos de la interferencia tolerable o en los criterios de la separación en frecuencia-distancia necesaria entre redes radioeléctricas.

1.1.7 Ingeniería del espectro

La gestión del espectro implica decisiones que pertenecen a un campo tecnológico, y se requiere una labor de ingeniería para evaluar adecuadamente la información, capacidades y soluciones del caso. Aunque en la mayoría de las decisiones intervienen consideraciones sociales, económicas y políticas, pueden analizarse numerosas cuestiones de gestión del espectro y tomarse decisiones al respecto basadas en factores técnicos y de ingeniería. Por consiguiente, se necesita que la organización cuente con personas versadas en estos análisis técnicos y que estén al tanto de los desarrollos tecnológicos para proporcionar evaluaciones imparciales a quienes, dentro de los grupos de política y planificación, hayan de considerar otros factores como la economía y la política nacional. Estos expertos pueden identificar y recomendar soluciones a los problemas de interferencia, determinar las características técnicas del equipo necesarias para asegurar la compatibilidad entre los sistemas, o en algunos casos alentar la utilización de tecnologías alternativas. Un aspecto importante consiste en la utilización de modelos con información de entrada suministrada por bases de datos apropiadas, para realizar análisis relacionados con la gestión del espectro, como los de asignaciones de frecuencia. Pueden utilizarse estos modelos para predecir si es posible el cumplimiento de las normas y reglamentos (por ejemplo, los límites de densidad de flujo de potencia en un satélite) y para evaluar las posibilidades de compartición mediante análisis de la probabilidad de interferencia.

1.1.8 Normas, reglamentos y patrones asociados

La unión internacional de telecomunicaciones (UIT) ha establecido normas generales y reglamentos referentes a la atribución internacional de espectro y gestión del espectro, las cuales están contenidas en el Reglamento de Radiocomunicaciones (RR) publicado por la UIT (http://www.itu.int/publ/R-REG-RR/en). Teniendo en cuenta este reglamento internacional, cada nación miembro crea su propia legislación y las normas y reglamentos pertinentes para acomodar su infraestructura de radiocomunicaciones y objetivos nacionales. El propósito de estas normas es proporcionar la estructura necesaria para la administración y el cumplimiento del proceso de gestión del espectro. Los reglamentos deberán incorporar el proceso de autorización del equipo, incluyendo especificaciones y patrones para las características del transmisor.

1.1.9 Coordinación y notificación de frecuencias

Dado que el espectro radioeléctrico es un recurso limitado y que la demanda de los usuarios privados y oficiales continúa aumentando, es necesario crear un mecanismo mediante el cual puedan asignarse frecuencias a los servicios y sistemas particulares que permitan acomodar el máximo número de usuarios. Esto se consigue a través de un proceso de coordinación de frecuencias.

La coordinación de frecuencias se inicia con el proceso de seleccionar frecuencias utilizables en un sistema que no sea probable que produzcan interferencia en otros sistemas existentes. Esta información puede luego ser intercambiada o "coordinada" con las partes interesadas para asegurar la compatibilidad entre los sistemas. La finalidad de este proceso es conseguir una máxima reutilización de frecuencias al tiempo que se reduce al mínimo la interferencia operativa entre los sistemas de comunicaciones.

Varios son los elementos esenciales a considerar en el proceso de coordinación de frecuencias. En primer lugar, la administración debe definir las normas y reglamentos que han de servir de base para el proceso. A continuación, debe haber un intercambio de información entre el que solicita un nuevo servicio y los coordinadores. La información debe contener datos técnicos suficientes para que los coordinadores puedan realizar un análisis para asegurar que el servicio nuevo no produzca interferencia perjudicial en las instalaciones radioeléctricas existentes y que la explotación de nuevos servicios sea compatible con los servicios existentes. La eficacia de la coordinación de frecuencias está directamente relacionada con la

precisión y vigencia de los registros contenidos en la base de datos y la capacidad de predecir exactamente el funcionamiento del sistema actual y del propuesto.

La coordinación de frecuencias y los estudios de compatibilidad entre las instalaciones radioeléctricas existentes y las propuestas son partes necesarias de un sistema eficaz de gestión del espectro, ya sea realizada a nivel nacional o internacional.

La coordinación de frecuencias internacional es un procedimiento que puede ejecutarse antes de conceder una asignación de frecuencia a una estación que pudiera entrar en conflicto con la de otro país. Este procedimiento de coordinación de frecuencias suele responder a un acuerdo especial concluido entre dos o más países, tal como se describe, por ejemplo, en la Recomendación UIT-R SM.1049. Las reglas generales, de ámbito mundial, para la asignación y utilización de frecuencias y los acuerdos especiales se describen en los Artículos 4 á 9 y 11 del Reglamento de Radiocomunicaciones.

1.1.10 Concesión de licencias, asignación y facturación

Las etapas administrativas necesarias en el proceso de concesión de licencias y asignación de frecuencias vienen definidas por las normas y reglamentos anteriormente identificados. Una entidad del gobierno suele controlar el proceso o función de concesión de licencias. Una vez que la entidad ha determinado que el sistema de comunicaciones propuesto cumple con estas normas, se concederá la autorización normalmente mediante la expedición de una licencia o su equivalente. En caso de introducir cualquier cambio apreciable en un sistema autorizado, las normas usualmente requieren que el usuario notifique a la entidad reguladora estos cambios de manera que pueda expedirse una licencia revisada. Si se siguen estos procedimientos en la concesión de licencias quedará garantizado que se mantiene la integridad de la base de datos de gestión del espectro, reflejando de modo oportuno los cambios efectuados en los sistemas en explotación. Los datos relativos a sistemas retirados del servicio pueden ser trasladados a una sección inactiva de la base de datos para referencia transitoria y futura, y ser eliminados finalmente.

Las ventajas de las funciones de concesión de licencias y administración en un sistema eficaz de gestión del espectro van más allá de la mera creación y mantenimiento de una base de datos de parámetros técnicos. El proceso de concesión de licencias puede ser una fuente de ingresos para la administración en la forma de tasas percibidas cuando se concede la licencia inicial y tasas para la renovación de las licencias existentes. También puede ser una fuente de ingresos en multas y penalizaciones por funcionar sin la licencia adecuada, funcionar fuera de los parámetros autorizados o desafiando las normas y reglamentos establecidos.

1.1.11 Inspección de las instalaciones radioeléctricas

La inspección de las instalaciones radioeléctricas es un medio efectivo para regular y garantizar una utilización más eficaz del espectro porque garantiza que dichas instalaciones se instalan y explotan de conformidad con los parámetros operativos asignados a las mismas. Las estaciones que no funcionan dentro de los márgenes de los parámetros operativos autorizados (por ejemplo, una potencia excesiva o un error en la ubicación del transmisor) tienen un potencial de generación de interferencias superior y tendrán un impacto en nuevas autorizaciones de frecuencias en el mismo canal o en canales adyacentes.

Las administraciones pueden adoptar diversos enfoques para la planificación y puesta en marcha de inspecciones de instalaciones radioeléctricas. Estos enfoques incluyen aspectos tales como:

– inspección de todas las nuevas instalaciones autorizadas;

– inspecciones basadas en determinadas causas (por ejemplo, un aumento en el número de informes de interferencias o la detección de infracciones a las normas establecidas), y

– inspección de un porcentaje de todas las estaciones mediante un muestreo aleatorio u otros procedimientos estadísticos.

Un ejemplo de método efectivo consiste en inspeccionar un porcentaje o "muestra" de instalaciones/ transmisores autorizados. Las instalaciones incluidas en la muestra pueden seleccionarse de forma aleatoria para los distintos servicios. Los resultados de la inspección se evaluarán seguidamente con arreglo a la reglamentación y normativa nacionales. El nivel de observancia de la muestra proporciona así una medición estimada del grado de observancia de la reglamentación nacional. En los años siguientes, el tamaño y categoría de la muestra de instalaciones sujetas a inspección se ajustarán en base a los resultados de la

observancia de las normas del año anterior. En otras palabras, si la observancia ha sido mayor en un servicio determinado, se tomará un menor número de muestras; en caso contrario, es decir, si la observancia ha sido baja, se podría analizar una muestra de mayor tamaño.

En el Informe UIT-R SM.2130 se incluye un análisis más detallado de los métodos de planificación de la inspección, determinación del muestreo estadístico, equipos para la inspección y procedimientos detallados de inspección.

1.1.12 Cumplimiento de la ley

Las ventajas de un sistema de gestión del espectro no pueden materializarse si los usuarios no cumplen los términos de su licencia y las normas y reglamentos apropiados. En las normas y reglamentos deben incluirse disposiciones que definan las medidas a tomar ante las infracciones del usuario. Según la gravedad de las infracciones, las penalizaciones pueden abarcar desde simples avisos hasta multas, revocaciones de licencias y cese del funcionamiento de los sistemas y, de conformidad y en función de la legislación nacional, incluso ser objeto de acciones judiciales. Sin procedimientos eficaces para imponer el cumplimiento se vería comprometida la integridad del proceso de gestión del espectro. La capacidad de una administración para hacer cumplir las normas y reglamentos establecidos en cuanto al funcionamiento de los sistemas de comunicaciones radioeléctricos depende claramente a la vez de un sistema de gestión del espectro eficaz y de un sistema de comprobación técnica del espectro. Cuando se recibe una reclamación en materia de interferencia, la señal interferente puede ser observada para determinar la localización de la señal, el tipo de transmisión y otros parámetros técnicos que puedan ayudar a identificar y localizar la fuente de interferencia que puedan ser objeto de una investigación adicional. Puede luego explorarse la base de datos de gestión del espectro para determinar si el origen de la interferencia es un transmisor autorizado que está funcionando fuera de los parámetros técnicos que tiene autorizados, o si procede de un operador ilegal.

1.2 Consideraciones sobre la gestión del espectro

1.2.1 Utilización eficaz del espectro

El rápido crecimiento de la demanda de servicios de comunicación mundiales, impulsado por la tendencia hacia una sociedad apoyada en la información, puede conducir a una grave escasez del espectro disponible a menos que se tomen medidas para la gestión eficiente de dicho espectro a nivel nacional, regional e internacional. Dado que el espectro de frecuencias es un recurso limitado, el crecimiento requerido deberá alcanzarse a través de una utilización eficaz del espectro disponible.

Se consigue la utilización eficaz mediante la atribución estratégica de porciones del espectro para satisfacer las necesidades de los usuarios, sin incurrir en desaprovechamiento alguno del espectro. La conservación de espectro permitirá la expansión futura y la aparición de nuevas tecnologías inalámbricas.

1.2.2 Compartición del espectro

Una consideración importante en la gestión del espectro es la capacidad de uno o más usuarios o servicios para compartir un segmento del espectro de frecuencias sin interferencias. La compartición del espectro entre los usuarios aumenta eficazmente la cantidad de espectro disponible para una amplia variedad de servicios. La compartición puede verse facilitada por el control de la potencia de los usuarios, la separación geográfica y en el tiempo de dichos usuarios así como de sus diagramas de radiación, permitiendo alguna interferencia cuando ésta pueda ser tolerable sin llegar a ser perjudicial, o por la utilización de tecnologías más modernas que permitan la coexistencia de múltiples transmisiones en la misma frecuencia. No obstante, para lograr un uso compartido eficaz es necesaria una buena coordinación entre las entidades nacionales que gestionen la utilización del espectro, pudiendo requerirse la coordinación entre administraciones a nivel internacional en las cercanías de las fronteras entre países. La atribución de espectro a los usuarios sujetos a restricciones geográficas se aprovecha de las limitaciones de propagación de señal. El ejemplo más sencillo de restricciones geográficas son las diferencias en atribuciones que existen entre las regiones de la UIT. A escala menor, la separación geográfica es también la base de la planificación de frecuencias para un sistema celular, la cual permite la reutilización de frecuencias tras haber logrado una separación física apropiada entre las células y entre los diagramas de emisión.

La separación en el tiempo es también un método eficaz que facilita la compartición mediante el empleo de tecnologías con agilidad de tiempo y sistemas de concentración de enlaces. En estos sistemas, uno o más canales pueden ser compartidos por numerosos usuarios que hayan delimitado sus necesidades en cuanto a tiempo de transmisión. Numerosos sistemas son capaces de coexistir en el mismo segmento de tiempo y espacio del espectro, dependiendo del umbral de interferencia, tipo de modulación o plan de acceso múltiple (como AMDC) específico de cada sistema. Por ejemplo, una de las ventajas fundamentales de la tecnología del espectro ensanchado es su mayor resistencia a la interferencia. Esta característica permite que múltiples transmisiones ocupen simultáneamente el mismo espectro sin perturbaciones aunque, por supuesto, dentro de las limitaciones del sistema.

1.2.3 Aspectos económicos

Las radiocomunicaciones han pasado a ser una parte cada vez más vital de la infraestructura de telecomunicaciones y la economía de un país, y es por tanto esencial abordar la gestión nacional del espectro desde planteamientos económicos. Tales planteamientos favorecen la eficacia económica, técnica y administrativa, a la par que ayudan a garantizar que los servicios radioeléctricos puedan funcionar sin riesgo de interferencias. Para que en un país haya radiocomunicaciones efectivas, se habrá de contar con un eficaz sistema de gestión del espectro.

Para implantar este sistema de gestión del espectro se han de buscar primero los recursos financieros adecuados. Estos recursos pueden obtenerse de la administración o de las tasas percibidas por el uso del espectro radioeléctrico. El cobro de tasas abarca desde la tramitación de una licencia de radio a la subasta de una porción del espectro. Las tasas pueden fomentar la utilización eficaz del espectro siempre que incorporen unos incentivos económicos correctos y no sean tan bajas como para ser despreciables a los ojos de los usuarios del espectro ni tan elevadas que sobrepasen el valor que fijaría el mercado, en cuyo caso el espectro podría permanecer ocioso, sin generar beneficio alguno.

Las subastas pueden ser la solución óptima cuando varios solicitantes compiten por la misma asignación de frecuencia. Los ingresos obtenidos a través de subastas pueden superar en mucho los costos de la gestión del espectro, pero este sistema posee la capacidad de reflejar con exactitud el valor del espectro. Tal vez no sean apropiadas las subastas para servicios en los que la competencia por asignaciones de espectro es limitada, servicios de necesidad social como los de seguridad y defensa nacional, y para algunos otros servicios específicos como, por ejemplo, los servicios internacionales por satélite. Dado que en las subastas recientes el espectro ha alcanzado altos valores, a veces de miles de millones de dólares, las administraciones tienen que asegurarse de que la banda de espectro subastada sea aceptable para utilizarse, bien trasladando a los usuarios existentes o bien estableciendo condiciones para la compartición. La comprobación técnica de esas bandas en las zonas de cobertura apropiadas prestará soporte a esta actividad.

Cierto número de administraciones han establecido diversas formas de apoyo a las entidades nacionales de gestión del espectro, a saber:

– grupos de comunicación con interés directo en el espectro, como son los comités consultivos, asociaciones comerciales, organizaciones profesionales y asociaciones semioficiales;

– coordinadores de frecuencias y gestores de espectro designados;

– consultores de gestión del espectro y contratistas de apoyo.

Estos métodos de soporte tienen posibilidad de ahorrar recursos estatales financieros o humanos, aumentando la eficacia de utilización del espectro, mejorando la efectividad de la asignación y coordinación de frecuencias y complementando la pericia de los responsables de la gestión nacional del espectro.

Véanse detalles sobre la economía del espectro en el Informe UIT-R SM.2012.

1.3 Objetivos de comprobación técnica nacionales

La finalidad de la comprobación técnica del espectro, como anteriormente se ha descrito, consiste en ayudar a resolver las interferencias y garantizar una calidad aceptable de la recepción de radio y televisión, y en proporcionar a la gestión del espectro información útil sobre la comprobación técnica.

Históricamente, la utilización cada vez más intensa de las altas frecuencias para enlaces internacionales fue la causa de que los países se reunieran para establecer normas reguladoras de la atribución de frecuencias y procedimientos para el tratamiento de la interferencia. El Artículo **16** del Reglamento de Radiocomunicaciones describe el procedimiento y las facilidades a utilizar, como se advierte en § 1.4. Para cumplir lo prescrito en este artículo, se recomienda que los países establezcan una oficina centralizada y uno o más centros de comprobación técnica en ondas decamétricas.

En nuestros días, aunque todavía sea preciso supervisar en ondas decamétricas, la necesidad de dedicar una atención especial a la comprobación técnica en ondas métricas, decimétricas y centimétricas es cada vez más acuciante. Estas frecuencias se utilizan más y más para redes de radiocomunicaciones cuyo alcance está limitado, por su propia naturaleza, a la visibilidad directa aproximada, o alrededor de los cien kilómetros, dependiendo de la frecuencia, la potencia, las condiciones de propagación y la altura de la antena (transmisora y receptora).

La mejor manera de emplazar las estaciones de comprobación técnica, habida cuenta del limitado alcance de los transmisores a supervisar, se aborda en el capítulo 2. La utilización nacional de estos medios se describe a continuación, mientras que su empleo internacional se trata en el § 1.4.

1.3.1 Comprobación técnica relativa a la observancia de las reglas nacionales

La finalidad de la comprobación técnica es identificar aquellas transmisiones que no se ajustan a los requisitos, bien porque la transmisión no está autorizada o por algún incumplimiento técnico de la transmisión con respecto a las normas y reglamentos nacionales.

Existen varios motivos de este tipo de trabajo:

– una transmisión no autorizada o defectuosa provoca un deficiente servicio de otros usuarios a causa de interferencia;

– las transmisiones no autorizadas representan para la administración la pérdida de los ingresos por licencia y desincentivan a los demás usuarios a solicitar licencia;

– la planificación sólo puede avanzar con eficacia en un entorno estable y coordinado;

– el público tiene derecho a un nivel aceptable de los servicios de radiodifusión, radio móvil y radiobúsqueda.

1.3.1.1 Verificación de los parámetros técnicos y de explotación

La comprobación técnica se utiliza para obtener información detallada sobre las características técnicas y/o de explotación de los sistemas radioeléctricos. Habitualmente podría incluirse aquí una medición detallada del espectro de emisión de un transmisor y/o de su diagrama de radiación de antena. Estas mediciones puede servir para obtener la información necesaria en un análisis de compatibilidad electromagnética (EMC) determinado, para verificar la conformidad con las características especificadas en un cierto registro de asignación de frecuencia, o como parte de un proceso de homologación para garantizar que un tipo particular de equipo funcionará de modo compatible con otros equipos en la banda de frecuencias. Por último, las mediciones podrían tener la finalidad de cerciorarse de que un determinado transmisor está funcionando dentro de los límites especificados.

Aunque pueden medirse muchos tipos de parámetros técnicos, probablemente el espectro de emisión de un transmisor sea el más importante. Debe escogerse una técnica de medición que permita medir cuantitativamente diversos tipos de modulación de señal de una manera útil. De este modo, un sistema de medición debe ofrecer una diversidad de anchuras de banda, filtros, atenuadores y otros parámetros que puedan seleccionarse individualmente para la señal que se está midiendo. Para algunas de estas mediciones se requieren capacidades de análisis vectorial de las señales.

1.3.1.2 Resolución de interferencias e identificación de transmisores no autorizados

Los datos de comprobación técnica del espectro son útiles para identificar y resolver la causa de la interferencia a transmisores autorizados. Estas mediciones pueden detectar la presencia de transmisores no autorizados que originan la interferencia o, por ejemplo, detectar la interferencia de intermodulación que resulta de una combinación de transmisores y emisiones no esenciales y no deliberadas. Aunque pueda

necesitarse una gran variedad de combinaciones de mediciones de espectro y análisis de ingeniería para resolver algunos tipos de interferencia, los datos de comprobación técnica del espectro suelen jugar un papel esencial en este proceso. La observación auditiva será frecuentemente útil para conocer la identidad de los transmisores implicados en la interferencia.

Puede sospecharse de transmisores no autorizados como origen de la interferencia. Por esta razón, a menudo habrá una estrecha asociación entre la capacidad de resolver problemas de interferencia y la de detectar e identificar transmisores no autorizados. Un problema importante en la detección de transmisores no autorizados es que suele ser difícil separar las señales legales de aquellas que no están autorizadas. Esto es especialmente cierto en las bandas congestionadas cuando transmisores autorizados y no autorizados comparten la misma banda y tienen características de modulación similares.

La detección de señales no autorizadas a veces puede realizarse mediante una observación auditiva en las frecuencias en las que los usuarios autorizados se han quejado de interferencia o en las que los registros de asignación de frecuencias no muestran usuarios legalmente autorizados. La radiogoniometría, los vehículos de seguimiento móvil y la información obtenida de la observación auditiva ayudan a identificar y localizar los transmisores ilegales una vez que se ha detectado su funcionamiento.

1.3.2 La comprobación técnica en ayuda de la gestión del espectro

La buena gestión del espectro sólo puede desarrollarse satisfactoriamente si los planificadores reciben una información adecuada sobre la utilización actual del espectro y las tendencias de su demanda. Si bien se recoge gran cantidad de datos de los aspirantes a usuarios en los formularios de solicitud o renovación de licencia, raras veces estos datos son apropiados para la gestión del espectro. Estos registros indicarán solamente que está autorizada la utilización de una frecuencia, pero quizá no den información adecuada que indique si esa frecuencia realmente se utiliza y de qué modo. Por lo tanto, una banda de frecuencias que aparece congestionada a juzgar por los registros de asignación de frecuencia puede estar congestionada o no en la realidad. Actualmente, numerosos países, al poner en marcha procesos de adquisición de nuevos sistemas de gestión del espectro, requieren que dichos sistemas dispongan de una conexión directa con el sistema de comprobación técnica a fin de almacenar los resultados de dicho sistema en una base de datos central. De esta forma, los planificadores del espectro disponen de los datos de comprobación técnica y los operadores responsables de la comprobación técnica tienen acceso en línea a la base de datos de licencias. Todo ello permite adoptar procesos de trabajo eficientes.

1.3.2.1 Datos de utilización (ocupación) del espectro

Los datos de utilización u ocupación de un canal indican en qué porción del tiempo ha habido señal presente en una determinada frecuencia o banda de frecuencias durante un intervalo de observación especificado. Las mediciones en una sola frecuencia pueden combinarse para exponer cómo varía la utilización durante un día de 24 horas (incluyendo la hora cargada y las horas de utilización máxima, media y mínima). Pueden combinarse los datos de muchas frecuencias para mostrar la utilización media en todas las frecuencias de una banda o en un grupo escogido de usuarios.

La información de ocupación de canal y congestión de banda es un instrumento valioso para varias funciones de gestión del espectro. Esta información puede emplearse para identificar los canales vacantes de una banda, y para prohibir la adición de más asignaciones a los canales intensamente utilizados. Estos datos pueden también utilizarse para provocar una investigación, bien porque haya señales presentes en canales que según los registros de gestión de frecuencias no están asignados, o bien porque no se detecte utilización alguna en frecuencias que hayan sido objeto de asignaciones. Las variaciones detectadas en las estadísticas de tiempo de ocupación, para una misma banda y en la misma zona geográfica, pueden ser reveladoras de tendencias. Finalmente, esta información puede servir para planificar por anticipado la atribución de bandas adicionales cuando se congestionan demasiado las bandas existentes.

Las mediciones de utilización del espectro son especialmente útiles en las bandas de radiocomunicaciones móviles terrestres y bandas similares de comunicación por canales. Otras bandas móviles serían también muy apropiadas para las mediciones de utilización. El proceso de gestión del espectro podría establecer patrones de uso para poder servir de referencia a cada uno de los servicios implicados.

La relación entre la información de comprobación técnica y los registros de gestión del espectro no siempre es directa. La información de ocupación de canal indica solamente que se utiliza una frecuencia. No indica cuál es el transmisor que produce la señal. La existencia de una asignación en una determinada frecuencia y la presencia de una señal en esa frecuencia no significa necesariamente que la señal medida haya sido transmitida por el transmisor asignado. Quizás se necesite para resolver esta ambigüedad una observación auditiva de los distintivos de llamada o informaciones similares que identifiquen un transmisor. Como alternativa, los radiogoniómetros permiten calcular las mediciones de ocupación para cada transmisor, basando la identificación en la determinación de la posición geográfica. Sin embargo, la ausencia de señal durante el tiempo de medición no indica necesariamente la ausencia de una asignación de frecuencia o que la frecuencia no se utilice. Puede suceder que un transmisor asignado no se haya utilizado durante el periodo de comprobación técnica.

1.3.2.2 Ayuda a las nuevas asignaciones

El nivel de utilización de cada titular de licencia varía según la actividad que desempeña, la hora del día y el día de la semana. Los datos de concesión de licencia pueden emplearse para predecir los niveles de utilización con cierto grado de éxito que depende del refinamiento del modelo de predicción y de la precisión de los datos. A medida que aumenta la congestión, el modelo puede hacerse progresivamente menos adecuado para identificar los canales de menor utilización. Los datos de comprobación técnica procedentes de la zona geográfica de la asignación propuesta serán de inestimable valor para identificar la frecuencia más adecuada a los fines que se persiguen.

1.3.2.3 Ayuda al desarrollo de mejores modelos de gestión

Los datos de comprobación técnica pueden ser de costosa recopilación y análisis. Por lo tanto, pese a ser un instrumento valioso, no es práctico utilizarlos para todas las asignaciones. Las zonas del país de escasa utilización pueden atenderse adecuadamente mediante un modelo basado en los datos de la licencia disponibles. Los datos de la comprobación técnica recogidos en las zonas más ocupadas pueden compararse con los niveles predichos por el modelo, sirviendo los resultados para identificar los datos de concesión de licencia sospechosos y refinar el modelo de manera que encaje mejor con la situación total. De esta manera, puede ser validado el modelo y mejorada su aplicabilidad. En consecuencia, la comprobación técnica puede orientarse mejor hacia las zonas que más necesitan asistencia.

1.3.2.4 Ayuda a la atención de reclamaciones y consultas

A medida que crezca la congestión, los usuarios estarán menos satisfechos con el servicio disponible. La posibilidad de ejercer la comprobación técnica en zonas en las que se concentran las reclamaciones en número desmesurado permite enterarse de la verdadera naturaleza del problema e idear la actuación correctiva óptima. También será posible sustanciar o rechazar las alegaciones que atañen a la calidad de servicio percibida.

1.3.2.5 Ayuda para clasificar e interpretar la interferencia y los efectos de propagación

Las bandas de ondas métricas y decimétricas no son inmunes a los efectos de la propagación anómala. Pueden, pues, producirse interferencias de servicios distantes que normalmente se consideran demasiado alejados para justificar grandes esfuerzos de coordinación.

Estos efectos tienen una vida muy breve y, aunque se disponga de datos estadísticos sobre ellos, sus implicaciones sobre servicios determinados solamente podrán evaluarse a través de la comprobación técnica. Puede suceder muy bien que sólo unos pocos servicios estén afectados por unos cuantos transmisores distantes. El remedio adecuado puede ser específico de cada caso, y unos buenos datos de comprobación técnica ayudarán mucho a identificar las causas del problema.

1.3.2.6 Ayuda a la compartición del espectro

Existe actualmente tal demanda sobre el espectro que se espera que los servicios hayan de compartirlo. Ciertos tipos de servicio son claramente incompatibles, pero a menudo la cuestión está en el límite. Podrían realizarse pruebas para determinar el grado de compatibilidad. El control ejercido sobre el desarrollo de la

prueba proporcionará informaciones tales como los niveles relativos de señales que ayudarán al análisis del comportamiento del sistema.

1.3.2.7 Funciones de comprobación técnica del espectro en un sistema de gestión del espectro

En la Fig. 1.3-1 se ilustra la relación entre la gestión del espectro y la comprobación técnica del espectro. Los datos de gestión proporcionan los datos de las predicciones, la base de datos de usuarios de referencia (licenciatarios), el equipo (RF, potencia) y las estaciones (coordenadas, identificación, altura sobre el nivel del mar, altitud sobre el nivel del suelo, ganancia de la antena, acimut y ángulo de elevación). Las tareas y prioridades se establecen en función de su importancia (por ejemplo, la seguridad de la vida), la estrategia de quienes toman decisiones y las quejas por interferencias. Las mediciones, es decir, los ojos y oídos de la gestión del espectro, permiten conocer la frecuencia, ocupación del espectro, intensidad de campo, anchura de banda, dirección, polarización y modulación. La comparación de las mediciones con las condiciones incluidas en las licencias permite determinar incumplimientos, discrepancias y estaciones ilegales. Una representación gráfica normal permite visualizar los resultados de la comprobación técnica y los datos de la licencia: registros, informes, datos estadísticos y análisis de los servicios, tales como radiodifusión, servicios móviles y fijos; la representación gráfica puede incluir la cobertura y calidad de servicio, incluyendo una digitalización de las características orográficas del terreno. En relación con las interferencias, también se visualizan los pasos del proceso: queja, investigación, identificación y solución; en el caso de estaciones no autorizadas, será obligatoria la observancia de la normativa vigente y la supresión de las emisiones.

FIGURA 1.3-1

Interrelación entre funciones de gestión del espectro y de comprobación técnica del espectro



Spectrum-1.3-01

1.3.2.8 Flujo de actividades y consideraciones sobre la base de datos

En aras de una cooperación óptima entre las actividades de gestión del espectro y de comprobación técnica del espectro, se recomienda que los responsables de la comprobación técnica del espectro tengan acceso a la base de datos de gestión del espectro. La autoridad de gestión del espectro es responsable de mantener la base de datos. Por su parte, con el fin de potenciar más eficazmente las capacidades del departamento de comprobación técnica del espectro con información en tiempo real, éste podrá acceder en línea y en modo de solo lectura a las correspondientes bases de datos de gestión del espectro, y establecer así una mejor planificación de actividades de comprobación técnica y de evaluación de resultados.

Igualmente, se recomienda permitir el acceso de los responsables de la gestión del espectro a la base de datos de comprobación técnica del espectro (principalmente a los resultados de la comprobación técnica).

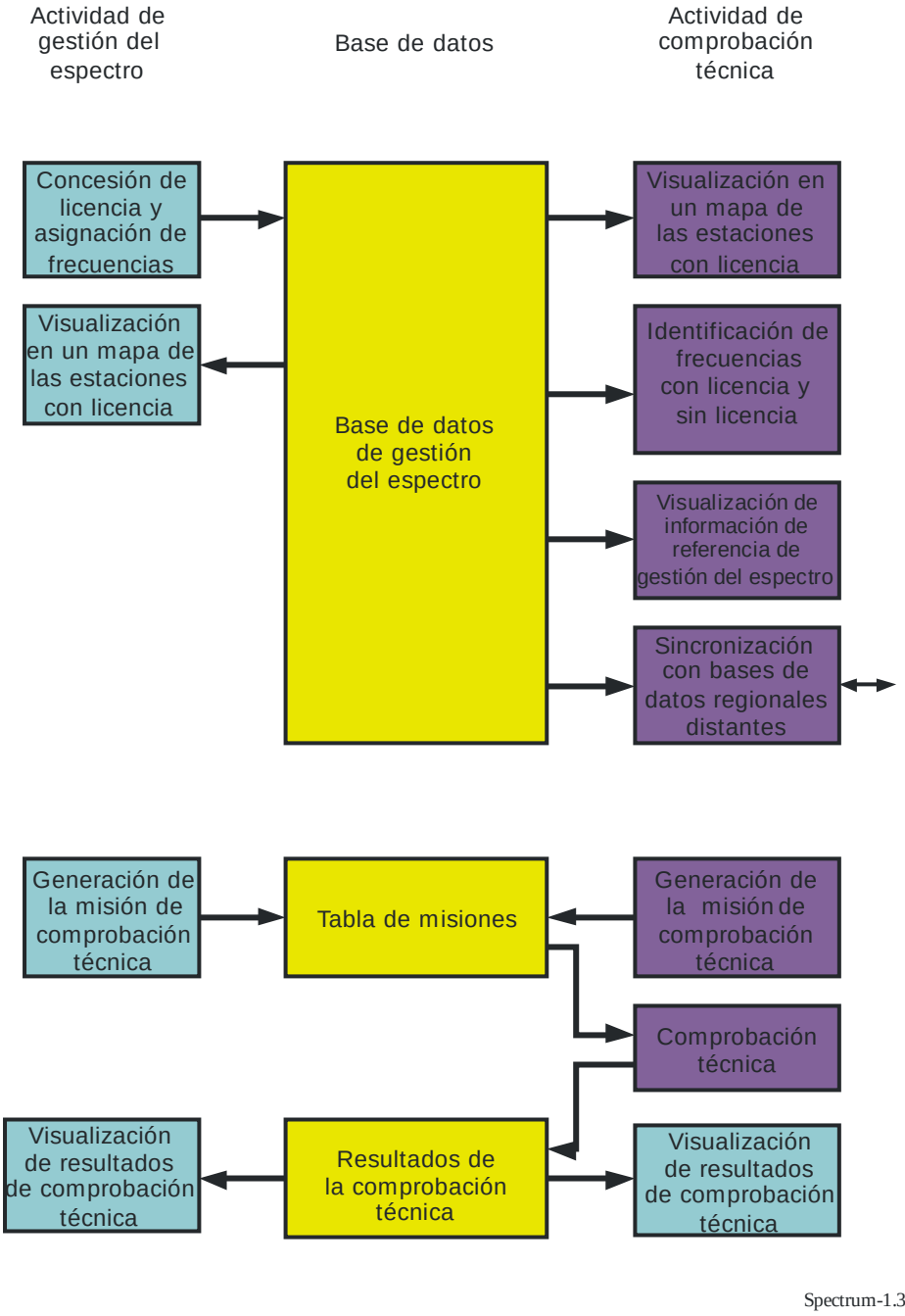
Ello puede reducir el número de mensajes entre la gestión del espectro y la comprobación técnica del espectro, y permitir el uso indiscriminado de la información por ambas aplicaciones, con independencia de cuál sea la que haya generado los datos; véase la Fig. 1.3-2.

La base de datos de gestión del espectro accesible para el servicio de comprobación técnica puede consistir en lo siguiente:

– Datos de estaciones y redes (licencia);
– Información sobre la asignación de frecuencias;
– Datos de los equipos;
– Otros datos.

FIGURA 1.3-2

Flujo de la cooperación entre la gestión y la comprobación técnica del espectro



La utilización de dicha información permitirá al departamento de comprobación técnica:

– Visualizar sobre un mapa el subconjunto de estaciones con licencia, señalando gráficamente la ubicación de cada una de ellas;

– Identificar estaciones con licencia y sin licencia así como la actividad transmisora;

– Analizar los incumplimientos de las condiciones de la licencia;

– Visualizar datos de referencia, tales como especificaciones de equipos, o información detallada de los usuarios.

Misiones y tareas de la comprobación técnica

– El sistema de gestión del espectro podrá preparar misiones de comprobación técnica y tareas que sean ejecutadas por el sistema de comprobación técnica. Las misiones y tareas requeridas se almacenarán en la base de datos.

– Se propone que cuando se definan misiones y tareas se establezcan umbrales y tolerancias de los parámetros a medir (por ejemplo, anchura de banda). Dichos umbrales y tolerancias se utilizarán para alertar al operador de posibles desviaciones respecto a los valores esperados (de acuerdo con los términos de la licencia).

– El servicio de comprobación técnica utilizará dichas instrucciones para programar actividades automáticas (así como para iniciar operaciones interactivas) y para almacenar los resultados en la base de datos.

– El personal de gestión del espectro y de comprobación técnica del espectro podrá analizar los resultados almacenados y elaborar informes al respecto.

La base de datos compartida descrita se implementará al nivel del departamento de gestión del espectro, tal como se especifica en el capítulo 3 del Manual de Gestión Nacional del Espectro de la UIT, edición de 2005. Dicho capítulo hace referencia a los componentes de la base de datos relevantes para el departamento de comprobación técnica del espectro que permitan integrar el sistema de comprobación técnica del espectro y el sistema de gestión del espectro, tal como se describe en la Recomendación UIT-R SM.1537.

Obsérvese que la distribución de información relevante a estaciones distantes de comprobación técnica (es decir, la actualización de una estación móvil de comprobación técnica con la lista de estaciones con licencia y de las frecuencias asignadas de una zona antes de que la estación móvil de comprobación técnica realice una campaña de medidas en dicha zona) y la transferencia de resultados de mediciones desde las estaciones distantes al centro nacional será responsabilidad del servicio de comprobación técnica.

1.3.2.9 Verificación y corrección de la base de datos

La integridad de una base de datos requiere actualizaciones y verificaciones regulares. Los datos de la comprobación técnica pueden utilizarse para ayudar a comprobar la exactitud de la base de datos de gestión del espectro y facilitar su puesta al día. Además, la capacidad de verificación de los datos que posee la comprobación técnica aporta cierta motivación adicional para mantener más al día la base de datos.

1.4 Comprobación técnica internacional

1.4.1 Sistema de comprobación técnica internacional

Como puede apreciarse en los diferentes capítulos de este manual, la comprobación técnica de las emisiones es parte esencial de un sistema de gestión del espectro de frecuencias. Cada país debe utilizar las instalaciones de comprobación técnica como instrumentos esenciales para garantizar una eficaz gestión del espectro a nivel nacional. Por otra parte, dado que los objetivos de la UIT incluyen el asegurar una utilización eficaz y económica del espectro de frecuencias y ayudar a eliminar rápidamente la interferencia perjudicial, las administraciones han decidido cooperar al desarrollo y explotación de un sistema de comprobación técnica internacional y, para este fin, han adoptado las disposiciones apropiadas en materia de reglamentación.

El Artículo 16 del Reglamento de Radiocomunicaciones contiene las disposiciones que rigen el establecimiento y explotación del sistema de comprobación técnica internacional.

El sistema de comprobación técnica internacional comprende solamente las estaciones de comprobación técnica que han sido designadas como tales por las administraciones. Esas estaciones pueden ser explotadas por una administración, por una empresa pública o privada, por un servicio común de comprobación técnica establecido por varios países, o por una organización internacional. Las administraciones responsables determinarán si las normas técnicas observadas por las estaciones están de acuerdo con las recomendaciones del UIT-R y comunicarán la información a la UIT. Hay que advertir al respecto que las administraciones pueden autorizar la participación de estaciones que apliquen normas técnicas menos rigurosas con el fin de atender algunas necesidades particulares de datos sobre comprobación técnica.

Cada administración, cada grupo de administraciones en los casos en que se haya establecido un servicio de comprobación técnica conjunto, o cada organización internacional que participe en el sistema de comprobación técnica internacional de las emisiones, ha de designar una oficina centralizadora. Las peticiones de información de comprobación técnica deben enviarse a esa oficina centralizadora, la cual reunirá los resultados de la comprobación técnica para su transmisión a la Oficina de Radiocomunicaciones de la UIT (la Oficina) u otras oficinas centralizadoras. De conformidad con el Artículo **20** del Reglamento de Radiocomunicaciones, la información sobre tales estaciones está publicada por la UIT en el Nomenclátor de las Estaciones de Comprobación Técnica Internacional de las emisiones (también llamada Lista VIII), junto con el nombre de la oficina centralizadora.

Además de lo anterior, la Lista VIII contiene información sobre las diferentes funciones que cada estación de comprobación técnica puede realizar de los servicios de radiocomunicaciones terrenales y espaciales.

La Lista VIII es un documento indispensable para explotar el sistema de comprobación técnica internacional de las emisiones, puesto que la información que contiene permite establecer un rápido contacto entre las oficinas centralizadoras, particularmente en el caso de interferencia perjudicial. Por ello es importante que las administraciones actualicen cuidadosamente la información de la lista (en respuesta a peticiones periódicas de la Oficina) y notifiquen inmediatamente cualquier cambio a la Oficina. Regularmente se publican suplementos a esa lista, y además la información recibida entre la publicación de los suplementos se incluye en el Boletín de Explotación de la UIT y en su sitio web (http://www.itu.int/ITU-R/ go/terrestrial-monitoring-listVIII/index.html).

1.4.2 Misión coordinadora de la Oficina de Radiocomunicaciones de la UIT

El sistema de comprobación técnica internacional de las emisiones es un medio para coordinar las actividades de comprobación técnica con miras a satisfacer las necesidades internacionales relativas a la recopilación, intercambio y publicación de información. Las actividades de comprobación técnica dentro del sistema se realizan en respuesta a una petición, ya sea de administraciones o de la Oficina. La Oficina desempeña un papel esencial en la explotación del sistema coordinando la organización de programas de comprobación técnica regulares o especiales, cotejando y estudiando los resultados y tomando las disposiciones necesarias para comunicarlos a las administraciones. Desde 1999, la Oficina publica los informes sobre datos de comprobación técnica recibidos de las administraciones en el sitio web de la UIT (http://www.itu.int/brtpr/monitoring/index.html) y los correspondientes ficheros electrónicos pueden telecargarse gratuitamente.

La Oficina organiza diferentes tipos de programas de comprobación técnica de ámbito mundial o regional, así como programas limitados confinados a unas pocas administraciones.

1.4.3 Utilización de la información de comprobación técnica internacional por la Oficina de Radiocomunicaciones

La Oficina de Radiocomunicaciones necesita los datos de comprobación técnica para realizar las tareas siguientes:

– asistencia a la supresión de las operaciones fuera de banda no autorizadas;

– asistencia a las administraciones en caso de interferencia perjudicial;

– orientación a las administraciones en la selección de frecuencias;

– preparación de las Conferencias de Radiocomunicaciones, en particular las responsables de atribuir bandas de frecuencias, proporcionando informes sobre la ocupación del espectro.

A causa de las distintas características de propagación en diferentes partes del espectro de frecuencias, los datos de comprobación técnica de emisiones utilizados por la Oficina se refieren a los servicios terrenales en las bandas de frecuencias por debajo de 28 MHz o en las utilizadas en radiocomunicaciones espaciales. En situaciones especiales, no obstante, particularmente cuando interviene en casos de interferencia, la Oficina debe ser capaz de obtener datos relativos a cualquier banda de frecuencias.

A este respecto, debe hacerse hincapié en que, dado el creciente uso del espectro de frecuencias por los servicios de radiocomunicaciones espaciales, hay una mayor necesidad de información de comprobación técnica concerniente a las bandas utilizadas por estos servicios. En la Recomendación 36 (CMR-97) se invita

al UIT-R a estudiar y formular recomendaciones relativas a las instalaciones necesarias para proporcionar la cobertura mundial adecuada con miras a garantizar una utilización eficaz de los recursos, y se invita a las administraciones a:

– procurar por todos los medios la provisión de instalaciones de comprobación técnica como se contempla en el Artículo 16 del Reglamento de Radiocomunicaciones;

– informar al UIT-R de hasta qué grado están preparadas para cooperar en los programas de comprobación técnica que pueda solicitar el UIT-R;

– considerar los diversos aspectos de la comprobación técnica de las emisiones originadas en estaciones espaciales para permitir la aplicación de lo dispuesto en los artículos 21 y 22 del Reglamento de Radiocomunicaciones.

Es también esencial que aquellas administraciones que ya disponen de instalaciones de comprobación técnica espacial participen en el sistema de comprobación técnica internacional y a este efecto notifiquen a la Oficina los datos detallados de sus estaciones de comprobación técnica para su inclusión en la Lista VIII (Sección III).

1.4.3.1 Asistencia para la supresión de operaciones no autorizadas o fuera de banda

La Oficina de Radiocomunicaciones organiza de vez en cuando campañas especiales de comprobación técnica de las emisiones con el fin de identificar operaciones fuera de banda y de animar a las administraciones a que adopten las medidas apropiadas para suprimir esas emisiones.

Las bandas de frecuencias para las que se organizan tales campañas suelen ser aquellas atribuidas a servicios de seguridad. Durante esas campañas, la Oficina pide a las administraciones que comprueben intensamente las bandas de que se trate durante un periodo de tiempo (generalmente una semana). El tipo de datos requeridos se explica en una carta circular. La Oficina resume los informes así obtenidos para facilitar su análisis posterior. Si la Oficina logra identificar con suficiente certidumbre que la estación funcionando sin autorización o fuera de banda se encuentra bajo la jurisdicción de determinada administración, señalará a la atención de esa administración el funcionamiento comunicado y el potencial de interferencia de esas emisiones a los servicios de seguridad.

Las emisiones interferentes se deben a veces a emisiones no esenciales resultantes de un mal ajuste del transmisor que trabaja en otra banda o a estaciones inscritas en el Registro Internacional de Frecuencias que funcionan sobre la base de no interferirse de conformidad con el número 4.4 del Reglamento de Radiocomunicaciones. Por tanto, las administraciones generalmente pueden eliminar la interferencia resultante.

Como ejemplo, desde 1987 se está desarrollando una campaña especial, conforme a la Resolución número 205 de la CAMR-MOB-87, en la banda de 406 – 406,1 MHz atribuida exclusivamente a las radiobalizas de localización de siniestros por satélite. Esta campaña ha dado resultados muy positivos. En los Informes Anuales de la Oficina y en los informes que se publican en el sitio web (http://www.itu.int/ITU-R/go/resolution-205/en) se publican apropiadamente estadísticas sobre el número de emisiones interferentes que han sido detectadas y posteriormente suprimidas.

1.4.3.2 Asistencia a las administraciones en caso de interferencia perjudicial

De conformidad con el Artículo **15** del Reglamento de Radiocomunicaciones, una administración puede solicitar la asistencia de la Oficina de Radiocomunicaciones en la resolución de casos de interferencia perjudicial. En los estudios que emprende para este fin, la Oficina frecuentemente utiliza información asegurada a través de la comprobación técnica internacional, que suele obtener organizando programas especiales en los que intervienen sólo unas pocas estaciones de comprobación técnica.

La Oficina puede requerir dos tipos de información en los casos de interferencia perjudicial.

– El primero de ellos se refiere a la identificación y localización de posibles fuentes de interferencia perjudicial. En este caso, la Oficina solicitará a las administraciones que dispongan de estaciones de comprobación técnica debidamente situadas que efectúen las mediciones necesarias.

– La Oficina evalúa los resultados de las mediciones así obtenidas para determinar el lugar donde se encuentran las estaciones interferentes y, por tanto, identificar las administraciones bajo cuya jurisdicción operan.

– La segunda utilización de la información de comprobación técnica de las emisiones en relación con casos de interferencia perjudicial es la medición de la intensidad de campo de la estación interferente. Esto quizás sea necesario cuando haya alguna incertidumbre en cuanto a la magnitud de la interferencia perjudicial experimentada, o cuando puedan aplicarse criterios específicos contenidos en el Reglamento de Radiocomunicaciones o alguna recomendación del UIT-R. La Oficina recabará, en casos de este tipo, la asistencia de las administraciones cuyas estaciones de comprobación técnica se encuentren debidamente situadas y equipadas para hacer las mediciones requeridas.

1.4.3.3 Orientación a las administraciones en la selección de frecuencias

Si lo pide cualquier administración, y en particular una administración de un país que necesite una asistencia especial, de conformidad con el número 76 del Reglamento de Radiocomunicaciones, la Oficina utilizará la información contenida en el registro internacional de frecuencias, junto con la información de comprobación técnica recibida en el marco de programas de comprobación técnica regulares o especiales, para identificar las frecuencias que posiblemente puedan asignarse a sus estaciones de los servicios fijo o móvil.

Se prestará una atención especial a los casos en que se necesite sustituir frecuencias para el funcionamiento regular de estaciones en el servicio móvil aeronáutico o marítimo debido a situaciones de interferencia no resueltas.

1.4.3.4 Preparación de las conferencias de radiocomunicaciones

Como parte de los preparativos de una conferencia de radiocomunicaciones, especialmente si la conferencia ha de introducir cambios en el cuadro de atribuciones de frecuencia, la Oficina puede organizar campañas de comprobación técnica especiales concebidas para completar los datos del registro internacional. Los resultados serían comunicados a la conferencia por medio de un informe, de manera que ésta pueda evaluar la repercusión de los cambios propuestos en la utilización del espectro.

Por añadidura, una conferencia de radiocomunicaciones puede solicitar a la Oficina que organice campañas de comprobación técnica especiales, no sólo con miras a obtener información sobre la utilización de una porción específica del espectro sino también en apoyo de estudios relativos a la interferencia causada a comunicaciones de seguridad a fin de que una conferencia posterior los examine con más detalle.

1.4.4 Programas internacionales de comprobación técnica de las emisiones

1.4.4.1 El programa regular

Desde la implantación del Cuadro de Atribución de Bandas de Frecuencias adoptado por la Conferencia de Radiocomunicaciones de Atlantic City, en 1947, la UIT ha mantenido un programa regular de comprobación técnica de emisiones en las bandas de ondas decamétricas comprendidas entre 2 850 y 28 000 kHz. El primer número del "resumen de la información de comprobación técnica de las emisiones" se publicó en 1953, y estos resúmenes aparecen regularmente desde entonces. Los principales objetivos de los programas regulares de comprobación técnica del Sistema Internacional de Comprobación Técnica de las Emisiones pueden resumirse del modo siguiente:

– reunir información sobre la ocupación del espectro en el emplazamiento de las estaciones de comprobación técnica y derivar de ella una indicación sobre el modo de utilización del espectro;

– identificar las estaciones cuyas emisiones no se ajustan al Reglamento de Radiocomunicaciones (número **16.8** del Reglamento);

– cuando lo solicite una conferencia de radiocomunicaciones, reunir información sobre la utilización de las bandas atribuidas exclusivamente a servicios específicos (por ejemplo, de radiodifusión, marítimo, aeronáutico) para ser examinada, en el futuro, por conferencias de radiocomunicaciones apropiadas;

– proporcionar a las administraciones que carecen de instalaciones de comprobación técnica información destinada a la gestión de frecuencias.

Varias administraciones presentan normalmente informes a la Oficina de Radiocomunicaciones a efectos de la preparación de resúmenes de la comprobación técnica regular. La Oficina valida la información recibida y prepara una base de datos compilada en la forma de ficheros trimestrales, que se actualizan continuamente y se publican en el sitio web de la UIT (http://www.itu.int/ITU-R/go/terrestrial-monitoring/en).

1.4.4.2 Programas especiales

La Oficina organiza de vez en cuando programas de comprobación técnica especiales que abarcan ciertas bandas de frecuencias e intervalos de tiempo. Se realizan éstos durante periodos de dos a tres semanas, cada uno de ellos próximo a un equinoccio y a dos solsticios por lo menos.

Cada uno de estos programas se anuncia en una carta circular enviada a todas las administraciones, invitándolas a hacer todos los preparativos necesarios con bastante anticipación para participar eficazmente en la campaña. La carta circular contiene también una lista de los diferentes parámetros cuya recopilación se solicita a las estaciones de comprobación técnica e indica el formato en el que deben comunicarse los datos a la Oficina.

1.4.5 Cobertura mundial de la comprobación técnica

Una de las condiciones principales para lograr el buen funcionamiento del sistema internacional de comprobación técnica de las emisiones es conseguir una cobertura uniforme de todas las partes del mundo mediante estaciones de comprobación equipadas adecuadamente y que tomen parte activa en estos programas de comprobación técnica de la UIT. En el momento presente esta cobertura es muy desigual, especialmente en algunas regiones del mundo de las que a menudo es esencial recoger información relativa a la comprobación técnica

La Resolución 23 del UIT-R se refiere a la necesidad de la ampliación del sistema internacional de comprobación técnica de las emisiones a una escala mundial, y en particular ha decidido que:

– debe instarse a todas las administraciones que ahora participan en el sistema de comprobación técnica internacional a que continúen haciéndolo en la mayor medida posible y a que suministren datos a la Oficina para la preparación de resúmenes de comprobación técnica en aplicación del artículo **16** del Reglamento de Radiocomunicaciones;

– debe instarse a las administraciones que actualmente no participan en el sistema de comprobación técnica internacional a que pongan a la disposición de este sistema instalaciones de comprobación técnica, de conformidad con el citado artículo **16,** utilizando la información pertinente contenida en este Manual;

– debe fomentarse y mejorarse la cooperación entre las estaciones de comprobación técnica de las diferentes administraciones con miras a intercambiar informaciones sobre la comprobación técnica en relación con las emisiones de estaciones terrenales y espaciales, y a resolver las interferencias perjudiciales producidas por estaciones transmisoras difíciles de identificar o que no puedan ser identificadas;

– debe instarse a las administraciones situadas en regiones del mundo donde las instalaciones de comprobación técnica son inadecuadas, a que promuevan el establecimiento de estaciones de comprobación técnica para su propia utilización y las pongan a disposición de la comprobación técnica internacional de acuerdo con el artículo **16** del Reglamento de Radiocomunicaciones;

– la Oficina puede utilizar los datos suministrados por las estaciones de comprobación técnica que participen en el sistema de comprobación técnica internacional para elaborar resúmenes de datos útiles de comprobación técnica en aplicación del Artículo 16 del RR;

– debe instarse a las administraciones con sistemas de comprobación técnica terrenal y espacial más avanzados a que acepten funcionarios de otras administraciones para capacitarlos en las técnicas de comprobación técnica, radiogoniometría y localización. El contacto inicial para la capacitación puede tener lugar en la Oficina centralizadora apropiada, como figura en la Lista VIII.

1.5 Colaboración entre las estaciones de comprobación técnica de diferentes países

Como se mencionaba anteriormente, uno de los objetivos señalados en la Resolución **UIT-R 23** de la Asamblea de Radiocomunicaciones es la cooperación entre las estaciones de comprobación técnica de diferentes administraciones. Esta cooperación es especialmente útil en zonas en que las estaciones de comprobación técnica de países distintos estén relativamente próximas entre sí. Pueden contemplarse diferentes formas de cooperación. A continuación se describen dos ejemplos en los puntos 1.5.1 y 1.5.2.

1.5.1 Colaboración por debajo de 30 MHz

Con el fin de evitar la superposición de actividades de las estaciones de comprobación técnica que cubren la misma zona, puede organizarse una estrecha cooperación entre tales estaciones de manera que puedan participar por turnos en un programa de comprobación técnica específico. A tal efecto, la parte del espectro que ha de comprobarse puede dividirse en subbandas que explorará cada estación de comprobación técnica participante en el programa cuando le llegue el turno de acuerdo con un horario predeterminado, por ejemplo, una vez por semana. Han de definirse ciertas reglas de operación comunes de tal manera que se utilice un método uniforme para realizar todas las operaciones, incluida la evaluación de la calidad de recepción. Es aconsejable que todas estas operaciones estén coordinadas por una de las estaciones de comprobación técnica participantes.

Estos acuerdos pueden materializarse, bien sea para fines particulares, por ejemplo durante los programas especiales de comprobación técnica organizados por la Oficina, o bien pueden ser de una naturaleza más permanente.

Otro campo de actividad en el que puede ser esencial la estrecha coordinación entre las estaciones de comprobación técnica es la determinación del emplazamiento de un transmisor y su identificación, particularmente cuando existe interferencia perjudicial. En ese caso, los factores más importantes son la rapidez y la exactitud de la intervención. Es pues esencial que se establezcan, a priori, acuerdos administrativos y de explotación entre las administraciones de los países en los que están situadas las estaciones de comprobación técnica. Tan pronto como surja la necesidad, estas estaciones pueden establecer contacto directo entre ellas con el fin de realizar mediciones simultáneas de la misma emisión, incluyendo en caso necesario la toma de marcaciones del transmisor interesado.

De nuevo aquí, una de las estaciones de comprobación técnica tiene que desempeñar un papel dirigente en el ejercicio pero, por supuesto, no ha de ser necesariamente la misma en todos los casos. Normalmente, la estación que solicita las investigaciones es la que asume el papel dirigente.

1.5.2 Colaboración por encima de 30 MHz

Los países vecinos se esfuerzan cada vez más en proporcionar radiocomunicaciones armonizadas para facilitar las operaciones transfronterizas mediante la adopción de especificaciones comunes. Este fenómeno es muy acusado, al menos en Europa, y debe animar a los países interesados a establecer instalaciones de comprobación técnica armonizadas e incluso integradas que utilicen procedimientos idénticos y, en ciertas circunstancias, una infraestructura común. Ello aumentaría la eficacia de los servicios de comprobación técnica y también contribuiría a reducir las inversiones financieras, que por tanto se aceptarían con más facilidad.

La colaboración entre técnicos de distintos países en la definición y el desarrollo de un sistema de explotación común tendrá también un importante efecto positivo en la innovación técnica y en la calidad de las relaciones interpersonales y las relaciones internacionales afines.

Como se menciona en el § 2.6, los países necesitan introducir estaciones de comprobación técnica en ondas métricas y decimétricas que estén cuidadosamente ubicadas, considerando el alcance limitado normal de los transmisores en dichas bandas.

Se podría aconsejar a los países limítrofes que establezcan acuerdos especiales sobre la base del artículo **16** del Reglamento de Radiocomunicaciones, con miras a optimizar los procedimientos e instalaciones de comprobación técnica que hayan de introducirse en la zona o zonas fronterizas. Estos acuerdos bilaterales o incluso multilaterales pueden clasificarse en tres categorías.

La primera categoría se ha de considerar como el paso inicial, mientras que la segunda y la tercera constituyen objetivos a más largo plazo. Los principales aspectos que han de abarcar dichas categorías son los siguientes:

Primera categoría:

- casos en los cuales las autoridades regionales a uno y otro lado de la frontera están autorizadas para entrar en contacto directo, por ejemplo, solamente cuando las frecuencias afectadas son de la responsabilidad directa del centro regional (frecuencias a especificar) sobre la base del número **16.3** del Reglamento de Radiocomunicaciones;
- en tales casos, los métodos para informar a las oficinas centralizadoras (número **16.3** del Reglamento de Radiocomunicaciones);
- intercambio de la lista de actuaciones autorizadas por las autoridades regionales, a saber:
  - realización de mediciones desde su propio territorio sobre transmisores del país vecino, a petición suya, y transmisión de los resultados a dicho país;
  - autorización de un equipo móvil del país vecino para venir y hacer las mediciones por sí mismos;
  - asistencia mutua en ambos casos.

Segunda categoría:

- establecimiento conjunto de un plan para la distribución de las estaciones de comprobación técnica en zonas fronterizas;
- definición de las interfaces que permitan a cada país efectuar mediciones de los transmisores emplazados en su propio territorio a partir de cualquier estación de la zona fronteriza;
- establecimiento de un programa para la instalación de equipos de comprobación técnica armonizados.

Tercera categoría:

- intercambio de listas de redes autorizadas en las zonas fronterizas de cada país, junto con sus características técnicas, de manera que los transmisores "extranjeros" no se consideren ya desconocidos;
- intercambio de dichas listas utilizando procedimientos automáticos de transmisión de datos a distancia.

Existen acuerdos de este tipo en numerosas partes del mundo, especialmente en las zonas congestionadas. El acuerdo de larga duración entre el Canadá, México y los Estados Unidos de América constituye un ejemplo típico de esta cooperación.

La necesidad de este tipo de colaboración es también acuciante en la zona europea en la que, por ejemplo, Francia, Alemania y Suiza han concluido un acuerdo de la primera categoría en 1993. En el Anexo 1 a este capítulo se incluye una descripción detallada de dicho acuerdo.

En el desarrollo de su sistema nacional de comprobación técnica del espectro, la intención de Francia es, en particular, ofrecer un acceso fácil y automático al espectro, tanto para usuarios nacionales autorizados como para usuarios de los países signatarios del acuerdo.

Anexo 1

Acuerdo de cooperación directa entre estaciones de comprobación técnica radioeléctrica

Acuerdo entre las administraciones de Francia, Alemania y Suiza, sobre la cooperación directa entre estaciones de comprobación técnica radioeléctrica

Acuerdo

Entre las administraciones signatarias sobre la cooperación directa entre estaciones de comprobación técnica radioeléctrica

Las administraciones signatarias, dentro del ámbito de sus responsabilidades definidas en los artículos[(1)] **20, 22** y **24** del Reglamento de Radiocomunicaciones en cuanto a la solución de problemas de interferencia perjudicial o emisiones no autorizadas, han determinado lo siguiente:

1. Si se estima necesaria la asistencia de otro país, la oficina centralizadora del país afectado deberá dirigirse a la oficina centralizadora del país ajeno de acuerdo con el Reglamento de Radiocomunicaciones (número **1875** del Reglamento de Radiocomunicaciones).

2. Los organismos responsables de la comprobación técnica radioeléctrica designarán estaciones de comprobación técnica radioeléctrica que, cuando se estime oportuno, puedan establecer contacto directo entre ellas (números **1946** y **1956** del Reglamento de Radiocomunicaciones)**.**

3. Las administraciones dan su consentimiento al equipo de comprobación técnica móvil de las estaciones de comprobación técnica mencionadas en el **2.** Anterior para cruzar las fronteras comunes de sus países en cumplimiento de las tareas de comprobación técnica radioeléctrica**.**

En cada uno de los casos se ha de obtener el consentimiento del país ajeno. Las estaciones podrán utilizar su propio equipo de comprobación técnica. La utilización de medios de comunicación no está cubierta por el presente acuerdo**.**

4. No pueden realizarse actos oficiales directamente dirigidos a los ciudadanos situados dentro del territorio del país ajeno**.**

5. Las estaciones de comprobación técnica radioeléctrica se prestarán mutuo apoyo en la aplicación del presente acuerdo**.**

6. Los organismos responsables de la comprobación técnica radioeléctrica estipularán dentro de un protocolo los términos que conciernen a la aplicación de este acuerdo**.**

NOTA 1 – Reemplazados por los Artículos **16**, **15** y **18**, respectivamente.

París, 16 de septiembre, 1993	Berna, 15 de octubre, 1993	Bonn, 9 de noviembre, 1993
Por el Ministro responsable de las telecomunicaciones en Francia:	Por la Dirección General de los Operadores de PTT suizos,	Por el Ministro Federal de Correos y Telecomunicaciones:
El Director de la Reglamentación General:	El Director de la Dirección General de Radio y Televisión:	

PROTOCOLO

Relativo al acuerdo de 1993 entre las administraciones de Alemania, Suiza y Francia sobre la cooperación directa entre las estaciones de comprobación técnica radioeléctrica.

1. Participantes en la cooperación

- por Alemania: las estaciones de comprobación técnica radioeléctrica de Constance y Darmstadt;
- por Francia: los servicios regionales de las radiocomunicaciones de Lyon-St André de Corcy y Nancy, y el centro internacional de comprobación técnica radioeléctrica de Rambouillet;
- por Suiza: las estaciones de comprobación técnica radioeléctrica de Basilea, Berna, Châtonnaye, Ginebra, St. Gallen y Zurich.

2. Forma de la cooperación

La cooperación directa ofrece las posibilidades siguientes a los países participantes en el acuerdo:

- efectuar mediciones con equipo de comprobación técnica fijo y móvil a petición de un país vecino en su propio territorio;
- efectuar mediciones con su propio equipo de comprobación técnica móvil fuera de su territorio;
- intercambiar resultados de las mediciones.

3. Procedimiento de la cooperación

La petición de mediciones será transmitida entre las estaciones de comprobación técnica por teléfono, fax o télex. Si hubieran de efectuarse mediciones con equipo de comprobación técnica móvil en territorio extranjero, no se podrá sobrepasar una distancia de 50 kilómetros de la frontera.

4. Límites de la cooperación

La cooperación directa de las estaciones de comprobación técnica finalizará cuando la petición ya no pueda ser atendida porque el asunto caiga fuera de la competencia de la estación de comprobación técnica.

Asimismo finalizará

- cuando se prevea que las mediciones con equipo de comprobación técnica fijo requieran más de 3 horas;
- cuando se prevea que las mediciones con equipo de comprobación técnica móvil requieran más de 9 horas o más de un vehículo de comprobación técnica.

En ambos casos, las peticiones se habrán de dirigir a la oficina centralizadora.

París, 16 septiembre, 1993	Berna, 15 octubre, 1993	Mainz, 29 noviembre, 1993
Por la Dirección de la Reglamentación General, El Servicio Nacional de las Radiocomunicaciones:	Por la Dirección General de los Operadores de PTT Suizos Dirección de Radio y Televisión Departamento de Monopolio Estatal de Radiocomunicaciones:	Por el BAPT, La Oficina Centralizadora del Servicio de Comprobación Técnica Radioeléctrica:

Nota – debido a reorganización de las autoridades de telecomunicaciones, las autoridades signatarias han cambiado su denominación. No obstante, el acuerdo sigue todavía vigente.

Referencias

Textos del UIT-R:

NOTA – En todos los casos debe utilizarse la última edición del correspondiente Informe.

Manual UIT-R [2005] Gestión Nacional del Espectro.

Manual UIT-R [2005] Técnicas Informatizadas para la Gestión del Espectro (CAT).

Recomendación UIT-R SM.1049 – Método de gestión del espectro destinado a facilitar el proceso de asignación de frecuencias a estaciones de servicios terrenales en zonas fronterizas.

Informe UIT-R SM.2012 – Aspectos económicos de la gestión del espectro.

Informe UIT-R SM.2015 – Métodos para la determinación de estrategias nacionales a largo plazo para la utilización del espectro radioeléctrico.

Informe UIT-R SM.2093 – Orientaciones sobre el marco reglamentario para la gestión nacional del espectro.

Informe UIT-R SM.2130 – Inspección de estaciones radioeléctricas.

Resolución UIT-R 23-1 – Extensión al ámbito mundial del sistema internacional de comprobación técnica de las emisiones.

Resolución 9 del UIT-D (Rev. Doha, 2006) – Participación de los países, en particular de los países en desarrollo, en la gestión del espectro de frecuencias.

CAPÍTULO 2

Organización, estructuras físicas y personal

		Página
2.1	Tareas y estructura del servicio de comprobación técnica	31
2.1.1	Tareas del servicio de comprobación técnica	31
2.1.1.1	Tareas derivadas del Reglamento de Radiocomunicaciones	31
2.1.1.2	Tareas a nivel nacional	31
2.1.1.3	Tareas habitualmente asignadas al servicio de inspección radioeléctrica	32
2.1.1.4	Cooperación entre los servicios de comprobación técnica del espectro y de inspección	32
2.1.1.5	Cooperación con otros organismos	33
2.1.2	Tareas de medición y equipo indispensable	33
2.1.3	Estructura de un sistema de comprobación técnica	34
2.1.3.1	Oficina centralizadora y cooperación internacional	34
2.1.3.2	Estructura organizativa	35
2.1.3.3	Configuración geográfica de las estaciones de comprobación técnica	35
2.1.3.3.1	Ondas decamétricas	36
2.1.3.3.2	Ondas métricas/decimétricas	36
2.1.3.3.3	Señales de satélite	36
2.2	Explotación	36
2.2.1	Instrucciones de trabajo y formularios	36
2.2.2	Programas de trabajo	37
2.2.3	Procedimiento típico para tratar las reclamaciones sobre interferencia	38
2.2.3.1	Informe sobre la interferencia	38
2.2.3.2	Diagnosis preliminar	38
2.2.3.3	Localización de la fuente por medios móviles	38
2.2.3.4	Mediciones de las emisiones y posibles fuentes	38
2.2.3.5	Evaluación de la medición y acciones necesarias	39
2.2.3.6	Interferencia que afecta a estaciones extranjeras o militares	39
2.2.3.7	Revisión final	39
2.2.4	Identificación y desconexión de las estaciones radioeléctricas ilegales	39
2.2.5	Documentación de los casos	40
2.3	Sistema de información de gestión	41
2.3.1	Base de datos	41

Página

2.3.2 Sistema de informes y análisis estadísticos 42
2.3.3 Plan de trabajo 43
2.3.4 Planificación de recursos 43
2.4 Tipos de estaciones de comprobación técnica 43
2.4.1 Estaciones de comprobación técnica fijas 43
2.4.2 Estaciones de comprobación técnica móviles 45
2.4.2.1 Sistemas de navegación y posicionamiento 45
2.4.2.2 Vehículos 45
2.4.2.2.1 Consideraciones generales 45
2.4.2.2.2 Antenas para estaciones móviles de comprobación técnica 46
2.4.2.2.3 Requisitos que ha de cumplir el vehículo 48
2.4.2.2.4 Alimentación 50
2.4.2.2.5 Ejemplos de concepto de vehículo 53
2.4.2.3 Estaciones de comprobación técnica a bordo de aeronaves 56
2.4.2.3.1 Explotación de las estaciones de comprobación técnica a bordo de aeronaves 56
2.4.2.3.2 Ejemplos de aplicaciones 57
2.4.2.3.3 Requisitos de funcionamiento de la aeronave 57
2.4.2.3.4 Requisitos técnicos de la aeronave 57
2.4.2.3.5 Antenas 58
2.4.2.3.6 Requisitos generales de los sistemas de a bordo 58
2.4.2.3.7 Criterios para configurar la estación de comprobación técnica de la aeronave 59
2.4.2.4 Estaciones marítimas de comprobación técnica 59
2.4.3 Estaciones de comprobación técnica transportables 60
2.4.4 Equipo de apoyo adicional 60
2.5 Control remoto del equipo de comprobación técnica 61
2.5.1 Modos de operación a distancia e intercambio de información 61
2.5.2 Arquitectura de red y líneas de comunicación 61
2.5.2.1 Interconexión de equipos en ámbito local 62
2.5.2.2 Red de telecomunicación de larga distancia 63
2.5.2.2.1 Red de telecomunicación fija 63
2.5.2.2.2 Redes radioeléctricas de telecomunicaciones 64
2.5.2.2.3 Redes de satélite 64
2.5.3 Flujo de datos y posibles implementaciones 65
2.5.4 Nota sobre protocolo y soporte lógico 66
2.5.5 Seguridad del sistema y método de acceso 67

Página

2.6 Emplazamientos, edificios y equipos 67
2.6.1 Emplazamiento de las estaciones de comprobación técnica 67
2.6.1.1 Generalidades 67
2.6.1.2 Condiciones mínimas deseables para el emplazamiento de una estación 68
2.6.1.3 Condiciones adicionales deseables para el emplazamiento de estaciones equipadas con radiogoniómetros 69
2.6.1.4 Protección contra los campos intensos procedentes de transmisores 71
2.6.1.5 Protección frente a sistemas informáticos locales 71
2.6.1.6 Necesidades de terreno 72
2.6.1.7 Red viaria 73
2.6.1.8 Vallado 73
2.6.2 Edificios e instalaciones auxiliares 73
2.6.2.1 Edificios 73
2.6.2.1.1 Edificio de la estación de comprobación técnica para emplazamientos de comprobación técnica atendidos 73
2.6.2.1.2 Distribución del espacio 74
2.6.2.1.3 Acondicionamiento acústico 77
2.6.2.1.4 Habitaciones apantallados 77
2.6.2.1.5 Canalizaciones para cables 77
2.6.2.1.6 Edificio o sala para la planta de alimentación de reserva 77
2.6.2.1.7 Sala de herramientas y garaje para vehículos automóviles 77
2.6.2.2 Recintos protegidos para la explotación a distancia de estaciones de comprobación técnica no atendidas 78
2.6.2.3 Suministros industriales, fuentes de alimentación y otras instalaciones 78
2.6.2.3.1 Energía eléctrica 78
2.6.2.3.2 Sistema de suministro ininterrumpido de energía 79
2.6.2.3.3 Alumbrado de emergencia 79
2.6.2.3.4 Circuitos de telefonía y de datos 79
2.6.2.3.5 Calefacción y climatización 79
2.6.2.3.6 Sistemas de alarma y extinción de incendios 79
2.6.2.4 Protección contra el rayo 80
2.6.2.4.1 Efectos del rayo 80
2.6.2.4.2 Protección contra la descarga directa del rayo 80
2.6.2.4.3 Protección contra las descargas inducidas 81
2.6.2.4.4 Proceso de protección 82
2.6.2.4.5 Puesta a tierra y apantallamiento 82
2.6.2.4.6 Protecciones de la antena 83

Página

2.6.2.4.7 Mantenimiento del sistema de protección contra el rayo 83

2.6.3 Fuentes de interferencia que afectan a la explotación de las estaciones de comprobación técnica 83

2.6.3.1 Principios generales 83

2.6.3.2 Fuentes de interferencia 84

2.6.3.3 Medidas correctoras 84

2.6.4 Examen del emplazamiento 85

2.7 Mantenimiento, calibración y reparación 90

2.7.1 Generalidades 91

2.7.2 Pruebas funcionales 91

2.7.2.1 Pruebas funcionales básicas 91

2.7.2.2 Capacidad de pruebas integradas 92

2.7.3 Pruebas funcionales intensificadas 92

2.7.4 Mantenimiento programado 92

2.7.5 Calibración 92

2.7.6 Reparaciones 94

2.7.7 Repuestos 94

2.7.8 Mantenimiento del software 94

2.8 Personal 95

2.8.1 Generalidades 95

2.8.2 Categorías de personal 95

2.8.2.1 Gestión 95

2.8.2.2 Personal de explotación 95

2.8.2.3 Servicio técnico / mantenimiento 96

2.8.2.4 Personal administrativo 96

2.8.3 Capacitación 96

2.8.3.1 Introducción 96

2.8.3.2.1 Identificación de necesidades y planificación de cursos 96

2.8.3.2.2 Revisión y evaluación 97

2.8.3.2.3 Medidas correctoras 97

2.8.3.3 Métodos de capacitación y su puesta en práctica 97

2.8.3.4 Aptitudes del personal de comprobación del espectro 98

2.8.3.5 Medios de capacitación de ámbito mundial para la comprobación técnica del espectro 98

2.8.3.5.1 Madios de capacitación en los Estados Unidos de América 98

2.8.3.5.2 Programa internacional de capacitación para la comprobación técnica del espectro en Japón 99

2.8.3.5.3 Programa internacional de capacitación sobre la comprobación técnica del espectro en Corea 99

2.1 Tareas y estructura del servicio de comprobación técnica

2.1.1 Tareas del servicio de comprobación técnica

2.1.1.1 Tareas derivadas del Reglamento de Radiocomunicaciones

Las siguientes tareas del servicio de comprobación técnica se derivan del Reglamento de Radiocomunicaciones:

– comprobación técnica de las emisiones en cuanto al cumplimiento de las condiciones de asignación de frecuencia;

– observaciones de las bandas de frecuencias y mediciones de la ocupación de los canales de frecuencia;

– investigación de casos de interferencia;

– identificación y suspensión de las emisiones no autorizadas.

La comprobación técnica regular de las emisiones nacionales en cuanto al cumplimiento de las condiciones y la subsiguiente eliminación de cualquier infracción va dirigida a evitar las interferencias radioeléctricas. Es necesario comprobar parámetros técnicos como la frecuencia, anchura de banda, desviación de frecuencia y clase de emisión y, en ciertos servicios de radiocomunicaciones, el contenido de las comunicaciones. Por ejemplo, la comprobación de las comunicaciones de radioaficionados debe en particular dirigirse a garantizar que se utilizan regularmente los distintivos de llamada y que no se efectúa difusión alguna.

Las observaciones de bandas de frecuencias pretenden determinar qué canales o frecuencias se utilizan y quién y de qué manera los utiliza. Por el contrario, las mediciones de ocupación de canales se orientan a determinar en qué grado y durante cuanto tiempo se utilizan las frecuencias, y por tanto también cuáles son las frecuencias no utilizadas, e implican la identificación de las emisiones junto con sus características básicas. Es esencial conocer la utilización real del espectro para que la gestión del espectro cumpla sus objetivos de garantizar que las frecuencias se utilizan eficazmente y sin interferencias, así como para decidir si una determinada frecuencia puede asignarse o no a usuarios adicionales. Estos datos forman también la base de la coordinación de frecuencias nacional e internacional.

A la vista de la intervención cada vez mayor de las aplicaciones radioeléctricas en cada aspecto de la vida, la tarea de investigar y suprimir con prontitud y eficacia las interferencias cobra importancia económica. Se ha de conceder especial prioridad a la supresión de interferencias a los servicios de seguridad, como son los de aeronáutica, policía e incendios.

La suspensión de las emisiones no autorizadas pretende sobre todo evitar la interferencia radioeléctrica pero además garantizar los ingresos, puesto que los usuarios autorizados son los únicos que pagan tasas.

2.1.1.2 Tareas a nivel nacional

Además de las tareas señaladas en el § 2.1.1.1, a menudo el servicio de comprobación técnica se encarga también de las siguientes tareas, no derivadas directamente del Reglamento de Radiocomunicaciones:

– asistencia en ocasiones especiales, como acontecimientos deportivos importantes y visitas oficiales;

– mediciones de la cobertura radioeléctrica;

– estudios sobre compatibilidad radioeléctrica y electromagnética;

– estudios técnicos y científicos.

En las visitas oficiales, las carreras de "fórmula uno" y otros acontecimientos de grandes proporciones, se utiliza un elevado número de equipos radioeléctricos dentro de un recinto limitado. A menudo los usuarios no se enteran de que necesitan una asignación de frecuencia o de que tal vez no puedan utilizar las mismas frecuencias en cada país. Con el fin de evitar la interferencia y de intervenir inmediatamente en caso de que ésta ocurra, conviene mucho la presencia local del servicio de comprobación técnica para observar la utilización del espectro y actuar con prontitud en la investigación y supresión de cualquier interferencia.

Es esencial para el éxito una oportuna coordinación con los organizadores y el personal responsable de la asignación de frecuencias, que también deben estar presentes para asignar frecuencias en breve plazo si fuera necesario.

Numerosas administraciones consideran también que las mediciones de cobertura radioeléctrica incumben al servicio de comprobación técnica. Esto lleva consigo la medición de la intensidad de campo y, en algunos casos, de parámetros de calidad tales como la proporción de bits erróneos (BER) y la potencia de canales adyacentes. Sin embargo, otras administraciones estiman que esas mediciones son competencia de los operadores de redes radioeléctricas y no del servicio de comprobación técnica, puesto que el mercado garantiza una cobertura radioeléctrica de suficiente calidad.

Antes de atribuir frecuencias a una nueva aplicación radioeléctrica, debe asegurarse la compatibilidad con los sistemas radioeléctricos existentes. Los estudios de compatibilidad puramente teóricos suelen ser inadecuados. Es muy frecuente pedir ayuda al servicio de comprobación técnica para que realice los estudios prácticos necesarios si posee el equipo de medida y la pericia requeridos. También puede solicitarse su asistencia en ciertos estudios científicos, tales como las observaciones de las condiciones de propagación a largo plazo.

2.1.1.3 Tareas habitualmente asignadas al servicio de inspección radioeléctrica

Las siguientes tareas se asignan habitualmente al servicio de inspección radioeléctrica y no al servicio de comprobación técnica:

- inspección in situ del equipo radioeléctrico;
- medición del equipo radioeléctrico para descartar riesgos de radiación electromagnética;
- tratamiento de casos de compatibilidad electromagnética (EMC) con respecto a equipos no radioeléctricos;
- actividades de vigilancia del mercado cuando se comercializa el equipo radioeléctrico u otro equipo electrónico.

En relación con la vigilancia del mercado, los equipos de radiocomunicaciones y telecomunicaciones utilizados a nivel mundial deben cumplir los requisitos regionales o nacionales a fin de garantizar que su funcionamiento sea conforme con las reglamentaciones o restricciones técnicas relevantes (banda de frecuencias, niveles de potencia, etc.).

El no cumplimiento de dichas reglamentaciones y restricciones conlleva el riesgo de que el equipo cause interferencias perjudiciales. Por tanto, entre las tareas de las administraciones puede incluirse el control de productos en este contexto de "vigilancia del mercado". Es habitual adquirir productos de forma aleatoria en el mercado al por menor y realizar las pruebas pertinentes en los laboratorios de pruebas de la administración o en un laboratorio de pruebas privado que tenga un contrato a estos efectos con la administración.

2.1.1.4 Cooperación entre los servicios de comprobación técnica del espectro y de inspección

Los servicios de comprobación técnica del espectro y de inspección deben colaborar estrechamente y, si es posible, tener acceso a una base de datos común. Por ejemplo, en su búsqueda de fuentes de interferencia perjudicial es de gran ayuda para el servicio de comprobación técnica disponer de información detallada de aquellos equipos de telecomunicación que los servicios de inspección hayan determinado que no sean conformes con la normativa vigente. A la inversa, el servicio de comprobación técnica puede provocar la realización de inspecciones al registrar los mismos parámetros que se registrarían durante una inspección. Los resultados de la comprobación técnica así obtenidos pueden utilizarse para seleccionar candidatos a una inspección *in situ*, sobre el terreno. Todo ello permite a su vez reducir el número de inspecciones *in situ* necesarias.

La comprobación técnica puede, además, apoyar al servicio de inspección al poder determinar si una estación radioeléctrica que estaba averiada ha sido reparada sin necesidad de que el servicio de inspección tenga que realizar una nueva inspección *in situ*.

El servicio de comprobación técnica debe hacer frente a los elevados costes en equipos de medida en comparación con el servicio de inspección. Por tanto, muchas administraciones disponen de un menor

número de emplazamientos para el servicio de comprobación técnica que para el servicio de inspección. Dado que el servicio de inspección está, en general, más próximo a los clientes, éste puede realizar la investigación final de casos de interferencia que hayan sido inicialmente detectados utilizando radiogoniómetros fijos.

No es necesaria una división estricta entre ambos servicios. Por motivos financieros puede estar justificado que en países pequeños los servicios no estén separados. De hecho, la integración o fusión de la comprobación técnica y la inspección en una sola organización puede simplificar la organización en su conjunto.

2.1.1.5 Cooperación con otros organismos

En la mayoría de los países los servicios de comprobación técnica no poseen fuerza policial alguna. Es por tanto esencial la cooperación de la policía y los juzgados para la confiscación de los transmisores ilegales y para imponer sanciones a los infractores. La experiencia anterior demuestra que es muy útil que policía y juzgados se involucren de antemano y se familiaricen con las principales disposiciones de la ley de telecomunicaciones.

Se da por sentado que no hace falta detallar aquí la necesidad de una estrecha cooperación entre la gestión de frecuencias y el servicio de comprobación técnica.

2.1.2 Tareas de medición y equipo indispensable

A fin de poder realizar las tareas mencionadas en el § 2.1.1, las estaciones de comprobación técnica han de ser capaces de identificar y localizar las emisiones y de medir sus características esenciales. Las tareas de medición más importantes que ha de poder realizar una estación de comprobación técnica son, como mínimo, las siguientes:

- mediciones de frecuencia;
- mediciones de intensidad de campo y densidad de flujo de potencia en puntos fijos;
- mediciones de anchura de banda;
- mediciones de modulación;
- mediciones de ocupación del espectro;
- radiogoniometría.

En consecuencia, el equipo de medición de una estación de comprobación técnica ha de desempeñar, por lo menos, las funciones de los equipos siguientes:

- antenas omnidireccionales;
- antenas directivas;
- receptores;
- radiogoniómetros;
- equipo de medición de frecuencia;
- medidores de intensidad de campo;
- equipo de medición de la anchura de banda;
- equipo de medición de ocupación de canal;
- equipo de registro del espectro de frecuencias;
- analizadores de espectro;
- analizadores de señal vectoriales o analizadores de modulación;
- decodificadores;
- generadores de señal;
- equipo de grabación.

Debe señalarse que el equipo de medición moderno a menudo puede desempeñar más de una función, lo que da lugar a un menor número de armarios. Muchas funciones pueden también realizarse mediante el soporte lógico.

En general, el equipo de medición deberá abarcar la gama de frecuencias de 9 kHz a 3 GHz. Si se proyecta tener estaciones de comprobación técnica separadas para ondas decamétricas y para ondas métricas/decimétricas, la gama de frecuencias puede dividirse, por ejemplo, en 9 kHz - 30 MHz para las estaciones de comprobación en decamétricas y 20 MHz - 3 GHz para las de comprobación en métricas/decimétricas.

Pueden necesitarse además otros equipos de medición, incluso equipos para frecuencias más elevadas, dependiendo de que el servicio de comprobación técnica haya de realizar tareas adicionales y más específicas como las siguientes:

- mediciones de intensidad de campo a lo largo de una ruta;
- comprobación técnica de las tecnologías de banda ancha que funcionan en bandas por encima de 3 GHz, tales como los sistemas Wi-Fi, WiMAX y WLAN/RLAN;
- mediciones de televisión sobre señales de vídeo (luminancia y crominancia);
- medición de los parámetros específicos de las redes digitales (por ejemplo, la BER y la respuesta a impulsos del canal);
- comprobación técnica de las emisiones sobre enlaces fijos;
- medición de las señales de satélite.

En los capítulos 3 al 5 se incluye información detallada sobre métodos y equipo para las mediciones.

2.1.3 Estructura de un sistema de comprobación técnica

2.1.3.1 Oficina centralizadora y cooperación internacional

Según los artículos 15 y 16 del Reglamento de Radiocomunicaciones, cada administración o servicio de comprobación técnica común establecido por dos o más países u organizaciones internacionales que participen en el sistema de comprobación técnica internacional, debe designar una "oficina centralizadora" a la que deben dirigirse todas las peticiones de información sobre comprobación técnica, y a través de la cual la información relativa a la comprobación técnica se enviará a la Oficina de Radiocomunicaciones o a las oficinas centralizadoras de otras administraciones. Es esencial que los estados miembros actúen con su mejor voluntad y máxima asistencia mutua para resolver los problemas de interferencia perjudicial.

El personal de una oficina centralizadora necesita por tanto cumplir cierto número de requisitos fundamentales. Debe estar autorizado para cursar instrucciones directas a las estaciones de comprobación técnica, ha de estar disponible a cualquier hora y debe estar familiarizado con los procedimientos de trabajo y equipos técnicos esenciales de dichas estaciones.

Satisfechos estos requisitos, es irrelevante que la oficina centralizadora pertenezca a un ministerio u organización de otro tipo, o que forme parte de una estación de comprobación técnica.

Cuando esto sea practicable, y con sujeción a un acuerdo entre las administraciones interesadas, los casos de interferencia perjudicial pueden ser tratados directamente por las estaciones de comprobación técnica designadas al efecto por dichas administraciones. Numerosas administraciones europeas respaldan la cooperación directa entre las estaciones de comprobación técnica.

En el Anexo 1 al Capítulo 1 figura un ejemplo de acuerdo por el cual las estaciones de comprobación técnica pueden solicitar a estaciones de comprobación extranjeras que realicen mediciones, no limitadas a casos de interferencia, y además utilizar sus vehículos en el país ajeno.

Tanto la cooperación como el apoyo se basan en el principio de reciprocidad, y por lo tanto se dan gratuitamente.

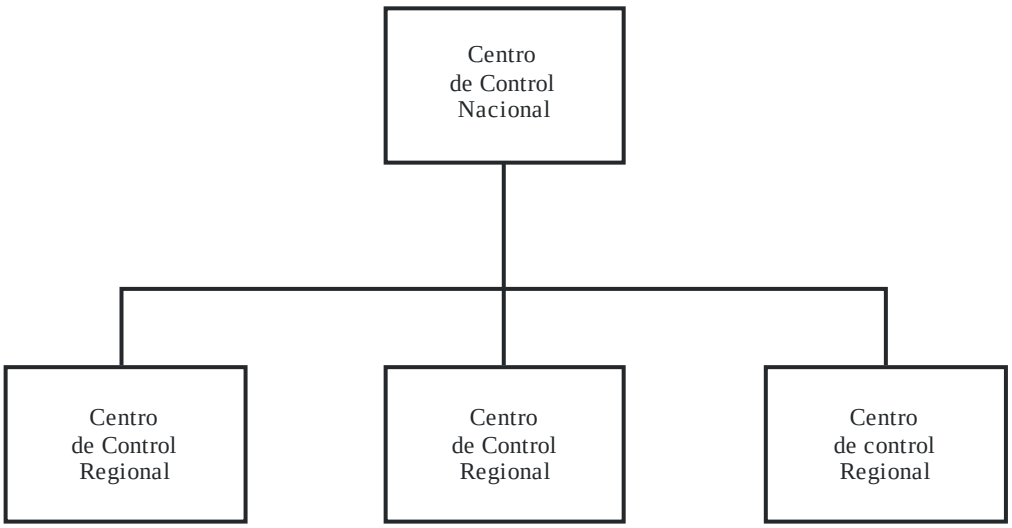
No obstante, las administraciones individuales también tienen instalaciones especiales extremadamente costosas, como son las estaciones de comprobación técnica de satélites. Es posible alcanzar un acuerdo contractual que permita a otras administraciones el uso de tales medios mediante el pago de su costo.

2.1.3.2 Estructura organizativa

Un sistema de comprobación técnica puede estructurarse de diversas maneras, aunque la gama de posibilidades realmente factibles en cada caso viene limitada por el número de estaciones de comprobación técnica y el modelo organizativo de la administración (véase la Fig. 2.1-1).

FIGURA 2.1-1

Estructura organizativa



Esta sección solamente atañe a las estaciones de comprobación técnica atendidas, que además se suponen con acceso a instalaciones móviles y controladas a distancia. Las estaciones de comprobación subordinadas también pueden ser controladas a distancia.

Los gestores del servicio de comprobación técnica al nivel más alto (denominado en ocasiones Centro de Control Nacional) definen las tareas de las estaciones de comprobación y proporciona recursos. En algunos países, los Centros de Control Nacional son responsables de una determinada región. Sus recursos pueden incluir estaciones de comprobación técnica atendidas, controladas a distancia y móviles. Es recomendable que el Centro de Control Nacional esté coubicado con una estación de comprobación técnica atendida. Con frecuencia, sólo existe una estación de comprobación técnica en ondas decamétricas que, por tanto, es la responsable de todo el territorio. Igualmente, algunas tareas especiales pueden asignarse a nivel nacional a un único Centro de Control Nacional.

La oficina centralizadora podrá estar asignada al Centro de Control Nacional o a uno de los Centros de Control Regionales. El servicio de inspección puede ser una organización separada, si bien se ha demostrado la conveniencia de integrar los servicios de comprobación técnica y de inspección cuando coinciden en su emplazamiento. Por añadidura, en ciertas administraciones la oficina centralizadora o incluso el servicio entero de comprobación técnica pueden formar parte del departamento de gestión de frecuencias.

2.1.3.3 Configuración geográfica de las estaciones de comprobación técnica

El número de estaciones de comprobación técnica en un país depende de las tareas a realizar, de la geografía y, desde luego, de los recursos financieros. Sería ideal que cada punto del país estuviera cubierto por dos radiogoniómetros al menos, permitiendo así localizar cualquier emisión. El costo inasequible del número de estaciones radiogoniométricas requerido hace inviable esta solución, y por tanto es obligado hacer concesiones. En las secciones siguientes se proporcionan argumentos adicionales teniendo en cuenta las

distintas bandas de frecuencias. La planificación y optimización de las redes de comprobación técnica del espectro mediante herramientas software se describe en la sección 6.8.

2.1.3.3.1 Ondas decamétricas

En caso de haber más de una estación de comprobación técnica en ondas decamétricas, cada estación podrá a veces proporcionar una cobertura mundial, dependiendo de la banda de frecuencias y de las condiciones de propagación.

2.1.3.3.2 Ondas métricas/decimétricas

Dado el limitado alcance de las ondas métricas/decimétricas, normalmente no superior a unas decenas de kilómetros, las estaciones de comprobación técnica deberán situarse cerca de donde sea mayor la concentración del trabajo. Para permitir la localización de transmisores las estaciones de comprobación técnica atendidas deberán además incorporar radiogoniómetros de control remoto.

Cada estación de comprobación atendida que disponga de equipo fijo y móvil deberá cubrir una zona de actuación de 150 a 200 kilómetros de radio aproximado, para que aquellos grupos que hayan de intervenir en los límites de la zona puedan desplazarse dentro del día. Este radio tendrá que adaptarse según los medios de transporte disponibles, el relieve geográfico, el estado de la red viaria y el intenso tráfico característico de ciertas regiones y de las zonas urbanas.

Toda zona que no esté cubierta por radiogoniómetros fijos deberá ser cubierta por vehículos de radiogoniometría. Los grupos móviles deberán tener los medios apropiados para realizar la búsqueda de interferencia y las mediciones de compatibilidad y coordinación en las zonas limítrofes.

2.1.3.3.3 Señales de satélite

Desde el punto de vista técnico, una estación de comprobación técnica de satélite podrá proporcionar una extensa cobertura tanto de satélites geoestacionarios como no geoestacionarios dependiendo de la estampa del haz del satélite, cubriendo así a veces el territorio de varios países fronterizos, y por lo tanto se recomienda que las administraciones nacionales cooperen.

2.2 Explotación

Esta sección trata de los procesos de la estación de comprobación técnica relativos a servicios terrenales, que abarcan las tareas señaladas en la sección 2.1 e incluyen equipos de medición fijos, controlados a distancia y móviles. Debido al elevado costo de un sistema de comprobación técnica radioeléctrica y teniendo en cuenta que los servicios de comprobación técnica del espectro se financian generalmente mediante impuestos o mediante tasas pagadas por los licenciatarios, es necesario organizar su trabajo de forma eficiente y verificable. Por tanto, la gestión del servicio debe documentar sus políticas, sistemas, programas, procedimientos e instrucciones en el grado necesario para asegurar permanentemente la calidad del sistema de comprobación técnica en su totalidad. Todo ello debe ser comunicado y entregado al personal apropiado, quienes deberán asimismo comprenderlo.

2.2.1 Instrucciones de trabajo y formularios

Para las tareas rutinarias es aconsejable establecer instrucciones de trabajo que describan flujos de trabajo, derechos y obligaciones relativas a los procedimientos normales. Dichas instrucciones de trabajo servirán como material de referencia tanto para el personal nuevo como para el experimentado. Al redactar tales instrucciones deberá adoptarse un enfoque pragmático para garantizar unas directrices inequívocas y fácilmente comprensibles, que motiven al personal al concederles en cierta medida la facultad de tomar decisiones individuales. Obviamente, el nivel de detalle dependerá de la cualificación del personal y de los requisitos reglamentarios en los distintos países. Deberán compilarse instrucciones separadas para casos concretos y tareas no rutinarias que no se hayan descrito en las instrucciones de trabajo.

Los formularios son útiles como ayuda cuando se tratan asuntos de naturaleza más o menos regular, en los que garantizan uniformidad y claridad. Por consiguiente habrán de tener una estructura lógica y dejar espacio suficiente para anotaciones escritas a mano. Por ejemplo, el formulario utilizado para el registro de reclamaciones sobre interferencia recibidas por teléfono debe permitir que el personal pregunte todos los

detalles necesarios. También aquí, pueden suceder casos excepcionales que no estén contemplados en el formulario. Es pues importante que haya suficiente espacio para registrar información suplementaria.

Las instrucciones de trabajo deberán asimismo hacer referencia a las reglamentaciones aplicables en materia de seguridad, o bien una cita de las mismas. Cuidarse de la salud y la seguridad del personal es una tarea de gestión importante.

2.2.2 Programas de trabajo

Las tareas pueden dividirse en dos grupos: mediciones fijas y mediciones móviles. En los programas de trabajo es necesario distinguir entre:

– tareas programadas que no pueden aplazarse.
– tareas programadas que pueden aplazarse.
– tareas imprevistas que pueden aplazarse.
– tareas imprevistas que requieren acción inmediata.

La primera categoría abarca tareas como las mediciones de intensidad de campo, que necesita la administración de frecuencias en una cierta fecha a efectos de la coordinación internacional. Las mediciones rutinarias, como son las de tipo general que verifican la observancia de las condiciones de asignación, no tienen normalmente una fecha límite y por tanto pueden ser aplazadas. La tercera categoría incluye los informes de interferencia que no son de carácter crítico, como los de interferencia en la banda ciudadana (CB) o el servicio de radioaficionados. Sin embargo, cuando los servicios afectados atañen a la seguridad, como el COSPAS/SARSAT o la radio policial, se requiere una actuación inmediata.

Seguidamente hay que evaluar y coordinar los recursos humanos y técnicos necesarios para abordar estas tareas. El programa de trabajo debe pues compilarse y publicarse lo antes posible para que el personal esté preparado adecuadamente. En el caso de informes urgentes sobre interferencia habrá que modificar rápidamente el programa de trabajo, como también ante una enfermedad o avería del equipo.

Al compilar el plan, debe prestarse atención a lo siguiente:

– si es necesario cubrir zonas extensas, puede convenir a los grupos de mediciones móviles permanecer en la zona y alojarse en un hotel en vez de regresar todas las noches, con lo que se ahorra tiempo de viaje costoso e improductivo.
– hay que garantizar una disponibilidad permanente del servicio de comprobación técnica, puesto que la interferencia también puede aparecer por la noche. En algunos países las estaciones de comprobación técnica están atendidas por personal 24 horas al día, mientras que en otros la disponibilidad se asegura mediante la atención permanente de personal en una sola estación o bien por el desvío automático de la llamada al domicilio de un técnico de guardia. Sin embargo, la disponibilidad no sólo implica poder ser llamado por teléfono: tener el servicio de comprobación técnica a cargo de una sola persona que no sea capaz de emprender un trabajo de campo urgente equivale a dejar desatendida la estación.
– se necesita un mantenimiento de vehículos y equipo con carácter regular, de lo contrario pueden requerir reparaciones inesperadas que los retirarían temporalmente del servicio.
– las reuniones periódicas del personal son esenciales para informarles acerca de cambios en la organización o cambios y desarrollos en los servicios, asignaciones de frecuencias o asuntos reglamentarios. Estas reuniones también ofrecen la oportunidad de instruir al personal sobre el manejo de nuevos equipos, si no se prevé ninguna otra alternativa de capacitación, como sería, por ejemplo, la impartida por el fabricante.

Las consideraciones anteriores también son válidas en caso de que las responsabilidades asignadas al equipo de comprobación técnica incluyan la realización de inspecciones in situ: por tanto, es recomendable planificar el trabajo de comprobación técnica e inspección conjuntamente para que sea realizado durante la misma visita. El programa de trabajo debe presentarse de forma que permita a cada miembro del equipo la inmediata identificación de quién realizará cada tarea y en qué lugar, qué vehículo va a utilizarse y cómo se mantendrán las radiocomunicaciones de contacto. Puede utilizarse un sistema de computador al que tengan

acceso todo el personal, pero un sencillo tablón de anuncios o incluso una anticuada pizarra es una alternativa barata que da el mismo buen resultado.

2.2.3 Procedimiento típico para tratar las reclamaciones sobre interferencia

El tratamiento de la interferencia no sólo es una tarea importante sino además muy compleja, que justifica una detallada descripción de los procedimientos involucrados.

2.2.3.1 Informe sobre la interferencia

La interferencia se comunica normalmente por teléfono, comunicación facsímil o correo electrónico. El operador debe entonces inquirir los detalles. Los elementos esenciales de información necesarios son:

– nombre, dirección, número de teléfono y correo electrónico del sujeto afectado por la interferencia;

– datos sobre el dispositivo que sufre interferencia: tipo, frecuencia, número de asignación, localización, número de licencia y otros datos relevantes;

– datos sobre la aparición de la interferencia (cuándo se notó por primera vez, hora, frecuencia, regular o esporádica);

– descripción de la interferencia (zumbido, silbido, etcétera);

– fuente de interferencia de la que se sospecha;

– determinar si es un caso de interferencia que deba tratar el servicio de comprobación técnica o si se trata de una simple avería del equipo implicado, en cuyo caso debería llamarse al operador del equipo o a un servicio de reparaciones.

2.2.3.2 Diagnosis preliminar

La prioridad concedida al caso dependerá del servicio interferido y del número de dispositivos que sufren la interferencia. La descripción de la interferencia servirá para decidir sobre las diversas etapas y mediciones requeridas. Puede preguntarse a operadores que utilicen la misma frecuencia en zonas próximas si también ellos sufren interferencia.

Muchos operadores de distintos servicios (por ejemplo, servicios por satélite, de radiodifusión, móviles y fijos) disponen de sus propios equipos de comprobación técnica para evaluar la calidad del servicio. La Administración puede utilizar esta infraestructura y sistemas autónomos avanzados de comprobación técnica a fin de prestar ayuda a la parte interferida: el emplazamiento interferido puede resultar ser el más adecuado para determinar la interferencia; localización, altitud sobre el suelo y sobre el nivel del mar de la antena y modulación.

Por lo general, se deberá utilizar un equipo de medición fijo y controlado a distancia para averiguar si la interferencia puede también escucharse en la estación de comprobación técnica. Con equipo radiogoniométrico ha de poderse identificar de manera aproximada la localización de la fuente. Dicha localización y otras características como la modulación y la anchura de banda suelen ser suficientes, con ayuda de las bases de datos de asignación de frecuencias, para limitar a un valor relativamente bajo el número de fuentes posibles. Se telefonea después, uno tras otro, a los operadores de las fuentes de interferencia sospechosas y se les pide que desactiven su transmisor durante un corto tiempo. El procedimiento se repite hasta que un cambio en la interferencia o en el espectro identifica claramente la fuente real. Por este método se eliminan las interferencias de la manera más rápida y económica.

2.2.3.3 Localización de la fuente por medios móviles

Si no puede determinarse el origen de la interferencia de la manera descrita anteriormente, será necesario desplazar vehículos. El trabajo de localización puede consumir mucho tiempo, especialmente en el caso de interferencia esporádica e interferencia sobre operadores móviles celulares.

2.2.3.4 Mediciones de las emisiones y posibles fuentes

Una vez localizada e identificada la fuente de la emisión interferente, se han de medir las características técnicas responsables de la interferencia para determinar la naturaleza de la misma, es decir, si se trata de interferencia cocanal, interferencia de canal adyacente, intermodulación del receptor o interferencia

conducida por la toma de red eléctrica. Durante estas mediciones deberá llevarse un registro exacto del equipo utilizado y los valores medidos a fin de poder comprobar en el paso siguiente si el sistema o dispositivo interferente contraviene en su funcionamiento las condiciones de asignación de frecuencia o supera los valores de umbral. Las normas y recomendaciones contienen especificaciones detalladas de los procedimientos de medición para una extensa gama de parámetros.

2.2.3.5 Evaluación de la medición y acciones necesarias

Los resultados de la medición deben seguidamente ser comparados con las condiciones de asignación de frecuencia o las normas pertinentes. Dependiendo del resultado, tal vez haya que dejar totalmente fuera de servicio el sistema o dispositivo interferente o modificar su explotación, o bien rectificar dicho sistema o dispositivo, o incluso tenga que aceptarse la interferencia. En numerosos países el resultado indicará si ha de pagarse una multa u otro tipo de penalización.

La reglamentación nacional, que varía según el país, especificará si la responsabilidad de las actuaciones a emprender corresponde al grupo de medición o a otra entidad perteneciente a la administración. Las actuaciones requeridas no sólo deben ajustarse a la ley sino además han de ser razonables. Si el contacto defectuoso de un relé en un sistema de calefacción resulta ser la causa de una pequeña interferencia, sería inadecuado exigir el inmediato cierre del sistema en pleno invierno. En vez de ello debería especificarse un periodo razonable para la eliminación de ese defecto.

2.2.3.6 Interferencia que afecta a estaciones extranjeras o militares

Se aplican disposiciones especiales a los casos de interferencia en los que intervienen estaciones extranjeras. A este respecto se hace referencia al artículo 15, al número 16.3 y al Apéndice 10 del Reglamento de Radiocomunicaciones (Informe de interferencia perjudicial). También puede ser conveniente especificar procedimientos concretos que deban ser adoptados en caso de haber estaciones militares involucradas.

2.2.3.7 Revisión final

En muchos casos el servicio de comprobación técnica podrá verificar si se ha ejercido acción correctiva, utilizando equipo fijo o controlado a distancia. Cuando esto no sea posible, quizás sea necesaria una inspección in situ. La manera más sencilla de tratar el asunto consiste en preguntar a la parte interferida si ha cesado la interferencia.

2.2.4 Identificación y desconexión de las estaciones radioeléctricas ilegales

Los transmisores que están siendo explotados sin la asignación de frecuencia prescrita son posibles fuentes de interferencia y por consiguiente deben ser retirados del servicio. La búsqueda de tales transmisores puede ser iniciada por cualquiera de los siguientes eventos:

– observación de un transmisor en tal situación por el servicio de comprobación técnica durante sus mediciones rutinarias;
– reclamaciones sobre interferencia;
– otras indicaciones.

Los pasos iniciales a seguir son idénticos a los del tratamiento de la interferencia. En primer lugar, debe recopilarse tanta información como sea posible acerca del transmisor mediante la evaluación de los resultados de la medición. Como los operadores de las estaciones radioeléctricas pirata suelen ser conscientes de que están infringiendo la ley, se esforzarán sobremanera por no ser descubiertos. Pueden emplear las siguientes tácticas:

– datos incorrectos y engañosos sobre la localización del transmisor;
– operación remota del transmisor;
– representación errónea y desinformación;
– emisiones esporádicas, irregulares;
– uso de diferentes frecuencias;
– cambio de localización.

En comparación con los casos de interferencia "normales", estas tácticas hacen mucho más difícil la localización e identificación del transmisor. El servicio de comprobación técnica tiene que adaptarse a las circunstancias y tomar las medidas necesarias, como puede ser la evaluación exacta del contenido del mensaje. Los detalles, que a primera vista parecen no tener valor, ayudan a identificar las estaciones ilegales e iniciar los expedientes sancionadores pertinentes.

Otra diferencia es que el operador de una estación interferente suele cuidar mucho de eliminar la interferencia y por tanto estará deseoso de brindar su ayuda para resolver el problema. Por el contrario, no es nada probable que los operadores de estaciones radioeléctricas pirata se presten a colaborar dadas las consecuencias de su ilegal conducta (penalización y confiscación de su equipo). Es por lo tanto muy importante que el servicio de comprobación técnica recoja pruebas inequívocas que puedan presentarse en juicio para apoyar la reclamación de que el demandado ha efectuado transmisiones ilegítimas. La incautación del equipo durante una transmisión real obviamente constituye una prueba irrefutable. Tal acción, sin embargo, depende de una estrecha coordinación con la policía.

Las probabilidades de éxito en el combate contra la operación de estaciones radioeléctricas pirata dependen íntegramente del marco legal de cada país, que deberá proporcionar las bases para procesar a los operadores de estos transmisores y confiscar su equipo.

2.2.5 Documentación de los casos

Numerosos ingenieros y técnicos consideran que las mediciones constituyen su obligación primordial, y que la documentación asociada no es más que un trabajo de segundo orden. Es pues fundamental destacar reiteradamente el gran valor de la documentación como una parte esencial de la responsabilidad del personal. Si en cualquier momento surgen dudas sobre la fiabilidad de los valores de una medición, esas dudas sólo pueden ser disipadas presentando un juego completo de documentación que demuestre la validez de aquellos valores.

Ejemplo: el valor medido de la potencia de entrada sólo tendrá significado si también se conoce la altura de la antena, el perfil del terreno y la distancia entre el transmisor y el receptor de comprobación técnica, la anchura de banda, el tipo de detector, localización de la medición, la antena utilizada y su factor k, y los valores de ajuste de los atenuadores presentes.

La documentación sirve como referencia de mediciones previamente realizadas, ofrece información de utilidad para prevenir futuras interferencias y proporciona datos actualizados que necesita la base de datos utilizada como sistema de información de gestión (véase la sección 2.3).

De lo anterior se desprende que la documentación debe comprender los elementos siguientes:

– número de la tarea;
– contenido de la tarea;
– entidad que requiere la tarea u origen de la reclamación sobre interferencia;
– personal dedicado a la tarea;
– fecha(s) y hora(s) en las que se realizó la tarea;
– localizaciones precisas de la medición (por ejemplo, coordenadas);
– equipo de medición y antenas utilizadas (debe indicarse el número de serie o el número de inventario para poder determinar si el equipo estaba calibrado cuando fue utilizado);
– valores de ajuste elegidos (atenuadores activados);
– montaje de la medición (en diagrama de bloques, croquis);
– valores medidos (¡con las respectivas unidades!) De frecuencia, anchura de banda, densidad de flujo de potencia (o intensidad de campo), marcaciones, etcétera, y observaciones, por ejemplo, distintivos de llamada e infracciones;
– cualesquiera protocolos de medición, diagramas de analizadores de espectro, ficheros de datos, etcétera;
– condiciones ambientales que posiblemente afecten la precisión de la medición;

– vehículo(s) utilizado(s) ;

– registros, tales como vídeos, audio y fotos.

La firma o las iniciales del autor deberán confirmar la corrección de los datos del parte de trabajo. Dependiendo del tipo de tarea, la documentación deberá también incluir un resumen de las conclusiones, decisiones, acciones ulteriores efectuadas e informes asociados.

2.3 Sistema de información de gestión

Los sistemas de información de gestión, tal como se utilizan para la comprobación técnica, proporcionan información como factor esencial para dirigir y tomar decisiones a nivel directivo. El proceso de la gestión puede considerarse como una estructura de realimentación o bien como una combinación de procesos descendente y ascendente. Un sistema de información de gestión, consistente en una base de datos y un sistema de indicación asociado, proporcionará en su momento la información pertinente. A partir de esta información se puede concebir un plan de trabajo que idealmente serviría de base para un plan de recursos. No obstante, en caso de que la información y el presupuesto disponibles sean insuficientes, puede ser más adecuado preparar primero el plan de recursos y tomarlo como base para el plan de trabajo. La experiencia enseña que el éxito se alcanza siguiendo una vía intermedia.

2.3.1 Base de datos

A fin de obtener una visión panorámica del volumen general de tareas, el tiempo que requiere su tratamiento y su distribución regional, la siguiente información deberá almacenarse en la base de datos:

– número de tarea único;

– código del tipo de tarea (por ejemplo, informe sobre interferencia, mediciones de ocupación);

– fecha de recepción y terminación de tarea;

– entidad que solicita la tarea, u origen del informe sobre interferencia, con dirección, número de teléfono y de fax, dirección de correo electrónico;

– identificación de la localización de la interferencia o medición por nombre y código numérico, como el código postal o las coordenadas;

– descripción de la tarea o contenido del informe sobre interferencia;

– servicio o aplicación afectados;

– frecuencia o frecuencias;

– distintivo de llamada;

– número de asignaciones de frecuencia, si se realizaron a título individual;

– categoría de la estación (fija, móvil);

– en los casos de interferencia, causa y fuente de la interferencia.

Puede ser conveniente introducir más datos, tales como el fabricante, el tipo y número de serie del dispositivo interferente o interferido, posibles países extranjeros o posiciones militares afectadas, medidas adoptadas (por ejemplo, imposición de multas), destinatario del informe final, nombres de las personas que han intervenido en las mediciones, u otras.

Debe garantizarse un análisis de los datos uniforme y sin ambigüedad mediante el uso de un menú estructurado jerárquicamente para la introducción del tipo de tarea, servicio involucrado, fuente y causa de la interferencia, como se expone en el siguiente ejemplo:

Capa 1	Capa 2	Capa 3
1 servicios terrenales	1-1 servicio fijo 1-2 servicios móviles	... 1-2-1 servicio móvil terrestre 1-2-2 servicio móvil aeronáutico 1-2-3 ...
2 servicios espaciales	1-3 servicio de difusión 1-4 ...	...

Para cada tarea individual deben registrarse las horas invertidas, repartidas entre trabajo de oficina y de campo, y los kilómetros recorridos. Según el tipo de análisis para el que se requieran los datos puede también ser necesario anotar el valor del equipo utilizado.

Puesto que los datos a que se refiere esta sección constituyen la base de los análisis del sistema de información de gestión, no se consideran en este contexto otros datos como las intensidades de campo, tasas de ocupación y otros resultados de mediciones. No obstante, los datos mencionados en el § 2.2.5 deberán almacenarse en la misma base de datos (la de la comprobación técnica), permitiendo así a la vez analizar los casos individuales y efectuar análisis estadísticos.

2.3.2 Sistema de informes y análisis estadísticos

Una vez introducidos en la base de datos los datos mencionados, son posibles varios tipos de análisis. A efectos de planificación es importante tener una idea del tiempo necesario para cada una de las tareas. Los gráficos que abarcan varios años indican claramente las tendencias típicas. Por ejemplo, si se reducen las horas de trabajo dedicadas a mediciones de ocupación porque la gestión ha reducido la demanda de dichos datos o debido a una mayor utilización de equipos de control a distancia, los recursos humanos quedan disponibles para otras tareas.

A menos que esta información se entregue a la gestión del servicio con bastante anticipación, se corre el peligro de tomar decisiones incorrectas, ya que la gestión puede no estar familiarizada con los detalles de la comprobación técnica. Cada vez hay más administraciones que piden datos exactos sobre el número total de tareas atendidas y los recursos utilizados, y en consecuencia sus costos para determinar las tasas que han de pagar los diferentes grupos de usuarios y, si fuera necesario, servir de prueba en un juicio.

Deberá especificarse el formato de los informes y estadísticas normales para garantizar que los datos se compilan de manera uniforme y admiten ser comparados. Sin embargo, esto no implica que la información deba distribuirse a todos los destinatarios en el mismo formato. Las necesidades de información del responsable de una estación de comprobación técnica suelen ser muy diferentes de las de su superior (en la administración). Los datos deben pues acomodarse a las necesidades individuales de sus destinatarios.

Es frecuente que el análisis de los datos estadísticos suscite nuevas preguntas. Por ello ha de ser posible realizar consultas individuales, no normalizadas, a la base de datos sin necesidad de programación adicional.

Por ejemplo, la identificación del servicio más interferido lleva automáticamente a preguntar por la fuente primaria de interferencia, y de ahí a indagar cuál será el mecanismo que realmente la produce. Las respuestas a estos interrogantes pueden tener bastante importancia en el contexto de las inspecciones de equipos radioeléctricos, normalización y vigilancia del mercado. Sobre todo indicarán las medidas correctoras que deban adoptarse en relación con el equipo interferente o el interferido.

Al diseñar un sistema de informe se han de tener en cuenta las técnicas HTML (lenguaje de marcado de hipertexto). La característica esencial del HTML es su capacidad de manejar diferentes tipos de datos como textos, imágenes y gráficos y presentarlos en una disposición unificada mediante el uso de un sencillo navegador.

2.3.3 Plan de trabajo

Al elaborar un plan de trabajo se ha de establecer una distinción entre tareas que admiten y que no admiten ser planificadas. Si bien suele ser posible predecir el número de mediciones de ocupación de frecuencia realizadas para la administración de frecuencias y el tiempo que invierte en ellas el departamento de gestión del espectro, es imposible predecir con exactitud el número de informes recibidos sobre interferencia y el tiempo requerido para eliminar la interferencia.

La planificación se basa en el plan de trabajo del año anterior, teniendo en cuenta cualquier aumento y/o disminución apreciable en las tareas. Para introducir cambios es necesario consultar con antelación a las entidades que solicitan dichas tareas. También deben tomarse en consideración los cambios en el marco reglamentario que afecten a las telecomunicaciones.

A fin de elaborar el plan de trabajo, es preciso registrar todas las tareas individuales en la base de datos para poder realizar un análisis estadístico de su volumen y del tiempo que requieren. En cualquier caso, el plan de trabajo debe dejar margen para necesidades imprevistas y admitir la posibilidad de revisión en el transcurso del año.

2.3.4 Planificación de recursos

El plan de trabajo es la base de la planificación de recursos, que constituye otra tarea compleja en la que intervienen varias interrelaciones funcionales. La comparación con el plan de trabajo del año anterior indicará cualquier aumento o disminución de la demanda de personal, capacitación, vehículos y equipos de medida.

La automatización de las mediciones en los modelos más recientes y la integración de varias funciones en un solo dispositivo pueden hacer disminuir el número de personas necesarias y que los vehículos sean más pequeños. No obstante, no debe olvidarse que tales adelantos pueden exigir una capacitación suplementaria destinada a mejorar las cualificaciones de operadores y personal de mantenimiento.

El asunto se complica aún más por la rapidez con que se producen los cambios en las telecomunicaciones y en los requisitos de las mediciones técnicas, de forma que no siempre pueden preverse adecuadamente en la planificación presupuestaria a medio plazo (de 3 a 5 años).

La experiencia revela la pertinencia de la recomendación siguiente: en la sustitución de un equipo debe prestarse especial atención a aquellos elementos para los que ya no se encuentren piezas de repuesto. Cualquier equipo que se retire del servicio debe retirarse físicamente de la estación de comprobación técnica para evitar costos adicionales por mantenimiento y uso de capacidad de almacenamiento.

2.4 Tipos de estaciones de comprobación técnica

Existen tres tipos de estaciones de comprobación técnica:

– estaciones fijas;

– estaciones móviles;

– estaciones portátiles.

2.4.1 Estaciones de comprobación técnica fijas

Las estaciones de comprobación fijas son el elemento central de un sistema de comprobación técnica. Generalmente permiten realizar todas las mediciones dentro de su zona de cobertura, sin limitaciones tales como insuficiencia del espacio de trabajo, dificultad de erigir las antenas y restricciones en suministro de energía.

Para determinar el emplazamiento de una estación de comprobación técnica fija hay dos enfoques posibles. Se puede escoger un lugar donde cabe esperar una mínima interferencia de ruido artificial y emisiones radioeléctricas, o bien una zona densamente poblada en la que pueden recibirse gran cantidad de emisiones, incluso emisiones de baja potencia. El primer enfoque es particularmente adecuado para estaciones de comprobación técnica en ondas decamétricas, muy sensibles a las interferencias, y en las que las condiciones de propagación permiten alejarse de los transmisores. La segunda opción es adecuada para las estaciones de

comprobación en ondas métricas/decimétricas, ya que las condiciones de propagación no permiten situar tales estaciones lejos de los transmisores. Sin embargo, hay que tener mucho cuidado de no sobrecargar los receptores con señales intensas, por ejemplo, las procedentes de transmisores de radiodifusión, ni crear productos de intermodulación. En la práctica, la diferencia de requisitos obligará a encontrar una solución de compromiso.

En la sección 2.6 se dan detalles sobre edificios y terrenos. Los requisitos especiales de las estaciones de comprobación técnica de satélites se hallan en la sección 5.1.

El principal inconveniente de las estaciones de comprobación técnica fijas, atendidas, es su propia condición de fijas y el no poder, por razones económicas, instalarse en número suficiente. En consecuencia, tales estaciones suelen complementarse con estaciones de comprobación técnica controladas a distancia, que pueden ir equipadas con receptores piloto de comprobación y/o radiogoniómetros, dependiendo de su finalidad. El equipo avanzado no sólo permite que las estaciones sean explotadas por un operador distante, sino además que los programas de medición se realicen automáticamente y los resultados se transmitan en un momento posterior a la estación de comprobación atendida, o que suene una alarma cuando se sobrepasan ciertos límites. En las secciones 2.5 y 3.6 se describen con mayor detalle el control remoto del equipo y la automatización de la comprobación técnica.

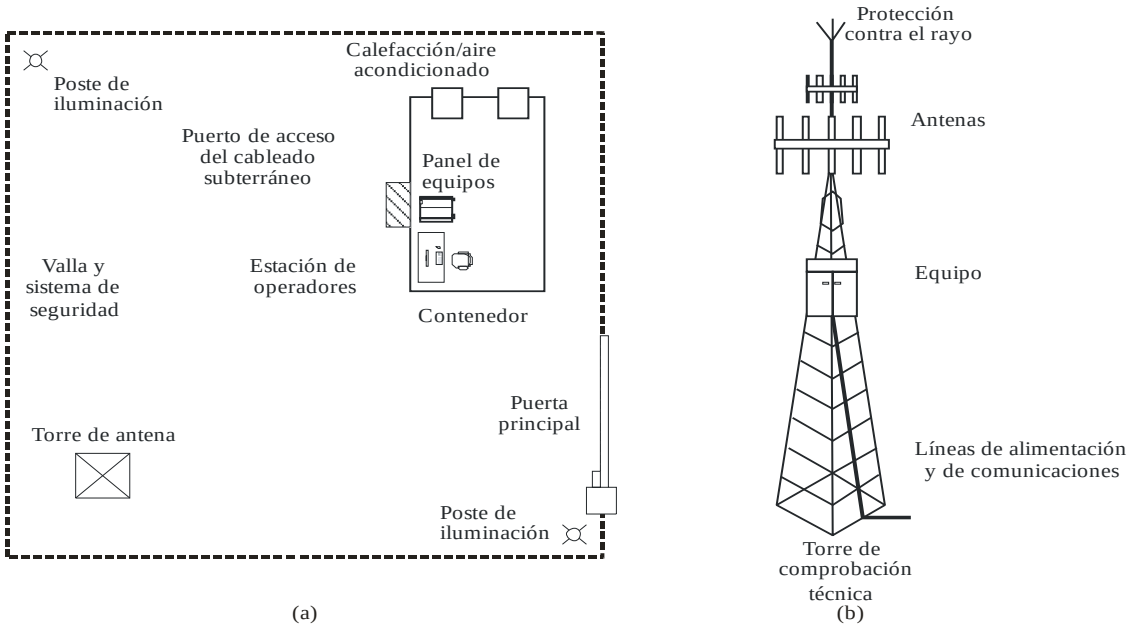
En la Fig. 2.4-1 se representa esquemáticamente la configuración de las estaciones fijas distantes, que pueden disponer de espacio en un contenedor que permita la operación local de dichos medios o bien sin dicho espacio, en cuyo caso sólo pueden explotarse a distancia.

Además, en algunas situaciones puede resultar difícil a las administraciones encontrar emplazamientos adecuados para la instalación de estaciones fijas, pudiendo ser necesarias soluciones que sólo dispongan de una infraestructura operativa mínima.

Por ejemplo, las administraciones pueden requerir soluciones que permitan la instalación sencilla de una estación fija sobre la techumbre de un edificio privado que precise de una obra civil muy reducida y que genere las molestias mínimas a sus moradores.

FIGURA 2.4-1

Esquemas de estaciones de comprobación técnica fijas: (a) emplazamiento mayor con espacio en contenedor que permita una operativa local
(b) emplazamiento menor con todos los equipos instalados sobre una torre



Dichas estaciones fijas tienen las características principales siguientes:

– están controladas a distancia,

– no requieren ni un edificio ni un contenedor junto al mástil,

– el conjunto de la instalación requiere un consumo de energía reducido.

2.4.2 Estaciones de comprobación técnica móviles

Las estaciones móviles de comprobación técnica tienen la función de realizar todas aquellas operaciones de supervisión en las que la baja potencia de los transmisores, la gran directividad de las antenas y las especiales características de la propagación imposibilitan que las mediciones sean realizadas por las estaciones fijas.

Se examinan aquí los aspectos especiales de las tareas de comprobación técnica que sólo atañen a la aplicación móvil, puesto que las consideraciones comunes a todos los problemas de emplazamiento, medición, conexión en red, manipulación de datos, etcétera, pueden encontrarse en los capítulos apropiados.

El diseño de una estación móvil de comprobación técnica varía notablemente según sea su finalidad, alcance y condiciones de explotación. La complejidad del equipo y su correcto funcionamiento, unidos a los problemas de peso y de consumo de energía, hacen que en general se necesite un vehículo especialmente equipado capaz de desplazamiento rápido. En algunos casos, la unidad móvil debe incorporar equipo portátil adicional para realizar mediciones especializadas en emplazamientos no fácilmente accesibles por el vehículo.

2.4.2.1 Sistemas de navegación y posicionamiento

Al contrario que las estaciones de comprobación técnica fijas, cuya posición permanece invariable, todas las estaciones móviles de comprobación técnica deben estar equipadas con un sistema de posicionamiento/navegación para obtener en todo momento y en cualquier lugar la localización exacta del vehículo. Esto garantizará que pueda identificarse la localización del sistema de pruebas en el momento en que se registran los datos. Además, si la estación móvil de comprobación está equipada con antenas directivas y/o radiogoniómetros, será también necesario conocer la orientación (marcación) del vehículo.

La precisión exigida a esta información de posicionamiento varía según los objetivos de la medición y el tipo de sistema que se mida. Por ejemplo, una precisión de 100 metros puede ser suficiente para obtener los perfiles de cobertura de una estación de televisión o de radiodifusión. Pero puede exigirse una precisión de pocos metros cuando se cartografía la cobertura de señal y la calidad de un sistema "microcelular".

Los sistemas de navegación como el sistema de posicionamiento mundial (GPS) y el sistema mundial de navegación por satélite (GLONASS) no requieren interacción con el operador y pueden utilizarse en vehículos, embarcaciones y aeronaves. Debe tenerse en cuenta, sin embargo, que estos sistemas se apoyan en la visibilidad del satélite y por tanto no pueden determinar la posición de un vehículo en un túnel, por ejemplo.

Para salvar el inconveniente de pérdida de las señales de navegación del satélite, se comercializan sistemas que utilizan una brújula giroscópica y un transductor giratorio acoplado al tren motor del vehículo para obtener la posición del mismo. Puede ser apropiada una combinación de sistemas diferentes.

Todos los sistemas de posicionamiento a bordo deben estar equipados con una interfaz de comunicación de tal manera que los datos de posicionamiento puedan almacenarse junto con los datos medidos en un controlador de proceso, por ejemplo, los valores de intensidad de campo emparejados con las coordenadas y la hora.

Véanse más detalles sobre los diferentes sistemas de navegación y posicionamiento en la sección 6.1.

2.4.2.2 Vehículos

2.4.2.2.1 Consideraciones generales

Antes de elegir un vehículo, se ha de establecer para qué funciones y en qué circunstancias se va a utilizar.

La ventaja de utilizar un vehículo de uso general para toda clase de tareas de medición es que permite desempeñar multitud de funciones. Siempre habrá medidas especiales, sin embargo, que no puedan realizarse

desde un vehículo de este tipo. Un equipo de medición montado en bastidores puede adaptarse fácilmente a las necesidades de una tarea determinada, siempre que haya espacio suficiente. La principal desventaja de un vehículo de uso general consiste en las grandes dimensiones que necesita para alojar todos los aparatos y antenas requeridos, con la dificultad de maniobra en ciudad y carretera que ello implica.

Los vehículos especializados ofrecen la ventaja de estar equipados con aparatos perfectamente adecuados a la tarea de medición que ha de realizarse, y a menudo son de tamaño menor que otros vehículos. Sin embargo, como solamente sirven para funciones especiales, pasarán mucho tiempo ociosos en el garaje.

Si el vehículo ha de utilizarse en misiones que duran varios días, hay que pensar dónde va a dormir y asearse el personal. Cuando no se proporcione alojamiento en hoteles, el vehículo tendrá que satisfacer requisitos adicionales, que influirán notablemente en sus dimensiones y su precio.

La dotación del vehículo consta generalmente de dos personas: un operador y un conductor/ayudante que solamente tenga conocimientos de radiocomunicaciones de nivel básico. Si no hubiera más que una persona en el vehículo, ésta tendría al mismo tiempo que conducir y manejar el equipo de medición, combinación que debe evitarse por razones de seguridad. Además, tener una segunda persona como testigo ha demostrado ser útil. Puede incluso ocurrir que haya tres personas a bordo, por ejemplo, cuando se instruye a un nuevo colega. Esto, sin embargo, no crea nuevas necesidades pues casi todos los vehículos contienen al menos tres asientos.

2.4.2.2.2 Antenas para estaciones móviles de comprobación técnica

Para más información sobre las antenas de comprobación técnica y sus características, se ruega consultar el capítulo 3. En la presente sección solamente se describen las limitaciones y accesorios auxiliares, habida cuenta de las características específicas de las antenas para las estaciones móviles de comprobación.

Los tipos de antena utilizados en los vehículos de comprobación técnica móvil variarán según la frecuencia y la naturaleza de las mediciones a realizar. Deben también adaptarse a las condiciones del tráfico y los requisitos de la instalación.

La limitación que afecta a las antenas de una estación móvil de comprobación concierne al tamaño y al número. Debido a la inevitable falta de espacio, las antenas habrán de ser pequeñas a menos que, como a veces ocurre, se utilicen antenas telescópicas que pueden colocarse en el suelo, cerca del estacionamiento del vehículo.

Durante las mediciones se ha de tener en cuenta que el vehículo mismo produce un efecto distorsionador en las características de la antena. Solamente puede obtenerse un diagrama de antena "limpio" (no alterado) a una distancia suficiente del vehículo o a una suficiente altura sobre el techo cuando está extendido el mástil de antena. El problema afecta también a la polarización.

Pueden utilizarse antenas omnidireccionales, particularmente adecuadas para una exploración general del espectro. Cuando se necesita mejorar la directividad o la relación señal a ruido, o aumentar la ganancia y por tanto reducir la interferencia en mediciones de intensidad de campo, o en el caso de la radiogoniometría, se utilizan antenas direccionales.

Se dispone de una gran variedad de antenas directivas y goniométricas, que operan desde las ondas decamétricas hasta las frecuencias de GHz, y son capaces de satisfacer todos los requisitos de una estación móvil de comprobación técnica.

Dado que las antenas para frecuencias superiores a 1 GHz son de abertura pequeña, que puede ser del orden de 1º solamente, dependiendo de la frecuencia, pueden necesitarse soportes hidráulicos para el vehículo de medición a menos que se utilice un trípode separado.

Hay que distinguir entre las antenas directivas, que permiten una tosca determinación de la dirección y las antenas goniométricas especiales, disponibles para las diversas gamas de frecuencias.

Las antenas directivas, sin embargo, deben instalarse de modo que puedan orientarse fácilmente desde el interior del vehículo hacia la dirección de recepción, ya sea a mano o mediante un motor eléctrico.

El operador debe ser capaz de comprobar fácilmente la orientación de la antena. Para mediciones automáticas habrá que disponer de información de posición para el control a distancia. Se recomienda un rotor que pueda ser gobernado por el controlador de proceso.

Para girar la antena puede hacerse girar todo su sistema de soporte (mástil o torre). Una solución alternativa más útil sería colocar una unidad rotatoria en el equipo situado en la parte superior de la torre. De este modo también podría controlarse a distancia la polarización.

La antena se ha de poder elevar hasta una cierta altura sobre el techo para mejorar la sensibilidad, reducir la influencia del vehículo en las mediciones y elevar la antena por encima de obstáculos a la propagación de las ondas. Esto se aplica especialmente a las antenas destinadas a recepción en ondas métricas y decimétricas. La altura a la que debe poder elevarse la antena será de 8 m como mínimo.

Para esta finalidad se utilizan mástiles telescópicos que consisten en una serie de tubos de acero concéntricos muy ajustados que se extienden hacia arriba por la acción de un sistema neumático o hidráulico. Otras soluciones muy generalizadas utilizan un sistema de cable metálico accionado manualmente o por un electromotor. Al elegir el sistema debe tenerse en cuenta el peso de la antena junto con el método de medición que haya de utilizarse (medición en un emplazamiento fijo con el mástil extendido durante un largo periodo o medición de punto a punto con extensiones sucesivas del mástil). Los soportes (mástiles) de construcción mecánica de la antena fijados en el vehículo juegan un papel importante por el gran esfuerzo que deben soportar.

La altura instantánea de la antena debe poderse leer desde el interior del vehículo. Para simplificar las mediciones de intensidad de campo que dependen de la altura, se recomienda un mástil orientable mediante un controlador de proceso, con la altura instantánea de la antena disponible en el procesador.

Deben adoptarse las precauciones oportunas cuando se iza un mástil de esa altura, y se ha de tener en cuenta el peso de la antena montada y la presión del viento, que podría hacer oscilar peligrosamente el soporte y amenazar así su estabilidad. **Al elevar el mástil hay que cuidarse de que no haya líneas eléctricas aéreas próximas**.

Aparte de las antenas que han de utilizarse en terreno descubierto, a menudo desmontables, las antenas de una unidad móvil de comprobación técnica van normalmente montadas sobre el techo del vehículo, que debe ser fácilmente accesible mediante una pequeña escalera exterior o, todavía mejor, desde el interior del vehículo a través de una trampilla en el techo a la que se acceda fácilmente por una escalera interior.

Para que las antenas puedan intercambiarse fácilmente, es prudente adoptar alguna forma de sistema de fijación normalizado, por ejemplo del tipo de bayoneta, que sea utilizable en todas las antenas de estación. La antena debe también tener un conector adecuado al cual pueda conectarse la línea de bajada.

Puede utilizarse una sola porción de cable flexible, que se hace bajar paralelamente al mástil y se enrolla en una bobina dentro del vehículo a medida que desciende el mástil.

Para evitar complicaciones al efectuar las mediciones de intensidad de campo, es esencial elegir un cable que tenga la impedancia característica correcta y sea del tipo de bajas pérdidas. La atenuación de cada sección del cable a las diversas frecuencias debe ser conocida y admisible.

Consideraciones sobre la interferencia para la comprobación técnica móvil: cuando se realiza la comprobación técnica mediante estaciones móviles, debe tenerse en cuenta el entorno de frecuencias radioeléctricas, especialmente en entornos radioeléctricos con presencia de señales intensas, como las de los transmisores de radiodifusión. Las señales intensas pueden generar distorsión por intermodulación en los propios equipos de comprobación técnica o de medida, dificultando la realización de medidas precisas. Esto puede ser particularmente importante para equipos de radiogoniometría instalados en vehículos de comprobación técnica, ya que dichos sistemas utilizan frecuentemente amplificadores internos y antenas activas que son más susceptibles a los efectos de la intermodulación generada internamente a partir de señales intensas.

En dichos entornos de radiofrecuencia no existen por lo general problemas cuando se utilizan sistemas con antenas pasivas (no amplificadas). Sin embargo, los sistemas de comprobación técnica que utilicen amplificadores de bajo ruido y/o antenas activas (preamplificadas) son mucho más susceptibles a la

intermodulación. En esta situación pueden aplicarse dos enfoques, de forma conjunta o separada, para asegurar que los sistemas no sufren los efectos de señales intensas.

Uso de una antena dual

Una antena dual puede conmutar de un modo activo (amplificado) a un modo pasivo (no amplificado). Funciona normalmente como antena activa y en zonas en las que haya presentes señales intensas, conmuta al modo pasivo para que su funcionamiento no se vea degradado.

Inserción de un filtro de banda eliminada

Otra posible solución es la instalación de un filtro de banda eliminada para una parte de la banda de frecuencias en la que existan señales intensas. El filtro de banda eliminada se instala antes del primer amplificador de señal del sistema de distribución de la señal y puede evitar que las señales intensas afecten al sistema. Obviamente, cuando se utiliza un filtro de banda eliminada, la correspondiente banda de frecuencias queda bloqueada y no puede medirse. Asimismo, deben tenerse en cuenta los efectos que el filtro pueda tener sobre la ganancia, el retardo de grupo de la señal, así como otras características del filtro que puedan afectar a los sistemas de comprobación técnica o de radiogoniometría.

Los efectos de la intermodulación se analizan con más detalle en la sección 3.3 relativa a los receptores.

2.4.2.2.3 Requisitos que ha de cumplir el vehículo

La elección de vehículos para las estaciones móviles de comprobación técnica está gobernada por una diversidad de factores. Cada entidad compradora individual asignará prioridades a estos factores según sus propias necesidades, pero como mínimo deberán considerarse los siguientes aspectos antes de especificar los vehículos.

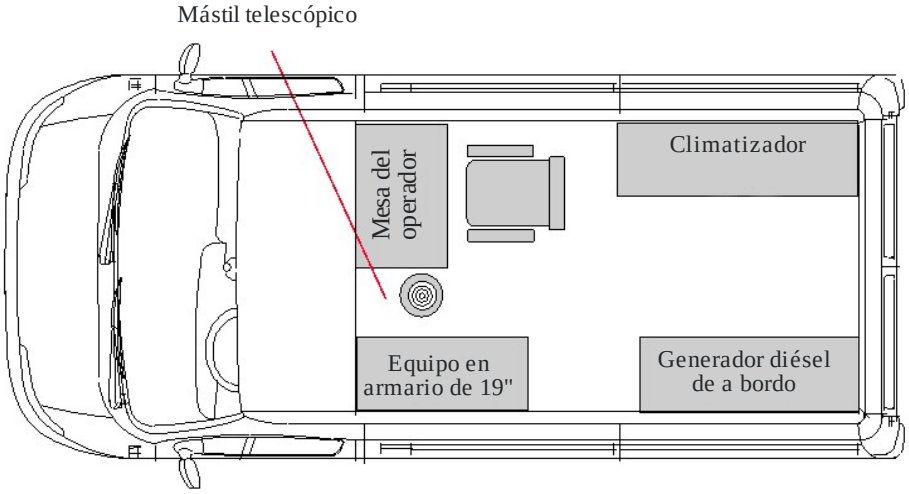
Es posible transformar en estaciones móviles de comprobación técnica una variedad de vehículos comerciales. Un vehículo en serie con componentes del tren de propulsión normales ofrecerá los costos mínimos durante su vida útil. La disponibilidad de piezas de repuesto debe formar parte de la especificación del vehículo. Es ventajoso adquirir los vehículos a fabricantes que tengan ya instalaciones de servicio funcionando. Los vehículos destinados a circular también por carreteras no pavimentadas y terrenos abiertos necesitarán tracción a las cuatro ruedas y suficiente distancia al suelo.

Tanto el conductor como el operador deberán tener suficiente espacio para las piernas. Durante las mediciones realizadas en marcha, el operador debe sentarse mirando adelante. En cualquier caso, el vehículo ha de contener todo lo necesario para garantizar que las mediciones se realicen con facilidad. El equipo se dispondrá de una manera cómoda a fin de que el personal pueda hacer las mediciones con los mínimos movimientos. El equipo de operación debe estar al alcance de la mano. Los vehículos grandes tendrán suficiente altura para que el operador esté de pie.

Se prefiere una estructura de tipo autobús como la representada en la Fig. 2.4-2, sin división entre la cabina del conductor y la sala de operadores, al objeto de que el conductor, que a menudo ha de trabajar en estrecha unión con los operadores mientras el vehículo está en marcha, pueda tener contacto directo con la sala de operadores. De este modo se deja ver a los operadores en qué dirección se mueven y se da al conductor la posibilidad de trasladarse a la zona del laboratorio sin tener que salir del vehículo.

FIGURA 2.4-2

Interior de una estación móvil de comprobación técnica



Spectrum-2.4-02

En la zona de trabajo del vehículo debe haber ventanas que proporcionen luz natural a los operadores y les permitan ver en todas las direcciones. No obstante, hay que tener cortinas o persianas para protegerse de la luz exterior en aquellos casos en los que interfiere con la visión de pantallas como los analizadores de espectro, monitores de computador o televisores.

Se ha de conceder gran importancia a la seguridad. Cada asiento dispondrá de un cinturón de seguridad y el equipo debe estar fijado firmemente de manera que no pueda desplazarse y causar lesiones cuando el vehículo está en marcha o en caso de una ligera colisión. Si hay un asiento para el operador en la parte trasera del vehículo, se ha de poder bloquear dicho asiento. Al techo de los vehículos grandes se fijará una barandilla de seguridad plegable para proteger al personal de posibles caídas.

El interior del vehículo debe estar provisto de armazones de equipo para sujetar bien los circuitos electrónicos y ofrecer alguna protección contra choques y vibraciones. El equipo puede ir montado en bastidores normales de 19 pulgadas, o en carriles especiales con abrazaderas de forma adecuada. Esta última solución puede dar más flexibilidad. Cualquiera que sea la técnica de montaje, deberá ser fácil desmontar el equipo para reparaciones. Los hilos de alimentación y de señal deben estar dispuestos convenientemente detrás del equipo en la medida de lo posible, con miras a reducir el desorden en la zona de trabajo y reforzar la seguridad del operador. Debe estudiarse y planificarse la disposición del equipo de forma que los controles y pantallas que los operadores utilicen más a menudo se sitúen en las posiciones más convenientes.

El cuerpo del vehículo, sea cual fuere su diseño, debe tener un aislamiento térmico adecuado para asegurar que el equipo interior está en correctas condiciones y las personas están cómodas. Un buen aislamiento térmico servirá por lo general como aislamiento acústico. La calefacción y el acondicionamiento de aire normal del vehículo serán suficientes para el bienestar del conductor, pero deberán equiparse unidades más grandes para los compartimentos del equipo y el personal. La capacidad de calefacción puede suplementarse mediante calefactores de propano, gasolina o eléctricos. La climatización del propio vehículo y de las cabinas externas, si fuera necesario, puede ser alimentada por el sistema eléctrico del vehículo, por una entrada de la red externa, o por un generador de a bordo.

El vehículo debe ir provisto de suficiente alumbrado interior para que los operadores puedan trabajar sin forzar la vista. El alumbrado fluorescente de baja tensión puede ser alimentado por el sistema eléctrico del vehículo. El alumbrado incandescente o fluorescente normal puede alimentarse del generador de a bordo o de la red externa cuando se disponga de ella.

El peso de un vehículo es el factor más crítico para su elección. Un coche (furgoneta) de pasajeros tiene la ventaja de ser muy manejable, capaz de circular por calles estrechas y por calles y plazas cerradas al tráfico

de camiones. La capacidad de carga máxima del vehículo, unos 500 kg incluidas personas, equipo de medición y sistemas de alimentación adicionales, junto con su reducido espacio interior, restringe considerablemente las posibilidades de su empleo. Sin embargo, se han empleado con éxito vehículos de este tipo en la búsqueda de fuentes de interferencia o transmisores móviles ilegales. La antena goniométrica puede ir camuflada como equipaje, y las antenas de menor sensibilidad incluso pueden estar totalmente integradas en el techo a fin de pasar desapercibidas.

Ofrecen mucha más flexibilidad los vehículos de 2,8 t de peso máximo total, que en la reglamentación de tráfico vial de muchos países todavía se consideran coches de pasajeros y tienen una capacidad de carga superior a 1000 kg. Pueden fácilmente utilizarse como vehículos universales, provistos de equipo de medición, mástil y radiogoniómetros, y en su parte trasera ofrecen espacio para antenas adicionales y un generador de alimentación portátil. El interior puede prepararse para formar una "estación móvil de medición" completa, pero a menudo basta con una versión "ocasional" del vehículo, en la cual sean intercambiables los instrumentos. No obstante, en ambos casos debe garantizarse la alimentación, el acceso al computador (por ejemplo, por bus CEI), el sistema de determinación de posición, las antenas de medición con sus soportes desmontables y los medios de comunicación apropiados.

Se elegirán grandes camiones para las mediciones de larga duración, casi estacionarias, que exigen llevar un potente generador incorporado, o cuando el personal tenga que estar de pie o dormir dentro del vehículo. También se necesita un camión cuando se utilicen antenas parabólicas de muy pequeña abertura que han de apoyarse en una plataforma plana maciza; en este caso el camión tendrá además que incorporar soportes hidráulicos.

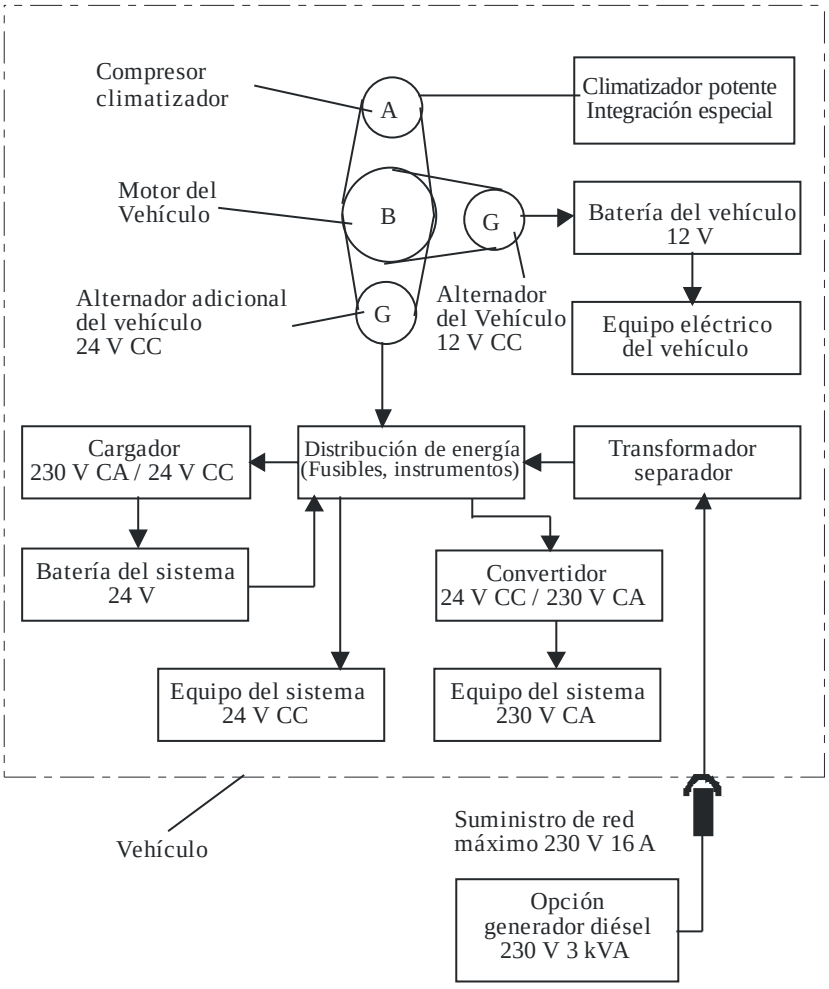
Aun en condiciones de plena carga, el vehículo deberá ser capaz de alcanzar una velocidad de al menos 80 km/h en carreteras llanas a fin de no obstaculizar el tráfico. Esto exige una potencia de motor adecuada. Si el fabricante ofrece un embrague reforzado, deberá éste utilizarse con miras a evitar un fallo prematuro de esta pieza provocado por cargas muy pesadas.

2.4.2.2.4 Alimentación

Existe una gran variedad de fuentes de alimentación para el equipo de las estaciones móviles. Una estación móvil bien equipada utilizará por lo menos dos fuentes para conseguir redundancia. Se presenta un ejemplo en la Fig. 2.4-3.

FIGURA 2.4-3

Ejemplo de un sistema de alimentación de un vehículo de uso general



Spectrum-2.4-03

El consumo de energía de los equipos modernos ha facilitado considerablemente el problema de alimentación de las unidades móviles. A título de ejemplo, en el Cuadro siguiente se dan cifras de consumo para los equipos existentes en el mercado en las categorías citadas. Estos equipos pueden estar disponibles como partes independientes o como un sistema completo que incluya varios elementos, con unas necesidades energéticas combinadas inferiores a la suma de cada una de sus partes, por ejemplo, un sistema de procesamiento de señal que conste de un distribuidor de frecuencias, uno o varios receptores y un procesador puede requerir solamente del orden de 200 W.

Tipo de equipos	Consumo de potencia (W)
Analizador de espectro	150
Osciloscopio	120
Generador de señal	150
Radiogoniómetro	250
Receptor en ondas decamétricas	80
Receptor en ondas métricas y decimétricas	100
Computador personal industrial con monitor en color	200

El equipo electrónico ha reducido también su peso y aumentado su compacidad. Estas características de tamaño y potencia combinadas permiten incluir un sinnúmero de capacidades en una unidad móvil que genera su propia energía. En multitud de casos, sin embargo, el equipo debe ser accionado a distancia desde el vehículo. Dicho equipo debe ser capaz de funcionar con alimentación por batería. Existen en casi todas las categorías equipos modernos de pruebas y comunicaciones (analizadores, osciloscopios, receptores, generadores de señal, radiogoniómetros, computadores, etcétera) que pueden funcionar con alimentación por batería. La mayoría de estos equipos pueden también funcionar dentro de una unidad móvil con alimentación de ca.

Existen equipos generadores compactos con propulsión por gasolina y capaces de suministrar al menos 2 kVA, que pueden fácilmente acomodarse en el compartimento trasero de una furgoneta. Algunas furgonetas de periodismo electrónico contienen dos de estos generadores. De este modo, el consumo de energía no debe ser ya el factor crítico en la elección de equipo para las unidades móviles.

Baterías o células secundarias

La alimentación por baterías o baterías recargables es la única solución para los equipos transportados a mano que han de utilizarse en lugares aislados inaccesibles a los vehículos. Este caso es frecuente cuando se hacen mediciones de intensidad de campo.

Alternadores acoplados al motor - convertidores

Puesto que la mayoría de los equipos electrónicos de medida están diseñados para alimentación directa en corriente alterna procedente de la red a 115 V/60 Hz o 220-230 V/50 Hz, el vehículo debe estar equipado con un generador capaz de suministrar energía con arreglo a estas características.

Una solución consiste en el uso de un convertidor, alimentado por una batería del vehículo. Puede también utilizarse una batería auxiliar de mayor capacidad si se necesita garantizar la autonomía imprescindible. Ello, sin embargo, plantea problemas adicionales de mantenimiento y recarga periódica.

El elevado rendimiento, la seguridad de funcionamiento, el silencio, la gran estabilidad tanto de la frecuencia como de la tensión generada y la ausencia de perturbaciones eléctricas que pueden proporcionar los sistemas de convertidores modernos, totalmente de estado sólido, sugieren que estos dispositivos son los más indicados para utilizarlos por lo menos hasta el límite de 500 VA.

Para potencias más elevadas, el tamaño y el peso de las baterías necesarias para garantizar la deseada autonomía respecto del suministro de la red y las inevitables dificultades de mantenimiento que llevan consigo, disuaden de utilizarlos como fuente de energía para las estaciones móviles de comprobación técnica.

Grupos electrógenos

Las estaciones móviles de comprobación técnica necesitan generalmente un suministro de energía superior a 500 VA. Hay que asegurar no sólo la alimentación del equipo electrónico sino también la del equipo auxiliar: pequeños motores eléctricos, ventiladores, alumbrado, sin olvidar radiadores, planta de climatización, etcétera. La carga conectada de una estación móvil de comprobación técnica de tamaño mediano puede alcanzar fácilmente, y en algunos casos superar, los 2,5 kVA, carga que hay que garantizar durante muchas

horas, y a veces días, de autonomía. En estas condiciones, la solución más conveniente consiste en un grupo electrógeno excitado por motor de combustión interna.

Los inconvenientes comunes a todos los motores de explosión de escasa potencia son: el ruido, la tendencia a vibrar y, a veces, sufrir paradas debido a sus propias características de funcionamiento y a los problemas de reparto de masas. Además, el encendido puede causar fácilmente perturbaciones eléctricas si no está equipado con supresores adecuados. Por lo tanto deberán preferirse los motores diesel.

La instalación de un grupo electrógeno en el vehículo exige un cuidado particular para evitar que su ruido llegue a la cabina y sea molesto para los operadores, en detrimento de la precisión de las mediciones. Normalmente va alojado en un compartimento lateral de la carrocería, enteramente revestido de un material que absorbe el ruido y fijado al mismo por un sistema de suspensión elástico. El acceso al grupo a los efectos de inspección, mantenimiento y arranque se realiza desde el exterior por medio de una ventanilla abatible que debe estar colocada con mucho cuidado para impedir las fugas de ruido.

Cuando el grupo electrógeno está destinado solamente a uso intermitente, por ejemplo poner de vez en cuando en marcha la planta de climatización, recargar las baterías durante una larga campaña de mediciones o hacer frente a crestas transitorias de consumo, puede ser aconsejable no instalar el grupo en el vehículo sino elegir un modelo portátil que, si es necesario, pueda instalarse a cierta distancia del vehículo, al que estará unido por un cable de manera que su funcionamiento no cause graves perturbaciones.

Suministro de la red pública

Aun cuando una estación móvil de comprobación técnica pueda equiparse con un sistema de alimentación autónomo, siempre es preferible aprovecharse del suministro directo de la red mientras ello sea posible. Esto se llevará a efecto para mantener el eficaz funcionamiento del alumbrado auxiliar y la planta climatizadora, o, desde luego, para recargar las baterías de servicio y las baterías internas de los instrumentos a través de sus respectivos dispositivos cargadores.

Evidentemente la conexión a la red reemplaza a los generadores de a bordo, ya que no es posible utilizar ambas fuentes en paralelo. El equipo eléctrico del vehículo debe necesariamente estar diseñado de manera que se impida, por medios mecánicos, conectar ambos sistemas a la vez.

Debe existir un transformador de separación en el vehículo para evitar el inconveniente de tener que conectar a tierra el vehículo y los instrumentos de medida. Cualquier toma de la red debe incluir un buen interruptor automático, ajustado para la máxima corriente que se necesite.

2.4.2.2.5 Ejemplos de concepto de vehículo

Debe elaborarse un concepto de vehículo que tenga en cuenta las consideraciones anteriores, el volumen de tareas (véase el § 2.3.4) y el número de emplazamientos; los recursos financieros generalmente exigirán establecer compromisos con respecto a la realización del concepto.

Aunque se sabe que los distintos países tienen necesidades y posibilidades diferentes, se presenta en la Fig. 2.4-4 un concepto de vehículo destinado a un país con varias estaciones de comprobación técnica.

Los tipos de vehículos descritos en este Manual se clasifican en tres, tal como se describe en los apartados siguientes:

Tipo 1. Se trata de vehículos de pasajeros (o vehículos de tipo ranchera) aptos para el transporte de personas, equipos y antenas. La red de antenas del radiogoniómetro y de comprobación técnica se instala sobre un dispositivo de transporte que no obstruya y se montan directamente sobre la estructura de carga situada sobre el techo. Los equipos de comprobación técnica y de radiogoniometría se instalan en la zona de transporte de equipaje en la parte trasera del vehículo, de forma que el operador pueda sentarse en la zona de los pasajeros y controlar el equipo desde su computador personal. Este tipo de estación puede operar en movimiento o en reposo. Los resultados de las mediciones se almacenan en el disco duro o memoria de estado sólido del computador, pudiendo descargarse a la base de datos de la estación fija cuando el vehículo retorna a su sede central una vez finalizada la sesión de medidas. Alternativamente, si se dispone de medios de comunicación de datos, éstos pueden transferirse directamente a la sede central. Generalmente, la estación de comprobación técnica se opera localmente, pero también puede controlarse a distancia desde la central.

El vehículo puede estar equipado con una impresora. Prácticamente cualquier vehículo de pasajeros o ranchera puede utilizarse como vehículo de Tipo 1, especialmente si viene equipado de fábrica con un soporte de carga sobre el techo. Debido a su apariencia de vehículos ordinarios que no atraen la atención, este tipo de vehículos se utilizan principalmente en la búsqueda de transmisores ilegales.

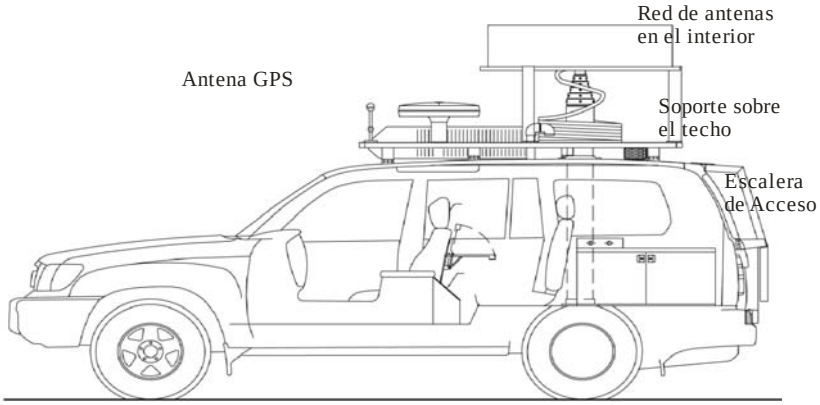
Tipo 2. Se trata de vehículos 4x4 aptos para un uso intenso en carreteras de condiciones difíciles en las que no pueden circular los vehículos de Tipo 1 ni de Tipo 3 (zonas desérticas, de montaña, etc.). Incluyen equipos para realizar labores de comprobación técnica y de radiogoniometría en movimiento o fijos. Están equipados con un mástil telescópico compatible con las difíciles condiciones de las carreteras para las que están diseñados y el reducido espacio del compartimento para los equipos. Un mástil típico puede elevar la antena de comprobación técnica y radiogoniometría hasta unos 6 m. por encima del nivel del suelo. El operador puede permanecer sentado en la zona de pasaje del vehículo y controlar el equipo desde su computador. Cuando el mástil está plegado, este tipo de estación puede operar tanto en movimiento como fija. Durante el funcionamiento normal, un alternador de elevada corriente montado en el motor del vehículo proporciona la energía eléctrica necesaria, y el control ambiental lo proporciona el sistema de climatización y calefacción del propio vehículo. En general, no hay espacio suficiente para disponer de un generador eléctrico auxiliar dentro del vehículo. No obstante, este tipo de vehículos pueden estar equipados con un generador eléctrico externo montado sobre una plataforma de propósito especial situada en la parte trasera del vehículo. Este tipo de vehículo es el vehículo estándar para operaciones en zonas rurales y montañosas en las que el acceso es difícil para vehículos de pasajeros o para furgones de gran tamaño.

Tipo 3. Se trata de vehículos tipo furgón, aptos para un uso intenso. Están destinados a un uso universal y, por tanto, están equipados con los mismos equipos de comprobación técnica y de radiogoniometría que los vehículos de Tipo 2, incluyendo un mástil que puede elevarse hasta unos 10 m. por encima del nivel del suelo. En caso de ser necesario, puede añadirse un mástil opcional para soportar antenas adicionales para la comprobación técnica. Cuando el mástil no está levantado, los vehículos de Tipo 3 pueden operar en movimiento con funciones de radiorrecalada. Además, el vehículo integra un generador auxiliar adecuadamente blindado contra el ruido y la interferencia electromagnética. Los vehículos de Tipo 3 utilizan potencia alterna producida por el generador de abordo o mediante la conexión a la red eléctrica cuando el vehículo está parado. El vehículo puede acomodar fácilmente un pasajero delante y 2 ó 3 en la parte trasera. Este tipo de vehículo es el vehículo estándar para el servicio de comprobación técnica y se utiliza principalmente para la investigación de interferencias. También puede incluir equipos transportables y portátiles para tareas de comprobación técnica y radiogoniometría en el exterior del vehículo a fin de cubrir zonas inaccesibles a vehículos.

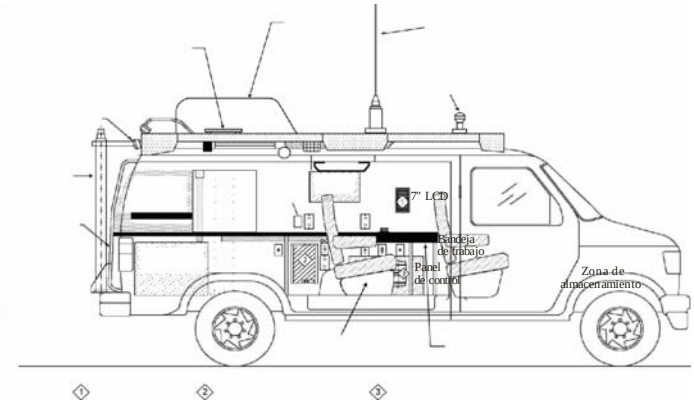
También pueden utilizarse otro tipo de vehículos, como por ejemplo, un camión con un contenedor que permita disponer de espacio para posiciones adicionales de comprobación técnica.

Para completar la exposición, también deben mencionarse los vehículos del servicio de inspección radioeléctrica. Son vehículos del Tipo 2 equipados con un mástil pero sin radiogoniómetros. Estos vehículos se utilizan casi siempre para investigar las interferencias que sufren las transmisiones de difusión y para inspeccionar las instalaciones radioeléctricas. Por esta razón llevan antenas especiales de radiodifusión, pero abarcan también toda la gama de frecuencias hasta 3 GHz. Cuentan también con equipos portátiles para la inspección de instalaciones radioeléctricas.

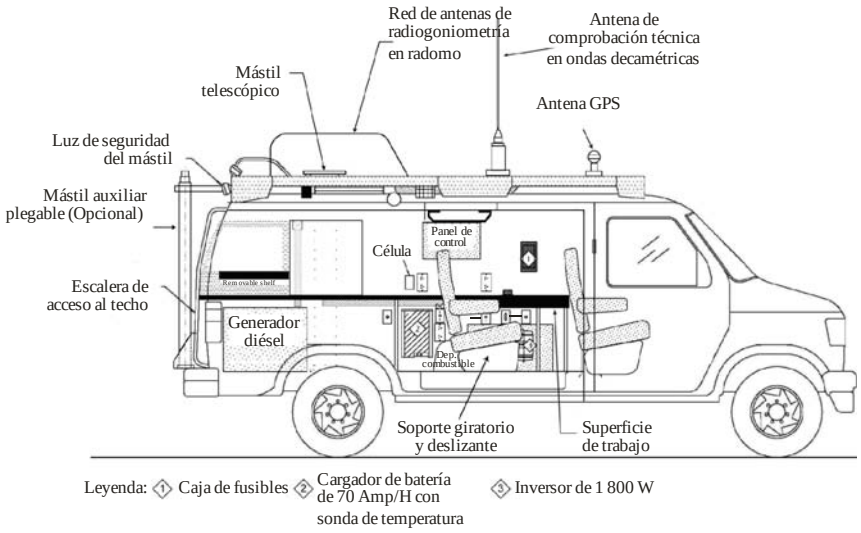
FIGURA 2.4-4
Ejemplos de estaciones móviles de comprobación técnica



Tipo 1



Tipo 2



Tipo 3

Spectrum-2.4-04

2.4.2.3 Estaciones de comprobación técnica a bordo de aeronaves

El uso de estaciones de comprobación radioeléctrica a bordo de aeronaves en lugar de estaciones móviles terrestres permite la realización de las tareas de comprobación técnica con ciertas ventajas a la par que desventajas, como se ilustra en el Cuadro 2.4-1.

2.4.2.3.1 Explotación de las estaciones de comprobación técnica a bordo de aeronaves

Procedimientos de aplicación general

Las misiones de vuelo tendrán que ser debidamente programadas y bien planificadas. Esto implica que deberán realizarse algunas actividades de coordinación siguiendo las directrices generales que se indican a continuación:

a) petición de la misión de vuelo, indicando su duración

Los programas de operaciones mensuales o semanales solamente pueden establecerse cuando se conocen las actividades a realizar y los tiempos relativos a esas tareas, junto con la disponibilidad de aeronave y tripulación. El término "aeronave" comprende aquí aviones, helicópteros, y todo vehículo aéreo.

CUADRO 2.4-1

Ventajas y desventajas de las estaciones de comprobación radioeléctrica a bordo de aeronaves

	Ventajas de la comprobación móvil aérea		**Desventajas de la comprobación móvil aérea**
1	Rápida exploración de extensas zonas geográficas	1	Costo del vuelo
2	Oportunidad de obtener la dirección geográfica con sólo una estación tomando varias líneas de marcación desde diferentes posiciones	2	Limitaciones de peso, potencia, tamaño, refrigeración
		3	Limitación por el clima, los vientos
3	Mejor oportunidad de hacer mediciones debido a la visibilidad directa	4	Tiempo de vuelo limitado por el combustible
4	Rápida localización de radiobalizas de emergencia, fuentes de interferencia y estaciones terrenas que a veces no pueden detectarse desde el suelo	5	Requiere exacta determinación de acimut y ángulo de depresión, capacidad de radiogoniometría rápida y seguimiento de antena
5	Toda clase de mediciones de las transmisiones aeronáuticas de asistencia de vuelo	6	Puede necesitarse compensación de frecuencia por la velocidad relativa

b) coordinación de las actividades de vuelo

Se debe informar por anticipado a las autoridades aeronáuticas responsables del espacio aéreo en el que ha de realizarse la comprobación radioeléctrica, así como a quienes se encarguen del soporte logístico de la aeronave y sus tripulantes. La comprobación técnica requiere unos procedimientos de vuelo que pueden necesitar coordinación especial, sobre todo en zonas de intenso tráfico. De modo análogo, durante las actividades de coordinación conjunta habrá que tener en cuenta las estaciones de comprobación fijas y móviles en tierra.

c) actividades previas al vuelo

Además de la planificación operativa y la preparación de la misión de vuelo (plan de vuelo, revisión de la aeronave, carga de combustible, etcétera), deben examinarse cuidadosamente los datos obtenidos de las mediciones efectuadas en misiones anteriores, o de otros orígenes, con miras a elegir las funciones y los procedimientos automáticos del equipo de comprobación que hayan de utilizarse durante el vuelo.

Procedimientos operativos

La misión de vuelo para comprobación técnica implica diferentes procedimientos operativos dependiendo de las actividades cuya realización se solicita. Estos procedimientos deben ser objeto de una minuciosa planificación antes de cada misión.

Es probable, por ejemplo, que durante las misiones de comprobación técnica la aeronave tenga que volar siguiendo trayectorias predeterminadas, tales como rizos, a velocidad y altitud adecuadas.

La altitud de la misión puede determinar la zona supervisada, mientras que la velocidad influye en la precisión de las mediciones radiogoniométricas. Además, con respecto a la detección de las fuentes móviles de señales radioeléctricas interferentes, puede ser necesario determinar su posición por radiorrecalada a baja velocidad y altitud.

2.4.2.3.2 Ejemplos de aplicaciones

Los sistemas móviles de comprobación técnica instalados a bordo de una aeronave, avión o helicóptero son muy adecuados para trazar el diagrama de radiación de torres de antena en ambos planos horizontal y vertical. En algunos casos, tal vez sea también necesario utilizar un helicóptero o avión provisto de equipo de medida adecuado para localizar fuentes de interferencia no identificables por instalaciones de comprobación en tierra, como podrían ser las estaciones terrenas o las fugas procedentes de la televisión por cable, para analizar los fenómenos que puedan derivarse de la escasa separación entre transmisores de alta potencia en ondas métricas, y para medir los diagramas de radiación de antenas.

En algunas situaciones dentro de las grandes ciudades, donde las instalaciones móviles terrestres quedan "ensombrecidas" por obstáculos como edificios muy elevados que enmascaran la fuente de la señal o producen multitud de reflexiones, disponer de un helicóptero o avión convenientemente equipado proporciona un alto nivel de precisión en el posicionamiento y/o la organización de los movimientos de los equipos en tierra.

Deberá garantizarse que:

– pueda registrarse la altura y la distancia (o los datos de navegación, como convenga);
– las antenas estén fijadas de un modo seguro;
– los instrumentos de medición estén instalados adecuadamente;
– puedan recopilarse los datos necesarios;
– los instrumentos tengan alimentación durante todo el vuelo.

2.4.2.3.3 Requisitos de funcionamiento de la aeronave

Tomando en consideración las necesidades generales de las actividades y mediciones que han de realizarse para la comprobación técnica del espectro, los requisitos de funcionamiento de una aeronave que incorpora un sistema de comprobación técnica en vuelo deben ser los siguientes:

– aptitud para volar cualesquiera sean las condiciones climatológicas;
– maniobrabilidad y buena estabilidad para velocidades y altitudes bajas;
– adecuada capacidad de carga con el fin de acomodar todos los equipos y personal de comprobación técnica necesarios.

2.4.2.3.4 Requisitos técnicos de la aeronave

Las características técnicas necesarias para una aeronave que incorpora un sistema de comprobación del espectro deben satisfacer los criterios siguientes:

– facilidades de autopilotaje que permitan las operaciones de vigilancia siguiendo procedimientos planificados previamente (por ejemplo, configuraciones cuadradas o circulares);
– equipo de navegación electrónica a bordo para realizar todas las operaciones en vuelo instrumental; debe haber un sistema independiente de cómputo de la posición instantánea y la altitud de la aeronave interconectado a la unidad de procesamiento de la comprobación técnica;
– radio de acción que haga posible operar al menos durante dos horas en la zona sometida a observación en condiciones de plena carga, considerando niveles de altura incluso inferiores a 6 000 pies (1 800 m);

– gama de velocidades suficientemente amplia para permitir tanto las rápidas maniobras de transferencia como los procedimientos de radiorrecalada a baja altura.

2.4.2.3.5 Antenas

Para aplicaciones prácticas en vuelo, los aspectos relativos a la red de antenas absorben gran parte del trabajo de ingeniería y del costo de integrar el sistema radiogoniométrico en la aeronave. Para empezar, se han de determinar posiciones de la antena que sean físicamente compatibles con el fuselaje, se han de preparar los puntos de fijación de la antena a la aeronave para que puedan soportar las cargas mecánicas generadas por las antenas, se ha de prever el efecto de las antenas sobre las características de vuelo de la aeronave, se necesita una certificación de seguridad aérea de la aeronave y otros aspectos accesorios como los requisitos de antihielo de la antena. En consecuencia, la simplificación de la red de antenas se traduce en una reducción significativa en la complejidad de la integración del sistema.

a) sistemas de antena pasiva de aeronave

Se han incorporado a la aeronave sistemas de radiogoniometría de alta calidad de funcionamiento que utilizan redes de antena pasivas, cubriendo una gama de tamaños y capacidades que abarca todos los tipos de avión utilizados en vuelos de misión múltiple. La forma en cimitarra de las antenas de ondas métricas aumenta su longitud efectiva sin aumentar la longitud que sobresale de la superficie de la aeronave. El sistema funciona principalmente con señales de polarización aproximadamente vertical. En consecuencia, suelen elegirse antenas monopolo o dipolo.

b) sistemas de antena activa de aeronave

Las antenas activas ofrecen una anchura de banda extremadamente grande y una reducción de tamaño físico, al tiempo que mantienen una sensibilidad constante comparadas con las antenas pasivas. Las antenas activas han llegado a ser prácticas con los dispositivos activos de la nueva generación, principalmente los transistores de efecto de campo (FET) que permiten la transformación activa de impedancias manteniendo un alto margen dinámico del circuito.

2.4.2.3.6 Requisitos generales de los sistemas de a bordo

Todas las instalaciones de a bordo han de diseñarse y realizarse muy cuidadosamente a fin de garantizar la máxima seguridad y fiabilidad de la aeronave. Es importante mencionar que todo equipo utilizado en aviones debe cumplir tanto la reglamentación de la OACI como la nacional.

Entre los parámetros que pueden influir directamente en las operaciones de vuelo se cuentan los siguientes:

– peso del equipo y su ubicación a bordo, que no deben afectar en modo alguno la estabilidad de vuelo de la aeronave;

– solidez y rigidez de la estructura de la aeronave tras cualquier modificación de que sea objeto;

– aerodinámica de la aeronave después de la instalación de la antena del sistema de comprobación técnica;

– equilibrio térmico y de energía eléctrica.

Esta lista de parámetros muestra la importancia de efectuar una cuidadosa verificación cruzada para mejorar la fiabilidad del sistema y reducir el costo de funcionamiento.

Asimismo, es habitual en la aeronáutica aplicar procedimientos de mantenimiento simplificados (diseño modular y sistema de prueba incorporado), con la posibilidad de retirar y sustituir fácilmente los equipos averiados para su examen y calibrado en laboratorio; estos principios de mantenimiento exigen disponer de suficientes piezas y subsistemas de repuesto.

2.4.2.3.7 Criterios para configurar la estación de comprobación técnica de la aeronave

Los principales subsistemas de la estación han de basarse en los siguientes criterios:

a) sistema automático de determinación de la posición

La aeronave debe estar en condiciones de determinar su propia posición a fin de poder determinar la posición de la fuente de la señal sin recurrir a sistemas especiales auxiliares externos de trayectografía, exceptuando los aparatos radioeléctricos existentes; por ello su sistema de navegación ha de ser autosuficiente.

Además, acoplando el sistema de navegación (por ejemplo, sistema inercial y/o de satélite, diversos equipos radiotelemétricos a múltiples (DME)) a la unidad procesadora de comprobación técnica, se podrá calcular la posición de la fuente de las señales radioeléctricas cualquiera que sea el rumbo de la aeronave. Sin embargo, es ventajoso disponer de un sistema independiente de cálculo de la posición y la altitud que trabaje conjuntamente con la unidad procesadora de comprobación técnica.

b) Interfaz hombre-máquina eficiente

Las operaciones de comprobación técnica desde aeronaves han de hacerse en poco tiempo para cada tarea y con el personal de a bordo reducido al mínimo. Por tal razón, los equipos de comprobación técnica deben estar en condiciones de seguir procedimientos de medición programables y automáticos, y sólo se recurrirá a las operaciones manuales para tareas muy específicas.

En cualquier caso, los datos presentados han de poder interpretarse de inmediato, y de modo tal que el personal técnico de a bordo pueda conocer intuitivamente la posición de la aeronave en todo momento.

2.4.2.4 Estaciones marítimas de comprobación técnica

El entorno marino presenta una ventaja así como unos problemas exclusivos relativos al equipo que han de considerarse. La ventaja primordial de la comprobación técnica móvil efectuada desde el mar es que la zona que rodea a la embarcación generalmente es muy tranquila desde el punto de vista de radiofrecuencia. Entre los problemas se encuentran la corrosión atmosférica, la propagación multitrayecto por reflexiones en el mar de la energía radioeléctrica, el montaje de la antena y la propagación guiada por conductos de la radiofrecuencia sobre masas de agua caliente.

El entorno húmedo corrosivo acortará radicalmente la vida de los dispositivos electrónicos si no están diseñados específicamente para utilización en el mar. Esto suele requerir controles sellados, cajas filtradas y tratamiento contra los hongos; como alternativa, el equipo puede colocarse en un recinto climatizado. Para evitar que se acumule humedad tiene efectos beneficiosos aplicar una pequeña cantidad de calor, a menudo en forma de una lamparita nocturna o manteniendo encendido el equipo. Si se deja desatendido en una zona sin acondicionar un equipo electrónico no diseñado específicamente para ese entorno, sufrirá corrosión y provocará fallos eléctricos.

La puesta a masa (tierra) eléctrica suele ser difícil de conseguir a bordo de las embarcaciones.

El equipo radiogoniométrico debe estar instalado y calibrado especialmente para el buque. No es recomendable tener un equipo móvil que se monta y se desmonta. La antena del radiogoniómetro debe estar instalada en un punto elevado de la nave, en la medida posible libre de obstáculos a su alrededor. Un problema particular originado por la colocación elevada de la antena es que los nulos en el diagrama de radiación vertical se encuentran a pequeños ángulos de elevación y a longitudes de onda que corresponden aproximadamente al doble de la longitud del mástil. Cambiar la posición de la antena mejorará la recepción sólo en parte de la gama de frecuencias. Para resolver el problema conviene montar dos antenas a diferentes alturas, y conmutar de una a otra cuando sea necesario. La calibración real debe realizarse haciendo girar el barco los 360 grados de una vuelta completa. Se necesitan referencias de navegación y del norte vía satélite para obtener unas líneas exactas de rumbo y posición.

Si bien el movimiento de la nave puede crear problemas en la radiogoniometría instantánea, es posible compensar el efecto del cabeceo y balanceo del buque determinando la línea de marcación media.

La propagación multitrayecto de las señales de radiofrecuencia sobre el agua está afectada por el estado del mar. Incluso las aguas tranquilas producen dificultades por multitrayecto, pero éstas se acrecientan cuando la mar empeora.

La propagación por conductos es un fenómeno en el cual la energía de radiofrecuencia es atrapada o reflejada por un "conducto" formado en la atmósfera. Sobre masas de agua cálidas (por encima de unos 20 ºC) se tienden a formar conductos que aumentan en intensidad cuando sube la temperatura del agua y del aire. Durante la comprobación técnica móvil en el medio marino los efectos de propagación por conductos pueden hacer fracasar la interceptación de señales y además interceptar señales muy distantes que avanzan por el conducto con muy poca atenuación.

2.4.3 Estaciones de comprobación técnica transportables

Las estaciones de comprobación técnica transportables combinan algunas de las características y ventajas de las estaciones fijas y de las estaciones móviles. Pueden equipar el tipo de antenas de mayor apertura que normalmente se utilizan en estaciones fijas y pueden utilizarse en zonas de trabajo de mayor tamaño como ocurre con las estaciones móviles, ya que pueden desplegarse en distintas ubicaciones en función de las necesidades del servicio de comprobación técnica.

El equipo de las estaciones transportables se instala habitualmente en un contenedor, tal como se describe en § 2.6.2.2. Los contenedores pueden ser de tamaño reducido, con espacio exclusivamente para el equipo controlado a distancia, o disponer de un espacio mayor, para uno o varios operadores. Las antenas en ondas métricas y decimétricas de las estaciones transportables pueden instalarse en mástiles transportables que se elevan varios metros sobre el nivel del suelo.

Las estaciones transportables pueden incluir capacidades de radiogoniometría en ondas decamétricas, utilizando antenas transportables que se despliegan en un terreno adyacente. Dichas antenas permiten que el sistema transportable ofrezca una mayor apertura y, por tanto, obtener resultados de radiogoniometría muy precisos. Las antenas se desmontan cuando se desplaza la estación transportable.

Una estación transportable puede situarse en un emplazamiento concreto, en el suelo o sobre la cubierta de un edificio, por un periodo de tiempo dado y posteriormente ser trasladada a otro emplazamiento según las necesidades del servicio de comprobación técnica. Dicha estación no precisa de un vehículo dedicado tal como ocurre con las estaciones de comprobación técnica móviles; será necesario disponer de un vehículo u otra forma de transporte cuando se desee trasladar la estación transportable de un emplazamiento a otro.

En general, este tipo de estación de comprobación técnica puede operarse localmente pero también ser controlada a distancia desde una estación central. Los datos de las mediciones pueden transferirse a la estación central mediante una conexión de comunicaciones.

2.4.4 Equipo de apoyo adicional

Para que las actividades de comprobación técnica gocen de mayor flexibilidad, la mayoría de las estaciones de comprobación técnica, especialmente las móviles, pueden estar equipadas con equipos portátiles, como analizadores de espectro y antenas de medida de pequeño tamaño, receptores portátiles y antenas direccionales, que puedan ser manejados por una persona. Su peso moderado permite que sean transportadas por una persona a pié hasta emplazamientos inaccesibles a los vehículos, como por ejemplo, el interior de un edificio o el tejado de una casa.

Dichos instrumentos son necesarios para determinar la localización exacta de la interferencia o verificar sobre el terreno la conformidad del equipo de radio con los parámetros técnicos relevantes.

En el mercado existen aparatos portátiles que realizan medidas de campo en la gama de frecuencias de 150 kHz a 30 MHz, con antenas de cuadro directamente conectadas a la entrada del receptor. La precisión puede ser mejor que ± 2dB, con aparatos que son suficientes para la comprobación técnica y para verificar el cumplimiento del Reglamento de Radiocomunicaciones. No obstante, su sensibilidad es inadecuada para la medición de campos de muy baja intensidad, como son las emisiones no esenciales de un transmisor; en esos casos deben utilizarse aparatos de banda estrecha con mayor sensibilidad.

También existen aparatos portátiles que funcionan entre 20 MHz y 3 GHz. Dichos aparatos portátiles pueden estar equipados con una pequeña pantalla y con antenas de banda ancha de tamaño reducido, que resultan adecuadas para aplicaciones portátiles. No obstante, si son necesarias mediciones más sensibles y precisas, es fundamental utilizar un receptor de comprobación técnica o un analizador de espectro más sofisticado.

2.5 Control remoto del equipo de comprobación técnica

Un sistema moderno de comprobación técnica del espectro consta de un cierto número de estaciones de comprobación atendidas y desatendidas, fijas y móviles. La automatización y el control remoto de las estaciones de comprobación interconectadas en red aumentan sobremanera la eficacia del sistema entero, permitiendo que se compartan recursos entre diferentes operadores y se realicen funciones avanzadas como la localización automática de transmisores. También puede existir control remoto del equipo en vehículos que permiten el acceso de los pasajeros del compartimento delantero al equipo instalado en la parte trasera.

En la sección 3.6 se incluye información adicional sobre la automatización de la comprobación técnica, sus limitaciones y un ejemplo de realización práctica. La presente sección trata de la especificación de la arquitectura de comunicaciones.

2.5.1 Modos de operación a distancia e intercambio de información

Una estación de comprobación técnica distante podrá hacerse operar de diferentes maneras.

El control en línea de una estación permite al operador utilizar la estación distante de manera similar a como utilizaría una estación local. Implica la supervisión de la señal de audio y el intercambio de datos para el control del equipo. El establecimiento del enlace entre la estación y el operador puede tardar unos segundos (hasta un minuto en GSM), pero conseguido esto el operador debe tener un control continuo y en tiempo real de la estación.

Este modo es particularmente adecuado para la investigación de problemas de interferencia y la identificación de usuarios no autorizados.

Aunque la utilización de software comercial de propósito general para tareas de mantenimiento a distancia puede ser de utilidad, no es, por lo general, una buena solución para la explotación a distancia, ya que requiere una mayor anchura de banda en comparación con una arquitectura dedicada cliente – servidor que esté correctamente implementada.

El *modo por lotes o programado* permite cargar un conjunto de parámetros para una medición automática que haya de realizarse durante un periodo determinado y extraer los resultados más tarde (mediante transferencia de ficheros). Este modo de operación no requiere un enlace permanente sino que necesita capacidad de transferencia de datos al principio de la tarea así como al final de la misma.

Este modo es particularmente adecuado para tareas tales como mediciones de la ocupación de frecuencias. Sin embargo, dependiendo de diversos factores, tales como la duración de las mediciones, puede haber un gran volumen de datos a transferir. Por consiguiente, antes de la transferencia de datos deberá aplicarse un procesamiento previo y otros métodos de reducción de datos.

Dado que las tareas programadas pueden ocupar durante un largo intervalo de tiempo a una estación de comprobación técnica, es necesario que el sistema permita la interrupción y el reinicio de un proceso por lotes o programado para poder realizar tareas de mayor prioridad, como por ejemplo, radiogoniometría interactiva.

2.5.2 Arquitectura de red y líneas de comunicación

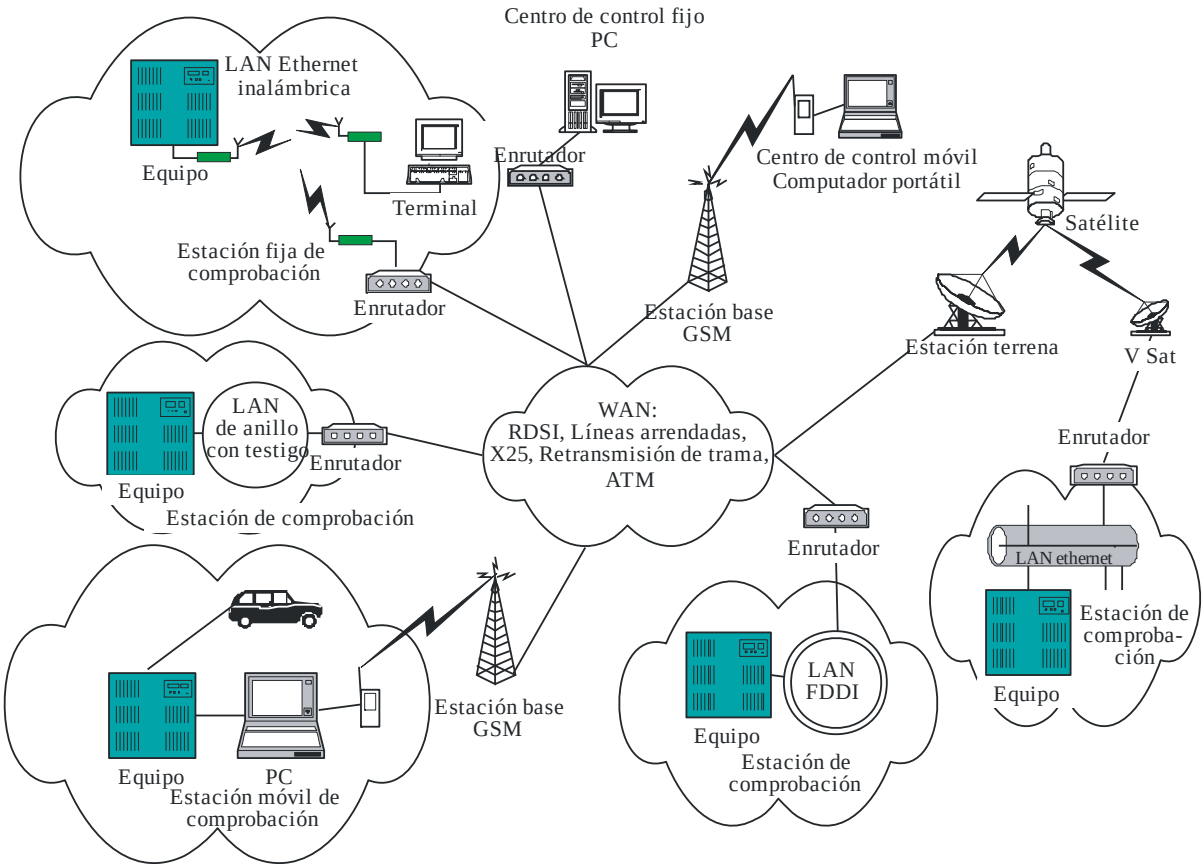
La elección de la arquitectura de red depende de varios requisitos expresados por el tiempo de establecimiento o de acceso (en el caso de redes conmutadas), velocidad de datos, retardo, disponibilidad de enlace y calidad de los enlaces. Asimismo es importante la naturaleza de la información a transferir, que puede ser digital o analógica. Dado que los equipos modernos generalmente transmiten en formato digital los datos analógicos como los de audio, prácticamente todos los datos pueden transferirse en formato digital.

El diseño de la arquitectura de red ha de tener en cuenta dos niveles de red (véase la figura 2.5-1). El primer nivel consiste en la interconexión con carácter local de diferentes dispositivos como los receptores y analizadores con un computador (mediante una conexión directa con el equipo o la conexión a través de una red de área local).

El segundo nivel es la red de zona extensa (WAN) merced a la cual se interconectan en red centros distantes y estaciones móviles de comprobación técnica y de radiogoniometría con fines de localización. Mediante una estructura de red en estrella a un segundo nivel, todas las estaciones de comprobación técnica disponen de un enlace directo con el centro de control, lo que permite mejorar el tiempo de establecimiento de llamada y el retardo durante la transferencia de datos.

FIGURA 2.5-1

Ejemplo de arquitectura de red



WAN: Esta red suele constar de varias LAN interconectadas mediante RDSI, X25, Retransmisión de trama, Red ATM

Spectrum-2.5-01

2.5.2.1 Interconexión de equipos en ámbito local

Casi todos los equipos de comprobación técnica, como receptores y radiogoniómetros, pueden ser conectados a un computador personal a través de algún tipo de interfaz.

La interfaz RS232, utilizada anteriormente para la conexión directa de algunos equipos con computadores personales, sólo ofrece velocidades limitadas de hasta 115 kbit/s. Además, actualmente ha dejado de ser una interfaz soportada por la mayoría de los computadores personales y por tanto no es recomendable para el control a distancia de los equipos.

IEEE488 (conocido como GPIB o bus IEC), es una conexión normalizada que aún se utiliza frecuentemente en equipos de comprobación técnica más antiguos. Permite la conexión de hasta 15 dispositivos y velocidades de datos del orden de 1Mbit/s a 8Mbit/s con una longitud máxima de cable de 5 m. Sin embargo, se requiere una interfaz física especial para que los computadores utilicen este tipo de conexión.

USB es una conexión local normalizada implementada en todos los computadores personales que ofrece velocidades de datos de hasta 240 Mbit/s (USB 2.0). Sin embargo, esta interfaz no está habitualmente implementada en equipos de comprobación técnica para control a distancia.

La interfaz más común que está presente en todos los computadores personales y que ha sido ampliamente adoptada por los fabricantes de equipos de comprobación técnica es la interfaz Ethernet/LAN. En función de la arquitectura de red y del cableado utilizado (cable coaxial, pares trenzados o fibra óptica) las velocidades de datos van desde 10 Mbit/s a 1 000 Mbit/s..

2.5.2.2 Red de telecomunicación de larga distancia

El acceso a una red de área extensa (WAN) puede realizarse a través de redes de telecomunicación fijas o por vía radioeléctrica (terrenal o por satélite). La solución real dependerá de los requisitos técnicos, la disponibilidad de un sistema específico y su costo.

2.5.2.2.1 Red de telecomunicación fija

La red de telecomunicación fija es adecuada para interconexión de estaciones de comprobación técnica fijas, transportables, y en casos especiales, también de estaciones móviles (explotadas en modo casi estacionario).

Red telefónica pública conmutada analógica

La red telefónica pública conmutada (RTPC) se caracteriza por un tiempo de establecimiento de llamada de pocos segundos, lo cual constituye un factor a tener en cuenta para las funciones de control de la comprobación técnica. Las velocidades que pueden conseguirse son adecuadas para los equipos de control (sintonización, ajuste de parámetros, carga y descarga de parámetros de comprobación técnica, etc.).

Líneas arrendadas analógicas

Las líneas arrendadas analógicas son enlaces permanentes, de características similares a las de la RTPC salvo en el tiempo de establecimiento, que aquí es nulo. Su costo suele ser relativamente bajo y depende de la distancia.

Líneas arrendadas digitales

Las líneas arrendadas digitales son enlaces digitales punto a punto, generalmente a velocidades desde 56 kbit/s en adelante. Tal vez no se disponga de líneas de este tipo en algunas regiones o ciertos países. Las líneas arrendadas digitales pueden ofrecer grandes capacidades, un bajo retardo y una buena fiabilidad. Su costo es, en general, relativamente elevado y depende de la velocidad de datos y la distancia.

Red digital de servicios integrados

La red digital de servicios integrados (RDSI) es una red telefónica conmutada digital que proporciona dos canales B de 64 kbit/s cada uno, más un canal D de 16 kbit/s. El costo del canal B suele depender de la duración y la distancia. El tiempo de establecimiento de la llamada es generalmente menor de 1 segundo.

Red de paquetes pública X25

Las redes de paquetes públicas X25 ofrecen enlaces de datos permanentes o semipermanentes a un costo que suele depender del volumen, pero no de la distancia. También son muy adecuadas para mensajes cortos esporádicos.

Red de retransmisión de tramas

Es un servicio de red de paquetes, que se apoya en la integridad de datos característica de las transmisiones digitales para conseguir velocidades de transmisión más elevadas (hasta 2 Mbit/s); fue creado para evitar los retardos de las redes X25.

XDSL (ADSL, VDSL)

Las tecnologías de línea de abonado digital (DSL, ADSL, VDSL) permiten añadir un flujo de datos a los pares de cobre existentes utilizados para la RTPC. Los datos DSL se cursan simultáneamente con las llamadas de voz de la RTPC en la misma línea, permitiendo añadir capacidad de transmisión de datos al cableado existente.

Red ATM (modo de transferencia asíncrono)

Las tecnologías ATM permiten tratar información multimedios, incluida voz y vídeo, con sus restricciones en tiempo asociadas a velocidades muy elevadas (de 25 Mbit/s hasta 2,4 Gbit/s). Es igualmente adecuada para redes LAN y WAN, por lo que ofrece la posibilidad de conectar máquinas a través de LAN y WAN utilizando la misma tecnología de extremo a extremo.

2.5.2.2.2 Redes radioeléctricas de telecomunicaciones

Una red radioeléctrica de telecomunicación es apropiada para conectar estaciones de comprobación técnica transportables y móviles instaladas en zonas aisladas en las que no hay disponibles enlaces de telecomunicaciones alámbricas, y para la conexión a la red de las estaciones móviles de comprobación técnica.

Enlaces de radiocomunicación móvil públicos 2G

Las redes radioeléctricas basadas en las normas 2G, por ejemplo las GSM, IS-95, han sido ampliamente desplegadas y ofrecen con facilidad conexiones con velocidad de datos de 9,6 kbit/s. Pueden ser suficientes para mantener un control en línea de equipos sencillos (sin transferencia de imágenes ni de grandes ficheros). Las normas mejoradas de radiocomunicación móviles públicas tales como GPRS y EDGE ofrecen velocidades de datos mejoradas de hasta 473 kbit/s.

Enlaces de radiocomunicación móvil públicos 3G

Las redes radioeléctricas basadas en las normas 3G/3.5G son consecuencia de la normas IMT-2000 del UIT-R, por ejemplo, UMTS y CDMA 1X. Las ampliaciones de las mismas, como las normas de acceso de paquetes de alta velocidad (HSDPA, HSUPA) permiten velocidades de datos de hasta 14,4 Mbit/s.

Enlaces de radiocomunicación públicos 3.9G y 4G

Los últimos desarrollos en redes de comunicaciones inalámbricas digitales han sido diseñados para proporcionar velocidades de datos a partir de 20 Mbit/s. Estas velocidades permiten un control directo en línea de los equipos de comprobación técnica, incluyendo datos I/Q, video, audio y transferencia de grandes ficheros. WiMAX y LTE son ejemplos de tecnologías asociadas a esta norma.

WLAN (IEEE 802.11)

Esta norma de comunicación privada de datos inalámbricos ofrece velocidades de datos de varias decenas de Mbit/s utilizando equipos muy baratos y comercialmente disponibles. Las distancias están por lo general limitadas a la visibilidad directa. Dado que estos enlaces funcionan normalmente en las bandas ICM (equipos industriales, científicos y médicos), la fiabilidad es baja pues pueden producirse interferencias de usuarios del mismo canal.

Todas las redes de radiocomunicaciones que emitan en la estación y en sus proximidades pueden afectar a las antenas activas de comprobación técnica, receptores, sistemas de radiogoniometría y otros equipos de la estación de comprobación técnica. Debe tenerse espacial precaución con las tecnologías inalámbricas utilizadas en la comprobación técnica para que no afecten negativamente a las actividades de comprobación técnica.

2.5.2.2.3 Redes de satélite

Redes de terminales de muy pequeña abertura

Las redes de terminales de muy pequeña abertura (VSAT) pueden proporcionar transmisión de datos en zonas sumamente extensas sin necesidad de una infraestructura de telecomunicaciones terrenal.

Los terminales VSAT son muy adecuados para enlazar estaciones dispersas en países muy extensos, en localizaciones que no están correctamente atendidas por las redes de telecomunicaciones públicas, a velocidades desde 64 kbit/s hasta 2 Mbit/s. Es característico de las redes VSAT su retardo relativamente largo (aproximadamente 600 ms y superior).

2.5.3 Flujo de datos y posibles implementaciones

La transmisión de datos entre los elementos de un sistema de comprobación técnica puede tener las características siguientes:

– La transmisión de información fundamental desde las estaciones de comprobación técnica al centro de control, como por ejemplo, la marcación y nivel de intensidad de campo, puede realizarse a velocidades tan bajas como 9 kbit/s. Para la transmisión de vídeo, audio, representaciones gráficas del espectro, espectros I/Q, acceso a distancia a computadores personales y transferencia de grandes ficheros, es necesario disponer de capacidad adicional.

– El centro de control transmite a las estaciones de comprobación técnica información sobre asignaciones de comprobación técnica, instrucciones para radiogoniómetros sincronizados, respuestas a peticiones de la base de datos del centro e información de servicio. Típicamente, cada centro de control generará una velocidad de datos de al menos 9 kbit/s hacia cada estación de comprobación técnica, aunque puede ser necesaria capacidad adicional

– Los centros de control pueden intercambiar entre sí datos de sus bases de datos locales e información de servicio, generándose velocidades de datos de 10 a 150 kbit/s. Esta estimación no tiene en cuenta otras necesidades de los centros de control (acceso a Internet o correo electrónico).

La lista anterior evidencia que, en términos de la velocidad de datos requerida, el tráfico entre los elementos de un sistema de comprobación técnica es frecuentemente asimétrica. La transmisión de datos desde las estaciones de comprobación técnica al centro de control constituye la mayor demanda de anchura de banda de las líneas de comunicaciones. En el Cuadro 2-5.1 se enumeran algunas aplicaciones de medida típicas, las velocidades de datos requeridas y posibles técnicas de comunicación que pueden utilizarse para las mismas. Los valores presentados deben considerarse solo una orientación, dado que las implementaciones reales pueden variar considerablemente teniendo en cuenta lo siguiente:

– El software implementado para las funciones de control a distancia (actualización completa de las pantalla o sólo de los datos que hayan cambiado).

– Técnicas de compresión de datos.

– Velocidad de actualización deseada.

– Implementación particular de dichas tecnologías por los proveedores de red/servicio así como otros factores.

CUADRO 2.5-1

Velocidad de datos e implementaciones típicas

Transferencia de…	**Velocidad de datos típica**	**Enlaces de comunicación alámbricos adecuados (mínimo)**	**Enlaces de comunicación inalámbricos adecuados (mínimo)**
Instrucciones y resultado de mediciones (para frecuencias individuales), resultados de radiogoniometría (para una única frecuencia)	9 kbit/s – 64 kbit/s	RTPC analógica, líneas arrendadas, RDSI	Enlaces radioeléctricos privados en ondas decamétricas, métricas y decimétricas; TETRA; GSM
Funciones de control descritas anteriormente, más el trayecto de retorno para audio digitalizado (banda estrecha)	16 kbit/s – 128 kbit/s	líneas arrendadas digitales, RDSI	GSM con (GPRS/EDGE), IS95
Resultados de la exploración de frecuencias, representación espectral en línea o pantallas para visualización de la frecuencia instantánea (resolución normal); Control a distancia de computadores (transferencia del contenido de las pantallas), resultados de radiogoniometría (para varias frecuencias)	64 kbit/s – 1 Mbit/s	Retransmisión de tramas, ADSL VDSL	IS95; CDMA 1X; UMTS; VSAT
Información espectral en bruto de banda amplia (datos I/Q)	1 Mbit/s a más de 1 Gbit/s (en función de la anchura de banda de la señal)	VDSL, ATM, LAN	UMTS con HSPA; WiMAX; LTE; WLAN Enlaces de microondas

La transferencia fuera de línea de tareas y resultados de medición no es crítica desde el punto de vista temporal. En ese caso, puede utilizarse cualquier velocidad de datos disponible. Obsérvese que los ficheros con resultados pueden tener un tamaño de muchos Mbytes y que las líneas de baja velocidad pueden ofrecer tiempos de transferencia inaceptables.

2.5.4 Nota sobre protocolo y soporte lógico

Como ya queda expuesto, existe una gran variedad de redes de telecomunicación, lo cual permite adoptar una configuración flexible y seleccionar la red de telecomunicación en base a la situación real. La utilización del protocolo TCP/IP permite que el funcionamiento sea totalmente transparente, y que la manipulación y control del enlace de comunicación se realice mediante equipos de comunicación modernos (enrutadores), permitiendo que el equipo terminal o de medida se concentre en otros procesos.

Si bien en una LAN pueden utilizarse diferentes sistemas y protocolos, para facilitar su administración durante la explotación, es recomendable utilizar el mismo sistema operativo en todos los elementos de la red.

Los fabricantes han desarrollado diferentes tipos de software para sus equipos de comprobación técnica. No obstante, puede ser de utilidad desarrollar un software general (integrado) que se adapte a la mayoría, si no a todos, los equipos de comprobación técnica que se controlan a distancia. De esta forma los operadores sólo se enfrentarían a un único y bien conocido interfaz de usuario para un control eficaz de los equipos.

Si varios operadores acceden a la red de comprobación técnica, puede ser conveniente adoptar un control de acceso de varios niveles para evitar conflictos de funcionamiento.

2.5.5 Seguridad del sistema y método de acceso

Los sistemas informatizados de comprobación técnica del espectro son vulnerables ante ataques de "piratas informáticos" y al deterioro de los datos. Los ataques pueden producirse por acceso físico a los computadores o consolas desde una localización distante a través de una red de computadores, o por simple observación pasiva de los datos enviados por un enlace de comunicaciones. El ataque puede amenazar la integridad y confidencialidad de los datos o interrumpir el funcionamiento del sistema. Proteger al sistema después del ataque puede ocasionar mayores costos a causa del tiempo necesario para localizar y reparar los datos alterados en el sistema.

La amenaza de ataques puede minimizarse utilizando técnicas de seguridad informática de un nivel adecuado a la potencial pérdida. Son ejemplo de ello los siguientes:

– asegurar el computador y equipo de red en un área cerrada (seguridad física).

– utilizar técnicas de control de acceso, tales como contraseñas y privilegios multinivel, para restringir el acceso de los usuarios a las funciones del sistema (seguridad lógica).

– ejecutar periódicamente funciones de mantenimiento de sistema, como son las copias de seguridad, comprobaciones de seguridad y otras que recomiende el fabricante (seguridad lógica).

– la información que se envía a la red de telecomunicación puede codificarse, pero desgraciadamente esta solución puede reducir la velocidad del proceso (seguridad lógica).

– utilizar enlaces y enrutadores de comunicaciones que puedan protegerse contra ataques externos (seguridad lógica).

– establecer una red privada virtual (VPN) si se utilizan tecnologías basadas en la red pública. Las VPN generan automáticamente una capa de protocolo adicional para los datos de usuario y restringen el acceso a componentes "conocidos" del sistema. Numerosos módem y enrutadores actuales soportan esta técnica y pueden utilizarse en todos los medios de comunicación mencionados en § 2.5.2.2.

2.6 Emplazamientos, edificios y equipos

2.6.1 Emplazamiento de las estaciones de comprobación técnica

2.6.1.1 Generalidades

Esta sección proporciona las directrices generales que deben seguirse para la elección de la ubicación de una estación de comprobación técnica e identifica algunos de los errores que han de evitarse. Antes de proceder a la elección de la ubicación, el grupo de planificación del proyecto debe conocer ciertas informaciones esenciales para que la estación cumpla adecuadamente las funciones previstas. Ello incluye lo siguiente:

– gamas de frecuencias y zonas geográficas que han de cubrirse (véase además el § 2.1.3.3);

– qué comprobación técnica es más importante, la que se efectúa a escala nacional o la de las señales procedentes del exterior de las fronteras;

– necesidad de instalaciones especiales como radiogoniómetros de largo alcance, aparatos de registro de la intensidad de campo o antenas directivas;

– intensidades de campo admisibles en el emplazamiento producidas por transmisores próximos en las bandas de frecuencias consideradas;

– consideraciones administrativas tales como las posibilidades de alojamiento, la existencia de un centro comercial, escuelas, transportes locales y servicios públicos;

– costo del terreno.

La importancia de las consideraciones administrativas no debe subestimarse. La experiencia ha demostrado que es difícil retener a personal técnico cualificado en las estaciones civiles de comprobación técnica si no se tienen al alcance los servicios normalmente esperados. Deberán tenerse en cuenta para las decisiones de emplazamiento de estaciones de comprobación técnica los cambios demográficos y las expectativas de crecimiento físico de la zona que se considere con miras a evitar intrusiones indebidas.

2.6.1.2 Condiciones mínimas deseables para el emplazamiento de una estación

Los emplazamientos destinados a estaciones de comprobación técnica del espectro deben reunir condiciones adecuadas para radiofrecuencias y cumplir tres principios importantes. Deberán, en efecto:

– localizarse en lugares apropiados a la zona que se va a supervisar (cobertura geográfica adecuada);

– estar protegidos contra obstáculos;

– tener protección electromagnética.

En la medida en que sea posible, debe seleccionarse un emplazamiento en el que los campos de las emisiones a registrar estén relativamente libres de perturbación por estructuras locales o accidentes del terreno. En particular, los emplazamientos destinados a mediciones por debajo de unos 30 MHz deben presentar un suelo liso situado en una zona relativamente llana, de conductividad moderadamente elevada y libre de grava o afloramientos de rocas. Los conductores descubiertos, edificios, grandes árboles, colinas y otros accidentes artificiales y naturales de las cercanías pueden distorsionar o perturbar gravemente el frente de ondas de la emisión. El grado en que estas condiciones pueden limitar la validez de las mediciones depende de varios factores entre los que se incluyen la gama de frecuencias y el tipo y orientación de la antena utilizada. En las gamas métricas y decimétricas, en las que se utilizan antenas muy directivas, es importante que esté despejado el trayecto en la dirección general de la fuente de señal; además, debe reducirse al mínimo la recepción por multitrayecto debida a reflexión local o a nueva radiación de la señal deseada.

Si el propio emplazamiento no cumple los principios enunciados anteriormente para las gamas de frecuencias métricas y decimétricas, la situación puede mejorar sustancialmente erigiendo torres de antena con suficiente separación de los obstáculos cercanos. Con miras a evitar los errores de marcación y otras influencias mutuas indebidas de las antenas no siempre será posible agrupar todas las antenas en una torre. Como mástiles de antena pueden utilizarse torres de celosía o de hormigón. Dependiendo de las condiciones locales puede ser menos costoso levantar una torre de celosía, pero también hay que tener en cuenta los costos recurrentes de mantenimiento. La torre tiene que resistir las condiciones meteorológicas de la zona, es decir la carga del viento y del hielo. Además, ha de ofrecer un acceso fácil y seguro a las antenas, al equipo de amplificadores, filtros y conmutación instalado cerca de las antenas y al pararrayos situado en lo alto de la torre.

La ubicación debe estar alejada de cualquier aglomeración industrial o barrio residencial de gran densidad, existentes o previsibles. Conviene que haya una distancia de 1 km como mínimo, o incluso mayor, a ciertos tipos de establecimientos que utilicen soldadores eléctricos, dispositivos de calefacción industrial de gran potencia, equipos de diatermia, precipitadores de humo y otras máquinas que produzcan niveles apreciables de energía en radiofrecuencia. En lo que respecta a la protección contra los campos intensos de transmisores radioeléctricos, véase el § 2.6.1.4.

Las líneas de energía de alta tensión pueden ser una fuente de interferencia de ruido de banda ancha si se encuentran cerca del edificio o de las antenas de la estación de comprobación técnica. Es conveniente prever una distancia mínima de al menos 2 km a las líneas de energía de tensión superior a 100 kV, y puede necesitarse una distancia mucho mayor (hasta 10 km) en el caso de líneas de muy alta tensión o si se desea efectuar una amplia comprobación de señales de muy baja intensidad.

En general hay que evitar la proximidad de aeropuertos o helipuertos, especialmente en las frecuencias superiores, porque las aeronaves que vuelan a baja altura reflejan energía suficiente para producir una reflexión por trayectos múltiples y desfasar la recepción de las señales que se pretende comprobar. La experiencia ha demostrado que los aeropuertos deberían distar más de 8 km en la dirección de la pista, y de 3 a 4 km en las otras direcciones.

Las carreteras muy transitadas deben estar suficientemente alejadas (por ejemplo, 1 km) del equipo de comprobación (incluidas las antenas) para minimizar la interferencia producida por la ignición de los motores. La ubicación debe ser accesible por carretera practicable en todo tiempo y contar (u ofrecer la posibilidad de contar) con los servicios públicos apropiados, como energía eléctrica, distribución de agua y servicio telefónico. Si la estación de comprobación técnica ha de incluir un radiogoniómetro, hay que conceder la máxima prioridad a las condiciones de emplazamiento para radiogoniómetros señaladas en el § 2.6.1.3. Estos criterios no pueden ser discutidos si se requiere precisión en las marcaciones.

2.6.1.3 Condiciones adicionales deseables para el emplazamiento de estaciones equipadas con radiogoniómetros

Además de las condiciones indicadas en el punto anterior, si ha de instalarse un radiogoniómetro conviene que no existan obstáculos tales como montañas, colinas, grandes estructuras artificiales u otras barreras que se eleven a ángulos de más de 3º por encima de la horizontal, según se ve desde el emplazamiento propuesto o desde el radiogoniómetro. A menos de 1000 m de la ubicación del radiogoniómetro no debe haber valles ni depresiones importantes, y conviene que la distancia a esos accidentes del terreno sea aún mayor.

La desviación máxima del terreno con respecto a la elevación del suelo de referencia en el centro del radiogoniómetro no ha de exceder de alrededor de 1 m dentro de una distancia de 200 m, a fin de evitar elevados costos de preparación del terreno al instalar el radiogoniómetro. Una vez completada su instalación, la superficie debe ser esencialmente plana dentro de un radio de varios centenares de metros desde su emplazamiento (o ligeramente convexa para facilitar el drenaje del agua).

Hay que evitar elegir para la ubicación del radiogoniómetro un lugar en el que la proporción de suelo húmedo o de alta conductividad eléctrica sea elevada. Si se descubren discontinuidades en el subsuelo, sobre todo si hay particularidades del terreno que las ponen de manifiesto, habrá que buscar otra ubicación.

A menos de estar enterrados a gran profundidad, los grandes conductos o tuberías metálicas (por ejemplo, los oleoductos) pueden introducir errores en las mediciones radiogoniométricas si se encuentran en la vecindad inmediata del radiogoniómetro. Se recomienda una separación mínima de 200 m.

Cuando haya una estructura única de media longitud de onda ($\lambda/2$), resonante en cualquier frecuencia comprendida en la gama de funcionamiento del radiogoniómetro, ésta debe distar al menos 15 longitudes de onda. Cualquier estructura única de un cuarto de onda ($\lambda/4$), resonante en cualquier frecuencia comprendida en la gama de funcionamiento del radiogoniómetro y situada en el mismo plano de polarización, deberá distar por lo menos 7 longitudes de onda. Por ejemplo, a una frecuencia de funcionamiento de 25 MHz (λ = 12 m), un objeto conductor de longitud 6 m ($\lambda/2$) debe estar al menos a 180 m de distancia del radiogoniómetro.

NOTA 1– Cuando se adviertan varias estructuras de un cuarto o de media longitud de onda a una distancia razonable del radiogoniómetro, puede necesitarse un estudio especial.

El funcionamiento de las turbinas eólicas en la proximidad de radiogoniómetros puede deteriorar las prestaciones de éstos. La dispersión causada por las aspas se presenta en forma de variaciones de amplitud lentas y pequeñas a la frecuencia de repetición de rotación geométrica (un tercio de la velocidad de rotación) de las aspas, así como una interferencia de gran amplitud y corta duración (unos 30 ms). En la región de dispersión hacia delante, la antena receptora que apunta hacia el transmisor sujeto a comprobación técnica también apunta hacia la granja de turbinas eólicas y la directividad de la antena ayuda poco a reducir los efectos de la interferencia. La altura de la antena de comprobación técnica puede ser crítica, ya que las reflexiones en el suelo pueden producir reducciones significativas de la señal (véase el informe UIT-R BT.2142, Efecto de la dispersión de señales de televisión digital por una turbina eólica, página 47).

Por debajo de 30 MHz, el ruido artificial adicional, generado por el hombre, y procedente de las turbinas eólicas puede también degradar la sensibilidad. Si las turbinas eólicas obstruyen la línea de visibilidad directa entre la antena de comprobación técnica y la señal transmitida, puede disminuir la precisión de la medición.

a) Radiogoniómetros que funcionan por debajo de 30 MHz

Los requisitos enumerados seguidamente y en el Cuadro 2.6-1 son de particular importancia al elegir un emplazamiento para estaciones radiogoniométricas que operan por debajo de 30 MHz. En general, el emplazamiento deberá tener un suelo de conductividad uniforme y elevada, de superficie llana, suficientemente alejado de todos los obstáculos metálicos y especialmente de las líneas de transporte de energía de alta tensión, a suficiente distancia de toda canalización o conducción metálica incluso enterrada, de líneas ferroviarias, carreteras, zonas pobladas, arboledas, edificios, etcétera.

Las ubicaciones más convenientes son aquellas en las que el suelo es llano y la capa freática está próxima a la superficie. Cuando el país es montañoso, convendrá elegir una meseta cuyo suelo tenga la mayor conductividad posible y que domine el terreno circundante.

CUADRO 2.6-1

Distancias mínimas entre los obstáculos y el radiogoniómetro

Obstáculo	Distancia mínima (m)
Edificios no metálicos de un solo piso: Edificio aislado Grupo de edificios	 100 (en ondas decamétricas, dependiendo del tamaño y forma de la antena, más de 100) 200
Edificios no metálicos de dos o tres pisos	250
Edificios no metálicos de más de tres pisos	300 o más, dependiendo de la altura
Pequeños edificios con techos metálicos	250
Estructuras metálicas (pequeños hangares, etc.)	800
Depósitos, grandes estructuras metálicas, puentes metálicos	Más de 1500
Líneas telefónicas aéreas, líneas de baja tensión	250-300
Líneas de alta tensión con torres de 20 m de altura	1000
Líneas de alta tensión con torres de 30 m o más	2000-10.000
Líneas de ferrocarril o tranvía	1000
Turbinas eólicas	2000 de turbinas eólicas individuales 5000 de granjas de turbinas
Árboles aislados	100
Grupos pequeños de árboles	200
Bosques	800
Cercas metálicas	200 (en decamétricas, dependiendo del tamaño y forma de la antena, más de 200)
Pequeñas antenas	200
Grandes antenas	400
Lagos, estanques, ríos	1000

Las reglas que, en la medida de lo posible, deben observarse son las que, a título indicativo, se enumeran seguidamente:

– el terreno no debe tener pendientes superiores al 1% en un radio de 100 m en el caso de instalaciones para ondas decamétricas, y de 250 m para instalaciones que operen en ondas hectométricas y kilométricas;

– fuera de la zona indicada precedentemente, las pendientes pueden ser más pronunciadas a medida que aumenta la distancia, pero deben evitarse cambios excesivos o repentinos del nivel del terreno;

– el ángulo formado entre la horizontal y la línea que une la antena del radiogoniómetro con la parte superior de un obstáculo cualquiera no debe ser superior a 2º o 3º;

– el terreno debe estar totalmente despejado, por lo menos en una zona de 200 m de radio en torno de la antena;

– todos los cables de entrada conectados a la antena del radiogoniómetro deben enterrarse a 1 o 2 m de profundidad dentro de una distancia de 30 m desde el centro de las antenas; la profundidad puede reducirse luego a unos 0,5 m a distancias entre 30 y 250 m.

Es recomendable que las antenas radiogoniométricas se sitúen lo más lejos posible de otras antenas de comprobación, puesto que las antenas receptoras de la estación de comprobación técnica obstruyen la propagación regular de las ondas radioeléctricas y por ello introducen errores en las marcaciones obtenidas.

En el caso de una instalación Adcock, es conveniente que el primer tramo de los cables siga la línea correspondiente a uno de los pares de antena o, de no ser esto posible, que se tienda a un ángulo de 45º con respecto a cada par.

El Cuadro 2.6-1 da completa información sobre las distancias mínimas que deben dejarse entre el centro de las antenas y los obstáculos más próximos a fin de no interferir excesivamente en las marcaciones.

b) Radiogoniómetros que funcionan por encima de 30 MHz

Cuando los radiogoniómetros funcionan en ondas métricas/decimétricas, las distancias mínimas indicadas en el Cuadro 2.6-1 pueden reducirse.

Como las estaciones de comprobación técnica en ondas métricas/decimétricas a menudo han de instalarse en áreas urbanas de alta densidad o en su vecindad, por ejemplo en tejados de edificios, puede ser oportuno definir las zonas de protección. Deben considerarse dos tipos diferentes de zona.

En las del primer tipo, de menor extensión, puede estar limitado el empleo de equipos radioeléctricos fijos y móviles. Por razones prácticas será difícil hacer cumplir esta condición fuera del propio recinto de la estación. En zonas más extensas, puede restringirse el empleo de equipos industriales, científicos y médicos (ICM) de elevada potencia y el levantamiento de grandes obstáculos como edificios de muchos pisos y plantas industriales. Las exigencias legales previas al establecimiento de tales restricciones varían totalmente de un país a otro.

2.6.1.4 Protección contra los campos intensos procedentes de transmisores

Los emplazamientos de estaciones de comprobación técnica deben estar libres de emisiones intensas y otras fuentes de interferencia puesto que, dependiendo de las gamas de frecuencia que haya que cubrir, la presencia de transmisores radioeléctricos cercanos puede limitar gravemente las capacidades de comprobación debido a intermodulación y efectos de bloqueo.

Para evaluar los posibles efectos adversos de tales transmisores, hay que tener en cuenta no sólo la intensidad de campo de la frecuencia fundamental sino también la de las frecuencias armónicas. Se ha de considerar la presencia de varios transmisores, aunque sus frecuencias sean muy distantes de las frecuencias de interés de la estación de comprobación técnica, porque los productos de intermodulación resultantes pueden caer dentro de la gama de frecuencias de dicha estación.

Con base en la experiencia, puede considerarse aceptable un nivel de intensidad de campo de valor cuadrático resultante (raíz cuadrada de la suma de los cuadrados) de 30 mV/m para señales múltiples comprendidas en la banda de paso del receptor de comprobación técnica, lo que corresponde a una distancia aproximada de 5 km entre un transmisor de 1 kW y la estación de comprobación, dependiendo de la frecuencia, el terreno y el equipo utilizado.

La gestión administrativa del espectro deberá investigar cuidadosamente todas las solicitudes de licencia para transmisores fijos dentro de un radio de 5 km, e incluso dentro de un radio de 50 km para transmisores de más de 1 kW, y no expedir licencias para ningún tipo de transmisor radioeléctrico que sobrepase un nivel de 30 mV/m medido en la estación (o estaciones) de comprobación técnica.

Si ha de ubicarse una estación de comprobación técnica en una zona de señal intensa, por lo menos hay que evitar la instalación de dispositivos de antena activos.

2.6.1.5 Protección frente a sistemas informáticos locales

En muchos casos se ha encontrado que diversos componentes de sistemas informáticos pueden emitir señales electromagnéticas y producir interferencias al equipo de comprobación técnica y de medición. Aunque ahora ya existan equipos informáticos de baja interferencia destinados a sistemas de comprobación técnica radioeléctrica, la mayoría de los sistemas informáticos utilizados son computadores personales (PC) típicos.

Una vez instalado un sistema de computadores, es muy difícil detectar el origen de la interferencia dado que el equipo y sus componentes periféricos están normalmente "distribuidos" en varias habitaciones, o incluso en el edificio de comprobación técnica entero. Las señales interferentes pueden ser emitidas por los componentes y/o conducidas a través de los cables del computador. Además, las señales interferentes no sólo suelen producirse en las frecuencias fundamentales (de reloj) sino en las frecuencias armónicas. La manera más apropiada de detectar el origen de la interferencia será pues desactivar y desconectar los diversos componentes del computador.

En cualquier caso, el servicio de comprobación técnica debe observar las siguientes recomendaciones:

– Sólo deben utilizarse cables coaxiales de doble apantallamiento para las conexiones entre las antenas y el equipo de recepción.

– Deben también utilizarse cables apantallados para conectar los componentes individuales del sistema de computador.

– Siempre que sea posible, no se instalarán equipos de computador de aplicación general cerca del equipo receptor y de medición.

– En el caso de interferencia, deberá desconectarse o desactivarse todo equipo de computador que no sea necesario.

– En general, los locales de comprobación técnica deben situarse cerca de las antenas y estar separados de los locales administrativos.

– Todas las medidas destinadas a evitar o reducir al mínimo la interferencia producida por equipos de computador han de incorporarse en la fase de planificación de la estación de comprobación técnica. Se recomienda pedir consejo a los servicios de comprobación técnica con experiencia en esta materia.

2.6.1.6 Necesidades de terreno

La extensión de terreno necesaria para una estación de comprobación técnica y la disposición de sus equipos depende en gran medida del cometido y las actividades que se asignen a la estación y de que esté atendida o no. Una estación destinada a la comprobación técnica en ondas decamétricas requiere mucho más espacio para las antenas del sistema radiogoniométrico que aquellas en las que la tarea más esencial es la radiogoniometría en ondas métricas/decimétricas o la comprobación local. Las estaciones que registran intensidades de campo exigen una superficie adicional para que haya una separación suficiente respecto de los conductores aéreos y de otros obstáculos que influyen en las antenas.

La actividad ejercida en los terrenos circundantes es también un factor importante. Por ejemplo, si una estación de comprobación técnica se encuentra en una zona de cultivo o de pastoreo, habrá menos peligro de que sufra interferencia que si se halla en una zona en la que existan o estén proyectadas fábricas u otras posibles fuentes de perturbaciones. Para evitar que la ubicación de una estación de comprobación técnica se torne más desfavorable debido a la implantación de fuentes de interferencia muy próximas al radiogoniómetro o las antenas, a menudo conviene adquirir parcelas adicionales que garanticen el necesario aislamiento respecto de tales fuentes. Estas tierras pueden arrendarse para utilización agrícola.

En el supuesto de que los terrenos circundantes dedicados a la agricultura o no utilizados aseguren una protección adecuada contra eventuales fuentes de interferencia, una superficie de 40 000 a 160 000 m^2 será suficiente para una estación de comprobación técnica atendida con radiogoniómetro en métricas/decimétricas y con necesidades limitadas de antenas directivas en hectométricas o decamétricas. Para la instalación de un radiogoniómetro en ondas decamétricas, se necesita una zona separada de hasta 90 000 m^2, dependiendo de su diseño. Teniendo en cuenta los valores dados en el Cuadro 2.6-1 para las distancias mínimas, resulta obvio que se necesitan superficies de 400 000 m^2 o todavía mayores si no puede garantizarse por otros procedimientos una protección adecuada, y todos los equipos e instalaciones han de estar ubicados en una parcela de terreno continua. Las estaciones de comprobación técnica que tengan necesidad excepcional de un gran radiogoniómetro de largo alcance para uso en frecuencias inferiores a las de ondas decamétricas, con un número limitado de grandes antenas directivas para la comprobación técnica, y provistas de equipo de radiocomunicaciones, pueden necesitar una superficie de 320 000 m^2 a 640 000 m^2, dependiendo de los diseños de las antenas. En ciertos casos excepcionales, con estaciones de comprobación técnica que poseen

varias antenas directivas grandes destinadas a la comprobación, aparatos aislados para registro de la intensidad de campo y funciones separadas de control o retransmisión en una red radioeléctrica, la extensión requerida puede llegar a 1 200 000 m^2.

La superficie necesaria para instalar una estación de comprobación técnica en métricas/decimétricas controlada a distancia está determinada primordialmente por el tamaño de la torre de antena. Una superficie de 30 m^2 puede ser suficiente para la torre de antena y una caseta de equipo. Si el mástil de antena se eleva a 80 m, por ejemplo, pueden necesitarse más de 100 ó 200 m^2.

También se deben considerar los aspectos legales relativos a la seguridad de explotación y la seguridad pública. Como ejemplo, los carámbanos de hielo formados sobre los elementos de la antena suponen un riesgo potencial y obligan a levantar vallas a cierta distancia del mástil, lo que sin duda aumenta la necesidad de terreno.

2.6.1.7 Red viaria

Además de las vías de acceso desde la red urbana a las estaciones de comprobación técnica y sus edificios, normalmente habrá que trazar caminos que conduzcan a todos los radiogoniómetros, antenas, cabinas para registrar la intensidad de campo y otras instalaciones exteriores, con el fin de que puedan utilizarse vehículos automóviles para transportar materiales entre estos distintos lugares. Para asegurar la continuidad de las operaciones a lo largo del año habrá que prever vías utilizables en todo tiempo y adaptadas a las características del terreno.

2.6.1.8 Vallado

Puede ser necesario construir vallas que impidan la incursión de ganado o de animales salvajes y, en ciertos casos, la intrusión de personas ajenas. Según las condiciones locales, se podrá vallar la totalidad del terreno o bien decidir que únicamente se necesita cercar la zona edificada.

Si se decide instalar cercas metálicas, éstas se colocarán a suficiente distancia (generalmente, no menos de 200 m) de las instalaciones delicadas, como radiogoniómetros de largo alcance y equipos medidores de la intensidad de campo, para evitar posibles perturbaciones del funcionamiento de estos dispositivos.

Las vallas metálicas deberán conectarse a tierra convenientemente para evitar que haya conductores flotantes que entren en resonancia y rerradien energía electromagnética dispersa.

2.6.2 Edificios e instalaciones auxiliares

2.6.2.1 Edificios

2.6.2.1.1 Edificio de la estación de comprobación técnica para emplazamientos de comprobación técnica atendidos

En función de la separación con respecto a las antenas de comprobación o al radiogoniómetro, se recomienda que el edificio no tenga más de tres pisos por encima del nivel del suelo. Si se elige un edificio de varios pisos, o de un solo piso con sótano y si se prevé la instalación de una gran cantidad de equipo en la estación de comprobación técnica, hay que tener en cuenta en los planos la concentración del peso de los bastidores y el equipo de comprobación, y prever en esos puntos suelos de suficiente capacidad de carga.

En el caso de estaciones no atendidas, hay que adoptar medidas para la protección de edificios y equipos contra el vandalismo, utilizando por ejemplo edificios de hormigón con ventanas enrejadas. Deben también considerarse el uso de unidades de supervisión remota para detectar intrusiones, cortes de la energía eléctrica y alarmas por incendio.

En el caso de estaciones atendidas, se puede distinguir entre dos enfoques claramente distintos. Algunas administraciones agrupan todas las operaciones de comprobación en una sala única; otras consideran más racional localizar ciertas operaciones fuera de la sala principal de comprobación. Por ejemplo, si se dispone de suficiente personal y las actividades de telecomunicación asociadas dan lugar a un tráfico importante, puede ser de interés instalar los equipos terminales de telecomunicación y las posiciones de explotación en una sala contigua. Por el contrario, si la disponibilidad de personal es reducida, las operaciones de telecomunicación serán normalmente realizadas, como obligación colateral, por el personal encargado de la

comprobación técnica, de tal manera que los equipos de telecomunicación sean fácilmente accesibles desde las posiciones de comprobación. Análogamente, si se prevé un gran volumen de trabajos especiales (por ejemplo, estudios de propagación a largo plazo) además de las tareas normales de comprobación y medición, puede ser ventajoso prever la realización de dichas operaciones en una sala distinta.

2.6.2.1.2 Distribución del espacio

No sólo la extensión de terreno requerida sino las exigencias de espacio del edificio destinado a la comprobación técnica, dependen acusadamente del cometido que se asigne a la estación. La legislación nacional sobre seguridad e higiene en el trabajo, la ergonomía y otros aspectos que atañen a la seguridad, pueden conducir a un fuerte incremento de las necesidades mínimas de espacio, como indica el siguiente ejemplo. Desde el punto de vista técnico, la separación entre el equipo y la pared debe ser suficiente para que el personal de mantenimiento pueda efectuar sustituciones. Por motivos de seguridad, quizás haya que dejar más espacio para que el personal pueda pasar aunque los armarios de equipo tengan todas las puertas abiertas. Se presentan dos ejemplos, A y B, que pueden considerarse puntos de partida para la planificación. Debe hacerse hincapié en que dichos ejemplos son sólo una referencia y tendrán que adaptarse a las necesidades individuales de cada administración.

Ejemplo A

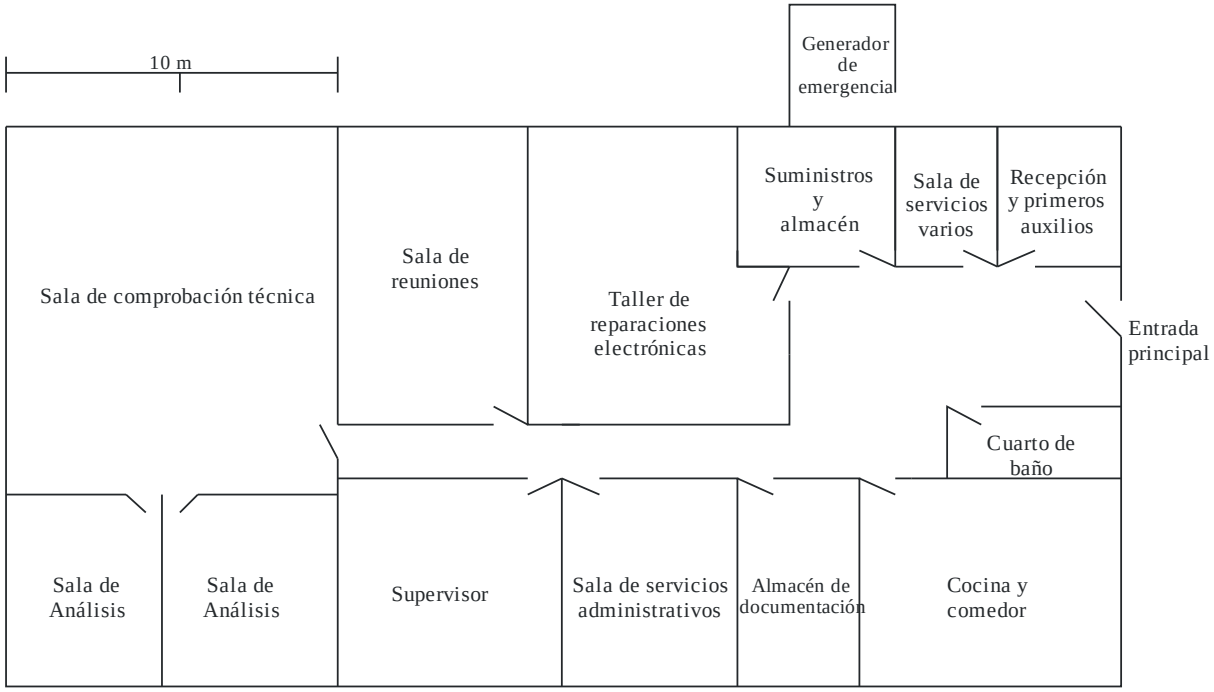
Este ejemplo representa un edificio para una estación de comprobación técnica cuya plantilla no exceda de 20 personas dedicadas a supervisión, comprobación técnica y tareas administrativas. El edificio consta de una sala principal para la comprobación técnica y dos pequeñas salas anexas para proyectos especiales. Las oficinas están destinadas a un supervisor y personal administrativo. Se dispone de espacio adicional para un taller de reparación de equipos electrónicos, cocina, sala a de reuniones y para botiquín, almacén y otras facilidades. En la Fig. 2-6.1 se muestra un esquema de dicho edificio que muestra cómo puede asignarse el espacio. En el Cuadro 2.6-2 se incluye un ejemplo de dimensiones.

Ejemplo B

El edificio incluido en el ejemplo B podría utilizarse en caso necesitarse espacio para un mayor número de empleados o para disponer de varias posiciones de comprobación técnica. En el Cuadro 2.6-2 se muestran dimensiones que dan una idea del tamaño de un edificio destinado a un equipo de personas más numeroso con funciones adicionales. Dicho edificio podría acomodar del orden de 35-40 personas del servicio de comprobación técnica y personal adicional para el servicio de inspección y de otras secciones. Se supone que sólo una parte de las 35-40 personas trabajarían simultáneamente en el edificio (otras estarían en misiones móviles, trabajarían en otro turno o estarían de vacaciones, etc.).

FIGURA 2.6-1

Ejemplo de un plano de distribución para un edifico de comprobación técnica que muestra como puede asignarse el espacio (no se muestran todos los detalles del edificio)



Spectrum-2.6-01

CUADRO 2.6-2

Ejemplo de distribución de espacio de un edificio de estación de comprobación técnica

Finalidad	**Superficie aproximada del ejemplo A (m^2)**	**Superficie aproximada del ejemplo A (m^2)**	**Observaciones**
Sala principal de comprobación técnica	100	190	
Taller de reparaciones electrónicas	50	60	
Taller de reparaciones mecánicas (si es independiente)	-	25	
Sala de reuniones	50	50	Alternativamente, puede existir espacio para reuniones en el despacho del supervisor
Zona asignada a despachos	15-40	15-40	En algunos casos (por ejemplo, para tareas administrativas), los despachos pueden estar ocupados por más de una persona
Máquinas copiadoras y almacén de documentos	(incluido en especio administrativo)	24	En algunos casos, pueden existir salas adicionales en el sótano para almacén de documentos
Equipos servidores y de telecomunicaciones	31		En el sótano
WC	10-15	25	Pueden existir varios espacios al efecto cuyo tamaño y equipamiento estará dictado por la normativa local.
Vestuarios	-	6	
Cocina	50 (incluyendo zona para almorzar)	6 (sólo la cocina)	Las zonas para almorzar pueden ser parte de la cocina o estar compartidas con zonas dedicadas a reuniones
Equipo de limpieza	-	6	
Almacén de equipos y antenas	10 (puede haber más espacio en dependencias anejas)	100	Parcialmente en el sótano
Almacén para el vigilante	-	30	
Calefacción	5-10	36	En el sótano o en sala de servicios
Planta de alimentación de reserva	(fuera del edificio o en dependencia aneja)	36	En el sótano
Sistema de suministro ininterrumpido	10	10	En el sótano
Transformador de potencia	(externo)	10	En el sótano
Garaje (si en el emplazamiento dispone de vehículos)	100	300	

2.6.2.1.3 Acondicionamiento acústico

El techo y, eventualmente (y posiblemente las paredes) de la sala principal de comprobación y de las salas para proyectos especiales deben revestirse de losetas antisonoras o ser objeto de otro tratamiento de aislamiento fónico. En ciertas circunstancias, puede ser conveniente aplicar también este tratamiento a otras salas.

2.6.2.1.4 Habitaciones apantalladas

Las salas de trabajos especiales o en talleres de reparaciones electrónicas donde puede ser necesario utilizar gran número de generadores de señales muy intensas u otras fuentes de energía radioeléctrica que pueden perturbar las operaciones de comprobación técnica se puede prever la instalación de apantallamiento continuo de las paredes, techo y suelo de esos locales. En general, dicho apantallamiento no es necesario cuando los generadores de señales son del tipo que se emplea para las operaciones normales de mantenimiento y prueba de los equipos. Se recomienda asimismo la instalación del servidor y de la centralita telefónica en salas apantalladas si no fuera posible acomodarlos en el sótano.

2.6.2.1.5 Canalizaciones para cables

El uso extensivo de conexiones para radiofrecuencia, frecuencia intermedia, audiofrecuencia y cables de control necesarios para la interconexión de los diversos equipos en el edificio de comprobación técnica y para los circuitos de cable que vienen de las antenas y demás instalaciones exteriores, es habitual construir canalizaciones subterráneas en el suelo del edificio. Estas canalizaciones deben presentar numerosas aberturas de acceso para simplificar los trabajos de instalación y de sustitución de los diversos cables. Suelen utilizarse dos tipos de canalizaciones:

– canalizaciones abiertas por su cara superior, con placas continuas de cobertura amovible que, una vez instaladas, quedan a ras del suelo;

– canalizaciones completamente cerradas, a las que se accede por registros de tapas atornilladas separadas a cortos intervalos.

Durante la construcción de las canalizaciones deberá tenerse en cuenta la compatibilidad de los materiales. Desde un punto de vista metalúrgico, se ha de evitar en todo caso el contacto directo entre las canalizaciones de aluminio o los tubos de aluminio para cables y el hormigón.

Se recomienda que las señales entrantes y los cables de control provenientes de las antenas, de los radiogoniómetros y del edificio de los transmisores, lleguen a un panel terminal situado en el punto en que los cables penetran en el edificio. Todos los cables de llegada deben terminar en este panel, a través de conectores apropiados. Este sistema permite localizar las averías de los cables más rápidamente que si éstos llegan directamente hasta los bastidores de los equipos en el interior del edificio. Tampoco es técnicamente apropiado tender cables para radiofrecuencia o audiofrecuencia en la misma canalización que los cables de energía eléctrica.

2.6.2.1.6 Edificio o sala para la planta de alimentación de reserva

Las plantas de alimentación de reserva de capacidad superior a algunos kilovatios, deberán montarse sobre una base "flotante", un zócalo de hormigón independiente del suelo que le rodea para reducir al mínimo las vibraciones transmitidas a dicho suelo y al propio edificio. Para las instalaciones más potentes conviene prever un depósito de carburante subterráneo, que se instalará a varios metros de distancia del edificio para que los riesgos de incendio sean mínimos.

Según lo que disponga la reglamentación nacional en materia de seguridad, puede ser obligatorio, o por lo menos de mejor rendimiento económico, alojar la planta de reserva en un edificio independiente. En uno y otro caso habrá que tomar las medidas adecuadas para protegerse de los incendios.

2.6.2.1.7 Sala de herramientas y garaje para vehículos automóviles

La necesidad de prever este edificio depende de las condiciones locales y del número y tamaño de los vehículos. Si ha de almacenarse gasolina para utilizarse en los vehículos, convendrá instalar los depósitos y la bomba en el exterior del edificio y separados de él para evitar riesgos indebidos de incendio. También

puede considerarse conveniente instalar en este edificio alarmas para casos de incendio o de elevación excesiva de la temperatura.

2.6.2.2 Recintos protegidos para la explotación a distancia de estaciones de comprobación técnica no atendidas

Los recintos protegidos, también denominados contenedores de equipos, pueden utilizarse para alojar equipos de comprobación técnica del espectro y de radiogoniometría de estaciones transportables y/o para la explotación a distancia no atendida. Es conveniente que dichos edificios incluyan el espacio mínimo y la potencia necesaria para el equipo y actividades de operación y mantenimiento locales. Aunque existen recintos protegidos de varios tamaños y formas, a continuación se describen dos tipos de recintos típicos.

Tipo 1. Los recintos de Tipo 1 tienen las dimensiones de un bastidor típico de equipos de 19 pulgadas. Están construidos con materiales robustos y herméticos al agua, e incluyen puertas delantera y trasera para el acceso al equipo. También disponen de un repartidor de cables a la entrada. Típicamente disponen de un equipo de climatización situado sobre el suelo junto al equipo.

Tipo 2. Los recintos de Tipo 2 tienen las dimensiones de un pequeño contenedor. Están construidos con materiales robustos y herméticos al agua. Incluyen una puerta de acceso al equipo y espacio para que una persona de mantenimiento acceda a la parte frontal y trasera de los bastidores de equipo. Incluyen una zona de trabajo para un operador que consta de una mesa y un armario para almacén. Típicamente disponen de un equipo de climatización situado en el propio contendor.

Ambos tipos de recintos protegidos deben disponer de suministro ininterrumpido de potencia (UPS) con baterías de respaldo. Es conveniente que incluyan un conmutador de desconexión automática en caso de alcanzarse una temperatura excesiva de forma que el equipo no se dañe por calentamiento en caso de fallo de la unidad de climatización. Deben incluir información distante del estado del equipo y alarmas por fallo de la alimentación, fallo de la unidad de control del grupo electrógeno y en caso de situaciones de calentamiento o enfriamiento excesivos.

2.6.2.3 Suministros industriales, fuentes de alimentación y otras instalaciones

2.6.2.3.1 Energía eléctrica

En caso de haber fuentes en energía eléctrica externas a la estación comprobación técnica capaces de asegurar una alimentación segura y suficiente, es preferible, en general, recurrir a estas fuentes para procurarse la energía eléctrica que requieren las operaciones normales, en vez de utilizar exclusivamente el grupo electrógeno de la estación. Si no existe esta facilidad y las operaciones de la estación de comprobación han de asegurarse sin interrupción, será necesario instalar dos grupos electrógenos separados de capacidad suficiente para atender las necesidades máximas de la estación, con una buena estabilidad de tensión y de frecuencia. Si se utiliza una fuente de alimentación exterior, podrá bastar normalmente con un solo grupo de reserva para cubrir el intervalo de tiempo en que no se disponga de la fuente de energía externa.

Es conveniente enterrar todos los cables de distribución de energía eléctrica para reducir al mínimo la introducción de ruido radioeléctrico en la estación. Esto es particularmente importante cuando las líneas de transporte de energía de alta tensión dan también servicio a zonas industriales o residenciales, puesto que puede entonces introducirse ruido en las líneas de distribución local proveniente de máquinas conectadas a la línea exterior. Si los circuitos se llevan bajo tierra dentro de los límites del terreno de la estación de comprobación técnica, la radiación producida por las líneas será despreciable, y la capacidad entre las líneas y el suelo tenderá a desviar a tierra la energía radioeléctrica presente en las líneas exteriores. Conviene trazar y consignar cuidadosamente el trayecto de todos los cables subterráneos que sirven para la distribución de energía, las comunicaciones y los controles, a fin de evitar su posible daño cuando se realicen excavaciones para la construcción de torres y estructuras de antenas.

Las plantas de energía modernas permiten la conmutación automática entre el suministro principal y el de reserva. Si la conmutación es automática, conviene dejar un retardo de algunos segundos entre la desconexión del suministro principal y la activación del generador de reserva para evitar repeticiones de paradas, arranques y conmutaciones cuando los fallos de alimentación son muy breves.

2.6.2.3.2 Sistema de suministro ininterrumpido de energía

Además de una planta de reserva, es necesario que la estación de comprobación técnica disponga de un sistema de suministro ininterrumpido de energía para mantener el sistema informático durante los intervalos que transcurren entre el fallo del suministro principal y el arranque del generador de reserva. Estos sistemas convierten corriente continua en corriente alterna y normalmente operan con alimentación por pilas secas o baterías de acumuladores.

El sistema de suministro de energía ininterrumpido deberá tener especificaciones técnicas adecuadas (por ejemplo, un retardo en el arranque inferior a 5 ms, buen comportamiento en cuanto a ruido y sobretensiones, y capacidad de funcionar durante un intervalo suficientemente largo, mayor de 10 minutos), con miras a impedir que los sistemas de computador pierdan información y tengan que ser reiniciados. Este intervalo operativo permite a los operadores salvar informaciones y datos que de otro modo se perderían, y arrancar manualmente el grupo electrógeno de reserva en caso de que falle el arranque y paso a reserva automático desde la red de energía eléctrica.

En la fase de diseño del sistema de suministro de energía ininterrumpido debe decidirse a qué equipo va a dar soporte. El costo depende acusadamente de la potencia máxima proporcionada. No obstante, en el cálculo debe preverse una reserva razonable.

2.6.2.3.3 Alumbrado de emergencia

Es necesario prever en el edificio de la estación de comprobación técnica y en el de los servicios de alimentación de reserva, un sistema de alumbrado de reserva alimentado por batería que se active automáticamente cuando se interrumpa el suministro normal de energía a los circuitos de alumbrado. Gracias a este alumbrado de reserva, el personal de la estación podrá localizar rápidamente los mandos de la instalación de reserva y poner en funcionamiento el grupo generador, si fuera necesario.

El alumbrado de reserva puede estar alimentado por baterías de pilas secas, que requieren pruebas y sustituciones periódicas, o bien por pilas líquidas que se mantienen en flotación sobre el circuito eléctrico normal y se están cargando constantemente.

2.6.2.3.4 Circuitos de telefonía y de datos

Para un servicio moderno de comprobación radioeléctrica tiene cada vez más importancia disponer de unas conexiones de telecomunicación que funcionen correctamente y con disponibilidad cercana al 100%. La centralita privada y los servidores deben instalarse en habitaciones separadas con acceso restringido. En este Manual no es posible resumir adecuadamente la experiencia de operadores y compañías de informática en un campo que se mantiene en constante desarrollo. Por lo tanto la única recomendación que aquí se expresa es la de dimensionar la arquitectura de comunicación con amplitud suficiente para satisfacer las necesidades futuras. Deberán asimismo considerarse la sección 2.5 y el § 2.6.3.

2.6.2.3.5 Calefacción y climatización

Las necesidades de calefacción y climatización dependen del clima local. Puede ser ventajoso instalar ventiladores asociados a conductos de aireación que vayan desde la parte superior de los bastidores de equipos al exterior del edificio. Con tiempo frío, el calor disipado por los equipos puede evacuarse hacia el interior del edificio, para reducir el costo y el consumo del sistema normal de calefacción.

2.6.2.3.6 Sistemas de alarma y extinción de incendios

En toda estación de comprobación técnica es necesario equipar alarmas y detectores de humo, junto con extintores apropiados para incendios en material eléctrico y un sistema de aspersión de agua por todo el edificio.

Los edificios grandes suelen necesitar tomas verticales de agua para que los bomberos enchufen las mangueras.

2.6.2.4 Protección contra el rayo

La protección contra el rayo pretende proteger una parte vulnerable de la estación de comprobación técnica de modo que sufra un daño mínimo.

El pararrayos ha sido la primera línea de defensa contra el impacto directo del rayo.

Para protegerse de descargas inducidas, deberá aplicarse el plan completo de protección que comprende la puesta a tierra, la interconexión o continuidad eléctrica, el apantallamiento y la supresión de crestas

2.6.2.4.1 Efectos del rayo

El rayo es el resultado de la separación de las cargas eléctricas en nubes tormentosas.

La máxima descarga de corriente (en potencia) puede rozar los 400 kVA.

Sin embargo, según las estadísticas, la mayoría de las corrientes de descarga son inferiores a 100 kVA, y alrededor del 50% están comprendidas entre 20 y 25 kVA; el alcance del rayo (cuando la cabeza de la descarga toca la tierra) varía entre 30 m y 70 m para 20 kVA, y entre 70 m y 150 m para 50 kVA.

Los efectos causados por el rayo pueden ser de dos clases:

1) Descarga directa, que produce enormes perjuicios debido a la gran intensidad de la corriente de la descarga. Normalmente los elementos conductores, como edificio y antenas, están expuestos a este tipo de efectos.
2) Descarga inducida, producida por un intenso campo electromagnético, que da lugar a fuertes sobretensiones y sobrecorrientes en el equipo, y puede provocar verdaderas descargas a distancias de hasta varios kilómetros.

2.6.2.4.2 Protección contra la descarga directa del rayo

Este tipo de protección se destina principalmente a objetos expuestos al exterior, como cubiertas de edificios, antenas y equipos de alimentación.

El método seguido consiste en atrapar la mayor parte de la potencia de la descarga y dirigirla hacia tierra.

Para conseguir esto, hay que destacar tres elementos importantes:

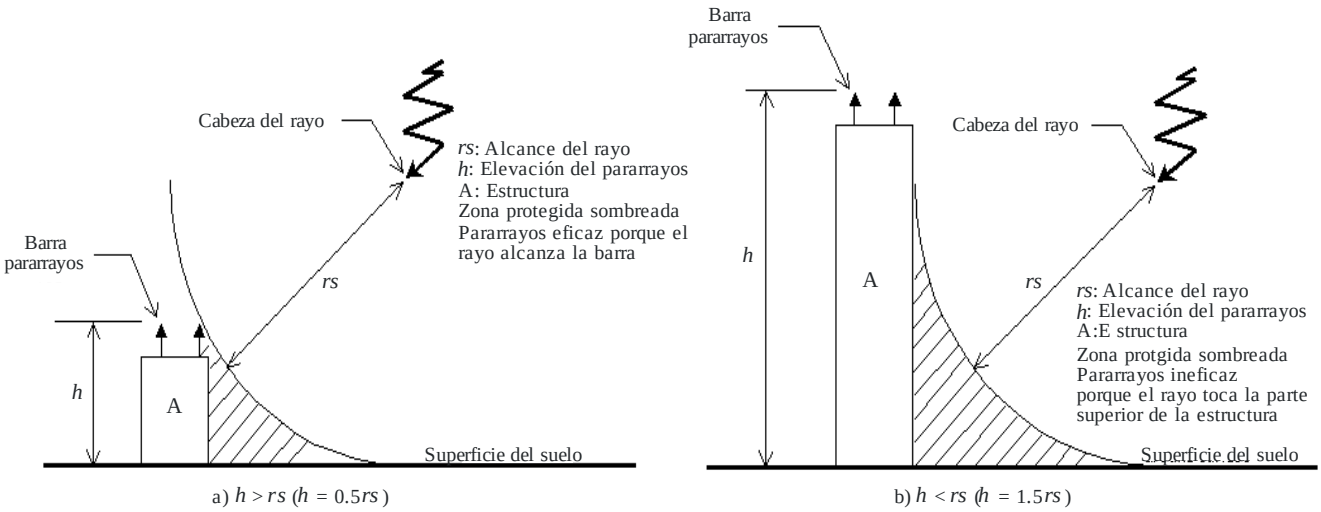
1) Pararrayos (terminación aérea): es la primera y más adelantada línea de defensa contra el rayo, cuya descarga directa debe interceptar.
2) Conductor de bajada: conductor eléctrico que conecta la barra del pararrayos a una toma de tierra. Según las normas existentes, estará formado por los metales de mayor conductividad (cobre o aluminio).
3) Toma de tierra: sistema de electrodos (habitualmente enterrados) cuyo fin es dispersar la corriente de la descarga en la tierra.

Como muestra la Fig. 2.6-2, la extensión de la zona protegida para una determinada estructura depende en gran medida de la magnitud de la corriente de descarga (§ 2.6.2.4.1) y de la elevación del pararrayos.

Cuando dicha elevación es mayor que el alcance del rayo (h > rs) como sucede en el caso de la Fig. 2.6-2b), el pararrayos es ineficaz para atraer el rayo, y por tanto el rayo puede incidir en la parte superior de la estructura.

FIGURA 2.6-2

Zona de protección



Spectrum-2.6-02

Dado que el alcance del rayo depende de la corriente de descarga, la norma CEI-1024-1 ha definido el nivel de protección de la estructura como se indica a continuación.

Nivel de protección	Alcance de la descarga (m)	Probabilidad (%) de que el rayo caiga sobre el pararrayos
Nivel I	20	98
Nivel II	30	95
Nivel III	45	90
Nivel IV	60	80

La protección que proporciona una barra pararrayos no es un sistema de protección total contra las descargas de rayos. Es importante determinar en qué medida deberá protegerse la estación de comprobación técnica del espectro.

2.6.2.4.3 Protección contra las descargas inducidas

Este tipo de protección se destina principalmente al equipo interior, como receptores y equipos de alimentación en CA, e incluye la protección contra la descarga directa de rayos. Esta protección sólo podrá conseguirse mediante una minuciosa investigación de la estación de comprobación del espectro para identificar todos los equipos sensibles y todos los posibles trayectos de las tensiones transitorias y corrientes de cresta. Seguidamente se habrá de proceder al diseño, especificación, instalación y mantenimiento del sistema de protección.

Para diseñar el sistema de protección, se aplican cuatro principios de ingeniería: puesta a tierra, continuidad eléctrica, apantallamiento y supresión de crestas.

– Los dispositivos adecuados para la puesta a tierra y la continuidad eléctrica ofrecen trayectos adicionales a las corrientes que conducen a tierra las descargas de rayos, reduciendo así las crestas al mínimo. Se incluyen aquí los armarios de equipo de interconexión, los componentes individuales y los conductores de puesta a masa, y posiblemente la interconexión de conductores adyacentes como el acero y las canalizaciones de la estructura.

– El apantallamiento de los cables reduce las crestas proporcionando un camino preferente para la corriente de descarga en vez del circuito propiamente dicho. Para tener máxima eficacia, el apantallamiento debe ser enteramente continuo, y conectado a tierra u otra terminación.

– El dispositivo supresor de crestas desempeña la función de suprimir tensiones transitorias y corrientes de cresta capaces de dañar equipos interconectados por cables a distancias largas. Se elegirá de manera que pueda soportar las tensiones y corrientes que cabe esperar en el caso de intensas descargas inducidas.

Para que la protección sea eficaz, se ha de aplicar un mismo principio de protección a todas las interfaces de la instalación.

2.6.2.4.4 Proceso de protección

El uso de un pararrayos para los objetos exteriores es la primera medida necesaria para la protección del edificio, pero también es preciso limitar las sobretensiones en la fuente de alimentación, las líneas de antena y de datos, antes de que lleguen al equipo electrónico.

Todas las líneas (de alimentación y de comunicación) deben entrar en el edificio por el mismo punto.

En ese punto de entrada, se conectarán todas las líneas a la red equipotencial, de manera que los cables, apantallamientos y otros elementos metálicos que no transportan señales ni alimentación se conecten directamente a la barra de continuidad equipotencial.

Las líneas que transportan señales (procedentes de antenas receptoras, radiogoniómetros o líneas de comunicación/computadores) o alimentación se conectan a la barra anteriormente mencionada a través de sus propios protectores especiales. En tal caso, el potencial de todas las líneas aumentará por igual y simultáneamente, y por tanto la diferencia de potencial entre las líneas de señal y sus pantallas tenderá a cero durante el periodo de la descarga.

Las tensiones residuales o las sobretensiones inducidas por señales electromagnéticas sobre toda la longitud del conductor (desde el punto de entrada hasta la posición del equipo) deberán omitirse insertando un protector más fino en el punto más próximo al equipo.

Merece destacarse que un dispositivo protector no puede por sí mismo proporcionar una plena protección; los protectores más adecuados deben ser utilizados en varias fases, conforme a las especificaciones del equipo.

2.6.2.4.5 Puesta a tierra y apantallamiento

La puesta a tierra eficaz y segura es un factor esencial para los procedimientos de protección contra el rayo, y deberá cumplir lo dispuesto en la norma CEI 1024-1.

Se recomienda tomar las medidas adecuadas ya en la fase de planificación. Todas las partes metálicas de dimensiones apreciables asociadas con la estructura (por ejemplo, refuerzos metálicos del hormigón, cubiertas de tejados y fachadas metálicas) se unirán eléctricamente entre sí y con el sistema de protección contra el rayo.

La continuidad eléctrica se aplicará a todas las partes conductoras externas que penetren en la estructura. Cuando las estructuras son de gran tamaño como los centros de comprobación técnica, una buena solución consiste en la conexión a anillos conductores de cobre en el interior. Dar continuidad eléctrica adecuada a las pantallas de los cables es parte esencial del concepto de zona de protección contra el rayo. Fundamentalmente, todas las pantallas deberán tener continuidad por ambos extremos (en el panel de conexiones así como en el terminal o zócalo) directa o indirectamente a través de dispositivos protectores de descargas. Es beneficioso que haya numerosos trayectos en paralelo para reducir las corrientes inyectadas en los cables y pantallas. Los sistemas "de puesta a tierra en malla" cumplen este requisito.

En el límite de las zonas de protección contra el rayo se proporcionará y realizará la continuidad eléctrica entre las partes metálicas y los sistemas que crucen ese límite, siempre mediante una barra de unión equipotencial conectada a los electrodos del sistema de puesta a tierra.

La resistencia de contacto y asentamiento de la tierra puede reducirse por procedimientos apropiados, denominados "mejora de la toma de tierra", tales como aumentar la conductividad del suelo por inyección de soluciones muy conductoras que por tanto reduzcan dicha resistencia. Ejemplo es la emulsión higroscópica elaborada para este fin.

La red de puesta a tierra debe ser "limpia", con una resistencia mínima de 4 a 10 Ω o todavía menor. Las partes metálicas no sufrirán corrosión y tendrán elevada conductividad. De acuerdo con las condiciones climatológicas, la composición del suelo, la humedad y la calidad de los materiales empleados, el sistema de tierra ha de ser probado y mejorado con periodicidad regular. La propia conexión a tierra deberá ser corta e incluir placas enterradas para que la impedancia sea mínima.

2.6.2.4.6 Protecciones de la antena

Además de las medidas adoptadas para la puesta a tierra y protección exterior deben considerarse las siguientes:

– El sistema/red de antena debe situarse dentro de la "zona de protección a 45º" y/o del "radio de protección de esfera rodante" del pararrayos.

– La barra pararrayos debe ir montada verticalmente sobre el sistema/red de antena o, si esto no fuera posible, en sus proximidades de manera que forme una zona de protección adecuada en torno del sistema.

– La terminación aérea y el conductor de bajada deben montarse de manera que se mantenga la simetría de la red de antena.

– En regiones de frecuentes tormentas, es preferible desconectar la antena del equipo cuando pueda predecirse descarga de rayos.

– La superficie de la antena se ha de cubrir con aislamientos adecuados (por ejemplo, de fibra de vidrio)

– En las antenas activas se utilizarán protectores adecuados para permitir el paso de tensiones en CC, debido al funcionamiento normal de los sistemas de antena.

– Las torres o mástiles de antena deberán ponerse a tierra de la mejor manera posible.

– Las pantallas de los cables de radiofrecuencia y coaxiales deberán ser puestas a tierra adecuadamente, y en el caso de antenas montadas en posición elevada dichas pantallas se unirán eléctricamente al mástil en sus extremos superior e inferior.

2.6.2.4.7 Mantenimiento del sistema de protección contra el rayo

A veces se descuida el mantenimiento del sistema de protección contra la descarga de rayos porque estos sistemas no forman parte del equipo principal. El mantenimiento programado es indispensable para dicha protección, al objeto de limitar los daños causados por el rayo. En particular, debe cuidarse el mantenimiento de la barra pararrayos y del conductor de bajada instalado fuera de la estructura con el fin de evitar los desconchamientos causados por la descarga del rayo y la herrumbre. También ha de vigilarse continuamente la resistencia de la toma de tierra.

2.6.3 Fuentes de interferencia que afectan a la explotación de las estaciones de comprobación técnica

2.6.3.1 Principios generales

Mientras sea posible, no habrá transmisores de ningún tipo en el emplazamiento de una estación de comprobación técnica. No obstante, si ello fuera necesario por razones poderosas, como por ejemplo establecer comunicaciones, se tomarán las debidas precauciones en las fases de planificación e instalación para evitar o reducir al mínimo la interferencia.

Más generalmente, la interferencia se debe a equipos que radian señales de radiofrecuencia de manera no deliberada. Existen básicamente dos mecanismos de interferencia: la radiación y la conducción. La radiación puede ocurrir directamente (por un apantallamiento insuficiente o defectuoso de la fuente) o a través de los

cables de conexión. La interferencia también puede producirse a través de una antena si la frecuencia de la señal radiada cae dentro de la banda (o bandas) de operación que utiliza la estación.

No obstante, si el origen de la radiación interferente está fuera de la cubierta de un elemento del equipo de comprobación técnica, la interferencia podrá ocurrir o no dependiendo de la eficacia del apantallamiento del equipo. Análogamente, la radiación en el interior o en el exterior de un tramo de cable puede causar interferencia o no dependiendo de la eficacia del apantallamiento del tramo de cable y de la forma en que esté tendido.

La interferencia procedente de una fuente perturbadora puede ser transportada por la red eléctrica o por cables de señal y de control utilizados en las interconexiones.

2.6.3.2 Fuentes de interferencia

Son las siguientes:

– computadores personales y servidores, incluidos sus dispositivos periféricos (monitores, impresoras, escáneres, cables, etcétera) utilizados para las aplicaciones de oficina y el control de dispositivos;

– centrales telefónicas, terminales telefónicos modernos, teléfonos inalámbricos, aparatos facsímil;

– lámparas fluorescentes;

– equipos de alimentación de lámparas halógenas;

– conmutadores de estado sólido utilizados en equipos de alimentación, calefacción o climatización y otros equipos de control;

– motores eléctricos utilizados para extractores y ventiladores (en cocinas, despachos), aspiradoras de vacío y rotores de antena;

– vehículos y cortadoras de césped con motores de ignición a chispa;

– equipos ICM (horno de microondas);

– televisión por cable y sistemas de distribución por cable similares.

2.6.3.3 Medidas correctoras

Todos los servicios que entran a través de conductores metálicos a las zonas sensibles deben ponerse separadamente a tierra de manera que cumplan con las reglamentaciones locales de seguridad eléctrica. Pueden considerarse las ventajas de las barreras no metálicas, pero si se utiliza metal dentro de la zona sensible deberá una vez más ponerse a tierra de forma adecuada.

El cableado de radiofrecuencia debe estar separado de todos los demás cables en la consola y ponerse a tierra de manera segura. Para reducir la interferencia producida por los cables de teléfono y de intercomunicación a menudo basta por ejemplo, con arrollar los cables 5 veces a través de 4 anillos.

Los computadores personales son omnipresentes y no es posible excluirlos de las salas de operaciones. Por consiguiente, debe procurarse que tengan bajo nivel de radiación. Hay que tomar ciertas precauciones con respecto a los dispositivos especificados por Tempest, puesto que sólo garantizan que la radiación no contiene información alguna, más que un bajo nivel de la misma.

Las LAN e interconexiones similares deben estar basadas en cableado por fibra óptica y no de cobre. Esto evitará toda radiación y también evitará cualquier puesta a tierra involuntaria. Por idénticos motivos, las señales del patrón de frecuencias de la estación deberán ser distribuidas a las consolas mediante cables de fibra óptica.

Si es inevitable la proximidad de los cables de datos y los cables de radiofrecuencia o audio, habrá que utilizar cables de doble apantallamiento. Los cables de audio deberán estar apretadamente trenzados y con apantallamiento simple o doble.

Normalmente el equipo de comprobación técnica radioeléctrica presenta propiedades de radiación adecuadas. Deben tomarse precauciones, sin embargo, si se utiliza equipo de radioaficionado.

Los equipos que sólo se dedican al procesamiento de datos y no necesitan ser atendidos por operador, deberán estar en un gabinete separado, contiguo si fuera posible.

Una toma de tierra eficaz y segura es esencial no solamente para la protección contra la descarga de rayos sino además para reducir las interferencias de radiofrecuencia. Véanse más detalles acerca de la puesta a tierra en el § 2.6.2.4.5.

Estas precauciones son relativamente sencillas si se adoptan en la fase de instalación. La identificación y eliminación posterior de los problemas descubiertos puede ser lenta y costosa.

2.6.4 Examen del emplazamiento

Antes de instalar el sistema de comprobación técnica del espectro deberán evaluarse exhaustivamente las tareas de explotación, la cobertura geográfica requerida, las condiciones radioeléctricas y otras limitaciones existentes. Se señalarán con claridad y se recogerán en un documento las prioridades de todas las cuestiones pertinentes.

A continuación, se ha de emprender el examen del emplazamiento utilizando una lista de verificación. Normalmente, la evaluación del emplazamiento pondrá de manifiesto que la mayoría de los lugares examinados no satisfacen todos los requisitos, y será inevitable llegar a soluciones de compromiso.

Los resultados de la evaluación se resumirán en un informe completo. Dicho informe y la lista de verificación anexa se conservarán como referencia para el futuro.

En los siguientes Anexos 1 y 2 se incluye un ejemplo de lista de verificación para examen del emplazamiento y un formulario completo para el informe de evaluación.

Anexo 1 a la sección 2.6

Lista de verificación para examen del emplazamiento

<table>
<tr><td colspan="2">Nº ref.:</td><td colspan="3">Preparado por:</td><td>Fecha: / /</td></tr>
<tr><td>0</td><td>Nombre del emplazamiento</td><td colspan="4">Nuevo Existente</td></tr>
<tr><td>1</td><td>Dirección del emplazamiento</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>2</td><td>Propietario</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td rowspan="3">3</td><td rowspan="3">Consentimiento del propietario a la instalación</td><td colspan="4">□ Concedido sin condiciones</td></tr>
<tr><td colspan="4">□ Concedido a condición de:</td></tr>
<tr><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td colspan="4">□ No concedido con denegación del examen de emplazamiento</td></tr>
<tr><td>4</td><td>Dirección</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>5</td><td>TEL/FAX/Correo electrónico</td><td colspan="4">/</td></tr>
<tr><td rowspan="5">6</td><td rowspan="5">Edificio
(con fotografías)</td><td colspan="2">Forma</td><td>Altura sobre la superficie del suelo</td><td>Elevación de la superficie del suelo sobre el nivel medio del mar</td></tr>
<tr><td colspan="2">□ Edificio
□ Torre ( )
□ Otros ( )</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3"></td><td rowspan="3"></td><td>Frecuencia:</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>Distancia:</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>Observaciones:</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>7</td><td>Zona circundante
(con fotografías)</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td rowspan="12">8</td><td rowspan="12">Posición geográfica</td><td>Latitud
(grad, min, seg)</td><td colspan="3">ºN ’ ’’</td></tr>
<tr><td>Longitud
(grad, min, seg)</td><td colspan="3">ºE ’ ’’</td></tr>
<tr><td>UTM
(zona, norte, este)</td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td>Punto de referencia</td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td>Método y fuente</td><td colspan="3">□ GPS / □ Mapa</td></tr>
<tr><td>Elevación (m) sobre nivel medio del mar</td><td colspan="3">"x" metros</td></tr>
<tr><td>Precisión de determinación X, Y, Z</td><td colspan="3">"x" metros</td></tr>
<tr><td>Posición en mapa (fichero o papel)</td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td>Referencia de mapa</td><td colspan="3">Código de mapa:</td></tr>
<tr><td>Sistema de proyección en mapa</td><td colspan="3">Cilíndrica, cónica Lambert, policónica, gnómica: xxx</td></tr>
<tr><td>Croquis</td><td colspan="3">Véase anexo nº x</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Fotografías</td><td colspan="3">□ Sí, véase anexo nº</td></tr>
<tr><td colspan="3">□ No</td></tr>
</table>

9	Entorno del emplazamiento	Margen de temperatura (ºC):	Mín.		Máx.
		Necesidad de deforestar:	□ Sí		□ No
		Grado de humedad (%):			
		Lluvia de tormenta:	□ Sí		□ No
		Nieve (cm):	Mín.		Máx.
		Riesgo sísmico:	□ No		□ Sí, valor (escala Richter)
		Observaciones:			
10	Localización de la antena	Localización	Véase anexo nº		
		Coordenadas	Véase anexo nº		
		Elevación sobre obstáculos circundantes	□ máxima (con fotografía)		
			□ no máxima pero satisfactoria (con fotografía)		
			□ más baja (con fotografía)		
		Elevación	Sobre la superficie del suelo:		
		Otra antena	□ No		
			□ Sí	Clasificación:	
				Polarización:	
				Distancia:	
		Línea aérea	□ No		
			□ Sí	Clasificación:	
				Distancia:	
		Objeto resonante	□ No		
			□ Sí	Clasificación:	
				Distancia:	
		Intensidad de campo en RF	Frecuencia:		
			Intensidad de campo:		Véase hoja 3 anexa
11	Antena goniométrica en ondas decamétricas	Terreno disponible para el diámetro de la red más la zona de extensión de riostras		□ Sí	□ No
		Horizontalidad del terreno: se admite una inclinación gradual de 3 grados de un lado al otro de la antena			
		La separación vertical para TOA supera 3 grados			
		Resistencia del suelo para soporte de la antena			
		Identificar posibles objetos dispersores: edificios altos, grandes árboles, líneas de alta tensión, torres radioeléctricas, etc.			
		Los dispersores potenciales tienen que distar de cualquier elemento de antena al menos lo que señala el cuadro 2.6-1			
		Entorno exento de dispersión en el interior de la red de antena			

<table>
<tr><td rowspan="4">11</td><td rowspan="4">Antena goniométrica en ondas decamétricas (continuación)</td><td colspan="4">Las líneas de alta tensión deben estar lejos de la red de antena, véase el cuadro 2.6-1</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="4">Equipo necesario:
Cámara, teodolito con brújula magnética, cinta métrica de 30 a 100 metros, cinta métrica de 4 metros, binoculares GPS, analizador de espectro y medidor de intensidad de campo; si es posible, obténgase mapa de contorno del emplazamiento</td><td colspan="2">Debe estar preparado antes del examen del emplazamiento</td></tr>
<tr><td colspan="4">Condiciones de corrosión o humedad del entorno</td><td>Buenas</td><td>No buenas</td></tr>
<tr><td colspan="4" rowspan="2">Deberá medirse la conductividad del suelo</td><td>Buena</td><td>No buena</td></tr>
<tr><td></td><td>Ω</td></tr>
<tr><td rowspan="12">12</td><td rowspan="12">Aspectos radiotécnicos</td><td>Zona de cobertura</td><td colspan="5">Véase el anexo nº:</td></tr>
<tr><td rowspan="5">Existencia de una estación radio cercana incluida la proyectada</td><td rowspan="5">Sí</td><td rowspan="5">No</td><td>Nombre:</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>Frecuencia:</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>Intensidad de campo:</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>Distancia:</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>Observaciones:</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td rowspan="6">Emisores de alta potencia cercanos no deseados</td><td colspan="3">Nombre del transmisor</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="3">Servicio del transmisor</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="3">Frecuencia [MHz]</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="3">Intensidad de campo [dBµV/m]</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="3">Saturación o interferencia</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="3">Distancia [km]</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">Fuentes de ruido naturales/artificiales</td><td colspan="3">Umbral</td><td colspan="2">µV/m, mV/m, dBµV/m</td></tr>
<tr><td colspan="3">Nivel de ruido aceptable a determinar</td><td>Sí</td><td>No</td></tr>
<tr><td>Mediciones de emisores deseados y de emisiones controladas</td><td colspan="5">Véase anexo nº:</td></tr>
<tr><td rowspan="2">13</td><td rowspan="2">Resistencia estructural para la instalación de antena</td><td colspan="6">suficiente (acompañada del cálculo de la resistencia estructural)</td></tr>
<tr><td colspan="6">se requiere el cálculo de la resistencia estructural</td></tr>
<tr><td rowspan="3">14</td><td rowspan="3">Sala de equipos receptores</td><td>Existente</td><td colspan="5">Véase anexo nº:</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Inexistente</td><td colspan="3">Sala propuesta</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="3">Observaciones</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">15</td><td rowspan="2">Resistencia estructural para la instalación de receptores</td><td colspan="6">suficiente (acompañada del cálculo de la resistencia estructural)</td></tr>
<tr><td colspan="6">se requiere el cálculo de la resistencia estructural</td></tr>
<tr><td rowspan="3">16</td><td rowspan="3">Alimentación en CA</td><td>suministrada</td><td colspan="5"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">no suministrada</td><td colspan="5">otras fuentes de alimentación disponibles</td></tr>
<tr><td colspan="5">carencia de alimentación</td></tr>
</table>

17	Medios de comunicación de datos	suministrados	Clasificación:	
			Ruta de cable:	Véase anexo nº:
		no suministrados	Alteración:	
18	Materiales requeridos para la instalación	Sistema de antena		
		Sistema de recepción		
		Desmontaje		
		Sistema de puesta a tierra		
		Altura de obstáculos		
		Protección contra el rayo		
		Posibles requisitos especiales		
19	Accesibilidad	Vehículo	Sí	No
		Vehículo de carga	Sí	No
		Zona de aparcamiento		
20	Obra de cimentación		Sí	No
21	Entorno de trabajo	Horas de trabajo	Sin restricción	
			Restringidas	
		Equipo de transporte	Sin restricción	
			Restringido	
		Ruido	Sin restricción	
			Restringido	
		Alumbrado	No requerido	
			Requerido	
		Almacén de materiales	No disponible	
			Disponible	
		Zona de trabajo	No disponible	
			Disponible	
		Condición especial		
22	Requisitos especiales del propietario	Para la instalación		
		Para el trabajo de instalación		

Anexo 2 a la sección 2.6

Informe de evaluación completo

Preparado por:	Fecha: / /
Nombre del emplazamiento	
Número de referencia de la lista de verificación del emplazamiento	
Resultado de la evaluación	Bueno Bueno con condiciones Cancelado
Fundamento de la evaluación	Instalación cancelada por denegación del propietario Emplazamiento inadecuado a causa de: Otros
Observaciones	

2.7 Mantenimiento, calibración y reparación

En esta sección se proponen métodos para mejorar el nivel de preparación y disponibilidad de la estación de comprobación técnica (y del sistema de comprobación técnica en su conjunto), se analizan las actividades de apoyo y las herramientas necesarias para un funcionamiento fiable a largo plazo del sistema. Las modernas estaciones de comprobación técnica controladas mediante computadores y basadas en equipos digitales, y específicamente receptores digitales, son elementos fiables cuyas mediciones presentan muchas menos desviaciones e inexactitudes que las que eran típicas de la generación anterior de equipos de comprobación técnica.

La verificación y mejora del funcionamiento de la estación se basan en lo siguiente:

– Aplicación, tanto periódica como discrecional del operador, de pruebas integradas para la detección de averías en los elementos de la estación.

– Mantenimiento programado, pruebas y actividades de mantenimiento a intervalos definidos (mensual y anualmente) para verificar y mejorar el funcionamiento a largo plazo de la estación.

– El calibrado puede considerare, de ser necesario, una actividad de reparación específica.

– Reparación, cuando se detecte una avería que debe ser corregida.

En la última parte de esta sección se analizan otros aspectos importantes, incluyendo el inventario de piezas de repuesto que deben estar disponibles para una rápida reparación de averías, el mantenimiento del software y la gestión del mantenimiento del sistema.

2.7.1 Generalidades

Una adecuada información sobre la precisión de una medición requiere conocer los factores de incertidumbre que entrañan los métodos de medición aplicados. La precisión exigida se basa en las normas nacionales e internacionales y/o en las especificadas por las administraciones responsables. El equipo de la medición está sometido durante su empleo a un gran número de factores que afectan sus parámetros técnicos, y con el tiempo cambian los valores especificados. Por tanto es esencial realizar con regularidad el examen, mantenimiento y calibración del equipo de medición. Si dicho equipo no se mantiene regularmente, crecerá el riesgo de mediciones erróneas y de averías. En cuanto los valores medidos caigan fuera de las tolerancias admisibles, habrá retirar del servicio cuanto antes el equipo de medición y llevarlo a reparar.

Cuando se pone en servicio un elemento del equipo debe abrirse inmediatamente un fichero que comprenda todos los documentos relativos a su compra, garantía, mantenimiento, calibración y reparaciones. Este fichero deberá estar vinculado al equipo por medio de una referencia única, como el número de serie o de inventario. Todas las calibraciones y reparaciones efectuadas en cada elemento del equipo deberán quedar registradas en los ficheros con miras a crear una historia de esos elementos durante su vida útil. Al equipo se le adjuntará una etiqueta que indique claramente su referencia exclusiva, así como la fecha de calibración, el número del certificado expedido al respecto y la fecha de la calibración siguiente.

Con el fin de garantizar la calidad del equipo de medición y su cumplimiento de los requisitos de precisión, se recomienda un sistema de varias etapas que comprenda las verificaciones siguientes:

– prueba funcional básica antes y después de cada medición;
– pruebas funcionales intensificadas a intervalos regulares;
– mantenimiento periódico por personal especialmente capacitado;
– calibración también con periodicidad fija.

Elemento esencial de dicho sistema de calidad son el plan de actividades y los intervalos que han de establecerse para las pruebas en cada etapa individual. En esos planes se incluirán los datos del equipo de medición, los parámetros técnicos a probar junto con sus valores nominales y tolerancias, y una lista de verificación con instrucciones para la realización de las pruebas. Tanto el plan como las instrucciones de las pruebas, la lista de componentes de los sistemas de medición y los informes de las pruebas, forman parte del manual de pruebas perteneciente a cada equipo o sistema de medición. La fecha de la prueba y el nombre del probador deberán exponerse con claridad.

Con miras al aseguramiento de la calidad, deberá designarse un miembro de la plantilla como responsable de la calidad, que en particular tendrá los siguientes cometidos:

– mantener al día un manual en el que se definan los procedimientos de mantenimiento y calibración;
– garantizar que se han preparado y entregado a tiempo los planes de pruebas y mantenimiento para cada elemento del equipo de medición;
– vigilar el cumplimiento de los plazos límite marcados para las actividades de pruebas, mantenimiento y calibración.

2.7.2 Pruebas funcionales

2.7.2.1 Pruebas funcionales básicas

La prueba funcional básica guarda relación directa con cada tarea de medición específica y la realiza el propio personal encargado de la medición o serie de mediciones, al principio y al final de las mismas. Solamente se verifican aquellos parámetros técnicos que atañen a la medición de que se trate. Por ejemplo, antes de medir una intensidad de campo hay que verificar cómo funciona el equipo utilizado para detectar y presentar los valores medidos con respecto a la frecuencia en que se mide. La documentación de la prueba funcional forma parte del informe de medición (véase § 2.2.5).

2.7.2.2 Capacidad de pruebas integradas

La capacidad de realización de pruebas integradas basada en recursos del sistema tiene por objetivo verificar el correcto funcionamiento de la estación de comprobación técnica; las pruebas integradas constituyen un elemento principal para asegurar la operabilidad de la misma.

Las pruebas integradas pueden realizarse aplicando algunos de los tres métodos siguientes:

– prueba integrada automática con el encendido del equipo

– prueba periódica de funcionamiento, cada varias horas, por ejemplo, cada 24 horas;

– prueba iniciada por el operador (incluyendo su posible ejecución a distancia).

Los resultados de las pruebas integradas (tanto automáticas como iniciadas por el operador) pueden estar disponibles para el operador en modo local y a distancia en la estación de control.

2.7.3 Pruebas funcionales intensificadas

La prueba funcional intensificada la realiza el personal de medición a intervalos prefijados. No está directamente relacionada con las tareas específicas de la medición, y el intervalo transcurrido entre pruebas sucesivas suele ser de uno a tres meses. Una vez más, la base de esta prueba funcional es un plan que comprende valores nominales y tolerancias admisibles de las magnitudes a medir, así como instrucciones para realizar la prueba propiamente dicha. A diferencia de la prueba básica, esta prueba funcional intensificada abarca todo el margen operativo del equipo o sistema de medición.

En la medida posible, deberán agruparse varios elementos del equipo de medición para formar un sistema susceptible de prueba colectiva. De ese modo, la prueba intensificada puede abarcar el equipo de un centro de prueba entero o de un vehículo de comprobación técnica. Las verificaciones han de documentarse en un informe de pruebas que contenga datos del valor nominal, la tolerancia admisible y el valor (real) medido de cada parámetro que ha de probarse.

2.7.4 Mantenimiento programado

Normalmente el mantenimiento del equipo de medición corre a cargo de un departamento técnico que presta apoyo al servicio de comprobación técnica. Las actividades implicadas suelen realizarse en un taller especialmente habilitado y no en el centro de pruebas ni en el vehículo.

El trabajo de mantenimiento difiere de las pruebas funcionales en que es considerablemente más completo y exhaustivo. El contenido de los planes de mantenimiento generalmente se corresponde con las especificaciones del equipo de medición entregadas por su fabricante.

Cada equipo o sistema de medición debe disponer de un programa de mantenimiento en el que se establezcan los parámetros técnicos a verificar, junto con sus valores nominales y tolerancias y las instrucciones de mantenimiento e intervalos aplicables. El trabajo de mantenimiento realizado se documenta en un correspondiente informe.

Las actividades de mantenimiento programado incluyen pruebas más elaboradas administradas manualmente (en comparación con las pruebas integradas), que pueden utilizar equipos de prueba externos y actividades para la protección de elementos mecánicos (lubricación de elementos móviles, limpieza y protección del polvo y la humedad o protección frente a la corrosión y erosión).

Las actividades de mantenimiento programado se realizan normalmente de conformidad con las instrucciones del fabricante y las lleva a cabo el propio fabricante o su agente local autorizado en el marco de un acuerdo global de apoyo y mantenimiento.

2.7.5 Calibración

Con el fin de garantizar constantemente la precisión absoluta de los parámetros técnicos de las antenas y del equipo de medición con arreglo a sus especificaciones, se necesita volver a calibrar el equipo a intervalos regulares. Un equipo calibrado garantiza que el valor medido está dentro del margen de incertidumbre especificado con respecto al valor real. La incertidumbre de la medición puede definirse provisionalmente como aquella parte de la expresión cualitativa del resultado de la medición que señala el margen de valores

dentro del cual debe estar situado el valor real. Los límites de dicho margen deben asociarse a una probabilidad determinada. Por ejemplo, el resultado de una medición de intensidad de campo podría expresarse en 30 dB(μV/m) ± 2,5 dB (con una confianza del 95%), es decir que se puede estar seguro al 95% de que el valor de la intensidad de campo está comprendido entre 27,5 y 32,5 dB(μV/m).

Al contrario que en las pruebas funcionales y de mantenimiento, la calibración realiza la trazabilidad de parámetros técnicos como la frecuencia, el nivel de señal y la potencia en relación con patrones nacionales e internacionales, a través de una cadena continua de comparaciones con una precisión definida absoluta.

Sólo pueden utilizarse patrones de referencia para las calibraciones. Las autoridades nacionales o internacionales responsables de calibración, o sus organismos subordinados, son quienes preferiblemente calibran dichos patrones. Cuando esto no sea posible, el laboratorio de calibración competente debe declarar su procedimiento por escrito para poder establecer correspondencias. Deben aplicarse procedimientos físicos/matemáticos a patrones que no puedan hacerse corresponder directamente con patrones nacionales o internacionales. La correspondencia es posible porque existe una relación fija entre cada uno de los patrones de la jerarquía de calibración y el patrón nacional. Cada patrón utilizado se compara regularmente con el patrón de referencia del mismo nivel, y este último a su vez se compara con un patrón de referencia del nivel inmediatamente superior. Se recorre así una cadena de calibración ininterrumpida, que presenta ventajas decisivas.

Las estaciones de comprobación técnica utilizan un número relativamente grande de equipos para realizar las diversas tareas de medición. Entre los parámetros de medición más usual se incluyen la intensidad de campo y la frecuencia, utilizando para ello antenas, receptores y analizadores de espectro. De ahí que el interés se centre en la calibración de la frecuencia, del nivel de señal y de la ganancia de la antena, y que aquellas mediciones en las que estos valores tengan significado legal se realicen solamente con antenas, receptores y analizadores de espectro calibrados. La conclusión inversa es que existen, sin embargo, mediciones susceptibles de realizarse con equipo no calibrado. Es pues necesario determinar cuál equipo hay que calibrar en primer lugar.

Hay casos en que no es posible calibrar el equipo de medición. Así sucede, en particular, con un gran número de antenas. En tal caso, es muy importante registrar valores de referencia cuando se pone en funcionamiento el equipo de medición, dado que la incertidumbre de la medición está en ese momento en su mínimo y puede tomarse como referencia en las pruebas funcionales y en el trabajo de mantenimiento.

No es posible calibrar en laboratorio los sistemas de radiogoniometría. No obstante, para mantener la precisión del sistema deben tomarse marcaciones regulares de transmisores conocidos en diversas bandas de frecuencias. Las desviaciones apreciables respecto de los resultados anteriores son indicativas de posibles defectos.

En el caso de los sistemas de medición, a menudo sólo pueden calibrarse componentes individuales como los receptores. Al evaluar la incertidumbre de la medición deben también tenerse en cuenta posibles errores debidos a los demás componentes del montaje de medición, tales como los alimentadores de antena y las propias antenas.

Toda calibración debe estar documentada en un detallado informe de calibración que acompañará a cada elemento de equipo. Dicho informe contendrá una completa documentación de las mediciones efectuadas, incluyendo los valores medidos. Cada elemento de equipo deberá por tanto estar marcado, etiquetado o señalado de manera fiable y permanente para indicar su estado de calibración. Los informes de calibración se incorporan al fichero del equipo cuando éste se repone en servicio.

No es posible especificar un intervalo de calibración normativo. Son comunes los intervalos de un año, pero no existe un periodo generalmente aplicable. El intervalo de calibración debe elegirse desde un punto de vista técnico evaluando las diversas características del equipo de medición.

La calibración impone grandes exigencias sobre el equipo técnico utilizado. Generalmente no puede disponerse de este equipo en el taller normal de una estación de comprobación técnica. El gasto de instalar y mantener un laboratorio de calibración propio sólo puede justificarse en organizaciones de gran volumen, que cuenten con suficientes equipos para mantener de una manera continua la plena utilización de la capacidad de calibración del laboratorio.

En multitud de casos es más aconsejable en el terreno económico recurrir al exterior para la calibración del equipo, bien en el propio fabricante o en un laboratorio de calibración ajeno. Se suprime así la necesidad de allegar recursos de locales, equipos y personal capacitado.

Ciertos fabricantes de equipos de comprobación técnica del espectro que comercializan y venden sus productos globalmente explotan centros regionales de servicio y apoyo en diversas localidades del mundo. Estos centros están equipados con aparatos y patrones de calibración portátiles, entre otros elementos. Para la verificación y calibración del equipo de comprobación técnica del espectro se contrata un equipo técnico especializado que realiza su trabajo con una determinada periodicidad. Los aspectos de la calibración relacionados con sistemas específicos (como los radiogoniómetros) se analizan con más detalle en otras secciones de Manual relativas a dichos sistemas.

2.7.6 Reparaciones

No pueden prevenirse fallos del equipo de medición debidos a defectos técnicos o a la desviación respecto de las tolerancias admisibles. Con miras a garantizar unas operaciones de medición sin alteraciones, debe organizarse un servicio de reparaciones que sea capaz de reaccionar con rapidez y sustituir los elementos afectados. En todo caso, el personal técnico responsable de instalar y mantener el equipo forma parte vital de todo servicio de comprobación radioeléctrica. Su trabajo también comprende la construcción de pequeños dispositivos electrónicos o mecánicos y la localización de averías. El establecimiento de un taller interno garantiza que los desplazamientos sean cortos y breves los tiempos de respuesta, eliminando en gran parte la necesidad de almacenar elementos de repuesto.

Sin embargo, no suele ser justificable que las estaciones de comprobación pequeñas tengan un taller propio totalmente equipado para las reparaciones. En este caso, habría alternativas mejores y más económicas, tales como tener un taller centralizado que atienda a varias estaciones de comprobación o contratar el servicio con fabricantes (véase la Nota 1) o especialistas autorizados. Los servicios de reparación centralizados o externos en general obligan a almacenar más repuestos para asegurar la continuidad del funcionamiento.

NOTA 1 - En algunas ocasiones, además de realizar las reparaciones, los fabricantes de equipos también pueden mantenerlos.

2.7.7 Repuestos

Para garantizar el funcionamiento continuado de las estaciones de comprobación técnica, se recomienda mantener un inventario de repuestos esenciales recomendados por el fabricante. Por consideraciones de costos, de la vida útil de los repuestos y en el caso de administraciones pequeñas, no es recomendable mantener un inventario completo de repuestos de todos los equipos.

2.7.8 Mantenimiento del software

Las modificaciones del software y la reparación de un paquete software complejo como el de los sistemas de comprobación técnica del espectro, hacen muy recomendable disponer de apoyo profesional y, por ende, utilizar el servicio de mantenimiento del software que ofrezca el suministrador /fabricante del sistema.

El administrador / responsable de las tecnologías de la información (TI) y el personal o agente local de soporte autorizado del fabricante/suministrador del sistema deben soportar a nivel local la administración del sistema, es decir, el ajuste y modificación de los diversos parámetros operacionales y la gestión de los datos almacenados (como por ejemplo, los resultados de las mediciones).

Gestión del mantenimiento de sistema

Es recomendable realizar el seguimiento de las actividades de mantenimiento mediante un registro que contenga información relevante.

El registro de mantenimiento puede incluir lo siguiente:

– Situación de los repuestos (disponibles o no disponibles en inventario durante una reparación).

– Seguimiento y registro de actividades de mantenimiento programado.

– Informes de detección de fallos y actividades correctivas subsiguientes (para hardware y software).

– Para cada elemento de equipo, la Administración mantendrá un registro histórico con la actividad de mantenimiento y reparaciones realizadas. Los datos de dicho fichero permitirán un análisis estadístico del funcionamiento y fiabilidad del equipo.

A grandes rasgos, se estima que la actividad anual de mantenimiento (repuestos, reparaciones y calendario de mantenimiento) y apoyo de un sistema de comprobación técnica supone aproximadamente el 10% del coste de establecimiento de dicho sistema.

2.8 Personal

2.8.1 Generalidades

Pese a la automatización de las mediciones que permiten los procesadores, el recurso más importante (y en muchos países el más costoso) sigue siendo el personal. Se necesita una cuidadosa planificación que garantice la constante disponibilidad de un número conveniente de personas con la cualificación adecuada.

El número de personas y las especializaciones requeridas dependen de una diversidad de factores, incluyendo las tareas encomendadas al servicio de comprobación técnica, el grado de automatización de las instalaciones técnicas y el número de emplazamientos y de vehículos.

La estructura de edades del personal debe prever la existencia de un grupo de personas de más edad y con una larga experiencia en el campo de las radiocomunicaciones, y otro grupo de personal más joven que tenga conocimientos actualizados de las tecnologías de la información. Si solamente hubiera trabajadores maduros, experimentados, el servicio de comprobación técnica correría el riesgo de perder en breve plazo su pericia, a medida que se fueran retirando. Análogamente, tampoco sería sensato tener una plantilla de jóvenes capacitados en tecnologías de la información pero sin experiencia en radiocomunicaciones ni en propagación de ondas. Una estructura de edades mixta tiene además la ventaja de que ofrece oportunidades para la promoción del personal.

2.8.2 Categorías de personal

El personal de un servicio de comprobación técnica puede clasificarse en las categorías siguientes:

– de gestión,
– de explotación,
– de mantenimiento/servicio técnico,
– administrativo.

2.8.2.1 Gestión

En el personal con cometidos de gestión se incluyen los jefes de las estaciones de comprobación técnica y los responsables de decisiones fundamentales relativas a la organización e instalaciones del servicio de comprobación. El personal de gestión tiene que ser capaz de demostrar conocimientos en las siguientes materias:

– estructuras y procedimientos internos de la Administración,
– procedimientos de explotación en las estaciones de comprobación técnica,
– tecnología,
– interrelaciones económicas,
– temas legales.

Es preferible que los jefes de estación hayan trabajado como operadores o técnicos en estaciones de comprobación técnica.

2.8.2.2 Personal de explotación

El personal de explotación (los operadores de la estación) realiza las tareas de comprobación técnica y ha de estar familiarizado con la reglamentación administrativa aplicable a los servicios de radiocomunicación, así

como con el equipo técnico correspondiente. En vista del creciente uso de los sistemas de comprobación automatizados y de software, los operadores también necesitan saber desenvolverse en el campo informático. Tanto ingenieros como técnicos poseen la cualificación adecuada para trabajar como operadores, adquiriendo un conocimiento especializado sobre el sector de radiocomunicaciones, principalmente mediante formación en el propio puesto de trabajo.

2.8.2.3 Servicio técnico / mantenimiento

Los operadores que posean la cualificación requerida pueden realizar ocasionalmente tareas técnicas, incluyendo el mantenimiento e instalación de equipos en estaciones pequeñas y en vehículos. Sin embargo, resulta más práctico que estas funciones las desempeñe otro personal, de tal manera que los operadores puedan concentrarse en sus tareas de comprobación técnica. El personal que sólo sea responsable del mantenimiento no precisa tener un conocimiento especial de los servicios de radiocomunicación.

2.8.2.4 Personal administrativo

El personal administrativo debe estar familiarizado con el soporte lógico normal de una computadora personal, incluidos programas de proceso de textos y hojas de cálculo.

2.8.3 Capacitación

2.8.3.1 Introducción

La calidad sólo puede conseguirse con un grupo de personal debidamente capacitado y motivado. La capacitación es por tanto esencial en la preparación del personal para el desempeño de sus funciones: amplía sus conocimientos, complementa su destreza y renueva su base teórica.

La tecnología de los sistemas de radiocomunicación, y por tato, de los equipos de comprobación técnica del espectro, se encuentra en rápida evolución. Si se considera que lo que está en juego también cambia con rapidez, deben tenerse presentes los cambios de la reglamentación nacional e internacional, que directa o indirectamente tienen una gran influencia en las actividades de comprobación técnica del espectro. La capacitación debe por tanto entenderse como un proceso continuo y abierto.

2.8.3.2.1 Identificación de necesidades y planificación de cursos

Las necesidades en materia de instrucción pueden definirse como la diferencia entre la cualificación que se pretende y la que realmente poseen las personas implicadas. Antes de proceder a la identificación, es importante definir con claridad las necesidades del puesto de trabajo para poder evaluar objetivamente el nivel de cualificación real, teniendo además en cuenta las necesidades que planteará el futuro. Mediante entrevistas personalizadas con los miembros de la plantilla, los jefes deberían descubrir qué tipo de instrucción se pide o se desea, y consecuentemente establecer las necesidades en esta materia. No debe olvidarse que la capacitación es una función de gestión.

Por lo que a la planificación se refiere, es importante hacer resaltar el déficit existente y las materias que el curso va a impartir. Este es el único modo de evitar el "turismo de la instrucción", inversiones malgastadas y motivaciones deficientes.

Seguidamente debe responderse a las siguientes preguntas:

- ¿Cuáles son los objetivos y el contenido del curso, qué conocimientos y aptitudes se desea transmitir?
- ¿Qué preparación en este campo poseen ya los participantes? (El personal dedicado a la comprobación del espectro puede presentar una amplia gama de niveles educativos.)
- ¿Debe el curso empezar desde cero, impartir nueva instrucción, repasar la ya adquirida o dar acceso a una cualificación especial?
- ¿Va a ser un curso técnico, de tecnologías de información, de aprender otra lengua, administrativo o de funciones de gestión?
- ¿Tiene la organización personal adecuado propio para impartir cursos o ha de recurrir a compañías privadas, consultores o fabricantes?

– ¿Qué medios o instrumentos de enseñanza va a utilizar (en papel, vídeo, simuladores, soporte lógico interactivo, etcétera)?
– ¿Existen ya los programas y el material didáctico del curso?
– ¿Cuál es el número máximo de participantes para que la instrucción sea eficaz?
– ¿Tiene que darse el curso en algún lugar determinado?

Una vez contestadas las preguntas anteriores puede decidirse si es más conveniente impartir la capacitación en la propia organización o en un centro externo, cuánto ha de durar el curso, el horario del mismo y quién va a recopilar el material didáctico. Sin embargo, a menudo no es posible impartir capacitación con la amplitud requerida debido a restricciones presupuestarias. En tal caso hay que establecer prioridades, tratando de buscarse el consenso con todos los interesados.

Finalizada la planificación, se avisará oportunamente a los instructores y asistentes al curso para que hagan sus preparativos.

2.8.3.2.2 Revisión y evaluación

La revisión y evaluación es una etapa de gran importancia en el proceso. Su importancia a veces se subestima. Al final del curso debe comprobarse si éste se ha desarrollado como estaba previsto y si se han logrado los objetivos propuestos. Con esta finalidad los participantes deberán contestar un cuestionario en el que se evalúe la capacitación recibida. Las preguntas a responder podrían ser, por ejemplo, las siguientes:

– ¿Cree que el curso ha sido útil para sus actividades cotidianas?
– ¿Qué calificación da al material entregado?
– ¿Qué calificación da a los instructores?
– ¿Qué calificación da al contenido técnico/especializado?
– ¿Estuvo bien organizado el curso?
– ¿Qué calificación da al lugar donde se impartió el curso?
– ¿Qué calificación da al curso en su totalidad?
– ¿Lo haría mejor si tuviera que preparar e impartir el curso usted mismo?

En la evaluación podría también incluirse una encuesta dirigida a los participantes al cabo de unos tres meses, en la que se les pregunte si han tenido oportunidad de utilizar lo que han aprendido, si lo han transmitido a sus compañeros, y si consideran logrados los objetivos del curso.

2.8.3.2.3 Medidas correctoras

La evaluación proporcionada por los participantes y sus superiores actúa, también, como aportación a la planificación de cursos posteriores, con lo cual se cierra el círculo del proceso de capacitación.

2.8.3.3 Métodos de capacitación y su puesta en práctica

Hay diferentes maneras de llevar a cabo la capacitación. Ciertas administraciones la realizan por su cuenta, con instalaciones y personal propios. Otras prefieren contratar compañías privadas, consultores o fabricantes para que impartan la capacitación.

Además de asistir a cursos teóricos y prácticos, que incluyan el uso de simuladores y soporte lógico interactivo, es esencial la lectura de libros, artículos, así como Manuales, Informes y Recomendaciones del UIT-R; es importante intercambiar información y experiencia con otros compañeros, tanto nacionales como de otras administraciones.

Dentro de la estrategia de capacitación general, la formación en el puesto de trabajo es el método más eficaz y más frecuentemente utilizado para la instrucción del personal nuevo. Es un método esencial para preservar el bagaje de conocimientos del departamento. Sin embargo, no basta con la simple asignación de nuevos miembros de la plantilla a un compañero experimentado, confiando en que todo marchará bien. Al jefe le incumbe la responsabilidad de planificar la instrucción en el puesto de trabajo y observar los progresos.

2.8.3.4 Aptitudes del personal de comprobación del espectro

El servicio de comprobación técnica del espectro tiene que tratar con una extensa gama de servicios, sistemas y procedimientos administrativos. Ello incluye la necesidad de incorporar conocimientos actualizados (por ejemplo, los sistemas de modulación digitales) y preservar los conocimientos existentes (por ejemplo, modulaciones analógicas). Existen diferencias entre los países en cuanto a sistemas legales, estructuras administrativas, sistemas educativos y sistemas de gestión de frecuencias, por ejemplo. Además, las aptitudes exigidas al personal de comprobación técnica del espectro dependen de sus tareas concretas. De ahí que no sea posible especificar un programa común y completo adaptado a las aptitudes requeridas.

Por esta razón, los conceptos enumerados en el Anexo 1 no son sino elementos teóricos y prácticos cuya inclusión se sugiere en programas y cursos de capacitación que interesan directamente al personal de comprobación del espectro. Se supone un conocimiento teórico de matemáticas, física y lengua, junto con fluidez de cálculo en unidades naturales y logarítmicas.

2.8.3.5 Medios de capacitación de ámbito mundial para la comprobación técnica del espectro

La capacitación guarda estrecha relación con el tipo real de equipo, que puede estar notablemente especializado; sin embargo, merece la pena indicar a continuación algunas instituciones y organizaciones industriales que ofrecen capacitación en el campo de la comprobación técnica de emisiones radioeléctricas.

Como medio para fomentar y desarrollar los sistemas de comprobación técnica, las administraciones de Australia, Francia, Alemania, Italia, Japón, Portugal, el Reino Unido y los Estados Unidos de América se han ofrecido, según la Resolución UIT-R 23 Nota 1), a recibir funcionarios dedicados a la comprobación técnica de otras administraciones. La República de Corea también ofrece su ayuda a responsables de comprobación técnica de otras administraciones., Los contactos iniciales para preparar esta capacitación pueden establecerse en la Oficina de Centralización apropiada como define el artículo 16 del Reglamento de Radiocomunicaciones y se indica en la Lista VIII, Lista de las estaciones de comprobación técnica, publicada periódicamente por la UIT.

También ofrecen capacitación fabricantes como Rohde & Schwarz (Alemania), THALES (Francia) y, en los Estados Unidos de América, TCI, una compañía del grupo SPX (Estados Unidos de América); Tadiran Electronic Systems (Israel) y Agilent Technologies (Estados Unidos de América)..

2.8.3.5.1 Medios de capacitación en los Estados Unidos de América

Dentro de los Estados Unidos de América, el Instituto de Capacitación de Telecomunicaciones de Estados Unidos (USTTI) viene impartiendo cursos de formación en comprobación técnica radioeléctrica y actividades de gestión del espectro conexas desde 1983, cuando el Instituto inició sus tareas en la Conferencia de Plenipotenciarios de la UIT en Nairobi, Kenya. Anualmente el USTTI ofrece varios cursos relacionados con la comprobación técnica radioeléctrica, la gestión del espectro o las mediciones radioeléctricas:

– Gestión del espectro de frecuencias radioeléctricas (en primavera)
– Gestión del espectro en el sector civil (en primavera)
– Comprobación técnica y mediciones en el espectro radioeléctrico (en primavera)
– Aplicaciones prácticas de la gestión del espectro y la comprobación técnica del espectro (en primavera)
– Técnicas y procedimientos de comprobación del espectro radioeléctrico (dos veces al año, en primavera y verano)
– Técnicas de laboratorio en apoyo de los programas de autorización de equipos (en otoño).

Además de estas oportunidades, descritas a continuación, las compañías estadounidenses patrocinan los cursos de radiocomunicaciones del USTTI que puedan contener elementos de la gestión del espectro. En el catálogo que el USTTI publica anualmente se dan detalles de tales cursos. La enseñanza impartida por el USTTI es gratuita.

Curso del USTTI sobre gestión del espectro de frecuencias radioeléctricas: este curso, de dos semanas de duración, se ha concebido como ayuda a la formación de personal técnico preparado para la gestión del

espectro, que sea capaz de realizar actividades diarias y de más largo alcance para la introducción de nuevos sistemas y tecnologías.

Curso del USTTI sobre gestión del espectro en el sector civil: este curso, de dos semanas de duración, se ha concebido para proporcionar al responsable de la gestión del espectro en las telecomunicaciones civiles nacionales información y material que le permita tomar decisiones lógicas relacionadas con el espectro, con un sólido fundamento en procedimientos técnicos básicos.

Curso del USTTI sobre comprobación técnica y mediciones en el espectro radioeléctrico: este curso, de una semana de duración, está concebido específicamente como una continuación del curso sobre gestión del espectro en el sector civil, requisito previo para asistir al primero. Se destina a los que tienen un interés particular por las técnicas de comprobación técnica y mediciones

Curso del USTTI sobre aplicaciones prácticas de la gestión del espectro y la comprobación técnica del espectro : este curso, de una semana de duración, se centra en las aplicaciones prácticas de las técnicas de gestión y comprobación técnica del espectro conformes con lo especificado por la UIT, incluyendo el tratamiento de licencias, instrumentos para análisis técnicos, mediciones radiogoniométricas y de señales, y hace hincapié en la detección automática de infracciones y otras ventajas que son el resultado de utilizar un sistema de gestión y comprobación técnica integrado y automatizado. El curso cubre también los objetivos de una organización internacional para gestión y comprobación del espectro radioeléctrico. Puede obtenerse más información sobre el curso de su patrocinador, TCI, una empresa de SPX.

Curso del USTTI sobre técnicas y procedimientos de comprobación técnica del espectro radioeléctrico: este curso proporciona instrucción práctica en los procedimientos de mediciones e identificación de señales de radiogoniometría en frecuencias entre 30 MHz y 3 GHz. Curso de USTTI sobre técnicas de laboratorio de apoyo a programas de autorización de equipos: este curso de una semana ofrece a los participantes capacitación y experiencia directa en un entorno de laboratorio en funcionamiento para la realización de mediciones técnicas y la prueba y calibración de equipos de telecomunicaciones.

2.8.3.5.2 Programa internacional de capacitación para la comprobación técnica del espectro en Japón

El Ministerio de la Gestión Pública, Asuntos Nacionales, Correos y Telecomunicaciones (MPHPT) ha preparado planes de capacitación internacional para la comprobación técnica del espectro.

Este programa de capacitación internacional es ejecutado anualmente por la JICA (Agencia de Cooperación Internacional Japonesa) para los países en desarrollo en cooperación con el MPHPT. El programa lo explota la ODA (Asistencia Oficial al Desarrollo) de Japón. Puede obtenerse una información más detallada del MPHPT o de la JICA

2.8.3.5.3 Programa internacional de capacitación sobre la comprobación técnica del espectro en Corea

La Comisión de Telecomunicaciones de Corea (KCC) ha venido ofreciendo a los países en desarrollo programas de capacitación internacional sobre teoría y técnicas de comprobación técnica del espectro. Los programas de capacitación internacional son organizados por la KISA (Agencia de Internet y la Seguridad de Corea). El programa incluye aspectos de la comprobación técnica del espectro y de la gestión del espectro. Esta capacitación ha sido principalmente planificada para funcionarios y técnicos de los gobiernos de países en desarrollo.

Programa de comprobación técnica del espectro de la Agencia de Internet y la Seguridad de Corea

El contenido del curso sobre Política de Gestión de Frecuencias Radioeléctricas versa sobre la política de gestión del espectro y las tecnologías de comprobación técnica. El curso está diseñado como introducción a nuevas tecnologías de la comprobación técnica del espectro. La mayoría del mismo corresponde a teoría y técnica de nuevos sistemas de radiofrecuencia, tales como sistemas inteligentes de comprobación técnica del espectro en Corea y teorías y sistema de radiogoniometría.

El curso de comprobación técnica del espectro ofrece formación sobre técnicas de comprobación técnica. Presenta las técnicas más novedosas de radiocomunicaciones y ofrece una visión general de las tecnologías de comprobación técnica, así como información detallada sobre técnicas de medición del espectro y

tendencias tecnológicas en el ámbito de la comprobación técnica del espectro. El curso ofrece a los participantes conocimientos teóricos y sobre técnicas de RF. Para promover el conocimiento de tecnologías avanzadas de comprobación técnica del espectro, la Oficina Central de Gestión del Espectro (CRMO), dependiente de la Comisión de las Comunicaciones de Corea (KCC), apoya el programa de capacitación con conferencias sobre instalaciones de comprobación técnica del espectro y el análisis sobre el terreno de diversos aspectos de la comprobación técnica del espectro.

El programa y requisitos de participación en el curso se publican en el sitio web (www.Koalp.org) y se notifican a las administraciones con anterioridad a su impartición. Los cursos son gratuitos.

Anexo 1 a la sección 2.8

Aspectos de la capacitación en comprobación técnica del espectro

Organizativos y generales

– Estructura, funciones y procedimientos comunes

– Estructura, funciones y procedimientos de las organizaciones nacionales que atañen a la gestión y comprobación técnica de las frecuencias (autoridades aeronáuticas, marítimas, policía)

– Estructura, funciones y procedimientos de las organizaciones nacionales e internacionales pertinentes

Aspectos legales

– Leyes aplicables

– Ordenanzas

– Acuerdos

– Reglamentación y normas

Gestión del espectro

– Cuadros de atribución de espectro, nacionales y otros

– Procedimientos de asignación de frecuencias y de concesión de licencias

– Designación de emisiones

– Lista Internacional de Frecuencias

– Distintivos de llamada

– Concepto de reutilización de frecuencias

Teoría radioeléctrica básica

– Servicios, sistemas y aplicaciones radioeléctricas

– Propagación de las ondas electromagnéticas, pérdidas en espacio libre, efectos de la propagación multitrayecto, cálculos del balance de enlace

– Antenas: teoría, tipos y técnicas en cada gama de frecuencias, antenas para las estaciones de comprobación técnica

– Transmisores de radiofrecuencia, incluyendo emisiones no deseadas

– Receptores: sistemas de comprobación del espectro, factor de ruido y relación señal a ruido, temperatura de ruido; sensibilidad e inmunidad, puntos de interceptación

– Técnicas de modulación, anchura de banda necesaria

– Cálculo de la PIRE y programas de computador para la comparación de niveles medidos y calculados

– Principios de las transformaciones de Fourier y la transformada rápida de Fourier (FFT)

– Filtrado y apantallamiento

Procedimientos de medición

– Frecuencia, desviación de frecuencia, excursión de frecuencia

– Anchura de banda ocupada, emisiones no esenciales y fuera de banda

– Intensidad de campo y densidad de flujo de potencia

– Radiogoniometría, calidad de triangulación

– Identificación de estaciones
– Selección de puntos de medición
– Registro, análisis, descodificación

Aspectos prácticos

– Presentación de informes y datos, que incluye la preparación de informes sobre infracciones e interferencia perjudicial en cumplimiento del Reglamento de Radiocomunicaciones.
– Procedimientos para identificar las fuentes de interferencia en televisión, distinguiendo entre un aparato televisor defectuoso o incorrectamente sintonizado, una fuente de alimentación de amplificador averiada, un cable o conexión de antena dañado, un amplificador de antena averiado o saturado, una antena orientada en multitrayecto, una emisión interferente en AM, una emisión interferente en FM, aparatos industriales, científicos o médicos en las proximidades, dispositivos de corto alcance, otros dispositivos electrónicos, etc..
– Procedimientos para identificar posibles elementos en los que se genera un producto de intermodulación, como un contacto defectuoso, por ejemplo.
– Procedimientos para observar diversos servicios de radiocomunicación.
– Selección de puntos de medición para las estaciones móviles de comprobación técnica.
– Reconocimiento y reducción de la interferencia en radiofrecuencia; principales medidas a adoptar contra la interferencia perjudicial.
– Identificación de señales por la escucha.
– Mediciones de la estampa de haz de antena.
– Reconocimiento de los sistemas de espectro ensanchado, tales como los generadores de saltos de frecuencia.
– Uso de analizadores de espectro.

CAPÍTULO 3

Equipo de comprobación técnica y automatización de las operaciones de comprobación técnica

		Página
3.1	Introducción	106
3.1.1	Consideraciones generales	106
3.1.2	Influencia del entorno de interferencia	107
3.1.3	Interfaz hombre–máquina	108
3.1.3.1	Principios básicos	108
3.1.3.2	Acciones y efectos	109
3.1.3.3	Identificación del accionador y exigencias de realimentación	109
3.1.3.4	Interfaz de computador	110
3.2	Antenas de comprobación técnica y de medición	110
3.2.1	Consideraciones generales	110
3.2.2	Configuraciones de antena adecuadas	111
3.2.2.1	Tareas de comprobación técnica realizadas mediante antenas omnidireccionales	111
3.2.2.1.1	Bandas de ondas miriamétricas, kilométricas, hectométricas y decamétricas	111
3.2.2.1.2	Bandas de ondas métricas y decimétricas	112
3.2.2.1.3	Banda de ondas centimétricas	113
3.2.2.2	Tareas de comprobación técnica asociadas a antenas directivas	114
3.2.2.2.1	Bandas en ondas miriamétricas, kilométricas y decamétricas	114
3.2.2.2.2	Bandas en ondas métricas y decimétricas	114
3.2.2.2.3	Banda de ondas centimétricas	115
3.2.2.3	Resumen de la selección de antenas	116
3.2.3	Antenas para ondas miriamétricas, kilométricas, hectométricas y decamétricas	116
3.2.3.1	Antenas omnidireccionales para ondas miriamétricas, kilométricas y hectométricas	116
3.2.3.2	Consideraciones generales sobre las antenas de ondas decamétricas	121
3.2.3.3	Tipos de antenas de ondas decamétricas	122
3.2.4	Antenas para ondas métricas, decimétricas y centimétricas	128
3.2.4.1	Antenas omnidireccionales para ondas métricas y decimétricas	128
3.2.4.2	Antenas directivas para ondas métricas y decimétricas	132
3.2.4.3	Antenas para frecuencias superiores a 3 000 MHz	133
3.2.5	Emplazamiento de las antenas	137
3.2.6	Antenas para estaciones móviles de comprobación técnica	140
3.2.7	Antenas para estaciones transportables y portátiles	143

		Página
3.2.8	Líneas de transmisión y sistemas de distribución	146
3.2.8.1	Líneas de transmisión	146
3.2.8.2	Sistemas de distribución	146
3.2.8.2.1	Principios generales	147
3.2.8.2.2	Calidad de funcionamiento	150
3.3	Receptores de comprobación técnica	152
3.3.1	Consideraciones generales	152
3.3.2	Receptores analógicos	152
3.3.3	Receptores digitales	154
3.3.4	Sintetizadores de frecuencia para los receptores	156
3.3.5	Especificaciones típicas de receptores de comprobación técnica	156
3.4	Radiogoniometría	159
3.4.1	Consideraciones generales	159
3.4.2	Antenas	160
3.4.3	Equipo	160
3.4.4	Número de receptores	161
3.4.4.1	Sistemas unicanal	161
3.4.4.1.1	Sistemas de radiogoniometría unicanal sencillos	162
3.4.4.1.2	Sistemas de radiogoniometría unicanal multiplexada o interferómetros	162
3.4.4.2	Sistemas multicanal (un canal de referencia y uno o más canales de muestreo conmutados)	162
3.4.4.3	Sistemas de N–canales (N = número de canales del receptor = número de antenas)	163
3.4.5	Procesamiento de la marcación	164
3.4.6	Especificaciones típicas de los sistemas de radiogoniometría	164
3.5	Equipo periférico y adicional	166
3.5.1	Equipo de medición de frecuencia	166
3.5.1.1	Generalidades	166
3.5.1.2	Patrones de frecuencia	167
3.5.1.3	Patrón de señales horarias y frecuencia controlado por GPS	167
3.5.2	Equipo de medición de intensidad de campo	168
3.5.3	Equipo de análisis del espectro y de medición de la anchura de banda	169
3.5.4	Equipo para la comprobación técnica automática de la ocupación del espectro	170
3.5.5	Equipo de registro	171
3.5.5.1	Medios de registro	171
3.5.5.2	Equipo de registro de banda amplia	173
3.5.5.2.1	Datos y formatos de registro	173

Página

3.5.5.2.2 Grabación de datos digitales 174

3.5.5.2.3 Anchura de banda del equipo de registro 174

3.5.5.2.4 Requisitos de calidad de funcionamiento del equipo de grabación 174

3.5.6 Equipo de medición de la modulación 175

3.5.7 Equipo de identificación 175

3.6 Automatización de la comprobación técnica 176

3.6.1 Introducción 176

3.6.2.1 Niveles de automatización 179

3.6.2.2 Automatización de una estación 180

3.6.2.2.1 Modos de funcionamiento típicos de una estación automatizada 181

3.6.2.2.2 Ejemplos de visualización automatizada de anchuras de banda amplias 185

3.6.2.2.3 Ejemplos de análisis de los resultados de mediciones 188

3.6.2.2.4 Funcionamiento en tiempo real con exploración espectral rápida, radiogoniometría instantánea y alertas al operador 189

3.6.2.2.5 Ejemplo de automatización de la recalada por radiogoniometría 193

3.6.2.2.6 Búsqueda automática del emplazamiento de fuentes de emisiones electromagnéticas 194

3.6.2.2.7 Visualización de zonas de cobertura de estaciones de comprobación técnica del espectro en ondas métricas y decimétricas 195

3.6.3 Redes informatizadas de comprobación técnica 198

3.6.3.1 Introducción 198

3.6.3.2 Sistemas nacionales informatizados integrados 198

3.6.3.2.1 Funcionamiento de la red de estaciones automatizadas 199

3.6.3.2.2 Acceso remoto a recursos del sistema 200

3.6.3.2.3 Detección automática de infracciones 200

3.6.3.2.4 Ejemplo de protocolo de transferencia de la comprobación técnica radioeléctrica para la explotación de muchas estaciones de comprobación técnica desde una estación de control 201

3.6.3.3 Ejemplo de un sistema automatizado en ondas decamétricas, métricas y decimétricas 202

3.6.4 Equipo para elaboración de informes y software de sistemas automatizados 204

3.1 Introducción

3.1.1 Consideraciones generales

El equipo disponible en una estación de comprobación técnica radioeléctrica debe ser adecuado para realizar las mediciones necesarias en esa estación. Estas mediciones son consecuencia de las tareas que se han asignado a la estación. A su vez, dichas funciones dependen de la finalidad y los objetivos de la comprobación técnica radioeléctrica dentro del país, según se expone en las secciones 1.3 y 2.3. La naturaleza y calidad de las mediciones determinará los tipos de equipo necesarios.

Una estación de comprobación técnica que participe en el sistema de comprobación técnica internacional debe ser capaz de realizar las mediciones con una precisión que cumpla con las normas técnicas para estaciones de comprobación técnica contenidas en las Recomendaciones pertinentes del UIT–R. Para los casos en que sean aplicables, se mencionan estas Recomendaciones en las secciones 3.3 a 3.5. Las demás características del equipo deben satisfacer los criterios mínimos como se expresa en las partes pertinentes de las secciones 3.3 a 3.5. En particular debe procurarse dotar de la linealidad recomendada a los receptores de medición y a las antenas activas, como se indica en el punto 3.1.2, y tener en cuenta el efecto del entorno, como son las estructuras metálicas circundantes.

Un conjunto de equipos mínimo para una estación de comprobación técnica estaría compuesto por un receptor y un sistema de antena para la gama de frecuencias de interés. Una antena direccional rotatoria puede proporcionar información de marcación aproximada. También se requiere una capacidad de medición básica de las frecuencias e intensidades de campo, lo que puede conseguirse mediante un receptor y una antena de calibración.

El sistema puede complementarse añadiendo un controlador de proceso para proporcionar la automatización de algunas tareas de medición esenciales y un equipo de radiogoniometría para obtener una información de marcación de acimut. La mayoría de las estaciones de comprobación técnica utiliza la automatización para descargar a los operadores de la ejecución de mediciones de largo periodo, que ocupan mucho tiempo, tales como las mediciones de ocupación del espectro.

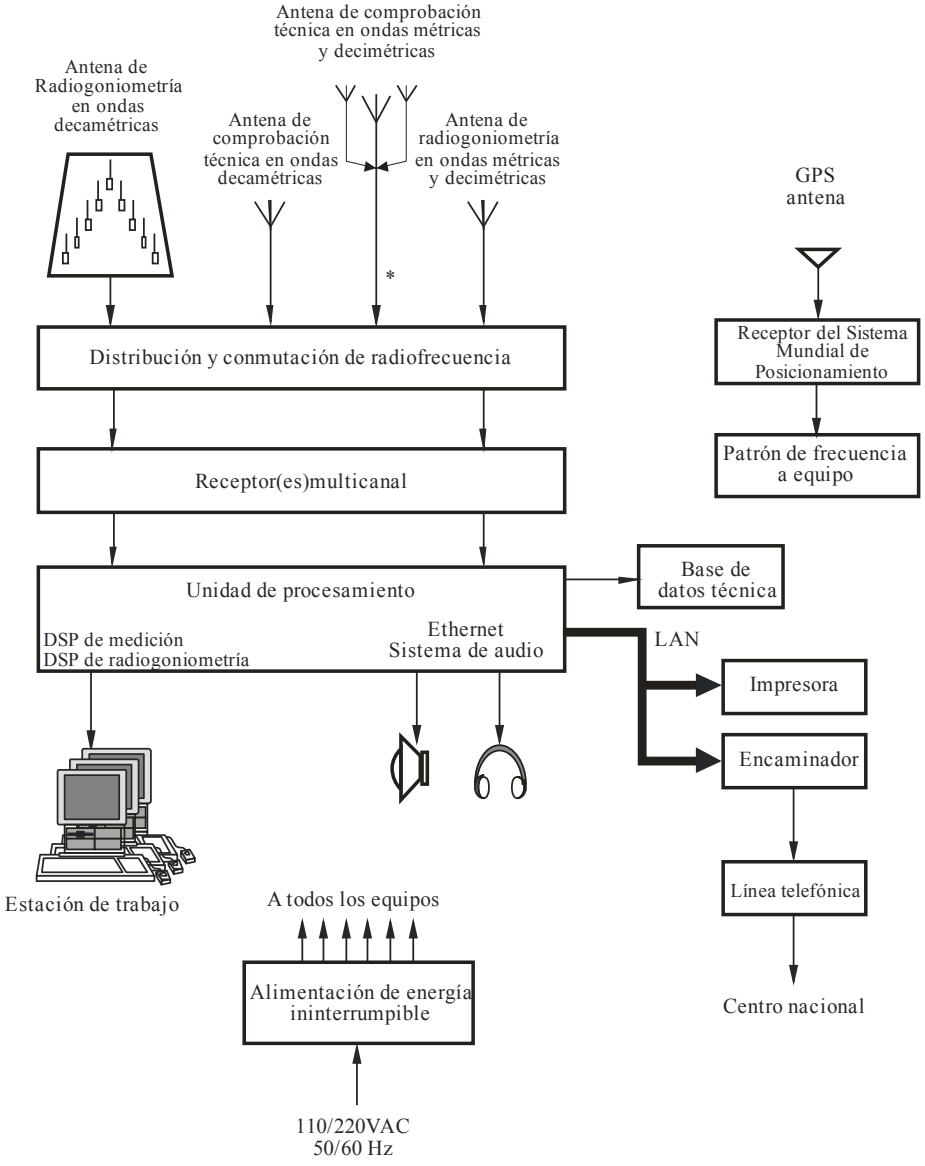
Los sistemas de comprobación técnica más refinados consisten en una jerarquía de estaciones de comprobación técnica nacionales, regionales, distantes y móviles enlazadas en una red en tiempo real para ofrecer el control integrado de estaciones múltiples con una sola consola de operación. Este tipo de sistema está informatizado y estructurado en red, valiéndose de un soporte lógico elaborado para descargar a los operadores de tareas aburridas y aumentar enormemente la velocidad de medición. Eleva asimismo el grado de utilización del equipo al permitir que se ejecuten automáticamente tareas de base, tales como la búsqueda de transmisores no autorizados, cuando el equipo no se requiere para otros fines.

En la Fig. 3.1–1 se muestra el diagrama de bloques de una estación de comprobación técnica integrada con un equipado mínimo. La estación utiliza receptores que cubren la gama de frecuencias de 9 kHz a 3 000 MHz o superiores para proporcionar las funciones básicas de medición, como son las de frecuencia, intensidad de campo, análisis de modulación y radiogoniometría. La unidad de control permite efectuar mediciones prolongadas en tiempo tales como la ocupación del espectro. Se proporciona una base de datos que contiene información de licencias y de tipo técnico, o una interfaz directa a una base de datos de un sistema de gestión del espectro. Esta base de datos técnica incluye información técnica sobre las estaciones con licencia y sus parámetros, que permiten a una estación integrada identificar las frecuencias en las que hay transmisores que no están incluidos en la base de datos, por lo que se supone que carecen de licencia, e identificar transmisores que no funcionan con los parámetros que figuran en la licencia.

Nótese que la precisión global de los sistemas de comprobación técnica no solo es función de las especificaciones de los componentes individuales tales como receptores y antenas. Determinados parámetros relevantes, como la linealidad, sensibilidad, precisión del azimut y precisión de la intensidad de campo, pueden también verse influidos por el tipo y longitud de los cables entre los componentes del sistema así como por las condiciones del entorno.

FIGURA 3.1–1

Diagrama de bloques de una moderna estación integrada de comprobación técnica



* Puede también ser conectada directamente a la unidad de procesamiento.

Spectrum-3.1-01

3.1.2 Influencia del entorno de interferencia

Idealmente las estaciones de comprobación técnica deben estar situadas en lugares donde la comprobación técnica no sufra interferencia de transmisores radioeléctricos próximos a las mismas, o en lugares no atravesados por líneas de alta tensión o enlaces de microondas. Además, una vez elegido un emplazamiento, o lo que es más importante, una vez que se hayan iniciado las operaciones de comprobación técnica el emplazamiento debe ser protegido por medios tales como la planificación de frecuencias.

Como no siempre puede cumplirse el principio indicado, las antenas y los receptores de las estaciones de comprobación técnica del espectro funcionan por lo general en condiciones de interferencia que suelen ser bastante más rigurosas que las sufridas por las antenas de recepción y los receptores de comunicación

ordinarios. La frecuencia de trabajo, la ubicación, la altura de antena y el acimut, etc. de un receptor de comunicaciones del servicio fijo son especialmente seleccionados en la etapa de asignación de frecuencias de manera que el receptor considerado esté adecuadamente protegido (dotándolo de una frecuencia apropiada y de separación geográfica entre las estaciones radioeléctricas, sobre la base, en particular, de los parámetros indicados de la antena y del receptor) contra los efectos de la interferencia causada por transmisores de otros enlaces radioeléctricos. Por consiguiente se hace todo lo posible para mantener dicha protección con respecto a todas las nuevas asignaciones de frecuencia.

Las antenas de estaciones de comprobación técnica del espectro deben establecerse idealmente en un punto elevado rodeado por espacio abierto para asegurar que las señales sean recibidas del mayor número posible de transmisores sometidos a comprobación técnica dentro de una amplia zona de servicio y en todos los acimuts. Ocurre a menudo que las estaciones de comprobación técnica están situadas en ciudades próximas a transmisores potentes (incluidos los que se utilizan en la radiodifusión sonora y de televisión) con antenas altas, o que dichos transmisores de potencia están instalados cerca de estaciones de comprobación técnica existentes. En esos casos, siempre se ha prestado poca o ninguna atención a la cuestión de observar los requisitos de frecuencia o de separación geográfica que son una característica fundamental de la planificación de frecuencias de los medios radioeléctricos de comunicación, por cuya razón las antenas y receptores de las estaciones de comprobación técnica tienen que funcionar en condiciones de interferencia mucho más rigurosas que otros medios radioeléctricos de comunicación, lo cual impone requisitos especiales en cuanto a los parámetros que caracterizan la protección intrínseca de los receptores y antenas activas contra los efectos de la posible interferencia.

Estos requerimientos afectan a parámetros tales como la selectividad y la linealidad del receptor (puntos de intercepción de segundo y tercer orden), rechazo de frecuencia intermedia y de frecuencia imagen, gama dinámica del receptor y la linealidad (puntos de interceptación de segundo y tercer orden) de las antenas activas y su protección contra la interferencia (umbral perjudicial). Éstos determinan en gran medida la aptitud del equipo de las estaciones de comprobación técnica del espectro en su conjunto para efectuar mediciones y radiogoniometría en condiciones de interferencia rigurosa e incontrolada. Si a consecuencia de una protección insuficiente debido a que no pueden cumplirse los requisitos indicados en las secciones 3.2 y 3.3, la antena y/o el receptor es afectada por la interferencia, tanto la medición de ciertos (o todos) los parámetros de emisión del transmisor y las operaciones de radiogoniometría pueden estar sujetos a errores apreciables; en otras palabras, los datos no serán fiables o simplemente no podrán obtenerse. Por tanto, cuando se utilicen antenas y receptores que tengan características insatisfactorias, las grandes sumas invertidas en el establecimiento de las estaciones y redes de comprobación técnica del espectro pueden haber sido malgastadas. La influencia de las señales interferentes se presenta por lo general en forma de intermodulación y/o bloqueo. Los mecanismos de estos fenómenos se consideran en el punto 3.3.2.

A la luz de lo anterior, se recomienda evitar la utilización con fines de comprobación técnica del espectro receptores de comunicación que no cumplan el conjunto completo de requisitos expuestos en las secciones 3.2 y 3.3.

Los resultados de las mediciones y de la radiogoniometría en el emplazamiento también son influenciados de forma notable por otras antenas y estructuras metálicas circundantes, asunto que se trata en el punto 3.2.5.

3.1.3 Interfaz hombre–máquina

Para realizar las tareas de las estaciones de comprobación técnica a menudo se requiere la explotación manual del equipo, incluidos los receptores y el equipo de mantenimiento, y el funcionamiento interactivo de los sistemas. Además, para la operación de los sistemas automatizados de comprobación técnica del espectro descritos en el punto 3.6, deberán observarse ciertas directrices relativas a la interfaz hombre–máquina.

La Norma CEI 447/4.93: *Man machine interface (MMI) – Actuating principles* (Interfaz hombre–máquina – Principios de accionamiento) ofrece una orientación general a este respecto.

3.1.3.1 Principios básicos

La aplicación de los principios de accionamiento, la disposición y la secuencia de los accionadores deberán aplicarse sin ninguna ambigüedad, especialmente en estaciones de comprobación técnica en las que las personas han de realizar tareas con equipos de orígenes diferentes. Habrán de tenerse en cuenta la velocidad

de trabajo requerida, los aspectos ergonómicos y el grado en que se pretende evitar el funcionamiento fortuito.

Los accionadores serán claramente identificables, y sólo será posible ejecutar una orden mediante la operación deliberada de un accionador (esto limita la aplicación de accionadores de doble función). El método de diálogo utilizado debe tener en cuenta los aspectos ergonómicos que afecten a esa tarea.

Para evitar los errores de operador, se recomienda la aplicación de las medidas siguientes:

– prioridad de orden definida; y
– simplificación de la secuencia de operación de los accionadores (por ejemplo, mediante la automatización).

El conjunto de accionadores estará agrupado lógicamente según la correlación existente entre sus mecanismos de operación o funciones. Se aplicarán uno o más de los siguientes principios de agrupamiento:

– por funciones o interrelaciones;
– por secuencia de utilización;
– por frecuencia de utilización;
– por prioridad.

3.1.3.2 Acciones y efectos

En la medida posible, la necesaria operación del accionador debe estar correlacionada con los efectos finales requeridos, según la dirección de operación o la localización relativa de un accionador. Los efectos finales pueden clasificarse en efectos de aumento y efectos de disminución.

Principalmente existen dos métodos diferentes para realizar las acciones opuestas:

– utilización de un accionador con dos direcciones de operación (por ejemplo, un volante manual o botón de sintonía);
– utilización de un conjunto de dos accionadores (por ejemplo, pulsadores), cada uno con un sentido de operación solamente.

Algunos operadores prefieren el empleo de botones de sintonización, especialmente para ajustar la frecuencia de un receptor y para el control de volumen. Puede así efectuarse fácilmente la corrección de la frecuencia mientras se escucha la señal de audio, al tiempo que se ajusta el volumen. Se requiere suficiente separación entre los dos botones para trabajar con las dos manos.

3.1.3.3 Identificación del accionador y exigencias de realimentación

La información visual, auditiva o táctil que se realimenta ayudará a mejorar la interfaz hombre–máquina. El efecto o la reacción de la operación del accionador deberán ser inmediatos. Cualquier retraso podría inducir al usuario a actuaciones erróneas. A continuación se indican algunos ejemplos:

– Un LED (diodo fotoemisor) sirve para indicar que un conmutador ha sido activado (el color del LED debería ser ámbar o verde).
– Todo cambio de un valor ajustador (por ejemplo, frecuencia, anchura de banda, atenuación) deberá ser indicado inmediatamente en una pantalla.
– Estará garantizada la legibilidad de las pantallas, tanto a luz del día como en una habitación oscura.
– En la mayoría de los casos, toda indicación auditiva distinta de la que procede del altavoz es inadecuada puesto que puede interferir con la señal de audio.
– Es preferible montar un altavoz sobre el panel frontal del receptor, de modo que la clavija del teléfono puede desconectarlo.
– Un visualizador panorámico ayuda a sintonizar la frecuencia y a orientarse cuando hay interferencias que perturban la recepción. En el caso ideal, la pantalla debe poder funcionar en tiempo real con posibilidad de almacenamiento digital para lograr una máxima retención. Cuando se añade una pequeña retención, pueden descubrirse fácilmente las señales intermitentes entre las emisiones continuas.

– Cuando se sintoniza la frecuencia por pasos discretos utilizando un botón de sintonía, resulta muy útil disponer de un botón dotado de enclavamiento magnético, lo que permite distinguir cada paso al tacto, al tiempo que evita una desintonía no intencionada producida, por ejemplo, por vibraciones. Por otra parte, el enclavamiento magnético combinado con un volante de inercia permite una sintonización rápida.

– El tratamiento digital de la información de cada paso proporcionará aceleración y una mayor velocidad de sintonización. En combinación con un conjunto de teclas el botón de sintonía permite la sintonización casi continua y para la sintonización desde un canal a otro se emplea una combinación de dos accionadores como se ha descrito anteriormente.

– Es conveniente tener una reacción analógica cuando la sintonización es manual, que puede ser mediante un medidor de nivel y de sintonía, especialmente cuando no se dispone de visualización panorámica del espectro. Un medidor analógico, por ejemplo, ayuda a orientar la antena en la dirección de máxima recepción.

3.1.3.4 Interfaz de computador

En lugar de que cada instrumento tenga una interfaz de usuario propia diferente, puede crearse una interfaz de usuario utilizando computadores, soporte lógico y equipos controlados a distancia, como se indica posteriormente en la sección 3.6. Esta interfaz de usuario permitiría acceder de un modo similar a los controles de cada instrumento y reduciría la capacitación exigida al operador. Ejemplos de tales interfaces de usuario son los menús y recuadros de diálogo, y la representación gráfica por medio de iconos y símbolos. Esta técnica es particularmente eficaz cuando el operador puede personalizarla para tareas prácticas, permitiendo flexibilidad al direccionar métodos de misiones y procesamiento.

3.2 Antenas de comprobación técnica y de medición

3.2.1 Consideraciones generales

La finalidad de las antenas receptoras consiste en extraer del entorno la máxima señal posible que se propaga a través de la atmósfera y aplicar esta señal a la entrada del receptor, garantizando al mismo tiempo una captación mínima de ruido y de señales interferentes. Las características específicas de una antena de comprobación técnica estarán en gran medida determinadas por el tipo de aplicación particular de que se trate. Al escoger una antena de comprobación técnica, es preciso tener en cuenta factores tales como las propiedades de la señal deseada, los parámetros que se proyecta estudiar, las características relativas al emplazamiento en que va a ser instalada y todas las posibles interferencias.

Para obtener la mejor relación posible, la polarización de las antenas debe corresponder a la del frente de onda de la señal recibida, y su impedancia debe adaptarse a la de las líneas de transmisión y circuitos de entrada del receptor a fin de lograr una transferencia máxima de la energía. Los diagramas de recepción omnidireccionales han demostrado su utilidad en la comprobación técnica general o para determinaciones del espectro de radiofrecuencia. En cambio, cuando se trata de observar una señal específica transmitida en una banda de frecuencias compartida, puede ser conveniente utilizar antenas directivas, que permitan anular una o más de las señales interferentes o reforzar la señal deseada. Una unidad móvil es también de utilidad porque separa las frecuencias compartidas cuando se conduce cerca de la antena que radia la señal de interés. Para determinado tipo de observaciones, como los estudios de intensidad de campo, conviene que las propiedades de la antena utilizada en función de la frecuencia sean conocidas y no varíen con el tiempo. Una unidad móvil con antenas calibradas es capaz de proporcionar una medida de la intensidad de campo media en una determinada zona. Como no existe ningún tipo de antena que reúna todas las características necesarias para una recepción eficaz de toda clase de señales, se necesitarán por lo general cierto número de antenas diferentes en las estaciones de comprobación técnica.

En lo que sigue se describen, agrupados según la banda de frecuencias, los distintos tipos de antenas para aplicaciones específicas.

3.2.2 Configuraciones de antena adecuadas

Las propiedades de las ondas electromagnéticas, incluidas la longitud de onda, la resonancia y la propagación de la señal y del ruido, permiten seleccionar las antenas teniendo en cuenta lo siguiente:

− Directividad y ganancia, que constituyen los principales parámetros de las antenas. Las antenas pueden dividirse en dos grupos: antenas omnidireccionales (cuyo acimut del diagrama de radiación es esencialmente circular) y antenas directivas. Las antenas omnidireccionales pueden utilizarse para tareas genéricas de comprobación técnica cuando no se conoce la posición del transmisor (tasas de ocupación, exploración), mientras que las antenas directivas pueden utilizarse para tareas específicas (mediciones técnicas) cuando es necesaria una mayor sensibilidad.

− Bandas de frecuencia en ondas miriamétricas, kilométricas, hectométricas, decamétricas, métricas, decimétricas o centimétricas.

− El tamaño y el peso también pueden tenerse en cuenta a la hora de elegir una antena en función del tipo de estación de comprobación técnica; fija, móvil, transportable o portátil.

3.2.2.1 Tareas de comprobación técnica realizadas mediante antenas omnidireccionales

Las antenas omnidireccionales son adecuadas para las tareas de comprobación técnica siguientes:

– búsqueda de un transmisor desconocido,

– ocupación del espectro,

– exploración de frecuencia o de banda de frecuencias,

– radiogoniometría,

– misiones automáticas.

Las antenas omnidireccionales también son adecuadas para:

– mediciones técnicas (intensidad de campo, mediciones de anchura de banda y de frecuencia) cuando se conoce el factor de antena,

– comprobación técnica de un transmisor en movimiento,

– identificación y análisis de servicios de redes móviles o celulares.

3.2.2.1.1 Bandas de ondas miriamétricas, kilométricas, hectométricas y decamétricas

En estas bandas de frecuencias la longitud de onda es muy larga y no es práctico tener antenas con un tamaño aproximado de un cuarto de longitud de onda, que es la que ofrecería la máxima sensibilidad de antena. En estos casos pueden utilizarse antenas activas, aunque éstas presentan una menor linealidad debido a la intermodulación.

Estaciones fijas:

Los equipos radioeléctricos fijos de comprobación técnica tienen menos limitaciones de tamaño y peso y, por tanto, pueden utilizar antenas con mejores prestaciones. Las estaciones fijas de comprobación técnica deben instalarse en zonas rurales, alejadas de las ciudades y donde haya disponibilidad de los terrenos necesarios para la instalación de todas las antenas necesarias.

Las estaciones fijas de comprobación técnica en ondas miriamétricas, kilométricas, hectométricas y decamétricas son muy importantes para el análisis de señales muy distantes y para el análisis de los transmisores de alta potencia, incluyendo la comprobación técnica cerca de las fronteras o en países de gran extensión, la radiogoniometría y localización mediante una sola estación (SSL), que mediante una única estación permite medir los ángulos de elevación y de acimut y utilizar información ionosférica para localizar un transmisor.

Las antenas omnidireccionales adecuadas para dichas estaciones incluyen las siguientes:

– Un sistema de antenas que permita la recepción omnidireccional con polarización vertical en la gama de frecuencias de onda corta (de 2 a 30 MHz). Este sistema puede utilizar una antena de gran tamaño, como por ejemplo una antena cónica invertida de banda ancha, varias antenas de tipo monopolo cónicas que se superponen en frecuencia o bien, una antena activa

– Al menos un sistema de antenas activas omnidireccionales que permitan utilizar polarización vertical y horizontal o la posibilidad de recepción con diversidad de polarización y que cubran la gama de frecuencias entre 9 kHz y 30 MHz, especialmente si existen restricciones de espacio o de recursos económicos.

– Una red de radiogoniómetros de gran apertura y largo alcance, con un tamaño de entre 50 y 300 m que proporcione marcaciones direccionales. Las antenas pueden ser omnidireccionales o directivas. Otras estaciones de comprobación técnica pueden proporcionar marcaciones adicionales pudiéndose determinar la posición del transmisor mediante triangulación. (Gama de frecuencias desde varios 100 kHz hasta aproximadamente 30 MHz.)

Estaciones móviles:

El tamaño de la antena es la principal limitación en las estaciones de comprobación técnica móviles en ondas miriamétricas, kilométricas, hectométricas y decamétricas. Dichas estaciones permiten obtener:

– Resultados de mediciones estando en movimiento cerca del transmisor. Por ejemplo, mientras que una estación de comprobación técnica fija no puede realizar una medición precisa debido a que la relación señal a ruido (*S/N*) es demasiado baja, una estación de comprobación técnica móvil pueden desplazarse hasta las proximidades del transmisor para aumentar la *S/N*.

– Una línea de marcación (LoB) adicional, junto con una estación de comprobación técnica fija para aumentar la precisión de la localización.

El tamaño limita considerablemente la elección de dichas antenas:

– Monopolo corto (antena de látigo)

– Dipolo (con alimentación central)

– Cuadros magnéticos

– Antenas activas.

3.2.2.1.2 Bandas de ondas métricas y decimétricas

En estas bandas el tamaño de la antena es menos crítico (excepto en la banda inferior de las ondas métricas en la que el tamaño de la antena influye directamente en la sensibilidad). Las antenas fijas y móviles tienen características similares; la principal diferencia es la posición de la antena y la posibilidad de ubicarla en la parte superior de un mástil.

Los tipos de antenas omnidireccionales disponibles en estas bandas incluyen antenas dipolo, cónicas o bicónicas. También pueden utilizarse antenas directivas, como las utilizadas en sistemas de radiogoniometría.

Estaciones fijas:

Una de las ventajas principales de una estación de comprobación técnica fija es la posibilidad de situar la antena en la parte superior de una mástil fijo con el fin de aumentar la visibilidad directa (LOS) para alcanzar más transmisores distantes de los que sería posible desde una estación móvil. Cuando se utilicen estas antenas en ciudades es importante tratar de minimizar los trayectos múltiples producidos por las reflexiones en los edificios.

Las antenas omnidireccionales son útiles para la comprobación técnica cerca de la estación fija y para la cobertura de zonas de grandes dimensiones, especialmente para tareas automatizadas. También se requieren antenas omnidireccionales de grandes dimensiones para lograr una mayor sensibilidad en la parte inferior de la banda de ondas métricas.

Si una estación fija está situada en una zona metropolitana o en sus cercanías, puede utilizarse un sistema de antenas de comprobación técnica de propósito general omnidireccionales de ganancia media con polarización horizontal y otro con polarización vertical. Puede conseguirse una pequeña mejora en la sensibilidad utilizando un sistema de antenas rotatorias de polarización cruzada (horizontal y vertical) logarítmico–periódicas y de alta ganancia para la gama o gamas de frecuencias requeridas. Generalmente resulta económicamente ventajoso aumentar altura de una antena omnidireccional debido a que la propagación en las bandas de frecuencias métricas y decimétricas es por visibilidad directa en las.

Estaciones móviles:

En las bandas de ondas métricas y decimétricas, las antenas omnidireccionales, cónicas o bicónicas son adecuadas para su utilización móvil:

– Su tamaño y peso reducidos junto con unas buenas prestaciones permiten un compromiso adecuado para su instalación en un vehículo.

– Son antenas que permiten realizar comprobaciones técnicas y mediciones radiogoniométricas en movimiento.

– Su reducido peso permite colocarlas sobre un mástil elevable, mejorando la zona de cobertura y minimizando la influencia de obstáculos de baja altura.

– Pueden realizar la comprobación técnica conjuntamente con estaciones fijas de comprobación técnica. Por ejemplo, cuando las estaciones fijas de comprobación técnica interceptan una señal con una *S/N* baja, la estación de comprobación técnica móvil puede lograr mejores resultados desplazándose a las cercanías del transmisor.

– Permiten la comprobación técnica en lugares donde no pueden ubicarse estaciones fijas de comprobación técnica. Dado que la propagación en la banda de ondas decimétricas es esencialmente por visibilidad directa, a menudo las estaciones fijas de comprobación técnica no ofrecen la cobertura necesaria.

Estas estaciones de comprobación técnica son útiles para la comprobación técnica de redes celulares:

– el reducido tamaño de las células propicia la utilización de estaciones de comprobación técnica móviles,

– los niveles de señal recibidos no requieren antenas de elevada sensibilidad.

Estaciones portátiles / transportables:

Las ventajas de dichas estaciones de comprobación técnica son las mismas que las de las estaciones de comprobación técnica móviles. Las antenas portátiles y transportabas también pueden utilizarse en las tareas siguientes:

– comprobación técnica desde la parte superior de edificios. Frecuentemente las estaciones de comprobación técnica móviles se ven perjudicadas por el efecto de los trayectos múltiples, en tal caso las estaciones de comprobación técnica portátiles pueden reducir dicho efecto;

– comprobación técnica realizada en zonas rurales, donde las estaciones de comprobación técnica pueden ubicarse en puntos más elevados inaccesibles para los vehículos móviles;

– mediciones realizadas desde un punto específico o desde un edificio (colegio, hospital).

3.2.2.1.3 Banda de ondas centimétricas

En la banda de ondas centimétricas, algunas antenas omnidireccionales tienen una ganancia muy baja mientras que las pérdidas de propagación requieren antenas de alta ganancia, por tanto, en esta banda las antenas de comprobación técnica han de ser normalmente muy directivas; para ser de utilidad, las antenas omnidireccionales y las antenas fijas deben estar en el haz principal.

Las antenas omnidireccionales móviles solo se utilizan normalmente en las frecuencias inferiores de la banda de ondas centimétricas (frecuencias hasta 6 GHz). No obstante, a menudo se utilizan para las tareas siguientes:

– interceptar, analizar y realizar mediciones del flujo del haz directo de un enlace de microondas con la antena de comprobación técnica situada cerca del transmisor;

– analizar redes celulares.

3.2.2.2 Tareas de comprobación técnica asociadas a antenas directivas

Las antenas directivas son útiles para las tareas siguientes

– mediciones de transmisores conocidos, para conseguir una ganancia más elevada en la dirección de la señal y mejorar así la comprobación técnica de señales de bajo nivel o para obtener una mejor *S/N*;

– mediciones técnicas en las que es necesaria la directividad a fin de conseguir mejores medidas con una *S/N* más elevada y reducir los trayectos múltiples o la interferencia;

– comprobación técnica en ondas centimétricas, en las que las condiciones de propagación exigen antenas de alta ganancia.

Los giradores para las antenas directivas deben tener una gran precisión para las antenas en ondas centimétricas. El girador de la antena requiere un cierto tiempo para apuntar la antena en la dirección de llegada de la señal. Por tanto, las antenas direccionales no están adaptadas para realizar una exploración rápida ni para la medición de la tasa de ocupación.

3.2.2.2.1 Bandas en ondas miriamétricas, kilométricas y decamétricas

En estas bandas de frecuencias se necesitan antenas directivas de gran tamaño y solamente son útiles en emplazamientos fijos donde existen instalaciones de gran tamaño.

Estaciones fijas:

Uno de los principales objetivos de las antenas directivas en estas bandas de frecuencias es aumentar la sensibilidad o la *S/N* de recepción. Uno de sus usos principales es la comprobación técnica de señales internacionales o nacionales.

Las antenas directivas adecuadas para dichas estaciones incluyen:

– Un sistema de antena con una recepción altamente directiva y con polarización vertical en la gama de frecuencias de onda corta para todos los sectores alrededor del radiogoniómetro. Por ejemplo, mediante una red de antenas log–periódicas en forma de estrella con seis cortinas, o una disposición escalonada de un sistema de antenas de cuadro lineales bidireccionales.

– Un sistema de antena con una recepción altamente directiva y con polarización horizontal en todos los acimuts en la gama de frecuencias de onda corta. Por ejemplo, mediante una red de antenas log–periódicas giratorias de hilos con polarización horizontal de gran tamaño. Este sistema presenta el inconveniente de que necesita sesenta segundos o más para una rotación en acimut o una red de seis antenas cortinas horizontales que cubran los 360º de acimut mediante seis haces de 60º

– Una red de radiogoniómetros de apertura amplia, con un tamaño entre 50 y 300 m, que proporcione marcaciones direccionales. Las antenas pueden ser omnidireccionales o directivas.

3.2.2.2.2 Bandas en ondas métricas y decimétricas

Las antenas directivas pueden mejorar las mediciones técnicas reduciendo el ruido y las interferencias y proporcionar una mayor cobertura y una mejor *S/N* en tareas de comprobación técnica y mediciones radiogoniométricas. Las antenas directivas individuales pueden constar de un girador o pueden utilizar redes fijas de antenas directivas que cubran todas las direcciones, como por ejemplo, una red de antenas en círculo. Las redes de antenas fijas con elementos directivos o con elementos omnidireccionales son adecuadas para los sistemas de radiogoniometría en ondas métricas y decimétricas.

Estaciones fijas:

En una estación de comprobación técnica fija, el tamaño y el peso tienen menos importancia que en una estación de comprobación técnica móvil, siendo las antenas directivas un buen complemento a las antenas omnidireccionales.

Estaciones móviles:

Las antenas directivas de una estación de comprobación técnica móvil tienen las mismas virtudes que las de una estación de comprobación técnica fija, pero presentan el inconveniente de que necesitan la instalación y el mantenimiento propios de una antena con un elemento giratorio en un entorno móvil. Una antena omnidireccional sobre un mástil que pueda ser elevado para mejorar la recepción es una alternativa excelente a una antena giratoria. Asimismo, una antena sobre un vehículo no necesita tener una sensibilidad más elevada ya que éste puede desplazarse para aumentar la *S/N* y así mejorar la recepción.

3.2.2.2.3 Banda de ondas centimétricas

Debido a las pérdidas de propagación que se producen a estas frecuencias, las antenas directivas son adecuadas para las bandas de ondas centimétricas por la mayor ganancia que presentan. Su principal inconveniente es la direccionalidad requerida en recepción, por lo que las mediciones deben realizarse sobre el haz principal de las señales.

Estaciones fijas:

Las estaciones de comprobación técnica fijas sólo realizan determinadas tareas específicas cuando se utilizan en funciones de comprobación técnica de señales en ondas centimétricas. No pueden utilizarse para enlaces de microondas, enlaces satelitales ascendentes o redes celulares. Las estaciones de comprobación técnica fijas sólo son necesarias para la comprobación técnica de enlaces satelitales descendentes. La comprobación técnica de dichas señales mediante una estación de comprobación técnica fija requiere antenas directivas de gran tamaño, como por ejemplo, antenas parabólicas de 10 m de diámetro que tienen una elevada sensibilidad.

Estaciones móviles, transportables y portátiles:

Las mediciones por encima de 3 GHz requieren normalmente utilizar estaciones móviles para poder ubicar la antena en el haz principal de la antena o cerca del mismo. Las estaciones de comprobación técnica móviles, transportables y portátiles permiten utilizar antenas pequeñas con diámetros de hasta 1 m.

Sus objetivos son:

- interceptar y analizar enlaces de microondas (en el trayecto principal o en los lóbulos secundarios de las antenas transmisoras),
- analizar enlaces satelitales ascendentes desplazando la estación de comprobación técnica cerca de la antena transmisora,
- señales de radiogoniometría con la directividad de la antena. En la banda de ondas centimétricas, una antena parabólica puede ofrecer resultados precisos.

En estas bandas y para estaciones de comprobación técnica móviles se utilizan principalmente dos tipos de antenas, de bocina o parabólica:

- Las antenas de bocina tienen una ganancia menor y, en consecuencia, una menor sensibilidad. Sin embargo, la menor directividad de las mismas puede ser más adecuada para señales desconocidas.
- Las antenas parabólicas tienen una ganancia mayor y, en consecuencia, una mejor sensibilidad. Sin embargo, la elevada directividad de las mismas exige que la dirección del transmisor o de la fuente de la señal sea bien conocida, o bien, que disponga de un sistema de exploración automático para localizar la fuente. En conclusión, las antenas de bocina son muy adecuadas para la comprobación técnica general en las frecuencias bajas de la banda de ondas centimétricas ($f < 18$ GHz). Las antenas parabólicas son las únicas adecuadas para frecuencias superiores en las que la atenuación es elevada.

3.2.2.3 Resumen de la selección de antenas

La selección de las antenas debería tener en cuenta la aplicación de nuevas técnicas de procesado digital, tales como las antenas inteligentes, que permiten que las antenas omnidireccionales adquieran propiedades direccionales. En el Cuadro 3.2–1 se presentan orientaciones generales para la selección de antenas adecuadas a las diversas tareas de comprobación técnica.

3.2.3 Antenas para ondas miriamétricas, kilométricas, hectométricas y decamétricas

3.2.3.1 Antenas omnidireccionales para ondas miriamétricas, kilométricas y hectométricas

Habida cuenta de las longitudes de ondas extremadamente grandes que corresponden a la gama de las ondas miriamétricas, kilométricas y hectométricas (por ejemplo, 10 000 m para una frecuencia de 30 kHz), será necesario utilizar antenas para esas frecuencias cuya longitud sea una pequeña fracción de la longitud de onda. Como por lo general las señales en estas bandas están polarizadas verticalmente, suelen utilizarse para la recepción antenas verticales. Una antena vertical sencilla cuya longitud represente sólo un reducido porcentaje del cuarto de la longitud de onda posee una impedancia elevada y esencialmente reactiva. Las antenas de este tipo pueden en general fabricarse suficientemente altas para proporcionar la sensibilidad requerida por encima de los niveles de ruido atmosférico.

CUADRO 3.2–1

Selección de la antena en función de la tarea de comprobación técnica y la banda de frecuencias

Antena	**Ondas miriamétricas, hectométricas y decamétricas**					
	Aplicaciones de comprobación técnica				**Aplicaciones de radiogoniometría**	
	Antenas omnidireccionales		**Antenas directivas**			
	Fija	**Móvil/ transportable**	**Fija**	**Móvil/ transportable**	**Fija**	**Móvil/ transportable**
Cuadro	X	X	X(1)		X	X
Monopolo	X	X	X(1)		X	X(2)
Dipolo	X	X	X(1)		X	X
Cónica/bicónica	X					
Log–periódica por sector	X					
Log–periódica			X			
	Ondas métricas y decimétricas					
	Aplicaciones de comprobación técnica				**Aplicaciones de radiogoniometría**	
	Antenas omnidireccionales		***Antenas directivas***			
	Fija	**Móvil/ transportable**	**Fija**	**Móvil/ transportable**	**Fija**	**Móvil/ transportable**
Monopolo	X	X	X(1)	X(1)	X	X
Dipolo	X	X	X(1)	X(1)	X	X
Cónica/bicónica	X	X	X(1)	X(1)	X	X
Abanico			X	X	X	X
Log–periódica			X	X(3)		
	Ondas centimétricas					
	Aplicaciones de comprobación técnica				**Aplicaciones de radiogoniometría**	
	Antenas omnidireccionales		**Antenas directivas**		**Antenas omnidireccionales**	
	Fija	**Móvil/ transportable**	**Fija**	**Móvil/ transportable**	**Fija**	**Móvil/ transportable**
Parábola			X	X		
Bocina			X	X		
Log–periódica			X	X	X	X
Oblicua	X(4)	X				
Dipolo					X	X

X(1): Utilizada como una red con conformación de haz analógica o digital.
X(2): Sólo en las bandas de ondas hectométricas y decamétricas.
X(3): La altura de la antena es más importante que la directividad; es más fácil elevar más alto una pequeña antena omnidireccional que una antena direccional, por tanto, la utilización de una antena log–periódica transportable es más práctica que una móvil.
X(4): Con cobertura limitada ya que se trata de una estación fija.

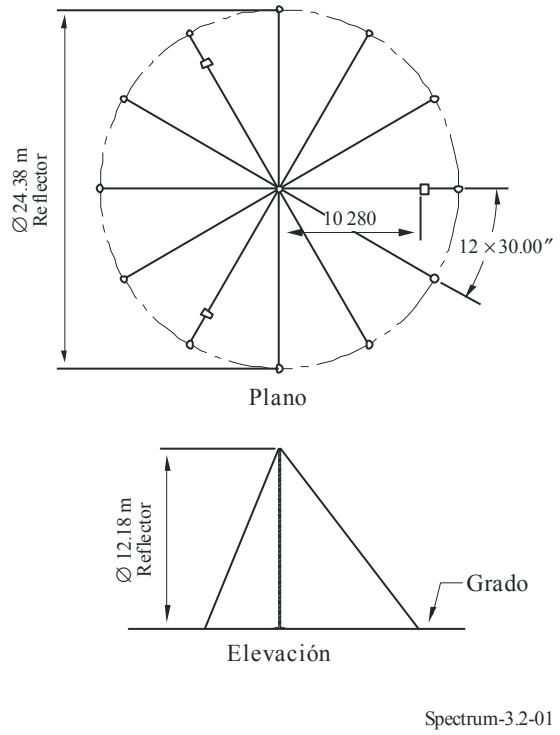
Cuando las dimensiones del elemento de la antena están limitadas físicamente a una pequeña fracción de la longitud de onda, como sucede en ondas kilométricas y miriamétricas, la antena activa ofrece normalmente una relación señal/ruido muy superior a la que se obtendría conectando la antena directamente al receptor sin utilizar un dispositivo activo para la adaptación de impedancias. Con el fin de evitar fenómenos de intermodulación y de modulación cruzada en los circuitos activos, deben satisfacerse las siguientes condiciones técnicas:

El factor de antena 20 log(E/V) debe estar comprendido entre	15 dB y 25 dB
El punto de interceptación de segundo orden (salida de antena) no debe ser menor que	50 dBm
El punto de interceptación de tercer orden (salida de antena) no debe ser menor que	25 dBm
La intensidad de campo admisible para modulación cruzada de 10 dB no debe ser menor que	10 V/m
El valor máximo eficaz admisible de la intensidad de campo interferente (umbral perjudicial en protección de descarga) no debe ser menor que	20 kV/m a 100 kHz y 200 kV/m a 10 kHz

Varios fabricantes ofrecen antenas activas con tecnología de vanguardia que cumplen las especificaciones señaladas anteriormente. En las altas intensidades de campo locales que son comunes en ondas hectométricas como ocurre en las bandas de frecuencia modulada y de televisión, incluso las especificaciones arriba indicadas para una antena activa no son adecuadas y debe recurrirse a una antena pasiva tal como un monopolo de 12 m de alto que se muestra en la Fig. 3.2–1.

FIGURA 3.2–1

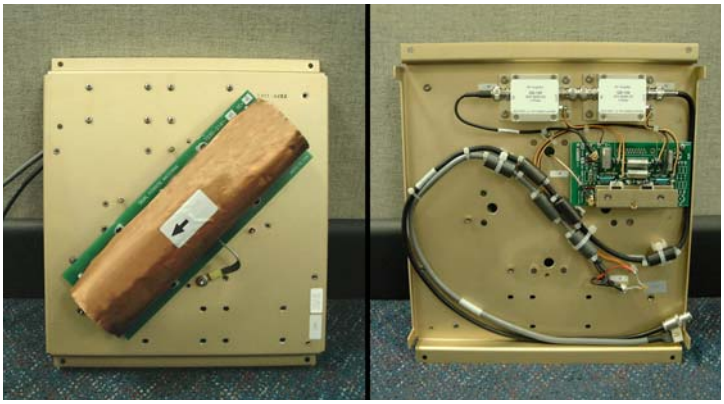
Antena de recepción pasiva típica para ondas miriamétricas, kilométricas, hectométricas y decamétricas de 9 kHz a 30 MHz



Un ejemplo de antena activa compacta, de utilidad para fines de comprobación técnica y de radiogoniometría, es un par de pequeños cuadros magnéticos activos; las vistas superior e inferior de uno de los pares de cuadros se ilustran en la Fig. 3.2–3. Esta antena puede ser bastante pequeña (un cajón con lados de aproximadamente 0,3 × 0,3 m y 0,1 m de altura) para cubrir la gama de 300 kHz a 30 MHz, pero tiene la sensibilidad y la precisión radiogoniométrica de acimut de una antena mucho más grande (como una red de antenas de látigo de 3 m de altura).

FIGURA 3.2–3

Antena activa compacta



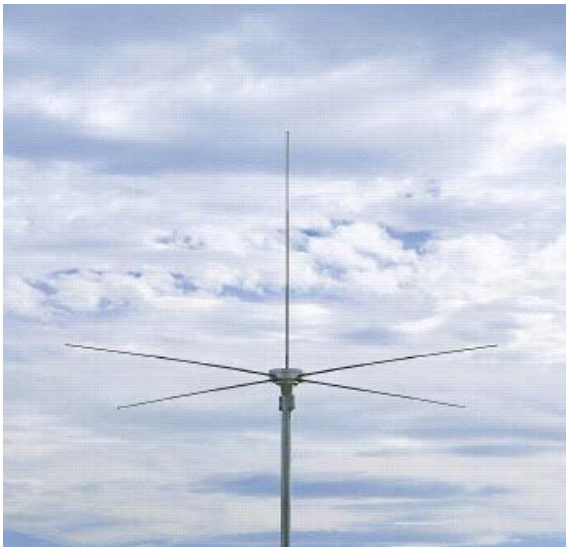
Spectrum-3.2-02

Cada cuadro consta de una varilla de ferrita de elevada permeabilidad cubierta por una bobina de múltiples vueltas. La bobina está protegida por una pantalla electrostática y el acceso de salida está conectado a un transformador, todo ello para hacer la antena menos sensible a las perturbaciones del campo eléctrico local, mejorando así la exactitud radiogoniométrica. El transformador proporciona adaptación de impedancias, rechazo de modo común y transformación de equilibrio a desequilibrio.

Las antenas activas para las bandas de frecuencias miriamétricas, kilométricas, hectométricas y decamétricas (9 kHz a 30 MHz) pueden construirse para polarización horizontal y vertical, tal como se muestra en la Fig. 3.2–3. La antena dispone de dos conectores de salida, uno para la polarización vertical y otro para la polarización horizontal. Abarca las frecuencias desde 9 kHz a 80 MHz con polarización vertical y de 600 kHz a 40 MHz con polarización horizontal.

FIGURA 3.2–3

Antena activa para polarización vertical y horizontal



Spectrum-3.2-03

3.2.3.2 Consideraciones generales sobre las antenas de ondas decamétricas

Las ondas decamétricas se reflejan en las capas ionosféricas que existen de 100 a 300 km por encima de la tierra. La antena deberá dirigir radiación máxima a las capas reflectoras ionosféricas a los ángulos de elevación y de acimut deseados para dar lugar a cobertura a las ubicaciones deseadas.

Por ejemplo, si el emplazamiento de un transmisor se halla a 350 km de una estación de comprobación técnica, la radiación máxima desde la antena deberá producirse a un ángulo de elevación próximo a 60 grados para su reflexión en la capa ionosférica alta de 300 km. En este caso, el trayecto del rayo desde la estación de comprobación técnica hasta la ionosfera y posteriormente al transmisor forma un triángulo equilátero aproximado que incluye una línea directa entre la estación de comprobación técnica y el transmisor; este trayecto unirreflexión simple se denomina trayecto de un salto.

A medida que aumenta la distancia disminuye el ángulo de elevación o el ángulo de despegue del trayecto de un salto; el ángulo de despegue del rayo de un salto puede bajar hasta unos 3 grados inferior para los trayectos más largos. Un ángulo de 3 grados suele ser un ángulo de despegue mínimo limitado por las colinas próximas, otras obstrucciones y el diagrama de radiación de antena sometido a corte a los ángulos de elevación muy bajos. En general, el trayecto hasta el receptor puede componerse de varios saltos; por ejemplo, se produce un trayecto de dos saltos cuando existe una reflexión en el terreno a media distancia entre la ubicación del transmisor y la estación de comprobación técnica y hay dos reflexiones en la capa ionosférica. El trayecto de un salto y de dos saltos puede existir aislada o simultáneamente. Cuando se producen dos o más trayectos al mismo tiempo, el fenómeno se conoce como propagación multitrayecto.

Por lo general no se necesita una antena de recepción muy eficiente debido a los niveles moderadamente altos de ruido artificial y atmosférico en ondas decamétricas. Por ejemplo, podría desearse utilizar una antena con polarización vertical por razones de cobertura del diagrama de radiación y aceptar unos pocos dB de pérdida de antena porque esta pérdida de antena no tendrá normalmente un efecto significativo en la sensibilidad del sistema de recepción.

En la recepción es mucho más importante utilizar antenas de elevada ganancia directiva para que el nivel de señal captado por la antena sea realzado con respecto al ruido. En la hipótesis de que se recibe igual densidad de potencia de ruido de todas las direcciones, que es lo que suele ocurrir, la potencia de ruido total recibida por la antena es independiente de la directividad de la antena. De este modo, la relación señal/ruido recibida se aumenta aumentando la directividad de la antena de recepción.

Una antena de comprobación técnica determinada puede ser capaz de utilizar varias antenas para proporcionar la cobertura requerida a corta y larga distancia. La selección de antenas puede incluir una antena omnidireccional de corto alcance con un alto ángulo de despegue combinada con varias antenas directivas de alcance moderado a largo. Además, puede que una estación de comprobación técnica disponga de terreno limitado y puede necesitar utilizar un menor número de antenas de un solo tipo que proporcionen el mejor servicio a todos los alcances. En este punto se presentan varios tipos de antenas de estación de tierra que pueden elegirse para su utilización en un emplazamiento de comprobación técnica. Cualquier transmisor de ondas decamétricas y alta potencia (>1 kW) deberá estar situado al menos de 5 a 10 km de la estación de comprobación técnica a fin de ofrecer un aislamiento elevado entre los transmisores y los receptores de ondas decamétricas y de hacer posible un entorno de ruido radioeléctrico menor en el emplazamiento de recepción. Las antenas de ondas decamétricas deberán cubrir la banda de frecuencias de 2 a 30 MHz.

3.2.3.3 Tipos de antenas de ondas decamétricas

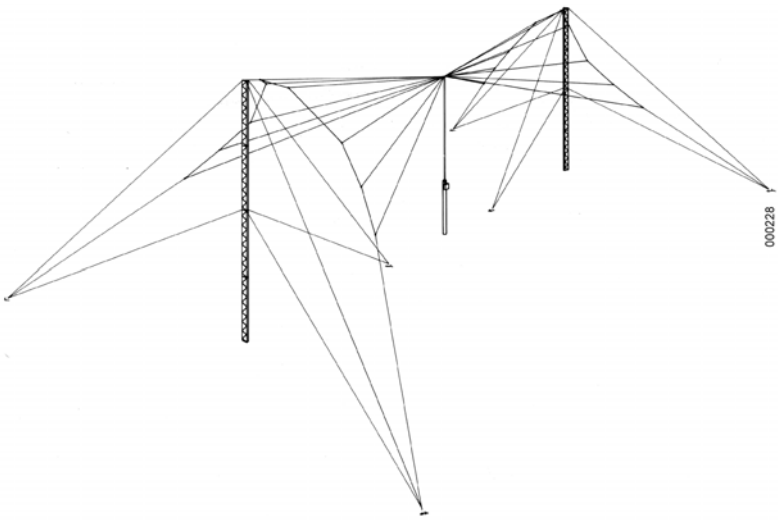
Dipolo horizontal de banda ancha (véase la Fig. 3.2–4)

Los mejores tipos de antenas para cobertura en ondas decamétricas de alcance corto a moderado son antenas de polarización horizontal o circular que tienen crestas de radiación cerca del cenit. La onda de superficie radiada por una antena de ondas decamétricas con polarización vertical es atenuada por las pérdidas en la superficie y no se recibe por lo general más allá de unos 100 km sobre tierra y de unos 300 km sobre aguas oceánicas. Todas las antenas de polarización vertical tienen un nulo por arriba y no son adecuadas para comprobación técnica por onda ionosférica de muy corto alcance en ondas decamétricas.

El dipolo horizontal de banda amplia es un ejemplo de antena que puede proporcionar cobertura de corto alcance de unos 3 a 12 MHz con un diagrama de radiación bastante omnidireccional. Estas antenas son relativamente pequeñas; un ejemplo de dicho dipolo con polarización horizontal está montado en dos torres de 22 m de altura y necesita un terreno de 66 por 38 m; ésta es una buena antena para utilizar en un emplazamiento de recepción o transmisión en espacio abierto. La ganancia de esta antena suele ser de 5 dBi o superior. Para valores de ganancia significativamente superiores, las antenas log–periódicas con polarización horizontal pueden diseñarse para una cobertura de corto alcance con una diagrama de radiación bastante omnidireccional para las frecuencias bajas, pasando a una cobertura de moderada a grande y comportamiento direccional para frecuencias superiores.

FIGURA 3.2–4

Dipolo horizontal de banda ancha – alcance corto a moderado



Spectrum-3.2-04

Antena log–periódica rotatoria con polarización horizontal

Mediante dipolos log–periódicos con polarización horizontal montados sobre mástiles se pueden conseguir incluso valores de ganancia superiores (hasta 12 dBi, en función de la altura del mástil). Estas antenas direccionales tienen normalmente una apertura del haz a potencia mitad de 60º a 70º. Mediante un mecanismo de giro, la antena puede rotar para cubrir todos los ángulos en acimut (véase la Fig. 3.2–5).

FIGURA 3.2–5

Ejemplo de antena con polarización horizontal y capacidad de giro para la comprobación técnica de 2 a 30 MHz



Spectrum-3.2-05

Sistema de antenas de cortina log–periódicas con forma de estrella

Un sistema de antenas de cortina log–periódicas con forma de estrella puede proporcionar haces direccionales con polarización vertical o horizontal, o con ambas polarizaciones.

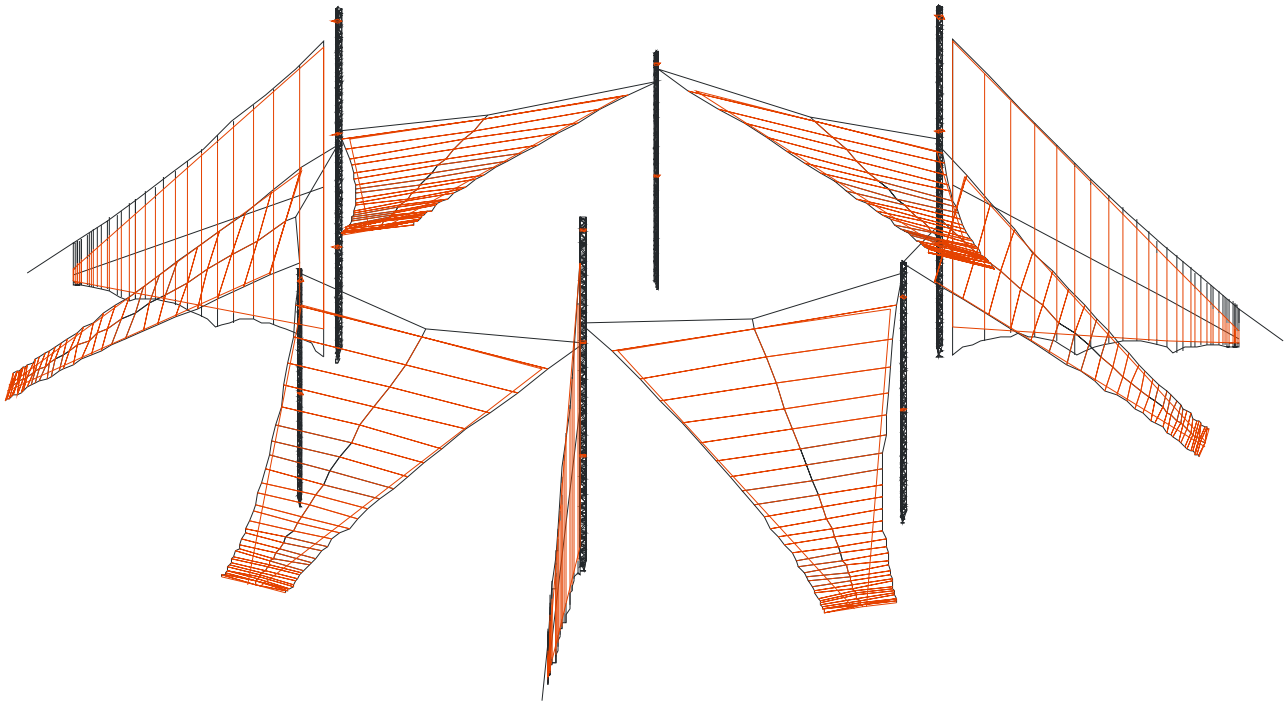
Un sistema de antenas con polarización vertical puede tener seis cortinas cada una con una anchura del haz de potencia mitad de unos 60º, espaciadas en intervalos de 60º alrededor del mástil de apoyo central (de hasta 60 m de alto).

Un sistema de antenas con polarización horizontal puede tener seis cortinas horizontales que comparten seis mástiles de apoyo, que también proporcionaría una cobertura de los 360º de acimut sobre seis haces de 60º.

En la Fig. 3.2–6 se muestra un sistema de antenas con ambas polarizaciones; este ejemplo concreto incluye seis antenas con polarización horizontal y tres antenas con polarización vertical.

FIGURA 3.2–6

Ejemplo de red en cortina logarítmico–periódica con forma de estrella



Spectrum-3.2-06

Antena log–periódica omnidireccional con polarización circular (véase la Fig. 3.2–7).

Un tipo de antena que ofrece cobertura omnidireccional en toda la banda de ondas decamétricas es una antena log–periódica con polarización circular (CPLPA, *circularly polarized log–periodic antenna*).

Esta antena tiene la ventaja de que proporciona comunicaciones de alcance corto a moderado desde una estructura.

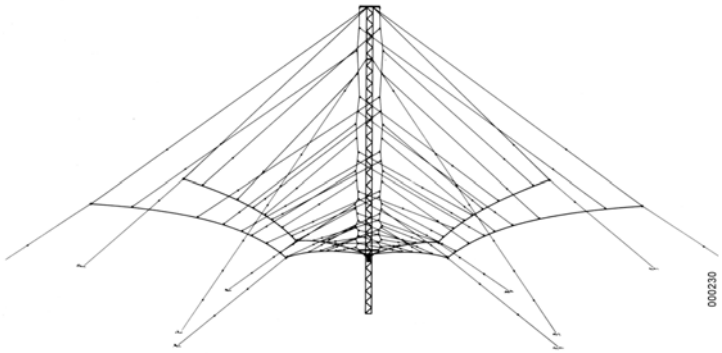
A las frecuencias inferiores, la antena radia a los ángulos de elevación superiores para una cobertura de menor alcance y a las frecuencias de ondas decamétricas superiores el ángulo de despegue es inferior para la recepción desde alcances superiores.

Esta antena es sustentada por una torre y tiene dos conjuntos de redes de dipolos log–periódicos ortogonales, siendo cada dipolo una V invertida con alimentación central conectada a líneas de alimentación soportadas a los lados de la torre.

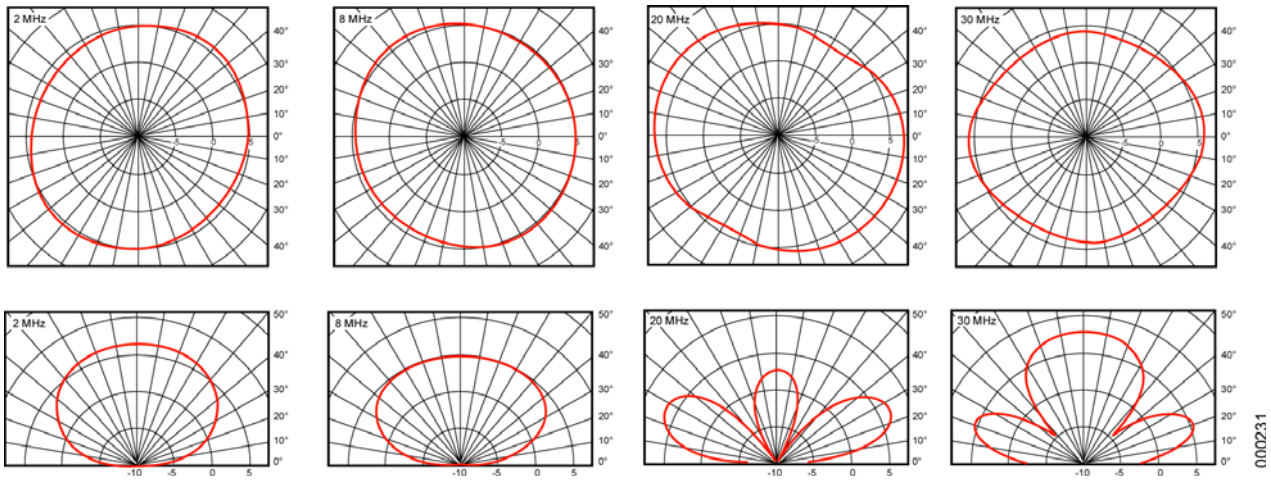
La altura de la torre es de 28 m y requiere un terreno cuadrado de 94 m de lado. La ganancia de esta antena es 5 dBi.

FIGURA 3.2–7

Antena log–periódica omnidireccional con polarización circular (alcance corto a moderado)



Diagramas de radiación para el ángulo de elevación con el máximo del haz principal (ganancia, (dBi))



Spectrum-3.2-07

Antena omnidireccional monopolo de banda ancha con polarización vertical

Esta antena es una antena omnidireccional de banda ancha que puede utilizarse para recibir onda de superficie de corto alcance y onda ionosférica de alcance moderado a largo.

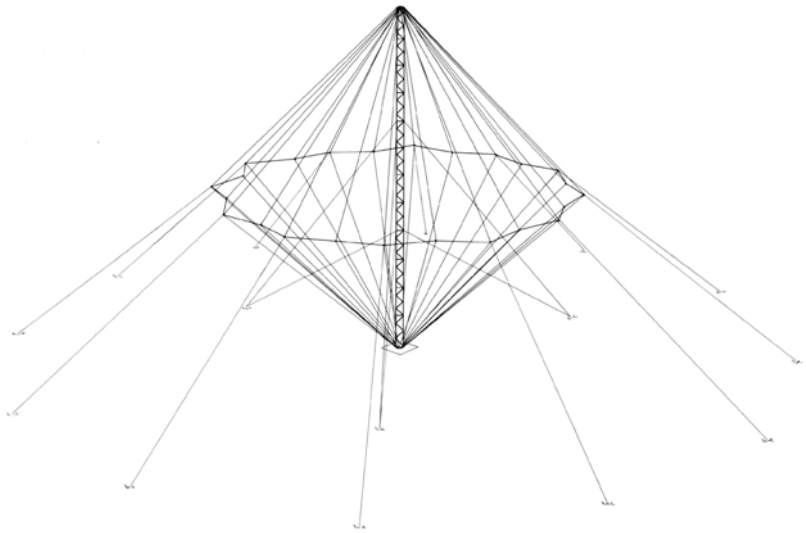
En la Fig. 3.2–8 se muestra un monopolo de banda ancha típico con polarización vertical.

Esta antena para 3–30 MHz tiene 25 m de altura y 52 m de diámetro.

El monopolo de banda ancha con polarización vertical y la CPLPA tienen una ganancia casi igual a bajas frecuencias a los ángulos de despegue inferiores; sin embargo, la CPLPA es superior a las frecuencias superiores.

FIGURA 3.2–8

Antena omnidireccional vertical de banda ancha – alcance moderado a largo



Spectrum-3.2-08

Redes de antenas de cuadro

Pueden utilizarse con ventaja antenas pequeñas de pequeña eficacia eléctrica, tales como antenas de cuadro, en una amplia gama de aplicaciones de recepción en la gama de frecuencias de ondas decamétricas. El ruido causado por la ineficacia de la antena tiene el mismo efecto que otras fuentes de ruido sobre la relación señal/ruido. Cuando el ruido exterior es mayor que el ruido debido a la ineficacia de la antena (y de su electrónica interna, si existe), se dice que una antena está "limitada por el ruido exterior". El ruido interno de una antena limitada por el ruido exterior es relativamente insignificante, ya que la fuente del mayor ruido exterior determina la relación señal/ruido del sistema. Cuando el ruido exterior es relativamente alto, las antenas de recepción pequeñas trabajan también como antenas plenamente eficaces de tamaño normal.

El cuadro básico es un tubo grande de aluminio. Está alimentado en el punto central mediante una red de adaptación pasiva de banda ancha. Una ventaja de las antenas de los cuadros sobre los dipolos es su baja impedancia de entrada. La calidad de funcionamiento del cuadro es comparativamente poco afectada por los cuerpos conductores próximos, como son los árboles, los edificios y la nieve. Además, como la resistencia de radiación de las antenas eléctricamente pequeñas es baja, los efectos mutuos son generalmente insignificantes, permitiendo a los cuadros configurarse en diversas redes que acomodan su calidad de funcionamiento a los distintos requisitos de recepción.

El diagrama acimutal de un cuadro simple tiene forma de ocho en el horizonte, crecientemente omnidireccional a los ángulos de llegada a mayores y virtualmente independiente del acimut a ángulos de llegada por encima de 50 grados. Las señales de múltiples cuadros pueden combinarse en fase, o "conformarse por haz". El diagrama resultante es direccional, con una marcación correspondiente a una de las direcciones de la red. El diagrama direccional tiene una ganancia máxima a algún ángulo por debajo del cenit. Si se aumenta el número de elementos de cuadro se aumenta la ganancia y la directividad. Aunque este diagrama direccional es útil para la comprobación técnica, si se utiliza una red de elementos de cuadro para la radiogoniometría, los elementos no deberán combinarse, de manera que la respuesta de cada elemento pueda medirse por separado.

La conformación del haz se realiza llevando los cables de cada elemento de una red de antenas de cuadro a una unidad de retardo/combinador, o conformador de haz, situado en el centro físico de la red. En la conformación de haces unidireccionales, las señales de cada elemento se retardan mediante largos apropiados de cable coaxial, o líneas de retardo, que se suman luego en un combinador. En la conformación

de haces bidireccionales, las señales se dividen y se aplican a dos conjuntos separados de líneas de retardo, sumándose luego en dos combinadores separados.

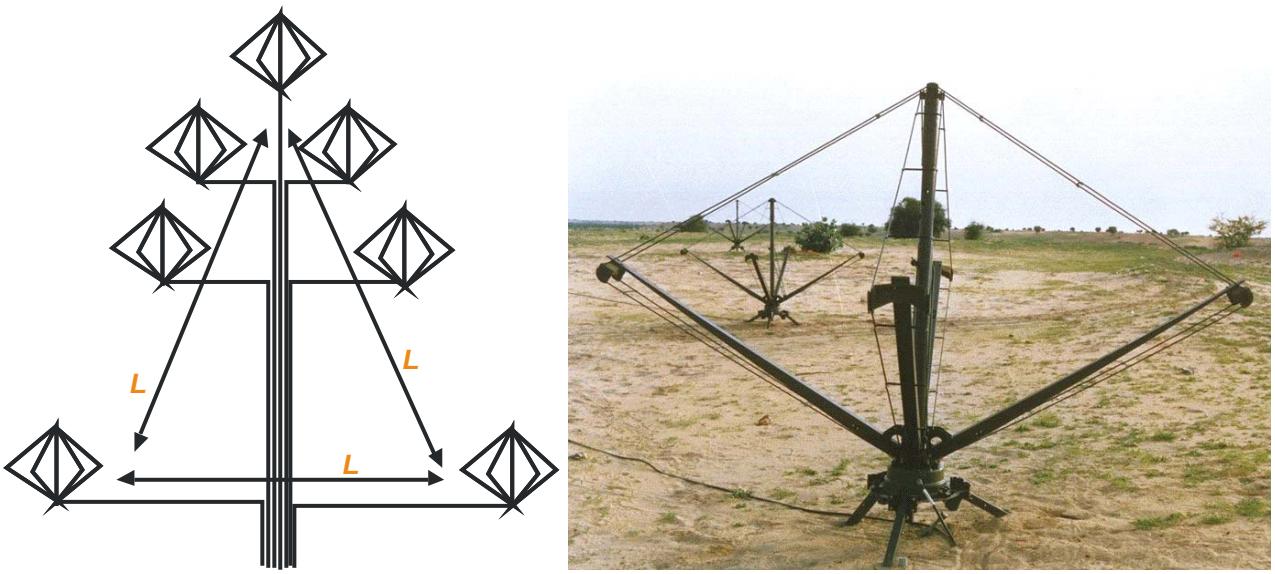
Múltiples redes pequeñas se combinan a menudo en configuraciones en roseta. Una roseta común consta de tres brazos bidireccionales de igual separación en acimut con un centro común. Cada brazo consta de ocho cuadros. Esta configuración de cuadros de tres brazos y 24 elementos puede producir seis haces, uno por cada 60 grados de acimut.

Antena de cuadros cruzados

Otro tipo de antena de cuadro es el que consta de dos tramas activas perpendiculares, de unos 2 m de altura. Esta antena de cuadros cruzados puede ser utilizada como una antena independiente o en una red de antenas, con un dispositivo de conmutación y un radiogoniómetro basado en el principio de interferometría. La red de antenas consta de siete o nueve elementos de antena, incluyendo una antena de referencia, instalada en los dos lados de una triángulo equilátero o en una configuración circular con aproximadamente 200 m de abertura. Si se reduce la abertura se reduce la precisión de la medición radiogoniométrica. En la Fig. 3.2–9 se muestra una red de antenas.

FIGURA 3.2–9

Red de antenas de cuadros cruzados para 1–30 MHz



Spectrum-3.2-09

A diferencia de la antena monopolo, esta antena puede recibir en todas las polarizaciones. Un conmutador en el interior de la antena permite seleccionar uno de los dos puertos del cuadro cruzado en función de la polarización elegida. Estas antenas, junto con el principio de mediciones radiogoniométricas por interferometría, puede realizar mediciones de radiogoniometría sobre ondas ionosféricas y sobre ondas con propagación con visibilidad directa, ofreciendo mejores prestaciones que las antenas de tipo U–Adcock que sólo permiten polarización vertical e incidencia rasante, lo cual es un inconveniente importante en ondas decamétricas porque en esta gama de frecuencias están presentes todas las polarizaciones. El principio de mediciones radiogoniométricas por interferometría permite realizar mediciones de localización con una sola estación (SSL), mientras que con el principio de Watson Watt el ángulo de elevación no puede medirse y la SSL no puede utilizarse.

3.2.4 Antenas para ondas métricas, decimétricas y centimétricas

Las condiciones de propagación que se presentan en las bandas de ondas métricas y decimétricas limitan por lo general la recepción a distancias correspondientes a trayectos con visibilidad directa. A fin de aumentar el alcance en recepción, las antenas para estas gamas de frecuencias suelen instalarse en lo alto de una torre situada cerca del local de la estación de comprobación técnica. De esta manera se logran mantener reducidas las pérdidas de la línea coaxial, que adquieren importancia a estas frecuencias.

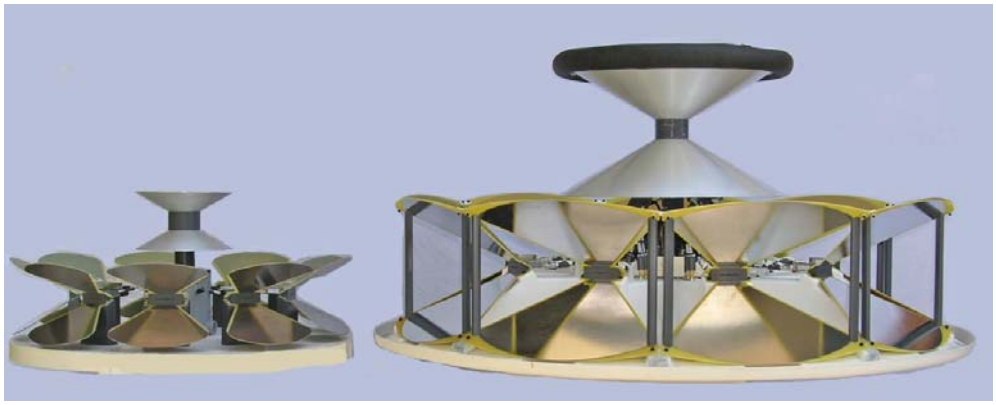
3.2.4.1 Antenas omnidireccionales para ondas métricas y decimétricas

La antena bicónica omnidireccional que se muestra en la Fig. 3.2–10a) es un ejemplo de antena utilizada en las bandas de ondas métricas y decimétricas. La antena puede ser complementada con un sistema de nueve antenas en abanico, tal como también se ilustra en la figura, a fin de disponer de cobertura para la radiogoniometría. En la figura se muestran dos configuraciones con antenas de distinto tamaño. La más pequeña situada a la izquierda es compacta y de peso suficientemente ligero como para ser utilizada en una configuración portátil o ser colocada sobre el techo de un automóvil de pasajeros normal, de forma que parezca un equipaje pudiendo pasar desapercibida la estación de comprobación técnica móvil. La configuración de mayor tamaño situada a la derecha está disponible en versiones con polarización vertical o con polarización dual (se ilustra el caso de polarización vertical); la versión con polarización dual tiene salidas independientes para las polarizaciones horizontal y vertical respectivamente. Ambas configuraciones ofrecen una cobertura muy buena en una gama de frecuencias de 150:1, entre 20 y 23000 MHz, teniendo la pequeña una sensibilidad algo reducida en las frecuencias inferiores a 100MHz.

La combinación de la antena bicónica y el abanico de nueve elementos puede utilizarse para la comprobación técnica y la radiogoniometría en toda la gama de ondas métricas/decimétricas, tanto en aplicaciones fijas como móviles; sin embargo, para mejorar la sensibilidad y la precisión en las ubicaciones fijas, puede utilizarse la antena de más tamaño de la Fig. 3.2–10a) y otra adicional, físicamente más grande, compuesta por una red de dipolos verticales de ondas métricas de cinco elementos, que se ilustra en la Fig. 3.2–11 a).

En las Figs. 3.2–10b), 3.2–10c), 3.2–11b) y 3.2–11c) se ilustran otras antenas utilizadas en la comprobación técnica y en radiogoniometría en ondas métricas y decimétricas. La Fig. 3.2–11c) incluye una red de dipolos verticales en ondas métricas con nueve elementos.

FIGURA 3.2–10
Ejemplos de elementos de antena de ondas métricas y decimétricas (se ha suprimido el radomo)



(D = 0,8 m × 0,4 m) (D = 1,3 m × 0,7 m)

a)



(D = 1,1 m × 0,44 m)

b)



(Altura: aproximadamente 0,8 m)

c)

Spectrum-3.2-10

Para tener una calidad de funcionamiento óptima en aplicaciones que requieren alta gama dinámica (buena sensibilidad y baja recepción), la antena debería utilizar elementos de antena pasivos seguidos por conmutación y preamplificadores de radiofrecuencia activos. El uso de elementos de antena pasivos asegura que la antena estará libre de respuestas parásitas, teniendo un buen comportamiento de los diagramas y de la respuesta ganancia/fase en cuanto a la precisión radiogoniométrica y no produce distorsión (intermodulación o armónicos), que es un problema común en las antenas de elementos activos. En la Fig. 3.2–11b) se muestra un ejemplo de dicho tipo de antena; tres juegos de dipolos independientes dispuestos en una estructura pentagonal, para la banda de frecuencias entre 20 y 3000 MHz con polarización vertical.

Este tipo de antena está diseñado para ofrecer la mejor resistencia en caso de mal tiempo o de descargas eléctricas. La protección contra el rayo es de la máxima importancia para las antenas de radiogoniometría en ondas métricas y decimétricas que, por su propia naturaleza, deben ser instaladas en la posición más elevada posible de la zona que se desea supervisar, quedando así expuestas directamente a los rayos. La antena que se muestra en la Fig. 3.2–11b) incluye una caja de metal resistente que contiene los equipos de comprobación

técnica y de radiogoniometría para protegerlos de las descargas eléctricas. La estructura de tubos de la antena facilita la toma de tierra como protección contra descargas eléctricas que recibe el pararrayos instalado por encima de la antena.

Debe tenerse en cuenta que las antenas activas pueden presentar respuestas parásitas que producen distorsiones tales como intermodulación y armónicos, un tiempo medio entre fallos menor y prestaciones que varían con el tiempo, aunque también presentan ventajas tales como una gama más amplia y una ganancia de antena mayor para un tamaño y peso menores. También debe tenerse en cuenta cuál es el uso que se le pretende dar y cuál el lugar de instalación, de forma que se ponderen adecuadamente las ventajas e inconvenientes de cada tecnología.

Para algunas aplicaciones puede ser conveniente disponer tanto de elementos de antena activos como pasivos. Las antenas de radiogoniometría que se muestran en la Fig. 3.2–11 tienen elementos de antena que pueden conmutar entre modos de funcionamiento activo y pasivo mediante un toque de ratón. El funcionamiento activo se aplica por defecto ya que ofrece una mejor sensibilidad. Si en el espectro de interés existen señales de elevada intensidad, la antena puede conmutarse al modo pasivo para minimizar los problemas de intermodulación.

FIGURA 3.2–11

Ejemplos de red de antenas fijas de ondas métricas y decimétricas (20–3 000 MHz)



a) b) c)

Spectrum-3.2-11

A modo de ejemplo, considérese la instalación de una estación de comprobación técnica en zonas urbanas con una gran utilización de espectro. Dicha instalación pueden ser convenientes para realizar la comprobación de transmisiones de bajo nivel que no sean detectables incluso desde estaciones muy sensibles y desde emplazamientos teóricamente perfectos situados fuera del centro urbano. Debido a los elevados niveles de señales de radiofrecuencia que existen en los centros urbanos, las prestaciones y efectividad de las antenas activas y los dispositivos de conmutación de banda ancha utilizados en estaciones de comprobación técnica en dichos emplazamientos pueden verse muy afectadas, impulsando así a utilización de antenas pasivas y/o filtros y de más sistemas selectivos en banda a fin de evitar interferencias.

Sin embargo, las antenas de elementos pasivos adolecen de mala sensibilidad, a menos que sean físicamente grandes y se construyan en múltiples bandas que sean optimizadas para gamas de frecuencias relativamente estrechas, lo cual produciría una estructura de antena compleja difícil de instalar y de mantener. En cambio, si preamplificadores de radiofrecuencia de muy alta gama dinámica y circuitos de conmutación de radiofrecuencia siguen a los elementos pasivos, la antena puede cubrir una amplia gama de frecuencias y ofrecer buena sensibilidad. Esto es posible si tanto los elementos de antena pasivos y la amplificación de radiofrecuencia activa operan a la misma impedancia, en cuyo caso es posible construir los preamplificadores y conmutadores con muy alta gama dinámica y respuesta de banda ancha.

Los circuitos de conmutación y preamplificación de radiofrecuencia de alta gama dinámica deben instalarse físicamente en la antena para eliminar la necesidad de cableado de radiofrecuencia adaptado en fase entre la antena y el resto del sistema cuando se utiliza para la radiogoniometría, y proporcionar amplificación de línea cerca de la fuente de señal para contrarrestar las pérdidas del cable que en otro caso aumentarían el factor de ruido del sistema, degradando así la sensibilidad. El preamplificador de radiofrecuencia utilizado en la antena debe tener características de calidad de funcionamiento de radiofrecuencia que superen sustancialmente las del receptor al que está conectado, dado que el preamplificador de radiofrecuencia debe manejar el espectro completo de ondas métricas y decimétricas, mientras que el receptor suele tener filtros de preselector que limitan la cantidad de energía de señales de radiofrecuencia que deben manejar los circuitos del paso de entrada de radiofrecuencia del receptor.

En la Fig. 3.2–12 se muestra otra antena de utilidad, un dipolo de banda ancha coaxial en ondas métricas y decimétricas con prestaciones óptimas en la gama de frecuencias de 80 a 2000 MHz. En la gama de frecuencias inferiores, la antena con polarización vertical funciona en modo coaxial, mientras que en la gama superior funciona en modo de guía de onda omnidireccional.

Tal como se ha indicado anteriormente, los sistemas de antenas activas pueden minimizar el tamaño de éstas en las bandas de ondas métricas y decimétricas. En la Fig. 3.2–13 se muestra un sistema de antenas de banda ancha activa que utiliza dipolos activos como elementos básicos con un amplio rango dinámico y elevada sensibilidad. La antena vertical es un dipolo activo con alimentación central para la gama de frecuencias de 20 a 1300 MHz. La antena horizontal cubre la gama de 20 a 500 MHz y es del tipo de antena torniquete o en cruz y consta de dos dipolos activos de banda ancha combinados con una híbrida con el fin de proporcionar un diagrama de radiación casi omnidireccional. Estas pequeñas antenas activas son sumamente adecuadas para los sistemas de comprobación técnica en banda ancha, e incluyen la distribución de señal a muchos receptores, ya que el sistema de distribución será mucho más sencillo si utiliza solamente una antena para toda la gama de frecuencias.

FIGURA 3.2–12

Dipolo de banda ancha en ondas métricas y decimétricas



Spectrum-3.2-12

FIGURA 3.2–13

Sistema de antena activa en ondas métricas y decimétricas



Spectrum-3.2-13

Otra solución técnica eficaz para mejorar las características de las antenas de comprobación técnica omnidireccionales en la banda de ondas métricas y decimétricas consiste en montar en las antenas convertidores de señales de radio en frecuencia intermedia (convertidores de frecuencia intermedia) en lugar de amplificadores [Ashikhmin *et al.*, 2006], [Rembovsky *et al.*, 2006].

En ese caso, la mejora de las características de la antena se consigue por la reducción a un valor mínimo de la longitud del cable en alta frecuencia, lo cual es importante si se tiene en cuenta que dicho cable es la principal fuente de ruido en la transferencia de las señales recibidas desde los elementos de la antena al receptor de radio. La ubicación de los convertidores de frecuencia intermedia (FI) en la proximidad inmediata de los elementos de la antena permite suprimir el efecto del cable sobre la antena (que en este caso sólo transporta la señal de FI) y asimismo transmitir la señal en FI a distancias de hasta varios cientos de metros. Ello aumenta la sensibilidad y el margen dinámico de un sistema.

3.2.4.2 Antenas directivas para ondas métricas y decimétricas

En las bandas de ondas métricas y decimétricas, la necesidad de disponer de antenas con una reducida relación de ondas estacionarias y diagramas uniformes ha conducido a la realización de redes directivas con series de elementos que se repiten periódicamente en función del logaritmo de la frecuencia (por lo que se denominan log–periódicas). Pueden construirse redes de este tipo con una ganancia moderada (de unos 10 dBi por lo general) con buena directividad (relación de radiación delante/atrás de 14 dB por lo general), y un diagrama que permanece uniforme en una gama de frecuencias de relación entre frecuencias extremas de hasta 10:1. El diagrama de radiación es por lo general amplio, aproximándose al de una antena formada por un dipolo con un elemento reflector y un elemento director, en casi toda la gama de frecuencias. La característica uniforme de la ganancia del diagrama de radiación y de la impedancia de esta antena, hacen que resulte adecuada para combinarse en redes de banda ancha que permiten lograr configuraciones

altamente directivas. En especial, la antena log–periódica se presta muy bien a su empleo como iluminador de reflectores para ondas decimétricas cuando se necesita disponer de haces muy estrechos.

Las redes de antenas log–periódicas se construyen por lo general empleando una serie de elementos radiantes alimentados por una línea de transmisión central que al mismo tiempo le sirve de soporte. Los elementos de cada dipolo individual se construyen de manera que ofrezcan, con la mayor uniformidad posible, las características deseadas en una reducida porción de la gama total de frecuencias de trabajo de la antena. Se reproducen estos elementos individuales a intervalos proporcionales al logaritmo de la frecuencia. El número de intervalos depende de la ganancia y de la relación de ondas estacionarias que debe presentar el sistema completo.

La superposición de las características de los elementos individuales del sistema produce una zona activa formada por varios elementos adyacentes que se desplaza regularmente a lo largo de la estructura a medida que varía la frecuencia. La relación de ondas estacionarias de la antena depende directamente, para una determinada frecuencia, del número de elementos en la zona activa y de su rendimiento en la transferencia de energía entre la onda electromagnética y la línea de transmisión.

Diversos fabricantes ofrecen antenas log–periódicas completas, de banda ancha o de banda estrecha, para servicios especiales. En la Bibliografía y otras fuentes figura información detallada para la realización de estas antenas.

3.2.4.3 Antenas para frecuencias superiores a 3 000 MHz

Para conseguir la elevada ganancia de antena necesaria para la comprobación técnica a largas distancias se utilizan principalmente antenas de reflector y alimentador. La ganancia depende de la relación entre el diámetro del reflector y la longitud de onda y del rendimiento de abertura de la antena. Una alternativa a tener muy en cuenta frente a la utilización de antenas de reflector y alimentador es la ampliación de la frecuencia de uso de algunas antenas en ondas métricas y decimétricas para proporcionar cobertura en la parte inferior de la banda de ondas centimétricas.

La optimización de un sistema de antena en la gama de ondas centimétricas requiere considerar varios parámetros: la aplicación en banda estrecha o en banda ancha, la vigilancia u observación general de las señales.

Para una aplicación de banda estrecha puede colocarse un alimentador de bocina o guiaondas, un dipolo o unos dipolos cruzados exactamente en el foco de un reflector parabólico. Puede optimizarse la relación distancia focal a diámetro con respecto al elevado rendimiento que se consigue reduciendo al mínimo las pérdidas producidas bien por iluminación insuficiente o bien por radiación en lóbulos laterales. Se obtendrá así una ganancia de antena lo más alta posible.

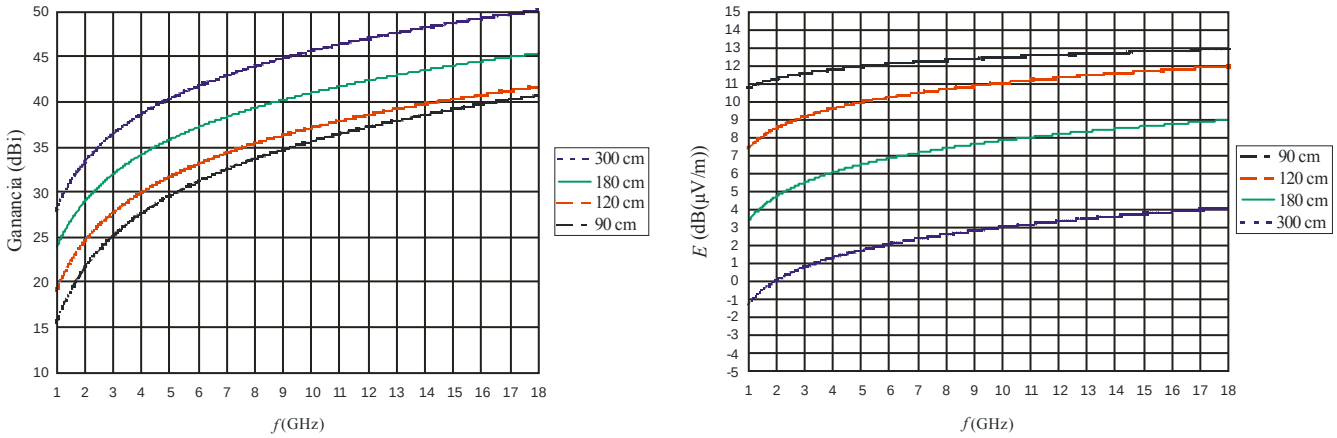
Para la comprobación técnica y la vigilancia espectral se requiere alta ganancia y una abertura de haz ancha para la captación de la señal. En este caso se aplica un método común consistente en enfocar o desenfocar el alimentador de la antena por medio de un equipo mecánico accionado a motor. Se puede conseguir una variación de abertura de haz entre 1:4 y 1:10.

Para aplicaciones de banda ancha pueden utilizarse antenas log–periódicas de polarización lineal doble, en espiral cónica, o antenas alojadas en cavidad, siendo estas últimas principalmente de polarización circular. Las señales radiadas de banda ancha se basan en el principio log–periódico y no tienen un centro de fase constante, sino que se van moviendo desde el radiador más corto al más largo de la estructura, dependiendo de la frecuencia. Si la estructura se posiciona en el reflector para una determinada frecuencia, en las demás frecuencias se producirá un desenfoque. Pueden reducirse a un mínimo las pérdidas causadas por el desenfoque mediante una optimización basada en el cálculo de más parámetros (por ejemplo, distancia focal/diámetro). Para evitar estas pérdidas puede utilizarse un enfoque mecánico como se ha descrito anteriormente.

Una solución destacable consiste en utilizar un reflector cuya superficie no sea perfectamente parabólica. En este caso aumentará la ganancia de antena y la abertura del haz disminuirá hasta una cierta frecuencia, y luego ambas serán prácticamente constantes (véase la Fig. 3.2–14).

FIGURA 3.2–14

Ganancia e intensidad de campo más baja que puede medirse para reflectores de diferente diámetro con alimentación lineal



Spectrum-3.2-14

Las antenas de microondas se montan fijas sobre un trípode o torre para la vigilancia de señales procedentes de una cierta dirección. En este caso, se proporciona un equipo manual para ajustar el sistema de antena exactamente a la dirección deseada. La abertura angular del haz de las antenas puede variar entre 20° y 0,05° dependiendo de la relación diámetro/longitud de onda.

Para la comprobación técnica general, los sistemas de antenas se instalan sobre posicionadores monoaxiales o biaxiales de alta precisión. Dependiendo del diámetro del reflector de la antena, las dimensiones y los costos pueden variar considerablemente si se exige el funcionamiento y la supervivencia en situaciones de viento de alta velocidad. En la comprobación técnica terrestre se utilizan posicionadores monoaxiales con juntas giratorias o con equipo de cable trenzado. Este último está limitado en cuanto al giro de acimuts (por ejemplo a 360°). La elevación se puede ajustar manualmente o controlar a distancia dentro de un margen de ±10°.

Para la comprobación técnica vía satélite los posicionadores biaxiales permiten un movimiento adicional entre –10° y más de +90°.

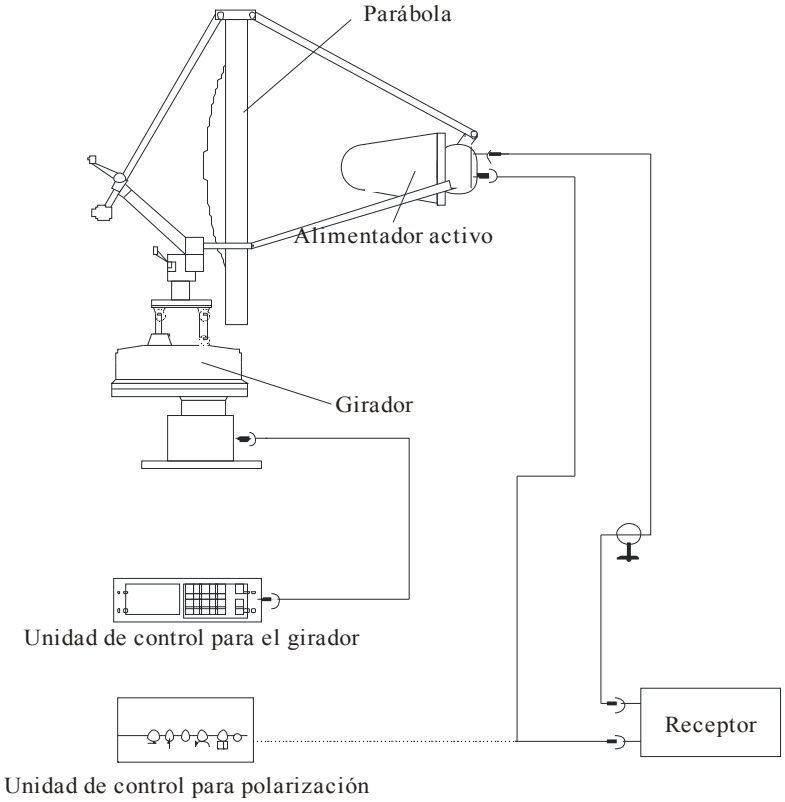
Los posicionadores a motor están controlados a distancia a través de unidades de control con diferentes modos de funcionamiento posibles, por ejemplo, con velocidad variable, posiciones prefijadas, exploración y selección de antena. Para la integración del sistema se proporcionan interfaces en paralelo y en serie informatizadas.

La Fig. 3.2–15 presenta un diagrama de bloques típico. Se recomienda vivamente instalar preamplificadores de bajo ruido (LNA) próximos al alimentador con el fin de evitar la atenuación y ruido adicional introducido por los cables. Tales denominadas "alimentadores activos", aparecen con preamplificadores de banda ancha (por ejemplo, de 1 a 18 GHz) o con unidades de amplificador conmutables en gamas de frecuencias de 1 octava. En la Fig. 3.2–16 se muestra un ejemplo de dichos alimentadores.

Por consiguiente, también se incluyen unidades de control para controlar a distancia la polarización y la gama de frecuencias. Otras características adicionales son el desvío conmutable, los atenuadores y los limitadores incorporados. Se recomienda asimismo instalar convertidores del sistema de recepción próximos a la antena para conseguir la mejor calidad de funcionamiento del sistema.

FIGURA 3.2–15

Diagrama de bloques de una antena de microondas direccionable en 1–18 GHz



Spectrum-3.2-15

FIGURA 3.2–16

Ejemplo de alimentación para un sistema de antena con reflector en 1–18GHz (sección del radomo)



Spectrum-3.2-16

En los grandes reflectores de antena, el alimentador no está situado en el foco del reflector sino en su vértice. Un subreflector hiperbólico desvía la radiación. El reflector puede también alimentarse en el "modo descentrado". En este caso, el alimentador de la antena está situado en una posición inclinada fuera de la radiación secundaria del reflector.

Para aplicaciones especiales pueden utilizarse reflectores de doble conformación tales como una parábola o cosecante cilíndrica. En tal caso la abertura de haz en acimut y elevación es diferente debido a la aplicación.

Para aplicaciones móviles en los que el espacio del techo es limitado, puede utilizarse una antena omnidireccional. Estas antenas omnidireccionales tienen polarización lineal oblicua y reciben todo tipo de polarización tal como polarización vertical, horizontal, circular dextrógira y levógira con diversas antenas que cubren muchas bandas de frecuencias incluidas las siguientes: 1–4 GHz; 4–18 GHz; 12–40 GHz.

De este modo, con tres antenas relativamente pequeñas (dimensión máxima 300 mm), puede cubrirse la banda completa. Es muy importante que estas antenas se monten muy próximas (dentro de unos 3 m) al receptor a fin de mantener pequeña la pérdida de atenuación en los cables coaxiales de las conexiones.

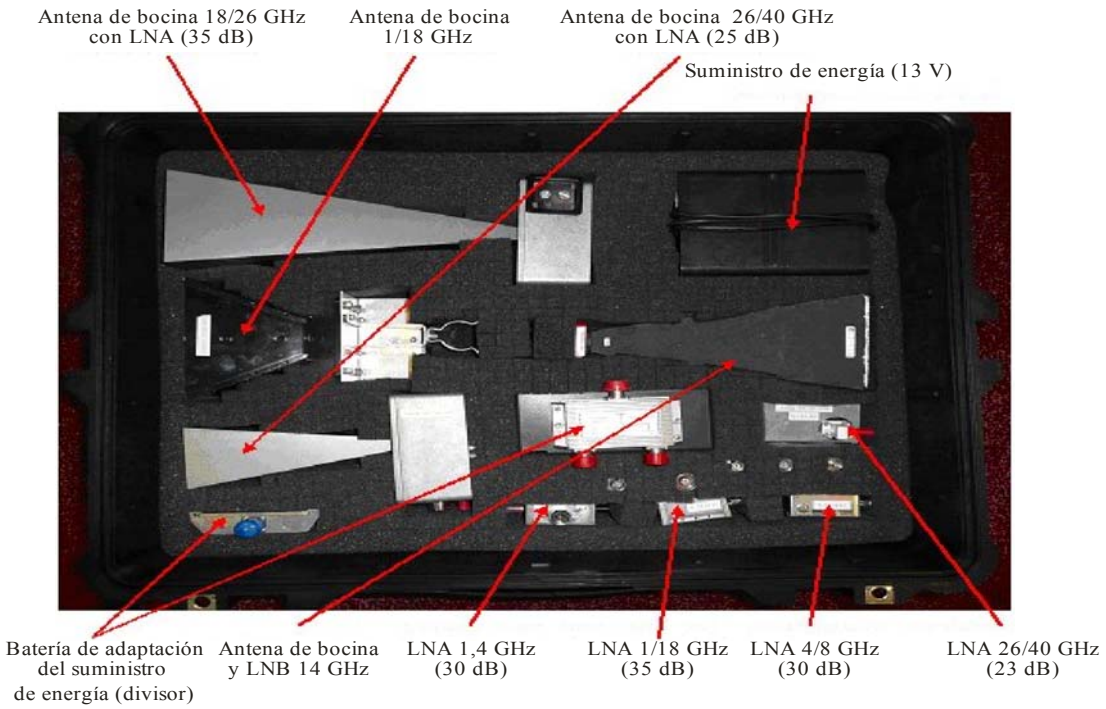
También puede contemplarse una solución compacta para mediciones en la banda de ondas centimétricas de 1 a 40 GHz y superiores que conste de varias bocinas y un único trípode.

Con el fin de evitar una contribución de ruido excesiva, en la banda de 1 a 18 GHz deberían utilizarse filtros selectivos y limitar la ganancia del LNA (menos de 20 dB). En la banda de 18 a 40 GHz y superiores, los resultados de las mediciones podrían mejorarse utilizando guíaondas. Dado que las guíaondas son por definición filtros paso de banda, pueden utilizarse amplificadores de mayor ganancia.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, en la Fig. 3.2–17 se ilustra un ejemplo típico de un dispositivo de mano. Consta de una maleta que contiene un conjunto de antenas de bocina con amplificadores, filtros, suministro de energía, baterías y cables para realizar medidas entre 1 y 40 GHz. Además, pueden añadirse a la maleta varios cables y adaptadores. El tamaño de la maleta es de 600 x 500 x 230 mm, y su peso con plena carga es de solamente 16 kg.

FIGURA 3.2–17

Solución compacta típica para realizar mediciones en ondas centimétricas



Spectrum-3.2-17

3.2.5 Emplazamiento de las antenas

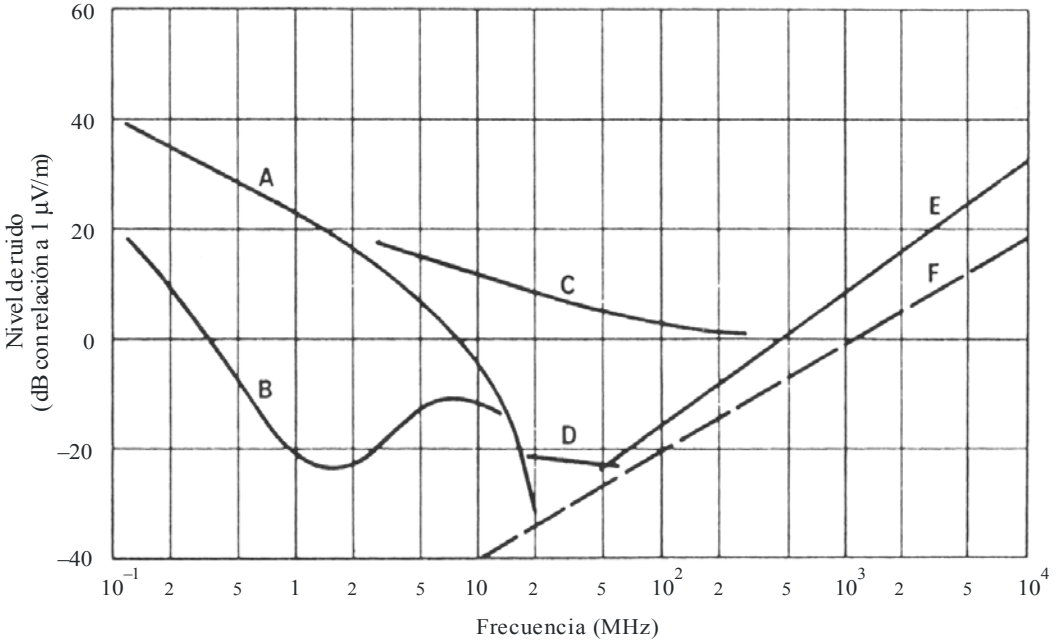
Existen tres factores primordiales que es preciso examinar cuando se escoge el emplazamiento de estaciones de comprobación técnica (el nivel de ruido interferente, la influencia del terreno sobre las características de funcionamiento de las antenas, y la interferencia entre antenas vecinas) antes de tomar una decisión respecto al emplazamiento adecuado de una antena y que hay que tener en cuenta antes de fijar el emplazamiento y disposición de las antenas. Durante el diseño de la estructura de la antena debe considerarse la influencia de las estructuras metálicas próximas tales como mástiles de antena y riostras de mástiles. Otras consideraciones de orden económico y de orden político pueden también tener influencia sobre el emplazamiento y disposición de la estación de comprobación técnica propiamente dicha.

El ruido que interfiere la recepción de ondas radioeléctricas puede dividirse en dos categorías generales: ruido de origen natural y ruido artificial.

El ruido de origen natural es el producido por los diversos mecanismos naturales, existentes tanto en las inmediaciones de la propia Tierra como en los cuerpos celestes más próximos. La componente principal de ruido natural generado sobre la Tierra está constituida por las descargas estáticas que se producen como resultado de la acción de las numerosas tormentas que ocurren continuamente en el globo. Dichas tormentas son más frecuentes en las regiones ecuatoriales y el ruido que producen se irradia hacia los polos dando como resultado componentes de ruido atmosférico cuya intensidad es máxima en el Ecuador y mínima en los polos. Existen fuentes de ruido galáctico muy energéticas en distintos puntos del firmamento (en particular las constelaciones de Sagitario y Casiopea) que pueden llegar a constituir una proporción considerable del ruido captado por las antenas que se encuentren en un lugar de bajo nivel de ruido atmosférico, tal como sucede en las latitudes más elevadas. Como se muestra en la Fig. 3.2–18, el ruido cósmico está por lo general enmascarado por otras fuentes en casi todas las frecuencias, pero puede adquirir importancia en algunos casos, especialmente si la antena receptora tiene un lóbulo orientado en la dirección de una fuente intensa.

FIGURA 3.2–18

Nivel medio típico de ruido en una banda de frecuencias de 6 kHz (gama de frecuencias, 100 GHz a 10 GHz)



Curvas A: Ruido atmosférico estático, noche
B: Ruido atmosférico estático, mediodía
C: Ruido de arranque de motores, en una gran ciudad
D: Ruido cósmico
E: Ruido típico de un aparato receptor
F: Ruido térmico

Spectrum-3.2-18

La interferencia producida por fuentes de ruido artificial en recepción puede revestir diversas formas (véase también las secciones 2.6 y 4.3). Una de las principales fuentes que deben evitarse cuando se escoge el emplazamiento de la antena, es la representada por una estación cercana de radiodifusión. Incluso si la frecuencia de trabajo de la estación difiere mucho de las frecuencias que se proyecta comprobar, pueden producirse importantes interferencias debidas a las radiaciones no esenciales y por armónicos de la frecuencia principal, productos de intermodulación u otras respuestas causadas en los receptores por sobrecarga de los circuitos de radiofrecuencia, de frecuencia intermedia y de baja frecuencia). También puede producirse una disminución de la sensibilidad del receptor, aunque no se detecten respuestas parásitas.

Otras fuentes de ruido artificial (tales como los aparatos de rayos X y de diatermia, las centrales eléctricas de alta tensión, así como sus redes de distribución, ciertos procesos de fabricación utilizados en la industria pesada, los equipos de soldadura, el alumbrado público, el tráfico automotor intenso, e incluso las zonas residenciales importantes), pueden crear niveles elevados de interferencia capaces de enmascarar la información de radiofrecuencia que se desea recibir. Además de la radiación directa, el ruido procedente de dichas fuentes puede propagarse por las líneas de distribución de energía y provocar interferencia a distancias considerablemente mayores que las alcanzadas por radiación directa.

Una vez escogido un emplazamiento adecuado desde el punto de vista de la interferencia producida por el ruido, es preciso analizar la influencia del terreno en la recepción. Esto reviste particular importancia ya que por lo general las antenas de una estación de comprobación técnica comparten el emplazamiento con antenas de radiogoniometría. En el caso de la radiogoniometría es importante que el terreno sea llano, sin discontinuidades y libre de obstáculos, para evitar errores en la medición de los diferentes acimuts de las señales recibidas en todas las direcciones. En las secciones 2.6 y 4.7 del presente Manual que tratan, respectivamente, del emplazamiento de las estaciones de comprobación técnica y de las de radiogoniometría, se da información detallada que no es del caso repetir aquí. Puede afirmarse que, salvo en algunos casos de estaciones de comprobación técnica destinadas a observaciones especiales, un emplazamiento adecuado para un radiogoniómetro resulta también adecuado para las antenas de comprobación técnica.

Un efecto que hay que tener en cuenta cuando varias antenas distintas deben instalarse en un mismo emplazamiento, es la posible interacción entre ellas y con otras estructuras metálicas próximas, tales como mástiles de antena, riostras de mástiles, vallas, tubos metálicos, escaleras y otras estructuras metálicas.

La interacción entre múltiples antenas en un emplazamiento será de la máxima importancia para tipos similares de antenas diseñadas para la misma gama de frecuencias o que lleguen a la cuasi resonancia a la misma frecuencia. Así, por ejemplo, se recomienda no instalar dos antenas rómbicas a menos de unas diez longitudes de onda, cuando una de ellas se encuentre en el lóbulo de la otra para las frecuencias recibidas.

Para que la interferencia entre antenas de distinto tipo sea mínima, se recomienda prever la máxima diferencia posible en dos, como mínimo, de las técnicas generales de diversidad: espacio, frecuencia y polarización.

Además de las otras antenas, las estructuras metálicas circundantes, situadas a distancias inferiores a varias longitudes de onda de una antena, pueden deformar inaceptablemente las características de antena, tales como los diagramas de elevación de antena y de acimut y acoplarse con alimentadores, con relación a las que se producen en condiciones de aislamiento.

Los errores en la medición de parámetros de emisión, que son producto de esa influencia, pueden sobrepasar considerablemente las tolerancias de error especificadas indicadas en el Capítulo 4.

La determinación cuantitativa de la influencia de otras antenas y estructuras metálicas puede calcularse por medio de programas informáticos [Kharchenko y Fomintsev, 2001], [Tanner y Andreasen, 1967], [Harrington, 1968] y [Thiele, 1973].

Las estructuras metálicas y otras antenas situadas dentro de varias longitudes de onda (ordinariamente de cuatro a ocho longitudes de onda) con respecto a una antena considerada son modelizadas mediante estructuras alámbricas, manteniendo las proporciones geométricas de las estructuras.

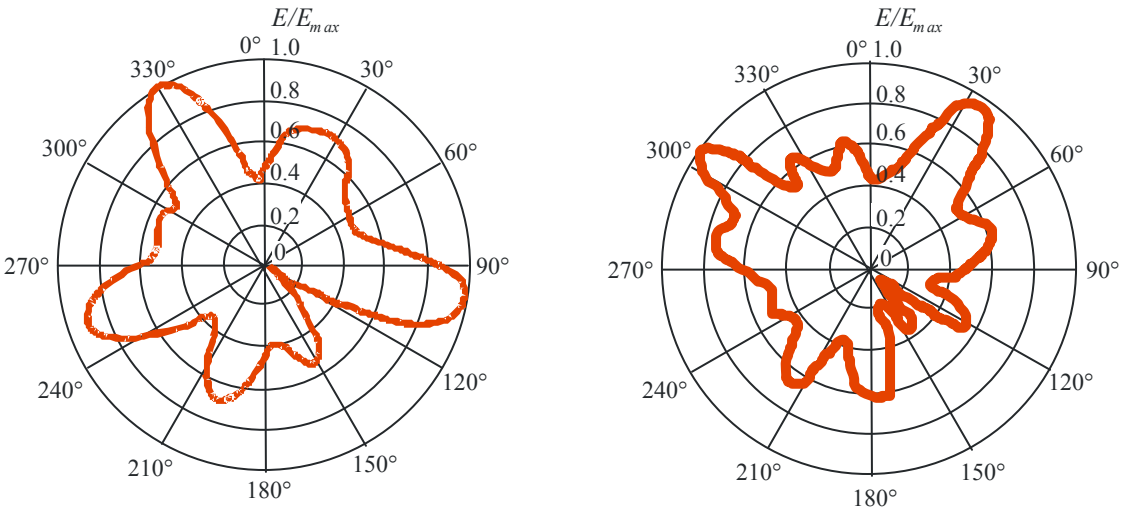
A continuación, con ayuda de un método de programa informático de momentos, se calcula la distribución de las corrientes dentro de todos los elementos de las estructuras alámbricas; el modelo electrodinámico de la antena y sus alrededores permite determinar las características verdaderas de la antena a determinar en presencia de dispersión, rerradiación y resonancia producidas por estructuras metálicas próximas.

Como ejemplo [Kharchenko y Fomintsev, 2001] del uso de la técnica indicada, la Fig. 3.2–19 muestra el diagrama de acimut calculado de una antena de omnidireccional de tipo paraguas cónica en presencia de importantes estructuras metálicas circundantes. Estas estructuras incluyen otras antenas similares para la misma gama de frecuencias y dos antenas de tipo paraguas y disco cónico para la gama 80–100 MHz. Hay también varias antenas de comunicación de varilla, una valla metálica y algunos otros objetos metálicos.

Como se aprecia claramente en la Fig. 3.2–19, las antenas y otras estructuras metálicas circundantes convierten un diagrama omnidireccional como el ilustrado en la Fig. 3.2–7 en uno direccional. Además, las variaciones en los diagramas varían considerablemente con la frecuencia, alcanzando diferencias de 20 dB. Esta variación complica extraordinariamente la posibilidad de corregir las mediciones de la antena.

FIGURA 3.2–19

Diagrama de acimut real de una antena omnidireccional de 30–80 MHz



E: intensidad de campo

a) $F = 40$ MHz b) $F = 60$ MHz

Spectrum-3.2-19

Se indican a continuación algunas recomendaciones específicas sobre el emplazamiento de antenas con relación a los edificios de la estación de comprobación, así como con relación a otras antenas.

Redes de antenas de cuadro para ondas decamétricas.

Deberán estar al menos a 100 m del edificio donde se encuentra la red de antenas de recepción para evitar que el edificio de recepción cause distorsión en los diagramas de radiación.

Redes de antenas de banda ancha para ondas decamétricas y hectométricas.

Deberán situarse no lejos del edificio (≈ 100 a 200 m). Habría que dejar una distancia suficiente para evitar el ensombrecimiento de la antena por los edificios, pero no demasiado grande, a fin de limitar las pérdidas debidas a las líneas de alimentación. Se recomienda el empleo de líneas coaxiales, dado que se trata de antenas de banda ancha con características de impedancia bastante críticas y de ganancia algo menor que las de tipo resonante.

Antenas receptoras y transmisoras.

Deberá mantenerse la máxima separación entre las antenas que se utilicen para transmisión y las que se utilicen para recepción a fin de reducir al mínimo la saturación de los receptores debido a señales producidas por los transmisores locales. Deberá otorgarse la máxima atención al emplazamiento de las antenas transmisoras para que sus lóbulos principales y laterales no puedan iluminar directamente a las antenas utilizadas sólo para recepción.

Antenas para radiogoniometría.

Si se prevé la instalación de equipos de radiogoniometría en la estación de comprobación técnica, habrá que tener en cuenta los eventuales efectos debidos a la componente de rerradiación de las antenas receptoras, las cuales pueden introducir errores en las marcaciones tomadas por el radiogoniómetro (véanse las secciones 2.7 y 4.7).

Antenas activas.

Puesto que el acoplamiento mutuo entre las antenas activas así como el acoplamiento mutuo entre dichas antenas y otras estructuras se reduce a un mínimo, las antenas activas pueden ser instaladas con separaciones menores que las antenas pasivas. Los transmisores radioeléctricos de alta potencia pueden perjudicar a las antenas activas, hecho que debe tenerse en cuenta al determinar el emplazamiento de dichas antenas.

Antenas para ondas métricas y decimétricas (frecuencias superiores a 30 MHz).

Deberán instalarse de forma que estén a gran altura, sobre torres situadas cerca del edificio en que se encuentran los receptores, a fin de reducir al mínimo las pérdidas en el cable coaxial, de aumentar el alcance con visibilidad directa. Para un radio de visibilidad directa de 20 km se necesita una torre de 24 m. Una torre de 48 m proporcionaría cobertura con visibilidad directa de unos 30 km.

Antenas para frecuencias superiores a 1 000 MHz.

Deberán estar emplazadas en un lugar con visibilidad óptica garantizada, sin obstáculos (por ejemplo, sobre un edificio, torre o montaña), especialmente cuando se dedican a comprobación técnica terrestre. Los sistemas de recepción deben instalarse cerca de la antena para evitar fuertes pérdidas en el cable coaxial.

3.2.6 Antenas para estaciones móviles de comprobación técnica

Una estación de comprobación técnica a móvil ofrece las mismas funciones que una estación fija en un vehículo móvil que puede conducirse de un lugar a otro. Esta configuración proporciona recursos de medición que pueden fácilmente desplazarse para responder a una reclamación concreta u otra necesidad de comprobación técnica, y que pueda hallarse en el trayecto de propagación con visibilidad directa de una señal de interés.

La principal limitación de las antenas de estaciones móviles de comprobación técnica es su tamaño. Debido a la inevitable falta de espacio, las antenas deben ser pequeñas. Por tanto, el tamaño de antena en el caso de las frecuencias más bajas representa sólo una pequeña fracción de una longitud de onda. Existen antenas de cuadro que cubren la gama de frecuencias de 9 kHz a 30 MHz con o sin material de ferrita, y que debido a sus características eléctricas claramente definidas son particularmente adecuadas para mediciones de intensidad de campo y radiogoniometría de señales de onda de superficie. Para frecuencias comprendidas entre 30 MHz y 3 GHz, existen antenas omnidireccionales de banda amplia para recibir ondas con polarización vertical u horizontal. Gamas de frecuencia típicas son 20 MHz a 1 000 MHz, 200 MHz a 3 000 MHz o 30 MHz a 3 GHz.

Existe una amplia variedad de antenas bidireccionales y de radiogoniometría para frecuencias por encima de 30 MHz, incluidas antenas de banda amplia y antenas Yagi de banda estrecha, dipolos sintonizables, dipolos plegados, antenas bicónicas y antenas log–periódicas. Estas antenas pueden cubrir perfectamente bandas de frecuencia bastante amplias y pueden cumplir todos los requisitos de una estación de comprobación técnica móvil. Al comienzo del punto 3.2.4.1 se describe una antena representativa.

La mayoría de las antenas de estaciones móviles están montadas en un vehículo. Sin embargo, las antenas de reflector para frecuencias superiores a 1 000 MHz no suelen estar permanentemente instaladas en un vehículo sino transportarse y desplegarse cuando es necesario mientras el vehículo está detenido, como se

muestra en la Fig. 3.2–20. En todas las gamas de frecuencias pueden utilizarse antenas activas considerando sus datos técnicos y sus limitaciones, que se indican en la explicación de más arriba relativa a las antenas omnidireccionales. Pueden utilizarse antenas activas transportadas a mano (véase la Fig. 3.2–21) para fines de comprobación técnica, de medición del campo eléctrico o incluso de radiogoniometría.

En la Fig. 3.2–22 se ilustran estaciones móviles típicas de comprobación técnica, equipada cada una con una antena montada en el techo del vehículo sobre un mástil neumático.

Las estaciones móviles son particularmente importantes para la comprobación técnica a las frecuencias de microondas. Las señales de comunicación de microondas se suelen propagar en haces bien definidos muy estrechos diseñados para la comunicación punto a punto o punto a multipunto.

Por tanto, sería muy improbable que una antena fija estuviese situada suficientemente cerca de un trayecto de microondas, como para poder interceptarla señal en dicho trayecto. Debido a su elevado costo y su muy limitado beneficio, no se recomienda instalar un interceptador de microondas en una estación fija, debiendo situarse este equipo en un vehículo móvil o en una estructura transportable. En el caso de un vehículo, puede implementarse un sistema completo para realizar medidas entre 1 y 40 GHz y a frecuencias superiores.

FIGURA 3.2–20

Antena de microondas transportable



Spectrum-3.2-20

FIGURA 3.2–21

Antena direccional portátil



Spectrum-3.2-21

FIGURA 3.2–22

Ejemplos de estaciones de comprobación técnica móviles



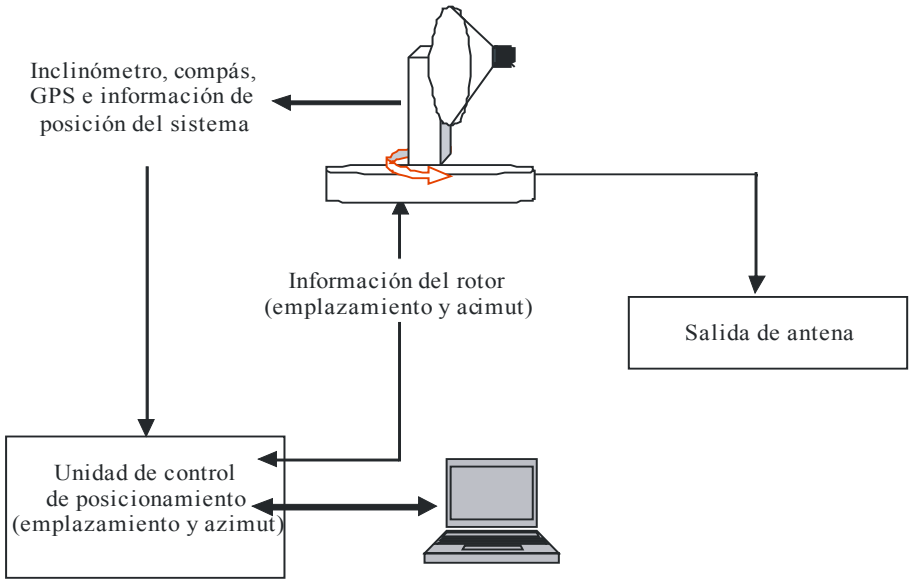
Spectrum-3.2-22

En este caso, que se ilustra mediante un diagrama de bloques típico en la Fig. 3.2–23, el sistema de antena consta de los elementos siguientes:

– Sistema de antena
– Sistema de posicionamiento automático
– Unidad de comprobación técnica de antena
– Mesa de salida de antena
– Unidad de control de acimut y elevación.

FIGURA 3.2–23

Ejemplos de sistema de comprobación técnica en ondas centimétricas



Spectrum-3.2-23

El sistema de antena puede estar compuesto por varias antenas para la comprobación técnica de toda la banda, tal como se ilustra en la Fig. 3.2–24. No obstante, para asegurar la flexibilidad de las medidas en ondas centimétricas y teniendo en cuenta las distintas situaciones que pueden darse en las mediciones y el bajo nivel de las señales en dicha banda, resulta de utilidad incluir cerca del sistema de antena algunos accesorios tales como amplificadores de bajo ruido y filtros YIG.

Una computadora personal proporciona la interfaz entre el sistema de antena y el usuario.

La unidad de control de posicionamiento actúa como supervisor. Envía datos para supervisar el sistema de posicionamiento y recibe información desde varios sensores para informar del estado del sistema y de los datos de referencia geográfica.

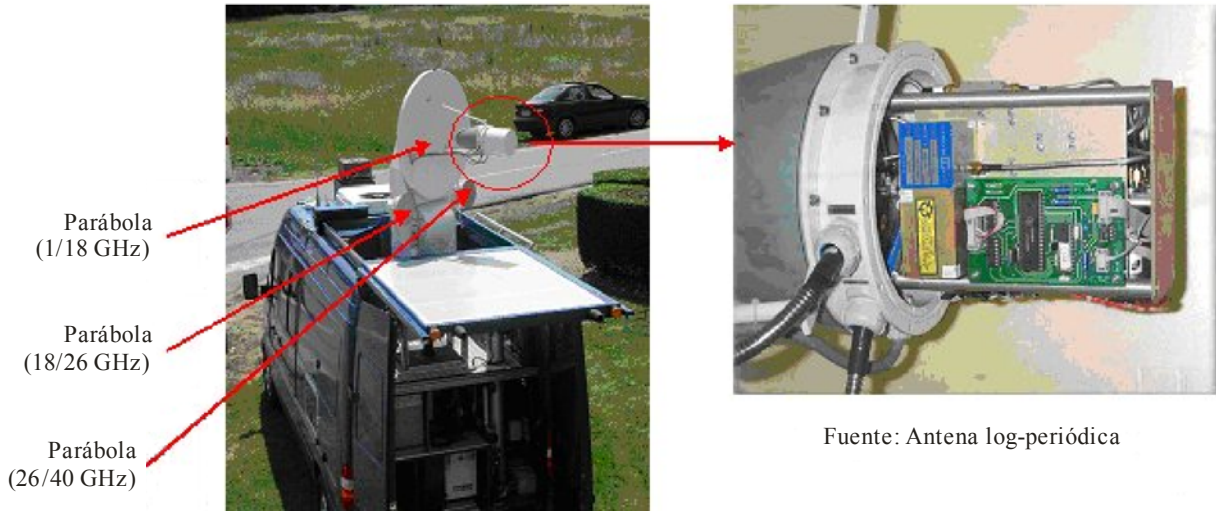
El usuario dispone de un panel de salida de antena para conectar los distintos equipos de medida con todas las salidas disponibles (con o sin amplificadores de bajo ruido, filtros o cualquier otro elemento). En la Fig. 3.2–25 se muestra el diagrama de bloques de una cadena de medida típica en ondas centimétricas.

3.2.7 Antenas para estaciones transportables y portátiles

Las antenas transportables y portátiles se diseñan para minimizar su peso y dimensiones. La antena que se muestra en la Fig. 3.2–10a) (a la izquierda) se utiliza como móvil o transportable. La antena se transporta fácilmente en una caja de embalaje. La antena transportable puede fijarse en la parte alta de un pequeño mástil telescópico para minimizar el tiempo de montaje. También puede montarse en vehículos o estaciones semifijas.

FIGURA 3.2–24

Visión general del sistema de antena

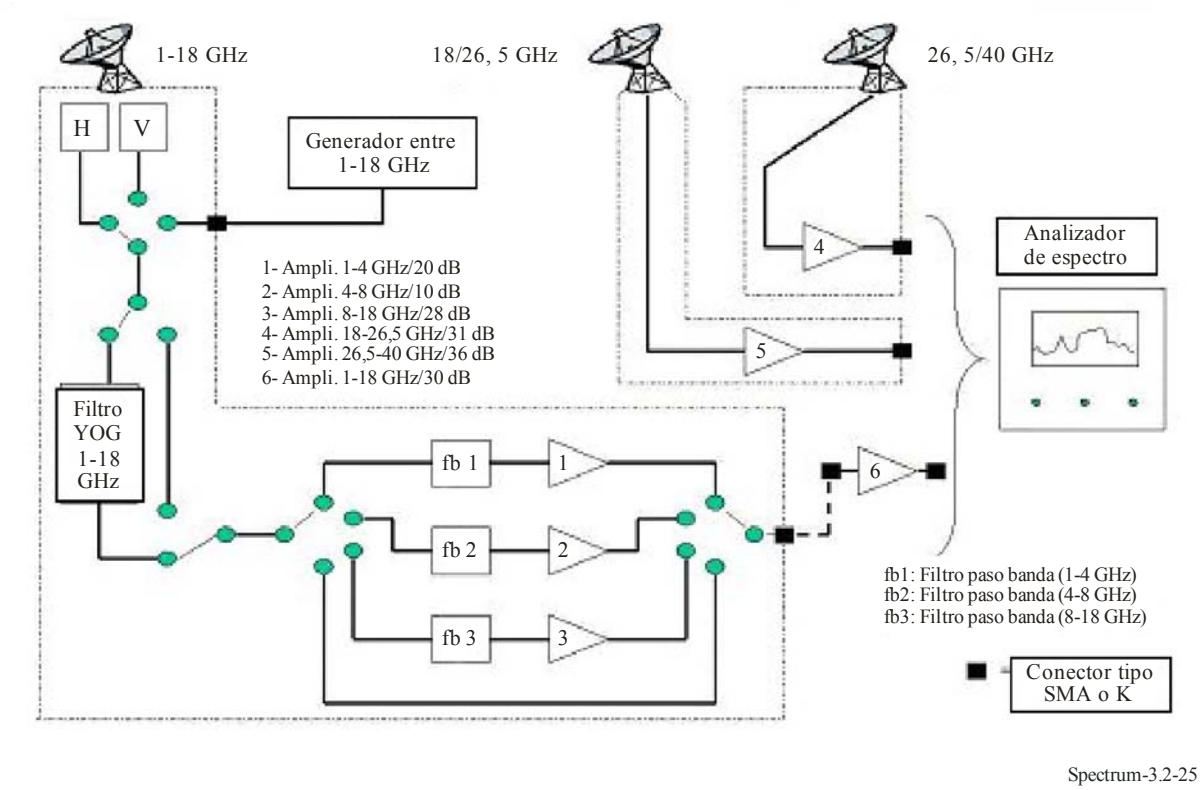


Fuente: Antena log-periódica

Spectrum-3.2-24

FIGURA 3.2–25

Diagrama de bloques de la cadena de recepción



Spectrum-3.2-25

Los avances tecnológicos y de los procesos de integración permiten que las antenas transportables ofrezcan funcionalidades y prestaciones similares a las antenas de estaciones fijas y móviles. Estas antenas, asociadas a un receptor integrado, permiten transformar una estación en transportable o portátil, lo cual es especialmente útil en las tareas de comprobación técnica realizadas en entornos urbanos o en zonas de difícil acceso. Debido a la intensa utilización del espectro en zonas urbanas, las mediciones de comprobación técnica realizadas en las calles no son siempre relevantes; solamente las mediciones realizadas desde las partes altas de emplazamientos dedicados, generalmente edificios de ciudades, ofrecen resultados fiables. Para estas tareas de comprobación técnica se necesitan antenas y estaciones portátiles compactas y de reducido peso y tamaño. Una configuración transportable o portátil proporciona los recursos necesarios y de fácil traslado para su ubicación en el trayecto de propagación de la línea de visibilidad directa de la señal.

A continuación se presentan tres ejemplos de antenas/estaciones portátiles:

Tipo 1: el primer tipo de antena/estación requiere un proceso de montaje. El equipo es transportado sobre las espaldas de una persona hasta un emplazamiento de medición dedicado. La Fig. 3.2–26 muestra un ejemplo de una antena de radiogoniometría de este tipo, que permite un rápido montaje (unos pocos minutos). La antena y la estación de comprobación técnica constituyen un conjunto integrado que incluye el receptor, la unidad de conmutación de cable y la antena, transportado sobre la espalda. La estructura de la antena está completamente empaquetada en una caja de plástico.

Tipo 2: el segundo tipo de antena portátil no requiere montaje. Toda la estación (antena y receptor) se integra en una mochila, que puede funcionar mientras el operador se desplaza. La interfaz hombre–máquina está integrada en una PDA, que da al operador libertad de movimientos, o en una computadora portátil. En el lateral del receptor existe una antena para radiogoniometría integrada. Las tareas de comprobación técnica son realizadas por una sola persona que tiene las manos libres para realizar las tareas necesarias. También puede proporcionarse una antena de radiogoniometría para las bandas de frecuencia más elevadas.

FIGURA 3.2–26

Ejemplo de antena en ondas métricas y decimétricas



a) La antena en su caja lista para ser transportada



b) Antena en 20-3 000 MHz en una configuración de despliegue que incluye un receptor compacto y un radiogoniómetro

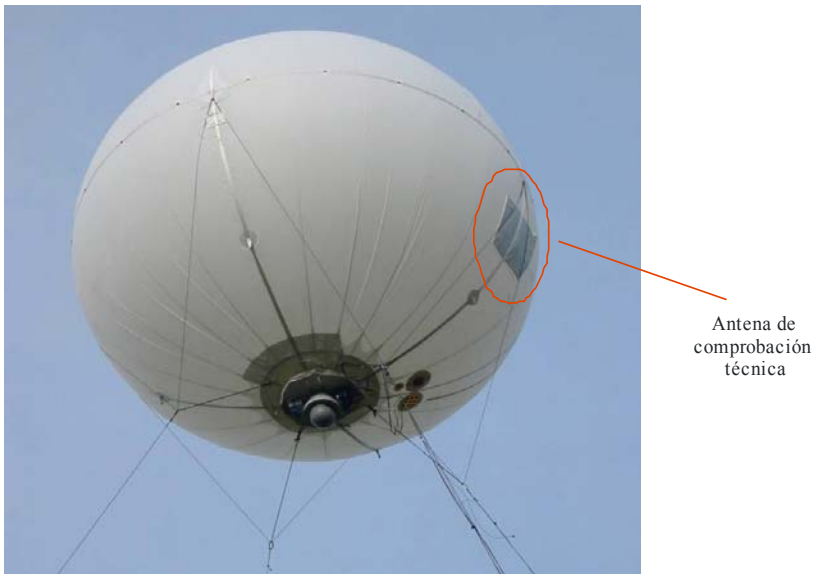
Spectrum-3.2-26

Tipo 3: un tercer tipo de antena portátil constituye una solución muy compacta. La antena portátil directiva se utiliza como antena de comprobación técnica y de radiogoniometría y está conectada a un receptor portátil que puede ser operado desde un panel frontal sin necesidad de una computadora personal o una PDA adicional. Las tareas de comprobación técnica son realizadas por una sola persona.

En la Fig. 3.2–27 se muestra otro tipo de antena que puede ser necesaria para usos específicos. Se trata de una antena de comprobación técnica flexible montada sobre la superficie de un globo que puede ser de gran utilidad en eventos de corta duración, como por ejemplo para la comprobación técnica durante eventos especiales tales como visitas de estado o acontecimientos deportivos.

FIGURA 3.2–27

Ejemplo de globo de apoyo para una antena flexible en ondas métricas y decimétricas



Spectrum-3.2-27

Una altitud de antena de hasta 100 m, como la que es posible con un globo de este tipo, permite detectar y medir un número máximo de señales de interés. También es una solución mejor que las estaciones terrenales para la interceptación del mayor número posible de señales sin el efecto perjudicial de los edificios, bosques u otros obstáculos elevados, y sin trayectos múltiples.

El globo está asociado a un receptor compacto (instalado sobre el terreno), se monta de forma rápida y sencilla, y puede comenzar inmediatamente a realizar la comprobación técnica en las bandas de frecuencia de ondas métricas y decimétricas, incluyendo usuarios sin licencia e interferencias.

Para evitar pérdidas excesivas del cable debido a la altura del globo, pueden utilizarse dos configuraciones:

- Instalar bajo el globo una unidad de recepción y procesado de las información de comprobación técnica. En este caso se tienden dos cables (alimentación y transmisión de datos) hasta la estación situada en tierra.
- Utilizar una unidad de conversión descendente para convertir la señal de radiofrecuencia en una señal en FI en banda base. Con una conversión analógica, puede emplearse un cable de radiofrecuencia si el globo está a baja altura. En caso de conversión digital, puede utilizarse un enlace óptico o enlace de datos para transferir los datos hasta la estación sobre el terreno.

3.2.8 Líneas de transmisión y sistemas de distribución

3.2.8.1 Líneas de transmisión

En las estaciones de comprobación técnica las líneas de transmisión transportan la energía recibida desde la antena al receptor

Entre los diversos tipos de líneas de transmisión la solución preferida en las estaciones de comprobación técnica es la línea de transmisión coaxial. Su impedancia es uniforme siempre que las dimensiones de las distintas partes que la componen, incluidos los conectores, estén controladas adecuadamente. Las señales transmitidas por buenos cables coaxiales no se ven gravemente influidas por la presencia de otros objetos. Los cables coaxiales se fabrican en una amplia variedad de dimensiones y materiales. Las propiedades de los cables coaxiales disponibles son numerosas y variadas y abarcan una gama de precios muy amplia. Existen numerosos manuales, preparados especialmente por los fabricantes, en los que se indican las características de los distintos cables coaxiales. Es importante utilizar cables coaxiales con doble trenzado de blindaje o con un conductor exterior resistente.

Una atenuación total de 3 dB puede ser aceptable para la línea de transmisión de recepción. Si se coloca un receptor integrado en la base de la antena se evitan recorridos largos del cable, se reducen las pérdidas de inserción y se evita la necesidad de un amplificador de bajo ruido en una unidad de conmutación.

3.2.8.2 Sistemas de distribución

Una vez que la energía recibida por una antena determinada se transporta hasta un punto dentro del edificio de la estación de comprobación técnica, se necesita, por lo general, distribuir esta energía a distintas posiciones de recepción. Para lograr resultados óptimos, el sistema de distribución tendría que estar concebido teniendo en cuenta la aplicación final de cada terminal. Por regla general, el nivel de la señal debiera mantenerse lo más elevado posible para no tener que recurrir a receptores de sensibilidad muy grande. También debiera mantenerse una elevada calidad de señal (relación señal/ruido) o, mantenerse su degradación lo más reducida posible, de forma que no resulten comprometidas las ventajas derivadas del empleo de antenas de alta ganancia y de líneas de distribución de muy pocas pérdidas.

Los receptores que se conecten directamente en paralelo a través de una línea de transmisión degradarán la calidad de funcionamiento del sistema de comprobación técnica debido, por ejemplo, a las ondas estacionarias, a una distribución de energía no definida y a una radiación secundaria por el oscilador local. Este método no se recomienda. En su lugar, deberán utilizarse sistemas de adaptación y de distribución de la señal.

La evolución tecnológica ha permitido aumentar el número de antenas de una estación de comprobación técnica, con el consiguiente crecimiento de la complejidad de los sistemas de recepción y distribución. En ocasiones es necesario recibir señales en antenas de distintas bandas de frecuencia con receptores diferentes.

Los avances tecnológicos en materia de computadores y software permiten que los sistemas de distribución utilicen módulos de equipos digitales en lugar de analógicos.

3.2.8.2.1 Principios generales

Los sistemas de distribución incluyen generalmente un conmutador y un duplexor de antena. Los avances tecnológicos permiten combinar ambos para controlarlos a distancia a través de la red de comunicaciones.

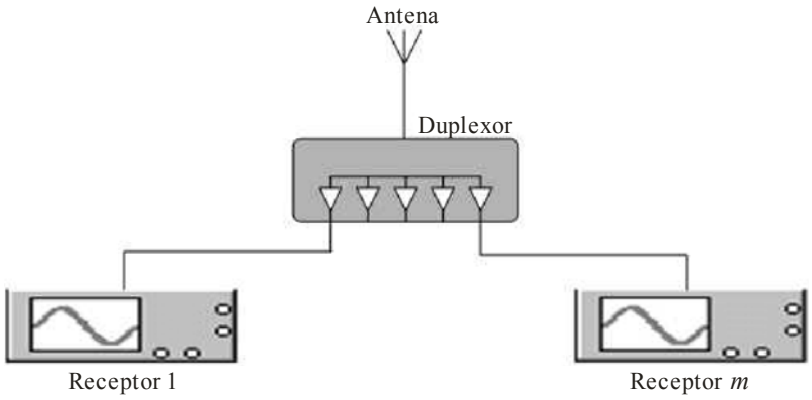
3.2.8.2.1.1 Duplexor de antena

En un sistema de recepción, el equipo que distribuye la señal desde una antena a un receptor multicanal o a múltiples receptores se denomina duplexor. El duplexor es el primer componente del sistema de recepción y debe presentar una buena linealidad para minimizar la intermodulación.

En la Fig. 3.2–28 se muestra un diagrama de la conectividad de la antena, el sistema de distribución y el equipo de análisis.

FIGURA 3.2–28

Ejemplo de sistema de distribución



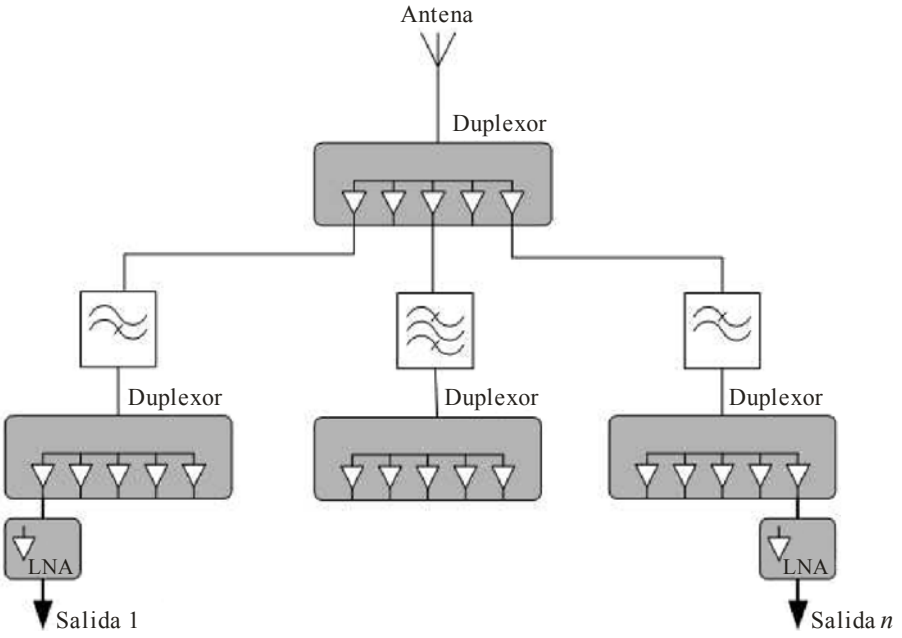
Un duplexor de antena puede estar constituido por varios duplexores e incluir filtros individuales que aíslan los diferentes trayectos de señales; se utiliza un amplificador de bajo nivel de ruido para compensar el efecto de la atenuación y los circuitos de control.

En la Fig. 3.2–29 se muestra un diagrama de bloques de un duplexor con varios trayectos.

Debido a la no linealidad de algunos componentes, la degradación del factor de ruido es inevitable si en la conexión se utiliza un duplexor multinivel. Por tanto, para mantener la calidad, se utilizan ampliamente duplexores de 2 y de 3 niveles. En general, el factor de ruido y la linealidad se degradan conforme aumenta el número de salidas.

FIGURA 3.2–29

Diagrama de bloques típico de un duplexor con varios trayectos



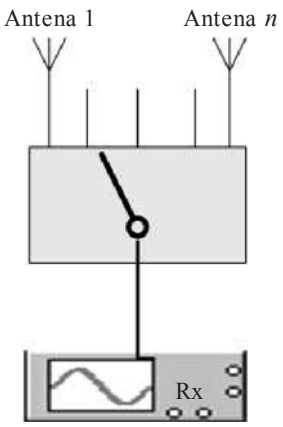
Spectrum-3.2-29

3.2.8.2.1.2 Conmutador de antena

Un conmutador de antena selecciona la señal deseada para enviarla a un receptor de entre varias entradas de antena. En la Fig. 3.2–30 se muestra un conmutador de radiofrecuencia de antena.

FIGURA 3.2–30

Conmutador típico de antena



Spectrum-3.2-30

De forma similar a los duplexores de antena, y debido a las limitaciones de frecuencia de cada uno de los componentes individuales, los conmutadores de antena constan de distintos componentes para cada banda de frecuencias; el diseño debe garantizar el aislamiento entre dichos componentes.

En ocasiones se utilizan amplificadores de bajo ruido para compensar la atenuación de los componentes.

3.2.8.2.1.3 Sistema de distribución

Las señales procedentes de las antenas se distribuyen entre los distintos receptores mediante un sistema de distribución en radiofrecuencia.

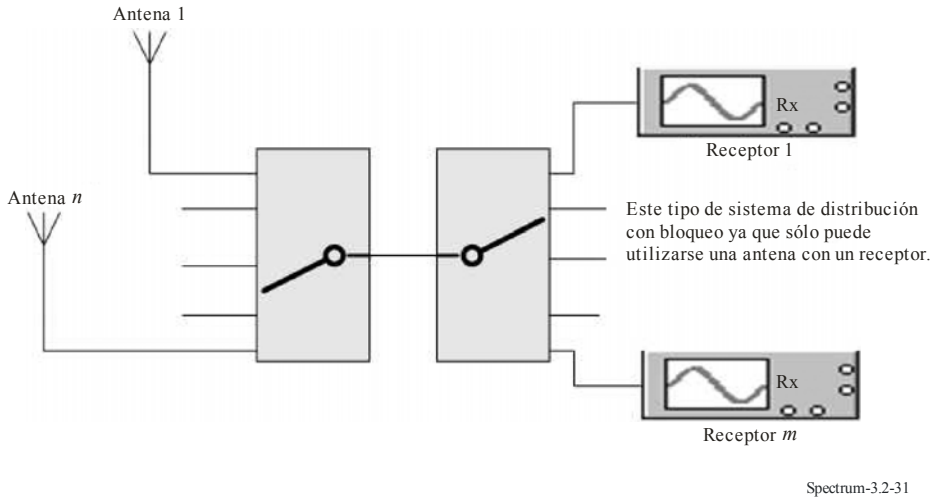
La señal de cualquiera de las antenas puede llegar a cualquiera de los receptores, de forma que cualquiera entrada puede entregarse a cualquiera de las salidas del sistema de distribución.

Existen dos tipos de sistemas de distribución. Uno de ellos es similar al sistema de bloqueo de un sistema de conmutación. En dicho sistema, sólo una antena se conecta al receptor, bloqueándose cualquier intento de conexiones adicionales. En la Fig. 3.2–31 se muestra un sistema típico de distribución con bloqueo.

El otro tipo, que utiliza tecnología más reciente, permite que la conexión se establezca entre múltiples antenas y cualquiera de los receptores, o entre una antena y múltiples receptores.

FIGURA 3.2–31

Sistema típico de distribución con bloqueo



De hecho, una matriz $M \times N$ ideal se compone de duplexores de M posiciones y conmutadores para N antenas. Cada antena entrega su salida al duplexor de m trayectos, mientras que los n trayectos de los duplexores se conectan a la entrada de un conmutador para n antenas. Cada conmutador de antena proporcionará n salidas a los receptores. En la Fig. 3.2–32 se ilustra el principio de una matriz de antena sin bloqueo.

Donde:

n: número máximo de antenas con duplexor

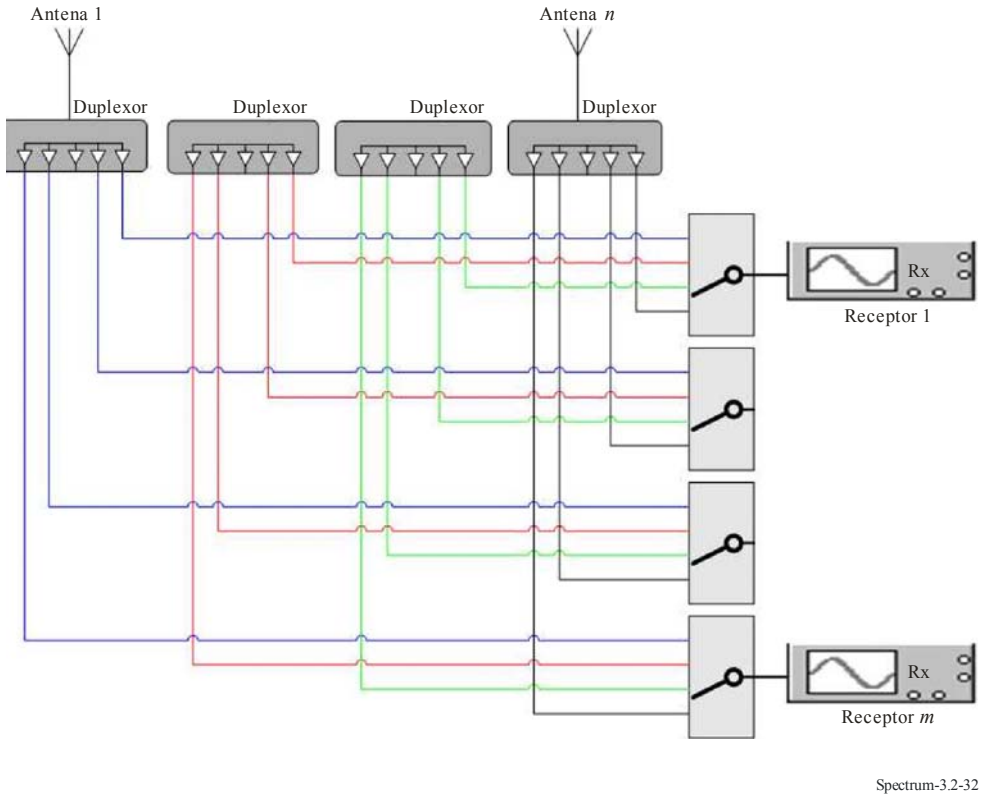
m: número máximo de receptores

x: receptor seleccionado

y: antena seleccionada.

FIGURA 3.2–32

Sistema típico de distribución sin boqueo



3.2.8.2.2 Calidad de funcionamiento

Pese al gran desarrollo de las tecnologías de procesado digital de la señal aplicadas a la detección de señales, demodulación y radiogoniometría, las tecnologías analógicas son aún necesarias para la distribución de la señal.

Un buen sistema de distribución debería optimizarse para asegurar su calidad de funcionamiento en aspectos tales como la sensibilidad, margen dinámico, conmutación de señales de radiofrecuencia, capacidad de distribución y aislamiento entre canales.

Las especificaciones de un sistema de distribución deberían incluir los siguientes parámetros principales

- Margen de frecuencias
- Pérdida de inserción
- Aislamiento
- Margen dinámico
- Producto de intermodulación de tercer orden (IP3)
- Factor de ruido.

Referencias

ASHIKHMIN, A., KOZMIN, V., KOROVIN, A. y REMBOVSKY, A. [2006] Distributed Systems of Radio Monitoring and Direction Finding. *Spetsialnaya Tekhnika*, **5** (http://www.ircos.ru/eng/articles.htm).

HARRINGTON, R. F. [1968] *Field Computation by Moment Methods*. The Macmillan Company, New York, Estados Unidos de América.

KHARCHENKO, I. P. y FOMINTSEV, S. S. [2001] Raschet kharakteristik antennikh sistem stantsii radiokontrolya na osnove matematicheskogo modelirovaniya (Calculation of the characteristics of radio monitoring station antenna systems on the basis of the mathematical modelling). *Elektrosvyaz*, **9**, Moscú, Federación de Rusia.

REMBOVSKY, A., ASHIKHMIN, A. y KOZMIN, V. [2006] *Radiomonitoring: Problems, Methods and Equipment*. Moscú, Goriachaya Liniya–Telekom press (http://www.ircos.ru/eng/articles.htm).

TANNER, R. L. y ANDREASEN, M. G. [Septiembre, 1967] Numerical Solution of Electromagnetic Problems. IEEE Spectrum.

THIELE, G. A. [1973] *Wire Antennas in Computer Techniques for Electromagnetics*, Chapter 2. Pergamon Press, New York, Estados Unidos de América.

Bibliografía

AISENBERG, G. Z., IAMPOLSKY, V. G. y TERESHIN, O. N. [1977] *Antenny UKV* (UHF Antennas). Sviaz, Moscú, Federación de Rusia.

AISENBERG, G. Z., BELOUSOV, S. P., JURBENKO, E. M. *et al.* [1985] Korotkovolnovye antenny (HF Antennas). *Radio i Sviaz*, Moscú, Federación de Rusia.

ARRL [2000] *The ARRL Antenna Book*. Newington, CT, Estados Unidos de América.

BALANIS, C. A. [1982] *Antenna Theory*. John Wiley and Sons, Estados Unidos de América.

BRAULT, R. y PIAT, R. [1962] *Les antennes*. Librairie de la radio, Paris, Francia.

DAVIES, K. [1990] *Ionospheric Radio.* Peter Peregrinus Ltd, London, Estados Unidos de América.

JOHNSON, R. C. [1993] *Antenna Engineering Handbook*. McGraw–Hill, New York, NY, Estados Unidos de América.

KRAUS, J. D. [1950] *Antennas*. McGraw–Hill, New York, NY, Estados Unidos de América.

MARKOV, G. T. and SAZONOV, D. M. [1975] *Antenny* (Antennas). Energia, Moscú, Federación de Rusia

THOUREL, L. [1956] *Les antennes*. Dunod, Paris, Francia.

WATT, A. D. [1967] *VLF Radio Engineering*. Pergamon Press, Oxford, Reino Unido.

WEEKS, W. L. [1968] *Antenna Engineering*. McGraw–Hill, New York, NY, Estados Unidos de América.

Recomendaciones UIT–R:

NOTA – Se insta al lector a que utilice la última edición de cada una de las Recomendaciones referenciadas.

Recomendación UIT–R F.162 – Utilización de antenas transmisoras directivas en el servicio fijo que funcionan en las bandas de frecuencias por debajo de unos 30 MHz.

Recomendación UIT–R BS.705 – Características y diagramas de las antenas transmisoras y receptoras en ondas decamétricas.

3.3 Receptores de comprobación técnica

3.3.1 Consideraciones generales

La calidad de funcionamiento de una estación de comprobación técnica guarda relación directa con la calidad del equipo de la estación, incluidas las antenas, los receptores, los radiogoniómetros y los procesadores. Las antenas, los radiogoniómetros y el equipo de procesamiento se analizan respectivamente en las secciones 3.2 y 3.4 y en el punto 3.6.2. Un estudio a fondo de los receptores exigiría un tratado especializado, por lo que aquí se expone solamente una visión general de la composición de los receptores, definición de las características principales y precauciones a adoptar para su funcionamiento.

La función del receptor es seleccionar una señal radioeléctrica entre todas las que se reciben en la entrada de la antena a la que está conectado, y reproducir en la salida del receptor la información que transporta dicha señal radioeléctrica. En el pasado, la mayoría de los receptores han utilizado circuitos totalmente analógicos, pero la mayoría de los modernos receptores son digitales, y utilizan técnicas de procesamiento digital de la señal (DSP, *digital signal processing*), para introducir muchas funciones del receptor, tal como ocurre en los sistemas de radio definidos por software. A continuación se tratan ambos tipos de receptores

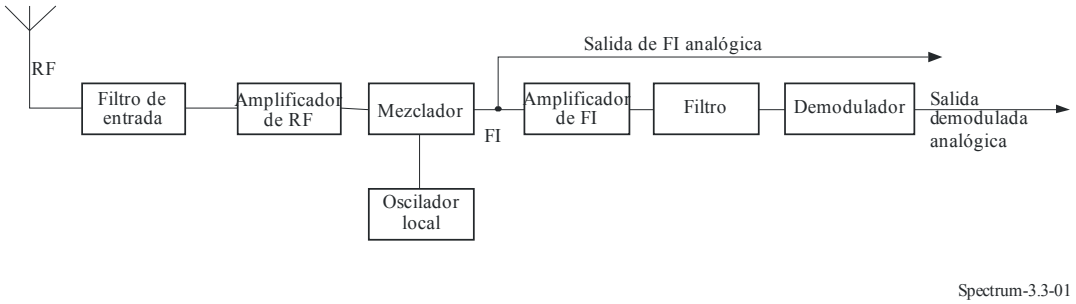
Las mejoras tecnológicas permiten que los receptores modernos sean cada vez más compactos. La miniaturización de osciladores de elevada estabilidad reduce el tamaño de la parte analógica de un receptor. La componente digital de los receptores digitales es cada vez más potente y compacta debido a las mejoras de la tecnología de conversión analógico a digital, las memorias y los procesadores. Actualmente las interfaces son completamente digitales.

3.3.2 Receptores analógicos

El diagrama de bloques de la Fig. 3.3–1 muestra las etapas principales de un receptor analógico. El filtro de entrada, que normalmente es un banco de filtros preselectores de suboctava o filtros de seguimiento, permite la recepción de las señales deseadas y elimina las señales fuera de banda para evitar intermodulación en el amplificador de alta frecuencia. Este filtro debe incluir la frecuencia central de la transmisión a recibir, y debe tener una banda de paso suficientemente ancha para permitir la recepción de todo el espectro transmitido.

FIGURA 3.3–1

Diagrama de bloques típico de un receptor analógico



El diseñador de una estación de comprobación técnica debe por tanto prestar atención a la potencia de las transmisiones que van probablemente a recibirse en la banda de paso de este filtro de entrada; es fácil que las señales distintas de la deseada originen señales no esenciales por intermodulación en el amplificador de radiofrecuencia y/o originen degradación de la sensibilidad del amplificador de radiofrecuencia debido a su bloqueo. Para eliminar estos efectos es necesario que el amplificador de radiofrecuencia tenga suficiente linealidad.

Otra finalidad del filtro de entrada es la de atenuar la recepción en la frecuencia imagen.

El amplificador de radiofrecuencia determina parcialmente, mediante su ganancia, la sensibilidad del receptor. Pero también tiene otra finalidad muy importante: junto con el filtro de entrada impide que la señal del oscilador local sea conducida a la antena y radiada por ésta, con lo que se generaría una señal radioeléctrica no esencial.

Se produce intermodulación entre dos señales cuando estas señales atraviesan un circuito no lineal, como se indica en la sección 6.5. Las señales de intermodulación pueden superponerse a las señales utilizables e interferirlas. La calidad del receptor, desde el punto de vista de la intermodulación se caracteriza por el valor de su punto de interceptación de tercer orden, que debe ser el máximo posible.

La sensibilidad del receptor está limitada por el ruido que generan sus circuitos de entrada, en particular el amplificador de radiofrecuencia y el mezclador. La sensibilidad viene asimismo expresada por el factor de ruido en el Cuadro 3.3–1, que debe ser lo más reducido posible. La relación entre la sensibilidad y el factor de ruido para el mismo receptor lleva consigo la banda de paso del receptor.

Cuando se conecta un receptor a una antena, junto con su propio ruido internamente generado, se añaden ruidos naturales de origen externo como el ruido atmosférico, galáctico y solar, además de ruidos artificiales como la interferencia industrial y la radiación producida por equipo electrónico y transmisores en general. El proyectista de una estación de comprobación técnica tiene por consiguiente que seleccionar el receptor desde el punto de vista de su sensibilidad, de acuerdo con los niveles de ruido medidos.

Debe señalarse que un receptor con sensibilidad muy elevada tendría un comportamiento deficiente en lo que respecta a la linealidad, es decir, la intermodulación y el bloqueo. El bloqueo caracteriza la degradación de la sensibilidad de un receptor y puede ser causado sólo por una sola señal no deseada situada en la proximidad de la portadora deseada y fuera de la banda de paso de frecuencia intermedia del receptor.

Debido a ello, los receptores de comprobación técnica normalmente incluyen preamplificadores conmutables o de ganancia programable. De esta forma, el receptor puede funcionar en modo de alta sensibilidad (con el preamplificador activado, en modo "on") o en modo de alta linealidad/baja distorsión (con el preamplificador desactivado, en modo "off").

Se especificarán o investigarán además otras características como las siguientes:

– anchuras de banda de los filtros de frecuencia intermedia;
– tipos de demodulación necesarios;
– eficacia del control automático de ganancia;
– eficacia del sistema de sintonía automática;
– respuesta de frecuencia de los circuitos que procesan las señales demoduladas;
– precisión y legibilidad de las pantallas;
– variaciones de las características dependiendo de la temperatura.

Normalmente se utilizan dos tipos de receptores en la gama de frecuencias de 9 kHz a 3 000 MHz, uno para las frecuencias de hasta 30 MHz y otro de 20 a 3 000 MHz. La gama de frecuencias de algunos receptores entre 20 MHz y 3 000 MHz puede ampliarse para disponer de cobertura en la parte inferior de la banda en ondas centimétricas. Si la gama de frecuencias cubiertas debe ser ampliada (por ejemplo, hasta 40 GHz), puede ser necesario equipo adicional. Al seleccionar los receptores deben tenerse en cuenta los tipos de modulación sujetos a comprobación técnica , tales como MA, CW, BLU, BLI, MDF y MF, debiendo preverse la recepción de dichas emisiones.

A los receptores de comprobación técnica pueden exigirse todas las cualidades que cabe esperar de los receptores utilizados en una estación receptora importante, añadiendo en este caso una gran precisión en la determinación de frecuencia (mejor o igual que 1 Hz), una rápida sintonización y un mínimo de conmutación de bandas.

Se ha de preparar también la conexión de unidades adicionales: unidades de manipulación de radioteleimpresores, osciloscopios, adaptadores panorámicos, etc. La salida de frecuencia intermedia de los receptores debe obtenerse en baja impedancia a través de etapas separadoras. Para obtener estabilidad de la alta frecuencia a largo plazo conviene tener una entrada para un patrón de frecuencia externo (véase el

punto 3.3.4). También se necesita prever la inserción de un atenuador a la entrada del receptor para eliminar las frecuencias espurias producidas por señales de alto nivel que saturan las etapas de entrada del receptor. Deben asimismo proporcionarse interfaces para control remoto y salida de los datos.

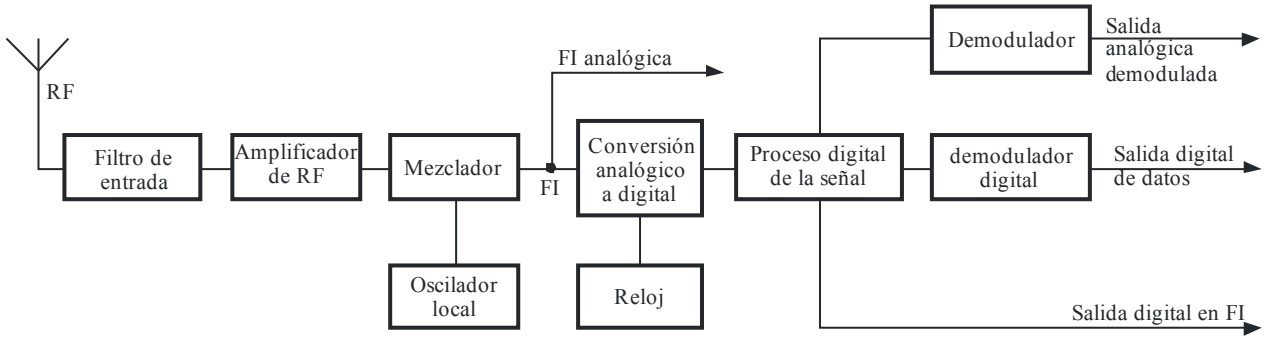
3.3.3 Receptores digitales

La aparición de chips de procesamiento digital de señal (DSP) de alta velocidad y coste reducido y de conversores de analógico a digital (A/D) de alto margen dinámico ha posibilitado el diseño de receptores de alta calidad de funcionamiento en los que se utilizan circuitos digitales en sustitución de los circuitos analógicos. Estos "receptores digitales" ofrecen un comportamiento perfeccionado en lo que respecta a la conversión de frecuencia, filtrado y demodulación, lo que da lugar a una mejor selectividad, estabilidad y control automático de la ganancia. Además, los receptores digitales ofrecen funciones tales como la compensación adaptable de la interferencia y el reconocimiento y reforzamiento de la voz que no se encuentran en los receptores analógicos. Estas funciones son muy importantes, sobre todo cuando se intenta clasificar e identificar señales específicas en un entorno congestionado de señales. Merced al empleo de circuitos digitales y los algoritmos lógicos asociados, las características de estos receptores no varían con respecto al tiempo y a la temperatura. Una de las características más notables de los receptores digitales es su mayor flexibilidad, ejemplo de la cual es la capacidad del receptor digital para admitir los formatos de modulación complejos utilizados corrientemente en enlaces celulares y de control de alta calidad de funcionamiento. Puede conseguirse una anchura de banda adicional en FI, otros modos de demodulación o nuevas funciones en un circuito DSP mediante cambios en el soporte lógico, en lugar de las costosas sustituciones de equipo que necesitan los receptores analógicos. Mediante procesamiento digital pueden sintetizarse filtros que proporcionen unos factores de conformación de un filtrado de corte muy nítido, al tiempo que mantienen una respuesta muy plana en amplitud y lineal en la fase en toda la banda de paso deseada. Este proceso reduce al mínimo la distorsión de señal que usualmente introducen los filtros analógicos. También es posible generar filtros de banda muy estrecha (menos de 50 Hz) que permitan la medición directa de los componentes no esenciales de la portadora de transmisión, como es el zumbido debido a líneas de energía.

En la Fig. 3.3–2 se ilustran los elementos básicos de un receptor digital: el sintonizador de RF, el digitalizador de FI, el procesador de señal y el módulo de reconstrucción de señal analógica.

FIGURA 3.3–2

Diagrama de bloques típico de un receptor digital



Spectrum-3.3-02

El primer paso importante del tratamiento en un receptor digital es la conversión a formato digital de la señal RF deseada. Este proceso se realiza por la combinación del sintonizador RF y el digitalizador de FI. El sintonizador de RF, que incluye la preselección analógica, traduce la porción deseada del espectro de RF a una banda ancha o de FI previa para el tratamiento por el digitalizador de FI. Este digitalizador utiliza un conversor analógico a digital (A/D) y otros circuitos para digitalizar la FI procedente del sintonizador de RF.

La señal digitalizada resultante se utiliza por el procesador de señal para realizar funciones tales como el filtrado, sintonización fina y demodulación. La salida digital procedente del módulo se ofrece luego para su tratamiento y/o registro posterior. El módulo de reconstrucción de la señal analógica convierte las salidas digitales a analógicas para la supervisión por el operador o el procesamiento ulterior.

Las características del receptor, que se enumeran en el punto 3.3.2, se aplican a los receptores digitales. Los receptores de comprobación técnica de las emisiones conformes con las Recomendaciones del UIT–R deben proporcionar las siguientes funciones:

– exploración de gamas de frecuencias predefinidas;
– exploración de memoria de varios cientos de canales;
– comprobación técnica de audio de transmisiones MF, MA, CW, BLU, BLI, MDA, MDF, MDP, IQ y de impulsos;
– identificación;
– almacenamiento de valores medidos para uso posterior o telecarga.

El procesamiento de estas diferentes funciones para las diversas señales disponibles, con relación señal/ruido óptima, exige un gran número de anchuras de banda de frecuencia intermedia.

Los modernos receptores digitales de comprobación técnica utilizan una unidad de visualización y de control, que suele ser un PC con soporte lógico, que proporciona un "panel de control virtual". El receptor tiene una interfaz remota, que incluye una LAN (Ethernet) que permite el funcionamiento con control local y remoto. Además, el concepto operacional de un receptor de comprobación técnica debe satisfacer todas las demandas exigidas a un receptor de medición de frecuencia y del desplazamiento de frecuencia, intensidad de campo, modulación, anchura de banda y ocupación del espectro. Para la ocupación del espectro, el receptor tiene que explorar la gama de frecuencia de interés con control digital y tiene que visualizar el espectro correspondiente.

Los receptores digitales pueden organizarse por separado, pero a menudo están integrados en el sistema de medición y procesamiento descrito en el punto 3.6.2. Los receptores incluyen cierto número de interfaces tales como salida basada en I/Q para radiogoniometría, salida de frecuencia intermedia de banda amplia para visualización externa en formato panorámico, salida para altavoz exterior, zócalo para auriculares.

Con la ayuda de un conversor reductor digital (DDC), la señal seleccionada se mezcla y pasa a banda base para su posterior procesado (demodulación, decodificación, identificación, medición de los parámetros de la modulación). Mediante un banco de conversores reductores digitales en paralelo (por ejemplo, implementado con tecnologías FPGA, DSP o ASIC) pueden mezclarse y procesarse en paralelo muchas señales. Cada conversor reductor digital puede sintonizarse en la gama de frecuencias cubiertas por la frecuencia intermedia de banda amplia y trabajar como un receptor virtual. Esta tecnología resulta especialmente útil para procesar señales que hayan sido registradas en una frecuencia intermedia digital de banda ancha, mediante la reproducción de la frecuencia intermedia digital en el receptor de banda ancha y utilizando el conversor reductor digital para seleccionar las señales que se desean procesar.

Esta técnica de procesamiento permite detectar y analizar transmisiones de corta duración, tales como señales de salto de frecuencia. Las ráfagas de los transmisores de salto de frecuencia se reciben en el receptor de banda ancha (en directo o reproducidas) y se detectan mediante un algoritmo de detección automática de ráfagas. Mediante conversores reductores digitales los saltos se mezclan y reducen a la banda de base para ser analizados (longitud exacta, anchura de banda, parámetros de modulación). Un proceso de evaluación que analiza la información medida de todas las ráfagas detectadas permite determinar los diferentes tipos de ráfagas, las velocidades de salto y los conjuntos de saltos (conjunto de frecuencias) de los transmisores recibidos. Este análisis estadístico proporciona información sobre los escenarios de uso de los transmisores de salto de frecuencia, como son el número de transmisores activos y los métodos de comunicación utilizados.

3.3.4 Sintetizadores de frecuencia para los receptores

Uno de los componentes más esenciales del receptor es el sintetizador de frecuencia. La finalidad principal del sintetizador de frecuencia es ofrecer una fuente normalizada de energía de radiofrecuencia de la cual se conocen exactamente las características de frecuencia, de nivel de potencia y de modulación. La precisión requerida de una frecuencia utilizada para controlar y comprobar los modernos sistemas de recepción se está haciendo cada vez más rigurosa, por cuya razón el sintetizador debe tener la máxima precisión y estabilidad posible. Por consiguiente, la mayoría de las estaciones de comprobación técnica de las emisiones tienen un sintetizador de frecuencia que cubre una amplia gama de frecuencias con muy alta precisión.

3.3.5 Especificaciones típicas de receptores de comprobación técnica

Los receptores empleados para la comprobación técnica deberían en general cumplir las especificaciones de los receptores en bandas miriamétricas, kilométricas y decamétricas y en bandas métricas y decimétricas incluidas en el Cuadro 3.3–1. Este cuadro es aplicable a receptores analógicos y digitales. Dichas especificaciones deberían considerarse directrices generales para seleccionar un equipo con una buena calidad de funcionamiento para las tareas de comprobación técnica. Para determinadas aplicaciones pueden encontrarse en el mercado equipos más sencillos que podrían ser suficientes para la aplicación deseada.

Algunos parámetros del receptor incluidos en el Cuadro 3.3–1, tales como interceptación de tercer orden, factor de ruido y parámetros del filtro, son importantes y tienen tal influencia directa sobre la adecuación de un receptor a determinadas tareas de comprobación técnica que sus especificaciones y procedimientos de medida se incluyen en Recomendaciones del UIT–R. Los resultados de las mediciones dependen notablemente de los procedimientos de prueba utilizados, permitiendo los procedimientos de prueba normalizados una comparación sencilla y más objetiva entre productos de distintos fabricantes. La velocidad de exploración, descrita en la Recomendación UIT–R SM.1839 y necesaria para determinadas mediciones, es en gran medida función del objetivo y aplicación de la medición; por ejemplo, la velocidad de exploración del receptor necesaria para detectar la presencia de una ráfaga de señal de un único evento es mucho mayor que la exploración del receptor destinada a medir algunos parámetros o características de la señal.

Las especificaciones incluidas en el Cuadro 3.3–1 representan la calidad de funcionamiento de un buen receptor de comprobación técnica comercialmente disponible. En el cuadro se describen especificaciones “típicas”, no “mínimas” ni “de la mejor calidad posible”. Las Administraciones deben tener en cuenta sus propias necesidades a la hora de especificar la calidad de funcionamiento del equipo, utilizando dicho cuadro como orientación. La calidad de funcionamiento de un receptor destinado a fines distintos a los de receptor de comprobación técnica del espectro de propósito general puede hacer hincapié en la mejora de algunas especificaciones y una cierta relajación en otras, en función de cuál sea su objetivo.

CUADRO 3.3–1

Especificaciones típicas para receptores de comprobación técnica de propósito general

Función	Ondas miriamétricas, kilométricas y hectométricas	Ondas métricas y decimétricas
Gama de frecuencias	9 kHz a 30 MHz	20 MHz a 3 000 MHz
Resolución de sintonía	≤ 1 Hz	≤ 10 Hz
Error de sintonía	≤ 1 ppm, **o** ≤ 0,01 ppm si se utiliza posicionamiento global por satélite [1] como referencia externa	≤ 0,1 ppm, o ≤ 0,001 ppm si se utiliza posicionamiento global por satélite [1] como referencia externa
Tiempo de estabilización del sintetizador	≤ 10 ms	≤ 5 ms
Entrada (entrada de antena) ROE	50 Ω, nominal ≤ 3	50 Ω, nominal ≤ 2,5
Preselección (los receptores altamente lineales pueden cumplir las especificaciones de intermodulación sin preselección)	Conjunto de filtros de banda de suboctava o filtro de seguimiento	Conjunto de filtros de banda de suboctava o filtro de seguimiento
Interceptación de tercer orden	≥ 20 dBm (> 3 MHz)(1)	≥ 10 dBm(1)
Interceptación de segundo orden	≥ 60 dBm (> 3 MHz)	≥ 40 dBm
Factor de ruido	≤ 15 dB (> 2 MHz)(2)	≤ 12 dB(2)
Ruido de fase del oscilador local	Véase más abajo	Véase más abajo
Rechazo de FI	≥ 80 dB	≥ 80 dB
Rechazo de imagen	≥ 80 dB	≥ 80 dB
Anchuras de banda en FI (–6 dB)	Filtros internos o externos, preferentemente digitales, de 0,1 a al menos 10 kHz (3)	Filtros internos, externos, preferentemente digitales, de 1 kHz a al menos 300 kHz (3)
Selectividad 60 a 6 dB (Factor de forma)	2:1(3)	2:1(3)
Modos de detección (en los receptores digitales, la demodulación puede efectuarse en DSP interno o externo)	MA, CW, LSB, USB	MA, MF, CW, LSB, USB
Margen de CAG (en los receptores digitales, puede introducirse parcialmente en DSP interno o externo)	≥ 120 dB	≥ 120 dB
Salidas – FI	Salida FI digital	Salida FI digital
Audio	0 dBm, 600 Ω, o flujo digital de audio y clavija de auriculares	0 dBm, 600 Ω, o flujo digital de audio y clavija de auriculares
Monitor de FI	Para monitor de FI externo , o flujo digital de datos	Para monitor de FI externo , o flujo digital de datos
Control remoto	LAN Ethernet, o GPIB, o RS–232	LAN Ethernet, o GPIB, o RS–232
Espectro de FI (puede hacerse en DSP)	Incorporado o externo, procesamiento FFT: renovación ≥ 10/s	Incorporado o externo, procesamiento FFT: renovación ≥ 10/s
Espectro de RF (puede hacerse en DSP)	Incorporado o externo, renovación ≥ 10/s	Incorporado o externo, renovación ≥ 10/s
Imagen del espectro de RF y FI	Por control local o remoto	Por control local o remoto
Compatibilidad electromagnética	CEI 61000–4–2, –3, –4 CISPR 11, grupo 1, clase B	CEI 61000–4–2, –3, –4 CISPR 11, grupo 1, clase B
Margen de temperaturas de funcionamiento	0 a 45° C	0 a 45° C
Humedad relativa	95% sin condensación	95% sin condensación
Vibración	CEI 68–2–6	CEI 68–2–6

(1) Procedimientos de medición conformes con la Recomendación UIT–R SM.1837.
(2) Procedimientos de medición conformes con la Recomendación ITU–R SM.1838.
(3) Procedimientos de medición conformes con la Recomendación ITU–R SM.1836.

Ruido de fase

El desempeño de un receptor en términos de ruido de fase afecta directamente a la capacidad de resolución de señales muy próximas entre sí de distintas amplitudes. También puede ser un factor que impida una demodulación precisa. El ruido de fase presente en un receptor modula las señales recibidas aumentando su anchura de banda. Dos señales adyacentes que no tengan espectros solapados en la entrada del receptor pueden interferirse mutuamente en el receptor tras ser remoduladas por el ruido de fase del mismo.

El ruido de fase es multiplicativo y, por tanto, se especifica como densidad de ruido relativa a una portadora (dBc/Hz), de forma que cuanto mayor sea la señal, mayor será la potencia del ruido de fase. El mayor efecto del ruido de fase se produce en señales muy próximas entre sí y de potencias diferentes.

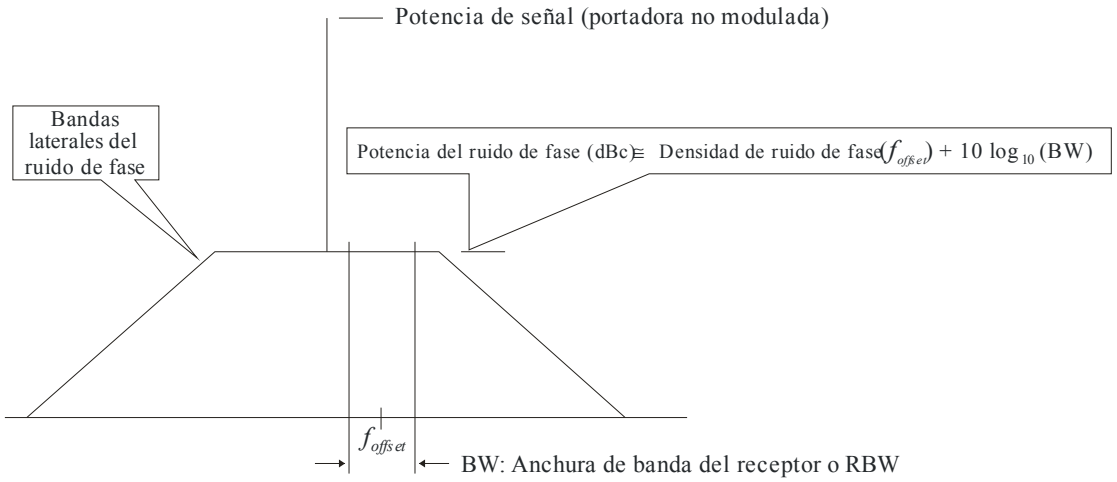
La señales de más nivel tendrán una mayor potencia en las bandas laterales del ruido de fase y, por tanto, tendrán un efecto superior sobre la detección o demodulación de una señal adyacente más débil que a la inversa. Para dichas señales de más nivel, el ruido de fase limita el margen dinámico del receptor.

La densidad del ruido de fase se especifica normalmente para valores de desplazamiento de frecuencia de 10 kHz o 100 kHz, siendo generalmente mayor para desplazamientos de frecuencia menores. Por ello, el requisito del ruido de fase está principalmente determinado por los tipos de señales objeto de comprobación técnica. Los requisitos del ruido de fase serán mucho mayores para señales de banda estrecha que para señales de banda ancha, por lo que las especificaciones del receptor estarán básicamente determinadas por la portadora (o subportadora) más estrecha objeto de comprobación técnica.

En el supuesto de que el espectro del ruido de fase sea relativamente plano en toda la anchura de banda (BW), el margen dinámico en las proximidades de una señal amplia puede estimarse tal como se muestra en la Fig. 3.3–3.

FIGURA 3.3–3

Estimación del margen dinámico y de la potencia de ruido de fase



Ejemplo de aplicación de la ecuación de la Fig. 3.3–3:

Anchura de banda o RBW	Ruido de fase	f_{offset}	Potencia de ruido de fase
1 kHz	–100 dBc/Hz	10 kHz	–70 dBc

El desplazamiento de frecuencia (f_{offset}) y la anchura de banda requerida afectan a la potencia del ruido de fase. Las aplicaciones en ondas decamétricas pueden requerir menor anchura de banda, mientras ésta puede ser mayor para las aplicaciones en ondas decimétricas.

Referencias

Recomendaciones del UIT–R:

NOTA – Se insta al lector a que utilice la última edición de cada una de las Recomendaciones referenciadas.

Recomendación UIT–R SM.331 – Ruido y sensibilidad de los receptores.

Recomendación UIT–R SM.332 – Selectividad de los receptores.

Recomendación UIT–R SM.1836 – Procedimiento de prueba para medir las propiedades del filtro de IF de los receptores de comprobación técnica radioeléctrica.

Recomendación UIT–R SM.1837 – Procedimiento de prueba para medir el nivel del punto de intercepción de 3er orden (IP3) de los receptores de comprobación técnica radioeléctrica.

Recomendación UIT–R SM.1838 – Procedimiento de prueba para medir el factor de ruido de los receptores de comprobación técnica radioeléctrica.

Recomendación UIT–R SM.1839 – Procedimiento de prueba para medir la velocidad de exploración de los receptores de comprobación técnica radioeléctrica.

Recomendación UIT–R SM.1840 – Procedimiento de prueba para medir la sensibilidad de los receptores de comprobación técnica radioeléctrica que utilizan señales con modulación analógica.

Informe UIT–R SM.2125 – Parámetros y procedimientos de medición de las estaciones y receptores de comprobación técnica en las bandas de ondas decamétricas/métricas/decimétricas

3.4 Radiogoniometría

3.4.1 Consideraciones generales

La identificación de una estación transmisora desconocida puede facilitarse si es posible determinar la localización del transmisor por medio de triangulación o localización por una sola estación (SSL, *single station location*) utilizando equipo radiogoniométrico. Una determinación más precisa de la localización del transmisor requiere tomar marcaciones desde varias estaciones radiogoniométricas ubicadas en localizaciones geográficas adecuadas. En el caso ideal, puede obtenerse una "marcación cruzada" o un "punto de posición" (es decir, el punto en que se cortan las líneas de marcación) cuando trabajan al unísono como mínimo dos estaciones radiogoniométricas, no necesariamente en el mismo país. Un operador experimentado que dispone de una estación de comprobación técnica con posibilidad de tomar marcaciones, obtendrá información que le permita identificar las transmisiones con un grado de confianza mayor.

La complejidad del equipo de radiogoniometría depende de la precisión requerida y de las condiciones locales, y se trata con más detalle en la sección 4.7. Dado que la antena de radiogoniometría debe emplazarse en un lugar despejado de cualesquiera edificios, antenas, líneas telefónicas y de energía y otros elementos, debe por lo general instalarse a alguna distancia del resto de la estación de comprobación técnica, o tal vez en una ubicación aparte en la que se haga funcionar por control remoto.

La precisión de las marcaciones depende de los factores siguientes:

– abertura de la antena, descrita en el punto 3.4.2;
– configuración de la antena, incluidos los diversos elementos de la misma, su organización según las bandas de frecuencia, la directividad de dichos elementos y otros factores;
– tipo de equipo radiogoniométrico;
– naturaleza del emplazamiento;
– banda de frecuencia;

– intensidad de la señal y relación señal/ruido;
– tiempo de integración;
– condiciones de propagación;
– magnitud de la interferencia.

En la gama de frecuencias en la que existe propagación por onda ionosférica, que suele ser 1–30 MHz, un sistema SSL permite determinar la posición geográfica de un transmisor con un solo radiogoniómetro que mida la elevación y el acimut del ángulo de llegada. El procesamiento de los datos suministrados por el radiogoniómetro (acimut, elevación, posición), asociado con las predicciones ionosféricas o preferentemente con las mediciones ionosféricas en tiempo real procedentes de una sonda, permite estimar la distancia del transmisor. El concepto de SSL permite, pues, llevar a cabo la misión de localización cuando por motivos geográficos, de tiempos y disponibilidad no puede instalarse un sistema completo de localización radiogoniométrica por triangulación o no puede recibirse la señal de interés en múltiples estaciones.

Véanse para más información la Recomendación UIT–R SM.854, Radiogoniometría y determinación de posición en las estaciones de comprobación técnica, y la sección 4.7.

3.4.2 Antenas

La antena de radiogoniometría es uno de los componentes más importantes del equipo de radiogoniometría debido a que define en gran medida la precisión radiogoniométrica. La abertura de la red de antenas (D/λ; D = diámetro de la red de antenas, λ = longitud de onda de la señal recibida) desempeña un papel importante para determinar la precisión. Las antenas de radiogoniometría con $D/\lambda > 1$, denominadas antenas de gran abertura, superan los problemas multitrayecto y otras fuentes de error, ofreciendo una relación señal/ruido superior y menores errores radiogoniométricos que las antenas de pequeña abertura ($D/\lambda < 0{,}5$). No todos los métodos de radiogoniometría permiten el uso de antenas de gran abertura, pero cuando pueden utilizarse ofrecen los resultados más exactos.

Cada antena de radiogoniometría consta de un número de elementos de antena (3 como mínimo). Según el método de radiogoniometría son posibles diversas configuraciones de la red de antenas de radiogoniometría. Las antenas de radiogoniometría de mayor abertura tienden a tener más elementos de antena para cubrirla abertura y evitar ambigüedades; las probabilidades de error introducidas por el ruido aleatorio tienden a desminuir con el inverso de la raíz cuadrada del número de elementos. En la gama de ondas decamétricas, son comunes las redes lineales de antenas y en forma de "L" o "X", y en la gama de ondas métricas/decimétricas se utilizan principalmente redes circulares. El método de radiogoniometría tiene también influencia en que una amplia gama de frecuencias pueda ser cubierta sólo por una red de antenas o que la gama haya de dividirse en cierto número de subredes de antenas para distintas subgamas.

Generalmente ha de discriminarse entre antenas de radiogoniometría para aplicaciones fijas o móviles. El tipo de elementos de antena depende de la gama de frecuencias y de la aplicación; en la gama de ondas decamétricas se utilizan redes de monopolos o de elementos de cuadros cruzados para los sistemas fijos, mientras que las antenas móviles utilizan sea cuadros o elementos de ferrita (véase el punto 3.2.3.1). En la gama de ondas métricas/decimétricas se utilizan sobre todo redes de dipolos o en abanico (véase el punto 3.2.4.1).

3.4.3 Equipo

El equipo de radiogoniometría puede estar integrado con equipo de medición en una estación de comprobación técnica como se describe en el punto 3.6.2, o puede estar compuesto por unidades separadas. En relación con las unidades portátiles véase el punto 3.2.7. La gama de frecuencias del equipo de radiogoniometría no sólo viene determinada por la antena de radiogoniometría, sino también por los receptores, que forman parte del equipo. En la práctica, hay equipos de radiogoniometría de ondas hectométricas y decamétricas (por ejemplo de 0,3 a 30 MHz) y equipos de radiogoniometría de ondas métricas y decimétricas (por ejemplo, de 20 a 3 000 MHz). En algunos casos, el equipo en ondas métricas y decimétricas puede ofrecer cobertura de la parte inferior de la banda en ondas centimétricas.

El número de receptores puede variar de 1 a n, siendo n el número de elementos, que forman una red de antenas de radiogoniometría, y depende también del método radiogoniométrico. Múltiples sistemas de receptor exigen menos tiempo de integración y/o menor relación señal/ruido para una precisión dada, por lo que su tiempo de respuesta es menor que los sistemas monocanal. Si se utiliza más de un receptor, todos los receptores tienen que ser sintonizados por un oscilador común. En los modernos receptores, la frecuencia intermedia se procesa en forma digital. Una característica muy importante es la selectividad del receptor para evitar la interacción mutua de dos señales adyacentes. Al menos uno de los receptores debe ofrecer la posibilidad de demodular la modulación de la señal recibida.

Algunos métodos radiogoniométricos requieren una calibración de los receptores distribución en radiofrecuencia y antenas en ciertos intervalos de tiempo. A tal fin se inyectará una señal definida en paralelo en los trayectos de recepción, y tras medir la amplitud y la fase para cada trayecto se adoptan pasos correctivos para restablecer características idénticas en cada canal si es necesario. Una característica muy importante es la posibilidad de control remoto del equipo en cualquier distancia. Son comunes las interfaces para RS–232, RDSI, LAN, WAN, y enlaces telefónicos celulares.

3.4.4 Número de receptores

En esta cláusula se comparan sistemas de radiogoniometría que tienen distinto número de canales de recepción, valorándose las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos. Un sistema de radiogoniometría puede tener un receptor de canal único, de dos canales, de tres canales o de tantos canales como elementos de antena. Los sistemas con al menos dos canales de recepción pero menos canales que número de antenas se denominan sistemas multicanales. Los sistemas con el mismo número de canales del receptor que de antenas se denominan sistema de *N*–Canales, siendo *N* el número de canales del receptor y de antenas

3.4.4.1 Sistemas unicanal

Ventajas	Inconvenientes
– Sólo requiere un canal en el receptor – Menos cableado desde la antena de radiogoniometría al equipo – No se requiere adaptación/calibrado de fase – En el caso de radiogoniometría unicanal mediante *interferómetro* utilizando circuitos de multiplexación, pueden realizarse medidas de fase precisas	– La conmutación y tiempo de muestreo asociados exigen un tiempo de medición sensiblemente más prolongado que los sistemas de radiogoniometría con más de un canal – Es sensible a variaciones rápidas de fase de la señal, lo cual puede dar lugar a datos erróneos y/o tiempos de integración largos – Si se utilizan circuitos multiplexados, la conmutación de antena es compleja

Los sistemas de radiogoniometría unicanal pueden dividirse en dos grupos:

– Sistemas de radiogoniometría unicanal sencillos, en los que cada elemento de antena se muestrea secuencialmente con un canal del receptor, y

– Sistemas unicanal de interferómetros o multiplexados, en los que el elemento de antena de referencia se muestrea conjuntamente con cada uno de los demás elementos de antena y ambas señales se combinan y envían a un canal del receptor.

En cada uno de los casos, después de cada conmutación el filtro de IF del receptor debe poder resintonizarse antes de muestrear la tensión. El tiempo de muestreo total es función del tiempo de resintonización del filtro, que está ligado a su anchura de banda y al número de elementos de antena. El tiempo de muestreo es sustancialmente mayor en sistemas unicanal que en sistemas con más de un canal receptor.

En un sistema unicanal, el estado de onda de la señal puede cambiar durante el periodo de muestreo debido a cambios en la modulación interna de la señal o a efectos del medio de propagación, tales como el desvanecimiento, los trayectos múltiples y las reflexiones que aparecen durante el muestreo secuencial de los elementos del sistema de antenas. Estos cambios en el estado de onda durante el proceso de conmutación secuencial, pueden introducir errores en los sistemas unicanal dado que pueden ser indistinguibles de

cambios en la señal debidos a que las antenas muestreadas secuencialmente tengan distintos diagramas de radicación o diferentes orientaciones de sus respectivos lóbulos principales. Un sistema unicanal sólo soporta los errores introducidos por este mecanismo durante las mediciones realizadas en periodos suficientemente prolongados como para que dichos efectos se compensen. Cuando no exista un tiempo suficientemente largo como para que se produzca dicha compensación, como por ejemplo, en caso de señales de corta duración, los sistemas unicanal pueden resultar confusos. No obstante, los sistemas de radiogoniometría unicanal pueden construirse de forma que cumplan el requisito de un tiempo de respuesta de 10 ms.

3.4.4.1.1 Sistemas de radiogoniometría unicanal sencillos

Los sistemas de radiogoniometría unicanal sencillos muestrean secuencialmente cada antena. A diferencia de los sistemas de radiogoniometría unicanal por interferometría que utilizan circuitos de multiplexación, solo se mide y procesa la amplitud. No se mide la fase. Los sistemas que no utilizan la información de fase de la señal recibida, son inherentemente menos exactos que los sistemas que utilizan toda la información disponible de la señal recibida.

3.4.4.1.2 Sistemas de radiogoniometría unicanal multiplexada o interferómetros

Los sistemas de radiogoniometría unicanal multiplexada o interferómetros utilizan una técnica de multiplexación en cuadratura. Dichos sistemas permiten medir la amplitud y la fase, ya que el elemento de referencia de fase siempre se mide junto con todos los demás elementos de antena.

Durante el proceso de medición, en el que todos los elementos de antena se muestrean sucesivamente, la amplitud de la señal puede cambiar debido a cambios en la modulación interna de la señal o por efectos del medio de propagación, tales como desvanecimiento, trayectos múltiples y reflexiones. Para evitar que disminuya la precisión, es necesaria una promediación adicional. Además, la diferencia de amplitud entre dos elementos de antena no puede medirse simultáneamente y sólo puede obtenerse mediante una promediación temporal, perdiéndose información que sería de utilidad en sistemas que utilicen elementos de antena direccionales.

Tras cada conmutación entre elementos de antena y en el multiplexor en cuadratura, el filtro de FI del receptor debe volver sintonizarse antes de muestrear la tensión. El tiempo de muestreo total depende del tiempo de resintonización del filtro, que está ligado a su anchura de banda y al número de elementos de antena. Dicho tiempo de muestreo es sensiblemente más largo en los sistemas unicanal tipo interferómetro que en los sistemas unicanal sencillos.

3.4.4.2 Sistemas multicanal (un canal de referencia y uno o más canales de muestreo conmutados)

Ventajas	Inconvenientes
– Requiere menos tiempo para obtener un resultado que un radiogoniómetro de un único canal, es decir, un tiempo de respuesta menor. – Maneja con precisión cambios del estado de la onda debido a condiciones de propagación o modulación. – Consigue fácilmente la concordancia entre fase y/o amplitud mediante calibración o mediante un método de promediación doble. – Mide simultáneamente la diferencia de amplitud entre canales.	– Se necesitan dos o más canales en el receptor; el cableado es más complejo. – La conmutación y el tiempo de muestreo asociados exigen un tiempo de medición más prolongado que los sistemas de radiogoniometría con tantos canales receptores como antenas. – Puede utilizarse la calibración regular para adaptarse a ambos canales del receptor o, en el caso de sistemas de canal dual, un método de doble premediación.

Los sistemas multicanal tienen más de un canal receptor, pero menos canales receptores que antenas; constan de un canal de referencia y de uno o más canales de muestreo conmutables. Sólo disponen de un oscilador local ya que la fuente de oscilación es común para todos los canales. No es necesaria una adaptación total entre receptores y filtros con exactamente la misma forma, sino que pueden utilizarse receptores no adaptados que tengan la misma fuente de oscilación. Estos receptores permiten realizar la detección

coherente de las señales en los dos canales, y se calibran sobre todo el trayecto de RF, desde las antenas hasta los convertidores analógico / digitales para cualquier retardo de fase, diferencias en la forma de los filtros, etc., teniendo en cuenta las diferencias entre las líneas de alimentación existentes entre los elementos de radiogoniometría y los circuitos de muestreo. Esta calibración es asimismo la base de las pruebas y los procedimientos de diagnóstico integrados de dicho sistema.

A fin de evitar la adaptación de elementos y/o la calibración de la fuente y simplificar la mediciones, pero sin calibración extremo a extremo ni pruebas integradas, en el caso de dos canales receptores puede emplearse un método de doble promediación, en el que se mide la amplitud y diferencia de fase entre dos canales, invirtiéndose la conexión a la antena mediante el conmutador y realizándose una medición de amplitud y fase adicional; el resultado se promedia, cancelándose cualquier desadaptación de amplitud y de fase sin realizar una calibración independientemente. Un inconveniente de este método de promediación doble es el mayor tiempo empleado en la medida.

Dado que los sistemas analizados tienen una antena y un canal receptor de referencia que puede servir como referencia para la fase, la diferencia de fase entre los canales muestreado y de referencia puede medirse con una precisión de décima de grado o menos. La diferencia de amplitud entre los canales de referencia y muestreado puede también medirse de forma precisa y simultánea, permitiendo que el sistema identifique cambios de amplitud debidos a diferencias de directividad de las antenas, cosa que los sistemas unicanal no pueden hacer sin realizar una promediación durante largos periodos de tiempo para compensar los efectos de la modulación y propagación.

La medición de tensión en cada antena muestreada se compara con la tensión en la antena de referencia medida exactamente en el mismo momento. Las mediciones sobre el canal muestreado se normalizan respecto al canal de referencia; la tensión en el canal muestreado se divide por la tensión en el canal de referencia.

Esta normalización reduce los efectos de los cambios de propagación y de modulación que, tal como se ha señalado anteriormente en relación con los sistemas unicanal, introducen errores ya que los factores de la propagación y la profundidad de la modulación afectan igualmente a cada antena, en condiciones de recepción de onda plana (situación generalmente supuesta). Esta normalización elimina todos los factores externos que puedan afectar a la precisión de la medición de fase y amplitud.

3.4.4.3 Sistemas de *N*–canales (*N* = número de canales del receptor = número de antenas)

Ventajas	Inconvenientes
– Mediciones radiogoniométricas más rápidas que otros métodos – No se necesita conmutación de antenas	– Se necesitan múltiples canales de recepción; el cableado es más complejo – La necesidad de calibración de fase y amplitud aumenta la complejidad del sistema

Los sistemas de *N* canales con un canal receptor para cada antena son los más rápidos y los que ofrecen una mejor calidad de funcionamiento, puesto que la señal puede ser muestreada simultáneamente por todos los elementos de antena en lugar de realizar un muestreo secuencial entre las antenas, como ocurre en los sistemas con menos canales receptores. Todos los canales receptores tienen un oscilador local común.

Estos sistemas son más caros que los que tienen menos canales receptores, en función del número de canales receptores y de la necesidad de adaptación de los canales o de calibración en tiempo real entre ellos. Los canales no necesitan estar adaptados de forma exacta, pudiendo ser simplemente calibrados en tiempo real

En los sistemas de *N* canales se mide la tensión y la fase en cada elemento en relación con un elemento elegido como referencia, de forma que tienen todas las ventajas de los sistemas analizados en el punto anterior en términos de capacidad de medición de fase y amplitud relativa al elemento de referencia.

3.4.5 Procesamiento de la marcación

El procesamiento de marcaciones puede basarse en diferentes métodos radiogoniométricos. Cada principio tiene sus ventajas e inconvenientes. Los métodos principalmente utilizados son los siguientes:

– Antena giratoria
– Doppler/pseudo Doppler
– Adcock/Watson–Watt
– Interferómetro de fase
– Interferómetro de correlación
– Resolución avanzada.

El equipo de radiogoniometría produce una marcación de más o menos precisión e indicará también el nivel de recepción de la señal al que el sistema está sintonizado. Algún equipo de radiogoniometría produce para cada marcación un valor de calidad, que también puede utilizarse para suprimir las marcaciones “salvajes” (*wild bearings*). El equipo de radiogoniometría sensible a la fase para la gama de ondas decamétricas indica también el ángulo de elevación de la señal recibida si llega como onda ionosférica.

Una característica muy importante del moderno equipo de radiogoniometría es la posibilidad de funcionar en un modo "exploración radiogoniométrica". Con esta característica, es posible explorar a través de gamas de frecuencias definidas determinando la ocupación de espectro y calculando simultáneamente las marcaciones asociadas de cualesquiera señales por encima de un umbral. Esta función de exploración radiogoniométrica se efectúa con procesamiento digital de la señal (DSP), donde se aplican técnicas FFT para subdividir el ancho de banda del receptor en muchos canales individuales o elementos FFT. La información de ocupación y la información de tensión de una técnica de procesamiento radiogoniométrico son calculadas por la FFT para cada canal individual.

Esta técnica de procesamiento hace posible interceptar transmisiones de corta duración tales como salto de frecuencias y emisiones en ráfagas. La exploración radiogoniométrica se trata e ilustra casi al final del punto 3.6.2.

3.4.6 Especificaciones típicas de los sistemas de radiogoniometría

Un sistema de radiogoniometría debe, por lo general, cumplir las especificaciones aplicables a sistemas de radiogoniometría en ondas hectométricas y decamétricas y en ondas métricas y decimétricas incluidas en los Cuadros 3.4–1 y 3.4–2 respectivamente. Dichas especificaciones deben considerarse orientaciones generales para la selección de equipos que proporcionen una buena calidad de funcionamiento y fiabilidad para las tareas de radiogoniometría. El capítulo 3 del Informe UIT–R SM.2125 proporciona información sobre la verificación de las especificaciones relativas a productos de intermodulación de segundo y tercer orden (IP2, IP3), sensibilidad, precisión angular, velocidad de exploración y duración mínima de la señal. Algunas de las especificaciones pueden variar o incluso pueden no ser aplicables, en función de los tipos de emisiones que encuentren y/o de la aplicación del radiogoniómetro. Por ejemplo, un radiogoniómetro destinado a la exploración rápida del espectro radioeléctrico debe tener la velocidad de exploración de interceptación radiogoniométrica que se muestra en el cuadro.

Sin embargo, un radiogoniómetro que solamente se utilice para radiorrecalada en un entorno móvil no necesita disponer de una velocidad de exploración rápida.

También a título de ejemplo, en caso de detección de señales de corta duración o en casos de exploración rápida del espectro, puede ser necesaria una duración de señal mínima corta (tiempo de respuesta), aunque sea aceptable una duración de señal mínima más larga en casos de radiorrecalada de un emisor en particular.

Asimismo debe señalarse la utilidad de tiempos de detección de señales más breves cuando existan efectos debidos a la propagación, tales como trayectos múltiples, que cambian rápidamente y ayudan a mitigar la interferencia, resultando en ese caso más preciso tomar numerosas muestras instantáneas en periodos breves en los que no se produzcan cambios debidos a la propagación o la interferencia, que tomar pocas muestras instantáneas de la señal sobre periodos de recopilación de datos más largos.

CUADRO 3.4–1

Especificaciones típicas para estaciones de radiogoniometría fijas y móviles en ondas hectométricas y decamétricas

Función/Calidad de funcionamiento (lista no exhaustiva de parámetros)	**Estación fija (300 kHz–30 MHz)**	**Estación móvil (1–30 MHz)**
Precisión de la radiorrecalada del sistema (probada en instalaciones de prueba al aire libre en un entorno libre de reflexiones tal como se indica en el informe UIT–R SM.2125)	Valor eficaz de 1º (*f*> 1 MHz), onda de superficie; valor eficaz de 2°/cos(elevación), onda ionosférica	Valor eficaz de 5° (*f*> 1 MHz); valor eficaz de 2° (*f*> 10 MHz), onda de superficie, sistema instalado en vehículo, prueba realizada en entorno sin reflexiones
Localización por una sola estación (SSL)	Opcional (son necesarios datos ionosféricos, véase § 4.7)	N/A[1]
Velocidad de exploración de la interceptación de radiogoniometría (véase definición en § 3.3.2 del Informe UIT–R SM.2125; aplicable a sistemas de exploración de radiogoniometría)	50 MHz/s, anchura de banda del canal de 5 kHz y ocupación del canal del 50%	50 MHz/s, anchura de banda del canal de 5 kHz y ocupación del canal del 50%
Modulaciones de la radiogoniometría	Todas	
Anchura de banda instantánea de radiogoniometría	≥ 500 kHz	
Sensibilidad de la radiogoniometría	2 μV/m (*f*> 1 MHz) referida a una anchura de banda de radiogoniometría de 250 Hz, tiempo de integración de 1 s y una precisión de valor eficaz 2°	30 μV/m (*f*> 1 MHz) referida a una anchura de banda de radiogoniometría de 250 Hz, tiempo de integración de 1 s y una precisión de valor eficaz 2°
Duración mínima de la señal (véase la definición en § 3.3.3 del Informe UIT–R SM.2125)	5 ms a 10 ms	

[1] N/A: No aplica.

NOTAS – En el Cuadro 3.3–1 se incluyen las especificaciones del error de sintonización de frecuencia, factor de ruido del receptor, punto de interceptación de 3er orden (IP3), anchura de banda de frecuencia intermedia, temperatura de almacenamiento y de funcionamiento y suministro de energía.

La precisión de la marcación mediante señales de onda ionosférica es función del coseno del ángulo de elevación de llegada, ya que conforme dicho ángulo crece el arco del círculo máximo cubierto para un ángulo de acimut dado se hace más pequeño de conformidad con el valor de cos (ºelevación), y de hecho, para una elevación de 90º, el arco del círculo máximo cubierto por un acimut dado es cero.

CUADRO 3.4–2

Especificaciones típicas para estaciones de radiogoniometría fijas y móviles en ondas métricas y decimétricas

Función/Calidad de funcionamiento (lista no exhaustiva de parámetros)	**Estación fija (20 – 3000 MHz)**	**Estación móvil (20 – 3000 MHz)**
Precisión de la radiorrecalada del sistema (probada en instalaciones de prueba al aire libre en un entorno libre de reflexiones tal como se indica en el informe UIT–R SM.2125)	Valor eficaz (r.m.s.) de 1°	Valor eficaz (r.m.s.) de 3°, sistema instalado en vehículo, prueba realizada en un entorno libre de reflexiones, antena de radiogoniometría sobre el techo, no ampliada.
Velocidad de exploración de interceptación de radiogoniometría (véase definición en § 3.3.2 del Informe UIT–R SM.2125; aplicable a sistemas de exploración de radiogoniometría)	1 GHz/s, canales de 25 kHz, ocupación del 50% de los canales	
Modulaciones de la radiogoniometría	Todas	
Anchura de banda instantánea de radiogoniometría	20 MHz	
Sensibilidad de la radiogoniometría	10 μV/m referido a una anchura de banda de radiogoniometría de 1 kHz, tiempo de integración de 1s y precisión de 2° según el Informe UIT–R SM.2125	20 μV/m referido a una anchura de banda de radiogoniometría de 1 kHz, tiempo de integración de 1s y precisión de 2° según el Informe UIT–R SM.2125
Duración mínima de la señal (véase la definición en § 3.3.3 del Informe UIT–R SM.2125)	1 ms	

NOTAS – En el Cuadro 3.3–1 se incluyen las especificaciones del error de sintonización de frecuencia, factor de ruido del receptor, interceptación de 3er orden (IP3), anchura de banda de frecuencia intermedia, temperaturas de funcionamiento y almacenamiento y nivel de potencia.

Los procedimientos de medida de la precisión de radiogoniometría utilizan señales con una relación señal a ruido > 20 dB tal como se analiza en § 4.7.

3.5 Equipo periférico y adicional

La mayoría de las modernas estaciones de comprobación técnica del espectro utilizan sistemas integrados automatizados que se describen en la sección 3.6. Estos sistemas realizan las mediciones recomendadas por la UIT de frecuencia, intensidad de campo, anchura de banda y modulación, así como las mediciones de ocupación del espectro y de radiogoniometría con equipo de medición integrado. Sin embargo, en lugar de o adicionalmente a estos sistemas integrados automáticos, también existe equipamiento adicional e independiente para efectuar estas mediciones y ayudar en la identificación. Algunos de estos equipos se tratan a continuación.

3.5.1 Equipo de medición de frecuencia

3.5.1.1 Generalidades

La frecuencia es la característica de emisión más importante que es objeto de medida por un servicio de comprobación técnica del espectro. La precisión requerida es, en buena medida, función del objetivo de la medición. Si el objetivo es verificar con rapidez la utilización del canal de banda estrecha adecuado para programas radiofónicos de voz con modulación de frecuencia, puede ser suficiente utilizar medidores de

frecuencia portables sencillos con una precisión de aproximadamente 10 Hz. Por el contrario, si se pretende verificar la conformidad de las emisiones con las Recomendaciones UIT–R o con disposiciones nacionales pertinentes, la precisión requerida puede ser muy alta.

Los instrumentos para la medición de frecuencias disponen, en general, de un patrón de cuarzo. La frecuencia de la etapa de salida del cristal es función de la temperatura ambiente y de la tensión de funcionamiento. Incluso después del periodo de caldeo, un generador de cuarzo acusa una variación continua de la frecuencia de salida. Actualmente, el orden de magnitud de dicha variación es de 10^{-8}. En aparatos de buena calidad, la variación continua de la frecuencia del cuarzo está comprendida entre 10^{-10} y 10^{-9} por día, tras un período de caldeo continuo de varias semanas.

En consecuencia, las etapas de cuarzo del aparato de medida deben compararse muy a menudo con patrones de frecuencia o controlarse mediante la emisión de una frecuencia patrón. Una alternativa a la comparación periódica consiste en enclavar permanentemente la frecuencia del cuarzo a un patrón normalizado (por ejemplo, oscilador de rubidio u oscilador gobernado por GPS) para así combinar la estabilidad a corto plazo del oscilador de cuarzo con la estabilidad a largo plazo del patrón atómico.

3.5.1.2 Patrones de frecuencia

Los generadores de cesio son uno de los tipos de generadores de frecuencia más estables en condiciones de laboratorio. Los osciladores de cesio se utilizan como referencias primarias de tiempo y frecuencia. Según el Sistema Internacional de Unidades, un segundo se define como la duración de 9.192.631.770 periodos de la radiación absorbida o emitida correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio 133, sin la presencia de perturbaciones debidas a campos externos. Los elementos de cesio normalizados comercialmente disponibles son bastante caros y, por tanto, no se utilizan en general en las estaciones de comprobación técnica.

El rubidio es un patrón secundario para tiempo y frecuencia y se calibra utilizando el patrón principal de cesio. Los dispositivos comercialmente disponibles que utilizan rubidio son menos caros que los que usan cesio. Tanto las referencias de cesio como de rubidio constituyen patrones atómicos con una precisión extremadamente elevada y excelentes características asociadas a su proceso de envejecimiento.

Los patrones basados en cristales son comparativamente baratos y hay disponibles varios tipos en función del nivel de precisión requerido. En consecuencia, los patrones de cristal de cuarzo se utilizan ampliamente en equipos de prueba y medición, así como en equipos de telecomunicaciones. El cuarzo se utiliza principalmente para la fabricación de osciladores patrones de cristal de cuarzo.

En el Cuadro 3.5–1 se muestran características típicas de algunos patrones de frecuencia.

CUADRO 3.5–1

Características típicas de algunos patrones de frecuencia

	TCXO*	**OCXO****	**GPS*****	**Rubidio**	**Cesio**
Inestabilidad a corto plazo	$< 1 \times 10^{-9}$	$< 1 \times 10^{-12}$	$< 5 \times 10^{-12}$	$< 2 \times 10^{-12}$	$< 5 \times 10^{-14}$
Inestabilidad a largo plazo	$< 2 \times 10^{-6}$	< 1 x 10–8	$< 1 \times 10^{-12}$	$< 1 \times 10^{-11}$	$< 5 \times 10^{-12}$

* TCXO = oscilador de cristal de temperatura compensada (*Temperature Compensated Crystal Oscillator*)

** OCXO = oscilador de cristal controlado por cámara termostática (*Oven Controlled Crystal Oscillator*)

*** GPS = oscilador de cristal controlado por GPS (GPS *Controlled Crystal Oscillator*)

3.5.1.3 Patrón de señales horarias y frecuencia controlado por GPS

Cada satélite del Sistema mundial de determinación de posición (GPS) transporta a bordo relojes de cesio que están sincronizados con su estación maestra. Cuando se utilizan para comparaciones de señales horarias y de frecuencia, el error de tiempo es muy inferior a 1 µs, siendo el valor medio del error de unos 10 ns. Un error de tiempo de 1 µs/día corresponde a un error de frecuencia de 10^{-11}. Para la comprobación técnica del espectro se recomienda controlar el patrón local de oscilador de cuarzo o atómico mediante un receptor GPS.

Típicamente puede lograrse una precisión de frecuencia de 5×10^{-12} (salida de 10 MHz) utilizando un patrón de rubidio controlado por GPS, sin que ello afecte a la estabilidad a corto plazo del oscilador local. En el Manual UIT Transferencia y difusión por satélite de señales horarias y frecuencias se proporciona información adicional sobre frecuencias y señales horarias.

3.5.2 Equipo de medición de intensidad de campo

La medición de la intensidad de campo se basa principalmente en la determinación de la respuesta de una antena de recepción a los campos eléctricos o magnéticos que inciden sobre ella. Dicha respuesta la detecta un receptor conectado a la antena. La respuesta al campo electromagnético debe ser analizada en lo que respecta al comportamiento tanto de la antena como del campo. La medición de la intensidad de campo se realiza utilizando una combinación de los elementos siguientes:

– una antena calibrada;

– una red de acoplamiento y/o una línea de transmisión;

– un receptor de medida o un analizador de espectro con:

  i) circuitos de atenuación y preselección;

  ii) circuitos de amplificación, situados antes del mezclador principal, y un filtro de frecuencia intermedia (conmutable), siendo recomendable utilizar filtros con una relación de anchura de banda de 60/6 dB;

  iii) un dispositivo detector y otro indicador, como por ejemplo, un dispositivo analógico o digital de medida o un conversor A/D con computador y pantalla;

– una fuente de calibrado (por ejemplo, una señal patrón de onda continua, o generador de seguimiento, un generador de impulsos o un generador de ruido aleatorio), que puede formar parte del receptor de medida o del analizador de espectro.

Estos elementos pueden combinarse en un único instrumento o en un conjunto de instrumentos, cada uno de los cuales puede realizar una o varias de las funciones requeridas. Para aplicaciones tales como la medición de diagramas de radiación de antenas o de áreas de servicio de estaciones, es habitual utilizar un medidor de campo portable que incluya todos los elementos arriba enumerados excepto la antena, aunque en algunos casos la antena es parte integral del medidor de intensidad de campo. En instalaciones móviles o fijas en las que el peso y el consumo de potencia no son tan importantes, existe una amplia gama de combinaciones, desde el típico medidor de intensidad de campo hasta unidades separadas compuestas por receptor, medidor, generador de señales patrón u otros dispositivos de calibrado, junto con un sistema de antena adecuado. Típicamente se utilizan sistemas de microprocesadores para controlar el receptor, calibrador, impresoras y/o trazadores gráficos, que también indican y almacenan los resultados de las mediciones (a menudo todas las partes están integradas en una única unidad).

Los medidores de intensidad de campo poseen las propiedades siguientes:

– alta estabilidad; debe ser posible medir durante un periodo muy prolongado sin necesidad de recalibraciones frecuentes;

– buena precisión relativa; en la práctica, las mediciones de un campo constante realizadas separadamente por dos operadores deben dar los mismos resultados;

– un extenso margen de medición (desde algunos microvoltios a varios voltios por metro);

– la indicación del aparato medidor debe ser proporcional al valor eficaz, de cresta o medio de la intensidad de campo, en función del tipo de medición.

Cuando se observan emisiones moduladas, es de gran importancia el conocimiento de la anchura de banda, las funciones estadísticas del receptor (es decir, media lineal, media logarítmica, valor de cresta, valor de cuasi cresta, raíz cuadrática media) y la constante de tiempo del medidor, como la hora de la medición de cada valor en el equipo utilizado para medidas del nivel de radiofrecuencia e intensidad de campo. Esta información está por lo general disponible en los equipos comercializados.

La anchura de banda debe ser lo suficientemente amplia para la recepción de la señal, incluidas las partes esenciales del espectro modulado. El tipo de detector debe garantizar que se mide la señal portadora, si ello es procedente.

Los siguientes son ejemplos de equipos actualmente disponibles en el mercado:

En el mercado existen medidores de intensidad de campo y receptores automáticos controlados por microprocesador en forma de unidades compactas para la gama de frecuencia entre 9 kHz y 3 GHz o para gamas de frecuencias reducidas. Los generadores de calibración integrados, los atenuadores de precisión, la calibración automática y los ajustes de gama de frecuencias permiten realizar las medidas de tensión de entrada con errores inferiores a 1 dB sobre toda la gama de tensiones de entrada y para una amplia gama de temperaturas de funcionamiento. Teniendo en cuenta además una precisión en el factor de antena de ± 1 dB, la precisión global de un sistema automático de medición de la intensidad de campo puede situarse en un rango de ± 2 dB sobre toda la gama de frecuencias, aunque puede estar limitado por diversos factores, como un conocimiento inexacto del diagrama de radiación de la antena. El receptor de medida puede completarse con tablas que reflejen la atenuación del cableado y el factor de antena a fin de obtener una indicación directa de la intensidad de campo. Los receptores están correctamente blindados de forma que la precisión de las mediciones no se vea afectada por la detección de señales parásitas ("*stray–pickup*") para valores altos o bajos de la intensidad de campo.

Cuando se seleccionan receptores de medición, debe tenerse presente la necesidad de una sensibilidad adecuada, una alta capacidad para soportar sobrecargas (es decir, puntos de interceptación de segundo y tercer orden elevados) y estabilidad de frecuencia y ganancia, incluida la autocalibración. Los receptores de medición de mejor calidad normalmente utilizados en actividades de comprobación técnica son adecuados para esta finalidad. La anchura de banda de medición debe ser la mínima requerida para una recepción satisfactoria de la señal a medir, y al mismo tiempo, debe evitarse una anchura de banda excesiva para evitar la interferencia por canal adyacente. Para las mediciones de intensidad de campo, los receptores de medición deben estar equipados con las funciones de calibración y detección necesarias.

Los veloces equipos de medición actualmente disponibles disponen de medios de registro digitales, especialmente cuando se realiza la medición automática de más de un canal. Los resultados de la medición se mantienen de forma segura en dispositivos de almacenamiento masivo, pudiendo obtenerse en cualquier momento representaciones gráficas de los datos medidos.

Para más información sobre las técnicas de medición de intensidad de campo, véanse las secciones 4.3 y 4.4 y la Recomendación UIT–R SM.378.

3.5.3 Equipo de análisis del espectro y de medición de la anchura de banda

Si bien el equipo mencionado realizará muchas de las funciones de comprobación técnica, el empleo de ciertos instrumentos adicionales permitirá operar con mayor eficacia a las estaciones de comprobación técnica y ampliará sus posibilidades funcionales.

Los adelantos tecnológicos recientes en cuanto a las posibilidades de los analizadores de espectro y de los analizadores de señal vector, que tienen amplias gamas dinámicas de la amplitud de señal presentada en la pantalla, han aumentado la importancia de las operaciones de control visual. El análisis espectral permite reconocer y clasificar rápidamente varios tipos de emisiones complejas. La comprobación visual puede elevar la eficacia de las operaciones de comprobación técnica al definir zonas de actividad que merecen más profundo examen. El servicio a los usuarios del espectro radioeléctrico es más rápido utilizando técnicas de presentación visual para sincronizar la aparición de la interferencia con la actividad de las emisiones que la causan.

Actualmente se utilizan cada vez más computadores y controladores de procesos en las estaciones de comprobación técnica para generar informes y/o controlar el equipo de comprobación.

Tres grandes categorías de equipos realizan el análisis del espectro radioeléctrico en el dominio de la frecuencia:

– analizadores de banda ancha, que pueden visualizar porciones seleccionadas del espectro con una definición comprendida entre 10 Hz/div y más de 100 MHz/div;

– módulos de presentación panorámica, conectados a las salidas de frecuencia intermedia del receptor, que muestran una parte limitada del espectro en torno de la frecuencia de sintonía del receptor. Ésta, por lo general, no excede de 40% de la frecuencia intermedia en el caso de receptores de tipo corriente.

Existen asimismo receptores panorámicos que pueden presentar (a veces simultáneamente) la gama entera del módulo de sintonización seleccionado o porciones más pequeñas de ella, métodos FFT e IFM.

Existen aparatos para la comparación y el control automáticos de una fuente de frecuencia con relación a una transmisión de frecuencia normalizada

En la sección 4.5 se presenta información adicional sobre mediciones de anchura de banda.

Puede utilizarse un analizador de espectro para los fines siguientes:

– análisis de la señal completa (modulación de amplitud, modulación de frecuencia o de impulsos) en función del tiempo y de la frecuencia;
– supervisión de la forma de onda;
– detección e identificación de las señales espurias de modulación de amplitud y modulación de frecuencia;
– medición del tiempo de subida de impulso, anchura de impulso y tasa de repetición de impulsos;
– medición de las características espectrales de las señales de modulación de impulsos;
– aplicación como receptor de onda continua y sensible a impulsos en estudios de propagación, trazado de diagrama de antenas, etc.

La calidad de las mediciones de anchura de banda depende de las siguientes características técnicas del medidor de anchura de banda o analizador de espectro:

– detector y promediación;
– anchura de barrido;
– anchura de banda del filtro;
– precisión de amplitud relativa;
– margen dinámico de amplitud.

El comportamiento de todos los tipos de instrumentos utilizados para mediciones de anchura de banda está limitado por el desvanecimiento y la interferencia, especialmente para las observaciones sobre transmisiones de larga distancia. Con un analizador de espectro es posible, superponiendo fotográficamente los resultados de varios barridos consecutivos, obtener informaciones muy útiles sobre la ocupación del espectro en las bandas de frecuencia recibidas en la estación de comprobación técnica.

Para más información sobre las mediciones de anchura de banda, véanse la sección 4.5 y las Recomendaciones UIT–R SM.328 y SM.443.

3.5.4 Equipo para la comprobación técnica automática de la ocupación del espectro

La ocupación del espectro es una de las mediciones más importantes para la comprobación técnica del espectro. El objetivo de estas medidas sobre ocupación es determinar cómo pueden atribuirse las bandas de frecuencia y cómo puede compartirse el espectro.

El equipo necesario para dichas medidas puede ser el siguiente:

Antenas: la medida de la tasa general de ocupación requiere antenas omnidireccionales. El objetivo de la medida es medir el espectro completo en una región.

Para una medición en particular, y por ejemplo, para determinar la ocupación de tiempo que hace un transmisor dedicado, puede utilizarse una antena directiva

Receptores: para una tasa de ocupación dada, a mayor anchura de banda analógica, más será la información disponible simultáneamente. Con un receptor de banda estrecha. La anchura de banda analógica debe conmutar entre todas las frecuencias.

Las mediciones de la tasa de ocupación y de comprobación técnica automática no precisan de mediciones de alta precisión, incluyendo las medidas de nivel y de frecuencia. El principal parámetro es la velocidad de exploración global y la anchura de banda instantánea máxima:

– Cuanto más corto sea el tiempo de ajuste del sintetizador, más rápidamente se hará la medida de ocupación. Es recomendable que el tiempo de ajuste en las bandas de ondas métricas y decimétricas sea menor de 5ms y menor de 10ms en la banda de ondas decamétricas;

– una anchura de banda instantánea de amplia permite que la FFT también sea amplia y que el sintetizador conmute menos. Puede utilizarse una anchura de banda instantánea de unos 20 MHz en las bandas de ondas métricas y decimétricas y de 2 MHz en la banda de ondas decamétricas.

Tratamiento digital: las técnicas basadas en la transformada rápida de Fourier (FFT) son adecuadas para las mediciones de ocupación y presentan numerosas ventajas:

− Los métodos basados en la FFT permiten el análisis instantáneo de la banda de IF completa. Asociados a un receptor de banda ancha, los métodos basados en la FFT permiten calcular todas las señales que se encuentran dentro de la anchura de banda en cuestión.

− En el caso de receptores con capacidad de exploración de alta velocidad pueden tenerse en cuenta nuevas modulaciones de frecuencia. Un analizador de barrido espectral no permite apreciar las modulaciones tales como acceso múltiple por división en el tiempo (AMDT) puesto que puede necesitarse más tiempo para explorar la banda de interés. Además, las técnicas basadas en la FFT son más adecuadas para medir señales que varían con el tiempo (activadas, a impulsos o transitorias) y señales dinámicas con modulaciones complejas mediante el procesado simultáneo de todas las frecuencias del espectro supervisado.

− Los métodos basados en la FFT permiten hacer otras medias en paralelo. Si bien una medición de la ocupación se aplica al espectro completo, un conversor reductor digital puede seleccionar una señal concreta en la anchura de banda y determinar a partir de ella la frecuencia o la anchura de banda.

− La medición de la ocupación se basa en cálculos estadísticos. Ello implica que se requieren un gran número de muestras, en función de la tasa de ocupación y que haya muestras independientes y dependientes. Gracias a su rápido tiempo de revisión, los métodos basados en la FFT permiten conseguir en un plazo breve altos niveles de fiabilidad.

− La medición de la ocupación mediante técnicas basadas en la FFT ofrece ventajas sobre los métodos convencionales en términos de precisión de la frecuencia, velocidad, almacenamiento digital de datos espectrales, reproducibilidad de los resultados, discriminación entre portadoras muy cercanas y entornos ruidosos.

En las Figs. 3.5–1 y 3.5–2 se muestran ejemplos de datos de ocupación. Aunque la FFT es un método moderno y efectivo para realizar mediciones de ocupación, existen otros métodos que también pueden utilizarse.

3.5.5 Equipo de registro

Es de utilidad registrar datos de sistemas de comprobación técnica del espectro que contengan información de espectro radioeléctrico e información de audio. Los datos registrados pueden reproducirse y verificarse posteriormente y pueden utilizarse como prueba contra una estación radioeléctrica ilegal. Puede también realizarse una explotación rentable no atendida de un sistema de comprobación técnica del espectro mediante el registro de resultados de los datos.

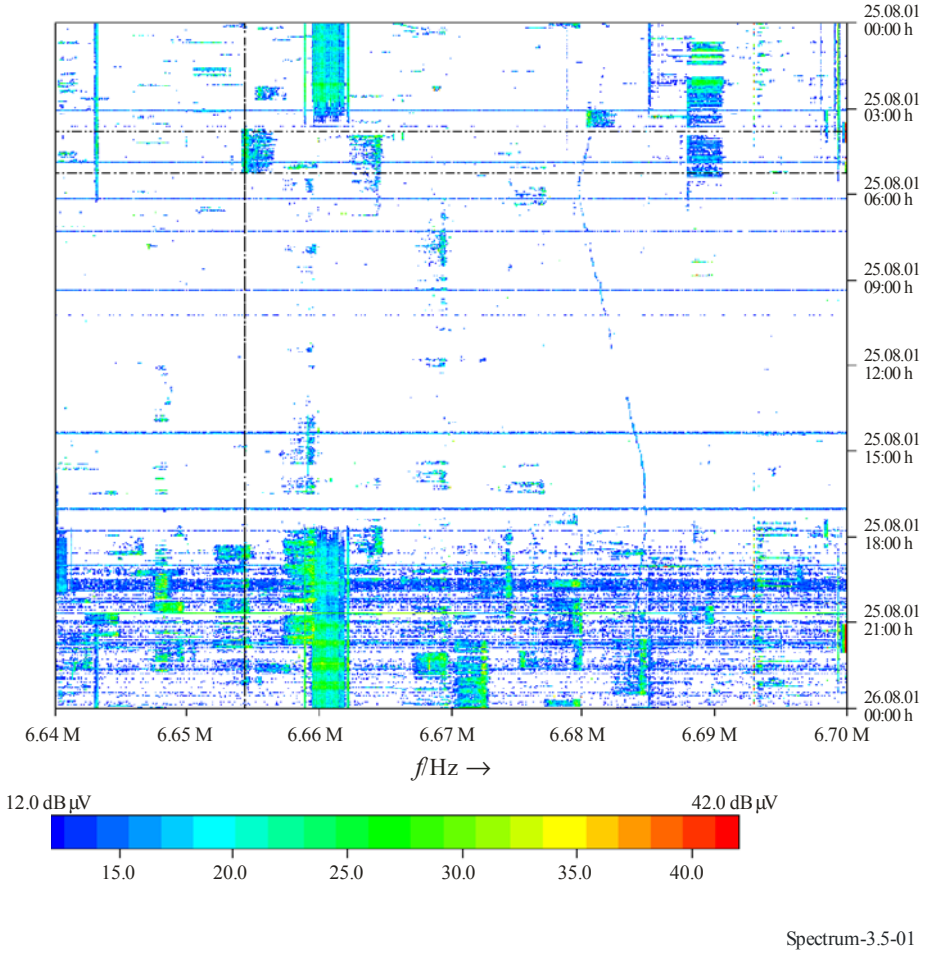
Además de registrar el audio, que es recibido en la estación de comprobación técnica del espectro, debería registrarse, incluso cronológicamente, información sobre el tiempo de detección, la frecuencia, modulación, anchura de banda, dirección, intensidad de campo e ID.

3.5.5.1 Medios de registro

Los registradores de datos de estado sólido y en disco son una alternativa preferida a los registradores convencionales en cinta. El registro de datos debe proporcionar una capacidad de registro continua considerable y debe ser de acceso aleatorio para permitir la rápida reproducción de los datos. Es conveniente que el equipo permita al registro de datos, la reproducción y la edición.

FIGURA 3.5–1

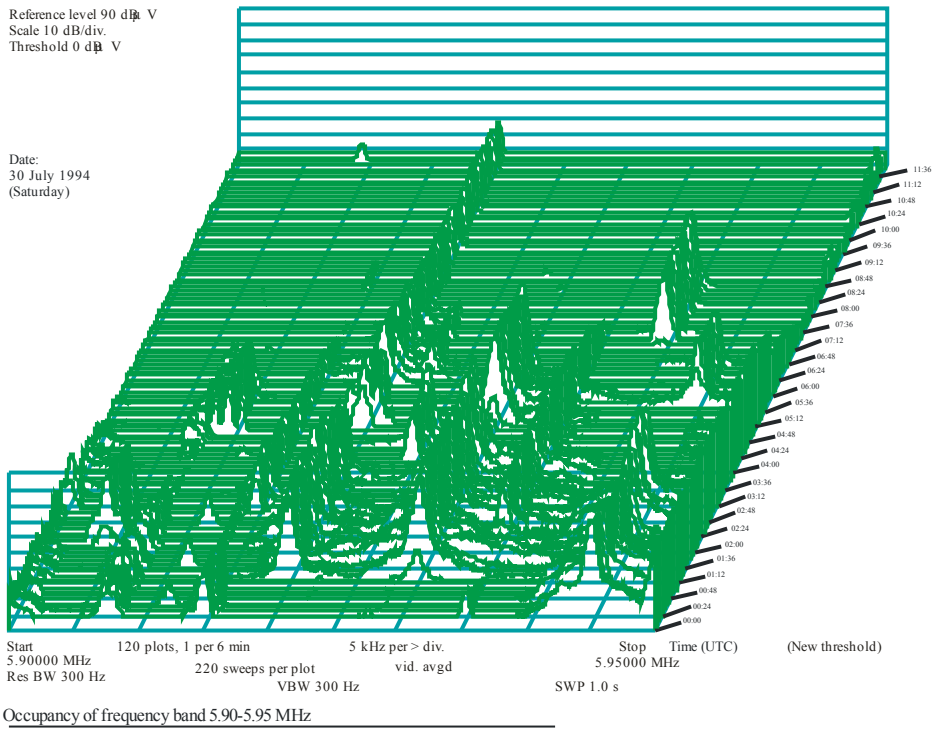
Ejemplo de representación de un espectrograma



Spectrum-3.5-01

FIGURA 3.5–2

Ejemplo de representación en cascada



Es conveniente realizar el registro de datos durante un periodo continuo de al menos 72 horas. Este tiempo de registro prolongado permite largos periodos de funcionamiento no atendido. El registro debe comenzar cuando se reciban los datos de comprobación técnica, permitiendo la captura inmediata de señales inesperadas y debe detenerse cuando no se reciban datos de comprobación técnica. El formato de los medios de registro debe analizarse cuidadosamente a fin de facilitar la reproducción de los datos. El operador deberá poder insertar una "marca" en el tren de datos de comprobación técnica y localizar ulteriormente con facilidad la marca durante la reproducción del mismo.

Las funciones de reproducción de datos deben reproducir exactamente los mismos datos de comprobación técnica en base a los datos registrados. La información del espectro radioeléctrico y la información del sonido deben sincronizarse durante la reproducción. Las funciones de reproducción de datos deben tener una función de búsqueda de "marca", avance rápido, rebobinado rápido y la función de búsqueda de encabezamientos.

La función de edición de datos debe ser capaz de extraer y copiar datos designados a partir de los datos registrados. Un operador debe fácilmente designar los datos deseados para su extracción y copia.

3.5.5.2 Equipo de registro de banda amplia

En este punto se analizan las necesidades de las capacidades de almacenamiento de datos digitales en las estaciones de comprobación técnica. No se presentan especificaciones técnicas, sino cómo han de determinarse las necesidades de almacenamiento. Actualmente la evolución técnica es tan rápida que cualquier especificación quedaría obsoleta en unos pocos años.

3.5.5.2.1 Datos y formatos de registro

En las estaciones modernas existen cinco tipos de datos de registro y sus ficheros asociados:

Tipo 1: datos digitales, que representan las componentes en fase y cuadratura (I/Q) de un flujo continuo o de muestras en modo bloque de la banda de base o de la salida en FI en un formato común. Estos datos en bruto

pueden posteriormente inyectarse en un receptor para analizar las señales registradas. Esto es especialmente útil para registrar señales móviles, ya que en esos casos el equipo de análisis de la estación de comprobación técnica fija no está siempre disponible. Algunas aplicaciones de este tipo son el análisis de las señales de corta duración y de señales capturadas durante grabaciones no atendidas.

Tipo 2: datos espectrales resultantes de aplicar la FFT a mediciones realizadas en el dominio del tiempo. Las estaciones modernas de comprobación técnica pueden generar varios cientos de FFT por segundo asociadas a mediciones de gran anchura de banda. El formato normalizado es un fichero de texto.

Tipo 3: datos demodulados y decodificados con formato de salida de fichero de texto.

Tipo 4: datos digitales de audio en ficheros con formatos wav, mp3 y otros formatos de audio.

Tipo 5: datos de mediciones en bruto con formato de fichero de texto.

Debido a las elevadas velocidades de datos manejadas, el almacenamiento de datos digitales en formato I/Q normalmente requiere almacenamiento de gran capacidad y gran anchura de banda de registro. Otros tipos de registros presentan requisitos menos exigentes.

3.5.5.2.2 Grabación de datos digitales

Dado que las interfaces pueden ser conversores analógico–digitales o conversores reductores digitales, es importante cuál sea la longitud del registro, el tipo de datos (octetos por muestra) y la anchura de banda de la señal. Actualmente las capacidades de almacenamiento son grandes y la investigación tecnológica sigue desarrollando sistemas de mayor capacidad. Los receptores digitales pueden disponer de una interfaz directa con el elemento de registro, proporcionando una entrada / salida digital adecuada en el receptor y en el elemento de registro.

3.5.5.2.3 Anchura de banda del equipo de registro

La anchura de banda de la señal a registrar influye en los requisitos, no solo en términos de capacidad de registro sino también en términos de anchura de banda de registro del sistema. El equipo de almacenamiento y el receptor que registra pueden estar en el mismo entorno local o conectados a través de una red de comunicaciones de área extensa. Las señales de mayor anchura de banda (por ejemplo, > 5MHz) requieren sistemas de almacenamiento rápidos debido a las elevadas velocidades de datos que manejan. Debe tenerse especial cuidado en que la red de conexión elegida y el equipo de registro tengan un caudal de datos de registro sostenido superior al necesario para la máxima anchura de banda de la señal a registrar, sin cargar en exceso (>30% en un entorno de conmutación de paquetes) la capacidad de la red de conexión.

3.5.5.2.4 Requisitos de calidad de funcionamiento del equipo de grabación

Los requisitos de capacidad de almacenamiento y de velocidad de datos pueden calcularse mediante la fórmula siguiente:

$$C \text{ (Mbytes)} = F_s \times N_b_\text{Bytes_por_muestra} \times \text{Rec_time}$$

donde:

F_s:frecuencia de muestreo del ADC o del convertidor reductor (DDC) (MHz)

N_b _ Bytes_por_muestra: generalmente 4 octetos para las muestras I/Q de 16 bits

Rec_time: tiempo de grabación (s).

Por ejemplo, una anchura de banda de señal de 10 MHz requiere una velocidad de muestreo de F_s = 25 MHz en banda de base o de 12,5 MHz en I/Q. Una señal en banda de base con 16 bits por muestra y un tiempo de grabación de 1 min implica:

– Velocidad de datos: 25 (MHz) × 2 (octetos/muestra) => 50 Mbyte/s

– Capacidad de almacenamiento / grabación: 50 (Mbyte/s) × 60 (s) => Capacidad de almacenamiento = 3 Gbytes

3.5.6 Equipo de medición de la modulación

Las mediciones de modulación recomendadas por las normas de la UIT son efectuadas por sistemas automatizados que se describen en el punto 4.6. En ciertos casos, tales como en las mediciones detalladas de la modulación digital, puede ser deseable equipo de medición especializado. Un analizador vectorial de señal (VSA, *vector signal analyser*) o un analizador de espectro con capacidad de análisis vectorial es útil para medir la modulación digital.

Los receptores necesarios para realizar la demodulación y la medición de las señales con MDP–n, la MAQ y otros esquemas de tipo vectorial descritos en el punto 4.6 se caracterizan por la alta calidad de los conversores reductores cuya amplitud de FI y respuesta al retardo de grupo no degradan la señal medida. El conversor reductor o el receptor va seguido por un VSA para realizar el análisis de la modulación digital [Blue y otros, 1993]. Un VSA acondiciona las anchuras de banda de FI finales utilizando DSP para obtener respuestas paso de banda de FI estables y de alta calidad. Además, modificando los coeficientes DSP pueden sintetizarse toda una gama de filtros de receptor para lograr una cobertura versátil de una diversidad de tipos de modulación.

Si se utiliza el conversor reductor de RF opcional del VSA y éste no contiene un preselector de RF, en condiciones de señal densa debe emplearse un preselector externo o un filtro de banda. Quizá sea necesario incluir en el procedimiento de corrección las correcciones de la respuesta de banda de paso del preselector para que la respuesta de la banda de paso del filtro de FI tenga la mayor calidad posible.

Tras ajustar la frecuencia portadora deseada, el tipo de modulación y la velocidad del símbolo, el DSP utilizado en el VSA lleva a cabo la demodulación. Además de presentar la señal modulada, el analizador vectorial de señal también ofrece mediciones de los errores en la modulación digital. Esto se consigue demodulando la señal y generando una señal de referencia ideal; posteriormente se comparan ambas señales para generar la medición de error.

Para comprobar la calidad de modulación de las emisiones, el trayecto de transmisión puede ser el elemento dominante cuando se miden los factores de calidad de modulación. La propagación multitrayecto u otro tipo de interferencia cocanal pueden hacer muy discutibles, o incluso inútiles los resultados de la medición de calidad de modulación. Por consiguiente, las mediciones detalladas sólo son adecuadas en el emplazamiento del transmisor, preferentemente con una conexión directa al transmisor. Dichas mediciones incluyen: magnitud vectorial de los errores, errores de fase y de amplitud, transalimentación de portadora, desequilibrio de ganancia I/Q, caída de amplitud y error de frecuencia de portadora.

Las mediciones generales que dan una indicación de la calidad de modulación global y pueden efectuarse en el emplazamiento del transmisor, o a alguna distancia de las emisiones radiadas son: espectro vectorial de errores (para poner de relieve la interferencia), relación de potencia de canal adyacente, anchura de banda ocupada, máscara de emisión de espectro, función de distribución acumulativa complementaria, frecuencia portadora, y mediciones en el dominio del código (potencia, temporización y fase).

La medición de la respuesta del canal a impulsos (CIR, *channel impulse response*) [Riedel, 1991, Blues y Riedel, 1993] no es una medición de modulación, sino una medición del multitrayecto del canal de propagación. Este multitrayecto afecta en gran medida a la calidad de la modulación en el emplazamiento de recepción. Otra medida indirecta de la calidad de modulación en el emplazamiento de recepción es la medición de la BER. Estas mediciones de calidad se describen con más detalle en los puntos 5.3.6.2 y 5.3.6.3.

3.5.7 Equipo de identificación

La identificación de las señales radioeléctricas es una de las tareas más difíciles de la comprobación técnica. En parte esta dificultad se debe a que raras veces emiten distintivos de llamada, en parte también a la utilización de distintivos de llamada abreviados o no registrados, y en una gran medida a la dificultad de decodificar las señales a causa del empleo cada vez más extendido de sistemas de transmisión complejos, como son el desplazamiento de frecuencia y la multiplexación por división en frecuencia y/o división en el tiempo. Además, existen sistemas de aparatos telegráficos que utilizan una diversidad de códigos distintos del Morse, sistemas de facsímil, sistemas de banda lateral única e independiente y dispositivos que aseguran la privacidad.

Las técnicas de procesamiento digital y los microcomputadores han permitido diseñar equipo de identificación de finalidad múltiple, capaces de demodular y decodificar la mayoría de las señales y susceptibles de ser programados para responder a nuevos planes de transmisión. Este asunto se analiza en la Recomendación UIT–R SM.1600, Identificación técnica de las señales digitales.

Una estación de comprobación técnica debe, en consecuencia, disponer de equipo para la recepción de varios tipos de modulaciones analógicas y digitales.

Para más información sobre la identificación de la señal, véase la sección 4.8.

Referencias

BLUE, K. *et al.* [Diciembre 1993] Vector Signal Analyzers for Difficult Measurements on Time–Varying and Complex Modulated Signals. *Hewlett–Packard J.*, Vol. 44, p. 6–47.

BUES, D. y RIEDEL, P. [1993] Planning digital radio networks using Impulse Response Analyzer PCS and test transmitter system. *News from Rohde & Schwarz*, **141**, p. 26–27.

RIEDEL, P. [1991] TS 9955 measures channel impulse response in GSM radio networks. *News from Rohde & Schwarz*, **137**, p. 12–14.

YANG Xuhai, Zhai Huisheng, Hu Yonghui, Li Zhigang, Li Xiaohui, Study on GPS Disciplined Rb Clock Based on New Frequency Accuracy Measurement Algorithm, National Natural Science Foundation of China (60172031), Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005 Vol.26–1.

Manual UIT [2010] Transferencia y difusión por satélite de señales horarias y frecuencias, disponible en: http://www.itu.int/publ/R–HDB–55.

Recomendaciones del UIT–R:

NOTA – Se insta al lector a que utilice la última edición de cada una de las Recomendaciones referenciadas.

Recomendación UIT–R SM.182 – Comprobación automática de la ocupación del espectro de frecuencias radioeléctricas

Recomendación UIT—R SM.328 – Espectros y anchuras de banda de las emisiones

Recomendación UIT–R SM.377 – Precisión de las mediciones de frecuencia en las estaciones de comprobación técnica internacional

Recomendación UIT–R SM.378 – Mediciones de la intensidad de campo en las estaciones de comprobación técnica

Recomendación UIT–R SM.443 – Mediciones de anchura de banda en las estaciones de comprobación técnica de las emisiones

Recomendación UIT–R SM.854 – Radiogoniometría y determinación de posición en las estaciones de comprobación técnica

Recomendación UIT–R SM.1600 – Identificación técnica de las señales digitales

3.6 Automatización de la comprobación técnica

3.6.1 Introducción

La automatización, mediante la utilización de computadores, modernas arquitecturas de cliente/servidor y comunicaciones a distancia simplifica la mayoría de las tareas y responsabilidades de los servicio de comprobación técnica del espectro. Los equipos informatizados proporcionan los medios para realizar mediciones repetitivas de manera rápida y precisa, liberando al personal de servicio para que puedan efectuar tareas más exigentes.

La utilización de bases de datos y la creación de modelos mediante computador agiliza las funciones de gestión del espectro y puede ayudar a evitar la interferencia.

El acoplamiento de la gestión del espectro y la comprobación técnica del espectro hace posible el establecimiento de sistemas integrados que pueden utilizar automáticamente los datos medidos por el sistema de comprobación técnica y la información sobre licencias y otras infracciones en la concesión de licencias.

La comprobación técnica y los sistemas de gestión integrados pueden disponer de facilidades de gestión centralizadas en las que se realice la gestión del sistema de comprobación técnica del espectro y el análisis estadístico de los datos de medida almacenados en la base de datos del sistema.

Los resultados almacenados se utilizan para la planificación de la gestión del espectro (por ejemplo, para la cancelación de asignaciones y para la reasignación de frecuencias).

En la Fig. 3.6–1 se representa un sistema integrado típico que se describe más ampliamente en la Recomendación UIT–R SM.1537.

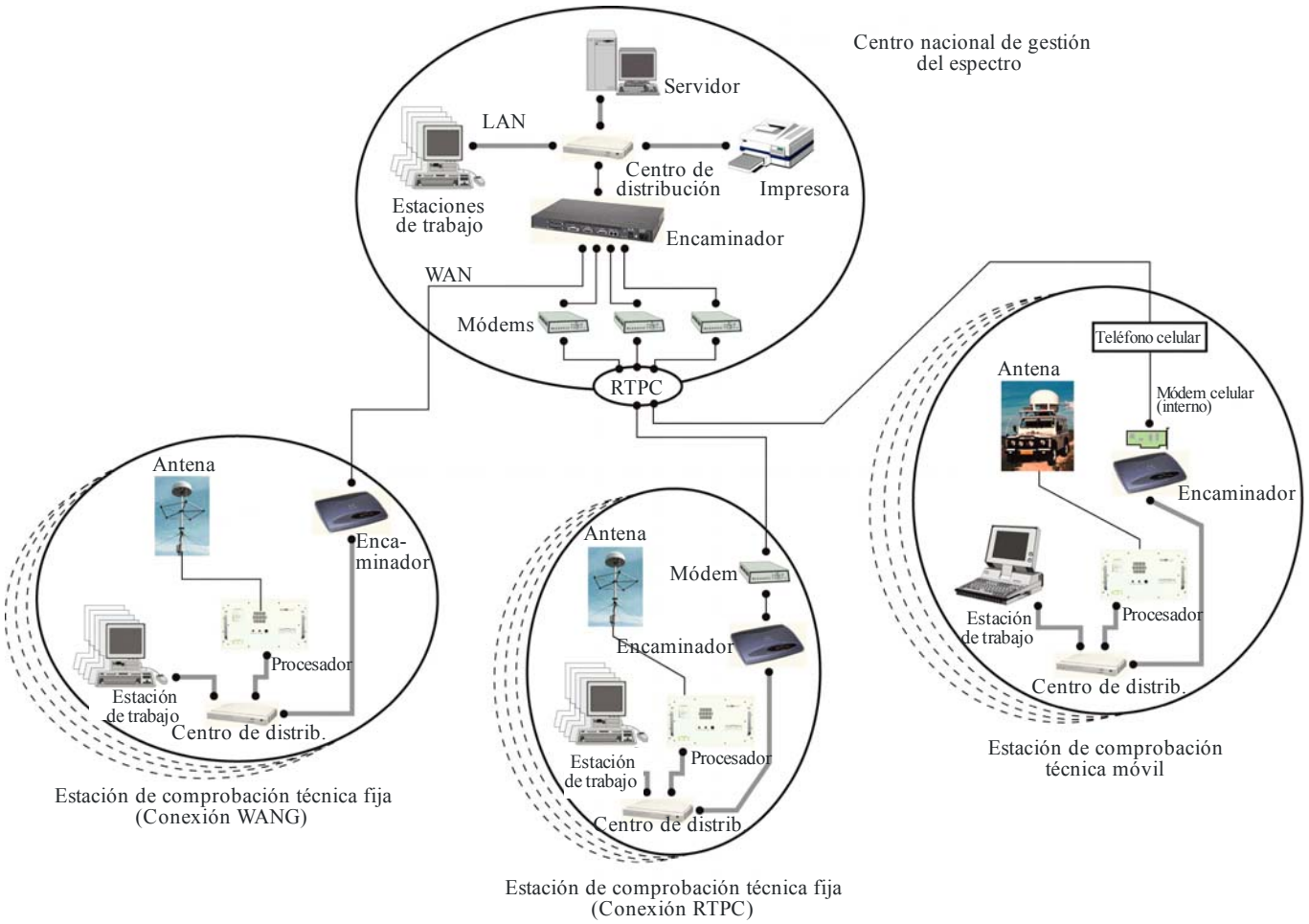
La configuración (número de estaciones de trabajo en cada estación, número de estaciones, etc.), los métodos de comunicación (TCP u otro protocolo; utilización de la RTPC, radiocomunicaciones o satélite) y otros detalles variarán de acuerdo con la aplicación.

Una configuración de sistema alternativa incluye la adición de un centro de comprobación técnica conectado directamente a las estaciones de comprobación técnica y, su vez, al centro de gestión.

Un servicio de comprobación técnica de envergadura puede tener centros de comprobación técnica regionales además de un centro de comprobación técnica principal o nacional para distribuir el control de las operaciones de comprobación técnica.

FIGURA 3.6–1

Ejemplo de sistema de comprobación técnica integrado con un sistema de gestión



3.6.2 Automatización de las operaciones de comprobación técnica

Las estaciones automatizadas efectúan por lo general las funciones de una estación de comprobación técnica fija como se indica en el punto 2.4. Todas las mediciones de comprobación técnica periódicas son tareas repetitivas que se prestan fácilmente a la automatización:

- *Mediciones de ocupación*: La exploración de gran resolución de las bandas de frecuencias con pantallas generadas por computador y capacidad de almacenamiento de la ocupación del canal a lo largo de varios días se adapta bastante bien a la automatización.
- *Mediciones de frecuencia*: Pueden realizarse automáticamente cuando el valor de la relación señal/ruido es suficientemente alto y en el caso de transmisiones con frecuencia portadora. En la banda de ondas decamétricas, los canales normalmente tienen una separación muy pequeña y debe proporcionarse una selectividad en frecuencia muy abrupta en el caso de que existan varias frecuencias en el mismo canal.
- *Mediciones de nivel* y, en caso necesario, de intensidad de campo.
- *Mediciones de anchura de banda*.

- *Mediciones de los parámetros de modulación*: Los avances experimentados en el hardware y en los algoritmos de procesamiento de la señal digital han desembocado en el desarrollo de sistemas de reconocimiento de la modulación que identifican los tipos de modulación en tiempo real. Estos sistemas pueden implantarse en instrumentos autónomos, tarjetas incorporadas a computadores y soporte lógico asociado, o pueden integrarse en otros instrumentos (tales como receptores o analizadores). Estos sistemas pueden emplearse para reconocer varios formatos de modulación (tanto digital como analógica), medir parámetros técnicos comunes y demodular o decodificar las señales.
- *Análisis de la señal*. No obstante, no todos los aspectos de los análisis de la señal pueden realizarse completamente de forma automática.
- *Radiogoniometría*.
- *Identificación de estaciones*, mediante el emplazamiento, o análisis automático de la señal (reconocimiento de código, número de elementos, velocidad de transmisión).

Todas estas mediciones pueden realizarse normalmente de manera automática pero algunas de ellas, tales como las de anchura de banda y la modulación requieren señales con una buena relación señal/ruido para lograr la suficiente precisión. Con estas mediciones se obtienen datos técnicos que pueden compararse con los parámetros técnicos inscritos en las bases de datos de la gestión del espectro o con los datos deseados. Los parámetros técnicos inscritos para un transmisor en dicha base de datos incluyen:

- frecuencia asignada;
- intensidad de campo calculada;
- clase de emisión;
- anchura de banda asignada;
- anchura de banda de la emisión;
- distintivo de llamada

Cada estación de comprobación técnica normalmente cuenta con una lista de transmisores y los operadores comparan los parámetros del transmisor indicados con las observaciones registradas por los equipos automatizados. Los sistemas automáticos integrados pueden realizar la comparación además de la recopilación de los datos, por ejemplo en la detección automática de infracción indicada más adelante. De cualquier forma, la comparación debe realizarse utilizando tolerancia en los parámetros medidos que sean coherentes con las precisiones de medición recomendadas por la UIT a fin de minimizar la tasa de aparición de alarmas falsas. El objetivo es confirmar el cumplimiento con los procedimientos establecidos y con los datos técnicos indicados en su fichero de la base de datos. Cuando se detectan discrepancias o anomalías, normalmente incluyen:

- transmisores o frecuencias ilegales o sin licencia;
- periodos o emplazamientos de funcionamiento no autorizados;
- clases de emisión ilegales o baja calidad de modulación;
- desplazamiento de frecuencia excesivo;
- distintivo de llamada inexistente o incompleto;
- anchuras de banda excesivas;
- potencia excesiva (valor excesivo de la intensidad de campo).

3.6.2.1 Niveles de automatización

La automatización puede introducirse en muchos niveles en todas las operaciones de comprobación técnica. Una sola estación de trabajo puede realizar un control automático de ocupación utilizando parámetros previamente programados. Varias estaciones de trabajo con un emplazamiento pueden estar conectadas a un solo conjunto de equipos de medición para compartir estos recursos de medición. Toda una estación, o una red de estaciones puede estar automatizada, posiblemente debido a su emplazamiento remoto, y los resultados de su comprobación técnica pueden retransmitirse a una estación más centralizada. Las posiciones

individuales en diversos emplazamientos pueden interconectarse de tal forma que una posición sintonice automáticamente posiciones en otros emplazamientos para obtener múltiples mediciones simultáneas en señales de interés. Los equipos controlados por computador pueden programarse para identificar las frecuencias en las cuales hay transmisores que no están incluidos en una base de datos de licencias concedidas, y para identificar los transmisores que están funcionando dentro de la gama de los parámetros establecidos en la licencia.

La automatización puede ayudar a disminuir el tiempo necesario para localizar e identificar una señal, reducir el personal necesario para explotar las estaciones y hacer que este personal esté disponible para otras funciones de mayor prioridad tales como ayudar a una estación móvil en operaciones de radiogoniometría o realizar análisis de datos, y aumentar la parte del espectro de radiofrecuencias que puede comprobar un servicio de manera efectiva. Por otro lado, la ausencia de un operador o un técnico en un emplazamiento remoto puede traducirse en largos periodos de inhabilitación de los equipos si se produce un fallo de los mismos. Además, los equipos automatizados puede que no ofrezcan la sensibilidad necesaria para sintonizar señales difíciles de recibir, lo cual podría lograr un operador mediante sintonía manual, y ese puede ser a menudo el caso en un entorno en ondas decamétricas. En cualquier circunstancia, cuando se automatiza una posición o una estación, el servicio debe incorporar la opción de pasar a funcionamiento manual, de forma local o a distancia. La automatización de equipos más antiguos normalmente exige un computador separado, y a menudo es necesario reemplazar los equipos más antiguos.

3.6.2.2 Automatización de una estación

Las modernas técnicas de procesamiento digital de la señal (DSP), permiten automatizar de forma económica estaciones completas. Una estación automatizada consta de:

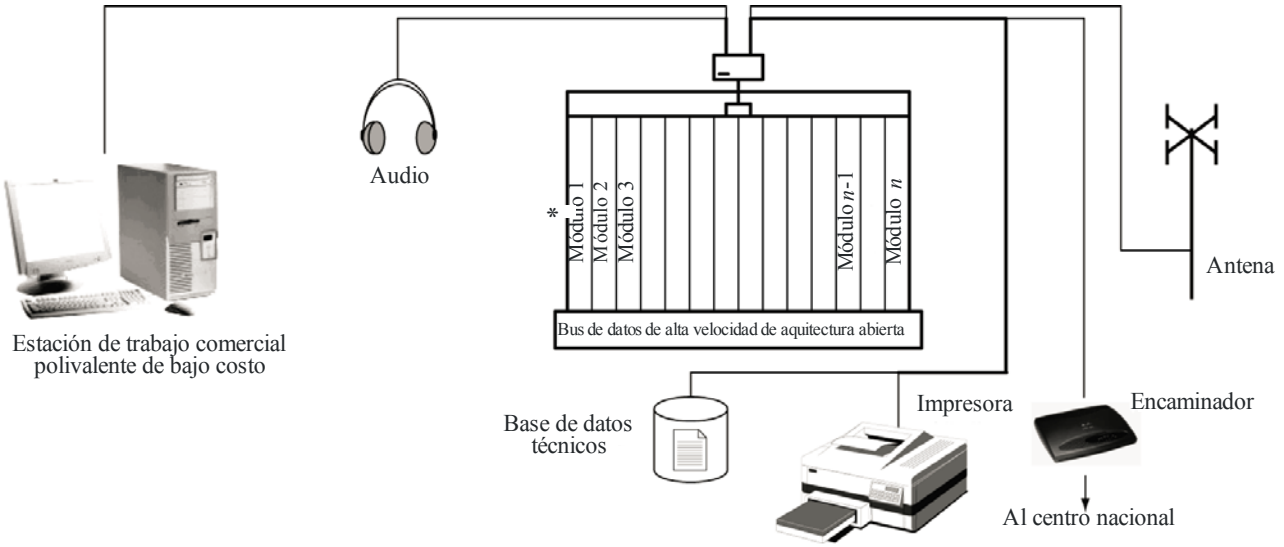
- un pequeño grupo de módulos de equipos de medición sofisticados que incluyen receptores digitales controlados por un computador denominado a menudo servidor de medición, y
- estaciones de trabajo de operador, denominadas a menudo clientes, que se utilizan para interfaz del operador y que contienen programas informáticos que facilitan la utilización y mantenimiento del sistema.

La estación puede explotarse de forma local o puede controlarse a distancia desde el emplazamiento más conveniente. Los enlaces entre las estaciones de medición y las estaciones de control pueden ser radioeléctricos o terrenales. Esencialmente, la estación pasa a ser un nodo en una red de área extensa administrado por la estación de control.

Una estación plenamente automatizada presenta la arquitectura ilustrada en la Fig. 3.6–2. Esta estación consta de antenas, un servidor de medición compacto que es una unidad de bus modulable a alta velocidad con procesadores, receptores y otros elementos electrónicos, uno o más clientes de estaciones de trabajo comerciales de bajo costo y varios equipos periféricos que incluyen impresoras, teléfonos y módems. Una arquitectura de estación alternativa pero relacionada con la anterior incluye unidades separadas pero muy integradas con receptores digitales, radiogoniómetros y procesadores; en este caso, la parte de la Fig. 3.6–2 que contiene el bus de datos a alta velocidad de arquitectura abierta con varios módulos se sustituye por unidades separadas, incluido un receptor digital, un radiogoniómetro digital y un procesador. Un equipo de prueba automático integrado permite conocer el estado actual de todos los dispositivos y generar una alarma en caso de fallo de alguno de ellos.

FIGURA 3.6–2

Típica estación moderna de comprobación técnica del espectro radioeléctrico integrada



* Funciones realizadas por soporte físico y módulos de programas de computador.

Procesamiento de radiogoniómetro	Audio digital	Matriz de radiofrecuencia
Conversión rápida analógica/digital	Receptor del GPS	Interfaz de comunicaciones
Procesamiento y modulación digital de la señal	Interfaz de la estación de trabajo	Base de datos del emisor
	Pantallas de espectro	Ranura de expansión
Receptor 1, 2, 3,..*n*	Matriz de audio	

Spectrum-3.6-02

Las funciones de una estación de comprobación técnica automatizada incluyen:

- comprobación técnica, demodulación y decodificación;
- grabación de audio;
- medición técnica y análisis, incluida la frecuencia y el desplazamiento de frecuencia, nivel/intensidad de campo, parámetros de modulación, incluida la profundidad de la modulación en amplitud y la desviación de la frecuencia modulada, anchura de banda y análisis del espectro;
- ocupación del espectro;
- radiogoniometría;
- comparación automática en tiempo real con los parámetros establecidos en la licencia;
- generación automática de alertas sobre transmisiones anormales o desconocidas.

3.6.2.2.1 Modos de funcionamiento típicos de una estación automatizada

Las estaciones automáticas de comprobación técnica normalmente tienen tres modos de funcionamiento que se utilizan para realizar las siguientes tareas:

Modo 1: modo interactivo.

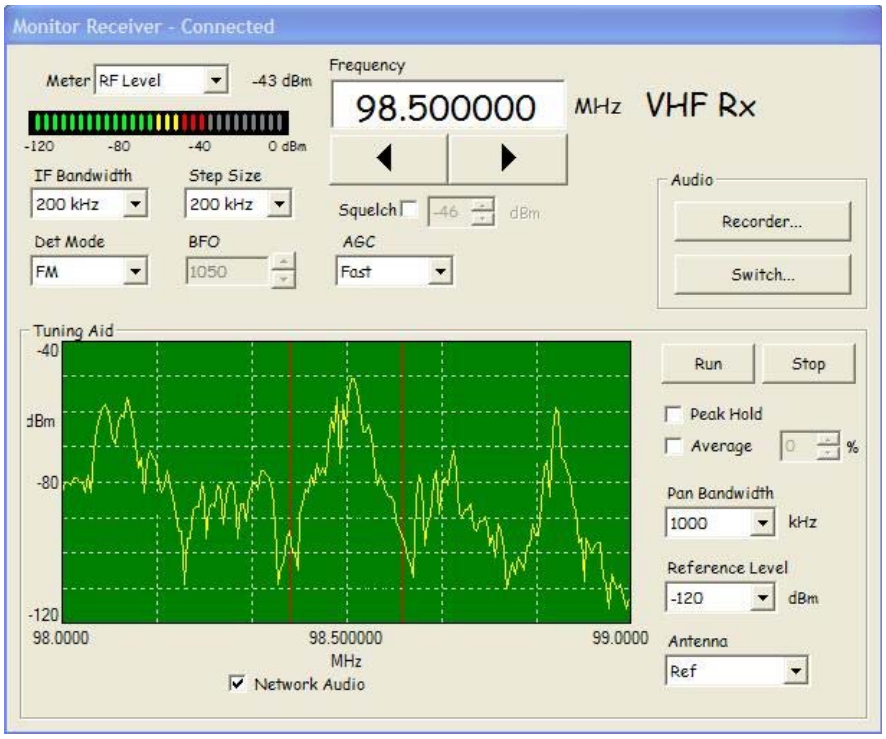
Modo 2: modo automático o programado.

Modo 3: modo básico.

El modo interactivo permite una interacción directa con varias funciones que proporcionan realimentación instantánea tales como sintonía del receptor de comprobación técnica, selección de la demodulación y selección de pantalla panorámica. El modo interactivo es necesario incluso en un sistema automatizado para permitir la intervención de un operador cuando sea necesario, de forma que el equipo pueda ser controlado a distancia por operadores y por el software del sistema automatizado. Estas funciones están controladas a partir de "paneles de control virtual" situados en la estación de trabajo del cliente, utilizando pantallas tales como las que se ilustran en la Fig. 3.6–3. Las pantallas panorámicas y de espectro sintéticas se crean en la estación de trabajo del operador e incluyen presentaciones en cascada (pantallas tridimensionales donde se representa la amplitud de la señal en función de la frecuencia y en función del tiempo) y pantallas de espectrogramas (presentaciones bidimensionales de la frecuencia de la señal en función del tiempo, indicando la amplitud de la señal mediante colores).

FIGURA 3.6–3

Ejemplo de panel de control virtual para el receptor de comprobación técnica



Spectrum-3.6-03

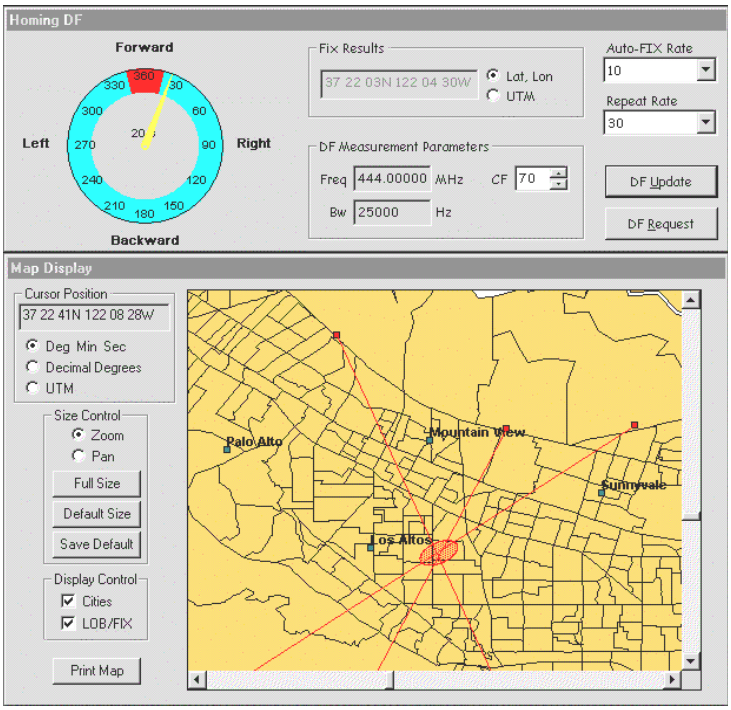
La recalada por radiogoniometría es un ejemplo importante de funcionamiento interactivo. La radiogoniometría puede controlarse en una unidad móvil cuando la unidad se encuentra en movimiento. Los resultados de la radiogoniometría se presentan con respecto a la parte delantera del vehículo, como ilustra la Fig. 3.6–4, y permiten al conductor decidir en qué dirección dirigir el vehículo para aproximarse al transmisor de la señal deseada. También se muestran los resultados de radiogoniometría procedentes de diversos emplazamientos en un mapa geográfico, lo que permite una triangulación automática por parte del sistema a fin de localizar el transmisor de la señal. Un receptor GPS de alta precisión actualiza de forma continua el emplazamiento exacto de la unidad móvil, y una brújula electrónica mide la orientación del vehículo con respecto al Norte.

El modo automático o programado puede establecer las tareas que deben ejecutarse inmediatamente o que van a ejecutarse en el futuro en instantes especificados. Las funciones que se realizan en modo programado

incluyen mediciones o análisis técnicos y radiogoniometría. Pueden especificarse los parámetros de medición, como el método de medición y de promediado, y el instante de medición (o instantes de medición en caso de mediciones repetitivas), o pueden utilizarse valores por defecto proporcionados por el sistema. El operador puede utilizar una pantalla que contiene un calendario con los días de la semana y múltiples intervalos dentro de cada hora del día para programar estas funciones. El cliente solicita intervalos de tiempo para las mediciones deseadas a partir del servidor de medición. El método de asignación de intervalos de tiempo permite la conexión de múltiples clientes a un solo servidor. A fin de controlar las tentativas de programación de múltiples mediciones en el mismo intervalo de tiempo, el servidor debe soportar un modo de programación "conveniente". Cuando el intervalo de tiempo solicitado ya está reservado, la petición del cliente de un intervalo de tiempo del servidor se desplaza hasta el primer intervalo de tiempo disponible. El servidor puede buscar el intervalo de tiempo disponible dentro de una ventana de tiempo especificada que normalmente es de pocos minutos. El servidor de medición lleva a cabo las mediciones solicitadas utilizando la programación de actuaciones y los algoritmos de priorización adecuados a fin de resolver cualquier conflicto de programación y mantiene los resultados medidos hasta que los solicita el cliente. El servidor puede registrar la señal de audio junto con las mediciones solicitadas.

FIGURA 3.6–4

Ejemplo de pantalla de recalada por radiogoniometría y mapa geográfico



Spectrum-3.6-04

El modo básico se utiliza para realizar las tareas de medición de ocupación del espectro y detección automática de infracciones cuando se desea recopilar datos a lo largo de grandes periodos de tiempo. La exploración de banda ancha para analizar la ocupación, o la radiogoniometría combinada con el análisis de ocupación (denominada "exploración radiogoniométrica"), puede especificarse y el sistema puede programarse para realizar una exploración automática en un conjunto de frecuencias o en gamas de frecuencias determinadas, y que cuando se detecte una de terminada señal se inicie la actividad especificada por el operador, como por ejemplo, una medición radiogoniométrica o técnica.

El modo básico funciona con una prioridad más baja que el modo programado de manera que las mediciones programadas especificadas interrumpirán el modo básico para utilizar el servidor de medición.

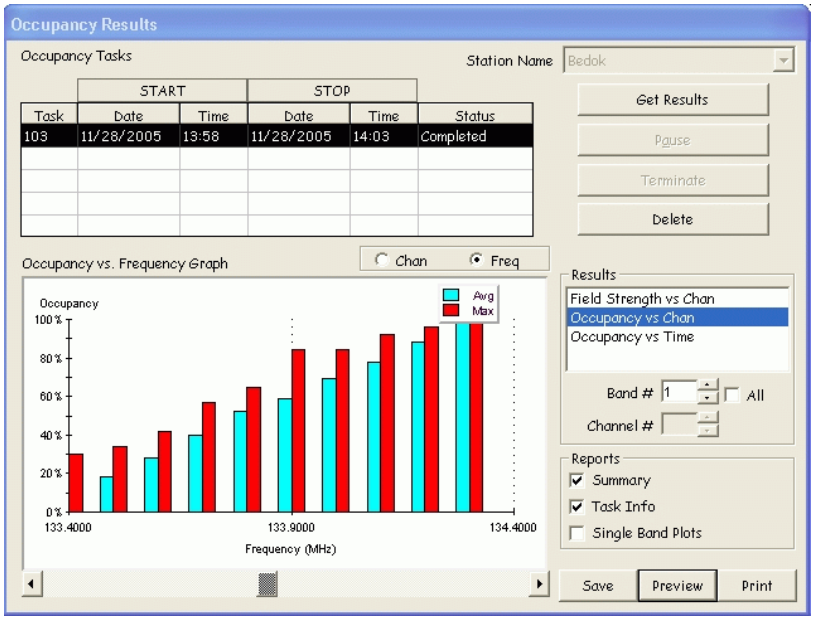
Una vez completadas las mediciones programadas, vuelve el control a las mediciones en modo básico que se estuvieron realizando cuando se interrumpió el proceso.

Cuando el cliente solicita los resultados de las mediciones puede consultarlos en formatos convenientes.

La mayoría de la información se presenta de manera gráfica en forma de histogramas de ocupación (véase la Fig. 3.6–5), gráficos de intensidad de campo en función de la frecuencia, mapas geográficos que muestran los resultados de determinación del emplazamiento (véase la Fig. 3.6–4) y otras presentaciones gráficas.

FIGURA 3.6–5

Ejemplo de histograma de ocupación



Spectrum-3.6-05

Estos sistemas pueden realizar radiogoniometría en la mayoría de las frecuencias simultáneamente y proporcionar gráficos del acimut en función de la frecuencia (véase la Fig. 3.6–6) que son útiles para interceptar y procesar las modernas modulaciones digitales; los resultados de radiogoniometría en esa presentación para el mismo acimut con muchas frecuencias distintas son un signo evidente de la presencia de una señal con salto en frecuencia.

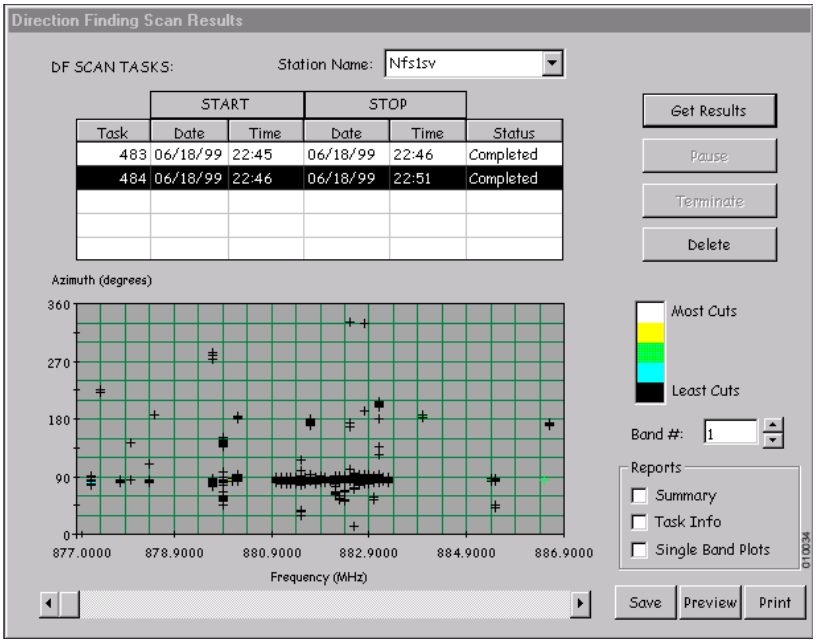
Pueden desarrollarse sofisticados sistemas cliente / servidor de utilización más sencilla que la de los sistemas con equipos separados o autónomos tales como receptores o analizadores de espectro.

Dichos sistemas pueden ser muy intuitivos y de fácil aprendizaje gracias a iconos y barras de herramientas en la pantalla de la computadora a las que el operador pueda acceder fácilmente apuntando y seleccionando con un ratón.

En el caso de administraciones con dificultades para encontrar operadores cualificados, la simplicidad de funcionamiento de un sistema de comprobación técnica constituye un elemento de valoración de gran importancia.

FIGURA 3.6–6

Ejemplo de presentación de resultados de la exploración radiogoniométrica



Spectrum-3.6-06

3.6.2.2.2 Ejemplos de visualización automatizada de anchuras de banda amplias

Tal como se indica en la Recomendación UIT–R SM.1794, los modernos servidores de medida basados en DSP ofrecen una anchura de banda instantánea muy amplia, de hasta 20 MHz, junto con una elevada gama dinámica, de manera que las señales de gran intensidad dentro de esta anchura de banda no impidan que las señales muy débiles presentes en la misma sean recibidas y procesadas.

Los sistemas automatizados con anchuras de banda instantáneas muy amplias pueden explorar el espectro a velocidades muy rápidas, sintonizando automáticamente el receptor, recopilando datos de ocupación y permitiendo repeticiones frecuentes de las medidas y el refresco de los datos mostrados en pantalla para permitir que el operador pueda tener una mejor comprensión de la situación del espectro radioeléctrico.

Son capaces de adquirir de forma efectiva y medir de manera intermitente señales de banda ancha y de frecuencia versátil que pueden dar la impresión de ser ruido cuando se observan con sistemas de banda estrecha.

Si se desean realizar medidas sobre anchuras de banda más estrechas y para conseguir la máxima calidad de funcionamiento, puede seleccionarse automáticamente una anchura de banda instantánea menor, reduciendo así el ruido y mejorando la S/N.

Los operadores pueden consultar una pantalla panorámica que representa gráficamente una anchura de banda muy amplia, lo que mejora su capacidad para localizar las fuentes de interferencia e identificar los tipos de señales y de interferencia que se estén siendo supervisadas.

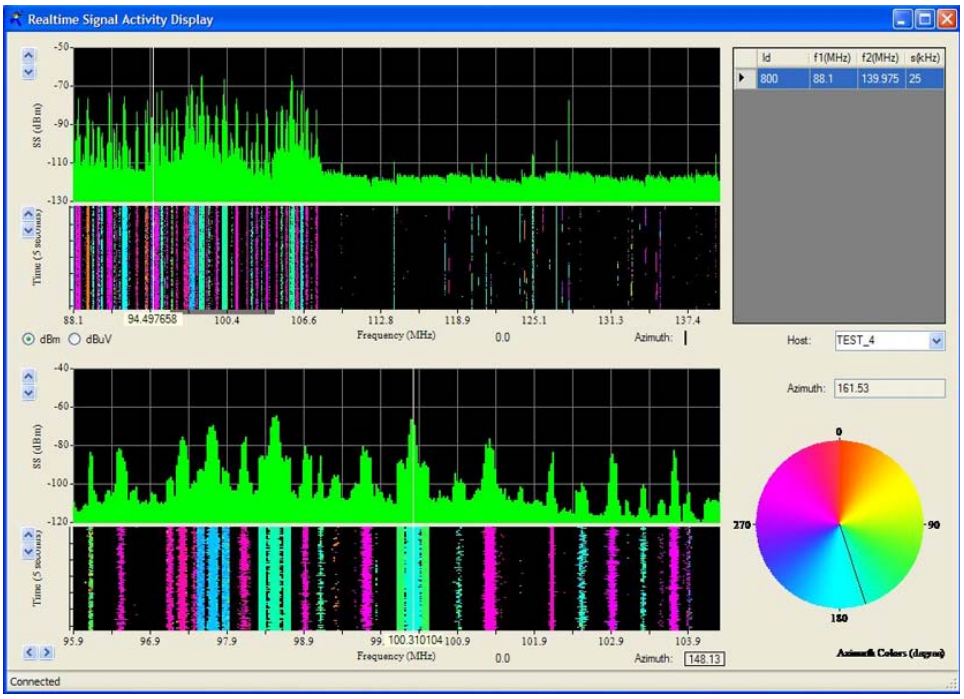
En la Fig. 3.6–7 se muestra una pantalla típica. Esta en concreto abarca 50 MHz de espectro, con una visión panorámica en la parte superior de la pantalla y bajo la cual se observa un espectrograma que revela la actividad de la señal durante los últimos 5 s, cuyas señales se han coloreado con un código de colores que hace referencia a la dirección de recepción de las mismas. Mediante una instrucción del sistema el operador puede modificar el código de colores que representa la dirección de recepción por otro código de colores que represente la intensidad de campo.

En la parte inferior de la pantalla se muestra una representación ampliada de una parte del espectro de la parte superior y el correspondiente espectrograma seleccionado por el operador, donde éste ha indicado la región que desea ampliar y que el sistema reproduce automáticamente; en la figura se ha elegido una zona de 8,5 MHz de la parte superior, que abajo se representa ocupando la anchura completa de la pantalla.

La representación se actualiza continuamente en tiempo real, y el espectrograma cambia simultáneamente representando la actividad actual de la señal según la dirección de recepción de la misma.

FIGURA 3.6–7

Representación típica de mediciones de anchura de banda muy amplia

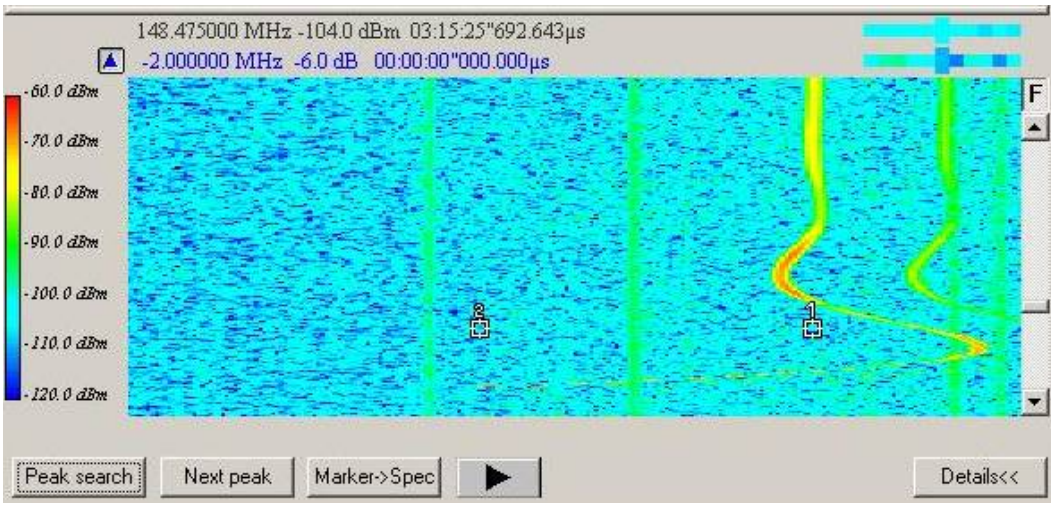


Spectrum-3.6-07

En la Fig. 3.6–8 se muestra una pantalla que representa la señal no estabilizada de un transmisor. Ese tipo de señales que interfieren en las señales del canal adyacente sólo pueden ser detectadas por un receptor de banda amplia. Un receptor de banda estrecha o bien es muy lento para detectar dichas señales o su anchura de banda es demasiado estrecha para que se observen las fluctuaciones de las señales.

FIGURA 3.6–8

Representación típica de una señal de banda amplia con una fluctuación muy rápida detectada por un receptor de banda amplia

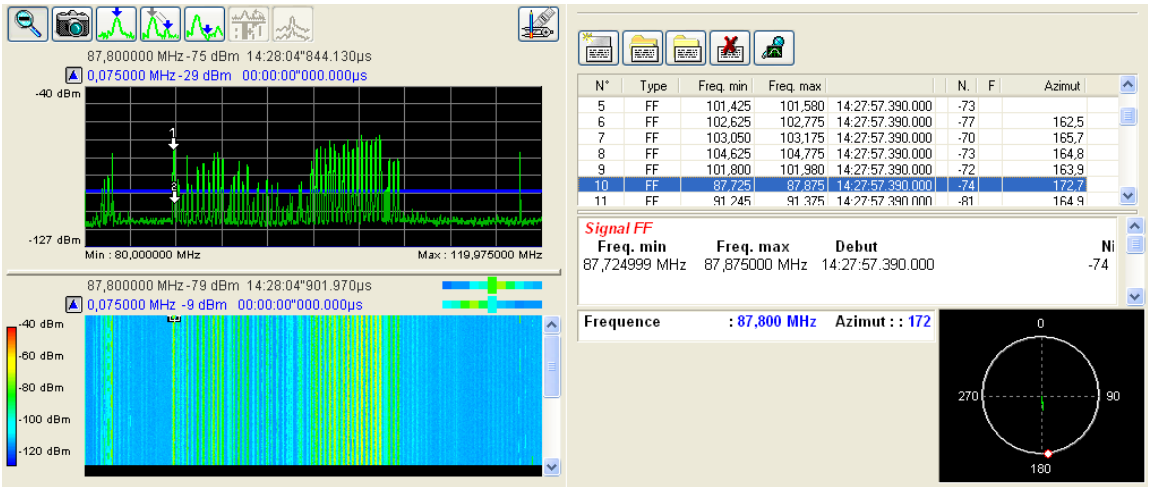


Spectrum-3.6-08

Los operadores pueden visualizar de forma panorámica una anchura de banda muy amplia, mejorando así su capacidad para localizar fuentes de interferencia e identificar los tipos de señales e interferencias objeto de comprobación técnica. En la Fig. 3.6–9 se representa una anchura de banda instantánea en tiempo real de 40 MHz sin exploración. Una anchura de banda instantánea amplia permite detectar señales de muy corta duración, del orden de microsegundos.

FIGURA 3.6–9

Representación típica de mediciones en una anchura de banda muy amplia



Spectrum-3.6-09

El DSP permite una gran flexibilidad, pudiendo añadir nuevas capacidades a los futuros sistemas de comprobación técnica. En caso de que aparezcan nuevos tipos de señales que requieran un procesado especial o si se deseara explorar nuevas bandas de frecuencia, en un sistema basado en DSP basta con modificar el software de la computadora del sistema de comprobación técnica.

3.6.2.2.3 Ejemplos de análisis de los resultados de mediciones

Las estaciones de comprobación técnica automatizadas disponen de un modo de funcionamiento para analizar los resultados de las mediciones. Este modo se utiliza para analizar los resultados de mediciones realizadas por los equipos de medida en condiciones diversas. El análisis puede realizarse en el centro de gestión del espectro.

Las características radioeléctricas de los resultados de las mediciones se representan en forma de gráficos de los valores medidos (intensidad de campo, desplazamiento de frecuencia, desviación de frecuencia, anchura de banda ocupada) en función del tiempo, gráficos de distribución de la desviación, o gráficos de la distribución acumulada de la desviación y espectrogramas. En la Fig. 3.6–10 se muestra una representación típica de un espectrograma. Si bien los gráficos de los valores medidos en función del tiempo son muy útiles para analizar periodos de tiempo muy cortos, los gráficos de la distribución de la desviación o de la distribución acumulada de la desviación son de utilidad en los análisis realizados para periodo de tiempo más prolongados.

Los resultados de las mediciones de la ocupación de la banda de frecuencias pueden representarse mediante diagramas tiempo – frecuencia; la intensidad de campo se representa mediante colores. En la Fig. 3.6–11 se muestra una representación típica.

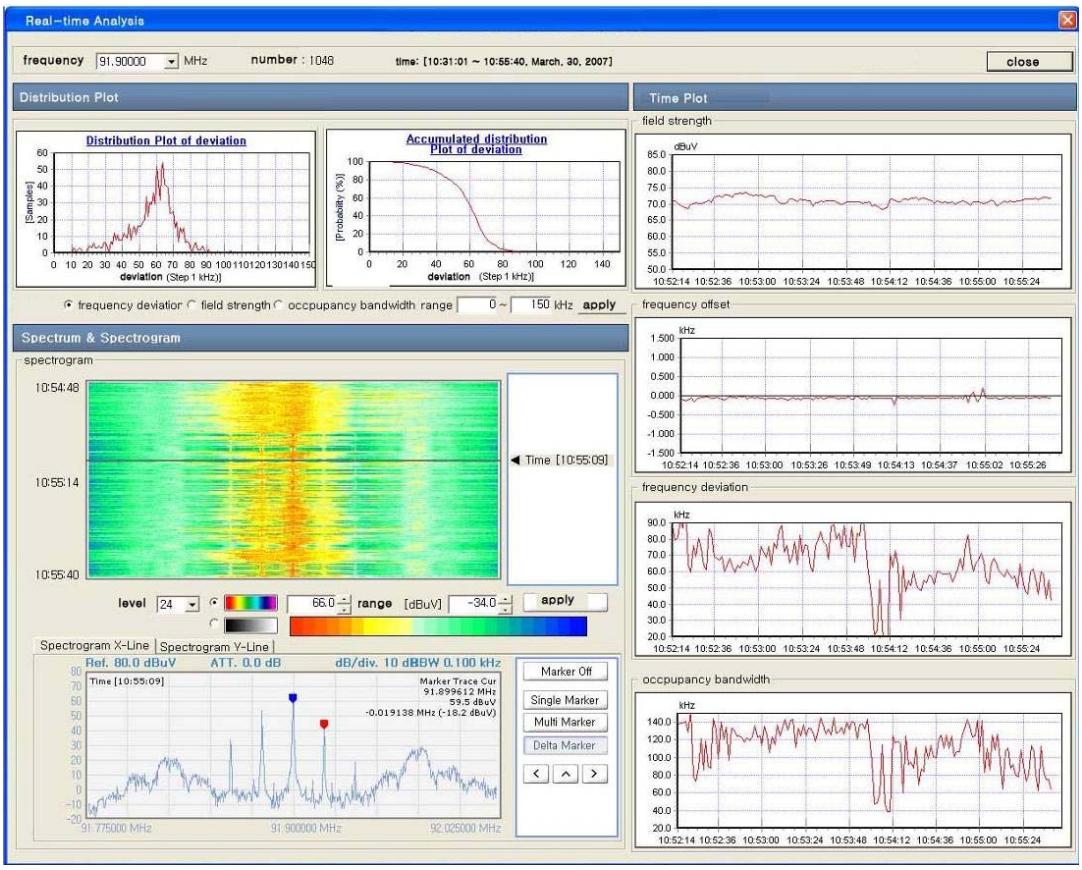
El histograma de ocupación de la banda de frecuencias junto con el espectrograma de la señal muestra la tasa de aparición de las señales, la tasa de ocupación del espectro y la intensidad de campo.

El análisis espectral puede realizarse mediante varias funciones que representan de forma gráfica y con gran rapidez los resultados de las mediciones espectrales. La banda espectral se compara con una carta de distribución de frecuencias y la frecuencia de la señal se representa de acuerdo con una indicación de marca.

En la Fig. 3.6–12 se muestra una representación típica. Los resultados medidos y analizados se utilizan para la predicción de la posibilidad de interferencia y la detección de señales radioeléctricas.

FIGURA 3.6–10

Gráfico típico del análisis en tiempo real de los resultados de mediciones



Spectrum-3.6-10

3.6.2.2.4 Funcionamiento en tiempo real con exploración espectral rápida, radiogoniometría instantánea y alertas al operador

En determinadas bandas de frecuencia es un requisito esencial mantener permanentemente el control en tiempo real de la actividad de transmisión radioeléctrica. Ello incluye la rápida identificación y localización de transmisores legales y la rápida identificación, localización y eliminación de fuentes de interferencia. Algunos ejemplos de tales bandas son las de servicios aeronáuticos, servicios marítimos y varios canales de emergencia esenciales para operaciones de búsqueda y rescate. Este tipo de protección espectral requiere un sistema de comprobación técnica radioeléctrica que funcione el tiempo real con capacidad de exploración rápida del espectro y medidas de radiogoniometría instantánea sobre todas las señales activas. Cuando se detectan señales activas en cualquiera de los canales de emergencia, el sistema tiene que emitir alertas en tiempo real a operadores locales o distantes.

La integración en un único procesador de las funciones de búsqueda de señales, radiogoniometría y comprobación técnica permite la exploración rápida del espectro y la radiogoniometría simultánea de todas las señales detectadas. Los sistemas típicos pueden supervisar hasta varias docenas de canales de emergencia y de comunicación móviles marítimas al menos diez veces por segundo, detectando y midiendo señales de una duración tan breve como 10 ms.

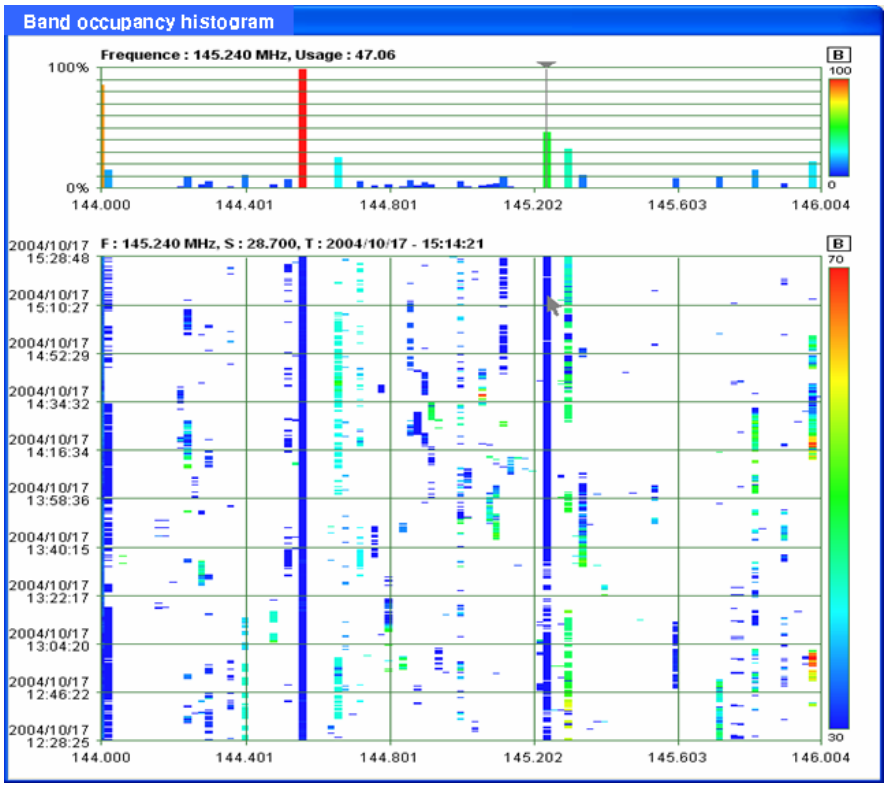
Las mediciones radiogoniométricas se realizan simultáneamente hasta en varias docenas de canales y sus resultados se presentan en tiempo real en la pantalla del operador. Las líneas de marcación (LoB) de los canales seleccionados se representan en un mapa digital y sobre un histograma polar. Si dos o más estaciones de comprobación técnica funcionan en red (tal como se analiza en el punto 3.6.3), el sistema muestra en la

estación de trabajo del operador no sólo la línea de marcación sino también los resultados de la determinación por triangulación del transmisor.

El sistema realiza automáticamente esta operación sin intervención del operador, mostrándose la estimación de la localización en la pantalla del operador sólo una fracción de segundo después del inicio de la transmisión.

FIGURA 3.6–11

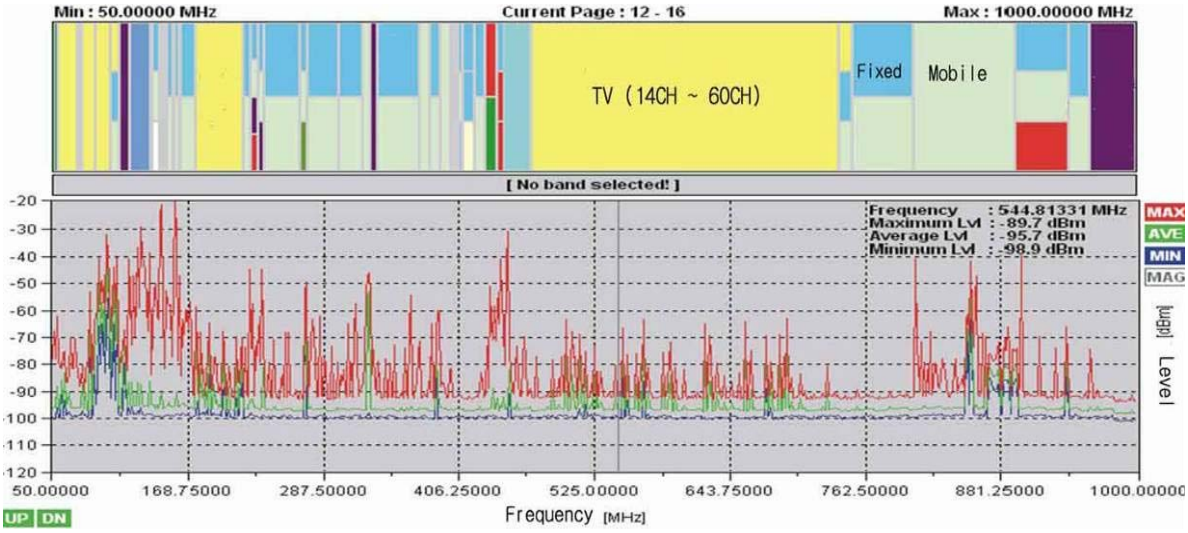
Histograma de la ocupación de una banda con el espectrograma de la señal



Spectrum-3.6-11

FIGURA 3.6–12

Representación espectral de una banda de frecuencias y el correspondiente cuadro de atribución de frecuencias



Spectrum-3.6-12

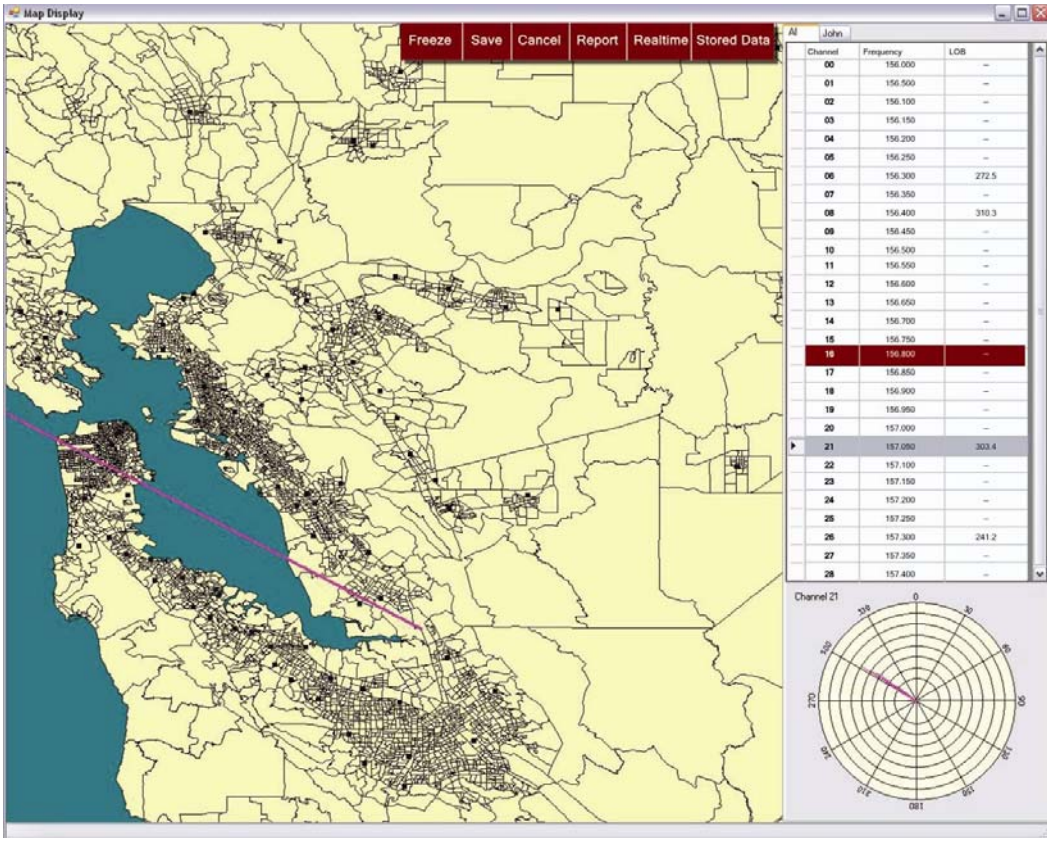
Todas las mediciones radiogoniométricas pueden ser almacenadas automáticamente en una base de datos local de la estación de trabajo del operador, donde se mantiene durante un periodo de tiempo razonable, por ejemplo, de 48 horas. El operador puede realizar diversas funciones desde su estación de trabajo, tales como

- Supervisar continuamente la actividad de la señal, con marcación (LoB) y determinación de posición en todos los canales que tenga asignados.
- Mantener los resultados de las mediciones radiogoniométricas y crear un informe de localización de transmisores que se almacene automáticamente en su base de datos local.
- Revisar y reproducir los resultados radiogoniométricos y las determinaciones de posición almacenadas en la computadora.
- Revisar los resultados radiogoniométricos almacenados en la computadora y crear listas de actividad de señales.

En la Fig. 3.6–13 se muestra un ejemplo de funcionamiento en tiempo real en la banda de los servicios marítimos con exploración rápida del espectro y radiogoniometría instantánea. La marcación se mide simultáneamente y en tiempo real para hasta 29 canales que se muestran numéricamente en la pantalla (parte superior derecha).

FIGURA 3.6–13

Resultados de medición radiogoniométrica simultánea de varios canales con refresco en tiempo real (arriba a la derecha); representación en un mapa de la marcación del canal seleccionado (izquierda) e histograma polar (abajo a la derecha)



Spectrum-3.6-13

La marcación de los canales seleccionados se muestra en el mapa (a la izquierda), así como los histogramas polares (abajo a la derecha). En este ejemplo, el operador ha seleccionado la comprobación técnica del canal 21, por lo que ésa es la marcación que se muestra en el mapa y en el diagrama polar. En la parte superior de la pantalla se muestran las teclas de funciones especiales de que dispone el operador.

En la Fig. 3.6–14 se muestra el caso de una señal medida por más de una estación radioeléctrica. En este ejemplo, hay dos estaciones. El sistema calcula la determinación de posición automáticamente y muestra el resultado en tiempo real en el mapa.

El software puede permitir que el operador defina varios canales de « alta prioridad ». Si se detecta actividad en cualquiera de los canales de alta prioridad, el software lanza un aviso automático en pantalla al operador, genera una alarma audible en la estación de trabajo y puede programar el envío de un mensaje a una dirección de correo electrónico externa o a un teléfono celular.

FIGURA 3.6–14

Cálculo automático y representación de una determinación de posición en tiempo real de una señal medida por más de una estación



Spectrum-3.6-14

3.6.2.2.5 Ejemplo de automatización de la recalada por radiogoniometría

El software avanzado de automatización de la comprobación técnica actualmente disponible [Rembovsky *et al*., 2006] permite procesar estadísticamente las marcaciones realizadas por estaciones móviles de comprobación técnica a fin de simplificar las actividades de los operadores relacionadas con la búsqueda de señales de transmisores

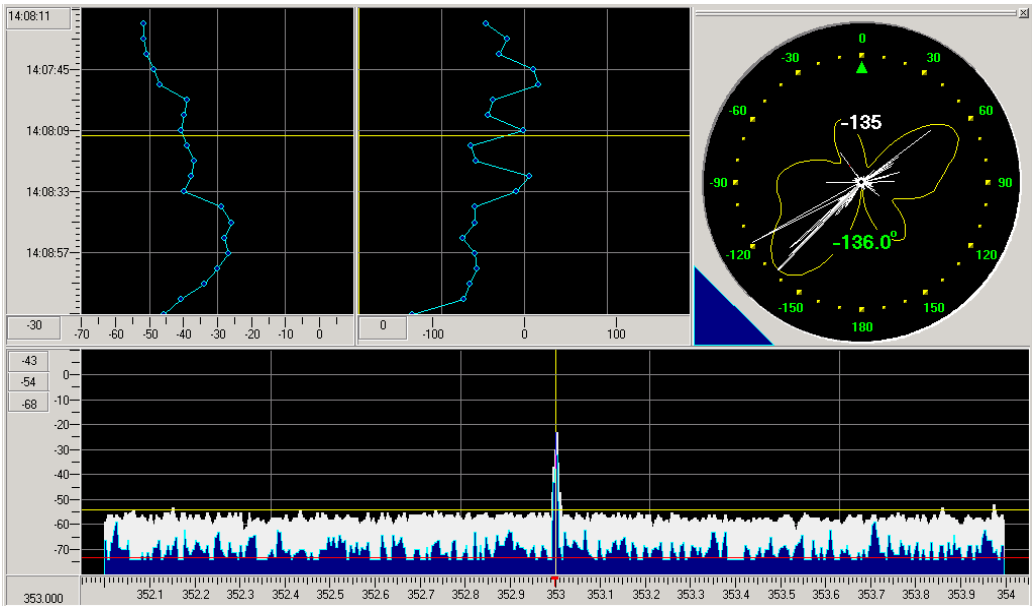
En la Fig. 3.6–15 se muestra una ventada de visualización típica del software del control del equipo trabajando sobre una señal de interés. Incluye el gráfico de valores históricos de la amplitud (esquina superior izquierda) y el gráfico de los valores históricos de la marcación (centro). Ambos gráficos tienen una ordenada común de tiempo. La abscisa del histórico de amplitudes es el nivel de la señal de marcación (dB), mientras que la abscisa del histórico de la marcación es el ángulo de las marcaciones (grados).

Los gráficos de valores históricos permiten seguir los cambios temporales de amplitud y marcación de la señal. Además, la representación gráfica circular de la parte superior derecha indica simultáneamente los valores de marcación y la curva de densidad de distribución de la dirección de marcación (histograma de la marcación) cuyo máximo se corresponde con la dirección más probable de la misma. Un cambio en la dirección de la curva de distribución de la marcación se refleja en el gráfico de valores históricos de la marcación. En condiciones de fuerte interferencia, el valor angular de un máximo muestra una dirección preferente de la dirección del movimiento del radiogoniómetro.

Los gráficos de valores históricos de amplitudes y marcaciones de la Fig. 3.6–15 proporcionan información muy útil para la radiorrecalada en tiempo real. En este ejemplo, el aumento gradual de la amplitud de la señal desde –50 dBmV hasta –30 dBmV y los valores de marcación en la parte inicial de los gráficos confirma que durante ese periodo (desde 14.07.45 hasta aproximadamente 14.08.45 en la Fig. 3.6–15), la estación de comprobación técnica móvil estuvo moviéndose hacia el transmisor. Posteriormente (desde aproximadamente 14.08.45, véase la Fig. 3.6–15), el transmisor se situó a la izquierda del vehículo pues las marcaciones giraron sistemáticamente hacia la izquierda y la amplitud de la señal comenzó a disminuir sistemáticamente. Para localizar el transmisor de la señal, la estación de comprobación técnica móvil debería girar 180º, volver por el mismo camino y buscar el transmisor al lado derecho de la estación.

FIGURA 3.6–15

Ventana del programa en modo radiorrecalada



Spectrum-3.6-15

La radiorrecalada mediante gráficos históricos de amplitud y marcación implica, entre otras ventajas, un aumento de la fiabilidad, un tiempo de búsqueda menor y la reducción del efecto de los errores causados por los objetos circundantes debido a que la estación móvil se mueve continuamente y la dirección más probable del transmisor de la señal viene determinado por el procesado estadístico de los datos de marcación obtenidos de forma continua.

3.6.2.2.6 Búsqueda automática del emplazamiento de fuentes de emisiones electromagnéticas

Una estación móvil equipada con un sistema de radiogoniometría de alta velocidad por correlación /interferometría que proporcione información de radiogoniometría (acimut y elevación) permite localizar fuentes tales como un transmisor, un equipo de consumo en ondas decamétricas o un equipo médico y otras fuentes de interferencia radioeléctrica [Ashikhmin *et al*., 2003], [Rembovsky *et al.*, 2006]. La estación móvil también debería estar equipada con una cámara de video y un software a medida.

Una sesión de investigación sobre una gama de frecuencias en concreto conlleva realizar los tres pasos siguientes:

Paso 1: Compilación de tramas de datos en bruto.

Paso 2: Análisis de las tramas y determinación con más detalle de las frecuencias a analizar.

Paso 3: Análisis de las frecuencias de la lista y determinación exacta de la ubicación de las fuentes.

La estación móvil se sitúa sucesivamente en varios puntos en la cercanía del lugar investigado y en otros situados a distancias relativamente grandes (véase la Fig. 3.6–16). En cada posición se recopila una ‘trama’ de datos en bruto.

Los datos son los siguientes:

– datos espectrales y de marcación (frecuencia, nivel, acimut y elevación),

– imágenes tomadas con cámaras digitales del emplazamiento que describan los límites angulares del mismo vistos desde la posición de la estación.

Debido a los efectos de la propagación multitrayecto y de otros efectos locales, en condiciones urbanas el análisis de la marcación se basa en métodos probabilísticos. Idealmente, la posición debiera elegirse de

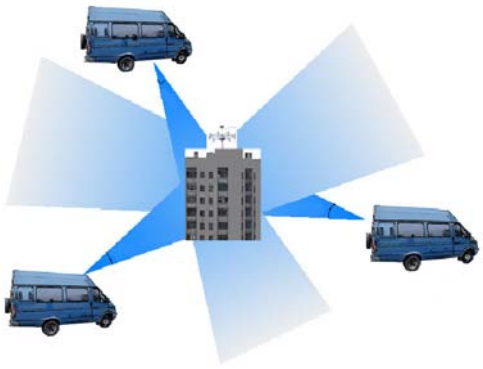
forma que el lugar supervisado permanezca bajo visibilidad directa y no haya edificios altos ni grandes estructuras metálicas cerca de la estación móvil. Cuantas más tramas obtenidas desde distintas posición se utilicen, más precisión tendrá la exactitud de la localización de la posición.

Durante el *Paso 2*, los datos brutos recopilados se utilizan para obtener una lista de frecuencias que deben ser estudiadas teniendo en cuenta que el acimut y la elevación medidos a una frecuencia deberán estar dentro de los límites angulares del emplazamiento en dos o más tramas y que el nivel de señal medido desde una posición lejana será mucho más débil que desde una posición cercana. La Fig. 3.6–17 muestra las pantallas que ofrece el sistema en casos en que la lista de frecuencias se obtiene en base a tres tramas desde posiciones lejanas y otras tres desde posiciones cercanas. El programa muestra las imágenes digitales obtenidas en las inmediaciones del emplazamiento. El análisis de las mismas permite identificar una señal transmitida a 300,25 MHz que está presente en las seis tramas, con un ángulo de llegada dentro de los límites angulares del emplazamiento. La posición más probable del transmisor está en la primera planta (cuarta o quinta ventana del edificio desde la izquierda)

Durante el *Paso 3*, la lista de frecuencias se analiza en base a las mediciones radiogoniométricas desde posiciones cercanas. Los datos de radiogoniometría se superponen con imágenes de video del emplazamiento en tiempo real y el operador se mantiene atento y escucha la señal. Para aumentar la fiabilidad, la estación puede situarse en varios emplazamientos.

FIGURA 3.6–16

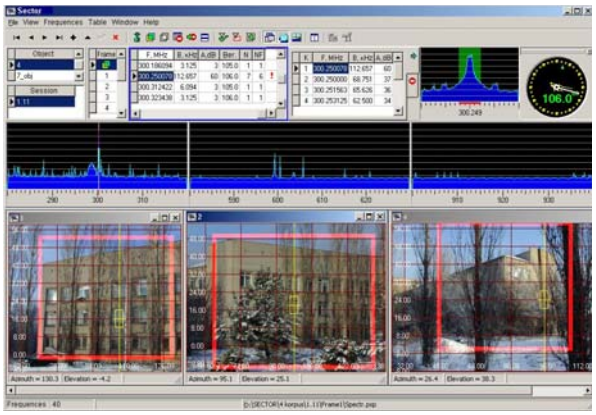
Una sesión operacional de la estación móvil incluye varias tramas



Spectrum-3.6-16

FIGURA 3.6–17

Vista de la pantalla del módulo de análisis tras el segundo paso



Spectrum-3.6-17

3.6.2.2.7 Visualización de zonas de cobertura de estaciones de comprobación técnica del espectro en ondas métricas y decimétricas

Actualmente existe software predictivo que permite que las estaciones de comprobación técnica determinen sus zonas de cobertura, algo que es particularmente útil para las estaciones móviles. La experiencia práctica muestra [Bondarenko *et al*., 2008] que la metodología [Kogan y Pavlyuk, 2004] y el software (véase el "Estudio de caso práctico 9" en el capítulo 5 del "Manual de técnicas informatizadas para la gestión del espectro", Edición de 2005) para la planificación y diseño de redes de comprobación técnica del espectro pueden utilizarse satisfactoriamente para automatizar la visualización de zonas de cobertura de estaciones de comprobación técnica fijas y especialmente de estaciones móviles en ondas métricas y decimétricas. Esta herramienta permite también determinar condiciones de interacción de estaciones de comprobación técnica fijas y móviles cuando realizan diversas funciones de comprobación técnica que aumentan la eficiencia operacional de las estaciones.

El ejemplo de la Fig. 3.6–18 ilustra dichas funciones. Los cálculos se realizaron utilizando un conjunto de parámetros de entrada descritos en [Kogan y Pavlyuk, 2004].

En la Fig. 3.6–18a) se muestra la topografía de la región analizada. Incluye algunas colinas con diferencias de altura de hasta 120 m. Supóngase que hay tres estaciones fijas de radiogoniométrica / comprobación técnica alrededor de la ciudad (FS1, FS2 y FS3) con un valor eficaz (r.m.s.) de la incertidumbre de radiogoniometría de 1º, y una estación móvil (MOB) con valor eficaz (r.m.s.) de la incertidumbre radiogoniométrica de 2º, es decir, en el primer caso situada inicialmente bastante lejos del grupo de estaciones fijas.

En las figuras 3.6–18b) y 3.6–18c) se presentan las zonas de cobertura de todas las estaciones cuando la estación móvil permanece bastante lejos del grupo de estaciones fijas. La Fig. 3.6–18b) corresponde a una altura de la antena de la estación móvil de H_a = 2 m (instalada sobre el techo del vehículo) y la Fig. 3.6–18c) a una H_a = 10 m (mástil de antena elevado). La línea roja dentro de la zona de cobertura radiogoniométrica muestra los límites de una zona para la que se realiza la localización por triangulación.

En las figuras 3.6–18b) y 3.6–18c) también se muestra que si la estación móvil está en esa posición y conectada a una red de comprobación técnica conjunta con las estaciones fijas, sólo puede interaccionar con ellas cuando realiza la función de escucha en el territorio común o intersección de todas las zonas de cobertura. Elevar el mástil de antena hasta 10 m aumenta significativamente la cobertura de todas las funciones de comprobación técnica excepto la localización.

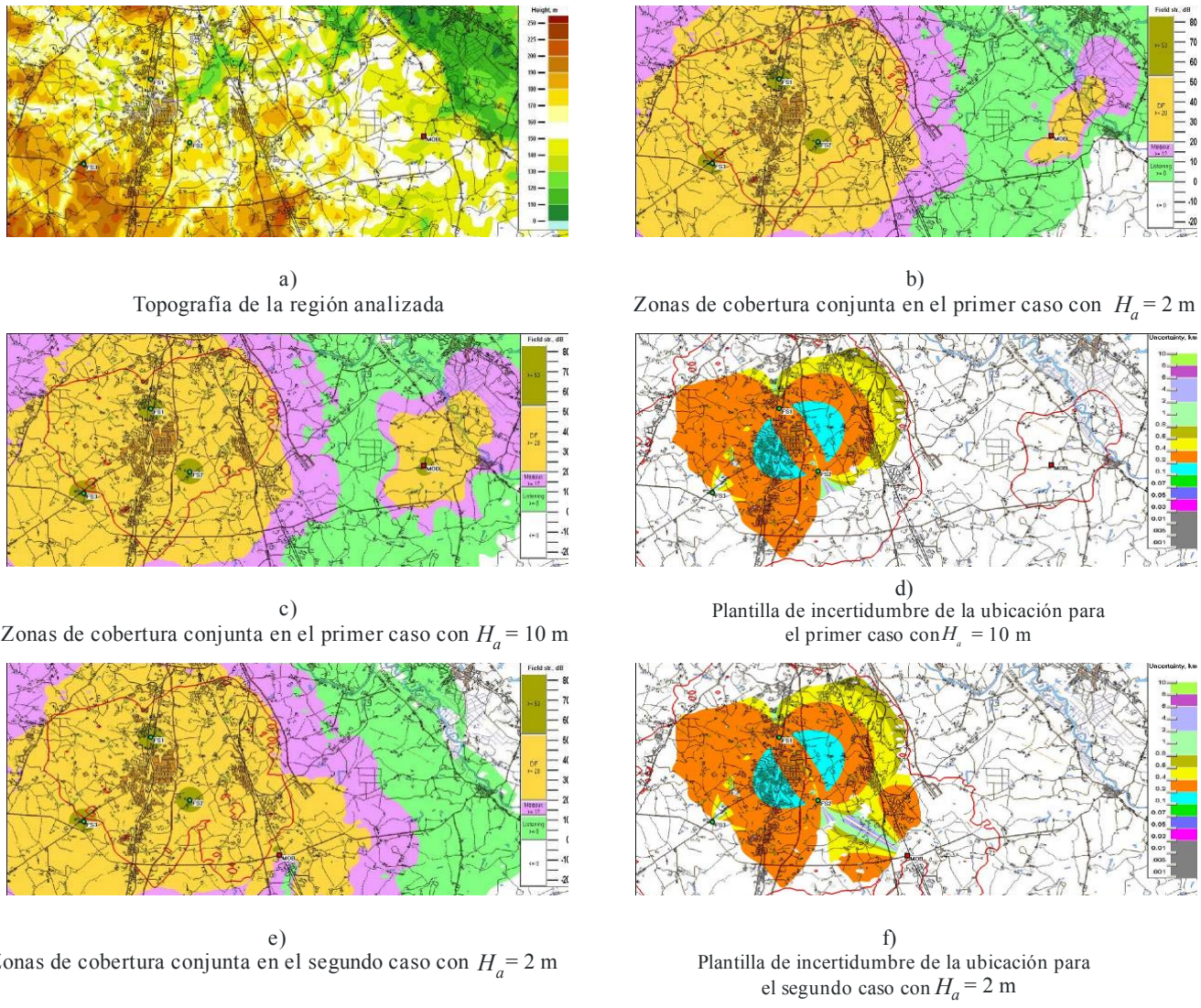
En la Fig. 3.6–18d) se presenta la plantilla de cobertura de posición cuyos límites exteriores corresponden a la línea roja situada dentro de las zonas de cobertura de radiogoniometría de las Figs. 3.6–18b) y 3.6–18c). Las zonas de diferentes colores de la plantilla reflejan distintos niveles de incertidumbre de posición (km) según el índice de colores a la derecha de la figura. La estación móvil no influye en absoluto en la plantilla. La línea roja exterior se corresponde con los límites de las zonas de cobertura conjunta de radiogoniometría de las Figs. 3.6–18b) y 3.6–18c).

En la Fig. 3.6–18e), que recoge el segundo caso, se presenta la cobertura de todas las estaciones cuando la estación móvil, con una antena de 2 m de altura, permanece en la cumbre de una colina muy próxima al grupo de estaciones fijas. Los cálculos muestran que en esta situación elevar el mástil de la antena a una altura de 10 m no mejora significativamente la situación.

En el segundo caso la cobertura radiogoniométrica de las estaciones fijas y móviles tienen zonas comunes, es decir, que las estaciones móviles y fijas pueden interaccionar en la función de triangulación de posición. Ello se muestra en la Fig. 3.6–18f), en la que se amplía la plantilla en dirección sudeste. En [Bondarenko *et al*., 2005] pueden encontrarse detalles y explicaciones adicionales.

FIGURA 3.6–18

Ejemplo de representación de la zona de cobertura



a) Topografía de la región analizada

b) Zonas de cobertura conjunta en el primer caso con H_a = 2 m

c) Zonas de cobertura conjunta en el primer caso con H_a = 10 m

d) Plantilla de incertidumbre de la ubicación para el primer caso con H_a = 10 m

e) Zonas de cobertura conjunta en el segundo caso con H_a = 2 m

f) Plantilla de incertidumbre de la ubicación para el segundo caso con H_a = 2 m

Spectrum-3.6-18

La breve descripción anterior demuestra el gran potencial de la herramienta de visualización de zonas de cobertura de comprobación técnica para realizar operaciones periódicas de las estaciones de comprobación técnica fijas y, especialmente, móviles. Con dichas herramientas, los operadores de las estaciones de comprobación técnica tienen "ojos" para ver las zonas de cobertura reales de cada estación o de grupos de estaciones combinadas en una red local conjunta mediante varias funciones de comprobación técnica, así como la producida por la interacción de estaciones móviles con las estaciones más cercanas durante sus misiones. Hoy día es posible determinar la ganancia que puede conseguir una estación móvil desplegando una antena semiestacionaria, pudiéndose decidir la no dedicación de tiempo a dicha acción si la ganancia que puede conseguirse en un lugar determinado es despreciable. Por tanto, los operadores pueden estar, por primera vez, plenamente informados de la situación que están analizando. Esta técnica también permite supervisar la futura ruta de una estación móvil de comprobación técnica antes de realizar la misión propiamente dicha, y elegir los mejores emplazamientos para realizar observaciones a lo largo de la ruta a fin de optimizar la misión y acortar su duración.

3.6.3 Redes informatizadas de comprobación técnica

3.6.3.1 Introducción

Las estaciones de comprobación técnica del espectro deben mantenerse comunicadas mediante una red informatizada y conectadas al sistema de gestión del espectro de la administración, tal como se recomienda en la Recomendación UIT–R SM.1537. La gestión y la comprobación técnica del espectro incluyen un conjunto de actividades administrativas y técnicas que pueden llevarse a cabo adecuadamente en el marco de un sistema interconectado e integrado.

La *gestión del espectro* se traduce, en última instancia, en la concesión de licencias o autorizaciones. Para realizar estas tareas de gestión, es esencial disponer de una base de datos informatizada. Dicha base de datos, que incorpora datos administrativos y técnicos tales como frecuencias asignadas, titulares de las licencias, características de los equipos, etc., constituye el núcleo fundamental del sistema informatizado automático de gestión del espectro.

La *comprobación técnica del espectro* permite verificar si las frecuencias se utilizan de conformidad con las disposiciones recogidas en la autorización o licencia, y realiza mediciones de la ocupación del espectro mediante estaciones de comprobación técnica.

Existe una relación importante e indisoluble entre la gestión del espectro y su comprobación técnica; debe mantenerse una estrecha cooperación entre ambas actividades de manera que las tareas de comprobación técnica del espectro sean de utilidad para la gestión del espectro.

Las áreas principales de interacción entre la gestión y la comprobación técnica del espectro son las siguientes:

- la gestión del espectro establece la lista oficial de frecuencias asignadas sobre las que realizar comprobación técnica de las emisiones;
- la gestión del espectro proporciona instrucciones generales sobre las bandas que deben explorarse y sobre tareas específicas de la comprobación técnica;
- la gestión del espectro solicita a la comprobación técnica del espectro que realice tareas específicas: por ejemplo, atención de reclamaciones de interferencia, con el objetivo de resolver el problema y realización de mediciones de ocupación en las frecuencias a asignar;
- la comprobación técnica del espectro permite realizar mediciones de los parámetros técnicos y verificar el cumplimiento técnico de los transmisores, identificar transmisores sin licencias o que no cumplen lo especificado y detectar problemas específicos.

La interacción entre los sistemas de gestión del espectro y los sistemas informatizados de comprobación técnica del espectro permite optimizar el funcionamiento tanto desde el punto de vista de la eficacia en la explotación de los sistemas como de la reducción de costos. El sistema se organiza en torno a una base de datos informatizada asociada a las computadoras personales utilizadas. La base de datos es el núcleo de todas las funciones y de las aplicaciones conexas, a saber, actualización de los datos, facturación, asignación de frecuencias, etc., así como la actualización de los parámetros técnicos de frecuencias y transmisores.

3.6.3.2 Sistemas nacionales informatizados integrados

Un sistema nacional informatizado de gestión y comprobación técnica del espectro integrado se basa en uno o más servidores de datos con una red, de manera que las estaciones de trabajo o los clientes del sistema puedan acceder a la base de datos. Los servidores del sistema de gestión incluyen un servidor principal y ocasionalmente uno o más servidores para una base de datos extraída de la base de datos principal y/o una base de datos especializada en una aplicación o en un centro de control local. Cada estación de comprobación técnica, sea fija o móvil, cuenta con un servidor de medición y una o más estaciones de trabajo, como se ilustra en la Fig. 3.6–2. Cada estación utiliza una arquitectura modular basada en computadores de servidor y de estación de trabajo interconectados a través de una LAN Ethernet.

Todas las estaciones que están conectadas constituyen una red de área extensa. Este sistema completamente integrado debe proporcionar a cualquier posición de operador un rápido acceso a cualquiera de las funciones del servidor disponibles. Esta configuración del sistema se representa en el diagrama de bloques de la Fig. 3.6–1.

El servidor principal contiene una base de datos relacional que está cargada con los datos administrativos o técnicos de la red regional o nacional, con un contenido de datos recomendado por el Manual del UIT–R Técnicas Informatizadas para la Gestión del Espectro y la Recomendación UIT–R SM.1370. Este servidor normalmente es un sistema basado en lenguaje de interrogación estructurado (SQL, *structured query language*) que permite al usuario el acceso adecuado para consultar fácilmente la base de datos. Las bases de datos modernas proporcionan sistemas y datos redundantes junto con un sistema de seguridad periódico. La base de datos con una red de computadores distribuida permite la implantación de una arquitectura cliente/servidor y un sistema informatizado distribuido:

- el servidor de la base de datos centraliza la gestión de datos facilitando de esa forma la seguridad y manteniendo un elevado nivel de integridad; contiene datos sobre aplicaciones, licencias, emplazamientos, equipos, facturación, asignación de frecuencia, etc.; algunas partes de esta base de datos pueden copiarse opcionalmente a servidores locales o móviles para aplicaciones específicas;
- las estaciones de trabajo de gestión, supervisión e introducción de datos son computadores personales que permiten cargar la base de datos con parámetros administrativos y técnicos y que son utilizadas por el personal de gestión y comprobación técnica para la gestión de frecuencias, la comprobación técnica de las emisiones, etc.

El soporte lógico de la base de datos debe proporcionar la entrada de datos electrónica a partir de una base de datos precedente, en caso de existir, de manera directa o a través de un programa de conversión de datos especialmente preparado.

3.6.3.2.1 Funcionamiento de la red de estaciones automatizadas

En un sistema integrado, el sistema de gestión debe tener una interfaz con las estaciones de comprobación técnica a través de una red de área extensa para permitir la asignación de tareas a distancia y de forma local, así como para realizar informes desde las estaciones de comprobación técnica. Las tareas de dichas estaciones de comprobación técnica incluyen mediciones sistemáticas de conformidad con las Recomendaciones UIT–R, tales como ocupación del espectro, parámetros de la señal, y mediciones de radiogoniometría en una frecuencia específica, que deban realizarse tras una reclamación. Los servidores de mediciones (descritos en el punto 3.6.2.2) que se encuentran en las estaciones que realizan las tareas ejecutan automáticamente las mediciones solicitadas. Esta información se pone a disposición del personal de supervisión como informes alfanuméricos o gráficos.

Los informes de comprobación técnica pueden incluir resultados de mediciones o representaciones geográficas de una zona o región de cobertura con:

- emplazamientos de las estaciones de comprobación técnica,
- emplazamientos de transmisores conocidos,
- resultados de las marcaciones radiogoniométricas de las estaciones para localizar el transmisor.

Las estaciones de comprobación técnica pueden ser fijas o móviles y algunas de ellas son útiles en un sistema nacional informatizado. Las estaciones fijas son apropiadas para realizar comprobaciones en las bandas de ondas decamétricas, donde la propagación normalmente es de largo alcance a través de la onda ionosférica. Las estaciones fijas situadas cerca de zonas urbanas son también útiles para realizar comprobaciones técnicas en las bandas de ondas métricas y decimétricas en dichas zonas urbanas.

Las estaciones móviles y transportables son adecuadas para realizar comprobaciones técnicas en las bandas de ondas métricas, decimétricas y centimétricas (y en la onda de superficie de las ondas decamétricas), puesto que en estos casos la propagación es de menor alcance y el sistema de medición normalmente debe desplazarse a la zona de interés. También son necesarias en muchos casos en que deben localizarse con precisión estaciones ilegales o fuentes de interferencia.

3.6.3.2.2 Acceso remoto a recursos del sistema

Los sistemas integrados, interconectados y multitarea con arquitectura cliente/servidor anteriormente descritos en el punto 3.6.2.2, normalmente permiten a un cliente acceder desde cualquier estación a los recursos de algunos o todos los servidores de mediciones, tanto los que están en el mismo emplazamiento del cliente como los que se encuentran en otras estaciones. Por consiguiente, todos los recursos de una red multiestación están disponibles para un operador determinado siempre que cuente con la adecuada autorización para acceder a todos estos recursos.

Las estaciones de comprobación técnica pueden controlarse a distancia desde una estación de trabajo en un centro de comprobación técnica del espectro, en el centro de gestión del espectro o en el centro de control local o pueden controlarse localmente en la propia estación y los resultados de la comprobación técnica pueden devolverse a dicha estación de trabajo. Este control remoto engloba a todos los operadores de comprobación técnica del espectro que desean trabajar desde un emplazamiento central y no desplazarse a ubicaciones de comprobación técnica distantes, siempre que la situación no exija el desplazamiento de un operador de comprobación técnica experimentado a dicha ubicación. Es necesario que los operadores analicen los datos medidos y validen todos los datos antes de su introducción en una base de datos central.

Los enlaces de comunicaciones entre estaciones sólo deben estar disponibles cuando un cliente solicita una tarea a servidores remotos y posteriormente cuando el cliente pide los resultados de dicha tarea; si los enlaces de comunicación están disponibles cuando se solicita la tarea, aunque posteriormente estén indisponibles, los resultados de las mediciones no se pierden sino que se mantienen en el servidor de mediciones hasta que se solicitan.

3.6.3.2.3 Detección automática de infracciones

Un sistema integrado de gestión y comprobación técnica del espectro puede comparar las mediciones obtenidas por el sistema de comprobación técnica con la información que figura en la licencia obtenida por el sistema de gestión para efectuar la detección automática de infracción –para identificar las frecuencias en las cuales hay transmisores que no están incluidos en la base de datos de licencias concedidas, y para identificar los transmisores que no están funcionando dentro de la gama de los parámetros establecidos en la licencia. La detección automática de infracciones permite al operador definir una gama de comprobaciones técnicas especificando las frecuencias inicial y final de la banda o bandas que van a comprobarse y determinar los parámetros de comprobación, incluido el periodo de tiempo durante el cual va a realizarse.

El sistema debe poder explorar la gama de frecuencias especificada durante el periodo de tiempo especificado. El sistema utiliza las mediciones obtenidas de la exploración y utiliza la información de la base de datos de las licencias para determinar qué señales en el espectro medido no se encuentran en dicha base de datos de las licencias, proporcionando automáticamente una lista de las frecuencias utilizadas que no figuran en la base de datos. El sistema también verifica los parámetros de la señal, tales como la anchura de banda, la desviación de la frecuencia central por sobremodulación, y desencadena señales de alarma cuando encuentra infracciones. Por tanto, alerta al operador sobre la existencia de señales no esperadas o que no cumplen con los parámetros especificados, basándose criterios aplicables por defecto o en parámetros de búsqueda especificados por el propio operador, y proporciona las bases para realizar un examen más detenido por el operador. Los resultados de la detección automática de infracciones, incluida la información sobre emisores sin licencia o que no cumplen los parámetros establecidos por frecuencia o por canal, se muestran en una pantalla de resultados. Una pantalla con un mapa geográfico similar a la de la Fig. 3.6–4 puede representar los emplazamientos de las estaciones que tienen licencia e indicar los emplazamientos de los emisores sin licencia o no conformes.

Para facilitar el proceso de detección automática de infracción y asegurar que es operativo aun en el caso de indisponibilidad de comunicaciones entre las estaciones, cada cliente, sobre una estación fija o móvil, debe mantener su propia base de datos de estaciones con licencia en su zona de funcionamiento. Esta base de datos se debe obtener a partir de la base de datos del sistema de gestión. Con la disponibilidad de esta base de datos local, cada estación fija y móvil puede continuar funcionando y realizar la detección automática de infracción aun cuando las comunicaciones no estén disponibles.

3.6.3.2.4 Ejemplo de protocolo de transferencia de la comprobación técnica radioeléctrica para la explotación de muchas estaciones de comprobación técnica desde una estación de control

Un sistema de gestión del espectro y de comprobación técnica del espectro puede incluir equipos de varios fabricantes.

Para construir con dichos equipos un sistema integrado es recomendable que una única estación de control, con usuarios locales y distantes, opere estaciones de comprobación técnica distantes fijas y móviles de los diferentes fabricantes. Dado que por lo general los fabricantes consideran que deben utilizarse los protocolos de comunicación y control propios de cada uno de ellos, en el caso del ejemplo, el centro de control utiliza un protocolo de transferencia de comprobación técnica radioeléctrica (RMTP). En la Fig. 3.6–19 se muestra la estructura del flujo de datos.

FIGURA 3.6–19

Estructura del software de la red de comprobación técnica



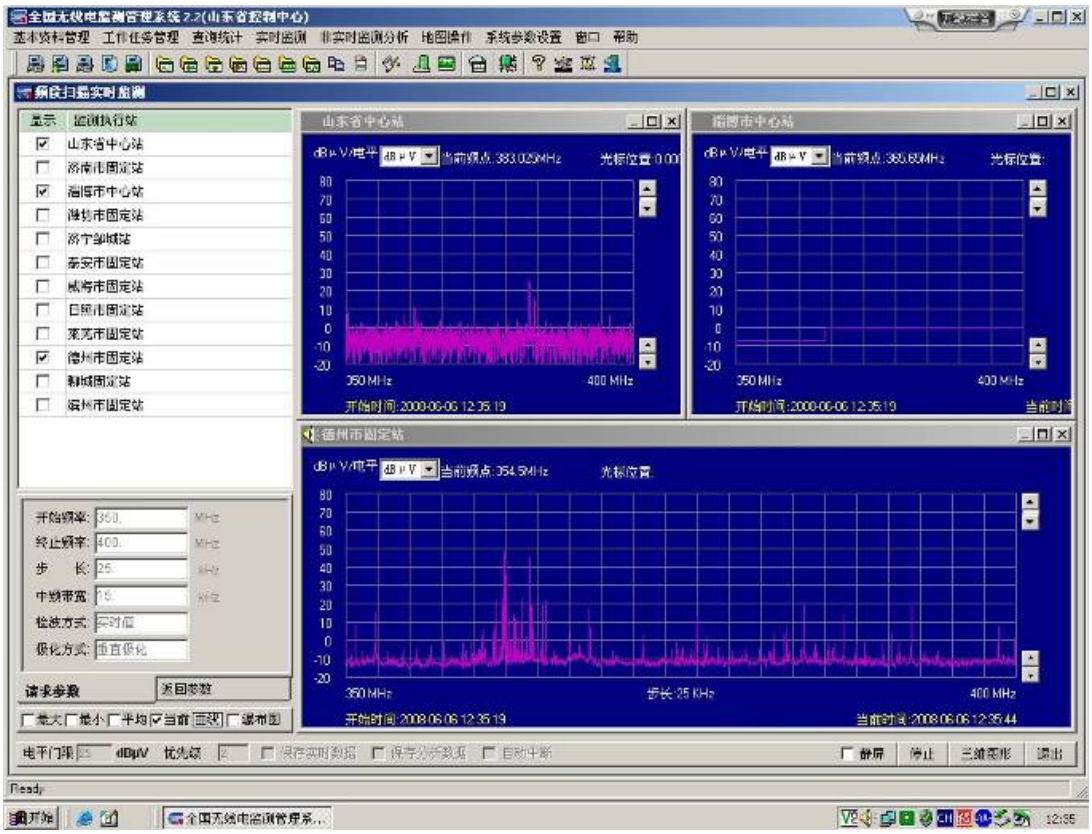
Spectrum-3.6-19

El centro de control puede obtener información sobre el estado de las estaciones distantes que están en línea, abrir ventanas para controlar sus receptores y fijar parámetros de las tareas a realizar por las estaciones distantes, solicitar mediciones técnicas y mediciones radiogoniométricas, explorar determinadas bandas de frecuencias utilizando anchuras de banda específicas y realizar otras funciones típicas de los sistemas de comprobación técnica.

El centro de control puede obtener los resultados de mediciones, representar sobre mapas geográficos en pantalla la información de radiogoniometría y de localización, tener una vista panorámica de la información (siempre que los canales de comunicación tengan suficiente anchura de banda para la visualización en tiempo real), visualizar representaciones gráficas del espectro, visualización en cascada y otros datos de comprobación técnica del espectro. El centro de control puede comparar las mediciones realizadas con las bases de datos de licencias a fin de determinar en qué frecuencias puede haber estaciones emitiendo sin licencia e identificar frecuencias incluidas en licencias otorgadas que, sin embargo, no se están utilizando.

FIGURA 3.6–20

Ejemplos de espectros medidos en tres estaciones de comprobación técnica



Spectrum-3.6-20

Aunque las mediciones de datos de comprobación técnica se realicen con equipos de distintos fabricantes, todos los datos se reciben desde las estaciones de comprobación técnica distantes utilizando el protocolo RMTP y se muestran en las pantallas del centro de control. En la Fig. 3.6–20 se muestra el ejemplo de una pantalla del centro de control, con representaciones del espectro de tres estaciones de comprobación técnica distantes producidos por receptores de fabricantes distintos. En algunos casos los espectros son muy distintos porque las estaciones están muy alejadas entre sí. Ambas pantallas muestran en la esquina superior izquierda una lista con todas las estaciones que están en línea y que pueden ser seleccionadas desde el centro de control para tareas de comprobación técnica o de radiogoniometría, y en la esquina inferior izquierda se pueden introducir parámetros, incluyendo arranque, parada, saltos de frecuencia, anchura de banda, polarización, demodulación, etc.

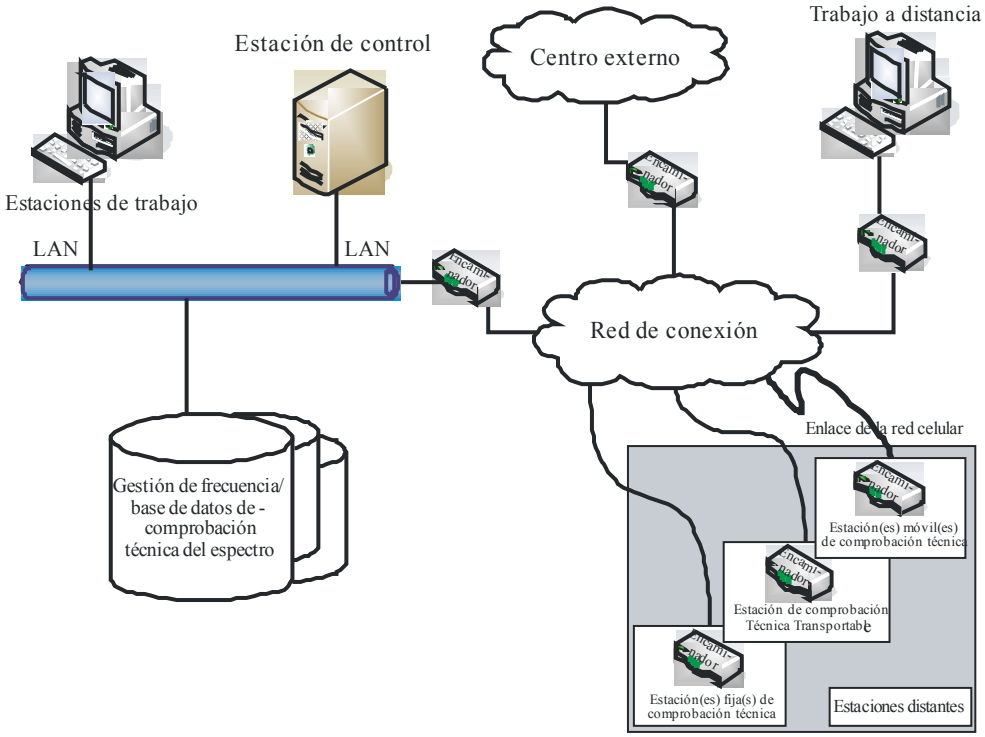
Aunque este ejemplo sea de estaciones de comprobación técnica situadas en un mismo país, el RMTP puede utilizarse para establecer una red entre estaciones situadas en distintos países que puedan ser controladas desde uno o más centros de control. Ello permitiría a administraciones de diferentes países compartir recursos, por ejemplo, para utilizar radiogoniómetros situados en otros países a fin de mejorar la precisión de la localización de transmisores sin licencia.

3.6.3.3 Ejemplo de un sistema automatizado en ondas decamétricas, métricas y decimétricas

En este ejemplo de comprobación técnica del espectro se ha supuesto que existe una red de sistemas de comprobación técnica (véase la Fig. 3.6–21) que consta de cierto número de estaciones distantes conectadas a una estación de control a través de una red de comunicaciones normalizada.

FIGURA 3.6–21

Ejemplo de sistema informatizado para las bandas decamétricas, métricas y decimétricas



Los elementos que componen este sistema tienen las características siguientes

a) Las estaciones de trabajo del operador, que realizan las tareas de comprobación técnica radioeléctricas descritas en el capítulo 2 de este Manual.

b) Las estaciones de control, que realizan la gestión y supervisión del sistema, planifican y asignan recursos, encaminan los mensajes, gestionan las averías y el horario de funcionamiento del sistema.

c) Las estaciones distantes, que pueden incluir diversos equipos de comprobación técnica para asegurar parte o todas las tareas de comprobación técnica descritas en el capítulo 2 de este Manual.

Las estaciones remotas pueden clasificarse en cuatro tipos cada uno de los cuales puede utilizar distintas bandas de frecuencia:

– Estación fija atendida o no atendida
– Estación transportable en un contenedor móvil y conectada a la estación de control a través de un enlace de datos fijo o inalámbrico
– Estación móvil en vehículo y conectada a la estación de control a través de un enlace de datos fijo o inalámbrico
– Estación portátil en una caja y conectada a la estación de control a través de un enlace de datos fijo o inalámbrico.

Todas las estaciones remotas son completamente automáticas y están supervisadas por un operador desde el centro de control de operaciones. Para cada estación distante de comprobación técnica se han desarrollado dos posibles formas de trabajo:

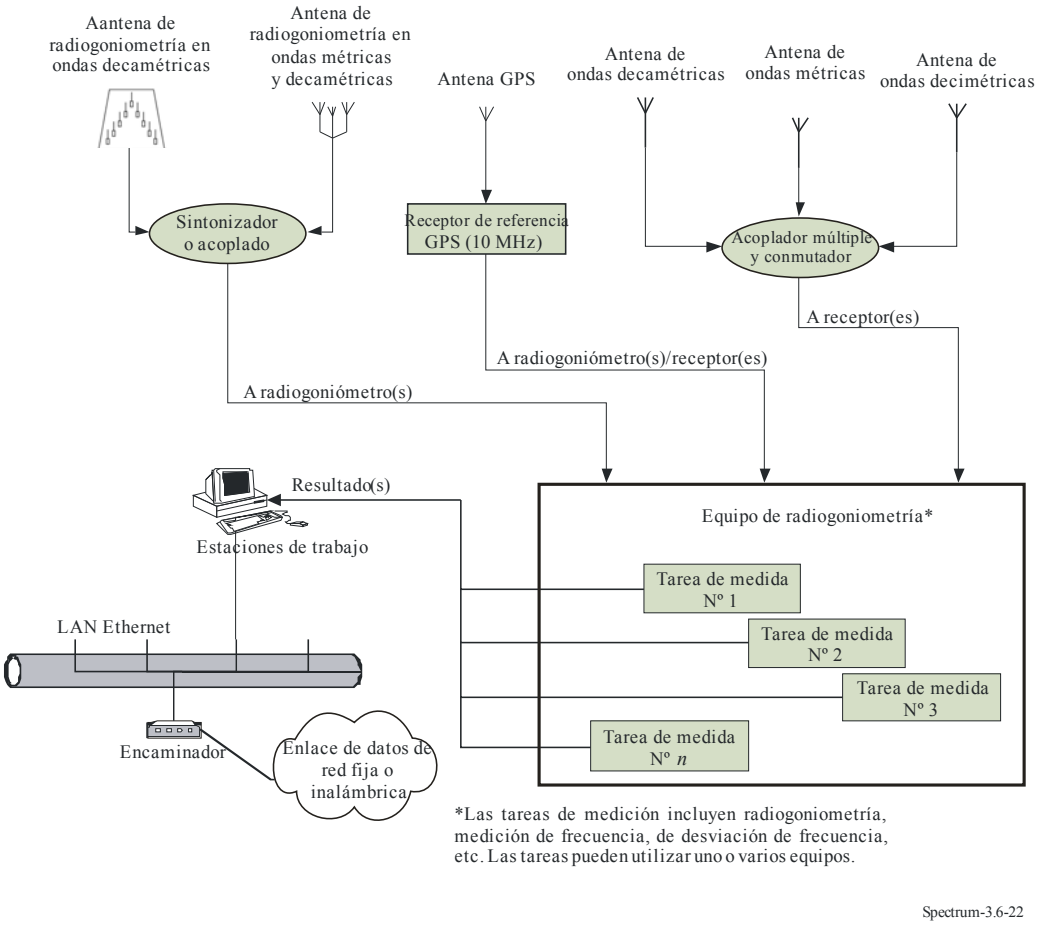
– Primero, funcionamiento con control en línea de la estación, que permite que un operador utilice la estación distante como si fuera una estación local.

– Segundo, funcionamiento en modo programado o en modo por lotes, que permite la carga de un conjunto de parámetros para poder realizar una campaña de medidas automáticas durante un periodo dado.

En la Fig. 3.6–22 se muestra un ejemplo de estación distante en ondas decamétricas, métricas y decimétricas.

FIGURA 3.6–22

Ejemplo de estación distante en ondas decamétricas, métricas y decimétricas



3.6.4 Equipo para elaboración de informes y software de sistemas automatizados

Los modernos sistemas de comprobación técnica del espectro incluyen software que permite generar informes. Aunque dichos informes se basan en mediciones realizadas, también pueden tomar datos de los diferentes registros disponibles en las bases de datos de gestión del espectro y de comprobación técnica. Hay disponibles una gran variedad de informes, incluyendo información en bruto de rastreo, análisis de portadoras por fecha o banda de frecuencias, estadísticas de ocupación de canales y de disponibilidad, estadísticas de longitud de mensajes, estadísticas de potencia de los canales, ficheros de registros en el sistema y de alarmas y plan de comprobación técnica e informes planificados.

En la Fig. 3.6–23 se muestra un típico informe automatizado. El sistema debe permitir la adaptación o personalización de los informes de acuerdo con los requisitos del operador.

Los informes deben poder generarse automáticamente a partir de cualquier pantalla de resultados. El operador especifica el tipo de informe que desea y los datos de mediciones que deben utilizarse; el operador activa una función “Informe” que genera automáticamente el texto del informe en la correspondiente pantalla.

Frecuentemente se prefiere que los informes tengan un formato gráfico por ser la forma más adecuada para examinar los datos pues proporcionan una visión resumida de la información y permiten identificar tendencias y excepciones más fácilmente. Gracias a la utilización del color, un único gráfico aporta mucha más información.

Un sistema moderno debe ofrecer la misma capacidad de generación automática de informes independientemente de que se trate de una unidad móvil, una estación fija o un sistema de gestión. El software típico de sistema permite crear de forma remota un informe basado en datos procedentes de distintas ubicaciones.

FIGURA 3.6–23

Representación parcial de un típico informe de ocupación informatizado

Occupancy vs. Channel

Task No.:	433	Storage Interval:	15 secs
Operator ID:	TRN1	Msb Length:	15 secs
Schedule Time:	05/02/2010 2:45:49 PM	Threshold Method:	Noise Riding 10 dB
Completion Time:	05/02/2010 3:15:50 PM	Duration:	Fixed: 30 mins
Site Location:	S 23 24' 47.5"	Band No.:	1
	W142 01' 56.8"	Bandwidth:	12.5 kHz
StartFreq:	152.112500 MHz		
StopFreq:	152.450000 MHz	NumChannels:	28

Channel:	Frequency:	Maximum occupancy (%):	Average occupancy (%):	Field strength (dB(µV/m))	
				Max.	Avg.
1	152.112500	0	0	0	0
2	152.125000	0	0	0	0
3	152.137500	53	6	5	4
4	152.150000	48	9	20	15
5	152.162500	100	100	8	7
6	152.175000	40	8	33	26
7	152.187500	37	6	28	21
8	152.200000	0	0	0	0
9	152.212500	0	0	0	0
10	152.225000	13	1	5	4
11	152.237500	20	4	39	38
12	152.250000	20	4	39	38
13	152.262500	90	71	21	17
14	152.275000	100	91	29	25
15	152.287500	0	0	0	0
16	152.300000	23	2	7	5
17	152.312500	0	0	0	0
18	152.325000	26	3	9	8

Spectrum-3.6-23

Referencias

ASHIKHMIN, A., KOZMIN, V., SHADRIN, I., STOPKIN, V. y ZHUKOV, A. [2003] Detection of EM–Wave Transmitters by means of Mobile Radio Control and Direction Finding Stations. *Spetsialnaya Tekhnika*, **5**, (http://www.ircos.ru/eng/articles.htm).

BONDARENKO, K., KRUTOVA, O. y PAVLYUK, A. [June, 2008] Visualization of coverage areas of VHF/UHF spectrum monitoring stations in the course of their routine operations. Proceedings of the Nineteenth International Wroclaw Symposium on EMC, Wroclaw, Polonia.

KOGAN, V. y PAVLIOUK, A. [June, 2004] Methodology of spectrum monitoring networks planning. Proceedings of the Seventeenth International Wroclaw Symposium on EMC, Wroclaw, Polonia.

REMBOVSKY, A., ASHIKHMIN, A. y KOZMIN, V. [2006] *Radiomonitoring: Problems, Methods and Equipment*. Moscow, Goriachaya Liniya–Telekom press (http://www.ircos.ru/eng/articles.htm).

Recomendaciones del UIT–R:

NOTA – Se insta al lector a que utilice la última edición de cada una de las Recomendaciones referenciadas.

Recomendación UIT–R SM.1050 – Tareas que ha de realizar el servicio de comprobación técnica de las emisiones

Recomendación UIT–R SM.1370 – Directrices de diseño para la elaboración de sistemas avanzados de gestión automática del espectro

Recomendación UIT–R SM.1537 – Automatización e integración de los sistemas de comprobación técnica del espectro con la gestión automática del espectro

Recomendación UIT–R SM.1794 – Sistemas de comprobación técnica del espectro de gran anchura de banda instantánea

CAPÍTULO 4

Mediciones

		Página
4.1	Consideraciones prácticas sobre las mediciones	215
4.1.1	Conceptos básicos de las mediciones	215
4.1.1.1	Atributo o fenómeno a medir	215
4.1.1.2	Condiciones de funcionamiento	215
4.1.1.3	Sistema de medición	215
4.1.1.4	Secuencia de operaciones técnicas	216
4.1.1.5	Resultado de la estimación e incertidumbre conexa	216
4.1.2	Entorno de la medición	216
4.1.2.1	Entorno de laboratorio	216
4.1.2.2	Mediciones sobre el terreno	217
4.1.3	Principios básicos de las mediciones	217
4.1.3.1	Mediciones en el dominio del tiempo y de la frecuencia	217
4.1.3.2	Mediciones (vector-) en los dominios de amplitud y de fase	220
4.1.3.3	Análisis de la transformada rápida de Fourier (FFT)	221
4.1.4	Incertidumbre de la medición	221
4.2	Medición de la frecuencia	222
4.2.1	Consideraciones generales	222
4.2.2	Métodos de medición de frecuencia más comunes aplicados a estaciones de comprobación técnica internacionales	225
4.2.2.1	Método directo de Lissajous	225
4.2.2.2	Método del contador de frecuencia	225
4.2.2.3	Método del analizador de barrido de espectro	226
4.2.3	Métodos de medición de la frecuencia basados en DSP utilizados en estaciones internacionales de comprobación técnica	226
4.2.3.1	Método de medición de la frecuencia instantánea	226
4.2.3.1.1	Principios generales	227
4.2.3.1.2	Calidad de funcionamiento de las técnicas de medición de la frecuencia instantánea	228
4.2.3.2	Método FFT	229
4.2.4	Etapa controlada por cuarzo de un equipo de medición de frecuencias en relación con una frecuencia patrón	230
4.3	Medición del nivel de radiofrecuencia	233
4.3.1	Introducción	233

Página

4.3.2 Detectores de medida 233
4.3.3 Definición de niveles 233
4.3.4 Influencia de la modulación 235
4.3.5 Anchura de banda de medición necesaria 235
4.3.6 Procedimiento de medición con un receptor de medida 237
4.3.7 Procedimiento de medición con un analizador espectral de barrido 237
4.3.8 Medición con un analizador FFT 239
4.3.9 Corrección para señales de banda amplia 240
4.3.10 Problemas típicos detectados 241
4.3.10.1 Señales no deseadas en frecuencias vecinas 241
4.3.10.2 Relaciones señal a ruido bajas 241
4.3.11 Calibración de receptores de medida 243
4.3.12 Errores de medición 243
4.4 Mediciones de intensidad de campo y de densidad de flujo de potencia 245
4.4.1 Consideraciones generales 245
4.4.1.1 Cantidades y unidades de medida 246
4.4.1.1.1 Condiciones de la medición 246
4.4.1.1.2 Intensidad de campo eléctrico y magnético 247
4.4.1.1.3 Intensidad de campo incidente equivalente 248
4.4.1.1.4 Potencia mediana disponible en el receptor 249
4.4.1.1.5 Densidad de flujo de potencia 249
4.4.1.2 División en rangos de frecuencias 250
4.4.2 Elección de los emplazamientos de medición 251
4.4.2.1 Instalaciones fijas 251
4.4.2.2 Instalaciones móviles 251
4.4.2.2.1 Aplicación estacionaria 252
4.4.2.2.2 Mediciones con un medidor de intensidad de campo portátil 252
4.4.3 Métodos de medida 252
4.4.3.1 Mediciones en un punto de medida fijo 253
4.4.3.1.1 Mediciones instantáneas 253
4.4.3.1.2 Mediciones de corta duración y de larga duración 253
4.4.3.1.3 Medición de la distribución espacial de la intensidad de campo 253
4.4.3.2 Mediciones a lo largo de una ruta 254
4.4.3.2.1 Resultados de mediciones móviles de intensidad de campo 254
4.4.3.2.2 Número de puntos de medición necesarios e intervalo de promediación 254
4.4.3.2.3 Velocidad del vehículo 255

Página

4.4.3.2.4 Antenas de medición 255

4.4.3.2.5 Sistemas de navegación y posicionamiento 255

4.4.3.2.6 Recopilación de resultados de mediciones con reducción del volumen de datos 255

4.4.3.2.7 Presentación de los datos 256

4.4.3.3 Comparación de los datos medidos y los datos calculados 256

4.4.3.3.1 Comparación de los valores de intensidad de campo predichos y medidos en la radiodifusión en MF 257

4.4.3.3.2 Software de planificación y bases de datos 257

4.4.3.3.3 Intensidad de campo predicha desde estaciones de comprobación técnica a distancia 257

4.4.3.3.4 Intensidad de campo medida desde estaciones de comprobación técnica a distancia 258

4.4.3.3.5 Comparación de los valores predichos y medidos 258

4.4.4 Evaluación, procesamiento y documentación de los resultados de la medición 259

4.4.4.1 Definición de parámetros estadísticos de la intensidad de campo y densidad de flujo de potencia 259

4.4.4.2 Evaluación de la dependencia espacial y temporal de la intensidad de campo 260

4.4.4.3 Ejemplo de lista de verificación para los datos de coordinación 260

4.4.5 Calibración de los instrumentos y las antenas de medición 262

4.4.5.1 Calibración de los receptores de medición 262

4.4.5.2 Calibración de las antenas de medición 262

4.4.5.2.1 Método de campo normalizado (calibración directa) 262

4.4.5.2.2 Calibración indirecta de antenas 262

4.4.5.2.3 Método de la antena normalizada (método de sustitución) 262

4.4.5.2.4 Método de la distancia normalizada o del emplazamiento normalizado 263

4.4.5.2.5 Cálculo del factor de antena a partir de sus dimensiones y de la distribución de la corriente 263

4.4.5.3 Calibración de las instalaciones fijas de registro 264

4.5 Medición de la anchura de banda 266

4.5.1 Consideraciones generales 266

4.5.1.1 Influencia de la anchura de banda sobre los servicios de radiocomunicación 266

4.5.1.2 Definiciones de anchura de banda 266

4.5.1.3 Comprobación de la anchura de banda de las emisiones en las estaciones de comprobación técnica 268

4.5.1.4 Consideraciones sobre la precisión 268

4.5.2 Métodos de medición de la anchura de banda 269

4.5.2.1 Medición de la anchura de banda ocupada 269

4.5.2.1.1 Método que utiliza un analizador de espectro 269

4.5.2.1.2 Métodos basados en la transformada rápida de Fourier 270

4.5.2.2 Métodos directos de medición de la anchura de banda entre puntos a "x-dB" 273

Página

4.5.2.2.1 Método con un solo filtro paso banda (análisis secuencial del espectro) 276
4.5.2.2.2 Incertidumbre de las mediciones de anchura de banda entre puntos a "x-dB" 276
4.5.3 Condiciones que deben tenerse en cuenta al medir la anchura de banda 277
4.5.3.1 Influencia de la interferencia 277
4.5.3.2 Influencia del ruido 280
4.5.4 Realización práctica de las mediciones de anchura de banda 281
4.5.4.1 Condiciones prácticas de las mediciones 281
4.5.4.2 Requisitos del equipo utilizado en la comprobación técnica 282
4.5.4.2.1 Requisitos del equipo receptor 282
4.5.4.2.2 Equipo para el análisis del espectro 282
4.5.4.2.3 Equipo para el método de la relación de potencias 282
4.5.4.2.4 Equipo que utiliza técnicas FFT 283
4.5.4.3 Método de medición de la anchura de banda ocupada utilizando un analizador de espectro 283
4.6 Medición de la modulación 286
4.6.1 Introducción 286
4.6.2 Principales tipos de instrumentos 286
4.6.3 Modulación analógica 286
4.6.3.1 Modulación de amplitud 286
4.6.3.2 Modulación de frecuencia y modulación de fase 287
4.6.3.3 Medición simultánea de modulación de amplitud y de la modulación de fase/frecuencia 288
4.6.3.4 Modulaciones analógicas especiales 288
4.6.3.4.1 Modulaciones de radiodifusión de TV 288
4.6.3.4.2 Modulación de banda lateral única con portadora suprimida 289
4.6.3.4.3 Modulación de banda lateral independiente 289
4.6.3.4.4 Modulación dinámica de amplitud 289
4.6.4 Modulación digital de portadora única 289
4.6.4.1 Velocidad de símbolos 289
4.6.4.2 Identificación de la modulación y del número de estados de una constelación 290
4.6.4.3 Filtrado de la banda base 295
4.6.4.4 Error de modulación 296
4.6.5 Modulación digital con varias portadoras 298
4.6.5.1 Tipo de modulación 298
4.6.5.2 Número de portadoras y separación entre portadoras 299
4.6.5.3 Duración de los símbolos 299
4.6.6 Errores de medición 301
4.7 Radiogoniometría y localización 302

Página

4.7.1 Consideraciones generales ... 302
4.7.2 Generalidades sobre radiogoniometría ... 302
4.7.2.1 Arquitectura básica, calidad de funcionamiento y problemas ... 303
4.7.2.1.1 Precisión ... 303
4.7.2.1.2 Sensibilidad ... 304
4.7.2.1.3 Efecto de la propagación por trayectos múltiples y de fuentes múltiples ... 305
4.7.2.1.4 Efecto de la despolarización ... 307
4.7.2.1.5 Duración minima de la señal ... 308
4.7.2.2 Técnicas de radiogoniometría ... 308
4.7.2.2.1 Antenas rotatorias ... 308
4.7.2.2.2 Doppler y seudo-Doppler ... 309
4.7.2.2.3 Adcock/Watson Watt ... 310
4.7.2.2.4 Interferómetro de fase ... 311
4.7.2.2.5 Interferómetro de correlación ... 313
4.7.2.2.6 Técnicas de resolución avanzadas ... 315
4.7.2.2.7 Comparación de técnicas de determinación del ángulo de llegada (AOA) ... 316
4.7.2.2.8 Técnicas combinadas de radiogoniometría ... 318
4.7.2.3 Influencia del entorno ... 319
4.7.2.3.1 Precisión de marcaciones de radiogoniometría por debajo de 30 MHz ... 319
4.7.2.3.2 Precisión de marcaciones de radiogoniometría por encima de 30 MHz ... 320
4.7.2.4 Red de control a distancia de estaciones de radiogoniometría ... 320
4.7.3 Localización ... 321
4.7.3.1 Métodos de localización basados en la triangulación y multi-angulación ... 321
4.7.3.1.1 Consideraciones generales ... 321
4.7.3.1.2 Características de la localización en función de la gama de frecuencias ... 322
4.7.3.1.3 Pasos para el cálculo de la localización ... 323
4.7.3.1.4 Distribución de valores de incertidumbre de la localización ... 326
4.7.3.1.5 Visualización en un mapa ... 329
4.7.3.2 Método basado en la diferencia del tiempo de llegada ... 329
4.7.3.2.1 Principios generales ... 329
4.7.3.2.2 Implementaciones de TDOA ... 330
4.7.3.2.3 Factores que afectan a la precisión ... 331
4.7.3.2.4 Consideraciones del sistema ... 335
4.7.3.3 Métodos de radiorreclada mediante ángulo de llegada y método de marcaciones separadas ... 337
4.7.3.4 Método de localización de un solo emplazamiento para emisiones en ondas decamétricas ... 338

Página

4.7.3.4.1 Estimación de la altura de la ionosfera 340
4.7.3.4.2 Software para la localización 340
4.7.3.4.3 Programa de generación de predicciones 340
4.7.3.4.4 Cálculo de las distancias de localización 340
4.7.3.4.5 Validez 341
4.7.3.4.6 Ángulo de elevación para SSL 342
4.7.3.5 Comparación de métodos de localización 342
4.7.3.6 Métodos de localización combinados 343
4.8 Análisis de la señal e identificación del transmisor 346
4.8.1 Introducción 346
4.8.1.1 La identificación en el marco de la reglamentación de comprobación técnica del espectro 346
4.8.1.2 Necesidad de identificación para actividades de comprobación técnica del espectro 347
4.8.1.3 Aplicaciones del análisis de señal en la comprobación técnica del espectro 348
4.8.2 Identificación mediante distintivo de llamada o mediciones básicas de la señal 349
4.8.2.1 Método de reconocimiento del identificador o de identificación mediante la identificación del distintivo de llamada 349
4.8.2.2 Mediciones de señal básicas para la identificación de transmisores sin el distintivo de llamada 349
4.8.3 Enfoque general del proceso de análisis de la señal 350
4.8.4 Consideraciones sobre las capacidades de un sistema para el análisis de la señal 351
4.8.5 Herramientas de análisis de la señal 352
4.8.5.1 Determinación de parámetros básicos de la señal 355
4.8.5.2 Determinación de parámetros de señal avanzados 358
4.8.5.3 Demodulación y decodificación 361
4.8.5.4 Correlación cruzada con una señal de prueba 361
4.8.5.5 Técnicas de correlación cruzada para el análisis de interferencias 363
4.8.5.6 Técnicas de filtrado adaptativo para separación de fuentes de señales AMDT y AMDC 364
4.8.5.7 Mediciones (de densidad de flujo de potencia) por debajo del ruido de fondo 365
4.8.6 Análisis de la señal para la identificación de las señales transmitidas 366
4.8.6.1 Equipo necesario 366
4.8.6.2 Prácticas de identificación 367
4.8.6.2.1 Identificación paramétrica 367
4.8.6.2.2 Identificación mediante señales de referencia 370
4.9 Medición de impulsos 376
4.9.1 Introducción 376
4.9.2 Parámetros básicos de las señales de impulsos 376

Página

4.9.3 Mediciones en el dominio del tiempo 378
4.9.4 Mediciones en el dominio de la frecuencia 380
4.9.5 Características de impulsos especiales 381
4.9.6 Requisitos de los equipos 381
4.10 Mediciones de ocupación del espectro 383
4.10.1 Generalidades 383
4.10.2 Técnicas de medición 383
4.10.3 Receptores para la comprobación técnica de la ocupación del espectro 386
4.10.4 Principios básicos y parámetros de medida 387
4.10.4.1 Principios de muestreo 387
4.10.4.2 Parámetros del sistema 389
4.10.4.2.1 Duración de la transmisión 389
4.10.4.2.2 Relación entre algunos parámetros relevantes 390
4.10.4.3 Resolución de las mediciones 390
4.10.4.4 Consideraciones sobre la ubicación 390
4.10.4.5 Limitaciones de la comprobación técnica y posibles soluciones 390
4.10.4.5.1 Señales no deseadas 391
4.10.4.5.2 Ocupación total 392
4.10.4.6 Fijación del umbral 392
4.10.5 Mediciones en las bandas de frecuencias 394
4.10.5.1 Frecuencias por debajo de 30 MHz 394
4.10.5.2 Frecuencias por encima de 30 MHz 395
4.10.5.2.1 Mediciones de la ocupación de canales de frecuencias 395
4.10.5.2.2 Servicios 395
4.10.5.2.3 Información adicional sobre determinados usuarios 395
4.10.5.2.4 Exploración lenta de canales 396
4.10.5.2.5 Comprobación estática de canales 396
4.10.5.2.6 Mediciones de ocupación de una banda de frecuencias 397
4.10.6 Presentación y análisis de los datos recopilados 398
4.10.7 Intercambio de datos 403
4.11 Mediciones de la cobertura 405
4.11.1 Introducción 405
4.11.2 Predicción de la cobertura 405
4.11.3 Principio básico de medición 406
4.11.4 Configuración para la medición 407
4.11.5 Parámetros que deben registrarse para las mediciones de cobertura 408

Página

4.11.6 Verificación de la cobertura 408
4.12 Medición de emisiones no deseadas 409
4.12.1 Introducción 409
4.12.2 Definiciones y terminología 409
4.12.3 Gamas de frecuencias de emisiones no deseadas 410
4.12.4 Mediciones en el dominio no esencial 411
4.12.5 Mediciones en el dominio fuera de banda 411
4.12.5.1 Medición de potencia del canal adyacente 412
4.12.5.2 Mediciones basadas en máscara espectral 413
4.12.6 Requisitos del equipo, configuración y limitaciones de la medición 416
4.12.7 Optimización del margen dinámico de la configuración de medición 416
4.12.8 Equipo requerido 416
4.12.9 Aspectos prácticos de la medición 417

4.1 Consideraciones prácticas sobre las mediciones

4.1.1 Conceptos básicos de las mediciones

Una medición es el proceso de asignar un valor a un atributo o fenómeno. En principio, el resultado es independiente del procedimiento utilizado. Sin embargo, la precisión del proceso de medición es esencial para obtener un valor fiable.

El proceso de medición debe definir:

– Atributo o fenómeno a medir.
– Condiciones de las operaciones.
– Sistema de medición y parámetros a utilizar.
– Secuencia de operaciones técnicas a aplicar.
– Resultado de la estimación e incertidumbres conexas.

4.1.1.1 Atributo o fenómeno a medir

En el contexto de la comprobación técnica del espectro, el objetivo básico de la medición son los campos electromagnéticos, que pueden caracterizarse como un valor de los campos E o H o como características de una señal (frecuencia, amplitud, fase, anchura de banda, etc.).

No obstante, a partir de dichas mediciones básicas, pueden implementarse procesos de medición más complejos para caracterizar la calidad y prestaciones de un sistema o una transmisión, como por ejemplo, mediciones de la ocupación del espectro y de la cobertura. En ese caso, el resultado es una combinación de diversos datos de medición, como hora, frecuencia, nivel, etc.

4.1.1.2 Condiciones de funcionamiento

Dada su influencia directa en el resultado de una medición, deben identificarse las condiciones en las que se llevan a cabo las operaciones. Dichas condiciones dependen del entorno, por lo que deben ser conocidas para garantizar la repetibilidad de la medición.

La ventaja de actuar en un entorno de laboratorio (realización de las mediciones o señal radiada medida en cámara anecoica) es que se conocen todos los parámetros y las condiciones de operación están bajo control.

No obstante, la mayor parte de las tareas de un departamento de comprobación técnica del espectro se realizan sobre el terreno y, por tanto, están sujetas a numerosas influencias debidas a infraestructuras circundantes, clima y otras limitaciones de los equipos de medida (tamaño de la antena, equipo integrado).

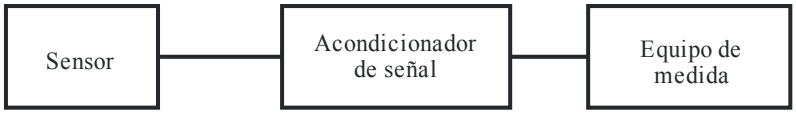
Deben tomarse todas las precauciones necesarias para limitar las influencias externas, debiendo especificarse en el proceso de medición cuáles son las condiciones en las que se llevan a cabo las operaciones a fin de garantizar que las mediciones sean reproducibles.

4.1.1.3 Sistema de medición

Un sistema de medición incluye todos los equipos utilizados para realizar las mediciones. Básicamente, el sistema puede dividirse en tres partes.

FIGURA 4.1-1

Sistema básico de medición



Spectrum-4.1-01

El sensor es el dispositivo que convierte el campo eléctrico o magnético en una señal eléctrica. En el contexto de la comprobación técnica del espectro, el sensor es por lo general, una sonda o una antena.

El acondicionador de señal se utiliza para dar un tratamiento a la señal de forma que pueda obtenerse la mejor calidad de la medición posible a partir de la señal suministrada por el sensor. Puede tratarse de filtros, amplificadores/atenuadores, acopladores, mezcladores, etc.

El equipo de medida es el dispositivo que procesa la señal y la muestra o registra para su explotación. Puede tratarse, por ejemplo, de un analizador de espectro o de un receptor.

En la descripción del proceso de medición, deben especificarse todos los dispositivos involucrados en la medición a fin de tener en cuenta en el resultado todos los parámetros (tipo de equipo, características e incertidumbres).

4.1.1.4 Secuencia de operaciones técnicas

A continuación se describe de forma general cómo se realizan las mediciones:

- se describe la configuración de la cadena de medida, identificando los equipos utilizados;
- se describen las mediciones preliminares a realizar (por ejemplo, mediciones para garantizar que no existe un emisor potente en el emplazamiento donde se realiza la medición que pueda provocar un resultado erróneo) ;
- se ajusta el dispositivo de medición utilizado (por ejemplo, banda de frecuencia, anchura de banda de resolución (RBW), margen, etc.) ;
- se realizan las tareas necesarias para la medición;
- se verifica la consistencia del resultado (por ejemplo, verificación del resultado por comparación con una determinación teórica, cálculo de la incertidumbre, etc.).

4.1.1.5 Resultado de la estimación e incertidumbre conexa

Para que la medición sea un valor fiable, es necesario un postproceso a fin de tener en cuenta incertidumbres de la cadena de medida y así evaluar la incertidumbre del resultado final.

El paso final puede ser, en caso necesario, especificar cómo deben publicarse los resultados.

4.1.2 Entorno de la medición

En función de la tarea de que se trate, el entorno de medición puede ser diferente.

Por una parte, para probar equipos radioeléctricos, algunas mediciones deben realizarse en cámara anecoica, y por otro lado, para la resolución de casos de interferencia, deben realizarse medidas sobre el terreno. En ambos casos los métodos de medición son muy distintos.

4.1.2.1 Entorno de laboratorio

Aunque las tareas reglamentarias no exijan disponer de este entorno, existe un número creciente de actividades que pueden requerirlo.

El principal interés por disponer de un entorno de laboratorio es que, a diferencia del entorno real, está libre de parámetros incontrolados.

Cuando las pruebas deben realizarse manteniendo el control del entorno electromagnético para evitar perturbaciones de fuentes de radiación externas, se consideran dos casos:

– mediciones en modo conducido;

– mediciones radiadas en un entorno controlado.

Las emisiones en modo conducido se realizan básicamente para verificar la señal generada por una fuente a la salida de la misma (justo antes de la antena).

No obstante, cada vez es más habitual que los sistemas se fabriquen de forma compacta, sin acceso a los puntos de entrada y salida del dispositivo en prueba. En ese caso, el análisis de la señal radiada no puede realizarse en el modo conducido.

Para la medición de emisiones radiadas debe disponerse de un entorno electromagnético controlado mediante una jaula apantallada. Algunas pruebas requieren que no existan trayectos múltiples, en cuyo caso el entorno adecuado es una cámara anecoica.

Las principales actividades que se realizan en dichas condiciones son las siguientes:

– medición de la compatibilidad entre sistemas (por ejemplo, un estudio preliminar relativo a la introducción de un nuevo sistema en la misma banda de frecuencias que otro, o que utilice una gama de frecuencias adyacente);

– verificación de las especificaciones del equipo de medida (por ejemplo, la ganancia de antena);

– conformidad de las emisiones radiadas por el dispositivo objeto de medición antes de su comercialización (por ejemplo, emisiones fuera de banda, no esenciales, etc.).

No obstante, la mayor parte de las mediciones de comprobación técnica son pruebas de campo en entornos electromagnéticos reales.

4.1.2.2 Mediciones sobre el terreno

Las principales actividades de una organización responsable de la comprobación técnica del espectro son la verificación de la conformidad de las emisiones reales con los valores declarados, la identificación de fuentes de interferencia y la realización de mediciones de cobertura o de calidad de servicio. Dichas mediciones deben realizarse sobre el terreno, mediante pruebas de campo.

Dichas tareas se realizan con estaciones de comprobación técnica fijas, móviles y equipos de medición móviles. En función de la tarea a realizar, las estaciones móviles tienen la ventaja de una mayor flexibilidad para la elección del emplazamiento de medición. Por su parte, las estaciones fijas tienen la ventaja del mejor conocimiento que existe de la ocupación del espectro en el entorno del emplazamiento.

Incluso si el entorno no está bajo control, deben tomarse determinadas precauciones para limitar las interacciones y realizar las mediciones. Entre las precauciones más comunes cabe destacar las siguientes:

– garantizar que, cuando sea preciso, el emplazamiento se encuentre en situación de campo lejano;

– garantizar un desacoplo en altura suficiente para evitar la influencia del terreno durante las mediciones;

– elegir un emplazamiento con los menores obstáculos posibles (construcciones, árboles, etc.) para evitar reflexiones y otros efectos debidos a trayectos múltiples;

– verificar que no existe un campo electromagnético intenso en las proximidades del emplazamiento de medición.

4.1.3 Principios básicos de las mediciones

4.1.3.1 Mediciones en el dominio del tiempo y de la frecuencia

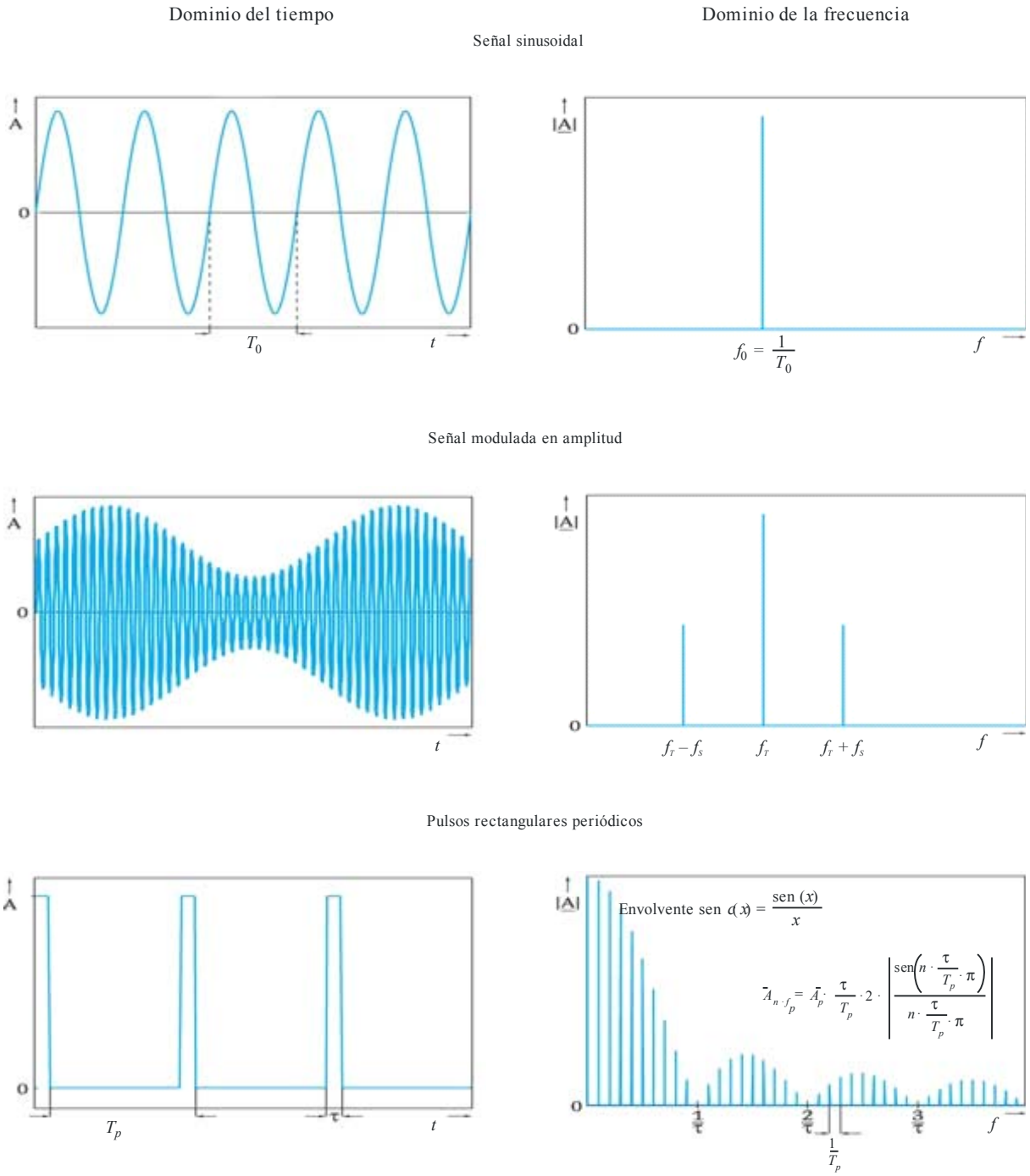
Las señales recibidas en una estación de comprobación técnica pueden caracterizarse en el dominio del tiempo, de la frecuencia o de la fase.

Estas tres formas de considerar el problema son en cierto modo intercambiables. La ventaja de introducir los tres dominios radica en el cambio de perspectiva que ello supone. Abandonando la perspectiva temporal, la

solución de problemas difíciles se simplifica notablemente en los dominios de la frecuencia o de la fase. Una vez que se desarrollen los conceptos de cada dominio, se presentarán los tipos de instrumentación actualmente disponibles. Se analizan las ventajas de cada tipo de instrumento genérico para ofrecer al lector una visión de las ventajas e inconvenientes de cada enfoque. Las Figs. 4.1-2 y 4.1-3 muestran ejemplos de señales periódicas y no periódicas en los dominios del tiempo y de la frecuencia.

FIGURA 4.1-2

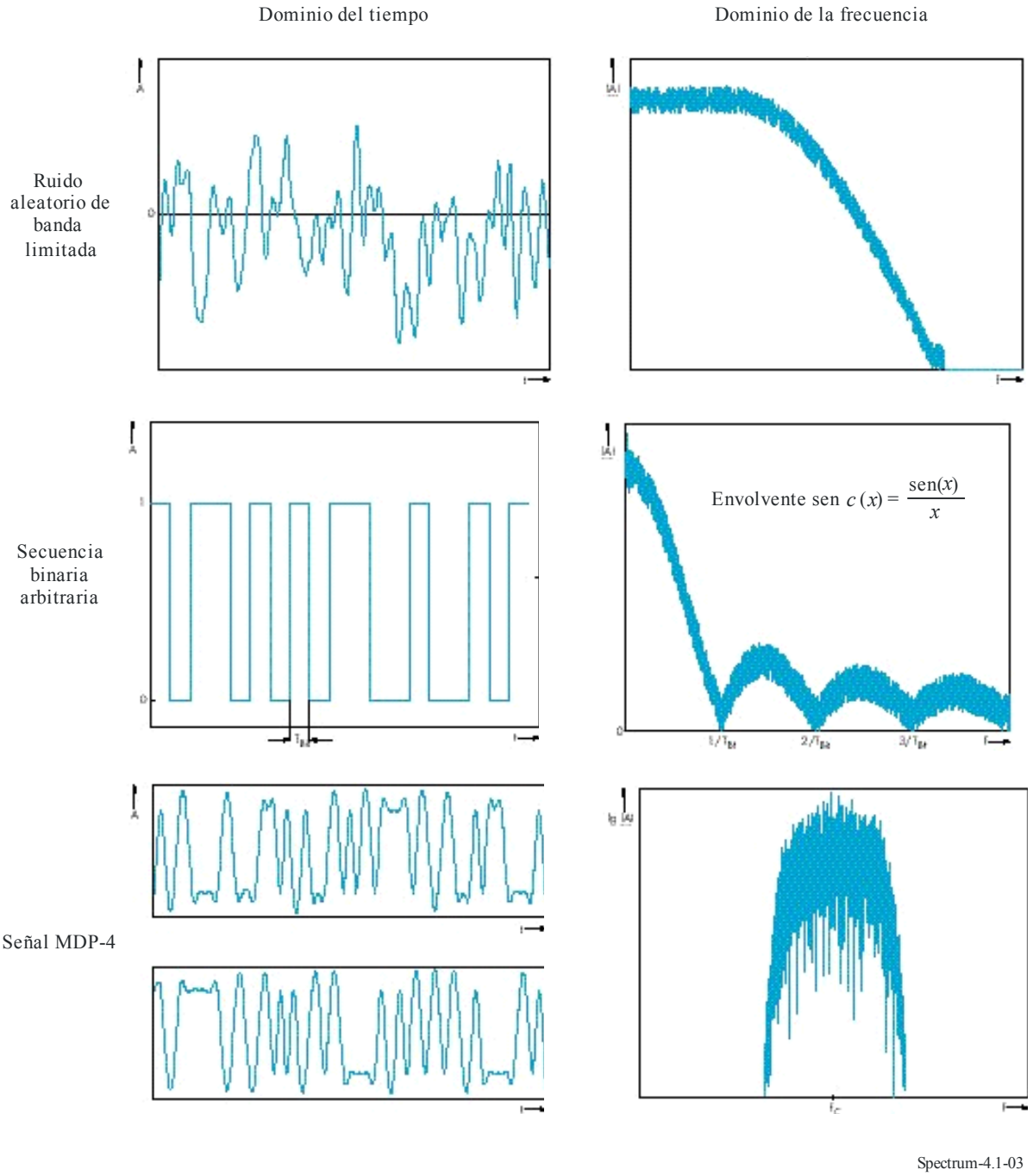
Algunas señales periódicas en los dominios del tiempo y de la frecuencia



Spectrum-4.1-02

FIGURA 4.1-3

Algunas señales no periódicas en los dominios del tiempo y de la frecuencia



La representación en el dominio de la frecuencia es especialmente adecuada para observar la ocupación del canal, la interferencia, los productos armónicos y las emisiones no esenciales. Además, la visualización del espectro característico de las distintas modulaciones permite identificar en ocasiones el tipo de modulación. La representación en el dominio del tiempo ayuda a entender la dependencia con el tiempo de la amplitud de las señales y a fijar el tiempo de medición necesario (por ejemplo, para el detector de cresta) para una medida correcta de la amplitud de la señal.

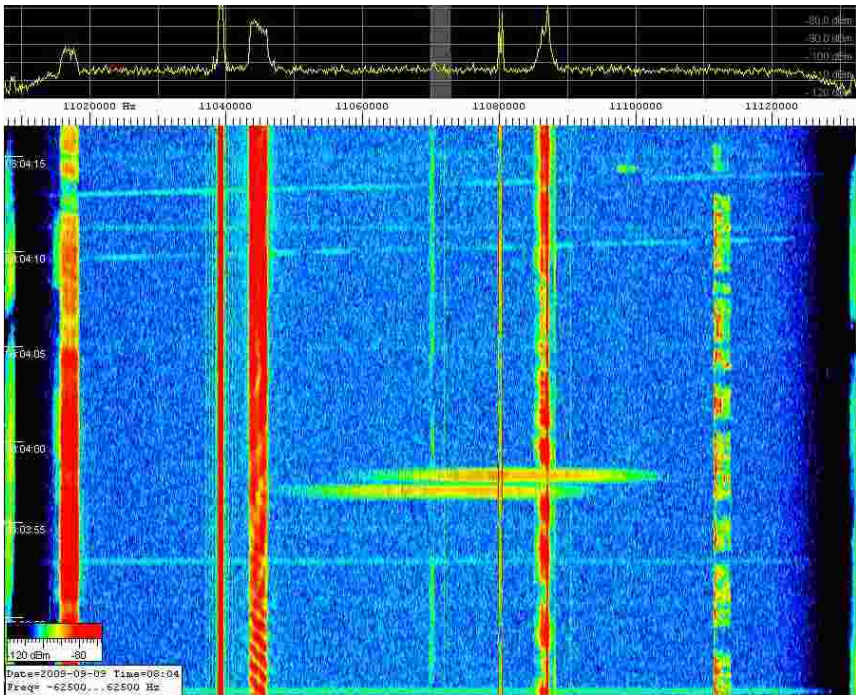
Especialmente cuando se analizan las emisiones de sistemas digitales, el dominio temporal ayuda a medir parámetros asociados a la multiplexación por división en el tiempo, tales como los tiempos de emisión de ráfaga y de reposo, el número de intervalos de tiempo ocupados y la elevación súbita del nivel de potencia.

El dominio temporal puede ser ademado para la detección y análisis de señales de ráfagas de corta duración o de efectos transitorios que no se detectan con analizadores de espectro tradicionales.

El análisis anterior relaciona la amplitud con la frecuencia y la amplitud con el tiempo. Otro enfoque de interés para la comprobación técnica es la utilización de un espectrograma (véase la Fig. 4.1-4) para evaluar, por ejemplo, la ocupación del espectro. Esta representación se basa en un análisis de la frecuencia en función del tiempo. En este caso, se proporcionan valores de amplitud gracias a una escala de colores adicional. Dicha representación es de utilidad para capturar emisiones de banda ancha o para el seguimiento de una emisión con una deriva de frecuencia o de una emisión de espectro ensanchado con salto de frecuencia.

FIGURA 4.1-4

Ejemplo de espectrograma



Spectrum-4.1-04

4.1.3.2 Mediciones (vector-) en los dominios de amplitud y de fase

La mayoría de los sistemas de telecomunicaciones digitales modulan la fase de la portadora de radiofrecuencia (MDP, MDPQ, etc.), o la fase y la amplitud conjuntamente (MAQ). Sin embargo, el dominio de la frecuencia no puede representar la información sobre la fase. Para recuperar dicha información, la emisión se representa normalmente mediante un diagrama que tiene la forma de una constelación de puntos. La longitud del vector que va desde el origen a cada uno de los puntos de la constelación representa la amplitud de la señal, mientras que el ángulo entre la parte positiva del eje x y el vector, medido en sentido contrario a las agujas del reloj, representa la fase. La componente "en fase" ("I") de la señal se representa sobre el eje X (REAL) y la componente en cuadratura ("Q") sobre el eje Y (IMAG). Se utilizan analizadores de señales vector para mostrar el dominio de la fase de una señal en instantes de tiempo definidos (véase la Fig. 4.1-5).

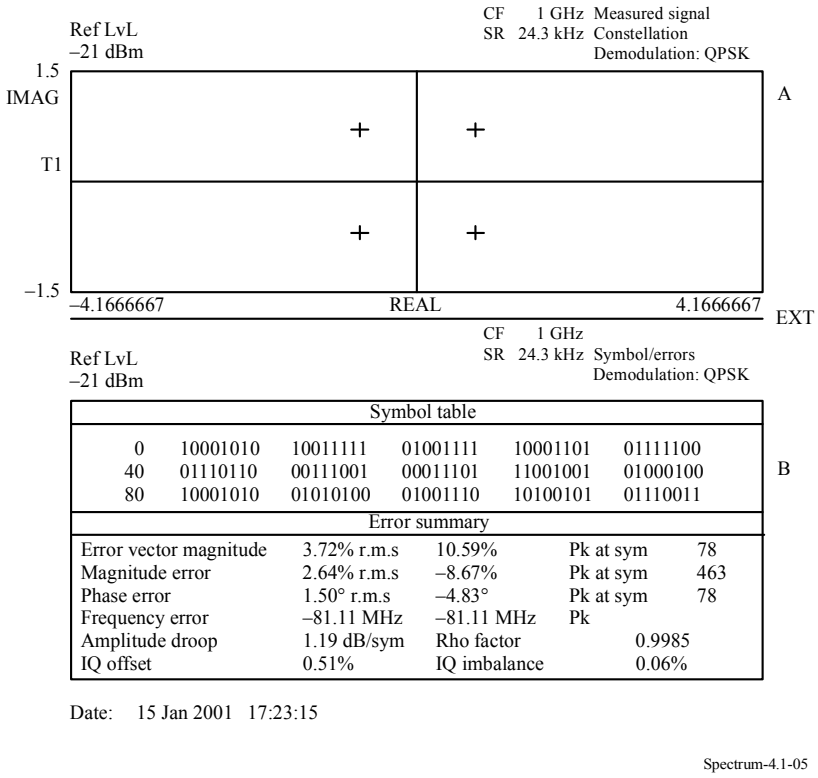
La frecuencia de repetición de esta representación debe ser igual a la velocidad de símbolos transmitida. Para conseguir una representación estable, en analizador debe estar sincronizado con la señal. Para que ello sea posible, el tipo de señal o al menos la velocidad de símbolos deben ser previamente conocidos.

En casos sencillos, cuando se conocen la modulación y el esquema de codificación, el análisis puede realizarse en tiempo real. Los modernos analizadores de vector pueden representar la secuencia binaria, o los caracteres de la información decodificada.

Sin embargo, en el caso de un esquema de modulación más sofisticado, si la modulación o la codificación no son conocidas en el instante de la recepción, es necesario un procesamiento posterior para obtener el código transmitido.

FIGURA 4.1-5

Representación de señal MDP-4 como diagrama de constelación (dominio amplitud-fase)



4.1.3.3 Análisis de la transformada rápida de Fourier (FFT)

La transformada rápida de Fourier (FFT, *Fast Fourier Transform*) es un algoritmo para transformar datos del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. La técnica FFT se describe con detalle en la sección 6.7.

4.1.4 Incertidumbre de la medición

Para ser completo, el resultado de una medición debe ir acompañado de una declaración del grado de incertidumbre. La estación de comprobación técnica debe determinar la incertidumbre para cada tipo de medición y debe tenerse en cuenta cuando se determine el cumplimiento o no cumplimiento de un límite reglamentario. Las medidas de tipo reglamentario incluyen la medición de la frecuencia, de los niveles de las señales y de la anchura de banda ocupada. En tales casos, los límites reglamentarios definen valores máximos de desplazamiento de frecuencia, de potencia radiada efectiva (p.r.e.) y de anchura de banda ocupada.

En la sección 6.9 se incluye información más detallada sobre el cálculo de incertidumbres.

4.2 Medición de la frecuencia

4.2.1 Consideraciones generales

Actualmente, los equipos de medición incorporan de forma generalizada facilidades de procesado digital de la señal (por ejemplo, FFT, IFM…). Ello ha dado lugar a un aumento considerable de la precisión de las mediciones, una mayor facilidad en los ajustes y, consiguientemente, una mayor velocidad de realización de mediciones. En relación con las mediciones de frecuencia, véase la Recomendación UIT-R SM.377.

Casi la totalidad de las mediciones de frecuencia realizadas en estaciones de comprobación técnica son realizadas a distancia, es decir, deben realizarse con la ayuda de receptores. Para conseguir resultados incuestionables, los receptores deben tener las propiedades siguientes:

– elevada sensibilidad de entrada;
– atenuación satisfactoria de la frecuencia imagen;
– niveles bajos de modulación cruzada e intermodulación;
– filtros de entrada (preselectores) adecuados a fin de proteger la banda de frecuencias utilizada para la medición contra las emisiones no deseadas;
– una entrada normalizada para la frecuencia externa;
– bajo ruido de fase de los osciladores internos;
– control manual, controlado a distancia o automático de ganancia;
– salida de frecuencia intermedia (FI) transparente para mediciones adicionales.

La portadora o portadoras internas utilizadas en el mezclador o mezcladores del receptor deben obtenerse de una frecuencia patrón.

Los generadores de señal externos o internos para las mediciones de frecuencia deben tener las siguientes características:

– la frecuencia debe sintetizarse a partir de un patrón de frecuencias;
– el patrón de frecuencia interno debe tener un error inferior a 1×10^{-7} para la propia frecuencia y todos los pasos de frecuencia;
– el paso más pequeño debe ser de 1 Hz o menos;
– debe existir una entrada de patrón de frecuencias externo para 1, 5 ó 10 MHz;
– debe ser posible mantener en reserva el patrón de frecuencias interno;
– la gama de frecuencias debe cubrir el margen de frecuencias que va a medirse;
– los armónicos deben atenuarse al menos 30 dB;
– las señales que no son armónicos deben atenuarse al menos 80 dB;
– el ruido de fase debe ser bajo (menos de –100 dBc/Hz a un desplazamiento de 10 kHz de la portadora);
– la tensión de salida debe ser variable entre 1 μV y 1 V a través de una resistencia de 50 Ω.

En las mediciones de frecuencia es necesario tener en cuenta la influencia de determinados parámetros:

– oscilador de referencia;
– procedimiento de medida;
– resolución de la lectura (por ejemplo, el número limitado de dígitos);
– estabilidad de la señal a medir;
– tiempo de medición en relación con la señal a medir.

Los procedimientos de medición descritos a continuación son en mayor o menor medida métodos manuales. A pesar de que han sido parcialmente sustituidos por métodos automáticos continúan teniendo importancia:

– para las instalaciones de medición sencillas y de bajo coste;

– para la capacitación de los operadores de comprobación técnica;
– para el servicio de comprobación técnica al principio de su funcionamiento;
– en los casos en que deben medirse señales débiles y/o interferidas debido a que el sistema automático a menudo falla en esas condiciones.

Realizar una medición de frecuencia significa normalmente establecer una comparación entre una frecuencia desconocida y una frecuencia conocida (frecuencia de referencia). En base a este proceso comparativo, en las estaciones de comprobación técnica se aplican los métodos de medición de frecuencia siguientes (algunas abreviaturas específicas se utilizan en el Cuadro 4.2-1 a modo de referencia sencilla):

– Los siguientes son métodos convencionales:
  – Método de la frecuencia de batido (BF, *Beat Frequency*)
  – Método de la desviación de frecuencia (OF, *Offset Frequency*)
  – Método de Lissajous directo (DL, *Direct Lissajous*)
  – Método del contador de frecuencia (FC, *Frequency Counter*)
  – Método del discriminador de frecuencia (FD, *Frequency Discriminator*)
  – Método del registro de fase (PR, *Phase Recording*)
  – Método del analizador de barrido de espectro (SSA, *Swept Spectrum Analyser*).
– Los siguientes son métodos basados en DSP:
  – Método de la medición de frecuencia instantánea (IFM, *Instantaneous Frequency Measurement*)
  – Método de la transformada rápida de Fourier (FFT).

NOTA 1 – Los métodos DSP son los recomendados en las estaciones de comprobación técnica internacionales.

El Cuadro 4.2-1 muestra los métodos de medición de frecuencia aplicables en función del tipo de emisiones.

CUADRO 4.2-1

Métodos de medición de frecuencia

	BF	**OF**	**DL**	**FC**	**FD**	**PR**	**SSA**	**IFM**	**FFT**
Portadora continua (N0N)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Telegrafía Morse (A1x)	X	X	X		X		X	X	X
Telegrafía Morse (A2x; H2x)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Radiotelegrafía (F1B; F7B)	X	X	X		X		X	X	X
Facsímil (F1C)	X	X	X		X		X	X	X
Difusión y radiotelefonía (A3E)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Difusión y radiotelefonía (H3E; R3E;B3E)	X	X	X		X	X	X	X	X
Difusión y radiotelefonía (F3E)				X	X		X	X	X
Radiotelefonía (J3E)							X		X
Difusión digital (MDFOC)							X		X
Difusión de televisión analógica (C3F)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Retransmisión de radio MDF (F8E)				X			X	X	X
Señales de radares de impulsos					X		X	X	X
Sistemas telefónicos inalámbricos (F1D, F2x, F3E, G3E)							X	X	X
Sistemas punto multipunto AMDT							X	X	X
Sistemas telefónicos celulares							X	X	X

El método para determinar la precisión de las mediciones de frecuencia debe satisfacer las condiciones siguientes:

– Las mediciones deben hacerse en condiciones óptimas de recepción para no introducir nuevas variables debidas a desvanecimientos o a interferencias.

– Si es posible, los operadores no deben conocer los valores exactos de la frecuencia que se ha de medir, a fin de que no sientan la tentación de corregir los resultados obtenidos.

– Para que se cumplan las condiciones anteriores, deben utilizarse frecuencias conocidas producidas localmente en vez de emisiones de frecuencia patrón cuyo conocimiento es generalizado.

– El método debe permitir la obtención del error de medida (excluido el error debido al patrón), y no de errores parciales.

– Siendo el error probablemente diferente para las distintas clases de emisión, debe determinarse para cada una de ellas.

– Puesto que para una clase de emisión dada el error variará de una medición a otra, y no puede ser inferior a la discriminación del equipo de medida, los resultados deben tratarse estadísticamente.

– Los resultados obtenidos deben servir para indicar el error del método utilizado para la clase de emisión de que se trate. No obstante, debe excluirse el error debido al patrón.

– Cuando se defina la precisión del sistema de medición (frecuencia patrón y equipo y método de medida), debe indicarse por separado el error de cada una de los factores implicados. El error máximo del conjunto sería entonces la suma de los valores absolutos de los errores debidos a la frecuencia patrón y al método de medida.

Como cualquier otra medición, las mediciones de frecuencia están sometidas a errores. Cabe considerar las siguientes fuentes de error:

– errores debidos al método de medida ($\Delta f_M/f$);

– errores debidos a la modulación de la señal que se desea medir ($\Delta f_{mod}/f$);

– errores de la frecuencia de referencia de la configuración de la medida ($\Delta f_R/f$);

– errores debidos a las características técnicas de la configuración de la medida, incluida la precisión de lectura ($\Delta f_A/f$);

– errores en el trayecto de transmisión (véase más abajo) ($\Delta f_T/f$).

El error máximo de $\Delta f/f$ puede estimarse a partir de la suma de los errores individuales:

$$\Delta f/f = \pm (|\Delta f_T/f| + |\Delta f_R/f| + |\Delta f_M/f| + |\Delta f_A/f| + |\Delta f_{mod}/f|) \qquad (4.2\text{-}1)$$

En la banda 7 (B.dam, decamétricas) y, en menor grado, en las bandas 6 (B.hm, hectométricas), 5 (B.km, kilométricas) y 4 (B.Mam, miriamétricas), la precisión de las mediciones de frecuencia está limitada no sólo por las características del método de medida del tipo de modulación del transmisor, sino también por las variaciones de frecuencia introducidas por el trayecto de propagación. En pruebas efectuadas en la banda 7 con propagación nocturna, se han observado, en un trayecto de más de 1 000 km, diferencias del orden de ±3 partes en 10^{12} entre las frecuencias recibidas y las frecuencias radiadas. Existe también una variación diurna media de las frecuencias. Las diferencias más pequeñas se producen generalmente cuando el transmisor y receptor se hallan en la zona diurna. En este caso las diferencias de frecuencia son por lo general inferiores a +3 partes en 10^8. También se observan variaciones diurnas en las emisiones en las bandas 5 y 4. En estas bandas, las variaciones son por lo general del orden de 1 parte en 10^9, siempre que la distancia entre el transmisor y el receptor no sea superior a unos centenares de kilómetros. Sin embargo, en muchos casos estas restricciones apenas son importantes.

4.2.2 Métodos de medición de frecuencia más comunes aplicados a estaciones de comprobación técnica internacionales

4.2.2.1 Método directo de Lissajous

Este método de medición se aplica en la salida en frecuencia intermedia (FI) del receptor. Si las frecuencias de los osciladores del receptor se obtienen a partir de un sintetizador controlado por cristal de cuarzo, el desplazamiento de la frecuencia intermedia con relación al valor nominal es igual al desplazamiento de la frecuencia recibida con relación a la frecuencia de ajuste. Para las mediciones de frecuencia, la señal de salida del paso de frecuencia intermedia del receptor se aplica al amplificador Y, y una frecuencia controlada por cuarzo (correspondiente al valor nominal de la frecuencia intermedia) se aplica al amplificador X (véase la Fig. 4.2-1).

Ello produce una elipse que se visualiza en la pantalla. Si el sintetizador de frecuencia se suministra con una escala de interpolación, es necesario realizar la medición cuando la elipse parece estacionaria.

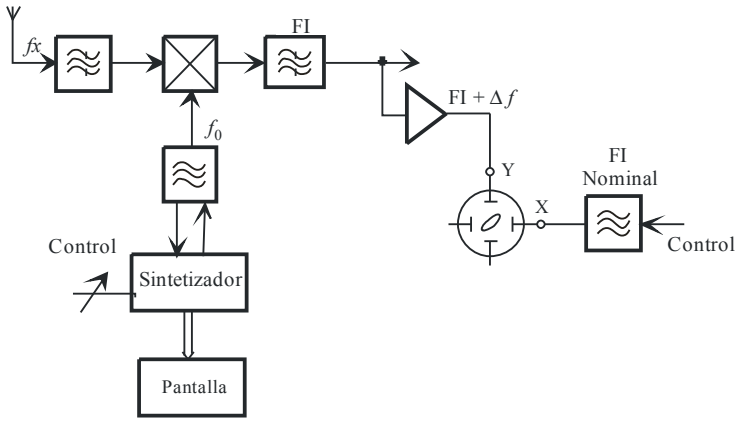
4.2.2.2 Método del contador de frecuencia

Independientemente de la inexactitud intrínseca del patrón de cuarzo, la precisión del contador de frecuencia está limitada a ±1 unidad de la última cifra. Para funcionar correctamente, los contadores de frecuencia requieren igualmente una tensión de entrada claramente definida y suficientemente elevada durante todo el periodo de medición.

En los receptores más modernos las frecuencias del oscilador se sintetizan y obtienen a partir de un patrón de frecuencia interno. Por consiguiente, una frecuencia de entrada igual a la frecuencia de sintonía del receptor se convertirá al valor nominal de la frecuencia intermedia (FI). Por lo tanto, un contador de FI cuya indicación de frecuencia sea corregida por la frecuencia (o frecuencias) del oscilador utilizado indicará la frecuencia de entrada.

FIGURA 4.2-1

Método directo de Lissajous



Spectrum-4.2-01

En el mercado existen receptores en los que las frecuencias del oscilador se sintetizan y obtienen a partir de un patrón de frecuencia interno. Por tanto, una frecuencia de entrada, igual a la frecuencia a la que se ha ajustado el receptor, se convertirá en el valor nominal de la frecuencia intermedia. Por tanto, el contador de la frecuencia intermedia cuya indicación de frecuencia haya sido corregida por la frecuencia o frecuencias del oscilador utilizado indicará el valor de la frecuencia de entrada.

A la vista de la propiedad integradora de los contadores de frecuencia, este método se presta especialmente a la medición de señales con modulación de frecuencia (MF), siempre que el tiempo de cómputo del contador sea mucho más elevado que el periodo de la frecuencia de modulación más baja.

4.2.2.3 Método del analizador de barrido de espectro

El método del analizador de espectro sintonizado de barrido se utiliza a menudo en estaciones de comprobación técnica para medir las frecuencias de las señales recibidas. Se utiliza un oscilador sintetizado, cuya frecuencia se obtiene de una frecuencia patrón interna o externa, para sintonizar un analizador de espectro moderno.

En el caso de algunas modulaciones digitales, a diferencia de lo que ocurre en la mayoría de las modulaciones analógicas, es difícil encontrar una frecuencia característica en el espectro de emisión (como, por ejemplo, es el caso de la portadora en la mayoría de las modulaciones analógicas). En tales casos puede calcularse una frecuencia central a partir de los extremos inferior y superior de la anchura de banda ocupada (véase la Fig. 4.2-2).

NOTA 1 – Para la medición de la anchura de banda ocupada véase la sección 4.5.

La frecuencia central es:

$$f_c = (f_l + f_u)/2$$

donde:

f_c: frecuencia central del espectro

f_l: valor de frecuencia más baja de la anchura de banda ocupada

f_u: valor de frecuencia superior de la anchura de banda ocupada

4.2.3 Métodos de medición de la frecuencia basados en DSP utilizados en estaciones internacionales de comprobación técnica

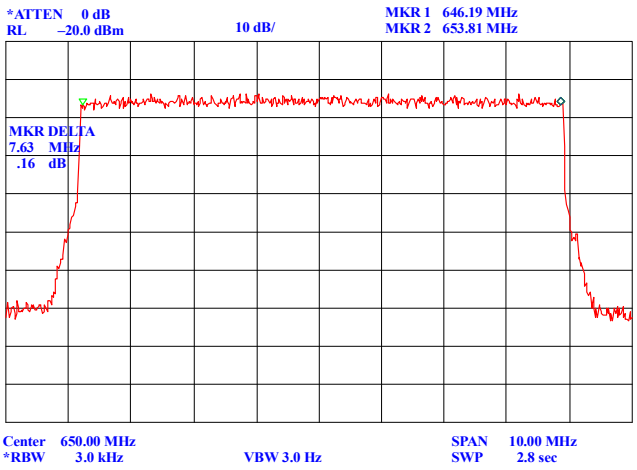
4.2.3.1 Método de medición de la frecuencia instantánea

Los beneficios derivados de la utilización de técnicas digitales para realizar mediciones y el progreso habido en tecnologías de adquisición y procesamiento de señales, han permitido que las estaciones de comprobación técnica alcancen un elevado nivel de precisión, manteniendo una velocidad apreciable en la realización de mediciones.

En particular, utilizando receptores de medida digitales como sensores, procesadores digitales de señal y técnicas de medida, tales como las de medición de frecuencia instantánea (IFM, *instantaneous frequency measurement*), se pueden garantizar la precisión y los niveles de calidad, al tiempo que se mantienen diversas ventajas: alta fidelidad / repetibilidad de las mediciones, funciones de promediado, filtrado, automatización de las medidas, etc.

FIGURA 4.2-2

Espectro de una señal DVB-T



Spectrum-4.2-02

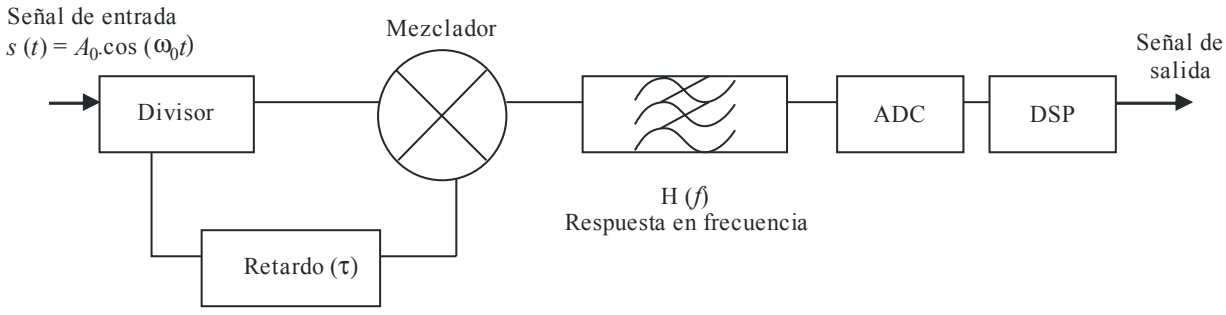
4.2.3.1.1 Principios generales

Un principio básico del IFM (método de medición de la frecuencia instantánea) es el proceso de autocorrelación de la señal capturada. Después del filtrado, el resultado de la operación se digitaliza y se procesa con un DSP a fin de determinar la frecuencia exacta de la señal.

Este principio básico se ilustra mediante el diagrama de la Fig. 4.2-3.

FIGURA 4.2-3

Principio básico de la técnica IFM



Spectrum-4.2-03

El procesado de la señal en el dominio del tiempo divide la señal de entrada en dos señales.

A continuación, la señal y la misma señal retrasada se mezclan. Ello genera dos términos matemáticos:

$$S_{MixOUT}(t) = \left(\frac{A_0}{2}\right)^2 \left[\cos(\omega_0 \tau) + \cos(2\omega_0 t - \omega_0 . t . \tau)\right] \qquad (4.2\text{-}3)$$

El primer término es proporcional a la frecuencia y al retardo aplicado a la señal, el segundo término es el segundo armónico de la señal que se suprime mediante el filtro paso bajo.

Después de la digitalización, el DSP permite estimar la frecuencia instantánea según la ecuación siguiente:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\tau}\arccos\left[\frac{8.s_{MixOUT}(t)}{A_0^2.H(f_0)}\right] \tag{4.2-4}$$

Otro principio del método de medición de la frecuencia instantánea (IFM) se describe como el análisis de la fase de la señal.

La señal de entrada se digitaliza, se filtra y se demodula en fase y cuadratura (I/Q).

La fase instantánea φ de la señal se determina como el Arctg(Q/I) de cada muestra. La frecuencia instantánea se deduce de la relación siguiente:

$$f_n = \frac{\varphi(n) - \varphi(n-1)}{2\pi\tau_s} \tag{4.2-5}$$

τ_s es la duración de la muestra.

La frecuencia central de la señal de entrada puede calcularse como la media de las frecuencias instantáneas calculadas.

4.2.3.1.2 Calidad de funcionamiento de las técnicas de medición de la frecuencia instantánea

En general, puede obtenerse una medición cada segundo e incluso en menos de 1 s (200 ms) manteniendo al mismo tiempo una precisión del orden de 1 Hz, o mucho mejor que 1 Hz, en portadoras puras o en portadoras de señales moduladas en amplitud.

Dichos tiempos de medición son compatibles con señales cuya frecuencia central presente una deriva lenta y también ponen en evidencia características de deriva en mediciones consecutivas.

Las técnicas de procesado digital de la señal permiten realizar mediciones con una precisión y fidelidad / repetibilidad muy elevadas a un precio razonable. Se pueden alcanzar fácilmente precisiones del orden de 10^{-10} sobre una portadora pura siempre que el equipo de medida tome la referencia de un sistema de frecuencias patrón adecuado. Los patrones de frecuencia gobernados por GPS están actualmente disponibles a un precio que sólo es una pequeña fracción de lo que anteriormente suponía disponer de patrones basados en rubidio, por lo que es posible disponer de una elevada precisión sin incurrir en costes desproporcionados en estaciones fijas y móviles de comprobación técnica. La utilización de patrones de frecuencia GPS soluciona asimismo el problema de la trazabilidad de las medidas y de la verificación de la precisión de la frecuencia del sintetizador del receptor.

Por lo tanto, la precisión de las mediciones de frecuencia que se pueden realizar en las modernas estaciones de comprobación técnica puede alcanzar aproximadamente 1 Hz a partir de 9 kHz y hasta las frecuencias más elevadas en la banda de ondas decimétricas (3 GHz) para portadoras puras. Estas prestaciones permiten verificar una de las precisiones de frecuencia más exigentes descritas en las Recomendaciones UIT-R, a saber, las frecuencias de los transmisores de radiodifusión de TV analógicos en redes de alta densidad (Recomendación UIT-R BT.655).

La precisión de las mediciones de frecuencia de señales moduladas aleatorias depende de las características estadísticas de la señal y de la duración de la muestra. Típicamente, la precisión de las mediciones de una señal modulada aleatoria es un orden de magnitud menor que la realizada sobre una onda sinusoidal pura (±10 Hz cuando ésta se encuentra enganchada a una frecuencia patrón de 10^{-10}). Sin embargo, la experiencia y las simulaciones realizadas muestran que los tiempos de medición antes recomendados aseguran que la precisión de las mediciones de frecuencias sea al menos un orden de magnitud mejor (incluso sobre señales moduladas aleatorias) que la precisión requerida por los transmisores de las diversas categorías de servicios definidas en el Reglamento de Radiocomunicaciones.

En aras de la repetibilidad de la medición de la calidad de funcionamiento de las estaciones de comprobación técnica, la calibración y la verificación de la precisión deben realizarse utilizando señales sinusoidales puras.

También debe recomendarse una anchura de banda de adquisición instantánea mínima para las mediciones de frecuencia realizadas en estaciones de comprobación técnica, de forma que las señales se ajusten

completamente al filtro de medición. En la práctica, la medición debe realizarse utilizando un filtro suficientemente ancho como para contener la emisión que debe medirse, pero suficientemente estrecho como para rechazar las emisiones adyacentes.

Los receptores modernos incluyen una serie de filtros (típicamente 10 o más) que normalmente son suficientes para proporcionar un buen filtrado de las señales más comunes; sin embargo, el equipo debe seleccionarse cuidadosamente para que disponga de anchura de banda suficiente como para acomodar las señales que se desean comprobar. Una de las señales más comunes sobre las que se realizan comprobaciones técnicas son las de radiodifusión en MF, que deben tener una desviación de frecuencia que no supere ±75 kHz, para lo cual es necesario disponer de una estación de comprobación técnica con una anchura de banda para la adquisición de frecuencia que vaya desde aproximadamente ±200 kHz hasta ±300 kHz. Una anchura de banda de ±300 kHz es compatible con muchas señales digitales modernas, incluido GSM, pero no lo es para señales tales como DAB, IS95 o algunos sistemas punto a multipunto de alta velocidad, tales como los empleados en sistemas de telefonía rural por debajo de 3 GHz, para los que es normalmente suficiente disponer de una anchura de banda de 2 MHz. Dado que una anchura de banda superior exige digitalizadores y procesadores más costosos, es recomendable que la anchura de banda de adquisición instantánea para la realización de medidas alcance los valores siguientes en función de los objetivos de las estaciones de comprobación técnica:

– aproximadamente ±200 kHz para una estación de comprobación técnica de baja gama que cubra desde 9 kHz hasta 3 GHz;
– aproximadamente ±2 MHz para una estación de comprobación técnica de gama alta que cubra desde 9 kHz hasta 3 GHz.

En algunos casos es conveniente disponer de anchuras de banda instantáneas superiores tales como ±8 a ±10 MHz, especialmente cuando se supervisan señales por encima de 3 GHz o señales de difusión de vídeo digital o señales AMDT de banda ancha (W/CDMA).

4.2.3.2 Método FFT

El método basado en la FFT es un método eficiente de convertir una amplitud digital que es función del tiempo en una amplitud que sea función de la frecuencia, siendo un método adecuado de implementar mediante microprocesadores.

Los analizadores FFT para la medición de frecuencia deben tener las características siguientes:

– capacidad de ZOOM FFT a la frecuencia intermedia del receptor aplicado, o una elevada resolución de frecuencia del receptor;
– capacidad de ventana de Hann (Hanning);
– una entrada de un patrón de frecuencia externo de 5 ó 10 MHz;
– una resolución de al menos 16 bits;
– un rango de frecuencias que debe abarcar el rango de la FI del receptor que desea medirse;
– una interfaz de control a distancia;
– capacidad de promediación para la medición de frecuencias de las señales con ruido.

Actualmente, la FFT se utiliza habitualmente en equipos de medida (receptores o analizadores de espectro). Para lograr un mejor precisión de frecuencia, pueden utilizarse regidos, por ejemplo, por un patrón de frecuencia gobernado por un receptor GPS integrado en el equipo. Puede obtenerse una excelente resolución de frecuencia utilizando ZOOM – FFT con una ponderación de Hann (aplicación de ventana) (véase la sección 6.7).

Es posible aumentar la resolución de la medición de frecuencia realizada mediante un analizador FFT estimando que el cómputo de la frecuencia correcta se está realizando a partir de la potencia de las líneas espectrales cercanas a la cresta que se ha detectado en el espectro de potencia.

$$\text{Frecuencia estimada} = \frac{\sum_{i=j-3}^{j+3} \left(\text{Potencia}(i) \cdot i \cdot \Delta f\right)}{\sum_{i=j-3}^{j+3} \text{Potencia}(i)} \qquad (4.2\text{-}6)$$

donde:

j: índice del conjunto de valores de cresta aparentes de la frecuencia de interés, y

$\Delta f = F_s/N$,

donde:

F_s: es la frecuencia de muestreo, y

N: es el número de puntos en el dominio del tiempo de la señal adquirida.

El margen de $j \pm 3$ es razonable pues representa una dispersión más ancha que el lóbulo principal de la ventana de Hann habitualmente aplicada. Este cálculo puede reducir significativamente el tiempo de medición.

Las ventajas de este sistema de comprobación mediante analizador FFT son (en general) las siguientes:

– precisión y resolución en frecuencia muy elevadas;
– posibilidad de medir las frecuencias de señales de canal común;
– mayor velocidad para una anchura de banda de resolución estrecha;
– sensibilidad del receptor y resolución de la señal mejorados en comparación con un receptor analógico (cuando las condiciones y la señal a analizar son comparables).

En una realización concreta, pueden conseguirse las ventajas adicionales siguientes:

– facilidad de sintonía y ajuste a las bandas de frecuencias que van a supervisarse (a través del terminal de computador);
– una alta flexibilidad para la adaptación a diversas bandas de frecuencias;
– almacenamiento digital de los datos del espectro;
– gran fiabilidad debido al reducido número de componentes mecánicos;
– posibilidad de reproducción de todos los ajustes del sistema gracias al procesamiento digital;
– posibilidad de transferir los datos por línea telefónica, para su posterior evaluación y/o procesamiento a los usuarios del espectro, departamentos centrales, etc.

NOTA 1 – Para calcular la frecuencia correcta, debe tenerse en cuenta la posición de los espectros en la salida de FI del receptor.

Para más información sobre el procesamiento de la FFT, véase la sección 6.7 "Transformada rápida de Fourier".

En la Fig. 4.2-4 se ilustra la medición de frecuencia mediante de una señal estable incluso a muy poca distancia en frecuencia (separación).

4.2.4 Etapa controlada por cuarzo de un equipo de medición de frecuencias en relación con una frecuencia patrón

Todos los aparatos para la medición de frecuencias están provistos de un patrón de cuarzo, con independencia de que la escala del oscilador variable pueda calibrarse en puntos determinados por comparación con armónicos, o que la última frecuencia la suministre el patrón de cuarzo, como ocurre con los sintetizadores de frecuencias.

La frecuencia de salida de la etapa de cuarzo depende de la temperatura ambiente y de la tensión de funcionamiento.

Incluso después del periodo de caldeo, un generador de cuarzo acusa una variación continua de la frecuencia de salida.

Actualmente, el orden de magnitud de estas variaciones oscila entre 10^{-8} y 10^{-12}.

En aparatos de buena calidad, la variación continua de la frecuencia del cuarzo está comprendida entre 10^{-10} y 10^{-9} por día tras un periodo de caldeo continuo de varias semanas.

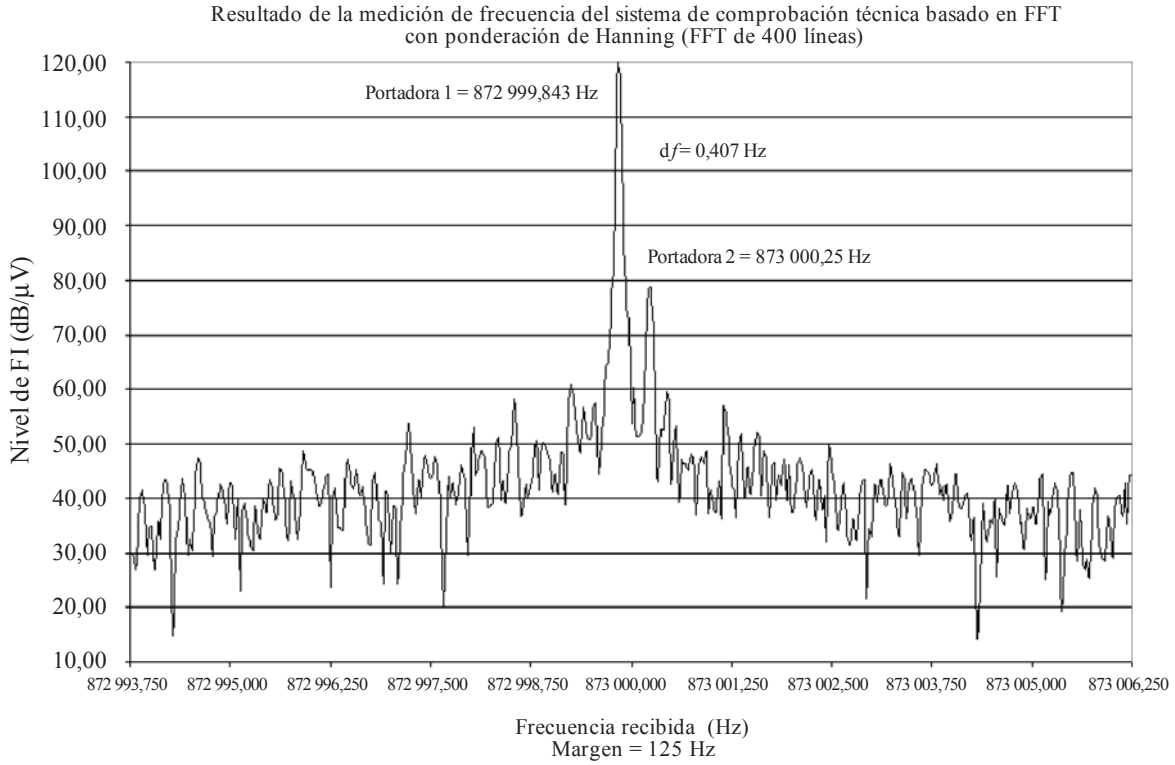
En consecuencia, las etapas de cuarzo del aparato de medida deben compararse muy a menudo con patrones de frecuencia o controlarse mediante la emisión de una frecuencia patrón.

Una alternativa a la comparación periódica consiste en enclavar permanentemente la frecuencia del cuarzo a un patrón atómico y, de esta forma, combinar la estabilidad a corto plazo del oscilador de cuarzo con la estabilidad a largo plazo del patrón atómico.

En los aparatos de medida de gran precisión, el generador de cuarzo externo, o al menos el recipiente térmico del mismo, debe funcionar en modo continuo si quieren evitarse los efectos perturbadores debidos al calentamiento y a la discontinuidad en el ritmo de envejecimiento.

FIGURA 4.2-4

Espectro FFT de un canal de radiodifusión en MF
(Margen = 12,5 Hz; Resolución: 400 líneas)



Bibliografía

Application Note 150[2000] Spectrum Analysis Basics. Agilent Technologies, Polo Alto, United States of America, puede descargarse en: http://www.agilent.com/.

Application Note 243 [2000] The fundamentals of signal analysis. Agilent Technologies, Santa Rosa, Estados Unidos de América, puede descargarse en: http://www.agilent.com/.

Application Note 1298 [2001] Digital Modulation in Communications Systems – An Introduction. Agilent Technologies, Santa Rosa, Estados Unidos de América, puede descargarse en: http://www.agilent.com/.

Manual UIT-R [1997] Selección y utilización de sistemas de frecuencia y tiempo precisos, Unión Internacional de Telecomunicaciones, Oficina de Radiocomunicaciones, Ginebra.

KUSTERS J. A.[Deciembre 1996] The Global Positioning System and HP Smart Clock. *Hewlett-Packard J.*

Recomendaciones del UIT-R:

NOTA – Debe utilizarse la última edición disponible de cada Recomendación.

Recomendación UIT-R SM.377 – Precisión de las mediciones de frecuencia en las estaciones de comprobación técnica internacional.

Recomendación UIT-R BT.655 – Relaciones de protección en radiofrecuencia para sistemas de televisión terrenal con modulación de amplitud de banda lateral residual interferidos por señales de imagen analógicas no deseadas y sus señales de sonido asociadas.

Recomendación UIT-R TF.768 – Frecuencias patrón y señales horarias.

4.3 Medición del nivel de radiofrecuencia

4.3.1 Introducción

Si bien en muchos casos las estaciones de comprobación técnica requieren conocer la intensidad de campo o la densidad de flujo de potencia (*dfp*) de una emisión de radiofrecuencia (RF), el único parámetro que puede medirse directamente es el nivel de RF, ya sea en términos de tensión a la entrada del receptor o como potencia de entrada. En ciertas condiciones, la intensidad de campo puede calcularse a partir del resultado de la medición.

Para medir el nivel de RF de emisiones continuas puede utilizarse un receptor de medida o un analizador de espectro. No obstante, cuando la señal objeto de medida está modulada, deben tenerse en cuenta determinadas consideraciones. Además, las señales moduladas digitalmente a menudo utilizan acceso múltiple por división en el tiempo (AMDT) y/o duplexación por división en el tiempo (DDT). Las emisiones resultantes son impulsos que hacen más compleja la medición del nivel de RF. En esta sección 4.3 se describen métodos y equipos para el servicio de comprobación técnica cuando se deben medir el nivel de RF de señales continuas y de impulsos.

4.3.2 Detectores de medida

Los receptores de medida y los analizadores de espectro pueden por lo general interpretar o ponderar el nivel de RF utilizando distintos detectores de medida. Aunque la amplitud instantánea de la señal de RF varía continuamente, el detector observa la amplitud de RF instantánea durante un cierto tiempo (el tiempo de medición) y muestra como resultado un único valor. Los principales detectores existentes son los siguientes:

– *Detector de cresta (Pk, peak)*

  El detector de cresta selecciona, de entre todas las amplitudes de RF instantáneas detectadas durante el tiempo de medición, el valor más alto, eliminando los restantes.

– *Detector de RMS (RMS)*

  El detector RMS calcula, de entre todos los niveles de RF instantáneos, la potencia media. Ello equivale a la potencia térmica de la señal de RF.

– *Detector de valor medio (AV, Average detector)*

  El detector AV calcula, de entre todos los niveles de RF instantáneos, la tensión de entrada media.

– *Detector de cuasi-cresta (QP, Quasi peak)*

  El detector QP integra todos los niveles instantáneos de RF como una red de ponderación de impulsos con tiempos de subida y de bajada definidos. Sus características se definen en CISPR-16.

– *Detector de muestras (SA, sample)*

  Este es el tipo de detector comúnmente incluido en los analizadores de espectro. En el caso de analizadores de espectro de barrido, el tiempo de medición en cada frecuencia es el tiempo necesario para barrer desde un punto de la pantalla al siguiente (*tiempo de barrido / número de puntos representados del eje x*). De todos los niveles instantáneos disponibles durante este tiempo, solo se selecciona el primero, eliminándose el resto.

Es importante entender cabalmente que los detectores de cresta y RMS indican el nivel de radiofrecuencia *efectivo*. Ello significa que la lectura del detector de cresta informará del valor cuadrático medio de una señal sinusoidal que tenga el mismo nivel de cresta que la señal medida, es decir, $U/\sqrt{2}$.

La Fig. 4.3-1 muestra un ejemplo del nivel indicado por distintos detectores cuando se mide una señal de RF con un índice de modulación de amplitud del 100%.

4.3.3 Definición de niveles

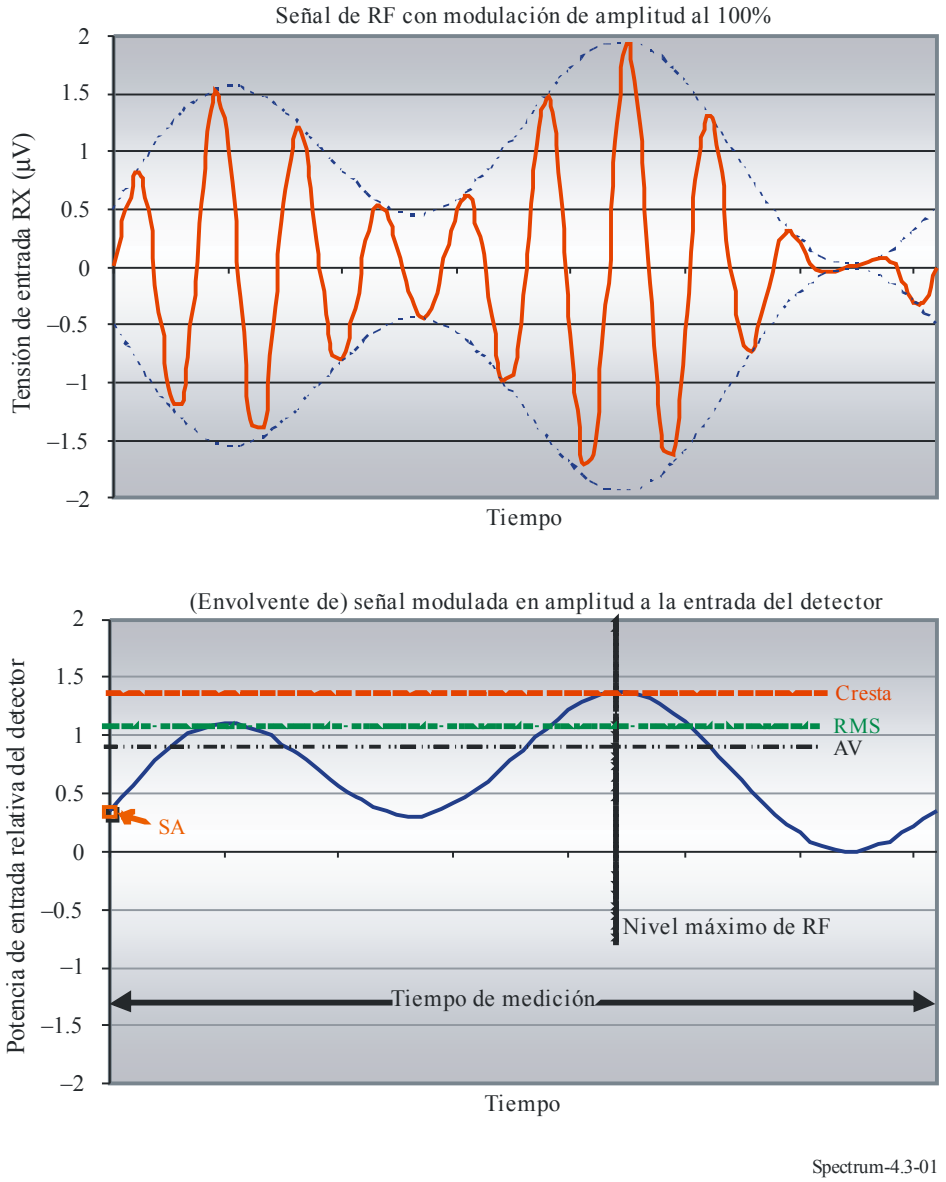
Muchas modulaciones analógicas y digitales, tales como MA, MDA, MDP, MAQ y MDFO modifican la amplitud de la señal de RF. Por tanto, cuando se miden dichas señales, debe tenerse en cuenta el *tipo* de nivel que debe medirse. Los siguientes niveles son importantes:

– *Nivel de cresta:*

Es el máximo nivel emitido. Este nivel es importante cuando se considera que se trata de una señal interferente, ya que normalmente el nivel de cresta determina la importancia de la interferencia. Se mide con un detector de cresta que disponga de la función de retención de máximos o *MaxHold* (si se utiliza un analizador de espectro). El procedimiento de medida es el mismo para todas las señales, ya sean impulsos o señales continuas.

FIGURA 4.3-1

Niveles de radiofrecuencia en la medición de una señal con modulación de amplitud al 100%



– *Nivel RMS:*

Es la potencia media emitida. Especifica la energía contenida en la señal y, por tanto, determina si un receptor puede decodificarla o no. Es el nivel más importante para señales continuas. Salvo que se especifique otra cosa, siempre se hace referencia al nivel RMS. También es el nivel de referencia para los estudios de planificación de red, coordinación y compatibilidad, y para la concesión de licencias a señales continuas. El nivel RMS es generalmente igual a la denominada potencia del canal. Se mide con un detector RMS y con un tiempo de integración largo.

– *Nivel medio de ráfaga:*

Es la potencia media (RMS) *durante una ráfaga* cuando se trata de una señal de impulsos (por ejemplo, sistemas AMDT). La medición RMS con un tiempo de integración largo promedia los tiempos de los impulsos y de las pausas, dando lugar a resultados que dependen de la temporización. Sin embargo, en el caso de señales de impulsos, el nivel más importante es el nivel RMS medido exclusivamente durante las ráfagas, sin tener en cuenta las pausas. Si se trata de señales de impulsos, y salvo que se especifique otra cosa, siempre se hace referencia al nivel medio de ráfaga. También es el nivel de referencia para los estudios de planificación de red, coordinación y compatibilidad, y para licencias de señales de impulsos. Se mide con un detector RMS y un tiempo de integración más corto (o igual) que el de la ráfaga. La medición debe estar sincronizada temporalmente con los impulsos de la señal.

– *Nivel de cuasi-cresta (QP):*

Este nivel se utiliza especialmente para caracterizar el efecto perturbador de las señales no deseadas tanto continuas como de impulsos. El nivel QP máximo de los dispositivos eléctricos se define en las normas pertinentes. Debido a las características de ponderación definidas del detector, el nivel QP de una señal de impulsos es función del nivel de cresta durante un impulso, la duración del impulso y su frecuencia de repetición. Se mide con una anchura de banda (200 Hz, 9 kHz o 120 kHz, en función de la gama de frecuencias) y un tiempo de integración predefinidos. Por lo general, los receptores de medida modernos fijan ambos parámetros automáticamente cuando se instala el detector QP.

4.3.4 Influencia de la modulación

Algunas modulaciones modifican la amplitud de la señal y otras no la modifican. Este hecho influye notablemente en cómo puede medirse la señal.

En el caso de señales no moduladas y de señales continuas con amplitud constante, tales como MF, MDM y MDF, todos los detectores muestran la misma lectura. En este caso, los niveles de las mediciones Pk, RMS, AV y QP son los mismos.

Si la modulación modifica la amplitud de RF, como es el caso de MA, BLU, MDA, MDP y MDFO, los detectores muestran lecturas diferentes. En este caso, cuando se seleccione el detector, equipo y método de medida debe tenerse muy en cuenta el nivel que se requiere.

En los sistemas que modifican la amplitud, requieren que la medición del nivel medio de ráfaga esté sincronizada temporalmente y que se asegure la eliminación de las pausas. Esta función no está siempre disponible en analizadores de espectro o en receptores de medida.

No obstante, es fácil determinar si una modulación modifica la amplitud. Mediante un analizador de espectro utilizado en modo margen cero (anchura de banda de resolución ≥ anchura de banda de la señal), se captura un determinado intervalo de tiempo (para señales de impulsos, al menos una ráfaga) en modo *ClearWrite*. Si la amplitud permanece constante con el tiempo, la modulación es MF, MDF o MDM, en cualquier otro caso, se modula la amplitud (MA, BLU, MDA, MDP, MAQ, MDFO).

En la Fig. 4.3-2 se muestra un ejemplo de señal GSM/EDGE en el dominio del tiempo (con margen cero). El primer intervalo de tiempo (ráfaga) es una ráfaga GSM normal, con modulación MDMG (modulación por desplazamiento mínimo gaussiano) de amplitud constante; el segundo intervalo es una ráfaga EDGE con modulación MDP-8 que modifica la amplitud.

4.3.5 Anchura de banda de medición necesaria

Para la medición directa de señales moduladas, la anchura de banda de la medición debe de ser al menos igual a la anchura de banda que ocupa la señal. En función del tipo de equipo, la anchura de banda de medición puede denominarse:

– anchura de banda de frecuencia intermedia (FI) (en caso de un receptor de medida convencional);

– anchura de banda de resolución (RBW, en caso de un analizador de espectro);

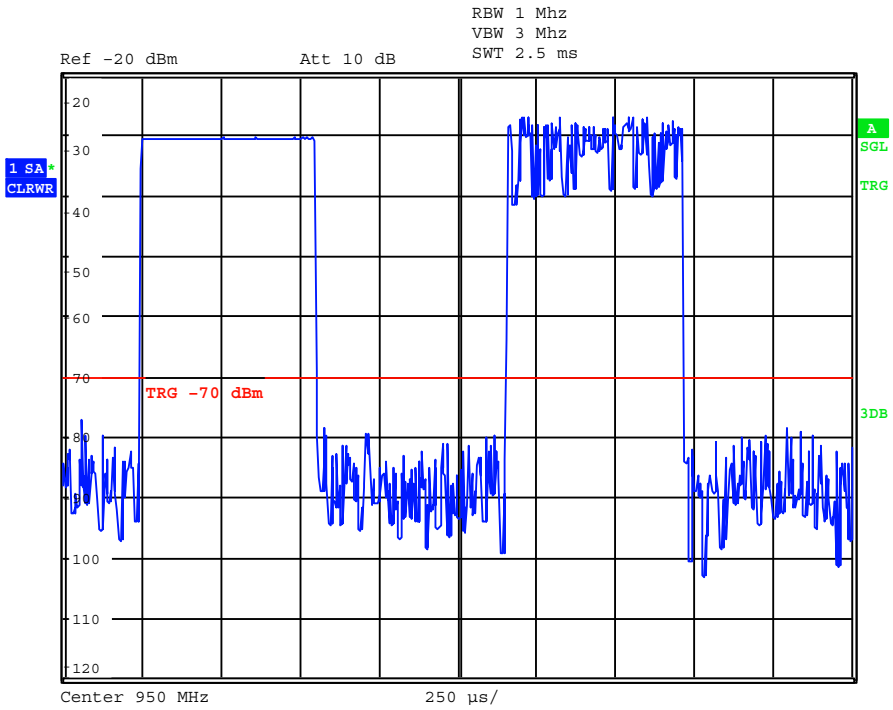
– anchura de banda de adquisición (en caso de un analizador FFT).

Por tanto, es necesario conocer la anchura de banda ocupada antes de realizar la medición del nivel de una señal modulada. La anchura de banda de medición más amplia del equipo limita anchura de banda máxima de las señales que pueden medirse. Una excepción de ello es el nivel RMS de señales continuas en un canal en uso. La mayor parte de los analizadores de espectro modernos pueden medir este nivel utilizando anchuras de banda de menor resolución e integrando los niveles espectrales sobre una gama de frecuencias mayor (modo de potencia de canal).

En el Cuadro 4.3-1 se muestran las anchuras de banda de medición necesarias en varios sistemas de radiocomunicaciones comunes.

FIGURA 4.3-2

Señal de impulsos con y sin modulación de amplitud



Spectrum-4.3-02

CUADRO 4.3-1

Anchuras de banda de medición necesarias

Sistema	Anchura de banda de medición necesaria	Observaciones
MA de doble banda lateral	9 ó 10 kHz	Transmisiones (voz) de banda estrecha
MA de banda lateral única	2,4 kHz	Transmisiones (voz) de banda estrecha
MF de banda estrecha con separación de canales de: 12,5 kHz 20 ó 25 kHz	 7,5 kHz 12 kHz	

Sistema	Anchura de banda de medición necesaria	Observaciones
Radiodifusión sonora en MF	120 kHz	La anchura de banda máxima ocupada es 180 kHz, pero casi toda la energía se encuentra en 120 kHz
T-DAB, T-DMB	1,5 MHz	
TV analógica	120 kHz	Aunque la anchura de banda ocupada es superior, casi toda la energía está en la portadora de video para lo que 120 kHz es suficiente.
TV digital terrenal	6, 7 ó 8 MHz	Igual a la anchura de banda utilizada del canal
TETRA	30 kHz	
GSM	300 kHz	Aunque la separación de canales es normalmente de 200 kHz, las señales GSM ocupan una anchura de banda superior
UMTS	4 MHz	
WiMAX, LTE	3, 5, 10 ó 20 MHz	En función de la configuración del sistema (igual a la anchura de banda máxima de emisión)

4.3.6 Procedimiento de medición con un receptor de medida

Un receptor de medida puede, por lo general, medir los niveles de cresta, RMS, AV y QP de una señal. Los cuatro niveles pueden medirse directamente utilizando la anchura de banda de medición correcta (véase el punto 4.3.5), el detector adecuado y un tiempo de integración suficientemente largo (tiempo de la medición).

Si se trata de una señal de impulsos, la lectura del valor RMS sólo proporciona la potencia media "a largo plazo" en la que se promedian impulsos y pausas. Cuando la señal está modulada en MDF o MDM, la lectura de cresta también es el nivel medio de ráfaga. Para las demás modulaciones, el nivel medio de ráfaga puede calcularse a partir de la lectura RMS a largo plazo, siempre que la relación impulso/pausa permanezca constante durante toda la medición:

$$P_{av\text{-}burst} = P_{RMS} + 10*\log(T/\tau) \qquad (4.3\text{-}1)$$

donde:

$P_{av\text{-}burst}$: nivel medio de ráfaga (dBm)

P_{RMS}: lectura RMS a largo plazo del receptor en dBm

T: periodo de la ráfaga (s)

τ: duración de la ráfaga (s)

Si T y τ no se conocen, pueden medirse utilizando cualquier analizador espectral normal con margen cero o bien, mediante un osciloscopio conectado a la frecuencia intermedia del receptor de medida.

4.3.7 Procedimiento de medición con un analizador espectral de barrido

La anchura de banda de resolución (RBW) óptima para que se muestre el espectro real de una señal con un analizador es aproximadamente igual al cociente *margen / puntos de barrido*. No obstante, este ajuste no puede utilizarse para medir directamente cualquier nivel de señal modulada. Para las mediciones de nivel, la anchura de banda de resolución debe ser al menos tan amplia como la anchura de banda de la señal. El resultado mostrado no reflejará el verdadero espectro, pero permite la lectura del nivel utilizando un marcador ajustado al punto más alto de la traza que se muestra en pantalla.

El nivel de cresta de las emisiones de impulsos y continuas puede medirse con un detector de cresta con la función de retención de máximos (*MaxHold*) ya sea en el dominio de la frecuencia o del tiempo (en ambos casos RBW $\geq$ anchura de banda de la señal).

El nivel RMS de señales continuas puede medirse con un detector RMS con la función *ClearWrite* (no la función *MaxHold*) y un tiempo de barrido suficientemente largo. Si no se dispone de un detector RMS, puede utilizarse un detector de muestras combinado con el promedio lineal de las trazas.

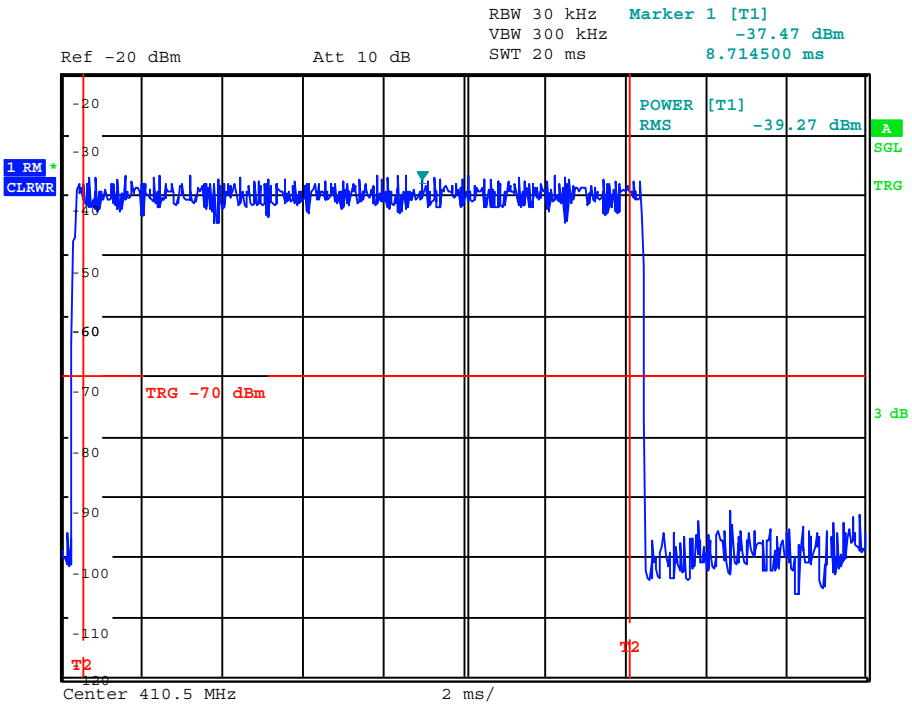
Para el nivel RMS, la mayoría de los analizadores espectrales modernos incorporan una función que mide la potencia en ciertos rangos de frecuencias. Esta función se denomina a menudo medición de la potencia del canal. Registra el espectro instantáneo (función *ClearWrite*) con una RBW pequeña e integra los niveles de potencia espectral sobre la gama de frecuencias deseada. Si bien esta función funciona correctamente con señales continuas, incluso cuando las bandas de frecuencias adyacentes están ocupadas, no funciona para señales de impulsos. Ello se debe a que el tiempo que necesita el analizador de espectro para barrer el canal es superior a la duración de un impulso. Por tanto, el nivel registrado cae al nivel del ruido de fondo en cada pausa, dando lugar a un espectro falso y una integración de potencia errónea. Esta medición precisa del detector RMS o del detector de muestras. No puede utilizarse la función *MaxHold*.

La forma recomendable de medir el nivel medio de ráfaga (AV) con un analizador espectral es en el dominio del tiempo. También en este caso, si la señal está modulada en MF, MDF o MDM con amplitud constante, el nivel de medio de ráfaga (AV) es el nivel de cresta y no se necesitan mediciones adicionales. Para las demás modulaciones es necesario sincronizar la medición y la señal a fin de garantizar que la medición sólo se activa durante una ráfaga. Esta función puede denominarse "medición de potencia en el dominio del tiempo". Como mínimo, se captura una ráfaga de señal en modo margen cero con una RBW ≥ anchura de banda de la señal y se emplea un detector RMS o de muestras. La función de medición calcula entonces el nivel RMS sobre toda la ráfaga. Para ello, puede ajustarse el tiempo de barrido de forma que la ráfaga ocupe toda la pantalla o, si el analizador lo permite, pueden establecerse límites en el tiempo que señalen los puntos de inicio y final del cálculo.

En la Fig. 4.3-1 se muestra una medición de potencia en el dominio del tiempo de una señal TETRA. Cada pixel de la traza es de hecho un nivel RMS instantáneo, ya que se ha utilizado el detector RMS. Sólo se integran los pixeles que se encuentran entre las dos líneas de tiempo T1 y T2 y el resultado es un nivel de potencia medio de ráfaga (AV) de –39,27 dBm.

FIGURA 4.3-3

Medición de potencia en el dominio del tiempo del nivel medio de ráfaga



Spectrum-4.3-03

4.3.8 Medición con un analizador FFT

Los analizadores FFT o de tiempo real modernos adquieren normalmente la señal en una anchura de banda que, en todo caso, es superior a la anchura de banda de la señal y calculan los niveles espectral y total utilizando algoritmos FFT. El usuario tiene una gran flexibilidad en relación con el tiempo de adquisición, la anchura de banda y el tiempo de análisis. Por defecto, el nivel indicado es la potencia media durante el tiempo de adquisición que corresponde al nivel RMS.

El nivel de cresta puede medirse seleccionando el tiempo de adquisición menor posible y utilizando la función *MaxHold* sobre varias FFT consecutivas.

El hecho de que el tiempo de adquisición sea variable, junto con la posibilidad de iniciar la adquisición exactamente al comienzo de la ráfaga, permite sincronizar el equipo para que sólo se analicen las ráfagas, obviando pausas. A diferencia de un analizador espectral de barrido, cuyo tiempo de barrido mínimo viene determinado por el filtro RBW, el analizador FFT permite visualizar el verdadero espectro de una señal, aunque sólo pueda tomarse una muestra muy breve. El tiempo de adquisición necesario es normalmente mucho más corto que la duración de una ráfaga de señales moduladas digitalmente, de forma que el analizador FFT también puede medir el nivel medio de ráfaga (AV) en el dominio de la frecuencia activando la función de medición de potencia de canal.

La Fig. 4.3-4 muestra una ráfaga de un enrutador WLAN 802.11g con modulación MDFOC. La ventana de la izquierda (visión temporal) muestra la amplitud en función del tiempo de la señal durante toda la captura o adquisición. La línea azul en la parte superior muestra el tiempo durante el que la señal se analiza (50 µs), que sólo es parte del tiempo total de adquisición.

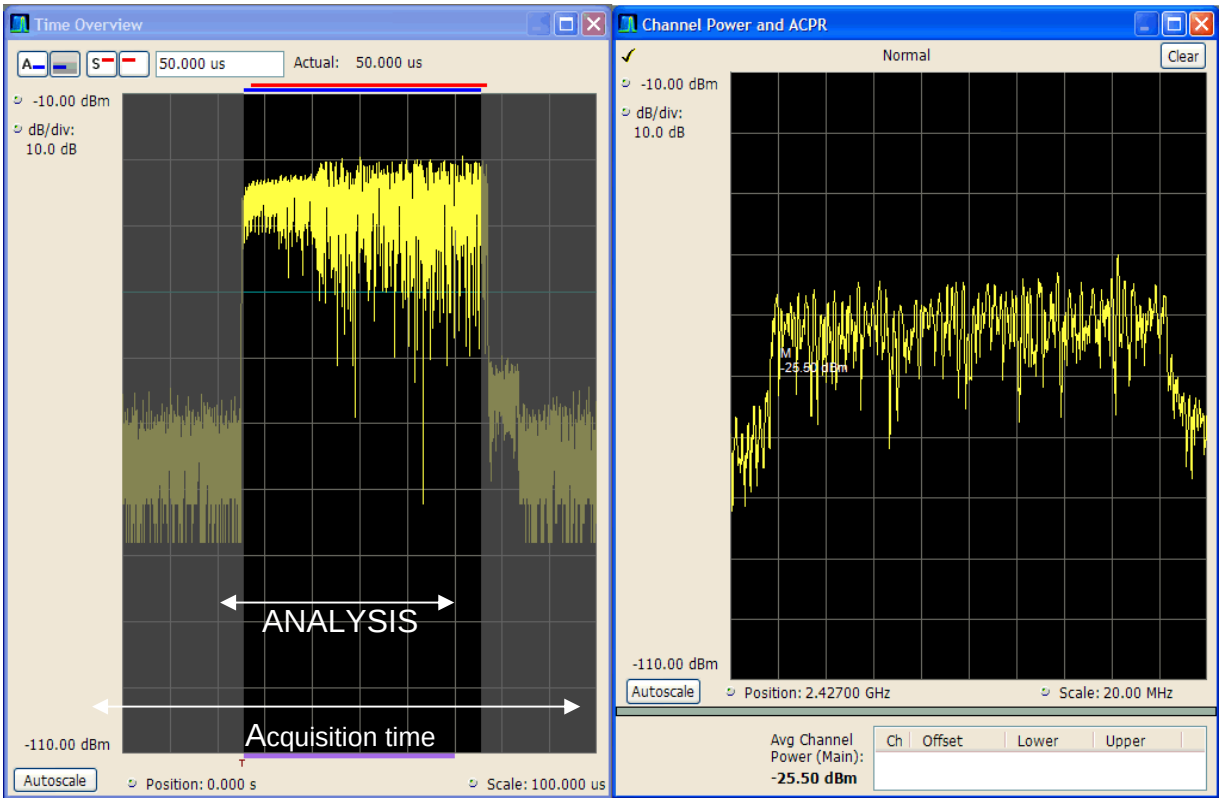
El tiempo de análisis se sitúa en la ventana temporal de adquisición de forma que sólo se analiza la ráfaga. El lado derecho de la Fig. 4.3-4 muestra la medición de potencia del canal en el dominio de la frecuencia.

Este método funciona con un analizador FFT porque la medición real sólo se realiza durante el tiempo de análisis (= tiempo de la ráfaga). Por tanto, la potencia del canal que se indica (–25,5 dBm) es, de hecho, la potencia media de ráfaga (AV).

Debe señalarse que algunos receptores de comprobación técnica de banda ancha modernos también realizan las funciones de un analizador FFT. Este tipo de equipo dispone asimismo de las capacidades de medición descritas en esta sección.

FIGURA 4.3-4

Medición del nivel medio de ráfaga en el dominio de la frecuencia con un analizador FFT



Spectrum-4.3-04

4.3.9 Corrección para señales de banda amplia

En ocasiones, y especialmente en el caso de las señales digitales, éstas presentan una anchura de banda mayor que la anchura de banda de medición más amplia del equipo. Si la energía de RF de la señal está homogéneamente dispersa en toda la anchura de banda, como ocurre en los sistemas MDFO, pueden medirse todos los niveles utilizado una anchura de banda de medición menor y corrigiendo el resultado con la fórmula siguiente:

$$P = P_m + 10*\log (\text{anchura de banda de la señal/RBW}) \qquad (4.3\text{-}2)$$

donde:

P: nivel de señal total en dBm

P_m: nivel medido en una RBW menor

Este método también puede ser de utilidad si existen señales de elevada intensidad en frecuencias adyacentes, que podrían influir en el resultado.

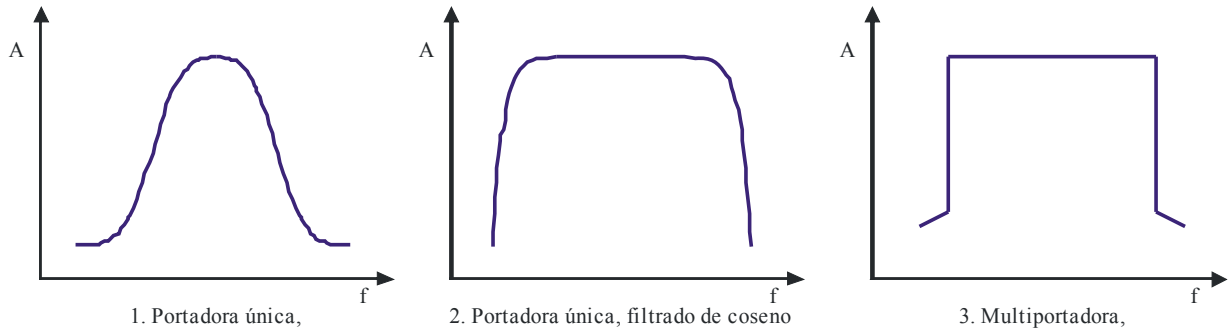
No obstante, sólo es aplicable a señales moduladas en MDFO y a señales digitales de una única portadora con filtrado de coseno o de raíz de coseno alzado (RRC), aunque en ese caso con un error generalmente inferior a 1 dB. No puede aplicarse a señales digitales que utilizan filtrado gaussiano.

La Fig. 4.3-5 se muestra el espectro típico de señales digitales.

Las señales con modulación analógica pueden presentar diversas formas espectrales, pero por lo general no es posible realizar la medición con anchuras de banda reducidas y aplicar una corrección a la anchura de banda de la señal.

FIGURA 4.3-5

Espectros típicos de señales digitales



1. Portadora única, filtrado gaussiano

2. Portadora única, filtrado de coseno de de raíz de coseno alzado

3. Multiportadora, MDFO

Spectrum-4.3-05

4.3.10 Problemas típicos detectados

4.3.10.1 Señales no deseadas en frecuencias vecinas

Las mediciones de nivel con un receptor de medida o las mediciones directas con analizadores espectrales de barrido sólo ofrecen resultados precisos cuando se han suprimido suficientemente las señales en frecuencias vecinas. Este no es el caso, por lo general, en situaciones típicas de comprobación técnica. Dado que la anchura de banda de medición debe ser al menos tan amplia como la anchura de banda de la señal y el filtro de medición debe ser gaussiano, también captura mucha energía de los canales vecinos. Si en un canal vecino existe una señal de más intensidad que la señal deseada, puede ser imposible realizar la medición directa del nivel.

Una forma de solucionar este problema es realizar la medición utilizando una anchura de banda de medición pequeña y aplicando una corrección a la anchura de banda de la señal según la fórmula 4.3-2; no obstante, este procedimiento sólo funciona para señales cuya energía está distribuida uniformemente en el espectro (señales MDFO y de banda ancha con filtrado de coseno o de raíz de coseno alzado).

Otro método que funciona en presencia de señales vecinas es la función de potencia de canal implementada por la mayoría de analizadores espectrales, pero que sólo puede utilizarse para medir el nivel RMS y limitado a señales continuas.

En cualquier caso, solamente un analizador FFT puede medir todos los niveles incluyendo el nivel medio de ráfaga. Funciona con independencia del tipo de modulación de la señal, es casi independiente de la anchura de banda de la señal y funciona en presencia de señales intensas en frecuencias vecinas.

4.3.10.2 Relaciones señal a ruido bajas

Cada uno de los métodos de medida descritos requiere una relación *S/N* suficientemente elevada para obtener resultados precisos. No obstante, algunas tareas de comprobación técnica requieren medir el nivel de señales muy débiles y cercanas al nivel de ruido del sistema. En estos casos, y en determinadas condiciones, puede aplicarse una corrección al ruido del sistema. La corrección depende de la relación *S/N*, del detector, de la forma del filtro de medición y, en ocasiones, incluso de la modulación de la señal deseada.

La Fig. 4.3-6 muestra las correcciones necesarias para los niveles de cresta, RMS y medio de señales continuas cuando el filtro de medición tiene una característica gaussiana.

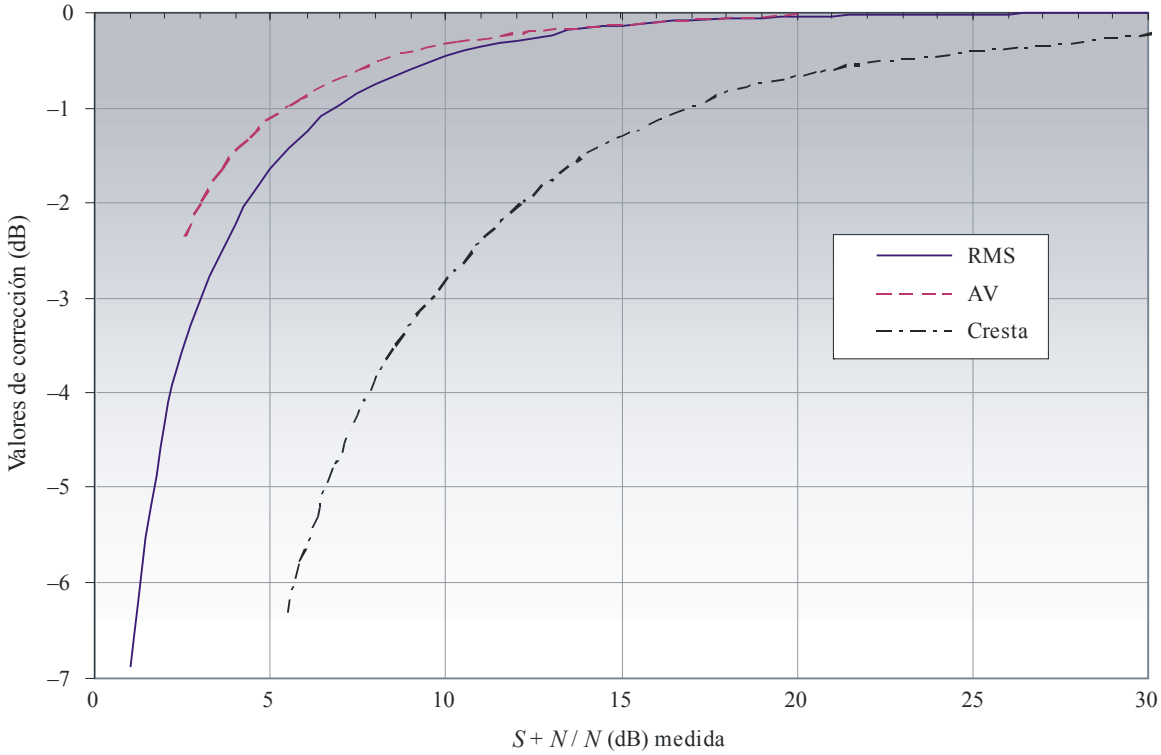
Los valores para el detector de nivel medio y de cresta de la Fig. 4.3-6 sólo son válidos para señales deseadas con una amplitud de RF constante (portadoras no moduladas, MF, MDF y MDPG). En el caso de señales moduladas en amplitud, las correcciones a los valores del detector de nivel medio y de cresta dependen de la señal real (por ejemplo, el tipo de modulación y la codificación) y no pueden generalizarse.

Para niveles medios de ráfaga, se aplica la corrección de RMS.

Los niveles a largo plazo RMS o medio (AV) de las señales de impulsos no pueden corregirse puesto que el valor de corrección necesario también depende de la duración del impulso y su frecuencia de repetición. Lo mismo es aplicable a los niveles de cuasi cresta (QP).

FIGURA 4.3-6

Correcciones del nivel medido para relaciones *S*/*N* bajas



Los valores de corrección de la Fig. 4.3-6 deben añadirse al nivel de señal medido. Debido a que la corrección es negativa, el nivel de señal real es inferior al medido.

En el Cuadro 4.3-2 se resumen las condiciones mínimas (*S*+*N*/*N*) para que las mediciones puedan realizarse sin aplicar correcciones siempre que la precisión de la medición sea mejor que 1 dB.

CUADRO 4.3-2

Valor mínimo (*S*+*N*/*N*) para una precisión de medición de 1 dB

	(*S*+*N*/*N*) mínima para una precisión de 1 dB		
Modulación	**AV (dB)**	**RMS (dB)**	**Cresta (dB)**
Portadora no modulada (N0N)	6	8	18
Amplitud constante (FM, MDF, MDM)	6	8	18
Amplitud modulada (MA, MDA, MDP, MAQ, MDFO)	6	8	14

4.3.11 Calibración de receptores de medida

Si el equipo de recepción utilizado no dispone de calibración interna, puede realizarse la calibración de la ganancia con un generador de señal común de onda continua (CW) sintonizable sobre el rango de frecuencias deseado, un generador de impulsos o un generador de ruido aleatorio con características de salida conocidas y estables y con una impedancia de salida igual a la impedancia de entrada del receptor utilizado. El nivel de salida de los generadores de señal CW puede calibrarse utilizando medidores de potencia de RF. Para adaptar la potencia de salida al nivel de entrada que requiere el receptor es recomendable utilizar atenuadores calibrados. La calibración no es, por lo general, resultado de una única medición, sino de una serie de mediciones, puesto que las características del instrumento a calibrar siempre son función de la frecuencia y del nivel de señal. La precisión de la lectura puede reducirse en ocasiones debido a la presencia de señales parásitas por un mal apantallamiento, a través de cables de alimentación, por discontinuidades en la caja o armario de apantallamiento, etc.

Los equipos modernos incluyen por lo general una fuente de calibración integrada en los receptores de medición/analizadores, estableciéndose procedimientos automáticos para la calibración del receptor de medida en toda su gama de frecuencias y niveles para todas las anchuras de banda y funciones del detector. En estos casos, es recomendable verificar periódicamente, por ejemplo, cada dos años, la referencia de calibración integrada. Los equipos modernos controlados mediante microprocesadores también utilizan funciones de autoprueba para la detección temprana de errores del hardware, evitando así la toma de datos erróneos durante un periodo de tiempo prolongado.

4.3.12 Errores de medición

La precisión que puede obtenerse incluye errores sistemáticos y estocásticos. La respuesta en amplitud de un detector síncrono correctamente diseñado no incluye errores sistemáticos.

Los medidores de nivel selectivo analógicos y los analizadores espectrales pueden presentar errores sistemáticos causados por la forma de la curva de selectividad, la velocidad de barrido y la respuesta del detector. Los errores que se produzcan en la práctica dependerán del diseño en particular y del método de aplicación.

Los analizadores de señal FFT presentan un error de amplitud inherente pero impredecible debido al tiempo finito entre muestras. La amplitud del error depende de la relación entre la frecuencia de muestreo del canal digital y la frecuencia de la señal, así como del factor de ponderación utilizado en el equipo. En el caso peor, el error de amplitud del procesamiento FFT, cuando se aplica la ponderación de Hanning, no supera 1,5 dB [Randall, 1977]. Este error sistemático puede compensarse fácilmente durante el procesamiento de la señal mediante el software adecuado.

Debe señalarse que dado que el receptor se sintoniza a una frecuencia fija pero el analizador espectral explora la banda de paso del receptor, cualquier rizado en la respuesta en la banda de paso de la frecuencia intermedia del receptor se convertirá en una fuente de error.

Bibliografía

RANDALL, R. B.[1977] *Application of B&K Equipment to Frequency Analysis*. Brüel & Kjaer, 17-089.

4.4 Mediciones de intensidad de campo y de densidad de flujo de potencia

4.4.1 Consideraciones generales

Introducción

En muchos casos, los servicios de comprobación técnica tienen que determinar la intensidad de campo o la densidad de flujo de potencia de una emisión. Estos parámetros se calculan por lo general a partir de las mediciones del nivel de RF descritas en la sección 4.3. Los procedimientos para determinar la intensidad de campo o la densidad de flujo de potencia se basan en los procedimientos y resultados de la medición del nivel de RF.

Los términos "mediciones de intensidad de campo" y "mediciones de densidad de flujo de potencia (*dfp*)", tal como se utilizan en esta sección, se aplican a cuatro clases generales de mediciones:

– las realizadas con aparatos portátiles o móviles para obtener datos relativamente instantáneos o a corto plazo en una o varias ubicaciones;
– las efectuadas con aparatos móviles para obtener parámetros estadísticos de cobertura en el campo de las radiocomunicaciones móviles;
– las de corta duración realizadas en lugares fijos, generalmente como complemento de otras operaciones de comprobación técnica;
– las de larga duración, que implican registros de intensidad de campo y análisis de los diagramas obtenidos así como almacenamiento y análisis de los datos medidos utilizando computadoras.

Objeto de las mediciones

Las mediciones de intensidad de campo y de densidad de flujo de potencia normalmente obedecen a una o más de las siguientes finalidades:

– determinar la suficiencia de la intensidad de una señal radioeléctrica y la eficacia de una fuente de emisión (por ejemplo, un transmisor) para un determinado servicio;
– determinar los efectos de la interferencia producida por una emisión radioeléctrica intencionada concreta (compatibilidad electromagnética);
– determinar la intensidad de la señal y los efectos de la interferencia provocada por emisiones no intencionadas de cualquier forma de onda procedentes de equipos que radian energía electromagnética y evaluar la eficacia de las medidas de supresión;
– medir los fenómenos de propagación para desarrollar y comprobar los modelos de propagación;
– recopilar datos sobre ruido radioeléctrico; por ejemplo, ruido radioeléctrico atmosférico de acuerdo con el Ruego UIT-R 85;
– asegurar el cumplimiento de las disposiciones pertinentes del Reglamento de Radiocomunicaciones;
– evaluar la exposición humana a campos electromagnéticos.

Los valores de intensidad de campo aproximados para un emplazamiento de recepción específico pueden obtenerse utilizando métodos de predicción y modelos informáticos. Sin embargo, es importante recordar que existen muchos factores desconocidos que exigen y/o justifican la realización de mediciones en el propio emplazamiento. En condiciones de propagación reales, las ondas radioeléctricas muestran un comportamiento determinístico con dependencias espacial y temporal aleatorias superpuestas.

Los valores numéricos que deben tenerse en cuenta para la medición de la intensidad de campo y la densidad de flujo de potencia son los siguientes:

– lectura del receptor;
– atenuación de la conexión entre antena y receptor;
– factor de antena;
– precisión de la tensión sinusoidal del receptor;
– selectividad del receptor en relación con la anchura de banda ocupada;

– ruido de fondo del receptor;
– efectos de desadaptación entre antena y receptor;
– interpolación en frecuencia del factor de antena;
– variación del factor de antena con la altura sobre el suelo circundante y otros efectos de acoplamiento mutuos;
– directividad de la antena;
– respuesta de la antena a la polarización cruzada;
– simetría de la antena;
– sombras y reflexiones debidas a obstáculos.

Este apartado relativo a mediciones de intensidad de campo y de densidad de flujo de potencia armoniza los procedimientos de medición de manera que las administraciones puedan intercambiar datos de intensidad de campo y de densidad de flujo de potencia.

Como medida de precaución, las mediciones de intensidad de campo o de densidad de flujo de potencia deben complementarse en algunos casos con otras mediciones de la calidad de la señal, tales como la conversión de MF a MA de las señales en MF, la proporción de bits erróneos (BER) y la respuesta impulsiva del canal en los sistemas de comunicaciones móviles digitales debido a la transmisión multitrayecto.

4.4.1.1 Cantidades y unidades de medida

4.4.1.1.1 Condiciones de la medición

La zona alrededor de una antena de transmisión se suele dividir en tres regiones:

1. Región reactiva de campo cercano
2. Región radiante de campo cercano (Fresnel)
3. Región de campo lejano (Fraunhofer).

La región reactiva de campo cercano se define como "la parte de la región de campo cercano inmediatamente alrededor de la antena en la que domina el campo reactivo".

La región radiante de campo cercano se define como "la región del campo de una antena entre la región reactiva de campo cercano y la región de campo lejano en la que predominan los campos de radiación y donde la distribución angular del campo es función de la distancia a la antena".

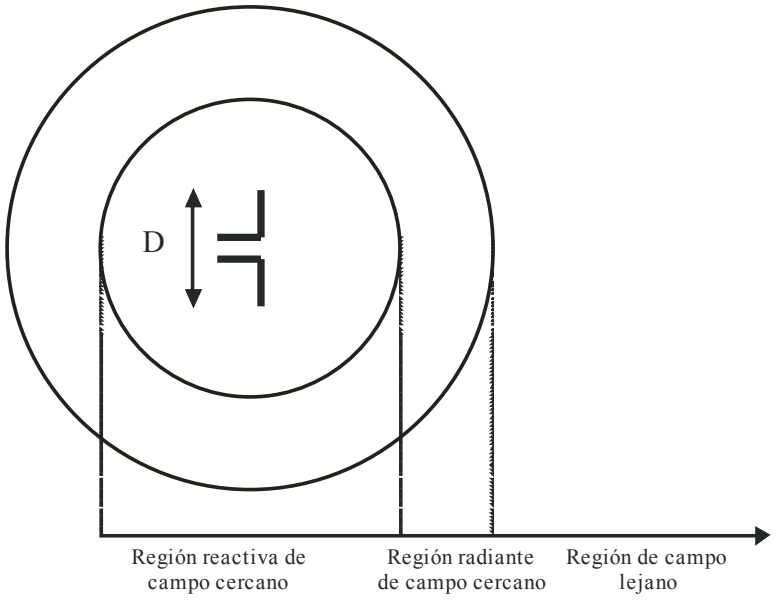
La región de campo lejano se define como "la región del campo de una antena en la que la distribución angular del campo es esencialmente independiente de la distancia a la antena".

Los parámetros de antena que proporcionan los fabricantes están disponibles en esta región y el cociente entre E y H es igual a 377 Ω.

En la Fig. 4.4-1 se muestra como se definen los límites de cada región.

FIGURA 4.4-1

Definición de las regiones del campo



En el Cuadro 4.4-1 se proporcionan algunos valores para establecer los límites entre las regiones.

4.4.1.1.2 Intensidad de campo eléctrico y magnético

La unidad de medición de intensidad de campo comúnmente empleada es el voltio por metro (V/m) y sus submúltiplos.

En realidad, esta unidad sólo es aplicable a la componente eléctrica (E) del campo, pero también suele utilizarse para expresar las intensidades de campo magnético o las componentes magnéticas de los campos radiados en relación con la impedancia de propagación, normalmente el valor en espacio libre (377 Ω), en cuyo caso el campo magnético lejano (H) en amperios por metro (A/m) viene dado por:

$$H = \frac{E}{377\ \Omega} \tag{4.4-1}$$

CUADRO 4.4-1

Definición de las regiones del campo

Región	Región reactiva de campo cercano	Región radiante de campo cercano	Región de campo lejano
Límites de las regiones, medidos desde la antena, donde: λ: longitud de onda D: máxima dimensión de la antena	$0 \ldots \max. \left(\lambda,\ D,\ \frac{D^2}{4\lambda} \right)$	$\max. \left(\lambda,\ D,\ \frac{D^2}{4\lambda} \right) \ldots \max. \left(5\lambda,\ 5D,\ \frac{0.6D^2}{\lambda} \right)$	$\max. \left(5\lambda,\ 5D,\ \frac{0.6D^2}{\lambda} \right) \ldots \infty$
$E \perp H$	No	En la práctica, sí	Sí
$\eta = E / H$	$\neq \eta_0$	$\approx \eta_0$	$= \eta_0$
Componente a medir	E y H	E o H	E o H

Para las radiaciones o los campos lejanos en el espacio libre, las energías de los dos campos son iguales (las definiciones de campo cercano y lejano aparecen en Kraus [1950]). El tipo de antena seleccionada debe ser el adecuado para la señal concreta que ha de medirse. Si la anchura de banda de la emisión que va a medirse es superior a la anchura de banda del medidor de intensidad de campo, debe tomarse en consideración el grado en que la anchura de banda restringida de este aparato afecta a la lectura de la intensidad de campo real de la señal captada.

Las intensidades de campo se miden utilizando antenas con factores de antena conocidos. El factor eléctrico K_e de una antena receptora es la intensidad de campo eléctrico E de una onda plana dividido por la tensión de salida V_o de la antena para su resistencia de carga nominal (que normalmente es 50 Ω).

$$K_e = E/V_o \tag{4.4-2}$$

Recíprocamente, el factor magnético de una antena de cuadro es la intensidad del campo magnético H de la onda plana dividido por la tensión de salida V_o de la antena para su resistencia de carga nominal (que normalmente es 50 Ω).

$$K_h = H/V_o \tag{4.4-3}$$

La relación entre el factor eléctrico y magnético de antena en especio lejano y condiciones de espacio libre viene dada por:

$$K_e = 120\pi \cdot K_h \text{ o } K_e = K_h + 51{,}5 \text{ dB} \qquad \text{dB/(m)} \tag{4.4-4), (4.4-4}bis\text{)}$$

Frecuentemente, en lugar del factor de antena, se da la ganancia de la antena (G) en relación con la antena isótropa. La relación entre la ganancia isótropa G y el factor de antena K_e se obtiene mediante la ecuación siguiente:

$$K_e = \frac{1}{\lambda\sqrt{G}} \cdot \sqrt{\frac{4\pi Z_0}{R_N}} = \frac{9{,}73}{\lambda\sqrt{G}} = \frac{f\,/\,MHz}{30{,}81\sqrt{G}} \tag{4.4-5}$$

donde:

$Z_0 =$ 377 Ω y $R_N = 50$ Ω.

Como los valores de tensión e intensidad de campo normalmente se miden como niveles en dB(μV) y dB(μV/m), los factores de antena también se utilizan en su forma logarítmica:

donde:

$$K_e = 20 \log K_e \quad \text{y} \quad G = 10 \log G$$

el factor de antena k_e viene dado en dB(m) como

$$K_e = -29{,}77 \text{ dB} - g + 20 \log(f/\text{MHz}) \tag{4.4-6}$$

por consiguiente, el nivel de intensidad de campo e puede medirse a partir del nivel de tensión de salida de antena v_o mediante la siguiente relación:

$$e(\text{dB}(\mu\text{V/m}) = v_o(\text{dB}(\mu\text{V})) + k_e(\text{dB/(m)}) \tag{4.4-7}$$

Como el valor de k_e normalmente no contiene la atenuación a_c del cable de transmisión entre la antena y el receptor de medición, la ecuación debe ampliarse de la forma siguiente (siendo v_o en este caso la tensión a la entrada del receptor de medición):

$$e(\text{dB}(\mu\text{V/m})) = v_o(\text{dB}(\mu\text{V})) + k_e(\text{dB/(m)}) + a_c(\text{dB}) \tag{4.4-8}$$

Ejemplo: una antena con una ganancia de 6,5 dB a 100 MHz tiene un factor de antena de 3,7 dB a esta frecuencia. Con una tensión de entrada v_o de 33,4 dB(μV) y una atenuación del cable a_c de 1,1 dB la intensidad de campo será 38,2 dB (μV/m).

4.4.1.1.3 Intensidad de campo incidente equivalente

Las tensiones medidas a la entrada de un receptor pueden expresarse en función de las correspondientes tensiones inducidas en la antena receptora y, por consiguiente, de las intensidades de campo asociadas.

En el caso de antenas sencillas (por ejemplo, antenas de varilla vertical o de cuadro) que responden exclusivamente a ondas con una única dirección de polarización (por ejemplo, vertical u horizontal), es conveniente introducir el concepto de intensidad de campo incidente equivalente. Este término se utiliza especialmente en la gama de ondas decamétricas. Se refiere al campo resultante con la misma polarización que la antena. Para cualquier señal, puede considerarse como la suma de la onda ionosférica y la onda reflejada en el suelo.

Los medidores comerciales portátiles de intensidad de campo y las instalaciones fijas que utilizan antenas verticales cortas o antenas de cuadro se calibran normalmente en función de la intensidad de campo incidente equivalente. Sin embargo, cabe señalar que el concepto de intensidad de campo incidente equivalente tiene escaso significado físico cuando se emplean antenas grandes cuyos elementos apuntan en distintas direcciones; por ejemplo, las antenas rómbicas, o en el caso de recepción descentrada, cuando se trata de antenas de dipolo o de cuadro.

La relación entre la intensidad de campo incidente equivalente y la tensión inducida en la antena receptora es función de la frecuencia y, a diferencia de la relación correspondiente para el valor eficaz de la intensidad de campo de la onda ionosférica, es independiente de la dirección de llegada de la onda y de las constantes del suelo.

Por lo tanto, la intensidad de campo incidente equivalente es un parámetro más adecuado de utilizar cuando se comparan los resultados de mediciones efectuadas en distintos lugares y con diferentes equipos. La utilización del valor eficaz de la intensidad de campo de la onda ionosférica exige conocer las componentes predominantes del campo electromagnético, las polarizaciones y los ángulos de llegada, además del diagrama de radiación exacto de la antena (véase la Recomendación UIT-R P.845).

4.4.1.1.4 Potencia mediana disponible en el receptor

El método de predicción del UIT-R (Recomendación UIT-R P.533) para estimar las intensidades de la señal ionosférica proporciona los valores expresados en intensidad de campo o potencia mediana disponible en el receptor en ausencia de pérdidas en el sistema de recepción. El parámetro preferido de intensidad de señal para comparar los resultados previstos con los medidos es la potencia mediana disponible en el receptor, ya que es independiente de la dirección de llegada y de la polarización de la onda (véase la Recomendación UIT-R P.845).

4.4.1.1.5 Densidad de flujo de potencia

En las frecuencias más elevadas, especialmente por encima de 1 GHz, la medición de la densidad de flujo de potencia (S) proporcionará en muchos casos una información más convencional sobre la intensidad efectiva de la emisión. La unidad de medición de la densidad de flujo de potencia es el vatio por metro cuadrado (W/m^2).

En el caso de una onda con polarización lineal en el espacio libre, $S = S = E^2/Z_0$

siendo

E: la intensidad de campo (V/m).

Z_0: es el valor de la impedancia del espacio libre (377 Ω).

La definición de la superficie efectiva, A_e para la medición de la densidad de flujo de potencia (*dfp*) es la siguiente:

Siendo P la potencia recibida (en W) y S la densidad de flujo de potencia (enW/m^2) y G la ganancia isótropa de la antena (en dB), la superficie efectiva A_e es:

$$A_e = P/S\frac{\lambda^2 G}{4\pi} = \frac{\lambda^2 G}{12.57} = \frac{(84{,}62\text{ m})^2}{(f/\text{MHz})^2}\,G \qquad (4.4\text{-}9)$$

siendo:

$$S = P/A_e$$

Utilizando $p = 10 \log P$ y $s = 10 \log S$, la superficie efectiva a_e expresada logarítmicamente, dB(m^2) es:

$$a_e(\text{dB}(\text{m}^2)) = 38{,}55 + g - 20 \log (f/\text{MHz})$$

Por tanto, $s(\text{dB}(\text{W/m}^2)) = p(\text{dB}(\text{W})) - a_e(\text{dB}(\text{m}^2))$.

Si la potencia recibida p se expresa en dBm, puede obtenerse la *dfp* s en dB(W/m^2) mediante:

$$s(\text{dB}(\text{W/m}^2)) = p(\text{dBm}) - a_e(\text{dB}(\text{m}^2)) - 30 \text{ dB}$$

Dado que normalmente a_e no incluye la atenuación a_c del cable de transmisión entre la antena y el receptor de medida, la ecuación se debe ampliar para que sea:

$$s(\text{dB}(\text{W/m}^2)) = p(\text{dBm}) - a_e(\text{dB}(\text{m}^2)) - 30 \text{ dB} + a_c(\text{dB}) \qquad (4.4\text{-}10)$$

Ejemplo: una antena tiene una ganancia g de 15 dB a 1 GHz, la superficie efectiva a_e es entonces –6,45 dB(m^2). Para una potencia recibida de –73,6 dBm y una atenuación del cable de 3,5 dB, la *dfp* (s) será –106,6 dB(W/m^2) o + 13,4 dB(pW/m^2).

NOTA 1 – Algunas veces resulta útil calcular la superficie efectiva a partir de un factor de antena dado o viceversa. A tal fin, se dispone de las ecuaciones siguientes (con las cantidades expresadas en los términos anteriormente definidos):

$$A_e = \frac{1}{K_e{}^2} \frac{Z_0}{R_N} \quad \text{y} \quad a_e(\text{dB}(\text{m}^2)) = 8{,}77 \text{ dB} - k_e(\text{dB}/(\text{m})) \qquad (4.4\text{-}11), (4.4\text{-}12)$$

4.4.1.2 División en rangos de frecuencias

A veces conviene clasificar las técnicas de medición de intensidad de campo y de densidad de flujo de potencia en los tres rangos de frecuencias siguientes:

– frecuencias por debajo de unos 30 MHz;

– frecuencias comprendidas entre aproximadamente 30 MHz y 1 000 MHz;

– frecuencias por encima de aproximadamente 1 GHz.

Esta división es útil porque la técnica más adecuada a aplicar es distinta según la gama de frecuencias. Esto se debe en cierta medida a la relación existente entre las dimensiones reales de las antenas y las longitudes de onda de las señales que van a medirse y también a los efectos de proximidad del terreno, que afectan de modo diferente a las mediciones hechas en las tres gamas de frecuencias. Por debajo de unos 30 MHz (longitudes de onda mayores de 10 m), las antenas normalmente empleadas son pequeñas (0,1 λ) comparadas con la longitud de onda. La antena de medición más común es un cuadro de una o varias espiras apantalladas eléctricamente con un diámetro del orden de 0,6 m, o una antena de varilla vertical cuya longitud es corta comparada con un cuarto de la longitud de onda. Estas antenas pueden ser activas o pasivas. Si se utiliza una antena activa, debe tenerse la precaución de evitar la sobrecarga. La antena de varilla vertical se utiliza con una contraantena en el suelo. Esta antena tiene la ventaja de ser omnidireccional.

En frecuencias por debajo de unos 30 MHz, hay que hacer generalmente las mediciones de intensidad de campo a alturas eléctricas próximas al suelo. Las características del suelo y de la vegetación circundante, cables aéreos y obstáculos diversos, influyen de modo diferente en los componentes del campo eléctrico y magnético, y en el ángulo de polarización. Pueden también influir en la impedancia de la antena. En general, las mediciones hechas con antenas de cuadro apantalladas sufren los efectos de los obstáculos próximos en menor medida que las realizadas mediante antenas de varilla.

En las frecuencias comprendidas entre 30 y unos 1 000 MHz (longitudes de onda comprendidas entre 10 m y 30 cm), las dimensiones de las antenas empleadas son comparables a la longitud de onda. Para una frecuencia fija en esta gama la antena más comúnmente usada para las mediciones de intensidad de campo es el dipolo resonante de media onda. Este dipolo está unido al aparato de medida por un transformador simétrico-asimétrico (balun) y por una línea de transmisión coaxial. El dipolo resonante se distingue de la antena de cuadro y de la antena de varilla corta por su elevado rendimiento (su resistencia eléctrica es muy baja con relación a su resistencia de radiación). Con las antenas dipolo se debe tener especial cuidado de

evitar (o reducir) el acoplamiento mutuo con el entorno y el cable de antena como fuente de incertidumbre. En la parte superior de esta gama de frecuencias, se utilizan a menudo antenas de banda ancha o antenas directivas, en particular las de tipo log-periódicas y cónicas-log-espiral. La directividad evitará o reducirá normalmente el acoplamiento mutuo con el entorno.

Por encima de aproximadamente 1 GHz (longitudes de onda inferiores a 30 cm), la superficie de abertura del dipolo es demasiado reducida para proporcionar la sensibilidad deseada. Se emplean entonces antenas que captan la energía recibida por una abertura de grandes dimensiones con relación a la longitud de onda (por ejemplo, bocinas y reflectores parabólicos). Se caracterizan en general por un rendimiento elevado (superior al 50%) y una apreciable directividad. Se utilizan líneas de transmisión coaxial o de guiaondas.

4.4.2 Elección de los emplazamientos de medición

Como se ha descrito anteriormente, la intensidad de campo en el emplazamiento de recepción depende del espacio y del tiempo. Por consiguiente, las mediciones de intensidad de campo realizadas con una antena en un punto fijo (posición fija en el suelo, dirección y alturas fijas) puede reflejar únicamente dependencia temporal de la intensidad de campo.

4.4.2.1 Instalaciones fijas

En lo posible, conviene elegir un lugar en el que los campos de las emisiones que se hayan de registrar sean relativamente poco afectados por las construcciones locales o por la topografía. La proximidad de conductores aéreos, edificios, grandes árboles, otras antenas y mástiles, colinas y cualquier otro obstáculo artificial o natural puede deformar o perturbar gravemente el frente de onda de la emisión. El grado en que estas condiciones limitan la validez de las mediciones depende de cierto número de factores, entre ellos la gama de frecuencias, el tipo y orientación de la antena utilizada con el equipo de medición de la intensidad de campo. Para frecuencias en ondas decamétricas o en ondas más largas, es corriente emplear antenas de monopolo vertical, o sistemas de banda ancha con características de recepción con polarización esencialmente vertical y en algunos casos (por ejemplo, en la parte más elevada de los edificios) dipolos verticales o horizontales que deben utilizarse, no obstante, con precaución teniendo en cuenta las dificultades de calibración que presentan. Con estas antenas, la influencia de los conductores suspendidos y de las construcciones es particularmente marcada.

En las frecuencias más elevadas, para las que se emplean antenas muy directivas, es importante que el trayecto de propagación esté despejado en la dirección de la fuente transmisora; además, es preciso reducir al mínimo posible la recepción por trayectos múltiples resultante de cualquier reflexión local o debida a la radiación secundaria de la señal deseada. Cuando se utiliza una antena con una relación muy elevada entre la ganancia hacia delante y hacia atrás (como ocurre con las antenas montadas en reflectores parabólicos o de diedro), las fuentes de reflexión o de radiación secundaria situadas detrás de los elementos de la antena son menos susceptibles de causar perturbaciones que en el caso de antenas con características directivas más limitadas.

Los emplazamientos fijos se utilizan fundamentalmente para realizar mediciones por debajo de unos 30 MHz. A tal efecto se sugiere tener en cuenta los siguientes criterios:

– las proximidades inmediatas del emplazamiento debe ser terreno sin accidentes situado en una zona relativamente llana;

– para antenas de monopolo vertical situadas a nivel del suelo conviene que la conductividad del mismo sea relativamente elevada y que el terreno no contenga gravilla ni afloramientos rocosos;

– no debe haber conductores aéreos (como antenas, líneas eléctricas, líneas telefónicas, edificios con tejado o canalones metálicos, etc.) a menos de 100 m de la antena. En las frecuencias más bajas, para las que 100 m representan la mitad o incluso menos de la longitud de onda, es conveniente que los conductores aéreos disten de la antena receptora 20 m o más por cada metro de altura sobre el suelo del conductor aéreo, hasta una distancia como mínimo igual a la semilongitud de onda.

4.4.2.2 Instalaciones móviles

Las instalaciones móviles, es decir, equipos de medición de intensidad de campos instalados en un vehículo de comprobación técnica, presentan las siguientes ventajas sobre las instalaciones fijas: pueden utilizarse

tanto en aplicaciones estacionarias cuando el vehículo no se desplaza como en aplicaciones móviles y, por consiguiente, pueden emplearse para determinar la distribución espacial y temporal de la intensidad de campo.

4.4.2.2.1 Aplicación estacionaria

En muchos casos, las mediciones de intensidad de campo en diversos puntos con altura variable de la antena de medición constituyen la solución preferida para determinar el valor esperado de intensidad de campo, especialmente en la gama de ondas métricas y decimétricas. Tales mediciones pueden realizarse desplazando el vehículo de un punto a otro y midiendo la intensidad de campo en las frecuencias de interés a distintas alturas. La antena va montada en la parte superior de un mástil telescópico unido al vehículo y a una altura normalmente de 10 m sobre el suelo. Teniendo en cuenta las características de propagación en estas bandas, la antena debe ajustarse a la dirección y polarización de la señal recibida.

4.4.2.2.2 Mediciones con un medidor de intensidad de campo portátil

Las mediciones de intensidad de campo con un medidor portátil se realizan manualmente con la antena próxima a la persona que está leyendo los valores de intensidad de campo. Las antenas de varilla, no obstante, deben situarse en el suelo. Por regla general, deben aplicarse los mismos criterios de emplazamiento que en el caso de instalaciones fijas, salvo que puede admitirse un mayor grado de libertad en caso de emplearse la técnica de "mediciones agrupadas". Esta técnica consiste en realizar varias mediciones por separado situando la antena en emplazamientos ligeramente distintos para cada medición (del orden de uno a cinco metros de separación según la frecuencia, correspondiendo el valor mayor a las frecuencias más bajas). El resultado es un conjunto o grupo de mediciones en torno a un punto central. A continuación se promedian los valores de las distintas mediciones para obtener un valor final. Si la antena es un cuadro apantallado, suele ser suficiente un pequeño número de mediciones, ya que este tipo de antena, sensible a la componente magnética del campo, está generalmente menos sometido a la influencia de los efectos perturbadores locales de reflexión o de radiación secundaria que una antena de varilla o un dipolo. Si el medidor de intensidad de campo funciona con una antena de cuadro u otra clase de antena directiva y se conoce aproximadamente el acimut de la estación cuya emisión se desea comprobar con respecto al emplazamiento de medición, a menudo se podrá observar la existencia de elementos perturbadores locales ajustando la antena de modo que capte el nivel máximo de señal y verificando si la dirección de llegada indicada coincide con la dirección real de la estación. Si se observa una diferencia apreciable entre esas dos direcciones, la verdadera y la indicada, convendrá elegir otro lugar para las mediciones. Para mediciones en ondas métricas e inferiores, puede ocurrir que no se consiga hallar un lugar exento de perturbaciones y que para obtener resultados de una precisión razonable haya que recurrir al método de mediciones agrupadas y proceder a 10 o más mediciones individuales.

Cuando las mediciones se realizan con un equipo autónomo como el indicado, los efectos de un movimiento rápido del equipo y la proximidad del usuario pueden conducir a resultados erróneos. Por tanto, para que las mediciones sean correctas el equipo debe instalarse en sobre un trípode.

Para las señales ionosféricas de la banda de ondas decamétricas, la utilización de la "técnica de agrupación" puede sustituirse por mediciones promediadas en el tiempo en un solo emplazamiento.

4.4.3 Métodos de medida

Existen numerosos métodos para medir la intensidad de campo en las estaciones de comprobación técnica, cuya elección depende del tipo de información datos que se desee obtener. Entre los métodos posibles cabe citar:

- registro continuo durante largos periodos (se han recopilado durante cerca de 30 años datos sobre la influencia de las variaciones estacionales y de las variaciones cíclicas del número de manchas solares sobre la propagación, en ciertos trayectos en la banda de radiodifusión en ondas hectométricas);
- registro continuo durante periodos más breves, a fin de estudiar variaciones diurnas y nocturnas y otras variaciones a corto plazo del nivel de una señal;
- muestreo a intervalos próximos (por ejemplo, durante 5 s cada 2 min);

– muestreo más espaciado (por ejemplo, durante 10 min cada 90 min).

En ciertos casos, sobre todo cuando se observan ondas de superficie, puede ser suficiente un único y breve periodo de medida, dependiendo de la finalidad de las mediciones. En otros casos, por ejemplo para estudiar la propagación en ondas decamétricas, puede ser necesario disponer de datos sobre las condiciones generales de propagación en toda una banda de frecuencias.

Por tanto, una solución muy práctica puede consistir en hacer breves registros en toda la banda en cuestión de unos 10 min, a intervalos de 90 min de estaciones que se sepa transmiten permanentemente las 24 horas del día, elegidas de modo que el conjunto de las frecuencias y de las distancias de interés estén debidamente representadas. En el caso de señales que se propagan a través de la ionosfera, pueden ser necesarias mediciones en días diferentes para tener en cuenta las variaciones diarias de la ionosfera.

La Recomendación UIT-R SM.378 recomienda que, salvo cuando existan limitaciones debidas al nivel de ruido del receptor, ruido atmosférico o interferencias externas, la precisión que cabe esperar en las mediciones de intensidad de campo es mejor que ±2 dB para frecuencias inferiores a 30 MHz y ± 3 dB para frecuencias superiores a 30 MHz.

Los equipos controlados por microprocesador pueden conmutar frecuencias y antenas, si es preciso, descargar la energía residual de la banda de paso del receptor, efectuar mediciones sobre una nueva frecuencia, incluyendo la aplicación de factores de corrección, y registrar todos los resultados en forma digital en cuestión de décimas de milisegundos. La utilidad de este tipo de sistemas se aprecia cuando hay que medir algo más que unas cuantas frecuencias o cuando un muestreo de larga duración suministra demasiados datos para su archivo y análisis manual. Los resultados deben registrarse en la memoria de un computador debido a la gran cantidad de datos obtenidos en un tiempo muy corto.

4.4.3.1 Mediciones en un punto de medida fijo

4.4.3.1.1 Mediciones instantáneas

En un punto de medición determinado, situado a una cierta distancia del transmisor, pueden tomarse muestras de la distribución de la intensidad de campo. Una vez que se encuentra a la altura requerida, la antena debe girarse en dirección del transmisor. Durante el periodo de medición la altura y orientación de la antena deben variarse para obtener lecturas y registros de la máxima intensidad de campo.

4.4.3.1.2 Mediciones de corta duración y de larga duración

Para medir la distribución en el tiempo de la intensidad de campo pueden realizarse mediciones de corta duración y de larga duración con un sistema instalado permanentemente, por ejemplo, en una estación fija o situada en un contenedor. Las mediciones pueden ser continuas o bien repetirse a intervalos regulares, permitiendo la observación de varias frecuencias. Un programa de medición ejecutado con arreglo a un plan ofrece los resultados adecuados para determinar las propiedades de propagación, que son variables según la hora del día, las estaciones del año o el número de manchas solares. Los tiempos de medición muy largos exigen realizar una verificación frecuente de la calibración. También es posible realizar mediciones a largo plazo utilizando equipos de medición manuales junto con registradores de datos

4.4.3.1.3 Medición de la distribución espacial de la intensidad de campo

Para obtener una estimación de alta fiabilidad del valor de la intensidad de campo en un punto situado a una distancia determinada de un transmisor, es preciso conocer la distribución espacial de la intensidad de campo en el entorno del punto de medición. A tal efecto, deben realizarse mediciones en varios puntos de una zona delimitada. En el caso de una distribución normal, el número de muestras necesarias para asegurar con cierto grado de fiabilidad que la intensidad de campo se encuentra dentro de una determinada gama de valores próximos a la intensidad de campo esperada, depende de la desviación típica σ. Determinando los puntos de mejor y peor recepción en dicha zona pueden medirse $E_{máx}$ y $E_{mín}$. En base en la experiencia práctica, puede estimarse la desviación típica como: $E_{máx} - E_{mín} = 5\sigma$.

El Cuadro 4.4-2 permite determinar el número necesario de muestras (D es la precisión lograda):

CUADRO 4.4-2

Número de muestras necesario dependiendo de $E_{max} - E_{min}$

		$E_{max} - E_{min}$ (dB)			
Nivel de confianza (%)	***D*(+/–dB)**	**0 a 5**	**5 a 10**	**10 a 15**	**15 a 20**
90	1	3	11	24	43
90	1,5	2	5	11	19
95	1	4	15	35	61
95	1,5	2	7	15	27

4.4.3.2 Mediciones a lo largo de una ruta

Bajo la influencia de las condiciones locales de recepción, los valores reales de intensidad de campo pueden diferir significativamente de los valores predichos y, por tanto, deben verificarse mediante mediciones que permitan establecer la cobertura en términos de intensidad de campo en una zona de gran extensión.

Los resultados de las pruebas deben registrarse junto con los datos de las coordenadas geográficas para la localización de los lugares donde se han realizado las mediciones y para establecer una correspondencia con resultados recopilados en las carreteras más accesibles de la zona en cuestión.

En lugar de medir la intensidad de campo real, en ocasiones es necesario medir la tensión a la salida de una antena de usuario (la antena típica del servicio investigado) a fin de evaluar la cobertura radioeléctrica.

Los sistemas de redes digitales (tales como GSM, UMTS o DAB) son sensibles a los efectos de la recepción de señales reflejadas. En estos casos, además de la medición del nivel de la señal, la evaluación de la calidad del sistema exige la medición de la tasa de bits erróneos (BER) o de la respuesta impulsiva del canal (CIR, *channel impulsive response*). Utilizando llamadas automáticas es posible realizar estas mediciones en redes digitales en funcionamiento sin que ello suponga efecto adverso alguno.

Para realizar mediciones a lo largo de una ruta es preciso que la transmisión sea continua.

4.4.3.2.1 Resultados de mediciones móviles de intensidad de campo

Debido al efecto de las señales reflejadas, la intensidad de campo a lo largo de una ruta muestra una fluctuación muy importante. El resultado de una única medida puede coincidir con el valor mínimo o máximo de reflexión, siendo también influenciado por la altura de la antena receptora, la estación del año, la climatología, la vegetación y la humedad del entorno, que falsea la medición realizada.

Teniendo en cuenta los factores antes mencionados, pueden calcularse unos resultados de las pruebas de intensidad de campo que sean reproducibles a partir de un gran número de lecturas de datos en bruto, mediante el adecuado procesamiento estadístico de los mismos.

4.4.3.2.2 Número de puntos de medición necesarios e intervalo de promediación

Para que pueda realizarse una evaluación estadística (método de Lee) el número de puntos de prueba debe ser tal que los resultados muestren el cambio lento que sufre el valor de la intensidad de campo (efecto del desvanecimiento a largo plazo), debiendo reflejar también, más o menos, el carácter individual a nivel local (instantáneo) de la distribución de la intensidad de campo (efecto del desvanecimiento a corto plazo).

Para obtener un intervalo de confianza de 1 dB alrededor del valor medio real, las muestras de los puntos de prueba deben elegirse a intervalos de 0,8 λ (longitud de onda), sobre un intervalo de promediación de 40 λ (50 valores medidos en 40 longitudes de onda).

4.4.3.2.3 Velocidad del vehículo

La velocidad del vehículo debe ser la adecuada a la longitud de onda (teniendo en cuenta el método de Lee), el número de señales medidas simultáneamente a diferentes frecuencias y el tiempo de medida más reducido posible del receptor de prueba.

$$v = \frac{864}{(f\,(\text{MHz})) \cdot (t_r\,(\text{s}))}\ (\text{km/h}) \qquad (4.4\text{-}13)$$

donde t_r el tiempo mínimo especificado del receptor para volver a realizar la prueba a una frecuencia.

4.4.3.2.4 Antenas de medición

Durante la medición la altura elegida para situar la antena es de 1,5-3 metros. Se considerará que el resultado se ha obtenido a una altura de 3 metros.

La señal recibida llega con ángulos distintos hasta la antena de prueba, por lo tanto, se conoce el efecto del diagrama de la antena sobre el resultado de las pruebas de intensidad de campo.

La precisión del factor de antena ("*k*") debe tener un margen de 1 dB.

La desviación del diagrama de radicación horizontal de la antena de medida con respecto a un diagrama de radiación no direccional no debe ser superior a 3 dB.

4.4.3.2.5 Sistemas de navegación y posicionamiento

Sistema de localización a estima

La distancia desde el punto inicial se determina con la ayuda de un transductor de distancia a impulsos unido a un volante no activado por motor del vehículo de prueba, al tiempo que un giróscopo mecánico proporciona la información de rumbo. La precisión de la determinación de posición depende de la precisión del registro del punto inicial y de la distancia recorrida por el vehículo de prueba.

Sistema GPS

Para verificar la cobertura de radiodifusión de una estación de TV o de radio es suficiente disponer de una precisión de 100 ó 200 metros. Un sistema GPS comercial convencional permite obtenerla.

La prueba de un sistema digital con microcélulas en una zona urbana requiere una precisión de posicionamiento de unos pocos metros. En tal caso, se deben utilizar los *sistemas* de posicionamiento diferencial.

Sistema de navegación complejo

Este sistema es la combinación de los sistemas anteriormente mencionados. Sin necesidad de la intervención manual de un operador, estos sistemas de navegación proporcionan continuamente datos de posición y tiempo así como información de dirección y rumbo.

4.4.3.2.6 Recopilación de resultados de mediciones con reducción del volumen de datos

Este método permite, mediante procesamiento estadístico, reducir considerablemente el volumen de datos en bruto que deben registrarse.

Valores promediados

Algunos receptores de prueba pueden realizar una clasificación interna de los resultados de las pruebas en intervalos predefinidos por el usuario. Éste puede seleccionar intervalos de evaluación de hasta 10 000 muestras medidas, debiendo tener cada intervalo al menos 100 valores.

Solamente se almacenan en el disco duro los valores de la media aritmética de un número predefinido de resultados de prueba, indicándose su valor en el mapa definitivo de cobertura radioeléctrica.

Clasificación de los resultados en función de la probabilidad de superar un determinado nivel

Durante las mediciones, los resultados se clasifican de acuerdo con la probabilidad de superación de un nivel, comprendida entre el 1% y el 99%. Dichos porcentajes representan la probabilidad de superar el nivel de intensidad de campo aplicable. Los valores típicos son 1; 10; 50; 90 y 99%. Generalmente en los estudios de propagación se prefiere el valor medio, 50%.

Debe tenerse especialmente en cuenta que los receptores requieren un tiempo de varios milisegundos para realizar la clasificación, por lo que durante dicho tiempo se ignoran los impulsos de activación y no se obtienen mediciones adicionales.

4.4.3.2.7 Presentación de los datos

Las representaciones siguientes pueden realizarse utilizando el monitor integrado en el controlador de procesos, el monitor color de un PC externo, la impresora o el sistema de trazado de gráficos:

Representación tabular de datos en bruto

Inconveniente: demasiado volumen de datos. Los resultados individuales no son repetibles.

Ventaja: da información detallada sobre efectos locales de desvanecimiento. Los resultados pueden convertirse en resultados de fácil visualización mediante procesos matemáticos o estadísticos.

Representación gráfica en coordenadas cartesianas

La representación gráfica de los datos de intensidad de campo se realiza en coordenadas cartesianas en función de la distancia, con indicaciones de dichos valores medios calculados.

Inconveniente: es difícil relacionar los resultados con los lugares exactos de las mediciones.

Ventaja: es una forma fácil y rápida de visualizar la distribución y ubicaciones cuyo nivel de intensidad de campo se encuentra por debajo de un umbral.

Representación en un mapa

Mediante una línea de varios colores se representan los niveles de intensidad de campo procesados (por ejemplo, con una escala de 10 dBμV/m) o la probabilidad de superar el nivel (entre el 1% y el 99%) a lo largo del mapa de la ruta.

La escala del mapa debe estar en consonancia con el tamaño la zona cubierta por las señales de radio que se investigan y la resolución requerida de los resultados de intensidad de campo procesados. En función de la escala del mapa, los intervalos representados pueden incluir múltiplos de los intervalos promediados. La resolución de la representación de los resultados debe permitir que se visualicen peculiaridades locales sin que por ello la línea esté demasiado coloreada.

Si fuera necesario representar los intervalos promediados con una elevada resolución (por ejemplo, cuando se representan los resultados en microcélulas), el sistema debe permitir un sistema de acercamiento – alejamiento del mapa (zoom).

Si durante las mediciones se registran simultáneamente dos series de datos (por ejemplo, la intensidad de campo y la BER), es conveniente representarlas simultáneamente mediante dos líneas coloreadas paralelas a lo largo de las carreteras representadas en el mapa (para más información sobre mapas véase § 6.2).

Inconveniente: la resolución del intervalo dibujado puede ser mayor que la del intervalo procesado. Ello puede impedir apreciar las características de la intensidad de campo locales.

Ventaja: los resultados de las pruebas pueden agruparse permitiendo disponer de una panorámica precisa de los resultados. Ello proporciona una forma rápida y fácil de visualizar los resultados de la distribución y valores de la intensidad de campo y de los valores que se encuentran por debajo de un cierto umbral.

4.4.3.3 Comparación de los datos medidos y los datos calculados

La p.i.r.e. del emisor se utiliza para calcular la cobertura de la estación.

Los datos obtenidos de la comprobación técnica pueden utilizarse para:

– estimar la p.i.r.e.;

– evaluar y verificar el modelo de propagación y el modelo digital del terreno (DTM).

Los datos calculados pueden utilizarse para:

– estimar la calibración de amplitud del sistema receptor: antena, cables, receptor;

– evaluar la calibración.

4.4.3.3.1 Comparación de los valores de intensidad de campo predichos y medidos en la radiodifusión en MF

Las señales radioeléctricas varían con el tiempo y con pequeñas diferencias en la localización. En numerosos métodos de predicción de la propagación se tiene en cuenta este carácter variable. En la mayoría de los casos, las mediciones de comprobación técnica se efectúan en una cierta localización y durante un periodo de tiempo que tal vez sea demasiado breve para definir enteramente la variabilidad en tiempo. Por lo tanto, hay que examinar con mucho cuidado las mediciones para poder compararlas con las predicciones. El ejemplo aquí descrito corresponde a una situación en la que las magnitudes medidas pueden variar muy poco y las comparaciones pueden establecerse con confianza. Pero en otros muchos casos las variabilidades serían mayores y las comparaciones tendrían que considerar con gran atención las diferencias observadas.

El Acuerdo Regional (Ginebra, 1984) contiene las bases de la planificación de estaciones de radiodifusión MF en la Región 1. En este plan se indican las frecuencias que puede utilizar cada país, señalando parámetros como la potencia, altura de antena, diagrama de antena, polarización u otros. La situación real queda reflejada en el Registro Internacional de Frecuencias a través de la publicación quincenal del DVD de la Circular Internacional de Información sobre Frecuencias (IFIC) de la Oficina de Radiocomunicaciones de la UIT.

A las administraciones nacionales les compete verificar, por medio de su servicio de comprobación técnica del espectro, que estas estaciones de radiodifusión se ajustan a los parámetros que les han sido asignados. Esto puede conseguirse mediante la inspección física de todas las estaciones con carácter regular, por ejemplo una vez al año (o cada dos años). Para economizar tiempo y costos, el sistema de comprobación técnica mide las estaciones de radiodifusión desde una o más estaciones fijas de comprobación y compara los resultados con los valores predichos. Si los resultados de esta comparación indican que la estación emite con demasiada potencia (o que la antena se ha montado a mayor altura que la permitida), podrá entonces realizarse una inspección física.

4.4.3.3.2 Software de planificación y bases de datos

La gestión de frecuencias a menudo se vale de un software para calcular los parámetros de las estaciones que ha de planificar o para revisar las peticiones de coordinación procedentes de países vecinos. El software de planificación también podría producir lo que se denomina un barrido de frecuencias. En tal caso, el programa explora la base de datos que contiene información de la banda 87,5–108,0 MHz y automáticamente genera una lista correspondiente a una localización determinada; esa lista contiene el total de los 204 canales con la intensidad de campo predicha para todas las estaciones que funcionan en esa frecuencia. El número de estaciones comprendidas en la lista, con la intensidad de campo calculada para determinada frecuencia, depende de la magnitud de la base de datos utilizada y del nivel de intensidad de campo definido previamente, el cual debería tenerse en cuenta.

4.4.3.3.3 Intensidad de campo predicha desde estaciones de comprobación técnica a distancia

En el país considerado a modo de ejemplo, se utiliza una red de 12 estaciones de comprobación técnica controladas a distancia. En cada una de las localizaciones de estación controladas a distancia el programa de planificación puede generar una lista de valores de intensidad de campo predichos para los 204 canales de radiodifusión en MF en su totalidad. En cada canal sólo se necesita la estación que emite con más intensidad. Sin embargo, es deseable obtener una lista más amplia, puesto que la estación que según los cálculos debiera producir el campo más intenso acaso funcione a potencia reducida y en su lugar podría recibirse otra estación. Las predicciones para este ejemplo se han formulado utilizando el modelo de propagación de la

Recomendación UIT-R P.370. Las predicciones futuras podrían basarse, por ejemplo, en la Recomendación UIT-R P.1546.

4.4.3.3.4 Intensidad de campo medida desde estaciones de comprobación técnica a distancia

Todas las estaciones controladas a distancia comprenden 2 receptores que utilizan la misma antena a través de un divisor. El receptor uno explora secuencialmente la banda de frecuencias en todas las estaciones. Los resultados se visualizan en 12 ventanas sobre dos pantallas de 21 pulgadas. El segundo receptor puede utilizarse para identificar las estaciones presentadas en la pantalla como resultado de las mediciones del primer receptor. Cada 10 segundos se explora la banda entera, tras lo cual se almacenan los valores de las intensidades de señal medidas en todas las etapas. El sistema mide continuamente durante 24 horas (aunque podría ser menos tiempo, por ejemplo, sólo en horas diurnas). La separación de canales en radiodifusión MF en la Región 1 es de 100 kHz. Por lo tanto, para el procesamiento de los valores de intensidad de señal medidos que han de compararse con las intensidades predichas sólo se necesitan aquellos que corresponden a los canales exactos (87,6, 87,7, 87,8, etc.). Para cada canal se toma el valor mediano en las 24 horas de la medición, reduciendo así al mínimo los efectos de los cambios de propagación durante el día.

4.4.3.3.5 Comparación de los valores predichos y medidos

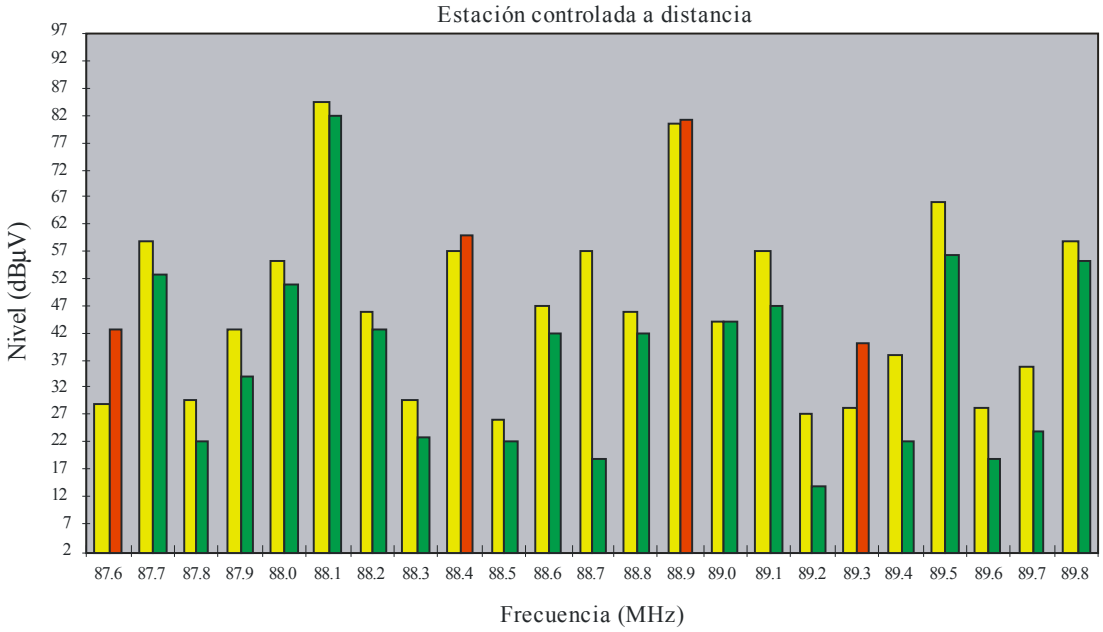
Se tiene acceso a los valores predichos y a los valores medianos medidos en cada una de los 12 emplazamientos. Estos valores pueden compararse entre sí automáticamente y visualizarse en una pantalla en porciones de 23 canales, por ejemplo (véase la Fig. 4.4-2).

Las barras de color verde (niveles medidos) cambian al rojo en caso de que el valor medido sea igual o superior al valor predicho. A partir de ahí es posible concentrar la atención en el transmisor interesado. Hay información detallada disponible con las mediciones anteriores de la estación correspondiente. Cabe considerar si se envía a un ingeniero inspector a una (o varias) estaciones que estén sobrepasando los valores predichos. Las mediciones descritas deben repetirse regularmente, de manera que puedan utilizarse para proporcionar informaciones adicionales como las siguientes:

- producir presentaciones que ilustren las tendencias históricas en cada canal por cada localización, gráficamente o en texto ordinario;
- representar los valores medidos en función del tiempo en un gráfico de distribución;
- calcular todas las medidas en exceso para cada estación distante;
- detectar automáticamente las estaciones no autorizadas por cada medición o estación, y presentar una panorámica sobre las tendencias de uso ilegal. De este modo pueden apreciarse los efectos de los trabajos en pro del cumplimiento legal;
- llevar a cabo revisiones de los diagramas de antena de la estación radiodifusora por comparación de los valores predichos de las intensidades de campo procedentes de una estación de radiodifusión con los valores medidos desde varias (tantas como sea posible) estaciones de comprobación técnica distantes en diferentes direcciones.

FIGURA 4.4-2

Niveles predichos (en amarillo) y medidos (en verde o rojo) entre 87,6 y 89,9 MHz desde una estación de comprobación técnica distante



4.4.4 Evaluación, procesamiento y documentación de los resultados de la medición

4.4.4.1 Definición de parámetros estadísticos de la intensidad de campo y densidad de flujo de potencia

El modo utilizado para deducir información de los registros depende fundamentalmente del fin que se persiga con dichos datos. Si se realizan estudios de propagación, se pretende en general determinar el nivel de la señal rebasado durante un cierto porcentaje del tiempo, o bien su valor mínimo o máximo en el curso de un periodo dado; por ejemplo:

– el valor mediano (es decir, el nivel rebasado durante el 50% del tiempo);

– el valor durante el 90% del tiempo;

– el valor durante el 10% del tiempo;

– el nivel máximo de señal;

– el nivel mínimo de señal.

El valor mediano (en dBµV/m) constituye un modo de presentación conveniente de los resultados de las mediciones en frecuencias discretas para los estudios de propagación. Si bien el periodo de base de los análisis (en ondas decamétricas) es a menudo de 60 min, puede preferirse en determinadas aplicaciones un valor distinto (por ejemplo, 1 min, 10 min o varias horas). A frecuencias más bajas, especialmente en frecuencias inferiores a 30 MHz, en las que el nivel de la señal depende mucho de la hora del día, como es el caso en el servicio de radiodifusión por ondas hectométricas y decamétricas, puede procederse al análisis en periodos horarios centrados en las horas de salida y puesta del sol en el punto medio del trayecto entre transmisor y receptor. La utilización de un computador o de un microprocesador simplifica y agiliza los análisis.

Con frecuencia, el nivel de intensidad de campo en dB(µV/m) presenta una distribución gaussiana (normal) con dependencia temporal y espacial. Para otro tipo de distribuciones, véase la Recomendación UIT-R P.1057.

La distribución de los valores de intensidad de campo medidos, expresada en unidades lineales (por ejemplo, V/m, mV/m o μV/m), sigue normalmente una distribución log-normal. Cuando estos datos se convierten a dB, los valores siguen una distribución normal (gaussiana) y se necesitan otras fórmulas. Para el caso de distribución gaussiana se aplican las siguientes definiciones:

La varianza empírica corregida de la intensidad de campo:

$$s*^2 = \frac{n}{n-1} s^2 \qquad \text{dB} \tag{4.4-14}$$

siendo:

n: número de muestras

s^2: valor empírico.

$$s^2 = \sum_{i=1}^{n} (e_i - \bar{e})^2 \qquad \text{dB} \tag{4.4-15}$$

siendo:

e_i: valor del muestreo de la intensidad de campo en dB(μV/m)

$\bar{e}$: media aritmética de las muestras en dB(μV/m).

4.4.4.2 Evaluación de la dependencia espacial y temporal de la intensidad de campo

En una zona situada a una distancia L del transmisor, donde haya un número suficiente de muestras, si se conoce el valor medio de la intensidad de campo (media aritmética $\bar{e}$ de las muestras) y la desviación típica por emplazamiento σ_L, puede obtenerse la función distribución $N(\bar{e};\sigma_L)$. Asimismo, durante un periodo de tiempo relativamente largo, cuando hay un número de muestras suficiente, si se conoce el valor medio de la intensidad de campo (media aritmética $\bar{e}$ de las muestras) y su desviación típica en el tiempo σ_t, puede obtenerse la función distribución $N(\bar{e};\sigma_t)$.

Con el valor reducido de la desviación típica por emplazamiento y la varianza en el tiempo, puede determinarse la función de distribución $N(\bar{e}\ \sigma_{L,t})$

$$\sigma_{L,t} = \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_t^2} \qquad \text{dB} \tag{4.4-16}$$

En las Recomendaciones UIT-R P.1542 y P.845 figura más información al respecto.

4.4.4.3 Ejemplo de lista de verificación para los datos de coordinación

En un acuerdo de cooperación europeo (Acuerdo de Viena de 2000) se ha establecido, entre otros, el siguiente procedimiento de medición en caso de que surjan desacuerdos sobre los resultados de la evaluación en una petición de coordinación específica, para facilitar la mejora de las redes existentes, y en caso de interferencia perjudicial entre estaciones de regiones fronterizas en las gamas de ondas métricas y decimétricas. Los resultados de las mediciones de intensidad de campo deberán intercambiarse y, por consiguiente, deben normalizarse los procedimientos de medición.

Los emplazamientos de medición deberán seleccionarse de manera que no haya objetos que produzcan reflexiones o éstos sean los menos posibles en un radio equivalente a 10 veces la longitud de onda (10 λ). Siempre que sea posible, debe haber contacto visual con la antena transmisora.

Dependiendo de las condiciones de medición, deben realizarse diversos registros de las medidas, incluida la instalación y el montaje realizado, de manera que los resultados puedan reproducirse. Deberán especificarse todos los equipos utilizados.

En caso de mediciones en punto fijo, la altura de la antena o antenas de medición, medida a partir del suelo, debe estar entre 3 y 10 m. Dentro de esos márgenes, debe registrarse el valor más elevado de la intensidad de

campo así como la altura de antena con que se midió este valor. Dicho valor debe considerarse como el valor de intensidad de campo para una altura de 10 m.

En una base de datos deben almacenarse registros de todos los montajes de medida y de todas y cada una de las mediciones. Todos los datos pertinentes para explicar los resultados de las mediciones deben registrarse para posteriores cálculos.

Datos de medición pertinentes (en casos de interferencia perjudicial):

Asignación interferente:

– Administración
– Frecuencia (MHz)
– Supuesto emplazamiento o dirección hacia la asignación interferida
– Denominación de la emisión
– Intensidad de campo medida (dB(μV/m)).

Asignación interferida:

– Número de referencia de la administración
– Frecuencia (MHz)
– Nombre del emplazamiento
– Coordenadas del emplazamiento (grados/minutos/segundos)
– Clase de estación.

Tipo de medición:

– Punto fijo, número de puntos
– Mediciones durante un periodo de tiempo más largo
– Móvil.

Datos de la medición:

– Número de la medición
– Frecuencia medida
– Anchura de banda medida
– Fecha (DD/MM/AA)
– Periodo de tiempo (de/a) (HH/MM a HH/MM)
– Nombre del emplazamiento
– Coordenadas geográficas (grados/minutos/segundos)
– Altura del emplazamiento (metros sobre el nivel del mar)
– Altura de la antena de medición (metros sobre el suelo)
– Polarización de la antena de medición (h/v)
– Antena de usuario ❑ Sí ❑ No
– Descripción del trayecto de transmisión
– Condiciones (meteorológicas) de la propagación
– Observaciones (anchura de banda en FI, modulación, proporción de bits erróneos, si es necesario).

Resultados de la medición (en caso de mediciones durante un periodo de tiempo más largo):

– Valor casi máximo (10%): (dB(μV/m))
– Valor casi mínimo (90%): (dB(μV/m))
– Valor medido (mediano): (dB(μV/m)).

4.4.5 Calibración de los instrumentos y las antenas de medición

La calibración de los aparatos de medición de la intensidad de campo incluye normalmente el calibrado por separado del receptor de medición y de la antena de medición, incluido el cable de transmisión.

Únicamente en los primeros tipos (manuales) de medidores de intensidad de campo en ondas decamétricas, la antena formaba parte del circuito de sintonización y se incluía en el procedimiento de calibración.

La frecuencia de calibración depende del equipo utilizado y del entorno en que va a emplearse; por ejemplo, tal vez sea preciso realizar con más frecuencia la calibración de la antena en el caso de funcionamiento móvil o en emplazamientos con variaciones estacionales de la conductividad del suelo.

4.4.5.1 Calibración de los receptores de medición

La calibración de los receptores de medición se describe en el punto 4.3.11.

4.4.5.2 Calibración de las antenas de medición

La parte del factor de calibración determinada por las características del sistema de antena (es decir, la ganancia y las pérdidas en la línea y el transformador) se denomina factor de antena (véase § 4.4.1.1.2). Por regla general, el factor de calibración varía con la frecuencia. Los métodos de calibración pueden clasificarse en tres categorías básicas: método de campo normalizado, método de antena normalizada y método de distancia normalizada o de emplazamiento normalizado. Todos los métodos deben proporcionar factores de antena válidos para la propagación en espacio libre en condiciones de campo lejano. Es importante que las antenas estén montadas para realizar las mediciones de manera que las características de la antena no sean influenciadas por los mástiles, los cables, otras antenas u objetos reflectantes que se encuentren en las proximidades

4.4.5.2.1 Método de campo normalizado (calibración directa)

El método de campo normalizado es el método de calibración más básico. Deriva directamente de la ecuación que define el factor de antena. La antena está expuesta a un campo electromagnético cuya intensidad se conoce con precisión. La intensidad de campo puede determinarse mediante cálculos basados en la corriente medida de una antena transmisora cuyas dimensiones y distribución de corriente son conocidas. Por razones prácticas, la aplicación de este método se limita a la calibración de las antenas de cuadro, puesto que para otros tipos de antenas existen otros métodos que proporcionan resultados más precisos.

4.4.5.2.2 Calibración indirecta de antenas

La calibración directa normalmente no se utiliza para calibrar instrumentos con antenas de varilla corta, toda vez que sería necesario determinar con precisión el valor del campo uniforme en una amplia zona de prueba ocupada por el instrumento y su antena. En este método, el factor de calibración se determina a partir de las características calculadas o medidas de la antena y las del instrumento. El radiador pasivo se elimina del equipo de medición de intensidad de campo y se sustituye por un generador de señal normalizado calibrado cuya impedancia es prácticamente igual a la de la antena. Normalmente se utiliza una antena artificial adecuada para calibrar el equipo restante (dispositivo de adaptación de impedancias más receptor de medición), actuando como un voltímetro de radiofrecuencia (o medidor de potencia), con respecto al generador de señal normalizado. Para cada frecuencia se determina un factor de antena basado en las dimensiones y la distribución de corriente de la antena, considerando la antena como una abertura, o a partir de su ganancia medida. Si se emplea un cable de transmisión, en algunos casos puede ser conveniente considerarlo como parte del receptor y conectarlo al generador de calibración, evitando de esa forma la necesidad de determinar por separado las pérdidas del cable y tenerlas debidamente en cuenta. Para verificar la calibración de la antena de varilla en el campo lejano sin perturbaciones de una estación radioeléctrica puede utilizarse un medidor de intensidad de campo con una antena de cuadro apantallada.

4.4.5.2.3 Método de la antena normalizada (método de sustitución)

En el método de la antena normalizada se mide una onda plana de intensidad de campo desconocida utilizando una antena cuyo factor de antena se conoce con precisión (antena de ganancia normalizada; por ejemplo, un dipolo normalizado) que se sustituye luego por la antena que va a calibrarse. A partir de la

diferencia de los niveles de tensión de entrada del receptor puede determinarse el factor de antena en dB. Los factores de antena de las propias antenas de ganancia normalizada se calculan basándose en sus dimensiones y en las propiedades medidas de los elementos de adaptación (por ejemplo, transformadores simétricos/asimétricos o baluns) o se determinan mediante el procedimiento de calibración adecuado. Comparado con el método descrito en el § 4.4.5.2.4, el método de sustitución tiene el inconveniente de que el error del factor de antena contribuye al error total del método. Pueden aparecer más errores debido a las distintas formas de la antena de ganancia normalizada y de la antena que va a calibrarse, cuando el campo no es una onda plana ideal. Los dipolos de media onda utilizados como antenas de ganancia normalizada presentan además el inconveniente de que deben sintonizarse mecánicamente para cada nueva frecuencia

4.4.5.2.4 Método de la distancia normalizada o del emplazamiento normalizado

Cuando se aplica el método de la distancia normalizada, la calibración de la antena se limita a realizar una medición precisa de la atenuación entre dos antenas idénticas, cuyo resultado se compara con el valor calculado de la atenuación en el emplazamiento. Para determinar el factor de antena en espacio libre, si es factible, deberá utilizarse un dispositivo de calibración en espacio libre que proporcione los resultados más precisos posibles. En este caso, las dos antenas deberán ir montadas de tal forma que puedan despreciarse las reflexiones provocadas por objetos circundantes. Normalmente esto es posible en el caso de antenas directivas. Si no pueden establecerse las condiciones de espacio libre, puede utilizarse, por ejemplo, un método de reflexión en el que las dos antenas se monten por encima de un plano de tierra reflector y la atenuación se compare con el valor teórico en el supuesto de que las ondas directa y reflejada se sumen en el emplazamiento de la antena receptora. Este método debe aplicarse con gran precaución, ya que el acoplamiento mutuo entre la antena y el plano de tierra puede tener influencia en el factor de antena. Por consiguiente, la distancia entre las antenas y entre cada antena y el plano de tierra debe ser lo suficientemente amplia como para que puedan despreciarse los efectos de acoplamiento mutuo. Debe prestarse especial atención al emplazamiento de los centros de fase de las antenas. Esta posible fuente de error puede eliminarse considerando adecuadamente los efectos sobre la atenuación medida en el cálculo de la atenuación en el emplazamiento.

Por lo que se refiere a la evaluación de los resultados del método de la distancia normalizada, debe distinguirse entre el método de las dos antenas y el método de las tres antenas. Si se mide la atenuación sólo con dos antenas, únicamente puede determinarse con certeza la suma de las ganancias de ambas antenas en dB. El factor de antena que va a calcularse sólo puede atribuirse a una antena cuando se conocen previamente los datos de la otra antena. Esta limitación puede eliminarse aplicando el método de las tres antenas, en el que se realizan mediciones de las tres atenuaciones con las tres antenas combinadas en tres pares intercambiables cíclicamente (a+b, b+c, c+a). Resolviendo el conjunto de ecuaciones con estas tres variables desconocidas, puede determinarse la ganancia (y el factor de antena o superficie efectiva de cada una de las antenas.

4.4.5.2.5 Cálculo del factor de antena a partir de sus dimensiones y de la distribución de la corriente

El empleo de antenas simples facilita el cálculo del factor de antena. Si, por ejemplo, se trata de una antena de varilla vertical delgada y corta (menos del 10% de la longitud de onda) instalada sobre un plano de tierra indefinido, se supone que la distribución de la corriente es lineal, con lo cual la altura equivalente de la antena es igual a la mitad de su altura geométrica. La impedancia de esta antena puede simularse aproximadamente mediante un condensador conectado en serie entre el generador calibrado y la entrada del aparato de medida. Otro ejemplo es el de una antena dipolo de media onda de espesor fino, frecuentemente utilizada para calibraciones, en la que se supone que la distribución de la corriente es sinusoidal. Esta antena tiene una longitud equivalente calculada de λ/π y su resistencia de radiación en el espacio libre de 73,3 Ω. Para que resuene, un dipolo real, cilíndrico, debe estar cortado a bastante menos de media longitud de onda. Su resistencia de radiación y su longitud equivalente son inferiores a los valores correspondientes de una antena infinitamente delgada. Estas diferencias se deben al efecto del espesor finito sobre la distribución de la corriente. Sin embargo, el diagrama de radiación del dipolo real no difiere respecto al del dipolo de espesor fino teórico, y cabe llegar a la conclusión de que la ganancia y la potencia disponible no presentan tampoco muchas diferencias. De lo que precede se desprende que un dipolo real puede considerarse equivalente a la antena de espesor fino teórica, completada por un transformador a fin de tener en cuenta la variación de la resistencia de radiación. El transformador simétrico/asimétrico (balun) es otro tipo de

transformador cuyo empleo puede introducir errores notables salvo que se haya optimizado su característica de adaptación de impedancia y se haya tenido en cuenta la atenuación que introduce. Los dipolos de precisión, disponibles comercialmente, tienen atenuadores adicionales para estabilizar la impedancia de carga del dipolo, lo cual supone una ventaja para la calibración de la antena. El método de los momentos [Harrington, 1968] calcula el factor de antena cuando se conocen las dimensiones de la misma. Deben tomarse todas las precauciones necesarias para aplicar adecuadamente el método de los momentos a este problema y conviene realizar siempre que sea posible una verificación cruzada de mediciones

4.4.5.3 Calibración de las instalaciones fijas de registro

Para poder obtener con estas instalaciones las precisiones que se consideran deseables en la Recomendación UIT-R SM.378, es necesario que su calibrado inicial se haga por comparación con un medidor de intensidad de campo calibrado, de precisión conocida, y en condiciones bien determinadas. Este calibrado sólo es válido mientras no varía ninguna de las condiciones en las que se ha realizado el calibrado inicial. Por consiguiente, de modificarse significativamente las antenas, las líneas de transmisión, los dispositivos de adaptación de impedancia o, incluso la propia ubicación (por ejemplo, adición o desplazamiento de antenas próximas, de conductores aéreos, etc.) habrá normalmente que proceder de nuevo al calibrado de la instalación. Conviene además verificar periódicamente el calibrado, por lo general cada día, comparándolo con el patrón local (generador de señal normalizado o generador de ruido o fuente de calibración incorporada). Las estaciones de radiodifusión locales pueden utilizarse con precaución para realizar verificaciones de la calibración. Si hay que hacer mediciones en una amplia gama de frecuencias, se puede trazar una curva de calibrado a base de las mediciones de comparación hechas a intervalos próximos en la gama de frecuencias de interés. Para estas mediciones de comparación, es preciso que la antena de la estación de comprobación y la del medidor de intensidad de campo tengan la misma polarización (por ejemplo, que ambas estén ajustadas para la recepción de emisiones con polarización vertical u horizontal).

Para mediciones en frecuencias inferiores a 30 MHz, es corriente utilizar un aparato de medida de la intensidad de campo provisto de una antena de cuadro apantallada para calibrar una instalación de registro que incluya una antena de monopolo vertical; generalmente se obtienen resultados satisfactorios colocando el medidor de campo a una altura conveniente sobre el suelo (por ejemplo, aproximadamente 1 m). En frecuencias superiores a 30 MHz, en las que normalmente se emplean dipolos u otras antenas resonantes y en cuya propagación no influye mucho el terreno, conviene instalar la antena del aparato de medida de intensidad de campo a la misma altura que la antena de registro (normalmente a unos 10 m sobre el suelo). Para evitar interacciones entre la antena del medidor de intensidad de campo y la antena de registro, puede ser conveniente retirar provisionalmente la antena de registro y poner en su lugar la antena del medidor de campo, para obtener la intensidad de campo de referencia; posteriormente se retirará esta antena y volverá a ponerse en su sitio la antena de registro. Esta opción presupone que la fuente de señal utilizada tiene un nivel constante durante toda la operación de calibrado. Si hay que recurrir a una señal de intensidad variable, habrá que hacer mediciones simultáneas en las dos antenas, estando ambas próximas entre sí, pero suficientemente separadas para que su interacción sea mínima.

Bibliografía

CENELEC European Standard EN50492 [November, 2008] Basic standard for the in-situ measurement of electromagnetic field strength related to human exposure in the vicinity of base stations.

CHAPIN, E. W.[1958] Field Strength Measurements. L. D. Report 6.3.1. Federal Communications Commission, Office of the Chief Engineer, Washington, DC, Estados Unidos de América.

CONSTANTINE A.BALANIS [2005] *Antenna theory, third edition*. John Wiley & SONS, inc., Estados Unidos de América, ISBN 0-471-66782-X.

EVERS, C. H. [1991] Communications & Spectrum Analyzers FSAD and FSBC. News from Rohde & Schwarz No. 134, p. 11 to 13.

HARRINGTON, R. F. [1968] *Field Computation by Moments Method*. Macmillan, New York, Estados Unidos de América.

IEC 597-2[1977 Areas for the reception of sound and television broadcasting in the frequency range 30 MHz to 1 GHz, Part 2: Methods of measurement of electrical performance parameters.

IEEE Standard 145 [1993] Antenna definitions.

IEEE Standard 211 [1991] Propagation definitions.

IEEE Standard 291 [1991] Methods for Measuring Electromagnetic Field Strength of Sinusoidal Continuous Waves, 30 Hz to 30 GHz.

IEEE Standard 302 [1969] Methods for Measuring Electromagnetic Field Strength for Frequencies below 1 000 MHz in Radio Wave Propagation, reaffirmed 1991.

IRPA [1991] Guidelines on Protection against Non ionizing Radiation. Pergamon Press Inc.

KANDA, M. [October 1993] Standard Probes for Electromagnetic Field Measurements. *IEEE Trans. Ant. and Prop.*, Vol. AP-41, No. 10, p. 1349-1364.

KRAUS, J. D.[1950] *Antennas*. McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, NY, Estados Unidos de América.

LEE, W. C. Y. [1986] *Mobile Communications Design Fundamentals*.Howard W. Sams & Co., Indianapolis, Estados Unidos de América, ISBN 0-672-22305.

LORENZ, R. W. [March 1979] Theoretical distribution functions of multipath fading processes in the mobile radio and determination of their parameters by measurements. Technical Report FI 455 TBr 66, FI, FTZ, Deutsche Bundespost, Alemania.

RANDALL, R. B. [1977] *Application of B&K Equipment to Frequency Analysis*. Brüel & Kjaer, 17-089.

ROHNER, C. H. and STECHER, M. [1993] Calibration of Antennas for the Measurement of Signals and Interference. News of Rohde & Schwarz, No. 143, p. 31 to 34.

TAGGART, H. E. [June 1965] Field-strength calibration techniques at the National Bureau of Standards. *IEEE Trans. Electro. Comp.*, Vol. EMC-7, p. 163-169.

Acuerdo de Viena, Anexo 7[2000] Disposiciones sobre los procedimientos de medición en el servicio fijo y en el servicio móvil terrestre.

WOLF, J. [1993] Test Receivers ESN and ESVN: Top Allrounders for Signal and EMI Measurements up to 2 GHz. News from Rohde & Schwarz, No. 141, p. 11 to 13.

Recomendaciones e Informes del UIT-R

NOTA – Debe utilizarse la última edición disponible de cada Recomendación e Informe.

Recomendación UIT-R SM.378 – Mediciones de la intensidad de campo en las estaciones de comprobación técnica.

Recomendación UIT-R P.529 – Métodos de predicción requeridos para el servicio móvil terrestre terrenal en las bandas de ondas métricas y decimétricas.

Recomendación UIT-R P.533 – Método para la predicción de la propagación de las ondas decamétricas.

Recomendación UIT-R BS.638 – Términos y definiciones utilizados en la planificación de frecuencias para radiodifusión sonora.

Recomendación UIT-R P.845 – Medición de la intensidad de campo en ondas decamétricas.

Recomendación UIT-R P.1057 – Distribuciones de probabilidad para establecer modelos de propagación de las ondas radioeléctricas.

Recomendación UIT-R M.1172 – Abreviaturas y señales diversas que habrán de utilizarse para las radiocomunicaciones en el servicio móvil marítimo.

Recomendación UIT-R P.1546 – Métodos de predicción de punto a zona para servicios terrenales en la gama de frecuencias de 30 a 3 000 MHz.

Informe UIT-R BS.516 – Intensidad de campo resultante de varios campos electromagnéticos.

4.5 Medición de la anchura de banda

4.5.1 Consideraciones generales

4.5.1.1 Influencia de la anchura de banda sobre los servicios de radiocomunicación

Los diversos esquemas de modulación utilizados por los distintos servicios de radiocomunicación producen componentes espectrales de distintas frecuencias.

A fin de conseguir un grado de calidad de servicio dado, es necesario reproducir la distribución espectral de la señal emitida en el emplazamiento de recepción con un cierto grado de exactitud.

Cuanto mayor sea la diferencia entre el espectro original y el espectro reproducido, más pobre será la calidad de servicio que se podrá conseguir.

Por otro lado, las componentes espectrales procedentes de otras fuentes de señales distintas a las deseadas degradan la calidad en la medida que distorsionan la distribución espectral original. Para que los requisitos de calidad de servicio puedan formularse en términos de cantidades físicas, la anchura de banda debe definirse adecuadamente.

4.5.1.2 Definiciones de anchura de banda

Anchura de banda necesaria

De conformidad con el Artículo 1 del Reglamento de Radiocomunicaciones (RR), número 1.152, la definición actualmente utilizada es la siguiente:

"1.152 *Anchura de banda necesaria:* para una clase de emisión dada, anchura de la banda de frecuencias estrictamente suficiente para asegurar la transmisión de la información a la velocidad y con la calidad requeridas en condiciones especificadas."

NOTA 1 – La anchura de banda necesaria puede calcularse utilizando la fórmula dada en la Recomendación UIT-R SM.328 para las distintas clases de emisión.

NOTA 2 – La emisión de un transmisor fuera de la anchura de banda necesaria se denomina emisión no deseada y consta de dos partes (véase número 1.146 del RR):

"1.144 *Emisión fuera de banda* es la "emisión en una o varias frecuencias situadas inmediatamente fuera de la anchura de banda necesaria, resultante del proceso de modulación, excluyendo las emisiones no esenciales" (número 1.144 del RR); la Recomendación UIT-R SM.328 describe curvas que limitan el espectro fuera de banda de diversas clases de emisiones."

La Recomendación UIT-R SM.328 incluye curvas que determinan los límites del espectro fuera de banda para diversas clases de emisiones.

"1.145 *Emisión no esencial* es la "emisión en una o varias frecuencias situadas fuera de la anchura de banda necesaria, cuyo nivel puede reducirse sin influir en la transmisión de la información correspondiente. Las emisiones armónicas, las emisiones parásitas, los productos de intermodulación y los productos de la conversión de frecuencia están comprendidos en las emisiones no esenciales, pero están excluidas las emisiones fuera de banda."

NOTA 3 – Las frecuencias debidas a las emisiones fuera de banda y a las emisiones no esenciales pueden superponerse. Por lo tanto, se han introducido las dos definiciones adicionales siguientes:

"1.146A *Dominio fuera de banda* (de una emisión) es "la gama de frecuencias externa e inmediatamente adyacente a la anchura de banda necesaria pero excluyendo el *dominio no esencial*, en la que generalmente predominan las *emisiones fuera de banda*". Las *emisiones* fuera de banda, definidas en función de su fuente, ocurren en el dominio fuera de banda y, en menor medida, en el dominio no esencial. Las emisiones no esenciales pueden asimismo ocurrir en el dominio fuera de banda así como en el dominio no esencial." (CMR-03)

"1.146B *Dominio no esencial* (de una emisión) es "la gama de frecuencias más allá del *dominio fuera de banda* en la que generalmente predominan las *emisiones no esenciales*." (CMR-03)

NOTA 4 – La Recomendación UIT-R SM.329 especifica los límites de las emisiones no esenciales y contiene directrices relativas a los límites entre el dominio fuera de banda y el dominio no esencial. De conformidad con los principios establecidos en el Apéndice 3 del RR, el dominio no esencial se compone de frecuencias separadas del centro de la emisión en un 250% o más de la anchura de banda necesaria de la emisión. Sin embargo, esta separación de frecuencia puede depender del tipo de modulación utilizada, de la máxima velocidad binaria en el caso de una modulación digital, del tipo de transmisor y de factores de coordinación de la frecuencia.

Anchura de banda ocupada

La definición de anchura de banda ocupada que figura en el Artículo 1 del RR, número 1.153, es consecuencia de un proceso de muchos años de modificaciones que han sido necesarias por el aumento de la congestión espectral y por existir una apreciación cada vez mayor de los problemas existentes, permitiendo así que la definición sea aplicable de una manera más general.

La definición actualmente utilizada es la siguiente:

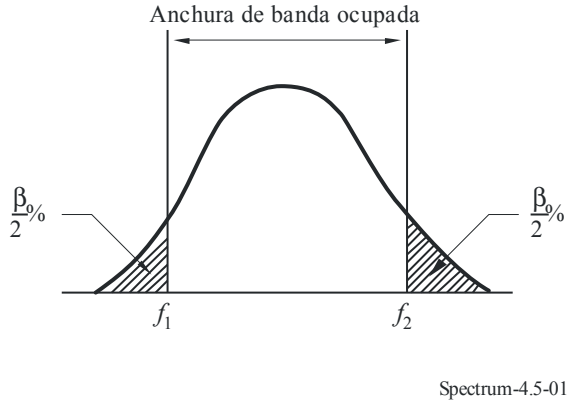
"1.153 *Anchura de banda ocupada:* Anchura de la banda de frecuencias tal que, por debajo de su frecuencia límite inferior y por encima de su frecuencia límite superior, se emitan *potencias medias* iguales cada una a un porcentaje especificado, β/2, de la *potencia media* total de una *emisión* dada.

Salvo que en una recomendación UIT-R se especifique otra cosa, para la *clase de emisión* considerada, se tomará un valor β/2 igual a 0,5%."

En la Fig. 4.5-1 se representa conceptualmente esta definición.

FIGURA 4.5-1

Definición de anchura de banda ocupada tal como se formula en el Nº 1.153 del Artículo 1 del RR



Pueden utilizarse técnicas de procesamiento digital de la señal (DSP, *Digital Signal Processing*) para calcular la anchura de banda del β% a partir de la densidad espectral de potencia (*d.e.p.*). En primer lugar, se estima ruido de fondo de la *d.e.p.* con uno de los diversos algoritmos DSP existentes. Los valores de *d.e.p.* se ajustan a cero si la potencia es inferior a *Y* dB por encima del ruido de fondo. Para la mayoría de los entornos de señal, un valor de *Y* de 6 dB proporciona excelentes resultados. La potencia total de la señal, P, se calcula sumando los segmentos de *d.e.p.* que contienen la energía de la señal. Se calcula la integral de la *d.e.p.* y se interpolan los datos para obtener la frecuencia f_1, en la que la potencia integrada es igual a $P_{\beta/2}$. Este proceso se repite desde el otro extremo del espectro para conseguir la frecuencia superior, f_2, en la que la potencia integrada es igual a $P_{\beta/2}$. La anchura de banda es $f_2 - f_1$.

NOTA 1 – De conformidad con § 2 de la Recomendación UIT-R SM.328 "una emisión debe considerarse óptima desde el punto de vista de la eficacia del espectro cuando su anchura de banda ocupada es igual a la anchura de banda necesaria para esa clase de emisión".

La anchura de banda entre puntos a *x*-dB

Las dos definiciones anteriores reflejan los aspectos de calidad y de interferencia de la anchura de banda. Sin embargo, puede resultar difícil aplicarlas directamente para medir la anchura de banda de una señal dada en determinados casos.

Consecuentemente, en la Recomendación UIT-R SM.328 se incluye la definición adicional siguiente:

"*Anchura de banda entre puntos a x*-dB*:* anchura de una banda de frecuencias fuera de cuyos límites inferior y superior, las componentes del espectro discreto o la densidad de potencia del espectro continuo son inferiores en por lo menos *x*-dB con relación a un nivel predeterminado de referencia de 0 dB."

NOTA 1 – Los resultados de investigaciones realizadas muestran que la "anchura de banda entre puntos a *x*-dB" puede utilizarse para estimar la anchura de banda ocupada en condiciones bien definidas de clase de emisión y características de modulación de la señal. Sin embargo, existen casos (por ejemplo, el de algunos esquemas de modulación digitales) en los que la anchura de banda entre puntos a *x*-dB no es una buena estimación de la anchura de banda ocupada.

4.5.1.3 Comprobación de la anchura de banda de las emisiones en las estaciones de comprobación técnica

La supervisión de la anchura de banda ocupada por una emisión debe realizarse de conformidad con la definición formal número 1.153 del RR. Dichas definiciones hacen referencia a la anchura de banda instantánea. Hay que señalar, sin embargo, que las mediciones sobre una emisión en una estación de comprobación técnica, deben realizarse con tráfico real sobre un trayecto de propagación y sujetas a la fluctuación de los valores medidos, a la influencia del ruido y de la interferencia, a la velocidad de respuesta de los aparatos de medida, etc.; por lo tanto, los métodos de medición deben mejorarse continuamente.

La anchura de banda de señales MF y MA varía continuamente en función de la señal modulada. En estos casos, las estaciones de comprobación técnica estarán interesadas en determinar la anchura de banda entre puntos a "*x*-dB" durante un periodo de tiempo determinado. Por lo tanto, todos los métodos de medición aquí descritos dan como resultado dicha anchura de banda ocupada máxima.

La Recomendación UIT-R SM.443 recomienda que las estaciones de comprobación técnica adopten, con carácter provisional, un método de estimación de la anchura de banda consistente en medir la anchura de banda a 26 dB (llamada anchura de banda entre puntos a "*x*-dB", con $x = 26$).

Los receptores de medición/comprobación modernos están basados en el procesamiento digital de la señal. Esta tecnología permite determinar la anchura de banda por ambos métodos – el método de anchura de banda entre puntos a *x*-dB y el método de β%. El método de β% permite realizar mediciones de anchura de banda con independencia de la modulación de la señal. Por lo tanto, debe ser el método preferido, especialmente para la medición de la anchura de banda de señales digitales cuando no está disponible su identificación técnica, así como en casos de una relación S/N baja. Sin embargo, en casos en que exista interferencia, los valores de las mediciones entre puntos a "*x*-dB" son mucho más relevantes.

4.5.1.4 Consideraciones sobre la precisión

Los factores que influyen en la incertidumbre de la medición de anchura de banda son los siguientes:

– el principio de medición empleado (FFT o análisis de barrido espectral);
– la anchura de banda de resolución;
– la no linealidad de la visualización de la amplitud;
– la forma espectral de la señal;
– el procedimiento de medición (por ejemplo, para señales AMDT);
– la lectura del receptor/analizador;
– las características del receptor /analizador (por ejemplo, sensibilidad);
– número de mediciones;
– entorno electromagnético (por ejemplo, ruido, interferencia, proximidad de otras emisiones).

4.5.2 Métodos de medición de la anchura de banda

4.5.2.1 Medición de la anchura de banda ocupada

Las mediciones de la anchura de banda ocupada por métodos directos se llevan a cabo como especifica la Recomendación UIT-R SM.328. La relación entre los errores en la medición de la banda ocupada δ' y los errores en la comparación de potencia υ se obtiene a partir de la aproximación de la envolvente del espectro que se describe a continuación y se representa en la Fig. 4.5-2. Las líneas continuas corresponden a la aproximación según la fórmula (4.5-1).

$$S_1(f) = S(f_m)\left(\frac{f_m}{f}\right)^{\gamma} \qquad (4.5\text{-}1)$$

$$\gamma = 0{,}33\ N$$

siendo $S(f_m)$ la potencia a una frecuencia determinada, f_m, y N el número de dB que se reduce la envolvente del espectro en una banda con una anchura de una octava. Las líneas de puntos corresponden a la aproximación según la fórmula (4.5-2):

$$S_2(f) = S(f_m)\exp\left[-\frac{0{,}23N_1}{f_m}(f - f_m)\right] \qquad (4.5\text{-}2)$$

donde N_1 es el número de dB correspondiente a la primera octava de la anchura de banda. La Fig. 4.5-2 muestra que para los valores más comunes de N, comprendidos entre 12 y 20 dB/octava, es suficiente realizar la comparación de potencias con una precisión muy baja, de aproximadamente ±15% a ±20% para asegurar una precisión de ±3% a ±7% en la medición de la anchura de banda ocupada.

Estos métodos consisten en comparar la potencia total de la emisión con la potencia que queda después del filtrado, ya sea mediante dos filtros paso bajo o dos filtros paso alto, o mediante un filtro paso alto, o un filtro paso alto y otro paso bajo, cuyas frecuencias de corte pueden desplazarse a discreción con relación al espectro de la emisión. Alternativamente, pueden determinarse las correspondientes componentes de la potencia evaluando el espectro de potencia obtenido mediante un analizador de espectro.

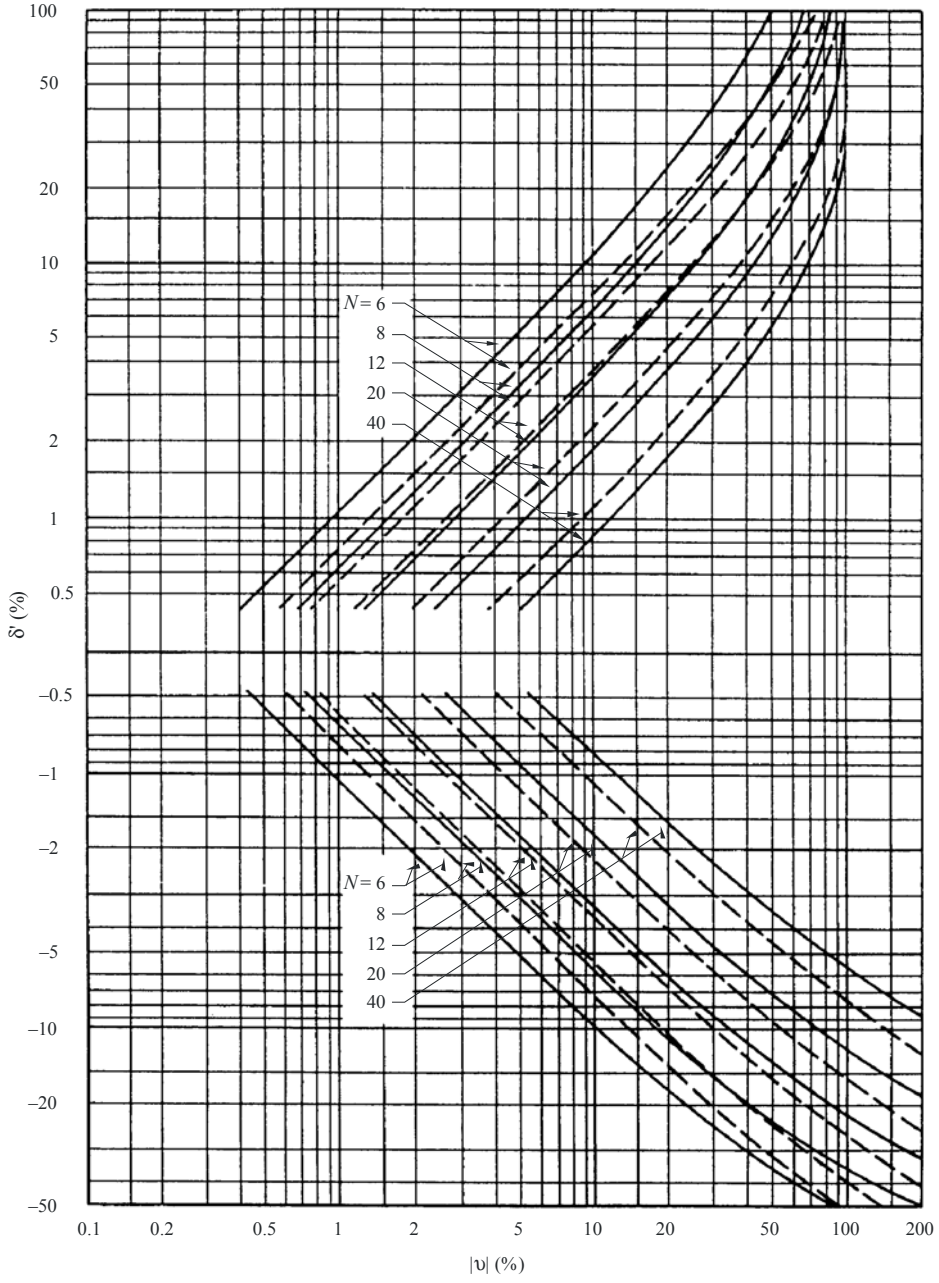
4.5.2.1.1 Método que utiliza un analizador de espectro

En este método, los dos límites de frecuencia mencionados en la definición de la anchura de banda ocupada (véase el § 4.5.1.2) se determinan mediante la evaluación del espectro de potencia de una emisión obtenido por análisis espectral. Los valores de potencia correspondientes se obtienen sumando las potencias de las distintas componentes espectrales.

Esto supone un espectro de líneas, que sólo existe en el caso de señales periódicas. El espectro de las señales realmente presentes en el tráfico real es, por el contrario, un espectro continuo. No obstante, el método puede también aplicarse en este último caso, dado que para la determinación de la anchura de banda ocupada es suficiente seleccionar muestras del espectro equidistantes en frecuencia. Dicha separación en frecuencia debe elegirse simplemente de modo tal que las muestras reproduzcan en forma apropiada la envolvente del espectro. Incluso en el caso de un verdadero espectro de líneas –por ejemplo, el de una emisión radar, en el que por razones prácticas la anchura de banda del filtro analizador no puede hacerse tan estrecha como sería necesario para conseguir una resolución capaz de discernir cada línea espectral– basta con evaluar un número limitado de muestras, en tanto se cumplan las condiciones indicadas para el espectro continuo. Así pues, este método es particularmente adecuado para determinar la anchura de banda ocupada de señales que contienen información digital o cuantificada, con sus espectros cuasiperiódicos, como las de telegrafía, datos y radar.

FIGURA 4.5-2

Relaciones entre el porcentaje de error (δ') en la medición de la anchura de banda ocupada y el porcentaje de error (υ) en la comparación de potencias, para distintos valores de N



El registro del espectro mediante un gráfico X-Y facilita enormemente su evaluación, para la cual basta normalmente con una calculadora de bolsillo. Este método es también especialmente adecuado para ser automatizado. Un analizador de espectro con un sintetizador controlado digitalmente explora el espectro en pasos de frecuencia definidos y una memoria digital remite los valores medidos a una computadora que realiza los cálculos. Puesto que un analizador de espectro convencional realiza un análisis secuencial pero no en tiempo real, es recomendable realizar varias exploraciones.

4.5.2.1.2 Métodos basados en la transformada rápida de Fourier

Existen métodos de procesamiento digital de la señal bastante simples basados en la transformada rápida de Fourier (FFT) que permiten medir la anchura de banda ocupada de una emisión en el sentido que establece la

definición formal (número 1.153 del RR), al menos en el caso de una señal recibida que tenga una relación señal a ruido suficiente (véanse en § 6.7 algunas explicaciones acerca de la FFT). Dichos métodos directos presentan ventajas respecto a los métodos entre puntos a "*x*-dB", que se basan siempre en supuestos para obtener la anchura de banda ocupada, supuestos que dependen de la modulación utilizada y de las señales moduladoras. Se han desarrollado supuestos normalizados para señales analógicas tradicionales y para señales RTTY, no habiéndose normalizado nuevos valores adicionales. Parece que las nuevas señales digitales presentan una relación *a priori* entre la anchura de banda entre puntos a "*x*-dB" y la anchura de banda ocupada cuya utilización resulta menos fácil debido a lo siguiente

– para modulaciones estrictamente idénticas (tales como una señal MAQ 64), la anchura de banda exacta depende del filtrado en banda de base, el filtrado en radiofrecuencia, la compartición del filtrado de Nyquist entre las partes de transmisión y recepción del sistema, la linealidad del emisor y la posible utilización de técnicas de predistorsión, etc., todas ellas técnica utilizadas por los distintos fabricantes para conseguir diversos compromisos de índole técnica;
– las dificultades adicionales, tales como una potencia interferente sustancial procedente de un canal adyacente, que pueden perturbar las mediciones realizadas;
– por otro lado, las señales digitales de velocidad binaria constante, tienen un comportamiento estacionario y en ese sentido son más fáciles de medir que las señales analógicas moduladas de forma aleatoria.

Los métodos de medición de la relación de potencias basados en la FFT requieren poco o ningún conocimiento acerca de los parámetros detallados de la modulación y pueden interpretar la parte del espectro de la señal que destaca por encima del ruido de fondo. Asimismo, el método de relación de potencia es mucho menos sensible a la ventana elegida que los valores a "*x*-dB". La relación señal a ruido puede aumentarse cuando sea insuficiente para determinar la anchura de banda que incluye el 99% de la potencia, mediante una integración más prolongada con una FFT de mayor resolución. Sin embargo, ello no es posible para modulaciones digitales con apariencia de ruido.

En cualquier caso, la relación señal a ruido necesaria para poder realizar la medición de la anchura de banda con el método del 99% de la potencia, no necesita ser desproporcionadamente elevada; para muchas señales, pueden obtenerse resultados precisos con una relación señal a ruido de 15 a 20 dB (definida como la diferencia entre la señal de cresta y el ruido de fondo), que es un valor razonable para la mayoría de los casos, e inferior al valor de 26 dB.

Influencia de diversos factores cuando se mide la anchura de banda con métodos de relación de potencias basados en la FFT

Influencia de la ventana

La FFT genera un banco de filtros que no son perfectamente rectangulares, que sólo muestrean la potencia en $f \pm \delta f$ pero que presentan lóbulos laterales.

Se han considerado varias funciones de ventana (véase § 6.7) para tener en cuenta la preferencia de la precisión de la medición del nivel o de las mediciones de frecuencia. En el caso de mediciones de potencia basadas en el método de β%, se debe seleccionar preferentemente una ventana que genere una potencia reducida en los lóbulos laterales, de forma que se opere en condiciones lo más próximas posibles a las de la definición, que requiere filtros rectangulares.

Numerosas mediciones realizadas sobre diversas señales muestran que el efecto de la ventana empleada es relativamente pequeño para señales comunes y en condiciones de medida que habitualmente se encuentran en la práctica.

Influencia de la resolución de la FFT

Otra característica que debe elegirse es el número de líneas de la FFT. Las mediciones de prueba (con diferentes tipos de señales con modulación digital y en ausencia de señal) muestran que el método del 99% de la potencia es mucho menos sensible a la resolución elegida para calcular la FFT. Produce resultados muy precisos cuando haya de 100 a 200 líneas en la anchura de banda ocupada por la señal medida.

Influencia de la duración de la muestra de señal

La duración de la muestra de la señal juega también un papel importante cuando se utilizan los métodos de relación de potencias basados en la FFT. El análisis de la FFT se basa en el supuesto de que la señal medida es de duración finita y ha sido capturada íntegramente. Por lo tanto, la ventana de observación debe ser suficientemente grande para que abarque toda la señal.

La medición de la anchura de banda debe realizarse sobre una parte significativa de la señal investigada, sin embargo, las estaciones de comprobación técnica sólo observen las señales durante un breve periodo de tiempo. Es por tanto necesario desarrollar métodos de medida que puedan aplicarse sobre un breve periodo de tiempo de la señal, de tal modo que sea posible realizar mediciones automáticas sobre un gran número de transmisores en un tiempo razonable.

Pruebas de simulación realizadas con señales estacionarias (tales como señales comunes con modulación digital y en ausencia de desvanecimientos) muestran que se obtienen resultados fiables para aproximadamente 1 000 símbolos. Una buena regla aproximada cuando se realizan mediciones sobre señales digitales sería abarcar al menos 1 000 símbolos de la señal modulada.

Influencia del ruido

En presencia de ruido es esencial filtrar la señal que destaca sobre el ruido, aumentando la importancia del filtrado cuando la relación *S/N* es baja y cuando el filtro de observación es amplio en comparación con la anchura de banda de la señal. Si se realiza una medición sin las debidas precauciones (por ejemplo, si la banda observada excede considerablemente a la anchura de banda ocupada), se medirá el 99% de la anchura de banda de la señal más el ruido, en lugar de medir sólo la señal, obteniéndose resultados completamente erróneos.

La forma y posición exacta del filtro no es un factor muy sensible en tanto que su ubicación sea la adecuada para aislar el lóbulo principal destacado de la señal. Algunas señales teóricas pueden tener dentro del 99% de su anchura de banda algún lóbulo lateral, pero dichas señales raramente se encuentran en la práctica puesto que el filtrado en el transmisor limita normalmente la emisión al primer lóbulo por razones de eficiencia espectral. Sin embargo, deben tomarse precauciones cuando se analicen señales con lóbulos laterales amplios que alcancen niveles de –26 dB, o con lóbulos laterales estrechos que alcancen niveles similares con caída lenta. Dos lóbulos laterales simétricos, cada uno con una anchura igual a la mitad del lóbulo principal y que alcancen un nivel de –20 dB, suponen el 1% de la potencia de la señal y, en consecuencia, contribuyen al 99% de la anchura de banda de la señal.

Valores del orden de –50 dB como máximo para el nivel del lóbulo lateral y de 0,1 dB de rizado en la banda de paso son parámetros que pueden utilizarse en la práctica para conseguir un filtro adecuado. La pendiente de caída del filtro debe ajustarse de forma que se rechace la señal más allá de la intersección de la señal con el nivel de ruido de fondo. El filtrado correcto comienza a menudo en la parte de pendiente de caída de la señal de tal forma que exista un rechazo total a partir de donde comience el nivel de ruido de fondo. Como medida práctica para validar la medición y para mejorar el resultado, es necesario que el operador defina un filtro más estrecho para repetir la medición. Obsérvese que la primera medición realizada con el filtro de captura total puede utilizarse para mejorar la definición del filtrado ulterior.

Influencia de factores desconocidos para el personal de comprobación técnica

Los denominados parámetros de modulación "ocultos" (tales como el factor BT de una modulación por desplazamiento mínimo gaussiana (MDMG) no pueden determinarse fácilmente en una estación de comprobación técnica. Asimismo, a partir de la señal medida no es posible determinar si se ha aplicado el filtrado en la banda de base o en radiofrecuencia sobre la emisión medida en el lado transmisor; igual ocurre para eventuales no linealidades del transmisor.

Estos factores son generalmente desconocidos y no pueden medirse en una estación de comprobación técnica. Sin embargo, una fuerte no linealidad causada por el desplazamiento de la polarización del amplificador de potencia del transmisor puede producir un aumento importante de la anchura de banda ocupada. Una estación de comprobación técnica puede detectar este problema cuando compara con resultados de mediciones previas de la anchura de banda ocupada. En cualquier otro caso, los parámetros "ocultos" tienen una influencia muy importante sobre la forma del espectro transmitido, haciendo casi

imposible poder disponer de un método para convertir las mediciones entre puntos a –"*x*-dB" en la anchura de banda correspondiente al 99% de la potencia, aunque se considere un tipo de modulación determinado. Por esta razón, son preferibles los métodos directos a los métodos de medición entre puntos a –"*x*-dB".

Influencia de la función de retención de máximos ("max-hold")

La función de retención de máximos permite tener en cuenta las variaciones extremas de la señal que se perderían al realizar una promediación debido a su baja tasa de ocurrencia. La función de retención de máximos puede no ser una forma adecuada de estimar la anchura de banda correspondiente al 99% de la potencia. Sin embargo, es adecuada cuando se analiza si una señal tiene un nivel inferior al de una máscara de espectro dada, pues retiene cualquier cresta que supere el límite.

Límites de la aplicación de los métodos de relación de potencias basados en la FFT a las mediciones de anchura de banda

Consideración sobre la automatización

La automatización total de la medición de la anchura de banda ocupada en el contexto de la comprobación técnica del espectro es difícil de conseguir en general: la señal a medir debe filtrase de forma tal que el canal adyacente y el ruido del canal adyacente no influyan negativamente en la medida. Además, la señal debe aislarse, lo cual implica que las emisiones presentes en el filtro deben distinguirse de las múltiples portadoras o de los lóbulos laterales de la señal a medir. Si la señal es intermitente, las mediciones deben realizarse solamente cuando la señal esté presente. Otros parámetros pueden asimismo influir en la medición, tales como la variación del control automático de ganancia en el receptor, el desvanecimiento por la propagación, etc. Por lo tanto, las mediciones de anchura de banda deben realizarse preferentemente con una relación *S/N* razonablemente elevada (digamos que sea >20 a 30 dB) para limitar las contribuciones del ruido cuando el filtro de análisis no se establece de forma óptima alrededor de la señal deseada, y en bandas canalizadas cuando el patrón de las emisiones es bien conocido.

Cuando se realizan mediciones automáticas de forma ciega sobre señales desconocidas, es conveniente que un operador verifique su validez antes de utilizar los resultados. Las mediciones sistemáticas rutinarias de la anchura de banda de emisiones conocidas pueden ser una forma de generación de alarmas cuando la señal deseada se ve sustituida por una señal intrusiva o por interferencia. Dichas mediciones pueden también utilizarse para verificar algunos de los parámetros de una emisión. Generalmente, las mediciones automáticas rutinarias de anchura de banda se realizan tomando una muestra reducida de la señal, por ejemplo, de unos pocos cientos de milisegundos. Ello es debido a que el receptor de comprobación debe procesar un gran número de señales en un lapso breve de tiempo, de forma que las observaciones sucesivas de una misma frecuencia sean suficientemente frecuentes como para detectar un uso irregular o indebido del espectro.

Cuando las mediciones de anchura de banda se realizan con una ventana de observación demasiado breve como para abarcar la densidad espectral de potencia, la medición es generalmente inválida si la señal objetivo no es estacionaria, tal como las señales de voz MA, BLU o MF. Por el contrario, pueden obtenerse fácilmente resultados válidos sobre transmisiones de datos de alta velocidad (como por ejemplo, la señal baliza permanente a 277 kbit/s del sistema GSM). Sin embargo, las mediciones de anchura de banda de corta duración pueden tener algún valor incluso para señales no estacionarias cuando se utilizan para verificar si la señal supera un valor máximo.

4.5.2.2 Métodos directos de medición de la anchura de banda entre puntos a "*x*-dB"

Estos métodos tienen por objeto obtener, de diversas formas, el espectro de la señal del que se obtiene directamente la anchura de banda entre puntos a *x*-dB. También pueden deducirse otras características de los espectros fuera de banda, por ejemplo, los niveles de los puntos iniciales y las pendientes de caída. Más adelante se describe el método para fijar los niveles de referencia de 0 dB a fin de determinar la anchura de banda entre puntos a *x*-dB y los valores de los niveles a *x*-dB para las diversas clases de emisión.

El nivel a "x-dB"

El nivel a *x*-dB, medido con respecto al nivel cero, puede especificarse para cada clase de emisión en particular.

Se obtienen resultados más conformes con el número 1.153 del RR midiendo la anchura de banda de ciertas clases de emisión, utilizando niveles a "*x*-dB" especialmente calculados, cuyos valores aparecen en el Cuadro 4.5-1.

NOTA 1 – Aunque la obtención de la anchura de banda del 99% de la potencia a partir de la medición a –"*x*-dB" puede ser un método viable para varias clases de emisión tal como se propuso anteriormente, parece evidente que estos métodos no pueden continuar utilizándose fácilmente para un espectro "digital", ya que la complejidad de las modulaciones digitales no permite definir una regla sencilla para obtener la anchura de banda del 99% a partir de las mediciones realizadas a –"*x*-dB".

Nivel de referencia cero de señales (difusión) moduladas en frecuencia

En ocasiones es difícil fijar un nivel de referencia (0 dB) que represente el valor de cresta de la emisión con miras realizar mediciones de anchura de banda, en el caso de emisiones de modulación de frecuencia, debido a la disminución de la amplitud de la portadora durante la modulación. En algunos sistemas de radiocomunicaciones, la modulación es continua, de suerte que la potencia total del transmisor raramente se emite en la frecuencia portadora, lo que permitiría establecer un nivel de referencia. Sin embargo, la potencia total emitida por una señal con modulación de frecuencia es constante.

Por lo tanto, el nivel de referencia cero puede medirse eligiendo una anchura de banda del receptor que abarque toda la señal al tiempo que el receptor de medida se sintoniza a la frecuencia central de la emisión que se mide. Debe tenerse especial cuidado de no incluir partes de las emisiones vecinas cuando se seleccione la anchura de banda del receptor.

Sin embargo, para las mediciones siguientes de los puntos a "*x*-dB", debe reducirse la anchura de banda del receptor para conseguir que la resolución sea suficiente. Sin embargo, debe ser al menos igual a la frecuencia de modulación más elevada.

CUADRO 4.5-1

Valor del nivel a "*x*-dB" obtenido empíricamente para el cual la anchura de banda entre puntos a *x*-dB y la ocupada son muy parecidas

Clase de emisión (Véase Apéndice 1 del RR)	**Valores de "*x*-dB" a utilizar cuando la medición de la anchura de banda a "*x*-dB" para la estimación de la anchura de banda ocupada**	**Observaciones**
A1A A1B	–30	Para $\alpha^{(1)} \geq 3\%$ (pulsos de cualquier forma)
A2A A2B	–32	Para un porcentaje de modulación de entre el 80 y el 90%
A3E	–35	
B8E	–26	
F1B	–25	Para señales de cualquier forma e índice de modulación $2 \leq m \leq 24$
F3C	–25	Para todo tipo de imágenes transmitidas e índice de modulación $0{,}4 \leq m \leq 3$
F3E G3E	–26	
F7B	–28	

Clase de emisión (Véase Apéndice 1 del RR)	**Valores de "*x*-dB" a utilizar cuando la medición de la anchura de banda a "*x*-dB" para la estimación de la anchura de banda ocupada**	**Observaciones**
H2B	–26	
H3E	–26	
J2B	–26	
J3E	–26	
R3E	–26	
C7W (8-VSB)	–12[(2)]	Promedio de más de 300 barridos
G7W (T-DAB)	–8[(2)(3)]	Promedio de más de 100 barridos

[(1)] El tiempo relativo de establecimiento, α, de una señal telegráfica se define en el § 1.10 de la Recomendación UIT-R SM.328.

[(2)] De conformidad con la Recomendación UIT-R SM.328, la unidad de dichos valores es dBsd porque el nivel de referencia elegido es el valor máximo de la densidad espectral de potencia (*d.e.p.*) en la anchura de banda necesaria.

[(3)] Este valor se obtiene de valores experimentales con la radiodifusión digital multimedia terrenal (T-DMB) utilizando una red T-DAB tomada del Informe UIT-R BT.2049.

Nivel de referencia cero de señales moduladas en amplitud

El método para la determinación del nivel de referencia (0 dB) descrito, puede aplicarse también a la medición de la anchura de banda entre puntos a "*x*-dB" de las transmisiones con modulación de amplitud y con modulación por impulsos.

Las señales moduladas en amplitud, tales como las emisiones de radiodifusión, tienen una anchura de banda del orden de la frecuencia moduladora de audio más elevada. En este caso, la anchura de banda mínima necesaria del receptor entre los puntos a *x*-dB, tal como se ha descrito anteriormente, pueden no ser suficientemente exactas debido a la baja resolución que se tiene cuando se utilizan grandes anchuras de banda de medición. Para evitar este problema, las señales MA pueden medirse con una anchura de banda de resolución más reducida. Sin embargo, para estas mediciones es necesario un analizador de especto para establecer el nivel de referencia cero tal como se señala a continuación: el espectro se registra con la anchura de banda de resolución tan estrecha como sea necesario utilizando la función de retención de máximos. El nivel de referencia que se toma es el nivel máximo espectral en las bandas laterales, sin considerar el nivel de la portadora que se visualiza como una cresta individual en el centro.

Nivel de referencia cero de señales con modulación digital

Las señales moduladas digitalmente tienen en general una anchura de banda que es superior a las anchuras de banda de medición necesarias para obtener una resolución razonable del espectro analizado. Sin embargo, debido a que la señal digital tiene apariencia de ruido, la reducción del nivel debida al filtro de medición estrecho será igual en todas las frecuencias del espectro emitido. Por lo tanto, el nivel de referencia cero es el nivel máximo que se visualiza cuando se registra o se explora el espectro. La medición de los puntos a *x*-dB debe realizarse entonces con la misma anchura de banda de medición.

Si las mediciones tienen por objetivo verificar la conformidad con una máscara espectral dada, éstas deben hacerse con la misma anchura de banda de resolución utilizada para definir la máscara. Sin embargo, si dichas máscaras están referenciadas a la potencia total emitida, dicho nivel debe medirse, en primer lugar, utilizando una anchura de banda del receptor suficiente para capturar toda la señal. Cuando la anchura de banda se reduce para registrar la forma del espectro, debe tenerse en cuenta la degradación del nivel máximo medido.

Equipo de prueba necesario

Este equipo exige que las señales estudiadas tengan un espectro cuyas componentes sean estables en amplitud y en frecuencia. Las amplitudes se miden por medio de un atenuador calibrado respecto a un nivel de referencia constante (interno o externo al receptor/analizador).

Se puede conseguir una precisión de ±1 dB en la medición de la amplitud relativa. La precisión de la medición de la anchura de banda "entre puntos a *x*-dB" depende de la precisión de la medición de la amplitud y de la forma y pendiente del espectro en el punto de medición.

Se utilizan los métodos siguientes de análisis del espectro.

4.5.2.2.1 Método con un solo filtro paso banda (análisis secuencial del espectro)

Este método, que es el más común, consiste en analizar completamente el espectro de la emisión mediante un filtro de banda estrecha de barrido; por ejemplo, un analizador de espectro. Utilizando este método, se considera que la anchura de banda a *x*-dB contiene componentes discretas atenuadas menos de 26 dB por debajo del nivel de cresta de las emisiones. Este procedimiento no proporciona evidentemente una medida precisa de la anchura de banda ocupada en el sentido de la definición que figura en el Reglamento de Radiocomunicaciones. Por ejemplo, es posible que una emisión determinada tenga numerosas componentes de bajo nivel a un lado y otro de la emisión principal, de manera que su suma en cada lado sea netamente superior al 0,5% de la potencia media total, mientras que los niveles de estas diversas componentes son todos inferiores al valor de –26 dB. En tal caso, es probable que la anchura de banda ocupada, determinada en el transmisor por la medición de las relaciones de potencia, sea ligeramente mayor que la anchura de banda entre puntos a *x*-dB medida a distancia por este método.

Un inconveniente importante de los analizadores de espectro que utilizan un filtro único para explorar toda la banda observada es la incompatibilidad entre una alta resolución y una gran velocidad de barrido, especialmente cuando la banda que debe estudiarse es muy ancha. Se necesita una rápida velocidad de barrido para obtener una buena representación de las componentes transitorias.

Sin embargo, a medida que aumenta dicha velocidad de barrido, la resolución se degrada tanto que ciertas componentes importantes de la emisión no se visualizarán con precisión.

No obstante, cada vez son más los analizadores de espectro o los receptores de banda ancha modernos basados en el procesamiento FFT de señales en tiempo real que permiten realizar mediciones con una gran anchura de banda instantánea (más de 100 MHz). En muchos casos, dichos equipos permiten realizar mediciones con un único filtro paso banda. La adquisición de la señal es lo suficientemente rápida como para medir emisiones transitorias. Además, algunos utilizan técnicas de almacenamiento intermedio para limitar interrupciones durante el proceso de adquisición de la señal.

4.5.2.2.2 Incertidumbre de las mediciones de anchura de banda entre puntos a "*x*-dB"

En la Fig. 4.5-3 se muestra la relación entre el error relativo (δBx) de la medición de la anchura de banda entre puntos a "*x*-dB" (Bx) y el error acumulado (δx) de la lectura del nivel entre puntos a "*x*-dB" y (la representación de) de la medida de los niveles de densidad espectral de potencia (*d.e.p.*) de la señal en los límites de Bx, para distintos valores tasas de reducción de *d.e.p.* expresados como N dB para un ensanchamiento de una octava de la banda de frecuencias. Los valores que se muestran en la Fig. 4.5-3 a) corresponden a la aproximación a la envolvente de la *d.e.p.* dentro de los límites de Bx de conformidad con la fórmula (4.5-1) y en la Fig. 4.5-3 b) se representan los correspondientes a la fórmula (4.5-2). Las líneas continuas de la Fig. 4.5-3 a) corresponden a errores de medición de Bx positivos, mientras que las líneas discontinuas corresponden a errores negativos.

De la Fig. 4.5-3 se desprende claramente que el error de medición de Bx cuando se utiliza una aproximación a la *d.e.p.* coherente con la fórmula (4.5-1) es aproximadamente 1,5 veces menor, siendo para ambas aproximaciones muy dependiente de la tasa de reducción N de la envolvente de la *d.e.p.,* dentro de los límites de Bx, aumentando rápidamente para valores bajos de N. Cuando N = 12 dB/octava, la obtención de una precisión en la medida de Bx del 5% o mejor exige una precisión agregada de la lectura del nivel entre puntos a "*x*-dB" y una medición (representación) de los niveles de la *d.e.p.* del orden de 0,6-0,9 dB, lo cual es

muy difícil; para $N = 6$ dB/octava (transmisión en MA o MF/MP de impulsos rectangulares con un índice de modulación bajo) es prácticamente imposible conseguir mediciones de Bx con precisión superior al 7-8 %.

4.5.3 Condiciones que deben tenerse en cuenta al medir la anchura de banda

La definición actual de anchura de banda ocupada sugiere el principio del método descrito en la Recomendación UIT-R SM.328 que consiste en medir la relación entre la potencia total y la parte de ésta que queda fuera de la banda que se mide. Para ello, es necesario localizar los límites superior e inferior de la banda, sumando las potencias de las componentes fuera de banda de la parte superior hasta que se obtenga un valor de 0,5% y repetir luego esta operación para las componentes fuera de banda de la parte inferior, comenzando cada vez en un punto suficientemente alejado de la frecuencia central, para evitar que escape a la medición alguna fracción importante de la energía.

Si bien es verdad que la anchura de banda ocupada de una emisión se puede determinar midiendo en las proximidades del transmisor la potencia total y la potencia fuera de banda, este método no es aplicable, por lo general, a las mediciones efectuadas a cierta distancia del transmisor, debido a la presencia de emisiones interferentes o de ruido, que tienen por efecto enmascarar las componentes fuera de banda interesantes. Esta observación se aplica muy especialmente a las porciones congestionadas de las bandas de ondas hectométricas (banda 6) y decamétricas (banda 7), de particular interés para las estaciones del sistema internacional de comprobación técnica de las emisiones.

A pesar de las limitaciones indudables a que está sujeta la precisión de las mediciones de la anchura de banda ocupada efectuadas lejos del transmisor, se ha creído interesante hacer de ellas una determinación aproximada en las operaciones de comprobación destinadas a verificar el cumplimiento de las disposiciones reglamentarias relativas a las anchuras de banda que no deben rebasarse.

Sin embargo, a causa de las imprecisiones debidas a las razones expuestas, estas mediciones a distancia sólo son útiles a título indicativo. Cuando se requiera una mayor precisión, es conveniente que las mediciones se realicen en las inmediaciones del transmisor.

Hay que conocer en detalle la influencia del ruido, la interferencia y los desvanecimientos para asegurar que la medición sea válida, como se indica a continuación.

4.5.3.1 Influencia de la interferencia

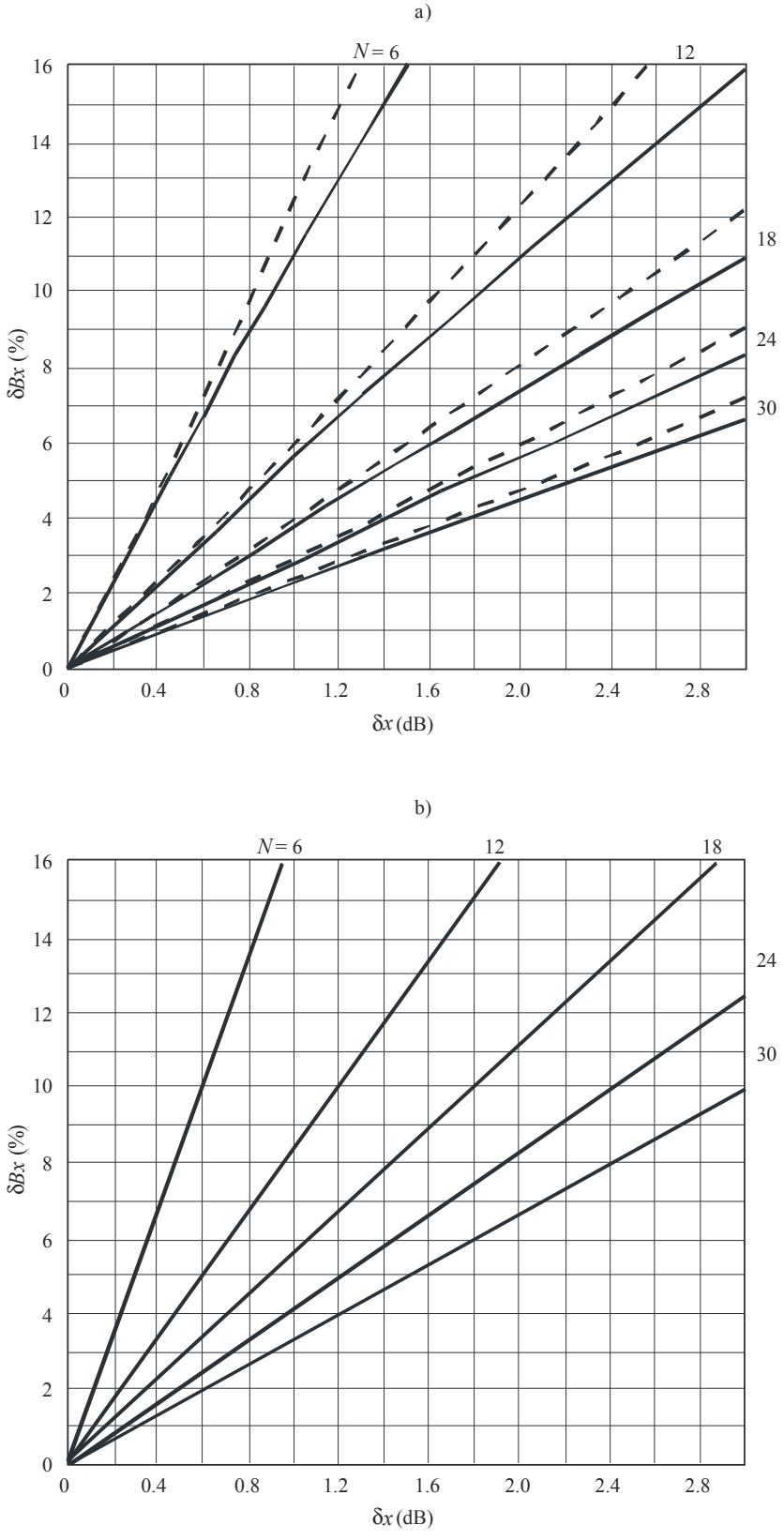
Las características reales de las emisiones interferentes son extremadamente complicadas y es difícil examinar aquí todos los casos. Se estudiará la influencia de la interferencia partiendo de las hipótesis siguientes:

– las dos emisiones, esto es, la emisión que se desea medir y la emisión interferente, tienen distribuciones espectrales estables;

– la emisión interferente no causa bloqueo ni intermodulación, y no produce ningún otro espectro parásito.

FIGURA 4.5-3

Error de la medición de la anchura de banda entre puntos a "*x*-dB"

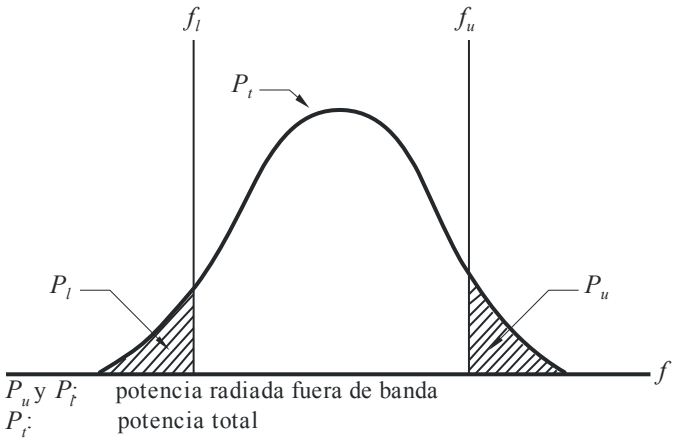


En los métodos de medición por análisis espectral, se puede detectar la presencia de interferencia mediante el estudio de la distribución espectral, lo que permite determinar la influencia de dicha interferencia y anularla. A título de ejemplo, a continuación se estudiará el efecto de la interferencia mediante el método de relación de potencias.

Para el trazado de la Fig. 4.5-4 se ha partido de la hipótesis de que la banda de paso del aparato de medida no contiene ruido ni interferencia, sino únicamente la emisión que ha de medirse.

FIGURA 4.5-4

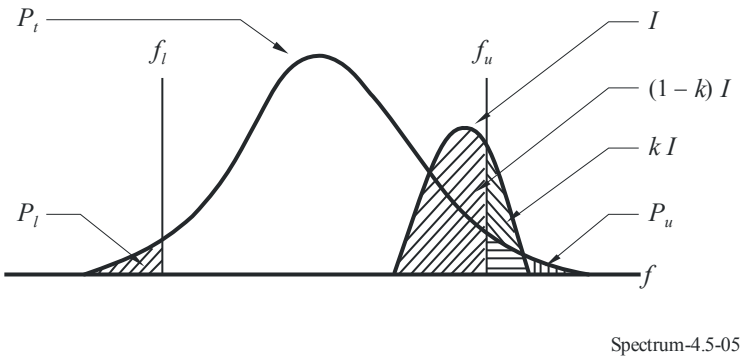
Distribución espectral sin interferencia



La Fig. 4.5-5 corresponde al caso en que existe una emisión interferente.

FIGURA 4.5-5

Distribución espectral en presencia de interferencia



Se representa como *D/U* la relación entre la potencia total de la señal deseada y la potencia total de las emisiones interferentes (no deseadas), y como *k* la relación entre la potencia de las emisiones interferentes en el exterior de la anchura de banda ocupada y la potencia total de las emisiones interferentes.

La Fig. 4.5-6 ilustra la influencia de la interferencia, siendo *k* el parámetro. Este gráfico es válido para todo tipo de modulación y distribución espectral de las emisiones.

Si *k* es igual a la relación entre la potencia fuera de banda de la emisión que se ha de medir y la potencia total de esta emisión, la interferencia no influye en el valor medido.

Por lo general, cuanto menor sea la relación D/U, mayor será el error. Para $k = 0$, las emisiones interferentes están todas comprendidas en el interior de la banda, y el valor medido de la anchura de banda ocupada es aparentemente menor. Para $k = 1$, las emisiones interferentes están todas situadas en el exterior de la banda, y la anchura de banda aparente es mayor.

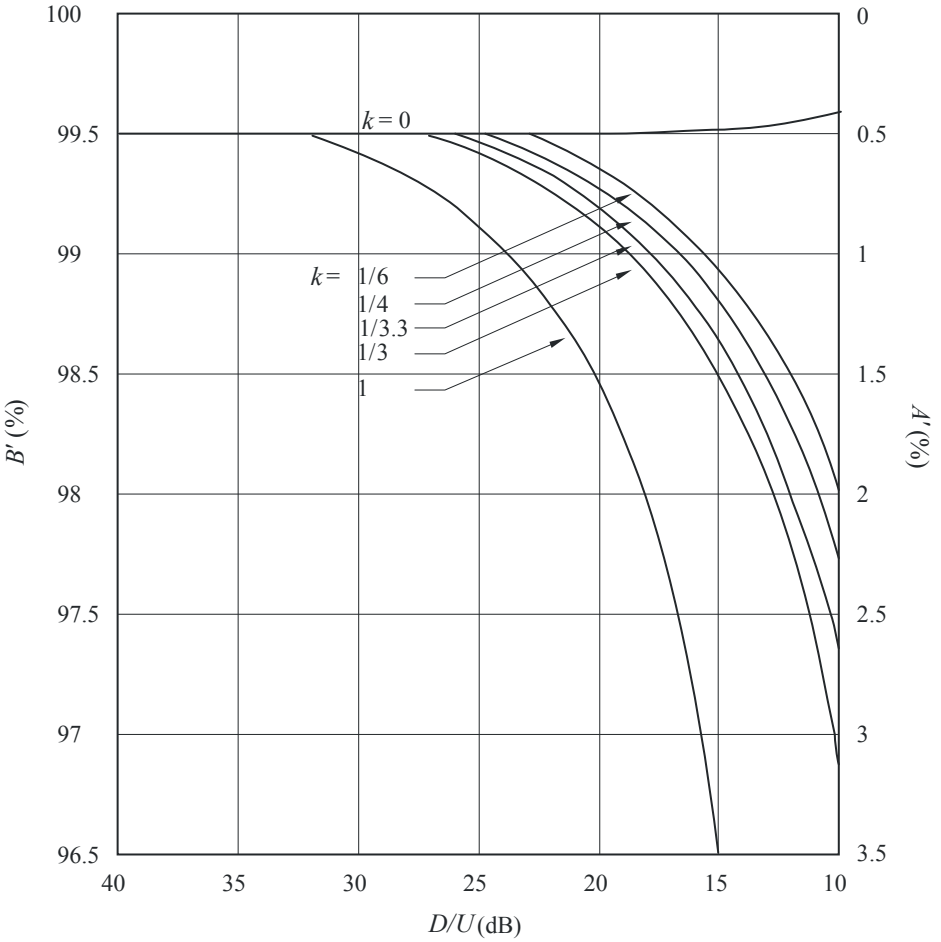
La interferencia no siempre se manifiesta en la práctica como acaba de explicarse, y su influencia es perjudicial. No obstante, por lo que a la medición en sí respecta, es suficiente considerar el error máximo, es decir $k = 1$ (la emisión interferente está completamente en el exterior de la banda).

De conformidad con la Fig. 4.5-6, el valor de la relación D/U debe ser superior a 30 dB para que el error de medida de la relación de potencias, sea inferior al 0,1% de la potencia total.

Durante las mediciones, es conveniente utilizar un analizador de espectro u otro aparato adecuado para determinar la naturaleza de las emisiones interferentes.

FIGURA 4.5-6

Relaciones entre *D/U*, *A´* y *B´*



A': valor virtual de la relación entre la potencia radiada fuera de banda y la potencia total

B': valor virtual de la relación entre la potencia radiada dentro de banda y la potencia total

Spectrum-4.5-06

4.5.3.2 Influencia del ruido

De la misma manera que en el caso de la interferencia, el método de medida por análisis espectral permite determinar la influencia del ruido y suprimir sus efectos. Sin embargo, el efecto del ruido resultante es complejo ya que sus características dependen de la fuente que lo genera.

A continuación, se estudia la influencia del ruido aleatorio, cuyo estudio teórico es fácil, y de otras categorías de ruido, y se da un ejemplo basado en los resultados obtenidos de mediciones efectuadas con el método de la relación de potencias bajo la influencia del ruido.

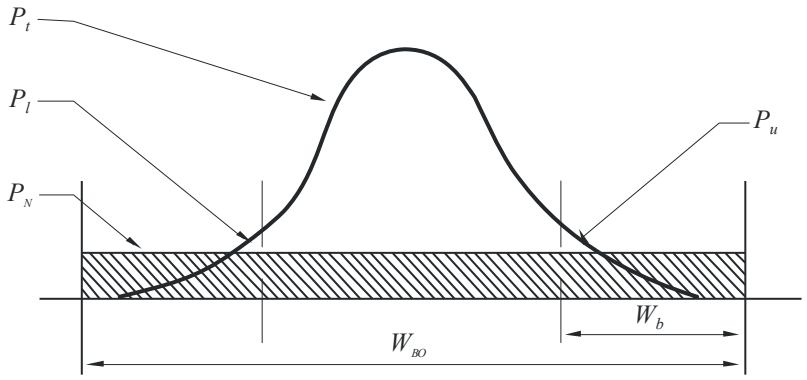
Influencia del ruido aleatorio

Si el ruido puede ser considerado como aleatorio, para determinar su influencia se procede de la manera siguiente.

La Fig. 4.5-27 representa esquemáticamente la distribución espectral con ruido aleatorio. La influencia del ruido aleatorio sobre el valor medido de la anchura de banda es la misma que la de una interferencia, con sólo reemplazar k por k_n (= W_b/W_{BO}) y D/U por S/N (= P_t/P_N) en la Fig. 4.5-6. Hay que precisar, no obstante, que con un ruido aleatorio no es posible que $k_n = 0$, o $k_n = 1$.

FIGURA 4.5-7

Distribución espectral con un ruido aleatorio



W_{BO}: Anchura de banda equivalente para el ruido del aparato de medida

P_N: Potencia total del ruido aleatorio que atraviesa W_{BO} (distribución uniforme de la potencia W_{BO})

Spectrum-4.5-07

Por lo tanto, la Fig. 4.5-6 muestra que a medida que disminuye la relación señal/ruido (S/N) de la emisión objeto de medida, aumenta la potencia radiada aparente fuera de banda y aumenta la anchura de banda ocupada.

Por ejemplo, si se quiere reducir el error de medida de la relación de potencias a menos de 0,1%, es necesario que la relación S/N de la emisión que ha de medirse, sea superior a unos 25 dB para valores de k inferiores a aproximadamente 1/3, el cual se considera adecuado para una estación de comprobación técnica.

4.5.4 Realización práctica de las mediciones de anchura de banda

4.5.4.1 Condiciones prácticas de las mediciones

En las condiciones normales de tráfico, las mediciones hechas en las estaciones de comprobación técnica suscitan problemas, dado que por regla general, las mediciones se realizan en lugares alejados de la estación transmisora. Esos problemas son los siguientes:

– el campo de la emisión que ha de medirse es, generalmente, de baja intensidad y hay que seleccionar la emisión entre muchas otras;

– como consecuencia de ciertos efectos perturbadores durante la propagación, puede ocurrir que el valor medido difiera del valor real en la estación transmisora;

– señales interferentes y ruidos pueden influir en los resultados de la medición;

– el tiempo de respuesta del equipo de medida debe ser suficientemente corto para que este equipo pueda seguir las variaciones de la anchura de banda ocupada, resultante de las condiciones de tráfico de la emisión que ha de medirse.

De estas dificultades, las tres primeras se han examinado en el § 4.5.3, junto con las cuestiones concernientes a las mediciones propiamente dichas. En la comprobación técnica de las emisiones real, habida cuenta del primer problema, el sistema de medida está constituido por la combinación de un equipo de medida de la anchura de banda ocupada y de un equipo receptor. Respecto al cuarto problema, en el § 4.5.4.2 se examinan las condiciones que ha de cumplir el equipo utilizado para la recepción y la medición de la anchura de banda ocupada.

4.5.4.2 Requisitos del equipo utilizado en la comprobación técnica

4.5.4.2.1 Requisitos del equipo receptor

El equipo receptor que conviene usar para las mediciones de la anchura de banda ocupada en una estación de comprobación técnica debe reunir las siguientes condiciones:

– en la banda de paso, la característica de frecuencia debe ser plana dentro de ±0,5 dB en toda la anchura del espectro de la emisión que ha de medirse;

– la selectividad de frecuencia debe permitir discriminar suficientemente contra el ruido y la interferencia fuera de banda sin introducir en los bordes de la banda de paso una atenuación de más de 2 dB con respecto al nivel en el centro de la banda de paso;

– dadas las posibles variaciones de la intensidad de campo de la emisión, conviene que el equipo presente una buena linealidad para una variación a la entrada de, por lo menos, 60 dB.

4.5.4.2.2 Equipo para el análisis del espectro

Siempre que se emplee un analizador de espectro para la determinación de la anchura de banda, debe estar disponible el modo de funcionamiento de "retención de máximos" (conocido también como memoria de crestas). El equipo debe tener buena linealidad y una gama de visualización suficiente, para variaciones de la tensión de entrada de, al menos, 60 dB.

Para medir las emisiones de banda estrecha, se requiere un analizador de espectro de gran resolución que permita obtener una representación precisa de la distribución espectral de la emisión. Un aparato típico tiene como una resolución máxima de 10 Hz, siendo posible ajustar la gama de frecuencias exploradas y la velocidad de barrido entre 1 y 100 kHz y entre 1 y 30 barridos por segundo, respectivamente.

Para el estudio de las emisiones de banda ancha, se dispone de analizadores de espectro con un receptor completo incorporado, así como otros destinados a ser utilizados con receptores de uso general. Los aparatos disponibles incluyen una gama de frecuencias de hasta 44 GHz, con una anchura del barrido variable de manera continua de hasta 100 MHz (en las frecuencias más elevadas). La velocidad de barrido es ajustable entre 1 y 60 barridos por segundo.

Con bajas velocidades de barrido, ha de emplearse un tubo de visualización con persistencia suficientemente larga para permitir una buena observación.

4.5.4.2.3 Equipo para el método de la relación de potencias

Debido a las estrictas condiciones que en materia de precisión deben cumplir los atenuadores de comparación, no se recomienda emplear el método que consiste en comparar la potencia dentro de la banda con la potencia total; por ello, conviene que el equipo esté concebido de modo que permita comparar la potencia radiada fuera de banda con la potencia total (como sucede con los equipos indicados en el § 4.5.2.2).

Como instrumento de medida polivalente, es recomendable que el equipo permita visualizar cada una de las frecuencias de umbral, para las que las potencias medias por debajo de su límite inferior y por encima de su límite superior, sean iguales al 0,5% de la potencia total, a fin de que se pueda calcular automáticamente la anchura de banda ocupada y registrarla directamente.

El equipo debiera tener una gama dinámica de por lo menos 30 dB. Si el nivel de entrada varía en una gama aún mayor, es conveniente utilizar un atenuador variable para el control automático en función de las variaciones de dicho nivel de entrada.

Es conveniente que el equipo de medida pueda proporcionar la indicación del máximo de su escala en un tiempo comprendido entre 0,3 y 0,5 s, y seguir así la fluctuación real de la anchura de banda ocupada por una emisión.

Para que la precisión de las mediciones de la radiación fuera de banda sea superior al 10%, conviene que la característica de la banda de paso se mantenga plana con una variación comprendida dentro de ±0,5 dB, y que la pérdida en la banda atenuada sea, por lo menos, de 30 dB. Además, la pendiente en la transición ha de ser pronunciada.

4.5.4.2.4 Equipo que utiliza técnicas FFT

La estimación fiable de la anchura de banda ocupada por señales digitales MDP, MPC y MAQ puede obtenerse utilizando un método de β%. Para que este método proporcione resultados coherentes, es necesario realizar un filtrado adecuado de la señal medida, a fin de evitar contribuciones de ruido en la anchura de banda en la que se realiza la medición. Para la mayoría de las transmisiones digitales, el 99% de la anchura de banda con potencia útil se encuentra dentro del espectro de señal que llega hasta el primer lóbulo. Una excepción destacada es la señal MDP2 no filtrada, que rara vez se utiliza; sin embargo, las transmisiones reales MDP2 se filtran a menudo en el lado del transmisor de forma que la forma de onda radiada correspondiente cumple la hipótesis de que el 99% de la potencia se encuentra dentro del espectro del primer lóbulo.

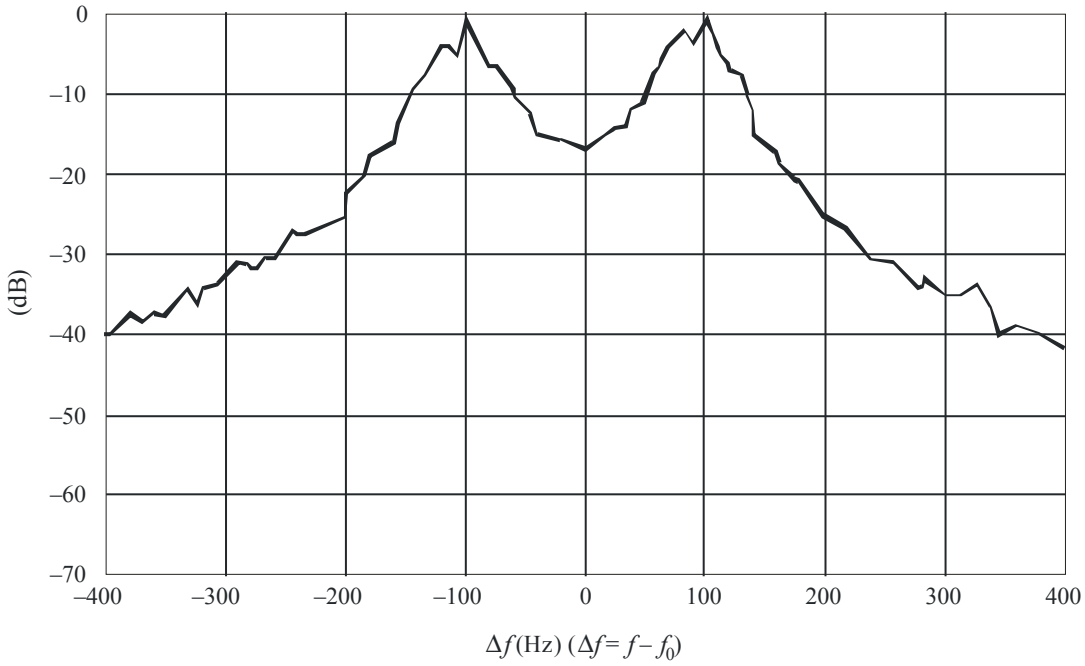
Por tanto, el equipo debe ofrecer una forma sencilla de fijar distintas características del filtro debido al efecto del ruido que se describe en § 4.5.2.1.2.

4.5.4.3 Método de medición de la anchura de banda ocupada utilizando un analizador de espectro

Este método se describe mediante un ejemplo. La Fig. 4.5-8 representa el espectro de una emisión F1B a 123,7 kHz a 50 baudios y con desplazamiento de frecuencia de 200 Hz, registrado con un analizador de espectro en modo de funcionamiento de "retención de máximos", con 5 barridos, una anchura de banda del filtro de análisis de 30 Hz y un tiempo de barrido de 100 s /2 kHz. La anchura del paso para la evaluación es de 20 Hz, como puede observarse en la retícula superpuesta al espectro, que se utiliza simplemente para determinar los valores de la atenuación a una frecuencia concreta.

FIGURA 4.5-8

Espectro de una emisión F1B a 123,7 kHz a 50 baudios y con desplazamiento de frecuencia de 200 Hz, utilizado para calcular la anchura de banda ocupada



Algunos analizadores de espectro modernos tienen funciones de microprogramación ("firmware") para evaluar la anchura de banda ocupada que funciona de un modo similar al descrito anteriormente. En la medida en que estos analizadores de espectro no muestran realmente los valores eficaces del espectro, proporcionan únicamente un valor aproximado de la anchura de banda ocupada.

El Cuadro 4.5-2 indica detalladamente los pasos del cálculo. Para $\beta/2 = 0{,}5\%$ el cálculo arroja los siguientes resultados:

100% de potencia relativa = 4,372984

0,5% de potencia relativa = 0,021865

límite inferior de la banda ocupada $\approx f_0 - 180$ Hz (véase la NOTA 1)

límite superior de la banda ocupada $\approx f_0 + 170$ Hz (véase la NOTA 2)

anchura de banda ocupada ≈ 350 Hz

NOTA 1 – El valor del 0,5% de la potencia relativa es muy próximo al valor de potencia de 0,023266 para $\Delta f = -180$ Hz (véanse las columnas primera y cuarta del Cuadro 4.5-2).

NOTA 2 – El valor del 0,5% de la potencia relativa en el extremo superior de la envolvente espectral corresponde aproximadamente al punto medio entre los valores de potencia de 0,015718 y 0,031567 para $\Delta f = 180$ Hz y $\Delta f = 160$ Hz, respectivamente (véanse las columnas primera y quinta del Cuadro 4.5-2).

CUADRO 4.5-2

Cálculo de la anchura de banda ocupada

Δf (Hz)	**p (dB)**	**$P_{relativa}$**	**$\sum_{-400Hz}^{\Delta f} P_{relativa}$**	**$\sum_{-400\ \mathrm{Hz}}^{\Delta f} P_{relativa}$**
–280	–31	0,000794	0,002321	.
–260	–31	0,000794	0,003115	.
–240	–28	0,001585	0,004700	.
–220	–27	0,001995	0,006695	.
–200	–24	0,003981	0,010677	.
–180	–19	0,012589	0,023266	.
–160	–14	0,039811	0,063076	.
–140	–8	0,158489	.	.
–120	–4	0,398107	.	.
–100	0	1,000000	.	.
–80	–5	0,316228	.	.
–60	–11	0,079433	.	.
–40	–14	0,039811	.	.
–20	–15	0,031623	.	.
0	–17	0,019953	.	.
20	–14	0,039811	.	.
40	–12	0,063096	.	.
60	–7	0,199526	.	.
80	–2	0,630957	.	.
100	0	1,000000	.	.
120	–6	0,251189	.	.
140	–13	0,050119	.	.
160	–18	0,015849	.	0,031567
180	–21	0,007943	.	0,015718
200	–26	0,002512	.	0,007775
220	–27	0,001995	.	0,005263
240	–31	0,000794	.	0,003268
260	–31	0,000794	.	0,002474
280	–33	0,000501	.	0,001679

Si se elige una anchura de paso de 40 Hz y sólo se tienen en cuenta las componentes comprendidas entre –260 Hz y 260 Hz, también se obtiene un resultado aproximadamente igual a 350 Hz. Así pues, en general basta con elegir una anchura de paso aproximadamente igual, o inferior, al 10% de la anchura de banda ocupada prevista, siempre que se siga reproduciendo la envolvente, y se tengan en cuenta sólo las componentes que sean aproximadamente de –30 dB, o mayores, con respecto a la cresta de la envolvente del espectro.

En el ejemplo proporcionado, el nivel relativo de potencia de 0 dB pasa por la cresta de la envolvente del espectro.

Esto es conveniente para los cálculos, aunque no indispensable; cualquier otro nivel de referencia conduciría al mismo resultado.

Nótese que las lecturas se realizan en dB (segunda columna) mientras que la definición exige resumir los valores de potencia. Por tanto, los valores en dB se convierten en potencia relativa (tercera columna).

Referencias

Recomendaciones del UIT-R

NOTA – Siempre debe utilizarse la versión más actualizada de cada Recomendación.

Recomendación UIT-R SM.328 – Espectros y anchuras de banda de las emisiones.

Recomendación UIT-R SM.329 – Emisiones no esenciales.

Recomendación UIT-R SM.443 – Mediciones de anchura de banda en las estaciones de comprobación técnica de las emisiones.

4.6 Medición de la modulación

4.6.1 Introducción

En la sección 6.6 se describen los aspectos fundamentales básicos de los diversos tipos de modulación. La sección 4.6 se centra en la medición de los parámetros de modulación, en la identificación de los métodos de modulación y en métodos de análisis.

4.6.2 Principales tipos de instrumentos

Los instrumentos adecuados para realizar mediciones relativas a la modulación pueden dividirse en tres grupos básicos:

– Instrumentación de propósito general: analizador de espectro, receptor de comprobación técnica común (analógico) y osciloscopio. La utilización se limita a mediciones de modulaciones analógicas o a parámetros específicos de modulaciones digitales.

– Dispositivos dedicados: medidores y analizadores de modulación.

– Receptores modernos de comprobación técnica (digitales) y analizadores vectoriales de señal (VSA) asociados con procesamiento digital. Este tipo de equipo permite realizar mediciones de todos los parámetros de modulación.

4.6.3 Modulación analógica

4.6.3.1 Modulación de amplitud

El parámetro fundamental para la medición de la modulación de amplitud analógica (MA) es la profundidad de modulación:

$$m\,(\%) = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}} \times 100$$

En un funcionamiento normal oscila del 0 al 100% y puede leerse directamente en los receptores de medida comunes.

Cuando la portadora está sobremodulada y m>100% se produce una situación crítica. Ello ocurre cuando $E_{mín} < 0$. Sin embargo, un receptor de medida no refleja dicha situación. En su lugar, puede utilizarse otra definición de profundidad de modulación:

$$m \pm (\%) = \frac{E_{max} - E_{min}}{2E_c} \times 100$$

siendo E_c el nivel medio. Los valores de $E_{máx}$, $E_{mín}$ y E_c pueden medirse, por ejemplo, con receptores de medida y con analizadores de espectro. Si $m+ = m- = m\pm$, la modulación puede considerarse simétrica (es decir, la modulación no modifica el valor de la amplitud de la portadora ($= E_c$)), el porcentaje de modulación es <100% y no existe sobremodulación.

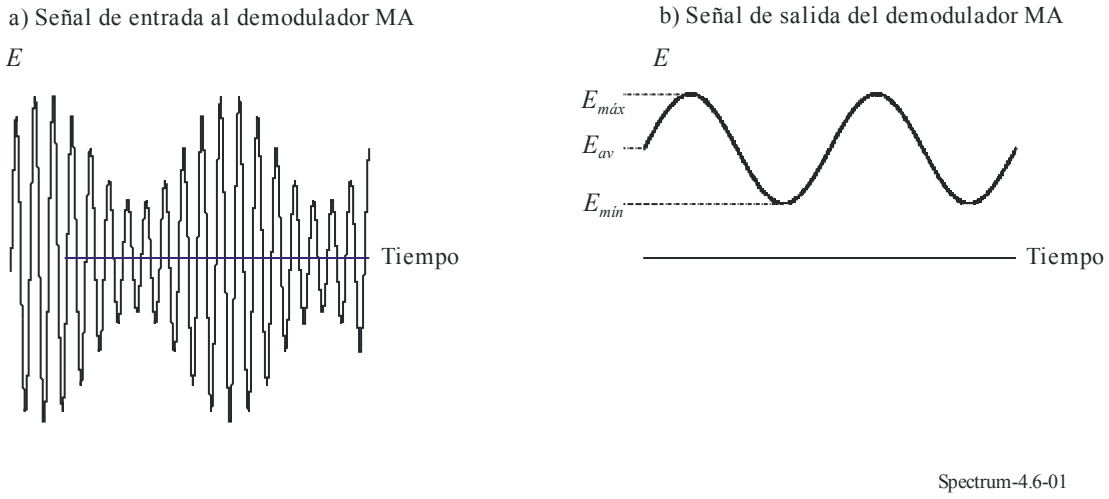
Mediante instrumentos especiales, denominados medidores de modulación o analizadores de modulación (si están equipados con circuitos especiales que permiten un examen más minucioso de la señal demodulada, por ejemplo, la distorsión y la relación *S*/*N*), puede realizarse un análisis más detallado de los parámetros de modulación.

Por lo general, los medidores de modulación también indican el valor de la frecuencia portadora ya que los instrumentos actualmente disponibles en el mercado lo permiten sin costo adicional.

La salida del demodulador de MA es, por ejemplo, la tensión positiva de la envolvente de la onda modulada, tal como se muestra en la Fig. 4.6-1. En las Figs. 4.6-1a) y 4.6-1b) se muestran las señales de entrada y de salida del modulador, respectivamente.

FIGURA 4.6-1

Señales de entrada y salida del demodulador de MA



El circuito de indicación calcula entonces la profundidad de la modulación. Por tanto, el instrumento indica *m*+, *m*–, o *m*±. La comparación de dichos valores muestra si la modulación es asimétrica o si existe sobremodulación (*m*+ >1).

En ocasiones sólo se requieren los valores instantáneos de la profundidad de modulación correspondientes a crestas de la modulación para verificar que no se produce sobremodulación. En este caso, puede bastar con un osciloscopio conectado a la salida de frecuencia intermedia de un receptor para realizar una verificación rápida. También puede utilizarse un analizador de espectro con margen cero (en el dominio del tiempo) o un analizador vectorial de señal.

Por otro lado, puede ser interesante conocer la profundidad de modulación media sobre intervalos de tiempo dados para garantizar que el transmisor se utiliza correctamente. Además, en algunos casos puede resultar de interés conocer la calidad de la modulación, como por ejemplo, la relación señal a ruido o los contenidos de distorsión. En todos los casos, es necesario utilizar un analizador de modulación que también contenga un medidor de profundidad de modulación de precisión. Dicho instrumento puede presentar los resultados en la forma que se desee, por ejemplo, en el panel frontal, en la pantalla de un computador o gráficamente, impresos o con un trazador.

4.6.3.2 Modulación de frecuencia y modulación de fase

Tal como se explica en la sección 6.6, las modulaciones de frecuencia y de fase (MF/MP) son similares y producen la misma señal de RF. En el caso de señales MF/MP el parámetro fundamental a medir es la desviación de frecuencia Δf, cuya lectura es directa en receptores de medida comunes. El índice de modulación:

$$m = \frac{\Delta f}{fm}$$

puede calcularse a partir de los resultados de la medición de Δf.

Los medidores de modulación permiten medir todas las propiedades de las desviaciones de frecuencia y fase. La desviación de las estaciones de radiodifusión con MF también puede medirse con un analizador del dominio de modulación basado en el método de frecuencia instantánea (IFM) o con un receptor de

comprobación técnica moderno (o analizador vectorial de señal, VSA) con capacidades de procesado digital. La velocidad de muestreo debe elegirse según la modulación (por ejemplo, un mínimo de 40 kmuestras/s si la frecuencia de modulación máxima es de 15 kHz), y el tiempo de repetición (ventana de tiempo) debe corresponder con la frecuencia más baja a la que se desea determinar la desviación. Cuanto mayor sea el tiempo de medida, menor será la frecuencia de modulación que puede observarse tras el procesado de las muestras.

Las mediciones de la desviación de fase y de frecuencia de las señales deseadas se realizan como mediciones de valores de cresta, ya que, por definición, las desviaciones de fase y de frecuencia son desviaciones de cresta. Sin embargo, si tienen que realizarse mediciones del ruido o de la relación señal a ruido (o SINAD) deben tenerse en cuenta valores eficaces (r.m.s.) o valores ponderados de cuasi-cresta de las respectivas desviaciones. Por tanto, los medidores de MP o de MF están por lo general equipados con detectores que ofrecen lecturas de valores eficaces, de SINAD y de cuasi-cresta (Recomendación UIT-R BS.468).

En la Recomendación UIT-R SM.1268 se describe detalladamente cómo se realiza la medición y evaluación de la desviación de frecuencia y de la potencia de modulación máximas de las emisiones de radiodifusión con MF durante una programación normal.

4.6.3.3 Medición simultánea de modulación de amplitud y de la modulación de fase/frecuencia

La propagación por trayectos múltiples es un problema general para las señales con modulación de frecuencia (MF) en las bandas de ondas métricas y frecuencias superiores. El efecto de la propagación por trayectos múltiples en sistemas con modulación de frecuencia es una distorsión inaceptable de la señal modulada. Debido a la propagación multitrayecto, la modulación de fase o de frecuencia se convierte en un cierto porcentaje de modulación de amplitud por suma vectorial en la antena receptora. Por consiguiente, midiendo la modulación de amplitud que presenta una portadora modulada en frecuencia puede determinarse el grado de propagación por trayectos múltiples de la señal. A tal efecto, el medidor de modulación, debe medir simultáneamente la MA y la MP/MF. Cuando sea necesario determinar si la calidad de las señales de radiodifusión MF es suficiente, debe medirse el porcentaje de la conversión de MP/MF en MA.

Para ello, existen instrumentos que proporcionan mediciones en paralelo de la desviación y de la profundidad de modulación que calculan de forma inmediata el factor de conversión como % de la profundidad de modulación con respecto a la desviación de MF en kHz.

En la Recomendación UIT-R SM.1268 se definen los valores máximos de la cantidad de modulación de amplitud así como otros prerrequisitos para una medición precisa.

4.6.3.4 Modulaciones analógicas especiales

4.6.3.4.1 Modulaciones de radiodifusión de TV

Una propiedad importante de la modulación de transmisiones de radiodifusión de TV analógica (banda lateral residual) en las bandas de ondas métricas y decimétricas es el nivel de las subportadoras (por ejemplo, para las ráfagas de sonido y color) en relación con la portadora de video. Ello puede medirse con un analizador de espectro cuya anchura de banda de resolución sea de al menos 100 kHz. Los valores nominales son función el sistema y pueden obtenerse de la correspondiente documentación normativa.

De acuerdo con la normalización pertinente, hay partes de la señal de TV que se mantienen con una amplitud constante, independientemente del contenido de imagen. Por esa razón, no tiene sentido medir la profundidad de modulación convencional de la modulación de vídeo.

La representación en un osciloscopio de la señal de FI o de la señal de vídeo demodulada es útil y da una buena idea de la modulación. Para una presentación correcta es imprescindible una anchura de banda mínima de 5,5 MHz en la salida de FI y, si se utiliza, el demodulador de vídeo del receptor.

Existen analizadores de TV analógica especiales que permiten un análisis detallado de la modulación de la imagen, incluyendo contenidos de las líneas de prueba insertadas entre cuadros sucesivos.

Las mediciones de la desviación de los canales de sonido pueden realizarse de forma convencional, siempre que la selectividad del medidor de modulación sea suficiente.

4.6.3.4.2 Modulación de banda lateral única con portadora suprimida

Con este tipo de modulación se suprime la portadora y no se define la profundidad de modulación. Por tanto, no puede medirse la profundidad de modulación.

4.6.3.4.3 Modulación de banda lateral independiente

Todo lo indicado sobre la banda lateral única (BLU) con portadora suprimida también se aplica a la modulación en banda lateral independiente (BLI) con portadora suprimida (B8E).

No es posible realizar ninguna medición de las características de la modulación de forma convencional.

4.6.3.4.4 Modulación dinámica de amplitud

Como se explica en la sección 6.6, este tipo de modulación reduce el nivel de la portadora cuando la profundidad de modulación es baja para ahorrar energía en la transmisión. En este caso, la lectura de un medidor de modulación convencional no es correcta sin conocer con detalle las características de la señal transmitida. Para determinar si se utiliza modulación dinámica de amplitud, debe medirse el nivel de la portadora con una constante de tiempo reducida.

4.6.4 Modulación digital de portadora única

En función de determinados parámetros del sistema, las modulaciones de amplitud, frecuencia o fase con portadora única, como MDA, MDF, MDP, MDM y MAQ, tienen espectros similares o idénticos y no pueden diferenciarse fácilmente utilizando un analizador de espectro de barrido. A menudo no es posible medir la profundidad de modulación y la desviación de frecuencia mediante medidores de modulación o receptores de medida normales. En lugar de ello, pueden ser de interés las propiedades de modulación siguientes:

– identificación de la modulación y del número de estados de la constelación;
– velocidad de símbolos;
– filtrado de la banda base;
– errores de la modulación.

4.6.4.1 Velocidad de símbolos

Para la decodificación de una señal digital, el receptor debe estar sincronizado con el transmisor, es decir, las velocidades de símbolos debe coincidir exactamente. Salvo que el equipo utilizado tenga capacidades de identificación de la señal digital, los receptores de comprobación técnica y los analizadores vectoriales de señal sólo funcionan cuando el operador ha introducido la velocidad de símbolos correcta. Los equipos de medida convencionales no pueden medir la velocidad de símbolos y si ésta no es conocida no es posible realizar un análisis o decodificación adicional.

En general, debido que el cambio de amplitud y/o fase de las señales filtradas es progresivo, no es posible medir la velocidad de símbolos con un osciloscopio conectado a la frecuencia intermedia de un receptor de comprobación técnica.

No obstante, como regla orientativa, puede considerarse que la velocidad de símbolos es aproximadamente igual a la anchura de banda ocupada de la señal. En el Cuadro 4.6-1 se muestran algunos ejemplos de sistemas digitales de portadora única.

CUADRO 4.6-1

Velocidad de símbolos y anchura de banda de ejemplos de sistemas de portadora única

Sistema	Anchura de banda	Velocidad de símbolos
TETRAPOL	7,2 kHz	8 kSímb/s
TETRA	21 kHz	18 kSímb/s
DECT	1,1 MHz	1,152 MSímb/s

Sistema	Anchura de banda	Velocidad de símbolos
GSM	250 kHz	270,833 kSímb/s
UMTS (European)	4,2 MHz	3,84 MSímb/s
Bluetooth	950 kHz	1 MSímb/s
WLAN DSSS (802.11b)	13 MHz	11 MSímb/s

La velocidad de símbolos puede medirse con analizadores de modulación digital y receptores de comprobación técnica modernos especialmente equipados y aplicando métodos matemáticos, tal como se explica en el punto siguiente.

4.6.4.2 Identificación de la modulación y del número de estados de una constelación

Como se ha indicado anteriormente, no es posible identificar unívocamente una modulación de portadora única utilizando receptores de medida o analizadores de espectro de barrido convencionales. No obstante, la medición de la diferencia entre los niveles de cresta y RMS (para señales de impulsos, la diferencia entre los niveles de cresta y promedio de la ráfaga) permite obtener algunas "pistas" al respecto. Para más detalles, véase la sección 4.3. Esta diferencia se denomina factor de CRESTA. Si éste es cero (ambos niveles son iguales), la modulación sólo puede ser MDF o MDM, ya que las restantes modulaciones de portadora única tienen una modulación de amplitud inherente.

En el caso de modulaciones MDF y MDM, el desplazamiento de frecuencia puede medirse con un osciloscopio conectado a la frecuencia intermedia de un receptor de medida convencional.

En el caso de MDA, la profundidad de la modulación puede medirse con un analizador de espectro con margen cero o con un osciloscopio conectado a la frecuencia intermedia de un receptor de medida convencional.

Para identificar la modulación utilizada, es necesario disponer de un equipo con funciones de analizador vectorial de señal o de analizador/receptor de FFT que pueda obtener información sobre amplitud, frecuencia y fase de la señal moduladora. Una vez que se introduce la velocidad de símbolos, estos analizadores /receptores permiten visualizar el diagrama de la constelación tal como se muestra en la Fig. 4.6-2. Para más información sobre el diagrama de la constelación, véase la sección 6.6.

Si el analizador puede mostrar el vector de radiofrecuencia entre los puntos de la constelación (es decir, de forma continua en cualquier momento), puede obtenerse información adicional de las propiedades de la modulación. La representación resultante se denomina normalmente diagrama vectorial. En la Fig. 4.6-3 se muestra el diagrama vectorial de la señal MDP-8 de la Fig. 4.6-2.

FIGURA 4.6-2

Diagrama de la constelación de una señal MDP-8

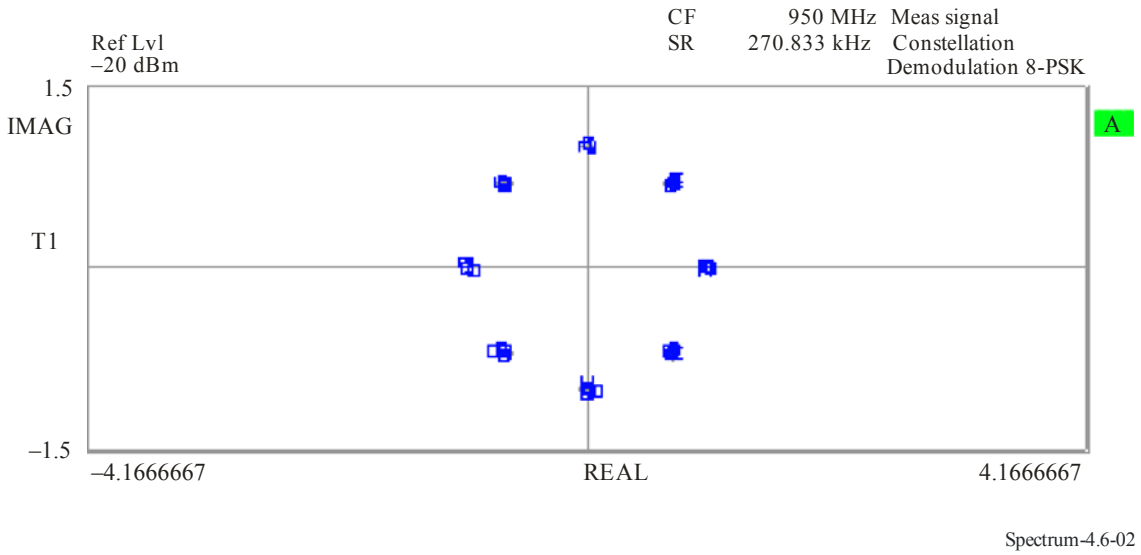
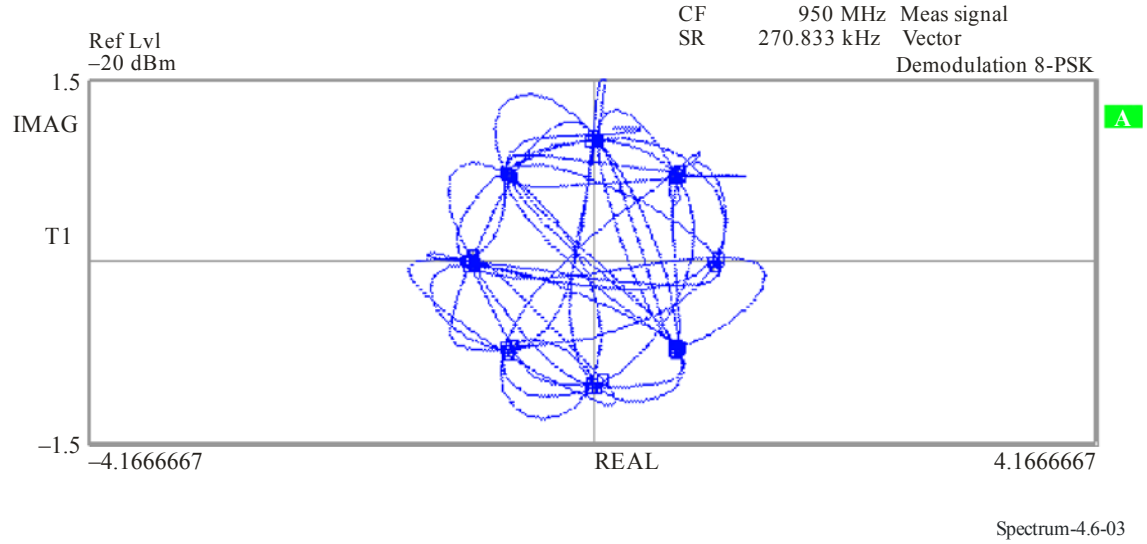


FIGURA 4.6-3

Diagrama vectorial de una señal MDP-8



Existen analizadores de modulación digital especiales que permiten, en determinadas condiciones, identificar la modulación y realizar la medición de la velocidad de símbolos de una señal completamente desconocida. Dichos analizadores son, a menudo, implementaciones software ejecutadas en un computador normal y que se alimentan de una secuencia de datos previamente registrada de la señal analizada. Las técnicas de medición se basan en funciones de transformación de la señal como las siguientes:

Correlación del espectro y método de los momentos

Se realiza una autocorrelación cíclica del espectro de sucesivos procesos FFT. El resultado puede representarse mediante un trazador gráfico en forma de diagrama bidimensional que muestra crestas diferenciadas en los puntos de la constelación y el tiempo necesario para la transición entre ellos. En la Fig. 4.6-4 se muestra un ejemplo de señal MDP-2.

Espectro de la señal elevado a la N-sima potencia

Este método se basa en la Transformada de Fourier de la señal, previamente elevada a la potencia de 2 o de 4. En función de la modulación, el resultado muestra diferentes crestas que representa el número de estados de la constelación.

Método del histograma

Se calcula un histograma de las frecuencias, amplitudes o fases instantáneas.

En función del tipo de modulación, los valores de las crestas calculadas caracterizan los parámetros de la modulación.

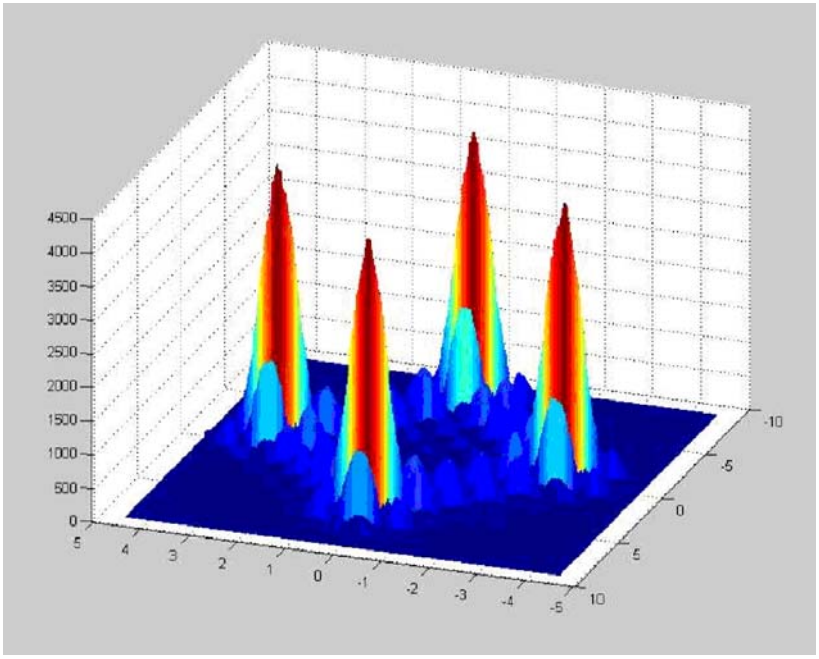
Espectro de cruces por cero

Este método evalúa la frecuencia instantánea de la banda base compleja de la señal de entrada. La frecuencia central de esta banda base es cero. La función de cruces por cero genera una cresta en el dominio del tiempo cuando la frecuencia de la señal de banda base (modulada) cruza el valor cero. Se determina el tiempo entre crestas consecutivas (t_n) de la función de cruces por cero y se calcula un nuevo "espectro" utilizando la relación $f = 1/t_n$.

En la Fig. 4.6-5 se ilustra este proceso.

FIGURA 4.6-4

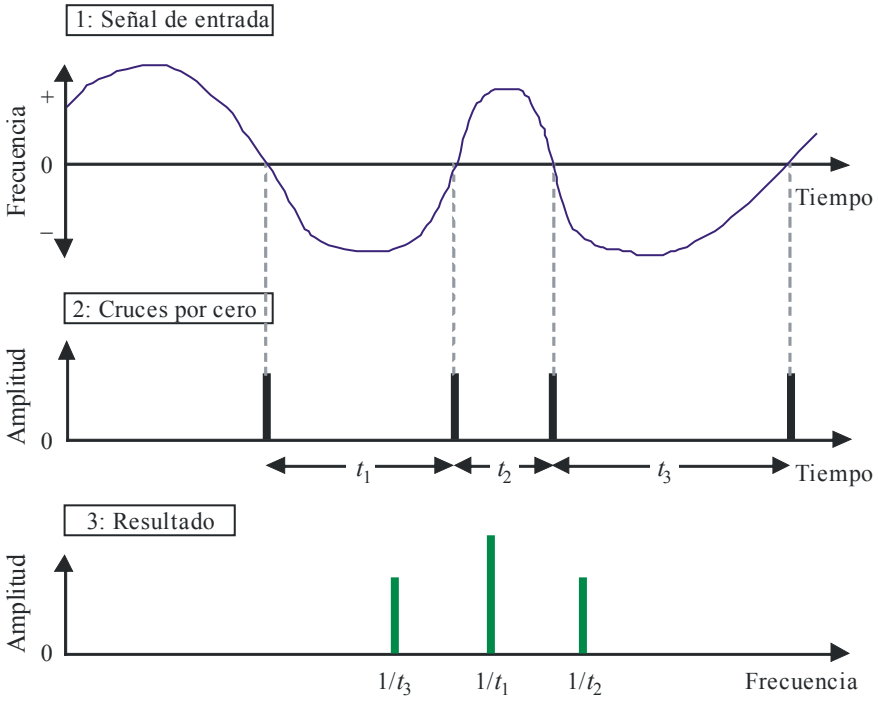
Resultado de la correlación espectral de una señal MDP-2



Spectrum-4.6-04

FIGURA 4.6-5

Principio del método de cruces por cero

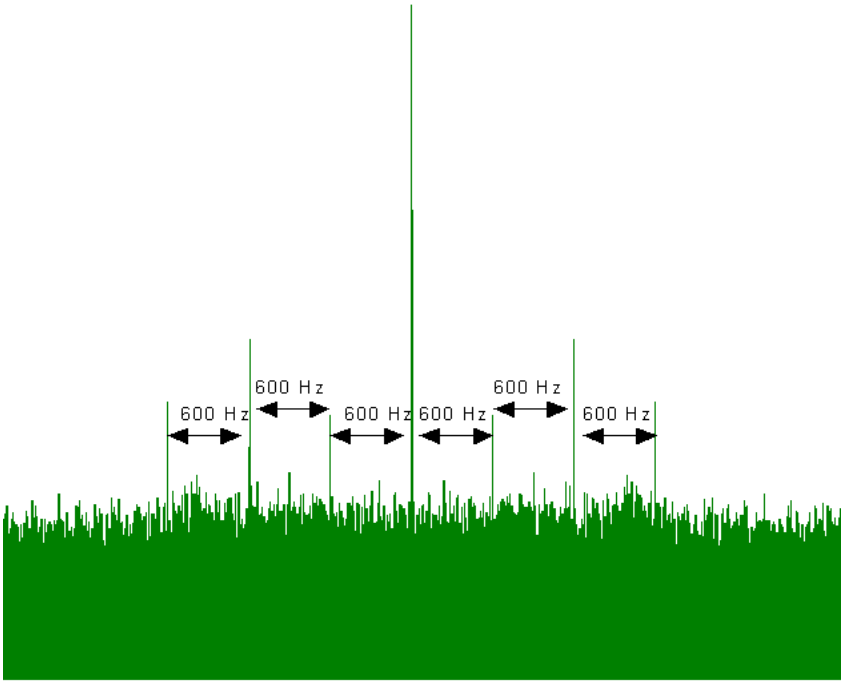


Spectrum-4.6-05

En la Fig. 4.6-6 se muestra un ejemplo del resultado del método de cruces por cero.

FIGURA 4.6-6

Cruces por cero de una señal MDP-4 de 600 símbolos/s



Estos métodos proporcionan a menudo información adicional al número de estados de la modulación. En el Cuadro 4.6-2 se resumen las capacidades de cada uno de los métodos mencionados.

CUADRO 4.6-2

Posibles métodos de medición de los parámetros de modulación digital

Modulación	**Medición de...**	**Correlación espectral y método de los momentos**	**Espectro de la señal elevada a la potencia de *N***	**Método del histograma**	**Espectro de cruces de cero**
MDA	Frecuencia portadora	√			
	Velocidad de símbolos		√ (*N*=2)		
	Número de estados			√	
MDF	Frecuencia portadora			√	
	Velocidad de símbolos	√			√
	Número de estados		√ (*N*= 1)*	√	
MDP	Frecuencia portadora	√	√ (*N*=2)		
	Velocidad de símbolos		√ (*N*=2or 4)	√	√
	Número de estados			√	

Modulación	Medición de...	Correlación espectral y método de los momentos	Espectro de la señal elevada a la potencia de *N*	Método del histograma	Espectro de cruces de cero
MDM	Frecuencia portadora		√ (*N*=2)		
	Velocidad de símbolos		√ (*N*=2)		√
	Número de estados			√	
MAQ	Frecuencia portadora	√			
	Velocidad de símbolos		√ (*N*= 4)		√
	Número de estados	(No es posible con estos métodos)			

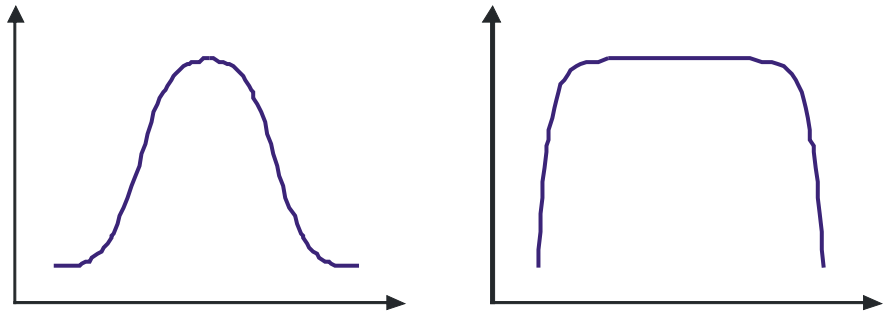
* En función del índice de modulación.

4.6.4.3 Filtrado de la banda base

Tal como se explica en la sección 6.6, para reducir la anchura de banda de las señales de portadora única sólo se utiliza el filtrado gaussiano y de coseno (o de raíz de coseno alzado, RRC). La forma característica del espectro de RF permite conocer el tipo de filtrado de banda base utilizado (véase la Fig. 4.6-7).

FIGURA 4.6-7

Espectros de señales digitales de portadora única filtradas



Spectrum-4.6-07

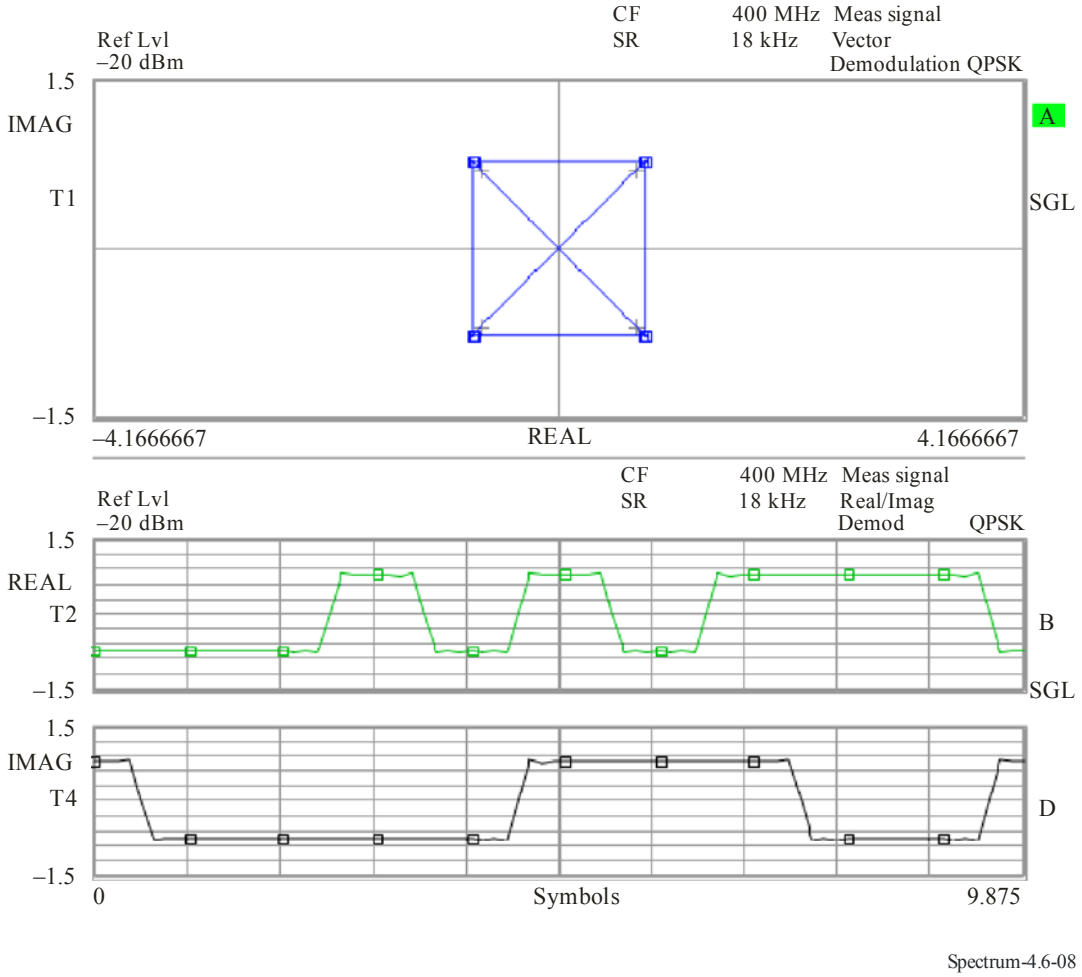
En general, un analizador vectorial de señal puede representar las componentes I y Q de la señal moduladora en el dominio del tiempo. Las Figs. 4.6-8 y 4.6-9 utilizan para ello el ejemplo de diez símbolos de una señal modulada en MDP-4. En la Fig. 4.6-8 no se ha aplicado ningún filtrado de banda base. En la Fig. 4.6-9 se muestra la misma señal con filtrado de coseno de la banda base.

Puede observarse que el filtrado de la banda base "suaviza" la agudeza de los bordes de la banda base moduladora al tiempo que garantiza que el vector de RF alcanza los puntos nominales de la constelación justamente en el instante de la decodificación.

Los cambios más suavizados de las componentes I y Q producen en ocasiones una "sobreoscilación" de los puntos de la constelación que aumenta la amplitud de cresta de la señal de RF. No obstante, la anchura de banda se reduce significativamente.

FIGURA 4.6-8

Diagrama vectorial y componentes I/Q en el dominio del tiempo de una señal MDP-4 no filtrada



4.6.4.4 Error de modulación

Los analizadores vectoriales de señal y los receptores de comprobación técnica modernos pueden, por lo general, medir al menos los errores siguientes:

– desplazamiento en cuadratura;

– asimetría de la ganancia;

– desplazamiento I/Q.

En la Fig. 4.6-10 muestra la medición del error de una señal MAQ-16 con un desplazamiento de I/Q considerable.

La suma de dichos errores de modulación puede expresarse como la magnitud vectorial del error (EVM, *error vector magnitude*). Normalmente se expresa en %.

FIGURA 4.6-9

Diagrama vectorial y dominio del tiempo de I/Q de una señal MDP-4 con filtrado de coseno

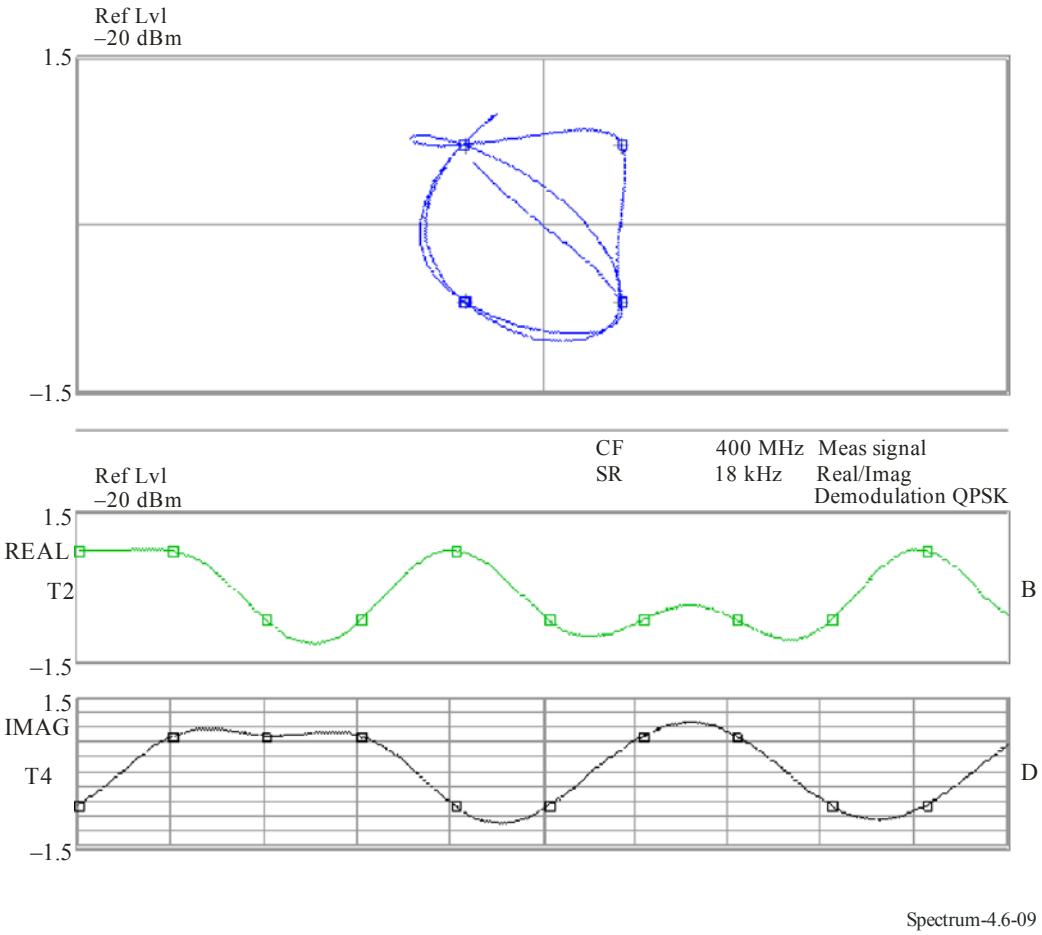
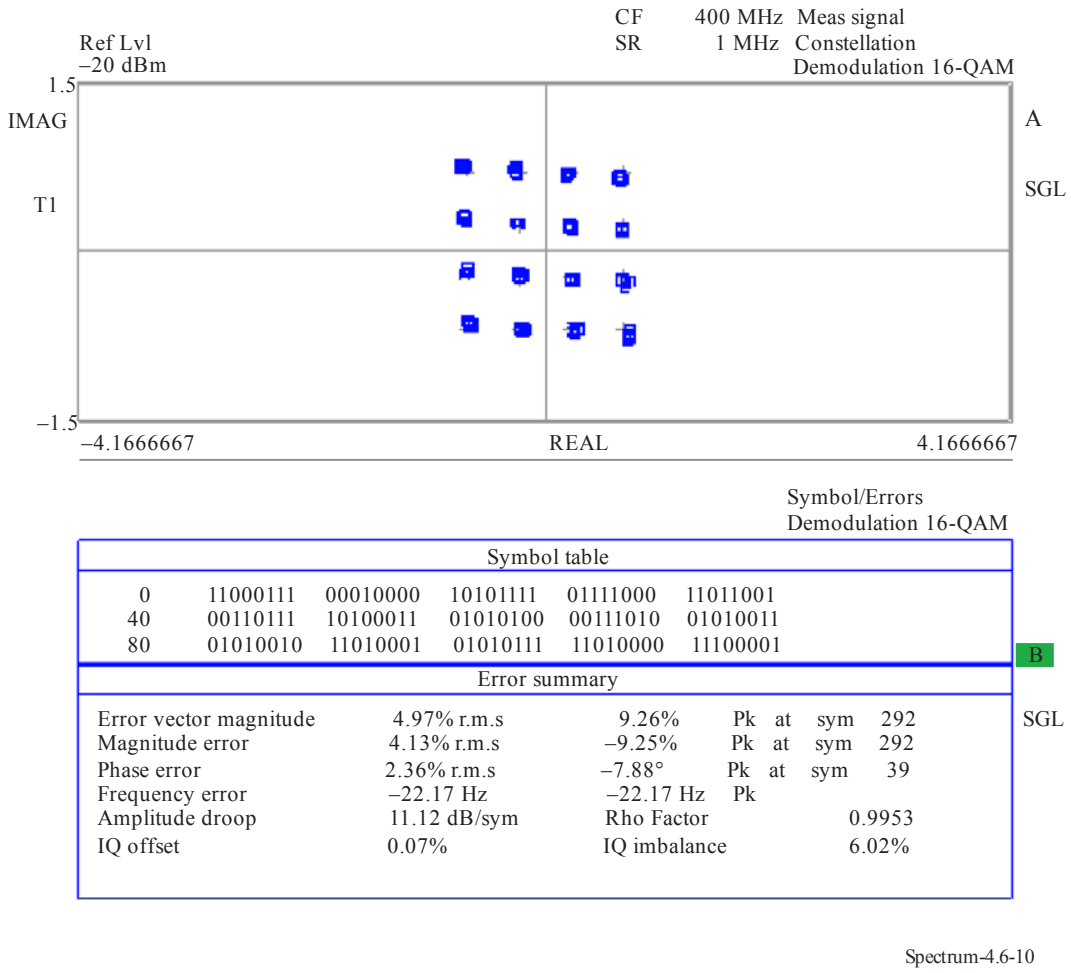


FIGURA 4.6-10

Ejemplo de medición del error de modulación



Spectrum-4.6-10

4.6.5 Modulación digital con varias portadoras

Muchos sistemas de comunicación modernos utilizan multiplexación por división de frecuencias ortogonales (MDFO). Para las señales MDFO son de interés los parámetros siguientes:

– tipo de modulación;
– número de portadoras;
– separación entre portadoras;
– duración de los símbolos;
– intervalo de guarda.

4.6.5.1 Tipo de modulación

Al igual que en los sistemas de portadora única, el tipo de modulación no puede determinarse mediante equipos de comprobación técnica normales como los analizadores de espectro. Es más, la mayoría de los analizadores de espectro sólo funcionan con sistemas de portadora única.

Para separar las portadoras individuales del conjunto MDFO se utilizan analizadores de señal especiales. También pueden utilizarse algunos receptores de comprobación técnica modernos junto con el software de procesamiento de señal adecuado.

Normalmente representan el diagrama de la constelación de todas las portadoras o de un conjunto de portadoras seleccionadas. A partir de dicha representación puede identificarse la modulación de las subportadoras.

4.6.5.2 Número de portadoras y separación entre portadoras

Los espectros de las subportadoras se solapan debido a su modulación. Por tanto, en un analizador de espectro convencional es difícil visualizarlas separadamente.

No obstante, utilizando un modo de promediado de traza de larga duración junto con una anchura de banda de resolución estrecha (RBW < 1/10 Δf), el analizador de espectro mostraría una imagen como la de la Fig. 4.6-11.

El espectro de la Fig. 4.6-11 es parte de una señal DAB en la que puede medirse una separación entre portadoras Δf de 1 kHz.

El número de portadoras puede calcularse mediante la anchura de banda entre las portadoras exteriores, lo cual puede determinarse fácilmente con un analizador de espectro y conociendo la separación entre portadoras.

4.6.5.3 Duración de los símbolos

La duración de un símbolo T_s es:

$$T_S = \frac{1}{\Delta f}$$

donde Δf es la separación de frecuencias entre dos subportadoras adyacentes. En el ejemplo de la Fig. 4.6-11, la duración del símbolo sería de 1 ms.

Una forma más exacta de calcular la duración de los símbolos que requiere disponer de un equipo o software especial es el cálculo de la función de autocorrelación de la señal en el tiempo (previamente registrada). En la Fig. 4.6-12 se muestra un ejemplo.

La autocorrelación presenta una cresta con un desplazamiento temporal igual a la duración del símbolo.

La duración del intervalo de guarda T_g no puede medirse utilizando un equipo de comprobación técnica convencional. En su lugar, deben utilizarse analizadores de señales MDFO especiales.

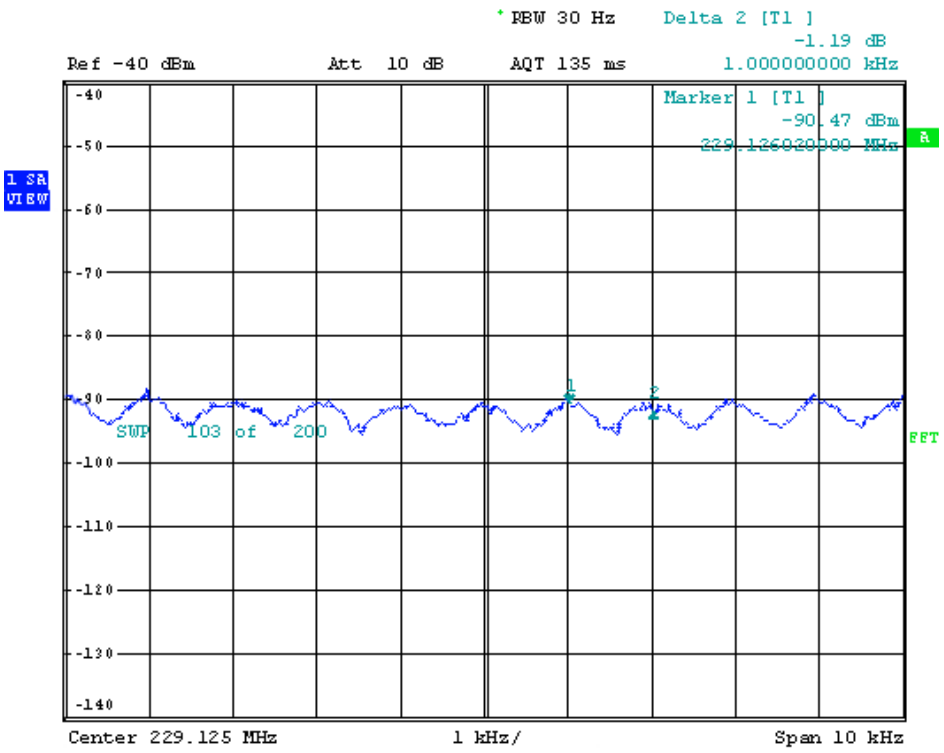
Una forma de determinar el tiempo de guarda con este tipo de equipos es aplicar un proceso de autocorrelación cíclico a la señal en el tiempo.

El resultado muestra crestas a dichos intervalos de tiempo en los que parte de la información transmitida se repite.

Dicho tiempo es $T_s + T_g$. Si se conoce T_s (o se ha medido anteriormente), puede calcularse T_g. En la Fig. 4.6-13 se muestra un ejemplo.

FIGURA 4.6-11

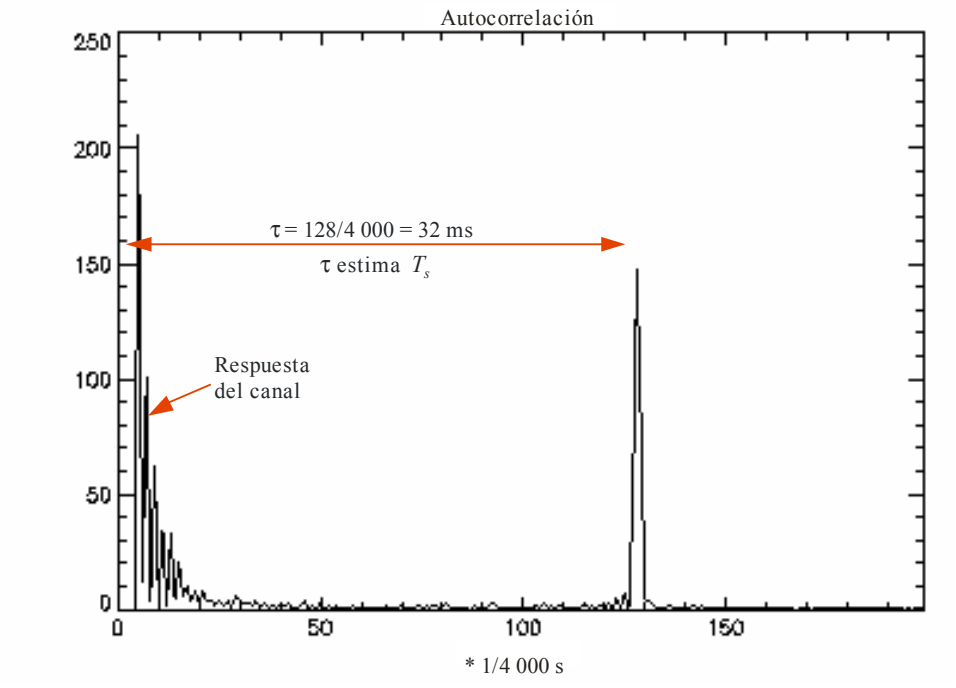
Parte del espectro de una señal MDFO con una resolución elevada



Spectrum-4.6-11

FIGURA 4.6-12

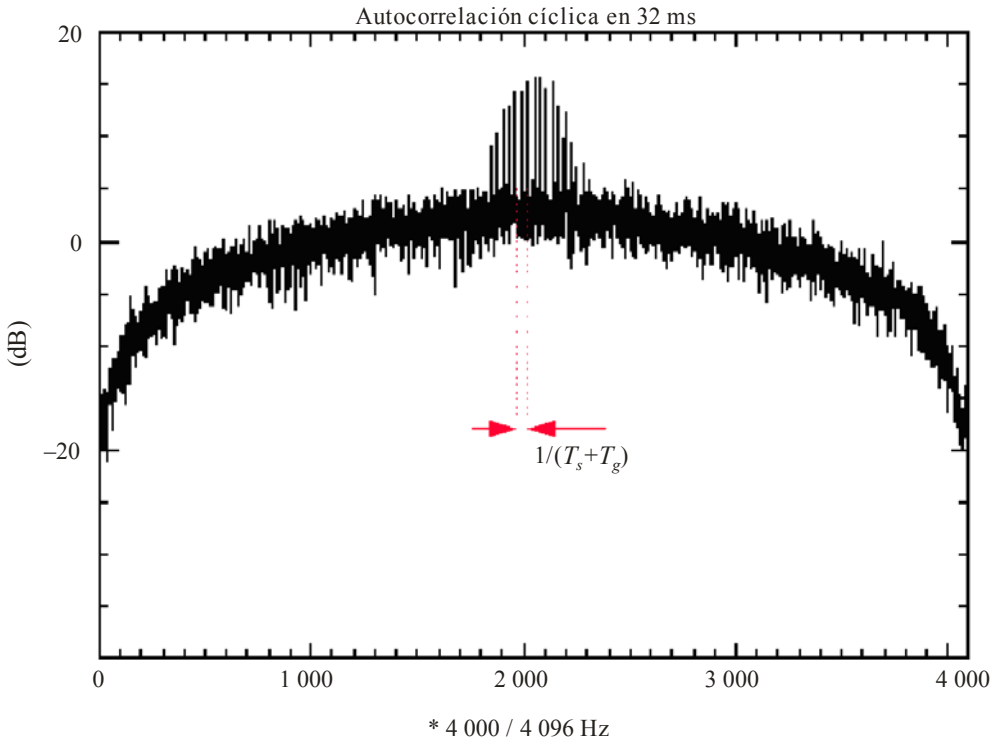
Autocorrelación de una señal MDFO



Spectrum-4.6-12

FIGURA 4.6-13

Autocorrelación cíclica de una señal temporal MDFO



4.6.6 Errores de medición

Las posibles fuentes de errores de medición son las siguientes:

– una anchura de banda del instrumento más estrecha que la señal modulada;

– señales de ruido o interferencia cocanales;

– señales interferentes sobre canales adyacentes

– recepción de reflexiones y de trayectos múltiples

Para evitar este problema, las mediciones deben efectuarse con la relación *S/N* óptima del receptor (medidor de modulación) y utilizando una antena directiva para eliminar al máximo las señales no deseadas y obtener la tensión máxima de la señal deseada. La anchura de banda de medición tiene que seleccionarse de forma que abarque exclusivamente la señal deseada.

Las mediciones de la desviación de señales con MF que tengan un elevado contenido de MA debido a trayectos múltiples generan resultados erróneos. El valor indicado puede ser excesivamente elevado (por ejemplo, en un factor de 2). Cuando se realicen mediciones de la desviación debe evitarse la recepción de trayectos múltiples.

Bibliografía

Application Note 150-1[2001] Spectrum Analyzer Amplitude and Frequency Modulation. Agilent Technologies, Santa Rosa, Estados Unidos de América, descargable en :http://www.agilent.com/.

BLUE, K., *et al.*[Diciembre 1993] Vector Signal Analyzers for Difficult Measurements on Time-Varying and Complex Modulated Signals. *Hewlett-Packard J.*, Vol. 44, p. 6-47.

BUES, D. and RIEDEL, P.[1993] Planning digital radio networks using Impulse Response Analyzer PCS and test tranmitter system.*News from Rohde & Schwarz*, No. 141, p. 26-27.

STOKKE, K. N. [Abril, 1986] *EBU Rev. Techn.*, No. 216, p. 81-87.

WOLF, J. [1993] Test receivers ESN and ESVN: Top-rounders for signal and EMI measurements. *News from Rohde & Schwarz*, No. 141, p. 11-13.

Recomendaciones del UIT-R

NOTA – Debe utilizarse la última edición disponible de cada Recomendación

Recomendación UIT-R BS.468 – Medición del nivel de tensión del ruido de audiofrecuencia en radiodifusión sonora.

Recomendación UIT-R SM.1268 – Método de medición de la máxima desviación de frecuencia de las emisiones de radiodifusión en frecuencia modulada (FM) a utilizar en las estaciones de comprobación técnica.

4.7 Radiogoniometría y localización

4.7.1 Consideraciones generales

La radiogoniometría tiene por objeto determinar la línea de marcación (LOB, *line of bearing*) de una fuente de radiaciones electromagnéticas utilizando las propiedades de propagación de las ondas.

Considerada de esa forma general, la radiogoniometría puede utilizarse para determinar la posición de un transmisor radioeléctrico o de una fuente de ruido radioeléctrico.

La utilización de varios radiogoniómetros (método de triangulación) o de métodos de localización directa es necesaria en los casos siguientes:

– localización de un transmisor en situación de emergencia;
– localización de un transmisor no autorizado;
– localización de un transmisor interferente que no puede ser identificado por otros medios;
– determinar el emplazamiento de una fuente de interferencia perjudicial para la recepción, tales como equipos eléctricos, aisladores defectuosos en una línea de alta tensión, etc.;
– identificar los transmisores, tanto conocidos como desconocidos.

El objetivo de la sección 4.7 es presentar una comparativa entre los distintos métodos utilizados para la radiogoniometría y la localización de un emisor.

4.7.2 Generalidades sobre radiogoniometría

Un radiogoniómetro es un sensor utilizado que determina la dirección de llegada o acimut (y la elevación en caso de ondas decamétricas) de una onda electromagnética (en condiciones ideales) con respecto a una dirección de referencia.

Sin entrar en detalles sobre los diferentes fenómenos que intervienen en la propagación radioeléctrica, se asume que la propagación siempre tiene lugar a lo largo del arco de círculo máximo que une la fuente de radiación al punto de recepción.

En estas circunstancias, si se dispone del equipo receptor adecuado que indique la dirección de llegada, es posible obtener una marcación de la fuente (transmisor y corriente interferente) y determinar la dirección en que se recibe dicha fuente en el lugar de recepción.

La arquitectura funcional común de todos los radiogoniómetros incluye:

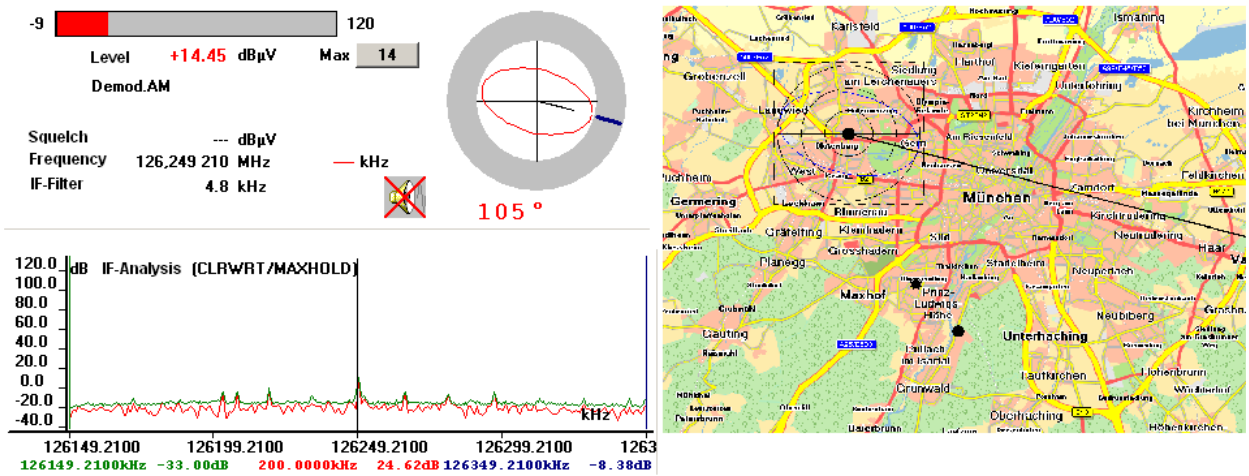
– un sistema de antenas;
– un conjunto de elementos de recepción;
– un procesador de radiogoniometría.

En la Fig. 4.7-1 se muestra un ejemplo de consola de visualización de un radiogoniómetro.

Los resultados básicos que deben reflejarse son: ángulo de llegada, nivel de la señal, calidad de la marcación y representación gráfica del espectro y mapa.

FIGURA 4.7-1

Ejemplo de consola de visualización de un radiogoniómetro



Anchura de la elipse: calidad de la marcación
Línea azul: Dirección
Línea negra: histórico de la marcación

Spectrum-4.7-01

4.7.2.1 Arquitectura básica, calidad de funcionamiento y problemas

La selección de un sistema de radiogoniometría siempre es un tema delicado pues supone llegar a un compromiso entre los comportamientos posibles ante una situación de explotación concreta. Existe un cierto número de características que debe tener un radiogoniómetro, sea cual fuere el principio de radiogoniometría adoptado. Las características operativas y de diseño del equipo (modo de visualización, concepto operativo, capacidad de control remoto, gama de temperaturas, robustez mecánica, forma, peso, consumo de potencia etc.) deben satisfacer los requisitos de la aplicación de que se trate.

Las principales características técnicas de los radiogoniómetros son:

– precisión,
– sensibilidad,
– inmunidad frente a ondas distorsionadas,
– insensibilidad a la despolarización,
– efectos de la interferencia cocanal,
– resistencia a la pérdida de sensibilidad del receptor,
– respuesta rápida.

Al realizar una comparación de los distintos métodos de radiogoniometría, como los que se indican a continuación, sólo revisten importancia las citadas características principales de los radiogoniómetros y, por consiguiente en este documento sólo se considerarán dichas características.

En el punto 3.4.6 se recogen especificaciones típicas de los radiogoniómetros.

4.7.2.1.1 Precisión

Precisión

En cuanto a la precisión especificada, hay que tener en cuenta que el error del sistema presenta dos componentes.

La primera de ellas, error de acimut, depende de la dirección de incidencia de la señal, el emplazamiento y la topografía circundante. La segunda, error de frecuencia, es un error del radiogoniómetro en función de la frecuencia seleccionada.

La precisión del radiogoniómetro puede contrastarse en un entorno real, en un emplazamiento a cielo abierto o en una plataforma de laboratorio.

Los valores de la precisión de la medida radiogoniométrica pueden diferir considerablemente en función del entorno de prueba.

La precisión del sistema puede medirse utilizando tres métodos, según se describe en el Informe UIT-R SM.2125:

– en un entorno real que represente el entorno de funcionamiento final, con diversas modulaciones y señales con un relación *S/N* mínima especificada por el fabricante del sistema;

– en un emplazamiento de prueba en zona abierta (EPZA), que normalmente se define para señales con una relación *S/N* suficiente (>20 dB) donde no haya reflexiones procedentes de obstáculos cercanos, ruido de ambiente u otras señales radioeléctricas que puedan interferir con la medición; no se incluyen los errores de radiogoniometría consecuencia del medio de propagación (por ejemplo, la ionosfera) y los efectos debidos a trayectos múltiples.

– en una plataforma la estación de radiogoniometría se conecta sin su antena a un simulador y un generador.

Calibración y corrección

Todas las técnicas de radiogoniometría deben implementarse para garantizar que se obtiene un elevado nivel de precisión en la marcación.

Pueden implementarse dos técnicas de calibración:

– Calibración de las estructuras físicas del radiogoniómetro. Debe realizarse una calibración destinada a reducir el efecto de la interferencia del mástil y/o resonancias entre antenas y/o interferencia debida al techo de los vehículos. La calibración se realiza principalmente en fábrica para los radiogoniómetros en ondas métricas/decimétricas. Ello es especialmente importante cuando la antena está fijada al techo de un vehículo. Sin embargo, las antenas de radiogoniometría montadas con precisión sobre el techo de vehículos sin resonancias por el mástil en la gama de frecuencias de la antena de radiogoniometría, y sin obstáculos en las proximidades de la antena, no precisan calibración, lo cual reduce el costo y aumenta la flexibilidad (por ejemplo, no es necesario calibrar los repuestos).

– Calibración periódica para corregir variaciones temporales y por temperatura de cada canal de recepción y parámetros de antena del radiogoniómetro. Por lo general, esta calibración se basa en la inyección de señales en fase de un oscilador local en todos los puertos de entrada del conmutador de antena para la igualación de los canales. También puede utilizarse un método de doble promediado a fin de conseguir la misma compensación de la variación sin necesidad de calibraciones periódicas.

Una vez que se ha instalado un radiogoniómetro, deben tenerse en cuenta otras consideraciones relativas a errores distintos a las tolerancias del equipo. También deben tenerse en cuenta errores debidos al emplazamiento del radiogoniómetro (trayectos múltiples, terreno, objetos cercanos, etc.), que serán distintos según el emplazamiento en particular. Los errores de marcación debidos al entorno circundante deben corregirse tras la instalación a fin de corregir ambas fuentes de error, realizando para ello medidas en emplazamientos conocidos, en varias direcciones y en la gama de frecuencias de funcionamiento. Una vez que se conocen las correcciones que deben aplicarse a las lecturas del radiogoniómetro para obtener las marcaciones verdaderas puede trazarse una curva a partir de los datos almacenados que muestre, para cada banda de frecuencias, la corrección que debe aplicarse a las lecturas del radiogoniómetro para obtener las marcaciones verdaderas.

4.7.2.1.2 Sensibilidad

La sensibilidad de un radiogoniómetro es una característica muy importante, especialmente en la comprobación técnica radioeléctrica. Si bien en el control del tráfico aéreo, por ejemplo, no existe un requisito especial relativo a la sensibilidad máxima sino más bien destinado a lograr un margen suficiente en la relación *S/N*, la comprobación técnica radioeléctrica se enfrenta a menudo con el problema de tener que evaluar señales difícilmente detectables.

Una buena sensibilidad es importante por dos razones:

– ampliar la cobertura de los radiogoniómetros en buenas condiciones de recepción, y

– lograr una fiabilidad suficiente en el radiogoniómetro en condiciones menos favorables.

Con bastante generalidad, la sensibilidad de un radiogoniómetro está estrechamente relacionada con el instante de observación (tiempo para la premediación de varios instrumentos) y normalmente se define junto con una fluctuación especificada de la marcación.

La variación de la sensibilidad es inversamente proporcional a la relación D/λ (D – diámetro de la antena del radiogoniómetro, λ – longitud de onda de la señal recibida), la relación *S/N*, el tiempo de integración disponible y la anchura de banda seleccionada.

En el Informe UIT-R SM.2125 se analiza con más detalle la sensibilidad, así como procedimientos simplificados para la medición de la sensibilidad.

4.7.2.1.3 Efecto de la propagación por trayectos múltiples y de fuentes múltiples

Propagación por trayectos múltiples

En algunas circunstancias (zonas urbanas o emplazamientos montañosos), pueden observarse efectos muy importantes debidos a la propagación (efectos de enmascaramiento y de sombra, desvanecimiento uniforme y selectivo).

Tal como se muestra en la Fig. 4.7-2, el fenómeno de trayectos múltiples se debe a la existencia de diversas señales procedentes de la misma fuente que llegan al receptor con diferentes ángulos y en momentos distintos debido a los fenómenos de reflexión o difracción a lo largo del trayecto radioeléctrico.

Los efectos de los trayectos múltiples sobre la determinación del ángulo de llegada (AOA, *angle-of-arrival*) pueden ser varios:

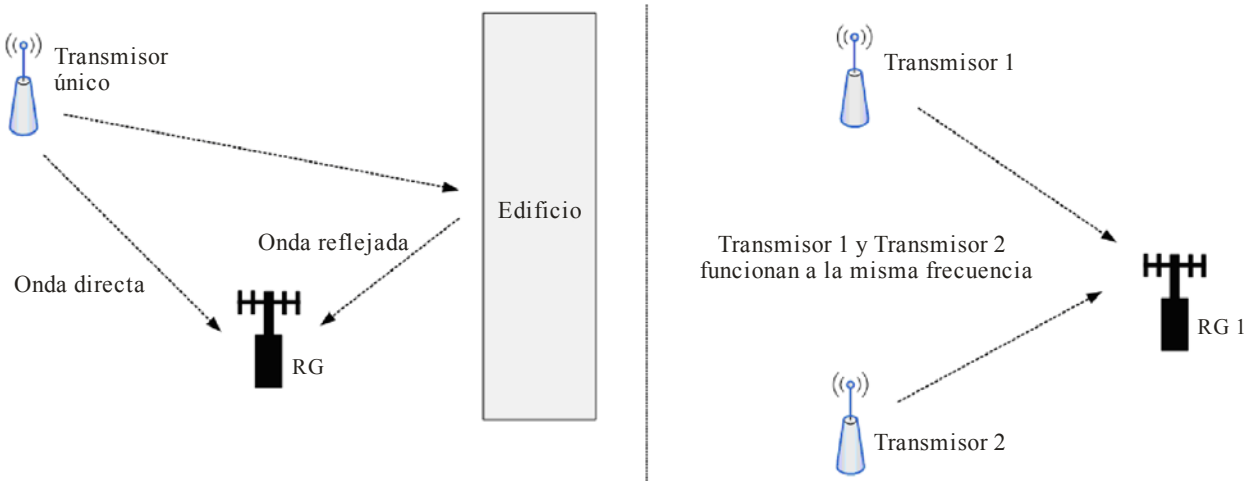
– normalmente, los trayectos múltiples de largo alcance (es decir, trayectos múltiples causados por reflexiones) sólo generan un sesgo en la determinación del AOA;

– la situación difiere significativamente cuando los puntos de reflexión se encuentran cerca del radiogoniómetro. Si un trayecto múltiple debido a la reflexión en un edificio o vehículo cercano es más intenso que el directo, el resultado de la radiogoniometría puede ser falso. Si la señal reflejada por un edificio o vehículo cercano no es tan intensa como la directa, el resultado de la radiogoniometría puede presentar un sesgo;

– en la figura de la derecha, señales de la misma frecuencia llegan al radiogoniómetro desde direcciones distintas generando también una situación de fuentes múltiples.

FIGURA 4.7-2

**Ejemplo de trayectos múltiples (imagen de la izquierda)
y de fuentes múltiples (imagen de la derecha)**



Fuentes múltiples

Cuando dos transmisores situados en emplazamientos diferentes utilizan la misma frecuencia, se produce una situación de fuentes múltiples. En dicha situación, el ángulo de llegada (AOA) y con otros métodos deben adaptarse a un entorno radioeléctrico complejo.

Pueden darse cuatro casos principales:

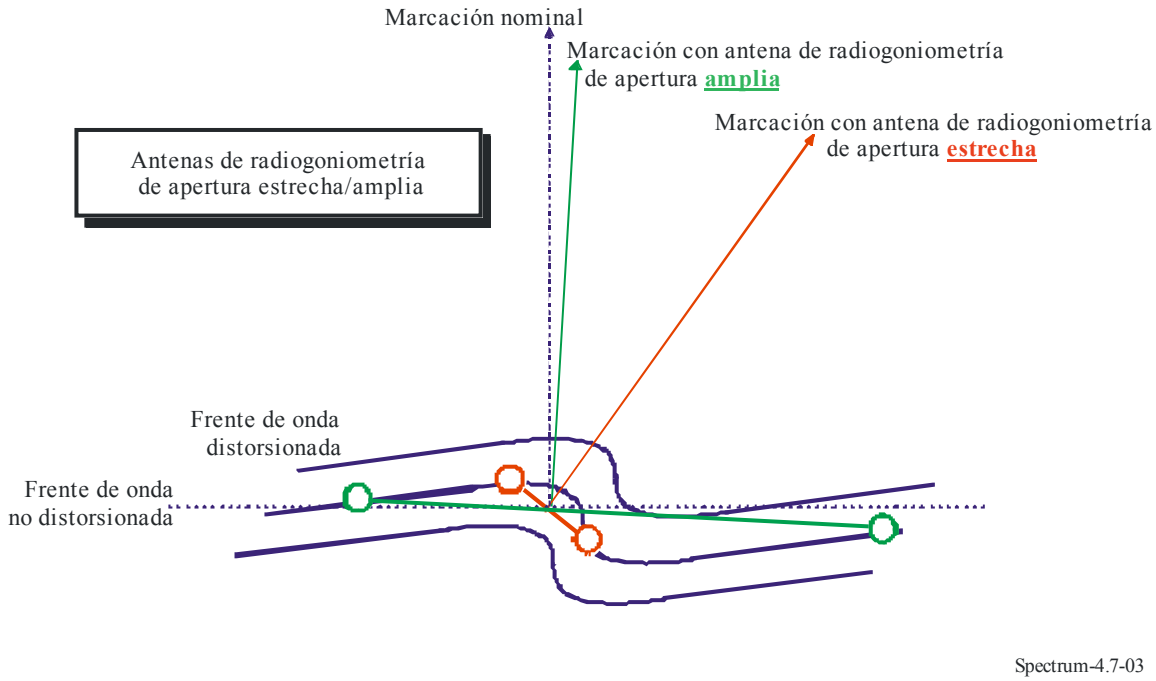
1. Interferencia interna de la red: ambas señales proceden de sendos transmisores pertenecientes a la misma red. Los métodos de reutilización de frecuencias pueden generar dicha situación de interferencia si la propagación se ve favorecida en un trayecto largo.
2. Interferencia externa: las dos señales proceden de sistemas de comunicaciones diferentes.
3. Cuando la señal de interés interfiere con una señal externa a la red.
4. Cuando se produce el funcionamiento simultáneo de transmisores analógicos y digitales durante el despliegue de una red digital.

Impactos sobre las técnicas de radiogoniometría

Con independencia de la técnica de radiogoniometría utilizada, cada radiogoniómetro obtiene la información de la dirección del campo electromagnético recibido, asumiendo, por lo general, que dicho campo es homogéneo y que la propagación no sufre perturbaciones. En ese caso ideal, que en la práctica raramente se produce, los frentes de ondas son planos y las líneas de ondas con la misma fase y amplitud son líneas paralelas rectas (véase la Fig. 4.7-3).

FIGURA 4.7-3

Antena de radiogoniometría de apertura estrecha / amplia



A lo largo de su trayecto de propagación, las ondas electromagnéticas sufren reflexiones en los obstáculos y difracciones provocadas por aristas interpuestas. También puede producirse recepción por trayectos múltiples debido a condiciones de propagación especiales, la mayoría de las veces dependientes de la frecuencia. Como resultado de ello, se producen interferencias, y el frente de onda plano original se distorsiona. De las diversas relaciones entre la amplitud, la fase, el número y el ángulo diferencial de las ondas mutuamente interferentes surgen diversos tipos de distorsiones.

Dependiendo de su diámetro D, una antena de radiogoniómetro detecta sólo una pequeña parte del frente de onda. La dirección determinada siempre es la línea perpendicular a la sección del frente de onda promediado. En un campo distorsionado cabe esperar resultados muy distintos, que dependen de la abertura de la antena del radiogoniómetro con respecto al periodo espacial del rizado isofásico en el campo distorsionado. Es pues aconsejable elegir una antena de radiogoniómetro de grandes dimensiones en comparación con la longitud de onda λ a fin de reducir al mínimo los errores provocados por las distorsiones de campo. Si la relación $D/\lambda > 1$, el radiogoniómetro se considera de abertura amplia, y si dicha relación es inferior a 0,5 se dice que las antenas del radiogoniómetro son de abertura estrecha. Con valores intermedios de la relación, los radiogoniómetros son de abertura media.

La capacidad de funcionar con una abertura amplia reviste una importancia fundamental para limitar la influencia de los obstáculos próximos a la antena del radiogoniómetro, que son la causa de los fenómenos multitrayecto más perturbadores pues pueden encontrarse en acimutes muy separados con respecto al trayecto directo y pueden tener, además, una amplitud similar.

4.7.2.1.4 Efecto de la despolarización

La despolarización consiste en un desplazamiento del plano de polarización entre la antena del radiogoniómetro y la onda incidente. La respuesta a la polarización de un radiogoniómetro depende en gran medida del sistema de antena utilizado y, en consecuencia, también del método de radiogoniometría.

En este caso, casi todos los transmisores de mochila o instalados en vehículos utilizan polarización vertical por razones prácticas y de propagación, y por ello las antenas de radiogoniometría en las bandas de ondas métricas y decimétricas normalmente están compuestas por dipolos verticales. En la medida en que la componente horizontal del campo recibido sea baja, el error inducido en el radiogoniómetro es despreciable.

La adaptación a la polarización horizontal se justifica en el caso de radiogoniometría de radiodifusión en MF, de transmisores de TV o desde un avión o un helicóptero. En este caso, o bien el radiogoniómetro funciona sobre la componente vertical de la onda transmitida o pueden utilizarse antenas radiogoniométricas adaptadas a la polarización horizontal.

4.7.2.1.5 Duración minima de la señal

En función del principio de funcionamiento del radiogoniómetro, la señal debe estar disponible durante un tiempo mínimo que permita realizar las marcaciones. Los receptores de banda ancha y estrecha permiten utilizar una señal de duración inferior a 1 ms.

Este desempeño depende básicamente de las técnicas de radiogoniometría y de las capacidades de procesamiento de señal del equipo.

4.7.2.2 Técnicas de radiogoniometría

La selección de un sistema de radiogoniometría para una aplicación concreta se realiza normalmente combinando las características de diseño de la antena, el receptor y el procesador para obtener la configuración óptima. Las técnicas de radiogoniometría tradicionalmente se han dividido en tres métodos básicos: sistemas de detección de amplitud, sistemas de detección de fase y sistemas de detección de amplitud y fase. Muchos radiogoniómetros modernos utilizan combinaciones de técnicas de detección de fase y amplitud. En este punto se comparan de forma simplificada algunas técnicas de radiogoniometría con miras a ilustrar las diferencias entre los métodos más populares. Un tratamiento completo sobre las teorías de funcionamiento de cada una de estas técnicas queda fuera del ámbito del presente manual. Pueden hallarse explicaciones técnicas más detalladas en los textos especializados en técnicas de radiogoniometría

Las siguientes son técnicas modernas de radiogoniometría:

– antena giratoria;
– Doppler/seudo-Doppler;
– Adcock/Watson-Watt;
– Interferómetro de fase;
– Interferómetro de correlación;
– Resolución avanzada.

Cada técnica se examina en términos de calidad de funcionamiento y se destacan en función de sus características exclusivas.

4.7.2.2.1 Antenas rotatorias

Una forma muy sencilla de detectar el ángulo de llegada (AOA) de una señal es utilizar una antena o un sistema de antenas rotatorias. Una antena de cuadro puede girarse manualmente para forzar un nulo en la dirección de llegada. Pueden utilizarse una antena y un receptor controlados a distancia para mostrar cuál es el nivel de entrada del receptor en función del ángulo. Puede utilizarse una antana direccional con polarización vertical u horizontal. Asimismo, para mejorar el resultado de la marcación puede utilizarse un sistema de antena compuesto por dos antenas idénticas que proporcione la suma o la diferencia de los niveles de entrada de cada una de ellas. La diferencia es mínima cuando ambas antenas apuntan en la dirección del transmisor. La señal suma tiene una sensibilidad más elevada pero una directividad mucho más baja (véase la Fig. 4.7-4).

Este método de radiogoniometría puede utilizarse para todas las transmisiones que permanezcan activas durante un tiempo superior a dos revoluciones del sistema de antenas. Este método también ha demostrado su practicidad en sistemas radioeléctricos que utilizan más de un transmisor en la misma frecuencia, como DVB-T, TETRA, GSM, etc.

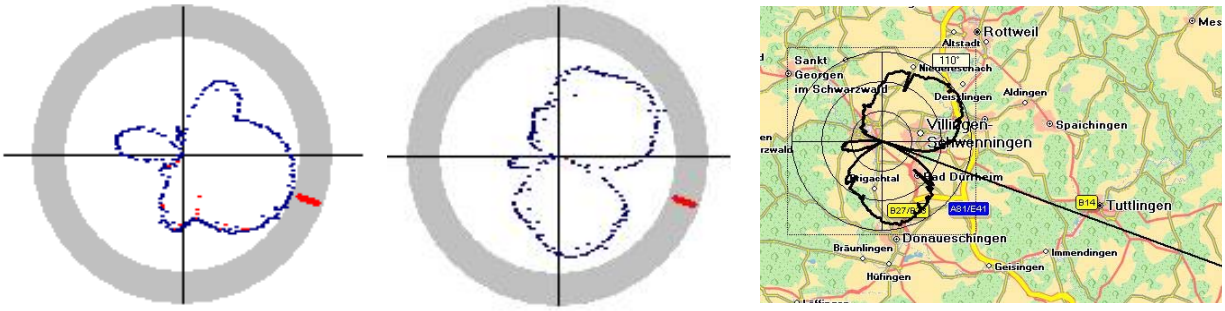
Los sistemas de antenas de rotación rápida pueden tener una velocidad de rotación de hasta 200 r.p.m. mientras que un sistema lento puede necesitar más de un minuto para una rotación completa. La polarización recibida sólo depende de cómo se realice el montaje de la antena.

Otra ventaja de este método, en comparación con otros, es que puede utilizarse con señales con polarización vertical y horizontal.

La frecuencia inferior viene determinada por las dimensiones mecánicas de la antena y generalmente no es menor de 80 MHz. La frecuencia superior está fundamentalmente limitada por la especificación del acoplador de rótula entre el mástil y la antena. Las antenas estabilizadas por rotación están disponibles para frecuencias de hasta 40 GHz.

FIGURA 4.7-4

Diagrama de antena a) Suma, b) Diferencia, c) Representación de la diferencia en un mapa



a) b) c)

Spectrum-4.7-04

CUADRO 4.7-1

Ejemplos de instalaciones

Gama de frecuencias	Polarización	Acoplamiento de antenas	Velocidad de rotación
80 – 1 000 MHz	vertical, horizontal	suma, diferencia	60 r.p.m
80 – 1 300 MHz	Vertical	suma, diferencia	1 r.p.m
500 MHz – 40 GHz	45°	suma, diferencia	≤200 r.p.m

4.7.2.2.2 Doppler y seudo-Doppler

Los sistemas Doppler y seudo-Doppler fueron desarrollados en los años 50 estudiando el desplazamiento Doppler provocado por una antena móvil sobre una señal recibida. La velocidad de rotación mecánica, según el principio Doppler directo, generalmente no es realizable en frecuencias por debajo de las de la banda de ondas decimétricas, por lo que se desarrolló un método de conmutación electrónica para simular el esquema de giro de la antena con una red de antenas fija y circular. Éste es el método denominado seudo-Doppler.

Para obtener resultados de radiogoniometría inequívocos, la separación entre elementos de antena individuales debe ser menor que la mitad de la longitud de onda de funcionamiento; en instalaciones reales se selecciona un valor de un tercio de la longitud de onda.

En comparación con los métodos de Adcock o Watson-Wat, los sistemas de radiogoniometría que utilizan tecnología seudo-Doppler tienen una buena sensibilidad e inmunidad frente a la propagación por trayectos múltiples

4.7.2.2.3 Adcock/Watson Watt

Los sistemas Adcock/Watson-Watt (WW) (véase el Cuadro 4.7-2) aprovechan las mejoras experimentadas en las antenas y en el procesamiento de señales para ofrecer una lectura casi instantánea de los resultados.

La red de antenas Adcock utilizada por estos sistemas (desarrollada en 1918) está constituida por pares de antenas de dipolo o monopolo combinados mediante un circuito híbrido de 180º para presentar el conocido diagrama de recepción "en forma de 8" típico de las antenas de cuadro.

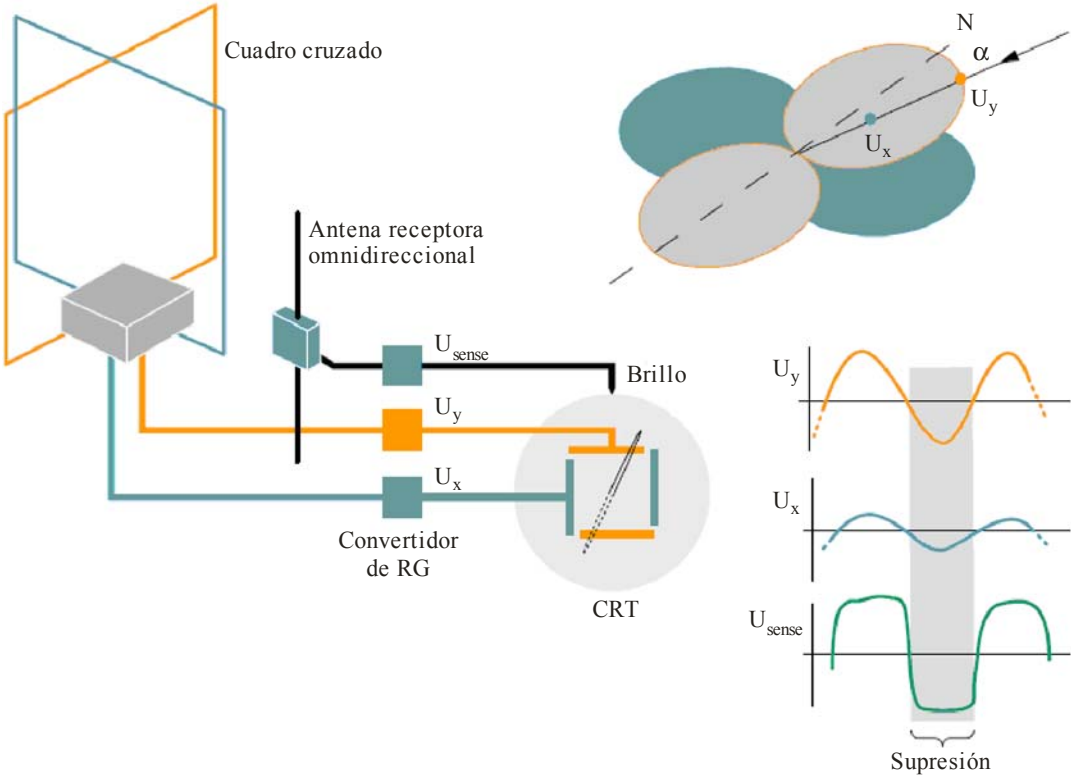
Dos pares Adcock, dispuestos ortogonalmente, presentan una respuesta a la dirección de llegada de la señal que varía con el seno de la dirección de llegada en una antena, y con el coseno de la dirección de llegada, en la segunda antena.

La técnica de radiogoniometría Watson-Watt utiliza tres receptores adaptados en fase y presenta el ángulo de llegada, expresado por las funciones seno y coseno, y un tercer canal omnidireccional para resolver el problema de la ambigüedad.

Los radiogoniómetros modernos Watson-Watt utilizan técnicas de procesado digital de la señal para calcular la marcación.

FIGURA 4.7-5

Principio del sistema de radiogoniometría Watson-Watt



CUADRO 4.7-2

Sistemas de radiogonometría Adcock/Watson-Watt

Mediciones con la red de antenas de radiogoniometría	Las mediciones de amplitud se realizan en la salida de tres antenas. Las antenas se configuran para responder con el ángulo de llegada de la señal en diagramas de seno, coseno y omnidireccionales. Se realizan mediciones de amplitud síncronas, normalmente utilizando tres canales del receptor coherente
Conversión de la medición a marcación radiogoniométrica	Marcación = arctg (senθ/cosθ); este cálculo a veces se mejora utilizando factores extraídos de una tabla de calibración. El problema de la ambigüedad se soluciona mediante el canal de sensibilidad (omnidireccional).
Precisión (sin influencia del emplazamiento)	1° a 2° r.m.s.
Sensibilidad	Media-Alta Comportamiento basado en la selección de antena
Tiempo de respuesta	1 ms, la marcación se indica sin retardo.
Inmunidad contra la despolarización	Cuando se utilizan antenas muy equilibradas los errores en la marcación son bajos para despolarizaciones <45º; no pueden utilizarse algoritmos de compensación de la despolarización.
Inmunidad contra los frentes de onda distorsionados (interferencia coherente)	Limitada, pues no es posible utilizar redes de antenas de abertura amplia.
Inmunidad contra la interferencia cocanal (interferencia no coherente)	Es posible la separación utilizando diversas técnicas analógicas de visualización en tubos de rayos catódicos. Para analizar el diagrama de interferencia debe acudirse a la interpretación que haga el operador de la imagen del tubo de rayos catódicos. El tratamiento digital de la señal no puede separar de forma algorítmica las señales cocanal coincidentes en el tiempo. Pueden emplearse técnicas de histogramas para señales no coincidentes en el tiempo.
Capacidad de onda ionosférica en las ondas decamétricas	No puede determinarse el ángulo de elevación de las señales de propagación ionosférica; se mantiene una buena sensibilidad para señales con ángulo de llegada elevado. Pueden emplearse antenas de cuadros cruzados en aplicaciones en que sea conveniente recibir las señales con ángulos de llegada extremadamente elevados.
Observaciones	Estos sistemas cuentan con más de 50 años de antigüedad y son las técnicas de radiogoniometría que han tenido más éxito; mantienen su importancia debido, en parte, al tiempo de respuesta muy breve del sistema y a su capacidad de medir la marcación de la fuente de señales transitorias (incluido el rayo, razón por la que fueron originalmente diseñados).

4.7.2.2.4 Interferómetro de fase

Los métodos del interferómetro (véase el Cuadro 4.7-3) se desarrollaron en los años 1950 y 1960 con el fin de realizar mediciones instantáneas y muy precisas de la línea de marcación. Este sistema utiliza una medición de fase diferencial entre al menos dos antenas independientes. El elemento crítico de este tipo de sistema es el detector de fase, que proporciona una estimación del retardo de fase entre las dos señales recibidas.

A partir de este retardo, puede determinarse el ángulo de llegada. Pueden utilizarse combinaciones de 3, 4, 5 o más antenas para obtener un campo de visión de 360º con este tipo de sistema sin tener que girar la antena.

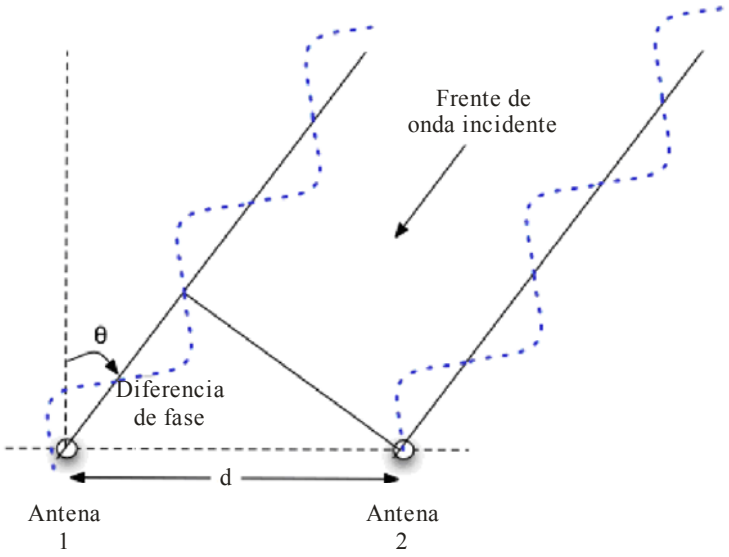
Por debajo de 30 MHz se utilizan instalaciones triangulares y para gamas de frecuencias más elevadas son preferibles las redes de antenas circulares,

Los sistemas de recepción multicanal y la conmutación de antenas se han utilizado con éxito para combinar las entradas procedentes de varias antenas.

En la Fig. 4.7-6 se muestra la diferencia de fase cuando un frente de onda incidente llega con un ángulo θ a dos antenas se paradas una distancia "d".

FIGURA 4.7-6

Interferómetro de fase: principio de la diferencia de fase



CUADRO 4.7-3

Interferómetro de fase

Mediciones con la red de antenas de radiogoniometría	Mediciones de fase diferencial entre un subconjunto de los posibles pares de antenas formadas dentro de la red. Para más información, véase § 3.4.4 – Número de receptores.
Conversión de la medición a marcación radiogoniométrica	La marcación se calcula combinando la información sobre la red de antenas con las mediciones de fase diferencial obtenidas para pares de antenas de la red. Las mediciones de fase para un par específico se utilizan para calcular el ángulo de llegada, basándose en el conocimiento de la separación entre antenas. Aprovechando el conocimiento de la geometría de la red, las mediciones procedentes de diversos pares se combinan para resolver las ambigüedades en acimut y calcular el ángulo de elevación de llegada.
Precisión (sin influencia del emplazamiento)	≤ 1° r.m.s.
Sensibilidad	Alta

Tiempo de respuesta	10 ms 1 ms* * Normalmente se utilizan con éxito sistemas que conmutan las antenas a un par de canales de medición coherentes. El tiempo de respuesta es más breve cuando se utiliza un receptor para cada antena y todas las mediciones se hacen en paralelo..
Inmunidad contra la despolarización	Es únicamente función de la linealidad de la polarización del elemento de antena, ya que no pueden emplearse algoritmos de compensación de la polarización; los errores de despolarización típicos son bajos para polarizaciones oblicuas en 60º y aumentan para inclinaciones más elevadas de la polarización.
Inmunidad contra los frentes de onda distorsionados (interferencia coherente)	Elevada cuando se utilizan redes de antena de abertura amplia .
Inmunidad contra la interferencia cocanal (interferencia no coherente)	Es posible la separación utilizando técnicas de histogramas para señales no coincidentes en el tiempo; para señales coincidentes en el tiempo únicamente puede evaluarse la señal cuyo nivel es superior en 3 a 5 dB.
Capacidad de onda ionosférica en ondas decamétricas	También puede determinarse el ángulo de elevación de las señales de propagación ionosférica; se mantiene una buena sensibilidad para señales con ángulos de llegada elevados cuando la red de antenas está constituida por antenas de cuadros cruzados.
Observaciones	Los interferómetros de fase son compatibles con las modernas técnicas de procesamiento digital de la señal; actualmente existe un cierto número de sistemas en el mercado que utilizan computadores personales para realizar el procesamiento de la radiogoniometría; dichos sistemas no están obligados a utilizar redes de antenas dispuestas circularmente.

4.7.2.2.5 Interferómetro de correlación

El interferómetro de correlación utiliza la información de fase y amplitud de la señal.

Por lo general, estos sistemas estiman la línea de marcación (LoB) de la señal mediante la correlación entre los datos de amplitud y fase recibidos con la base de datos de calibración de la red de antenas.

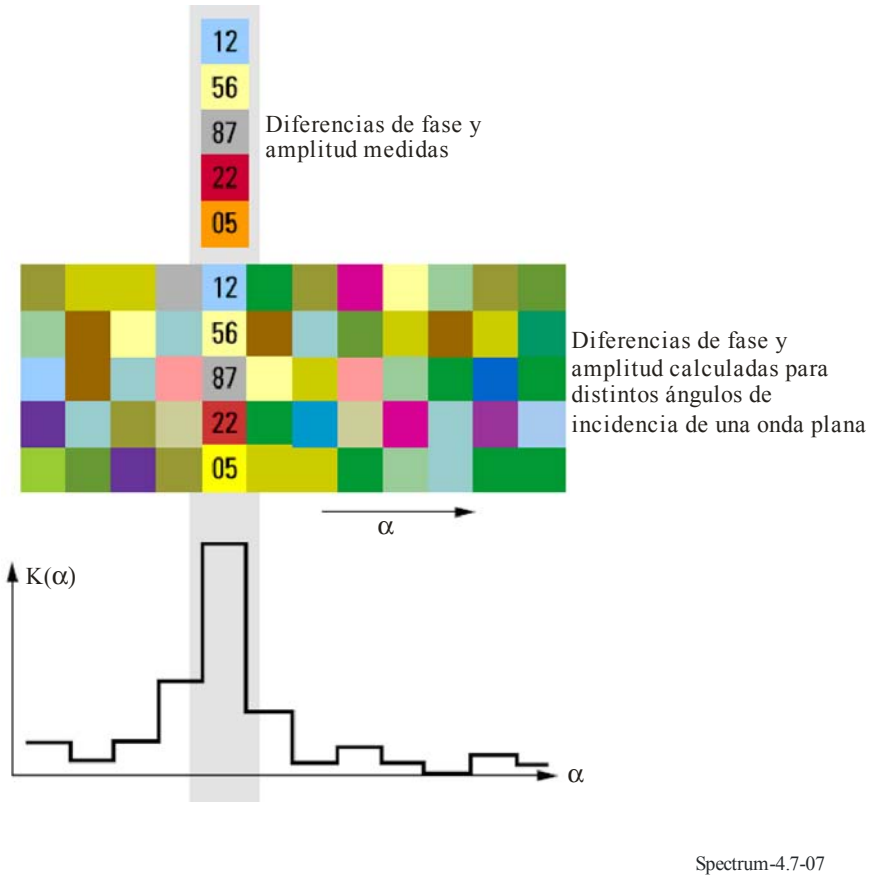
La comparación se realiza calculando el error cuadrático del coeficiente de correlación.

Si la correlación se realiza para los distintos valores de acimut del conjunto de datos de referencia, la marcación corresponde a los datos para los que el coeficiente de correlación es máximo.

Esto se muestra en la Fig. 4.7-7. Este método puede eliminar errores debidos a los instrumentos y al emplazamiento y puede adaptarse para ser utilizado con una amplia variedad de redes de antenas.

FIGURA 4.7-7

Principio del interferómetro de correlación



CUADRO 4.7-4

Interferómetro de correlación

Mediciones con la red de antenas de radiogoniometría	Para cada antena se mide la tensión de señal compleja (amplitud y fase), realizándose medidas en al menos dos antenas simultáneamente. Para más información, véase el punto 3.4.4 Número de receptores.
Conversión de la medición a marcación radiogoniométrica	El interferómetro de correlación utiliza vectores de calibración generados durante la calibración del sistema en fábrica. La marcación es el valor del acimut interpolado correspondiente al vector de calibración del acimut que mejor concuerda con el vector de medición.
Precisión (sin influencia de emplazamiento)	≤1° r.m.s.
Sensibilidad	Alta
Tiempo de respuesta	para ondas decamétricas 10 ms para ondas métricas/decimétricas 1 ms Los tiempos de procesamiento del sistema se alargarán si se emplean menos canales de receptor en paralelo que el número de elementos de antena.
Inmunidad contra la despolarización	Es función de las características de polarización de la red de antenas a menos que se utilice compensación mediante el algoritmo polarizado doble adecuado para estos sistemas de procesamiento vectorial.

Inmunidad contra los frentes de onda distorsionados (interferencia coherente)	Alta, cuando se utilizan redes de antenas de abertura amplia.
Inmunidad contra la interferencia cocanal (interferencia no coherente)	Es posible la separación utilizando técnicas de histogramas para señales no coincidentes en el tiempo; para señales coincidentes en el tiempo únicamente puede evaluarse la señal cuyo nivel es superior en 3 a 5 dB.
Capacidad de onda ionosférica en ondas decamétricas	También puede determinarse el ángulo de elevación de las señales de propagación ionosférica; se mantiene una buena sensibilidad para señales con ángulos de llegada elevados cuando la red de antenas está constituida por antenas de cuadros cruzados.
Observaciones	Estas técnicas de radiogoniometría son compatibles con la nueva generación de métodos de procesamiento digital de la señal; los coprocesadores de la nueva generación de computadores personales cuentan con suficiente potencia de procesamiento para efectuar rápidamente estos cálculos.

4.7.2.2.6 Técnicas de resolución avanzadas

Las técnicas de resolución avanzadas a menudo se denominan de superresolución o de alta resolución. Estas técnicas se utilizan para discriminar entre señales (ya sean trayectos múltiples o fuentes múltiples) transmitidas a la misma frecuencia.

En este apartado se analizan dos técnicas:

– conformación de haces y filtro espacial adaptado (por ejemplo, el algoritmo CAPON)**:** una red de antenas orientables sondea mediante haces todas las direcciones y el algoritmo busca crestas en la potencia de entrada. El cálculo de la conformación de haces y del filtro espacial adaptado se realiza mediante una fórmula del vector de direccionamiento, al tiempo que se intenta minimizar la potencia del ruido y de las señales interferentes;

– técnicas de subespacio (por ejemplo, el algoritmo MUSIC, *Multiple Signal Classification*): se basan en la compensación del ruido, de las señales interferentes y de los trayectos múltiples. El cálculo del algoritmo de las técnicas de subespacio se basa en el análisis de un componente principal (valor propio o eigenvalor) de las muestras de datos de todos los sensores. Los ángulos de las ondas incidentes se calculan modificando el vector de orientación y buscando ángulos para los que el vector de orientación es ortogonal a los vectores propios correspondientes a los valores propios del ruido.

CUADRO 4.7-5

Resolución avanzada

Mediciones con la red de antenas de radiogoniometría	Para cada antena se mide la tensión de señal compleja (amplitud y fase), con medidas simultáneas en al menos dos antenas. Normalmente se requiere un mínimo de dos canales receptores coherentes. En la técnica de subespacio, se utilizan parejas de valores de tensión para todos los emparejamientos posibles de antenas de la red de antenas a fin de generar lo que matemáticamente se conoce como "matriz de covarianza" de las mediciones. La matriz se evalúa para determinar el contenido cocanal en la señal recibida.
Conversión de la medición a marcación radiogoniométrica	Se calculan múltiples marcaciones utilizando valores de acimut interpolados. Una vez fijada la red de antenas, cada uno de dichos valores corresponde a una firma espacial calibrada. La firma espacial calibrada que mejor se adapte a las firmas de las fuentes proporciona la estimación de los acimutes de las fuentes.
Precisión (sin influencia de emplazamiento)	≤ 1° r.m.s.

Sensibilidad	Alta La sensibilidad depende del método seleccionado. La utilización de la técnica de subespacio ofrece mejores prestaciones para señales con baja relación señal a ruido en comparación con la técnica de conformación del haz.
Tiempo de respuesta	para ondas decamétricas 100 ms para ondas métricas/decimétricas 10 ms Los tiempos de procesamiento del sistema se alargan si se utiliza un número de canales receptores en paralelo inferior al número de elementos de antena. La señal debe ser estable durante todo el periodo de medición, lo cual es difícil con menos receptores que elementos de antena, particularmente en ondas decamétricas.
Inmunidad contra la despolarización	Es función de las características de polarización de la red de antenas a menos que se utilice compensación mediante el algoritmo polarizado doble adecuado para estos sistemas de procesamiento vectorial.
Inmunidad contra los frentes de onda distorsionados (interferencia coherente)	Las técnicas de conformación de haz pueden separar múltiples señales interferentes no correladas pero no señales interferentes coherentes. Las técnicas de subespacio pueden separar múltiples señales interferentes no correladas y, parcialmente, señales interferentes coherentes. Ambas técnicas tienen prestaciones mejoradas cuando se utilizan redes de antena de apertura amplia.
Inmunidad contra la interferencia no coherente	Ambas técnicas pueden separar señales interferentes no coherentes.
Capacidad de onda ionosférica en ondas decamétricas	También puede determinarse el ángulo de elevación de las señales de propagación ionosférica; se mantiene una buena sensibilidad para señales con ángulos de llegada elevados cuando la red de antenas está constituida por antenas de cuadros cruzados.
Observaciones	Estas técnicas de radiogoniometría son compatibles con la nueva generación de métodos de procesamiento digital; los coprocesadores de la nueva generación de computadores personales cuentan con suficiente potencia de procesamiento para efectuar rápidamente estos cálculos (aunque probablemente no en tiempo real); en estos sistemas no se exige la instalación de redes de antenas dispuestas de forma circular.

4.7.2.2.7 Comparación de técnicas de determinación del ángulo de llegada (AOA)

En este apartado se comparan distintos métodos y se identifica el más efectivo en situaciones de trayectos múltiples y de fuentes múltiples.

En el Cuadro 4.7-6 se comparan los principales algoritmos de estimación del AOA. En el mismo se resumen las principales prestaciones y uso de dichos métodos.

CUADRO 4.7-6

Resumen de la comparación de técnicas de radiogoniometría

Precisión /ángulo de separación	Sensibilidad	Inmunidad a los trayectos múltiples	Tiempo de respuesta	Observaciones
Antena rotatoria				
De 2° a 5° r.m.s. Dependiendo del sistema de antena utilizado	Alta	Buena	Dependiendo de la velocidad de rotación, hasta 1 min	Implementación sencilla Método en tiempo real Buena separación de señales de varias fuentes
Métodos Adcock/WW				
De 1° a 2° r.m.s. Sin ángulo de separación	De media a alta	Limitada	1 ms	Implementación sencilla Método en tiempo real Método en funcionamiento y ampliamente implementado
Interferómetro de fase				
Normalmente una precisión de 1° r.m.s. para una única fuente La separación angular puede ser buena si la resolución en tiempo y frecuencia es elevada.	Alta	De media a buena para una única fuente, en función de la apertura de la antena.	10 ms 1 ms (Nota 1)	Implementación sencilla Método en tiempo real Método en funcionamiento y ampliamente implementado
Interferómetro de correlación				
Normalmente una precisión de 1° r.m.s. para una única fuente La separación angular puede ser buena si la resolución en tiempo y frecuencia es elevada.	Alta	De media a buena para una única fuente, en función de la apertura de la antena.	Ondas decamétricas: 10 ms Ondas métricas y decimétricas: 1 ms Depende del número de elementos de antena y de receptores así como de la velocidad de proceso.	Implementación moderadamente compleja Método en funcionamiento y ampliamente implementado.

CUADRO 4.7-6 (*FIN*)

Precisión /ángulo de separación	Sensibilidad	Inmunidad a los trayectos múltiples	Tiempo de respuesta	Observaciones
Filtro espacial adaptado – (CAPON)				
Buena para fuentes no correladas. Normalmente, la precisión alcanza 2° Normalmente procesa de 2 a 3 fuentes no correladas separadas angularmente	Alta	Procesa parcialmente entornos radioeléctricos coherentes. Robusta frente a múltiples fuentes no correladas. No puede procesar señales de trayectos múltiples correladas.	Ondas decamétricas: 100 ms Ondas métricas y decimétricas: 10 ms Depende del número de elementos de antena y de receptores así como de la velocidad de proceso	Implementación moderadamente compleja si el análisis se realiza fuera de línea Implementación compleja que requiere más recursos de cálculo en tiempo real. Requiere un tiempo de integración prolongado para conseguir resultados y que durante dicho tiempo el entorno de la señal sea relativamente estable.
Método del subespacio (MUSIC)				
Prestaciones de alta precisión < 1° Procesa normalmente de 2 a 3 fuentes parcialmente coherentes. Solamente está limitado por errores de calibración y el tiempo de integración	Alta	Procesa normalmente de 2 a 3 fuentes parcialmente coherentes Robusta frente a múltiples fuentes parcialmente coherentes o a trayectos múltiples y al ruido (procesa eficientemente relaciones S/*N* <0) No puede procesar señales de trayectos múltiples correladas.	Ondas decamétricas: 100 ms Ondas métricas y decimétricas: 10 ms	Implementación moderadamente compleja si el análisis se realiza fuera de línea Implementación compleja que requiere más recursos de cálculo en tiempo real. Funciona en entornos radioeléctricos adversos (zonas urbanas, montañosas). Requiere un tiempo de integración prolongado para conseguir resultados y que durante dicho tiempo el entorno de la señal sea relativamente estable.

NOTA 1 – Los sistemas funcionan por lo general de forma satisfactoria cuando las antenas se conmutan sobre una pareja de canales de medición coherentes. El tiempo de respuesta es más breve si se utiliza un receptor para cada antena y todas las mediciones se hacen en paralelo.

4.7.2.2.8 Técnicas combinadas de radiogoniometría

Los métodos y técnicas de radiogoniometría de filtro espacial adaptado y de subespacio pueden ser de utilidad en entornos radioeléctricos difíciles. Es recomendable disponer de una implementación en tiempo real de estos métodos de radiogoniometría, pero ello puede acarrear la necesidad de sistemas complejos, que incluyan un sistema de N canales con un canal receptor, de procesado y de registro para cada elemento de antena.

Para solventar este asunto y gestionar por lotes (de algunas decenas de segundos) entornos radioeléctricos más complejos, puede asociarse un equipo multicanal con tratamiento en tiempo real basado en un algoritmo sencillo a un sistema de registro digital multicanal

Ello permite que el sistema se adapte al entorno mediante la aplicación de diversos métodos de determinación del ángulo de llegada (AOA) de complejidad creciente:

1. Un interferómetro de correlación o una correlación vectorial permite una exploración rápida y en tiempo real del entorno radioeléctrico para establecer en primera instancia el emplazamiento de los emisores o fuentes dominantes, así como una indicación preliminar de la presencia de fuentes de interferencia.
2. Un método de resolución avanzado ofrecerá un nivel suficiente de discriminación/localización para entornos de complejidad media y/o con necesidad de una precisión limitada.

En entornos de señal complejos, también pueden aplicarse otras técnicas que utilicen el análisis de la FFT.

4.7.2.3 Influencia del entorno

4.7.2.3.1 Precisión de marcaciones de radiogoniometría por debajo de 30 MHz

La Recomendación UIT-R SM.854 clasifica las marcaciones en cuatro clases en función de la precisión y otras características observadas.

Clase A: probabilidad menor del 5% de que el error supere 2 grados.

Clase B: probabilidad menor del 5% de que el error supere 5 grados.

Clase C: probabilidad menor del 5% de que el error supere 10 grados.

Clase D: marcación con un error superior al de la clase C.

La Recomendación UIT-R SM.854 también recomienda que las administraciones presenten datos estadísticos para soportar valores numéricos medios asignados a las características observadas, tales como la desviación típica, el número de muestras, el error real y el procesamiento estadístico de la muestra.

4.7.2.3.1.1 Errores causados por la ionosfera

Los radiogoniómetros que funcionan por debajo de 30 MHz son sensibles a errores inducidos por reflexiones de las transmisiones en la ionosfera. Existen sistemas especializados para funcionar en estas condiciones, en caso de ser necesario. Estos sistemas normalmente se utilizan para la localización de señales de largo alcance, más allá del horizonte. No todas las estaciones de un sistema de comprobación técnica del espectro requieren esta capacidad.

La ionosfera es un medio no homogéneo sujeto a cambios continuos.

En la práctica, la propagación entre transmisor y receptor puede involucrar distintos modos, incluyendo una onda de superficie y una o varias reflexiones en las capas E y F.

El campo electromagnético interceptado por la red de antenas del radiogoniómetro puede estar considerablemente distorsionado debido a interferencia por trayectos múltiples, que causa dispersión y errores en las marcaciones medidas. Ello puede reducirse mediante diversidad de polarización y algoritmos adecuados.

La recepción de las transmisiones con *una o varias* reflexiones en la ionosfera tiene varias consecuencias:

– estratificación horizontal;
– densidad iónica;
– estructura (consta de ondulaciones de diversos tamaños, de hasta 2 km de profundidad y varios cientos de kilómetros de longitud);
– estructura fina (que produce efectos de dispersión cuando se producen reflexiones);
– despolarización (señales con polarización opuestas (circular o elíptica), como consecuencia de la reflexión).

En caso de una única reflexión, una variación relativamente lenta de la marcación se superpondrá a la fluctuación rápida causada por la dispersión debida a la "estructura fina" de la ionosfera. La precisión de la marcación también depende del ángulo de inclinación con la superficie reflectante. Por este motivo, los

errores en las marcaciones aumentan con la altura y el número de reflexiones así como con la disminución de la distancia al trasmisor.

En caso de varias reflexiones, las observaciones se hacen difíciles debido a que se produce dispersión en uno o más puntos de la superficie en que se refleja la onda. A causa de la dispersión debida a la estructura fina de la ionosfera, el ángulo de recepción de la onda no es constante sino que se encuentra contenido en un cono cuyo vértice coincide con el centro de la red de antenas.

La dispersión que tiene lugar en el punto de reflexión de la superficie aumenta el ángulo de abertura de este cono y, en consecuencia, aumenta también la amplitud de las fluctuaciones rápidas de la marcación.

4.7.2.3.1.2 Errores debidos al emplazamiento

El punto 2.6.1.3 incluye información sobre la elección del emplazamiento de una estación radiogoniométrica.

La elección debe hacerse con el mayor cuidado posible para reducir al mínimo los errores debidos a las deformaciones del frente de onda motivadas por cambios bruscos de la conductividad del suelo o por radiaciones secundarias debidas a obstáculos.

Como los emplazamientos reales no son ideales, la naturaleza del emplazamiento y las características del terreno circundante producirán errores cuya magnitud variará con la dirección y la frecuencia.

Estos errores pueden corregirse calibrando el radiogoniómetro instalado utilizando varios transmisores de referencia en direcciones conocidas y distintas frecuencias (véase § 4.7.2.1.1, Precisión).

4.7.2.3.2 Precisión de marcaciones de radiogoniometría por encima de 30 MHz

La Recomendación UIT-R SM.854 clasifica las marcaciones en cuatro clases en función de la precisión y otras características observadas. Nótese que los valores para las distintas clases difieren de los correspondientes a frecuencias por debajo de 30 MHz.

Clase A: probabilidad menor del 5% de que el error supere 1 grado.

Clase B: probabilidad menor del 5% de que el error supere 2 grados.

Clase C: probabilidad menor del 5% de que el error supere 5 grados.

Clase D: marcación con un error superior al de la clase C.

Los valores de las marcaciones obtenidas con un radiogoniómetro que funcione por encima de 30 MHz contendrán errores debidos:

– al equipo (o a la técnica utilizada por el equipo);
– a la ubicación del radiogoniómetro;
– a la propagación.

Los errores debidos al equipo son consecuencia de su diseño y fabricación.

Los errores debidos a la ubicación tienen su origen en las irregularidades de la configuración o de la constitución del terreno próximo al radiogoniómetro. El valor de esos errores varía con la dirección y la frecuencia. En consecuencia, pueden considerarse errores variables.

Los errores del tercer tipo son consecuencia de irregularidades en la propagación. Estas irregularidades pueden dar lugar a desviaciones laterales de la dirección de propagación con relación a la dirección del arco de círculo máximo entre el transmisor y el radiogoniómetro. Además, las irregularidades en la propagación dan lugar a errores debidos a la polarización.

4.7.2.4 Red de control a distancia de estaciones de radiogoniometría

Una red de radiogoniómetros controlados a distancia puede ofrecer ventajas de economía de explotación y de flexibilidad de uso. En la sección 2.5 y en el punto 3.6.3 se analiza el control a distancia mediante sistemas informáticos.

4.7.3 Localización

En muchos casos, la línea de marcación no es suficiente para la identificación, siendo necesario determinar la posición exacta del transmisor. Para identificar el emplazamiento, se utilizan principalmente cuatro métodos:

1. el método clásico: que combina el resultado de dos o más mediciones radiogoniométricas que establecen el ángulo de llegada (AOA) a fin de realizar varias angulaciones (manualmente o por computador);
2. el método de medición de la diferencia del tiempo de llegada (TDOA, *time difference of arrival*);
3. el método de radiorrecalada o autónomo, mediante un radiogoniómetro móvil;
4. el método de localización mediante una sola estación (SSL, *single station location*) en la gama de frecuencias decamétricas en base a la propagación ionosférica: es posible determinar la posición de un transmisor con una única estación de radiogoniometría que ofrezca junto al acimut del AOA, información de la elevación del mismo.

En los puntos siguientes se exponen detalladamente cada uno de dichos métodos.

4.7.3.1 Métodos de localización basados en la triangulación y multi-angulación

A continuación se describe el método de triangulación, que es un caso particular de la multi-angulación.

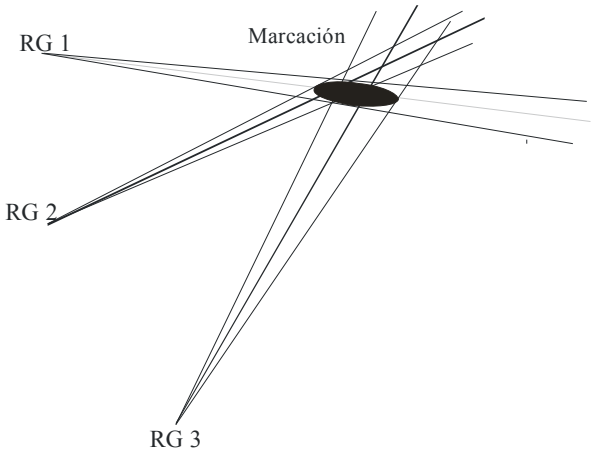
4.7.3.1.1 Consideraciones generales

El método de triangulación requiere un mínimo de dos, aunque preferiblemente tres, mediciones de líneas de marcación (LoB). La intersección de las LoB determina la posición del emisor. Debido a errores de medición de los radiogoniómetros, el resultado es una elipse que representa el área donde puede encontrarse el transmisor. Véase la Fig. 4-7.8.

Cuanto mejor sea la precisión del radiogoniómetro y más ortogonales sean las marcaciones, menor será el área de incertidumbre.

FIGURA 4.7-8

Localización mediante el método de triangulación



Spectrum-4.7-08

El cálculo de la posición depende directamente de la calidad de las marcaciones ofrecidas por las diversas estaciones de radiogoniometría. Para lograr una calidad suficiente, las marcaciones deben analizarse en cada uno de los pasos del proceso de determinación de la posición, es decir, en las estaciones de comprobación técnica y de radiogoniometría y en la estación de localización, desde donde se ha calculado la localización (fija).

En las estaciones de comprobación técnica y radiogoniometría el análisis consiste fundamentalmente en:

– verificar la correspondencia entre una señal escuchada localmente y una señal de interés para la estación de comprobación técnica;
– clasificar las marcaciones en caso de presencia de más de una señal de la misma frecuencia (interferencia);
– eliminar marcaciones aberrantes;
– calcular el valor medio de las marcaciones;
– calcular la varianza de las marcaciones.

En la estación de localización, el análisis de las marcaciones consiste fundamentalmente en:

– determinar las marcaciones que van a utilizarse para calcular la posición;
– calcular el emplazamiento del punto de transmisión probable;
– calcular la elipse de incertidumbre.

En los sistemas manuales de determinación de la posición, la calidad de las marcaciones depende en gran medida de la habilidad del operador para realizar dicho análisis. En sistemas de localización automática el análisis se lleva a cabo mediante el procesamiento de la información (programas de computador).

4.7.3.1.2 Características de la localización en función de la gama de frecuencias

Por debajo de 30 MHz

Por debajo de 30 MHz, además de la propagación por onda de superficie, las ondas también pueden propagarse mediante reflexiones sencillas o múltiples y por conductos formados en la ionosfera.

La señal recibida por un radiogoniómetro es una señal compuesta originada por los múltiples trayectos que la onda puede seguir entre el transmisor fuente y el radiogoniómetro. Esta circunstancia viene reforzada por el hecho de que, en ondas decamétricas, los radiogoniómetros a menudo se encuentran a gran distancia de la zona de interés. En consecuencia, las mediciones de radiogoniometría frecuentemente se realizan con una baja relación señal/ruido y, por consiguiente, son relativamente inestables.

Existen otras circunstancias en la gama de frecuencias por debajo de 30 MHz que dificultan el cálculo de la posición, a saber:

– congestión del espectro (frecuentes interferencias);
– zonas geográficas y periodos sin visibilidad en algunas gamas de frecuencias.

Una marcación elemental no es suficiente para determinar adecuadamente la posición. Si se desea tomar una buena marcación en ondas decamétricas, es necesario realizar varias marcaciones elementales para obtener una marcación media significativa.

No obstante, debe recordarse que los trayectos complejos seguidos por las ondas a través de la ionosfera tal vez no correspondan a los círculos máximos en la superficie de la Tierra, lo que introduce un sesgo en la medida del acimut y, por tanto, en el cálculo de la posición.

Por encima de 30 MHz

En las bandas de ondas métricas y decimétricas la propagación se realiza fundamentalmente con visibilidad directa (o por difracción o dispersión) y, en consecuencia, los radiogoniómetros deben instalarse en las proximidades de la zona objeto de la comprobación técnica, en general, zonas urbanas. Aunque la relación señal /ruido puede ser pobre, la señal suele recibirse en una dirección constante y estable. Tales condiciones permiten tomar marcaciones fiables de una forma relativamente rápida y sencilla.

Sin embargo, las mediciones pueden dificultarse debido a la presencia de interferencia y a causa de las reflexiones sufridas por las ondas. Ello sucede especialmente en zonas urbanas y cuando las mediciones se realizan desde estaciones de radiogoniometría móviles.

Generalmente, pueden realizarse mediciones sencillas de 10 ms o menos, pero es conveniente integrar los resultados a lo largo de un periodo de tiempo adecuado, coherente con la duración de la señal y las

condiciones de recepción. Esto es especialmente importante cuando se utilizan estaciones de radiogoniometría móviles.

Sólo deben tomare marcaciones fiables que minimicen el efecto de las reflexiones cuando la unidad de radiogoniometría se encuentre en movimiento, salvo que esté situada en un lugar despejado de cualquier obstrucción.

Los modernos radiogoniómetros, además de las marcaciones convencionales, pueden llevar a cabo un cierto número de mediciones técnicas tales como la frecuencia central, velocidad de modulación y anchura de banda.

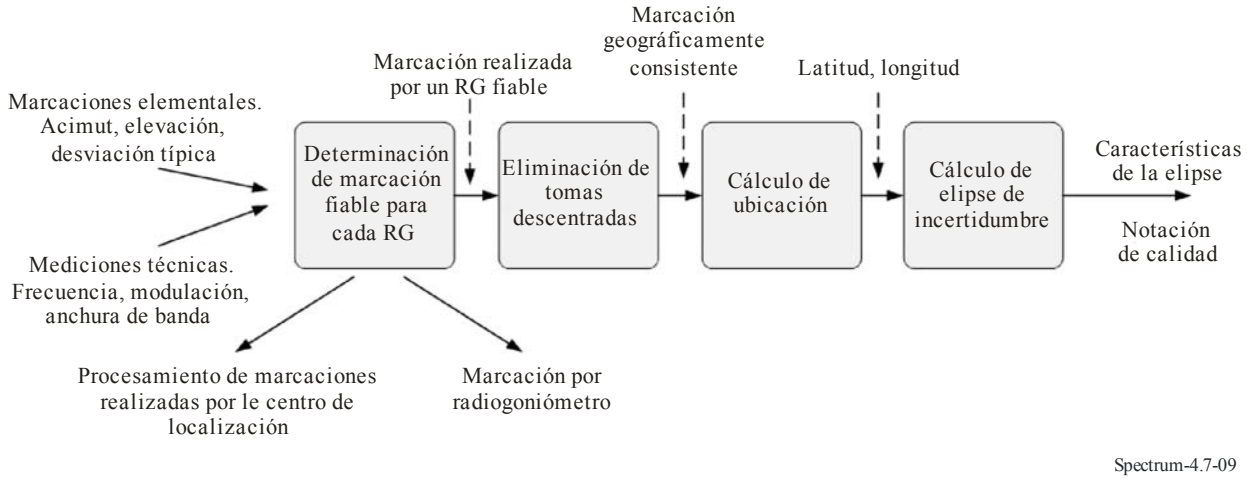
Cuando dichas mediciones se realizan en condiciones favorables (buena relación señal/ruido), ofrecen fiabilidad y permiten una reducción eficaz de los datos de marcación.

4.7.3.1.3 Pasos para el cálculo de la localización

En la Fig. 4.7-9 se representa el cálculo para determinar la posición.

FIGURA 4.7-9

Esquema del cálculo de la posición



El programa de cálculo "TRIANGULACIÓN", que generalmente sigue la realización de dichos pasos está disponible en la UIT.

Determinación de marcaciones fiables

La clasificación de las marcaciones radiogoniométricas elementales puede realizarse en las estaciones de radiogoniometría o en el centro de localización. La elección entre estas dos posibilidades está directamente relacionada con las capacidades de los enlaces utilizados entre las estaciones de comprobación técnica/ radiogoniometría y el centro de localización para el encaminamiento de los controles remotos.

a) Enlaces rápidos

Si los enlaces transmiten a velocidades tales que los intercambios entre las estaciones de comprobación técnica y de radiogoniometría son rápidos (por ejemplo, una red de área local amplia, WAN, de alta velocidad), puede ser interesante encaminar al centro de localización las marcaciones de cada estación en tiempo real. A continuación, se analiza la marcación de una estación con respecto a las marcaciones obtenidas por la otra estación en el mismo instante. El rechazo de una marcación dudosa se realiza no sólo por comparación con las marcaciones obtenidas por el mismo radiogoniómetro, sino también con respecto a las marcaciones obtenidas de forma síncrona por las otras estaciones. Al final del estado de alerta, el centro de localización recibe de cada radiogoniómetro cierto número de marcaciones elementales, Dichas marcaciones se procesan estadísticamente (gráfico de barras, conexión simple, etc.) para determinar la

marcación o marcaciones características de cada radiogoniómetro, así como las desviaciones típicas correspondientes.

La ventaja de un sistema de este tipo es que aplica un procesamiento sencillo en los radiogoniómetros. Esta clase de funcionamiento permite la visualización en tiempo real del comportamiento de los radiogoniómetros. En el centro de localización pueden seleccionarse manualmente las líneas de marcación medidas para la transmisión analizada.

b) Enlaces lentos

Si la velocidad de los enlaces es tal que los intercambios entre el centro de localización y las estaciones de radiogoniometría son de larga duración, es decir, que el tiempo de comunicación es superior al tiempo de medición, el proceso de realizar marcaciones fiables debe realizarse en la estación de radiogoniometría. Se consiguen resultados fiables promediando las marcaciones elementales relativas a la señal de interés para el centro de localización. Por consiguiente, el radiogoniómetro debe poseer las características necesarias para clasificar las marcaciones elementales. Esta clasificación puede realizarse atendiendo a varios elementos de información:

– separación en acimut;
– coherencia de la frecuencia central medida;
– coherencia del ángulo de elevación entre las diversas marcaciones;
– probabilidad del ángulo de elevación con respecto a las características de propagación;
– parámetros de análisis técnico que permitan identificar la señal deseada.

La ventaja de este tipo de sistema es que posibilita la utilización de enlaces de baja velocidad (por ejemplo, enlaces telefónicos convencionales). Por otro lado, estos sistemas requieren radiogoniómetros capaces de analizar sus propias marcaciones y separar los datos en caso de recibir múltiples transmisiones. Este tipo de sistema es muy adecuado para la localización en la gama de ondas métricas y decimétricas, en la cual las marcaciones de radiogoniometría son relativamente estables en el tiempo.

Eliminación de marcaciones no convergentes

Esta etapa se realiza manualmente en algunos sistemas de localización. Se propone aquí (véase la Fig. 4.7-10) un método automático que permite determinar geométricamente las marcaciones no convergentes.

El método consiste en examinar para cada caso el número de tomas coherentes con dicho caso. En cada toma se determina la zona cubierta por el propio error angular de cada una de las tomas.

Cuando las zonas se superponen parcialmente, se dice que las tomas pueden asociarse. Por consiguiente, para cada toma se examinan las diversas asociaciones posibles y se retiene la asociación que incluye el mayor número de tomas. Si ese número ha sido alcanzado por varias asociaciones, se retiene la asociación obtenida con las mejores marcaciones y el mejor ángulo de abertura con respecto al objetivo. Las tomas que no forman parte de la mejor asociación se considera que están descentradas y no se tienen en cuenta los cálculos de determinación de la posición.

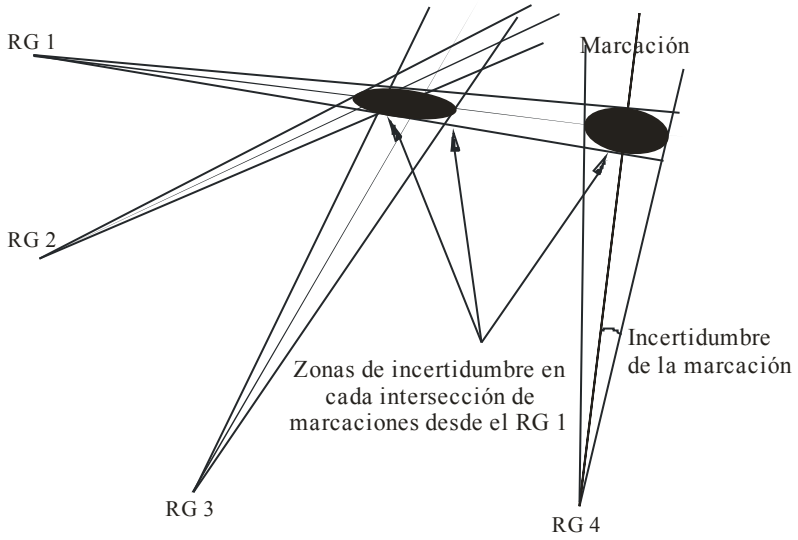
Este método presenta la ventaja de estar basado en los errores angulares, siendo por tanto válido para corto y largo alcance.

Evaluación del punto de localización

En esta etapa se proporciona un cierto número de marcaciones coherentes entre sí, pero que no todas se cruzan en el mismo punto geográfico. La finalidad de la etapa es determinar la posición óptima del punto de localización.

FIGURA 4.7-10

Validación / eliminación de marcaciones no relacionadas para la fuente analizada
(RG 1, RG 2, RG 3 pueden asociarse, RG 4 no puede asociarse)



Spectrum-4.7-10

El punto óptimo se calcula aplicando el método del error cuadrático mínimo. A tal efecto, se busca el punto en el que se reducen al mínimo las variaciones angulares que hay que aplicar a cada marcación para dirigirla hacia ese mismo punto.

Si P es un punto cualquiera y d_1, d_2, d_3, … son las variaciones angulares que hay que aplicar a cada marcación para que pase por P, y ν_1, ν_2, ν_3, … son las varianzas de las diversas marcaciones.

Se define S_p por:

$$S_p = (d_1^2 / v_1) + (d_2^2 / v_2) + (d_3^2 / v_3) + ... \qquad (4.7\text{-}1)$$

El punto óptimo es el que minimiza la cantidad S_p.

Para resolver este problema existen varios métodos:

– triangulaciones;

– método de grandes círculos, triángulos esféricos (largas distancias).

En [Stansfield, 1947] y [Barfield, 1947] pueden encontrarse enfoques adicionales.

La ejecución por computador de estos métodos no plantea ningún problema, pero debe recordarse que todos los métodos calculan una mera estimación, y que no existe ninguna fórmula matemática de la que se obtenga la posición exacta.

La estimación visual del punto óptimo es un ejercicio difícil, incluso con varias marcaciones. Cuando se utilizan dos radiogoniómetros, la intersección de dos marcaciones es un punto, pero debido a los errores no puede asegurarse que dicho punto sea el punto donde se localiza el transmisor. Si se utilizan tres radiogoniómetros, se obtiene un triángulo pero, debido a los errores de cada marcación, no puede asegurarse que el transmisor esté situado dentro del triángulo.

Cálculo de la elipse de incertidumbre

La elipse de incertidumbre es la superficie centrada alrededor del punto óptimo.

El cálculo de la elipse de incertidumbre se basa en los trabajos de [Stansfield, 1947]. Este cálculo se realiza a partir de las desviaciones típicas de las diversas marcaciones. Para que esta desviación típica sea apreciable,

el sistema debe contar con un número de marcaciones elementales suficiente para poder calcular un valor de la desviación típica significativo.

Los radiogoniómetros actuales tienden a proporcionar una notación de la calidad, indicando las condiciones en las cuales se llevó a cabo la marcación de radiogoniometría, en vez de dar la desviación típica real. En tal contexto, el cálculo de la elipse de incertidumbre será solamente aproximativo. La tendencia de los sistemas de localización es establecer una notación de calidad para cada localización.

La notación de calidad asociada a una localización representa:

– El acuerdo mutuo de los radiogoniómetros en designar un mismo punto.

– La persistencia de los radiogoniómetros en designar siempre el mismo punto.

El acuerdo es sólido si son varios los radiogoniómetros que designan el mismo punto.

La persistencia es fuerte cuando una variación en las marcaciones de un radiogoniómetro ejerce poca influencia en el punto óptimo calculado a partir de todas las marcaciones (inercia).

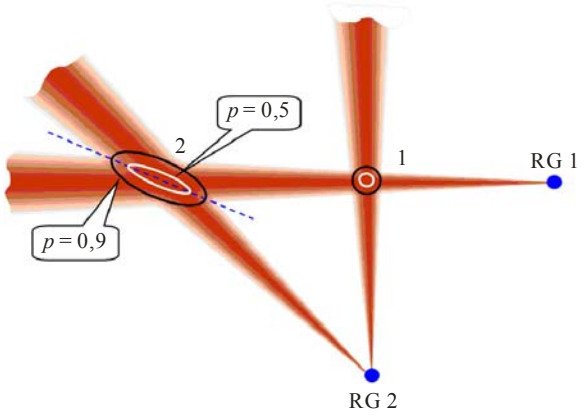
4.7.3.1.4 Distribución de valores de incertidumbre de la localización

Incluso cuando no existen influencias externas que afecten a las marcaciones (tales como reflexiones debidas a características locales, edificios, estructuras metálicas u otras, así como los efectos del medio de propagación radioeléctrica) y las líneas de marcación de todos los radiogoniómetros utilizados en el proceso de triangulación se crucen en un único punto, el transmisor buscado puede no estar ubicado en dicho punto sino dentro de los límites de una elipse de indeterminación determinada por (el error) la incertidumbre de localización de los instrumentos (o sistema) de cada radiogoniómetro (véase § 4.7.2.1.1). Ello puede apreciarse en la Fig. 4.7-11, donde las distribuciones angulares de las líneas de marcación de dos radiogoniómetros, RG1 y RG2, se representan, dentro de los límites especificados de la incertidumbre de los instrumentos de los radiogoniómetros, como segmentos con bordes difusos. Puede asumirse que la distribución angular de las líneas de marcación dentro de dichos segmentos es gaussiana, con valores de incertidumbre de marcación comprendidos entre 1º y 2 º r.m.s.

De los dos casos de la Fig. 4.7-11 en los intersectan los segmentos de distribución de las líneas de marcación de los radiogoniómetros RG1 y RG, se observa que la incertidumbre se reduce al mínimo cuando el ángulo de intersección es 90º (situación 1). En ese caso, en el que las incertidumbres de los radiogoniómetros utilizados en el proceso de triangulación son idénticas y las distancias desde los radiogoniómetros a la zona en la que se produce la intersección son iguales, la elipse de incertidumbre se convierte en un círculo.

FIGURA 4.7-11

Dos casos de intersección de los segmentos de distribución de las líneas de marcación de dos radiogoniómetros RG1 y RG2



Spectrum-4.7-11

Conforme disminuye el ángulo de intersección de los segmentos (situación 2), el eje principal de la elipse, que normalmente se considera que representa la incertidumbre de la localización, aumenta rápidamente, tendiendo al infinito conforme el ángulo tiende a 0º y 180º, de forma que la localización mediante dos radiogoniómetros se hace imposible y es necesario disponer de un tercer radiogoniómetro alejado de la línea que une los dos primeros.

A partir de la intersección de los segmentos en el caso de ángulos pequeños, puede verse claramente como el cambio de la longitud del eje principal de la elipse de incertidumbre de localización está relacionado con la probabilidad ***p*** de localización del transmisor buscado dentro de la misma. Conforme aumenta la probabilidad ***p***, también aumenta la longitud de los ejes (mayor y menor) de la elipse, resultando en un aumento de la incertidumbre de localización determinada por la longitud del eje principal de la elipse.

En la Fig. 4.7-11 puede verse que la longitud del eje principal de la elipse de incertidumbre depende de varios factores, tales como:

– las incertidumbres de marcación inherentes de los radiogoniómetros utilizados en el proceso de triangulación;

– las distancias entre la zona en la que intersectan los segmentos de distribución de las líneas de marcación y los respectivos radiogoniómetros;

– el ángulo de intersección de los segmentos de distribución de las líneas de marcación.

Por tanto, la incertidumbre de la localización, determinada por la longitud del eje mayor de la elipse, tomará valores diferentes en puntos distintos de la zona de cobertura global de localización.

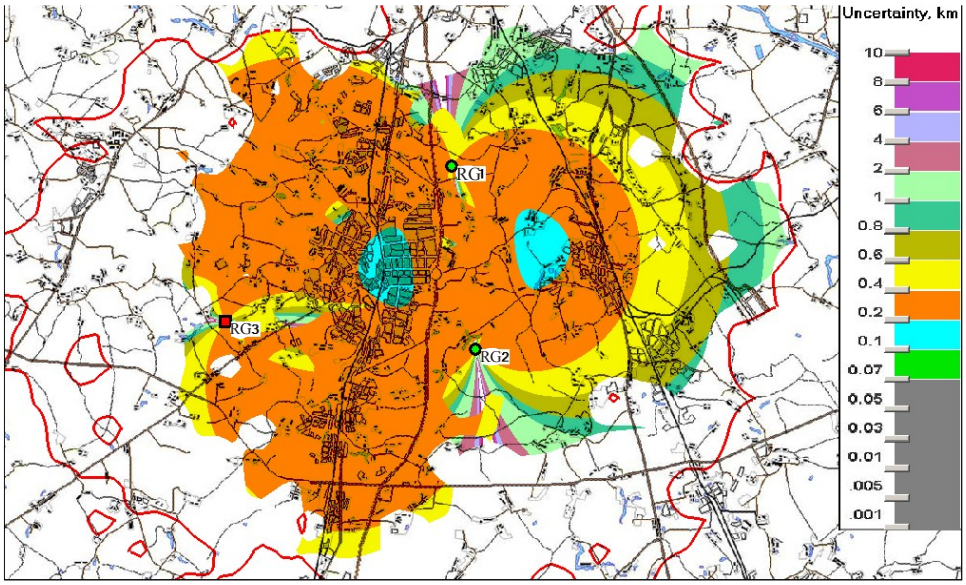
Las características de las elipses de incertidumbre que determinan la incertidumbre de localización en cada punto de la zona de cobertura global de localización pueden calcularse a partir de la densidad de probabilidad bidimensional de la curva de distribución gaussiana, cálculo que se hace considerablemente más complejo conforme aumenta el número de radiogoniómetros utilizados en la triangulación, particularmente cuando dichos radiogoniómetros tienen valores de incertidumbre de marcación diferentes. Las bases de la herramienta matemática para dichos cálculos se presenta en Kogan y Pavliouk, 2004a], y el software utilizado para la implementación de la metodología se describe en [Krutova *et al*., 2005] [Manual UIT, 2005].

Los resultados del cálculo ofrecen la distribución de los valores de la incertidumbre de localización en la zona de cobertura global de localización. La distribución puede representarse gráficamente como subáreas adyacentes cuyos límites corresponden con los valores de incertidumbre de localización establecidos, tal como se muestra en la Fig. 4.7-12.

Mediante la paleta de colores del lado derecho de la Fig. 4.7-12 se representan los valores de incertidumbre de localización correspondientes a los límites de las distintas zonas. La totalidad de dichas zonas, situadas dentro de los límites de la zona de cobertura global de localización se denominan "plantilla de cobertura de localización" (LCT, *location coverage template*) [Kogan y Pavliouk, 2004a], [Kogan y Pavliouk, 2004b], [Manual UIT, 2005] y [Krutova *et al*., 2006].

FIGURA 4.7-12

Plantilla de cobertura de localización con tres radiogoniómetros, RG1 – RG3



Spectrum-4.7-12

La Fig. 4.7-12 muestra que para una disposición dada de los radiogoniómetros en la zona territorial de interés, los valores de incertidumbre de localización más pequeños están en el rango de 0,1 a 0,2 km (zona que se muestra en color azul turquesa). Dichos valores se producen donde las líneas de marcación de los radiogoniómetros RG 1 y RG 2 se intersectan con ángulos cercanos a 90º. La zona más amplia es la que se muestra en color castaño, correspondiente a incertidumbres de localización de entre 0,2 y 0,4 km. Los valores de incertidumbre de localización más elevados del ejemplo están en el rango de 1 a 2 km (zona en verde claro). Ello ocurre en los límites de la zona de cobertura global de localización, es decir, a las mayores distancias posibles de los radiogoniómetros. En las zonas estrechas en las que las líneas de marcación de los radiogoniómetros RG 1 y RG 2 se cruzan con ángulos cercanos a 0º, la incertidumbre de localización es mayor de 2 km (zonas en rosa y otros colores).

El ejemplo muestra la considerable dispersión de valores (con un factor superior a 20) de la incertidumbre de localización en función de los factores antes descritos. Ello debe tenerse en cuenta en la planificación de redes de radiogoniómetros.

En [Kogan y Pavliouk, 2004b] y en [Nurmatov y Titov, 2005] se analizan detalladamente las características de las plantillas de cobertura del servicio de localización, y en la sección 6.8 se describe su utilización en la planificación de las redes de comprobación técnica del espectro.

En la medida en que el cálculo de las plantillas de cobertura del servicio de localización sólo tiene en cuenta errores de la instrumentación (sistemas) de los radiogoniómetros, los valores de incertidumbre de localización que reflejan dichas plantillas son los mínimos posibles que pueden conseguirse en condiciones ideales. No obstante, esta información tiene un valor considerable para la planificación y optimización de redes de comprobación técnica del espectro (véase la sección 6.8).

4.7.3.1.5 Visualización en un mapa

Las líneas de marcación y sus puntos de cruce se muestran en un mapa cuya visualización permite al operador encontrar fácilmente una posición estimada de la emisión. Cuando la emisión se realiza desde una unidad móvil, el operador puede estimar la dirección de movimiento de la misma observando el punto de cruce en la pantalla.

En la sección 6.2 puede encontrarse más información sobre los mapas.

4.7.3.2 Método basado en la diferencia del tiempo de llegada

4.7.3.2.1 Principios generales

El método basado en la diferencia de tiempos de llegada (TDOA, *time-difference-of-arrival*) determina la ubicación del emisor utilizando los tiempos de llegada relativos de una señal en varios receptores. Los sistemas TDOA ofrecen flexibilidad en la selección de la antena y de su emplazamiento pues la precisión del método TDOA se ve mínimamente afectado por la existencia de reflectores próximos y las antenas, y los cables no están por lo general integrados en los receptores TDOA. Esta flexibilidad permite considerar otros factores tales como tamaño de la antena, complejidad de la estación, accidentes del terreno y cobertura de frecuencia. La capacidad de utilizar antenas sencillas y de fácil mantenimiento permite establecer fácilmente sistemas de geolocalización basados en TDOA, especialmente para instalaciones temporales.

A menudo se dice que el método TDOA es menos preciso para señales de banda estrecha que para señales de banda ancha. Aunque por lo general ello es cierto, dicha afirmación sólo tiene en cuenta la anchura de banda de la señal. Las señales de mayor anchura de banda tienen características temporales de menor duración que favorecen la precisión del método TDOA, especialmente cuando existen trayectos múltiples. No obstante, la precisión de la localización también se ve afectada por la relación señal a ruido de las señales recibidas que, en general, es mejor para señales de banda estrecha en frecuencias más bajas. Los métodos TDOA son adecuados para la mayoría de las señales moduladas intencionadamente, pero no pueden utilizarse para localizar señales continuas no moduladas (ya que no contienen ninguna referencia temporal).

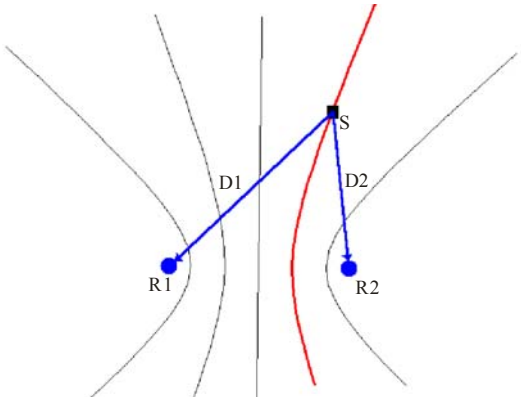
El método TDOA se basa en un concepto sencillo, a saber, que la diferencia en las distancias entre la fuente de una señal electromagnética y dos receptores cualesquiera de un sistema de localización puede observarse directamente como la diferencia entre los tiempos de llegada a ambos receptores. A partir de la diferencia de tiempos observada, puede calcularse fácilmente la diferencia en distancia como el producto entre la diferencia en tiempo y la velocidad de la señal. El TDOA cambia aproximadamente 3,3 ns por cada metro de diferencia de distancia entre los dos trayectos directos de señal.

En dos dimensiones, la ecuación de la diferencia de distancia, $\Delta D = D1-D2$, describe una curva hiperbólica. En la Fig. 4.7-13 se dibujan las curvas hiperbólicas para cinco valores distintos de ΔD. En una de las líneas se sitúa una fuente de señal "S".

Dado que la curva hiperbólica representa una diferencia de distancia constante, le fuente de la señal puede reposicionarse en cualquier emplazamiento a lo largo de la curva hiperbólica indicada sin que ello afecte a la diferencia de tiempos de llegada observada en los receptores R1 y R2. Obviamente, ello implica que se necesitan más de dos receptores para que los sistemas TDOA determinen la localización.

FIGURA 4.7-13

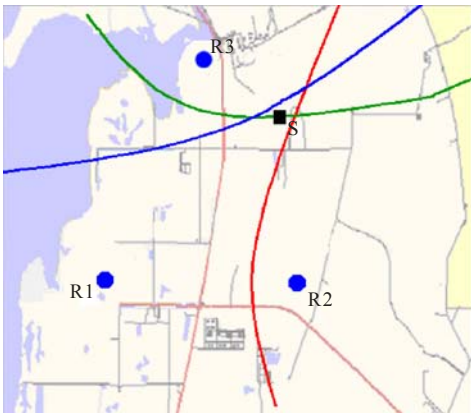
Diferencia de tiempo basada en la diferencia de distancia ΔD = D1-D2



Spectrum-4.7-13

FIGURA 4.7-14

La fuente de la señal se encuentra en la intersección de dos o más hipérbolas



Spectrum-4.7-14

Si no se tienen en cuenta las geometrías de casos especiales, los sistemas TDOA necesitan un mínimo de tres receptores para localizar una fuente en dos dimensiones. Tal como se muestra en la Fig. 4.7-14, si existen tres receptores hay tres posibles emparejamientos de receptores que generan tres observaciones distintas de diferencia de tiempos y, en consecuencia, tres curvas hiperbólicas distintas que se cruzan en un punto común en condiciones ideales. La fuente de la señal se sitúa en la intersección de las curvas hiperbólicas. Aunque se necesitan tres receptores, la geolocalización solo precisa de dos emparejamientos de receptores. En teoría, el tercer emparejamiento de receptores es redundante. No obstante, en un entorno no ideal, la calidad de los datos de será distinta según los emparejamientos de receptores. Por ejemplo, en la Fig. 4.7-14 se muestra la fuente de la señal está físicamente más cercana al recetor R3. Suponiendo una intensidad de señal superior en R3, los emparejamientos R1-R3 y R2-R3 pueden producir ambos una mejor estimación de diferencia de tiempos que el R1-R2. A menudo, los algoritmos de localización avanzada aprovechan esta redundancia para mejorar la precisión de la localización.

4.7.3.2.2 Implementaciones de TDOA

Existen dos métodos básicos para calcular la diferencia de tiempos de llegada de una señal a una pareja de receptores. En el primer método, cada receptor determina e informa del tiempo de llegada (TOA) de la señal a una computadora del sistema TDOA. La computadora sustrae una de las estimaciones de TOA de la otra para calcular la diferencia de tiempos. En el segundo método, los receptores digitalizan la señal y envían muestras con sello de tiempo a la computadora, donde pueden utilizarse diversos métodos numéricos para estimar la localización.

Método TOA

Determinar el tiempo de llegada de una señal en el receptor resulta interesante en situaciones en las que están restringidas las anchuras de banda para las comunicaciones de datos. En este método, sólo es necesario comunicar el tiempo de llegada de la señal. El inconveniente del mismo es que, salvo que la señal tenga características conocidas que permitan al receptor determinar con precisión el tiempo de llegada cuando las condiciones del canal son malas, el método necesita de elevadas relaciones señal-a-ruido, elevadas relaciones señal-a-interferencia y una distorsión limitada por trayectos múltiples en todos los receptores.

Es posible mejorar la precisión del método TOA utilizando información conocida de las señales con modulación digital. El método apoyado en datos se aplica a sistemas que tienen parámetros normalizados ("señales discriminantes") en canales de servicio o en canales de tráfico que se transmiten de forma continua o a intervalos regulares: secuencias de acondicionamiento en el caso de protocolos AMDT, códigos PILOT o

códigos de sincronización en el caso de protocolos AMDC, pilotos continuos o dispersos en formas de onda MDFO (DVB-T, DVB-H, WiMax), etc. La explotación de características de señales discriminantes en los cálculos TDOA permite:

– beneficiarse de una ganancia significativa en la detección de la señal, lo cual mejora la sensibilidad y la fiabilidad;

– separar las fuentes en la misma banda cuando utilizan distintas señales discriminantes para la sincronización (varias secuencias de entrenamiento en ráfagas AMDT, varios códigos AMDC, diversidad de pilotos distribuidos en símbolos MDFO, etc.).

Método TDOA

En el método TDOA, los receptores digitalizan la señal y transfieren muestras con sello de tiempo a la computadora TDOA. El inconveniente de este método es que deben comunicarse a la computadora cientos, y posiblemente miles, de muestras de cada receptor para cada actualización de la posición estimada de la señal. Las redes de datos de baja velocidad limitan la frecuencia de las actualizaciones de localización. La ventaja básica de este método es que soporta el uso de algoritmos que funcionan con la mayoría de las señales, en malas condiciones del canal y sin necesidad de un conocimiento preciso de las características de las señales. También se reducen los recursos de computación necesarios en el receptor y puede proporcionar más información al operador, como por ejemplo, tiempo, espectro y diagramas de correlación. Por la calidad de funcionamiento del servicio de localización y su flexibilidad, es el método preferido en la mayoría de las aplicaciones de comprobación técnica del espectro.

Cálculo de la localización en sistemas TDOA

Un enfoque habitual y directo para la determinación de la localización en sistemas TDOA es estimar, en primer lugar, la diferencia de tiempos de llegada para cada pareja de receptores. Mediante los correspondientes algoritmos se determina el punto de intersección de las curvas hiperbólicas de los distintos valores de diferencia de tiempos. Es un enfoque análogo al de marcaciones mediante líneas de marcación (LoB) utilizado en los sistemas de radiogoniometría. En los sistemas de radiogoniometría, frecuentemente los errores angulares impiden la convergencia de tres o más LoB en una única localización. En sistemas TDOA, los errores de estimación de tiempos tienen un efecto semejante sobre las curvas hiperbólicas, tal como se muestra ilustra en la Fig. 4.7-14.

También pueden utilizarse otras técnicas de cálculo, generalmente específicas de los sistemas informáticos utilizados, para estimar la localización. Estas técnicas tienen, por lo general, una mayor sofisticación para tratar los trayectos múltiples, las situaciones con múltiples señales cocanal y algunos aspectos complejos del método TDOA. También pueden incorporar información de amplitud y, en el caso de redes de antenas, información del ángulo de llegada. Los resultados de estos cálculos se presentan a menudo en forma de mapas de probabilidad, en los que se utilizan colores o intensidades para indicar las probabilidades de localización de las señales, tal como se muestra en la Fig. 4.7-15.

4.7.3.2.3 Factores que afectan a la precisión

Geometría

Las posiciones relativas de los receptores y de las fuentes de señal afectan a la precisión de la localización basada en TDOA.

En la Fig. 4.7-16 se muestra el mecanismo básico de error. En dicha figura se representan curvas hiperbólicas para las tres parejas de receptores para un rango de diferencias de tiempos espaciadas uniformemente. En este ejemplo, se asume que las líneas están espaciadas a intervalos de 1 µs y que la presencia de trayectos múltiples y de otros errores puede introducir un error de 1 microsegundo en la estimación de diferencia de tiempo.

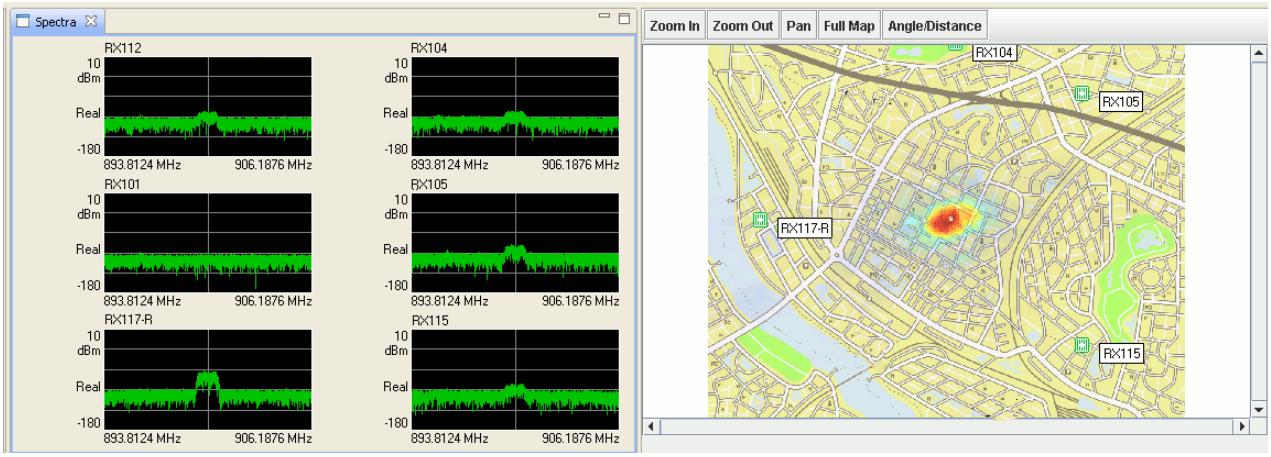
En estas condiciones, las zonas sombreadas representan zonas de incertidumbre limitada por variaciones temporales de +/–1 µs utilizando los tres emparejamientos posibles de los receptores. En la figura se observa claramente que la mejor precisión se encuentra cerca del centro de la disposición de los receptores. La precisión se degrada fuera de la zona triangular definida por los tres receptores y es claramente deficiente en las zonas inmediatamente "detrás" de cada uno de ellos. En zonas externas a la que definen los tres

receptores, las curvas hiperbólicas tienden a ser paralelas, lo cual limita a los sistemas TDOA a informar de algo similar a una línea de marcación.

La precisión de la localización está frecuentemente condicionada de forma voluntaria por el aprovechamiento de los emplazamientos de receptores existentes y de otras infraestructuras. La Fig. 4.7-17 ilustra una geometría de líneas rectas. Para esta geometría, la precisión horizontal es por lo general pobre. Asimismo, el sistema de localización no puede distinguir entre una fuente de señal a la izquierda de la línea del sensor y otra a la derecha que sea la imagen especular en relación con la línea vertical que une los sensores.

FIGURA 4.7-15

Ejemplo de mapa de probabilidad y de los correspondientes diagramas espectrales. Cuando están disponibles, los diagramas espectral, temporal y de correlación pueden ayudar a interpretar los resultados del método TDOA



Spectrum-4.7-15

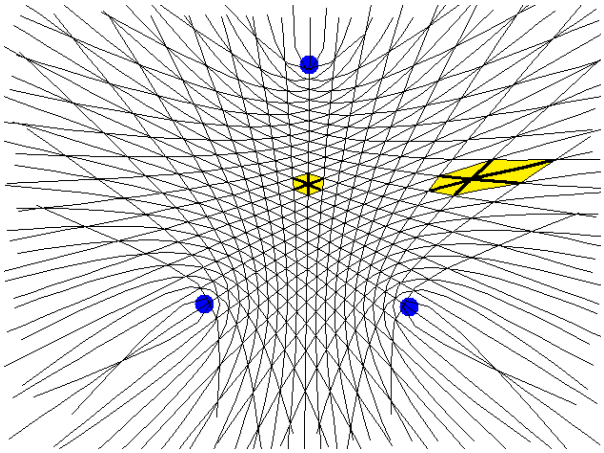
Anchura de banda de la señal, periodicidad y trayectos múltiples

La relación inversa entre los dominios de tiempo y frecuencia es algo bien entendido. Tal como se ilustra en la Fig. 4.7-18, una forma rectangular (RECT) amplia en el dominio de la frecuencia se convierte en una forma sin(x)/x (SINC) estrecha en el dominio del tiempo. Una forma rectangular más estrecha en el dominio de la frecuencia produce un impulso temporal sin(x)/x más amplio. Dejando al margen otras consideraciones, las señales de anchura de banda amplia pueden ser localizadas con mayor precisión ya que resulta más sencillo determinar la temporización de las características en el dominio del tiempo más nítidamente definidas de la señal en presencia de distorsión por ruido y trayectos múltiples.

Si bien es conveniente adaptar la anchura de banda del receptor TDOA a la anchura de banda de la señal, se trata de algo que no es estrictamente necesario ni constituye siempre el mejor enfoque. Existen muchas señales que tienen la mayor parte de su energía alrededor de la portadora, lo cual permite anchuras de banda del receptor más estrechas para mejorar la SNR o proporcionar un mejor aislamiento frente a señales adyacentes o superpuestas.

FIGURA 4.7-16

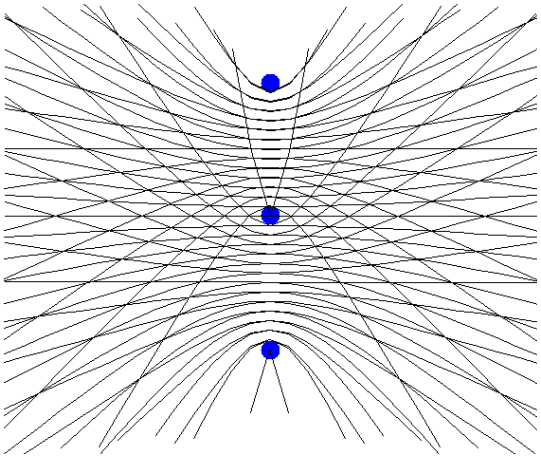
La geometría afecta a la precisión de TDOA



Spectrum-4.7-16

FIGURA 4.7-17

Geometría de un receptor de baja calidad

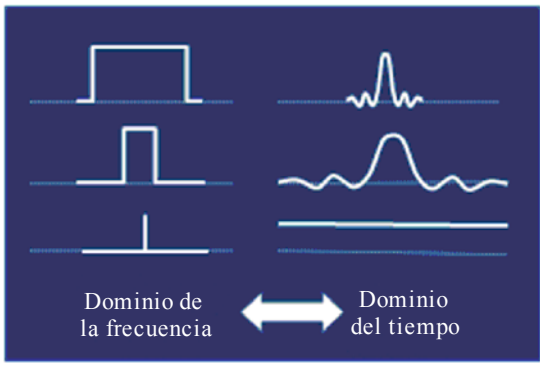


Spectrum-4.7-17

En los sistemas de radiogoniometría la presencia de trayectos múltiples se hace evidente cuando se producen varias marcaciones debidas a varias copias de una misma señal. En los sistemas TDOA, los trayectos múltiples son patentes cuando varias copias de una señal llegan con distintos retardos. Los trayectos múltiples son un factor potencialmente más relevante para señales de banda estrecha cuando las características temporales de la señal son amplias en relación con la dispersión del retardo, tal como se muestra en la Fig. 4.7-19. En estas condiciones, es más difícil discriminar la distorsión de la forma del impulso causada por los trayectos múltiples, añadiendo así un error adicional a la estimación de la diferencia de tiempos.

FIGURA 4.7-18

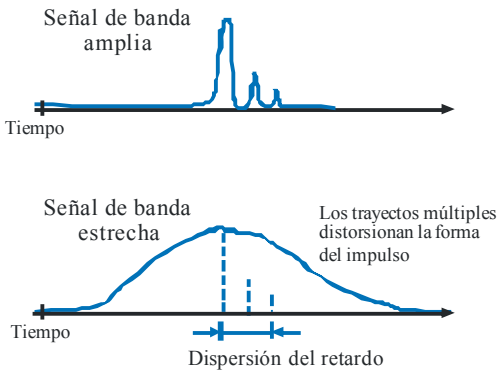
Relaciones tiempo-frecuencia



Spectrum-4.7-18

FIGURA 4.7-19

Trayectos múltiples y anchura de banda de la señal



Spectrum-4.7-19

Aunque la probabilidad sea baja, los algoritmos TDOA basados en la correlación pueden generar respuestas incorrectas cuando las señales contienen elementos periódicos. Las secuencias de datos de repetición y los impulsos de sincronización son ejemplos de elementos periódicos. También pueden producirse respuestas incorrectas cuando el sistema de localización detecta señales procedentes de múltiples transmisores que

utilizan señales de sincronización comunes. En esta situación, el sistema puede ser incapaz de distinguir entre la cresta de la correlación cruzada de una misma señal que llegue a dos receptores TDOA diferentes, y la cresta de la correlación debida a elementos de señal comunes incluidos en dos señales diferentes. Este problema puede minimizarse evitando que la separación entre receptores sea grande en relación con la separación entre transmisores.

Precisión de la temporización

La precisión de la temporización es fundamental para la precisión de la localización en sistemas TDOA, al igual que la precisión angular es fundamental en los sistemas de radiogoniometría. Aunque sea necesaria una buena precisión de la temporización, ello no es suficiente para garantizar la precisión de las localizaciones. Las precisiones habituales, del orden de "pies/ns" o "30 cm/ns" dan una idea de lo que es posible en relación con la especificación de la precisión de la temporización, pero no debe considerarse garantía de indicadores precisos de la calidad de funcionamiento de los sistemas TDOA. Estas aproximaciones no tienen en cuenta las localizaciones relativas de los receptores o las características de la fuente de señal, tal como se ha descrito anteriormente. Tampoco tienen en cuenta los errores de temporización relativa entre receptores o errores de retardo introducidos por cables de antenas y filtros.

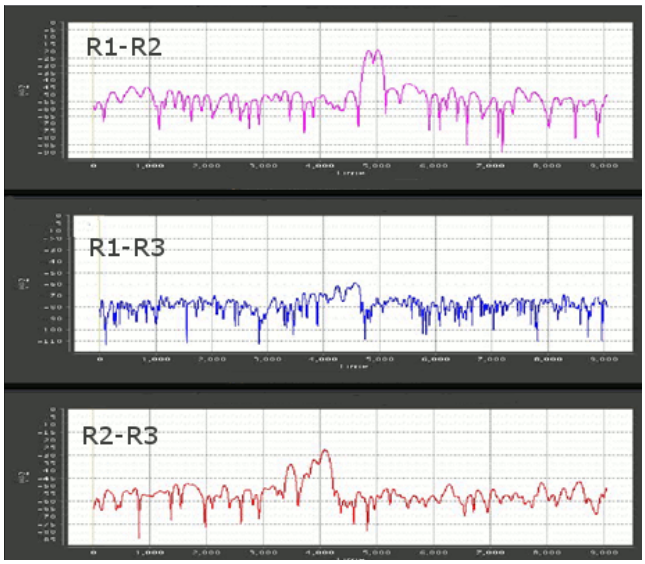
Efectos del nivel, duración y velocidad de la señal en la TDOA basada en la correlación

El cálculo de la correlación cruzada entre las señales de dos receptores constituye un método para determinar la TDOA. La función de correlación cruzada refleja los aspectos comunes de ambas señales como una función del desplazamiento temporal. En el caso de una señal observada simultáneamente en dos receptores diferentes, la posición de la cresta de amplitud en la función de correlación cruzada indica la diferencia de retardo para esa pareja de receptores.

La Fig. 4.7-20 muestra los gráficos de correlación cruzada de una medición sencilla en un sistema con tres receptores. Idealmente, cada gráfico debería contener un único impulso en una posición desplazada a izquierda o derecha en función de la diferencia de tiempos. Dado que estos datos son los de una medición real, muestran los efectos de las degradaciones del mundo real. Los tres gráficos de correlación cruzada muestran múltiples impulsos indicadores de trayectos múltiples. Además de la distorsión por trayectos múltiples, la segunda correlación cruzada R1-R3 también muestra los síntomas típicos de una baja relación *S/N*. Aunque la correlación cruzada de este ejemplo dista de ser ideal, los algoritmos sofisticados de TDOA pueden extraer información de localización a partir de datos de esta calidad.

FIGURA 4.7-20

Correlación cruzada distorsionada por ruido y trayectos múltiples



Spectrum-4.7-20

La magnitud de la cresta de la correlación cruzada es función de la potencia de la señal recibida en ambos receptores. El nivel de ruido de la correlación cruzada es función del nivel de ruido en ambos receptores, del grado en el que están correlados los ruidos en ambos receptores y de la longitud del intervalo sobre el que se calcula la función de correlación cruzada.

La reducción de ruido es uno de los beneficios de los sistemas basados en la TDOA. Permite la geolocalización de señales recibidas con una relación *S/N* negativa en uno o más de los receptores del sistema. Aunque no hay un límite teórico para la cantidad de reducción de ruido que puede conseguirse, existen límites prácticos como la duración de la señal.

El movimiento relativo entre la fuente de la señal y los receptores TDOA introduce un desplazamiento de frecuencia (Doppler). El desplazamiento de frecuencia será diferente para cada receptor en función de la velocidad a la que se mueven la fuente de señal y el receptor. La magnitud del desplazamiento de frecuencia también es función de la frecuencia de la señal. Los sistemas TDOA basados en la correlación deben corregir los desplazamientos de frecuencia relativos entre los receptores para estimar correctamente la diferencia de tiempos.

4.7.3.2.4 Consideraciones del sistema

Receptores

Los receptores deben tener anchuras de banda de frecuencia intermedia (FI) ajustables para permitir señales espectralmente aisladas de otras señales, minimizar la potencia de ruido y permitir una utilización máxima de la anchura de banda de la señal en aras de la precisión de la geolocalización.

Para minimizar los requisitos de la red, los receptores que transfieren señales muestreadas al sistema informático de cálculo de la TDOA deben utilizar la velocidad de muestreo mínima que represente a la señal sin que se produzca solapamiento ("*aliasing*"). La precisión temporal es independiente de la velocidad de muestreo. En otras palabras, una velocidad de muestreo de 20 kHz no debería implicar una precisión de temporización de 50 µs (1/20 kHz).

Para minimizar aún más los requisitos de red y computacionales, los receptores deben evitar en la medida de lo posible la trasferencia de la señales muestreadas cuando las señales no estén presentes.

La precisión de temporización absoluta de un receptor debe especificarse en el conector de antena para la mayoría, sino para todas, las condiciones de funcionamiento. Ello evita introducir de errores de

temporización debidos a la conmutación de filtros de preselección internos o de atenuadores, u otros cambios de los elementos de procesado de señal analógicos y digitales que podrían afectar al retardo de grupo total del receptor.

La precisión de la temporización del receptor es válida para todas las frecuencias de las anchuras de banda de FI de un receptor. Ello garantiza que las señales que ocupan un porcentaje significativo de la anchura de banda de FI no sufren una distorsión adicional por la distorsión de retardo de grupo. También garantiza que una señal de anchura de banda estrecha en comparación con la FI tenga una buena precisión de temporización para cualquier desplazamiento de frecuencia dentro de la FI. El filtro de FI final de un receptor es generalmente el filtro más estrecho del mismo y, probablemente, la fuente principal de errores de temporización en el trayecto interno de la señal en el receptor.

El sistema TDOA, o cada receptor de un sistema, deben poder añadir coeficientes de calibración del retardo en cada emplazamiento de recepción.

Número de receptores

La geolocalización basada en TDOA precisa de al menos tres receptores. Cuando se utilizan datos de más de tres receptores puede mejorarse la precisión de la geolocalización. La precisión mejora significativamente, por ejemplo, con cuatro o cinco receptores. El número de emparejamientos de receptores es N (N-1)/2, siendo N el número de receptores. Con cinco receptores se logran diez emparejamientos y, por tanto, diez estimaciones de diferencia de tiempo. La calidad de los datos de cada pareja variará notablemente en función sobre todo del nivel de señal y de la existencia de trayectos múltiples. Los sistemas que incluyen algoritmos TDOA avanzados combinan o descartan de forma inteligente datos de varias parejas de receptores para mejorar la precisión de la localización. A partir de un momento dado, la adición de más receptores es contraproducente pues aumenta exponencialmente las necesidades de cálculo a cambio de una mejora de precisión mínima.

Consideraciones adicionales sobre el receptor y el emplazamiento

Existen una serie de consideraciones adicionales en la planificación de un sistema TDOA. Durante el proceso de planificación, deben tenerse presentes, entre otros, los siguientes factores:

– precisión de localización deseada;
– complejidad del sistema;
– disponibilidad de energía eléctrica;
– disponibilidad de red y calidad de funcionamiento de la red;
– entorno de propagación;
– entorno de la señal (utilización y reutilización de frecuencias);
– tipos de señales a localizar (anchuras de banda, potencia, duración, frecuencia);
– emplazamientos disponibles (elevación, proximidad a los transmisores);
– desempeño de la antena;
– desempeño del receptor.

En función de estas consideraciones, la separación recomendada entre receptores varía de unos cientos de metros a decenas de kilómetros.

Referencias de tiempo

Los sistemas TDOA utilizan, por lo general, receptores GPS para tener una referencia temporal común. Para conseguir la mejor precisión de temporización posible, el receptor GPS puede funcionar en un modo en el que la localización sea fija. El funcionamiento en modo fijo permite al receptor GPS una resolución temporal de mayor precisión.

Los receptores de un sistema TDOA no deben utilizar el servicio GPS ni otro servicio de temporización basado en señales de radiofrecuencia cuando dicho sistema TDOA se utilice para la localización de señales que interfieran con dichos servicios.

Consideraciones sobre la red

Los requerimientos de la red dependen de:

– el método TDOA empleado;

– la implementación concreta;

– los requisitos de usuario en términos de velocidad y fiabilidad.

Los requisitos de capacidad y velocidad de la red son mayores para sistemas TDOA que reenvían las señales muestreadas a un sistema informático de cálculo TDOA. Los sistemas TDOA que establecen el tiempo de llegada (TOA) en el receptor, tienen requisitos menos exigentes de anchura de banda. En ambos tipos de sistemas, la transferencia de datos puede ser muy asimétrica con requisitos de carga ascendente superiores a los de descarga. Los requisitos de anchura de banda del sistema informático TDOA serán mayores si los datos de todos los receptores se recopilan en un único emplazamiento.

Es recomendable que los sistemas TDOA presenten una latencia reducida. Una elevada latencia puede afectar negativamente a la velocidad de actualización de la localización. También puede influir en la capacidad de realizar campañas de mediciones basadas en TDOA.

En grandes sistemas de localización, puede ser necesario disponer de varias tecnologías de red, tales como tecnologías inalámbricas, DSL, módem de cable y fibra óptica. En estos sistemas, la capacidad y fiabilidad de las conexiones de red pueden verse alteradas por la meteorología, las interferencias y la carga que suponen otros usuarios de la red. Los sistemas TDOA deben poder admitir diferencias en la calidad de funcionamiento de los diversos enlaces, así como la desconexión de uno o más receptores. Cuando se utilizan redes inalámbricas, debe tenerse especial precaución para evitar interferencias entre los receptores TDOA y los módem de radiofrecuencia.

Cuando un sistema TDOA incluye elementos de la red pública, deben utilizarse redes privadas virtuales (VPN) u otras tecnologías similares para garantizar la transferencia de datos y prevenir ataques directos contra los receptores. Los receptores TDOA tienen, en general, recursos de cálculo limitados y pueden sufrir sobrecargas debidas a tráfico innecesario o malicioso.

4.7.3.3 Métodos de radiorreclada mediante ángulo de llegada y método de marcaciones separadas

La localización de un emisor puede determinarse utilizando radiogoniómetros reubicables, con la ventaja de utilizar menos estaciones de radiogoniometría. Las estaciones de radiogoniometría móvil van montadas en vehículos que contienen todos los equipos, fuentes de alimentación y antenas necesarios. Las estaciones de radiogoniometría portátiles son conjuntos reubicables que pueden exigir unos procedimientos de montaje y ajuste previos a las mediciones. Estos dispositivos han sido diseñados para funcionar según dos métodos básicos: método de marcaciones separadas y método de radiorrecalada.

El **método de marcaciones separadas** supone la obtención de varias mediciones de línea de marcación (LoB) discretas a partir de emplazamientos fijos que se encuentran a distancia adecuada del emisor en cuestión. Es probable que la distancia adecuada sea función de la precisión del sistema de radiogoniometría, de las características del terreno local o de otras condiciones. Pueden hacerse mediciones sucesivas en emplazamientos distintos con una sola estación portátil o móvil y combinarse los resultados utilizando métodos de triangulación normalizados.

Entre los inconvenientes que presenta este método está el hecho de que la elección del emplazamiento de la medición es susceptible a la interferencia provocada por las estructuras circundantes, y que a menudo es imposible realizar mediciones simultáneas desde diversos emplazamientos. Los tiempos de transmisión de la señal o los movimientos del transmisor pueden introducir errores en la localización. Al elegir el principio de radiogoniometría para estos tipos de mediciones debe tenerse en cuenta la susceptibilidad a los efectos del emplazamiento, así como las disposiciones físicas para las aplicaciones móvil y portátil.

Los **métodos de radiorrecalada** están empleando con éxito equipos móviles de complejidad mínima y una precisión sólo moderada. También son eficaces para las tareas de supresión de interferencias utilizando vehículos de comprobación técnica móvil.

Esta segunda estrategia utiliza equipos móviles (normalmente instalados en automóviles o en aviones) que pueden desplazarse rápidamente a las proximidades del transmisor siguiendo aproximaciones sucesivas en la

línea verdadera de marcación. A medida que disminuye la distancia al transmisor, la magnitud del error de distancia absoluto también disminuye hasta un valor admisible, aun cuando el error relativo en grados permanezca constante. Entre las ventajas de esta estrategia puede citarse el menor coste y complejidad de los equipos, el hecho de que normalmente se obtengan resultados aceptables en un tiempo razonable, el hecho adicional de que los problemas de errores debidos al emplazamiento sean mucho menos importantes porque la unidad es móvil y las contribuciones de los errores pueden promediarse sobre una línea de base larga y, por último el que la información de radiogoniometría pueda deducirse a partir de una modulación del sistema de radiorrecalada subaudible y localmente inducida que no perturba la información a transmitir.

Existe un gran número de sistemas de radiorrecalada que funcionan o bien en una configuración de "radiorrecalada" sin la posibilidad de escuchar claramente las componentes de modulación normales, o bien en una configuración "audible" cuando se desconecta el circuito de radiorrecalada. Esta limitación es inherente al diseño de los equipos que superponen una modulación local audible proporcional a la dirección de llegada de la señal. Únicamente se necesita un sistema de radiogoniometría por radiorrecalada para localizar una fuente de señal, aunque la utilización simultánea de otros sistemas puede agilizar la localización del transmisor. Los inconvenientes son la pérdida de la claridad inherente al sistema de marcaciones separadas y la necesidad de diversas transmisiones a lo largo de un periodo de tiempo razonable para determinar adecuadamente el emplazamiento del transmisor.

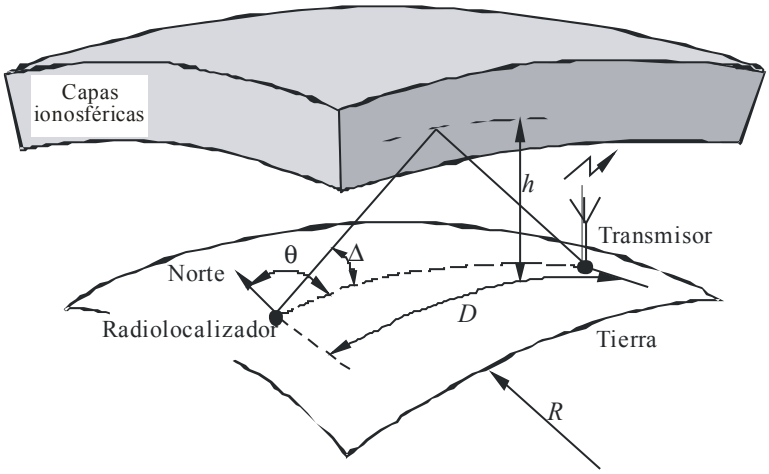
Los modernos radiogoniómetros son suficientemente compactos como para ser instalados en vehículos.

4.7.3.4 Método de localización de un solo emplazamiento para emisiones en ondas decamétricas

El sistema de localización mediante una sola estación (SSL, *Single Station Location*) permite determinar la posición geográfica de un transmisor con un solo radiogoniómetro (véase la Fig. 4.7-21). El sistema de procesamiento de los datos proporcionados por dicho radiogoniómetro (acimut, elevación, posición) unido a las mediciones o predicciones ionosféricas, permite estimar la distancia del transmisor al radiogoniómetro. De este modo, el concepto SSL permite llevar a cabo la localización cuando por razones geográficas, de tiempo o de disponibilidad, no puede instalarse un sistema completo de localización mediante triangulación radiogoniométrica. El sistema SSL también puede considerarse como complemento a un sistema de localización existente.

FIGURA 4.7-21

Principio del sistema de localización mediante una sola estación (SSL)



θ: acimut geográfico
Δ: ángulo de elevación
D: distancia
h: altura de la reflexión virtual
R: radio de la Tierra

Spectrum-4.7-21

Los radiogoniómetros SSL proporcionan simultáneamente el acimut y el ángulo de elevación de la señal recibida por la red de antenas. La propagación se realiza por onda de superficie y por onda ionosférica a través de múltiples trayectos correspondientes a los distintos ángulos de elevación. De ahí resulta que el radiogoniómetro SSL señala un ángulo de elevación que presenta variaciones en el tiempo debidas a las interferencias causadas por trayectos múltiples. Se utilizan algoritmos de procesamiento para determinar los valores de los ángulos de elevación relativos a los citados trayectos múltiples.

Este procesamiento, asociado a las mediciones o previsiones ionosféricas, permite estimar la distancia del transmisor al radiogoniómetro para distancias de hasta de 2 500 km (aunque las estimaciones de distancias de transmisores de más de 1 000 km aproximadamente están sujetas a un error significativo debido al bajo ángulo de llegada y ala geometría e la situación en particular). La asociación de los datos sobre el acimut, la distancia y la posición del radiogoniómetro permite calcular las coordenadas geográficas del transmisor de ondas decamétricas.

La base del método SSL es el denominado método clásico de estimación de la distancia. En este procedimiento se supone que puede establecerse un modelo de la propagación real de las ondas decamétricas basado en que la reflexión tenga lugar en un solo espejo horizontal que se encuentra a la altura adecuada. La altura de este espejo se obtiene a partir de un ionograma de incidencia vertical, como la altura virtual de la denominada frecuencia de incidencia equivalente. El método clásico se basa en tres relaciones fundamentales sencillas, la Ley de la secante, el teorema de Briet y Tuve y el teorema del trayecto equivalente de Martyn. El resultado es sólo aproximativo puesto que el teorema de Martyn únicamente es exacto para una tierra e ionosfera planas.

Limitación de la técnica SSL

El principio SSL se basa en la hipótesis de que la señal se refleja en la ionosfera solamente una vez (un solo salto). La propagación por saltos múltiples da lugar a que las distancias calculadas sean más cortas que las reales. Además, los valores de la altura ionosférica pueden ser ambiguos. En consecuencia, la reflexión puede producirse en varias capas de distintas alturas, con el resultado de que el sistema SSL indique distintas distancias a los objetivos.

4.7.3.4.1 Estimación de la altura de la ionosfera

Los sistemas SSL incluyen uno o más de los métodos siguientes para determinar la altura de la ionosfera:

– caracterización ionosférica en tiempo real, que puede obtenerse de los procesos de sondeo de la ionosfera. El equipo que realiza esta función se denomina ionosonda o simplemente sonda. Una sonda puede determinar las características de propagación de la ionosfera a todas las frecuencias y, por tanto, caracterizar la ionosfera en las proximidades de la sonda. Una sonda requiere un transmisor, una antena dedicada y un software de análisis;

– calibración con ayuda de un transmisor situado en una posición conocida (véase [Touré, 2004]). Este método requiere una base de datos actualizada de la posición de los emisores. Por lo general, ofrece resultados tan precisos como el método SSL basado en sondas ionosféricas porque, a diferencia de lo que haría una sonda, la calibración mediante uno o varios emisores individuales no caracteriza completamente la ionosfera a todas las frecuencias;

– base de datos con ficheros de predicción ionosférica. Algunas organizaciones científicas nacionales proporcionan resultados precisos a partir de cálculos complejos que tienen en cuenta la actividad solar, las capas de propagación de la ionosfera, etc. No obstante, las predicciones sólo son valores medios y no tienen en cuenta aspectos locales, temporales u otros efectos de propagación que pueden ser detectados por las mediciones en tiempo real. Estas predicciones son útiles cuando no existe acceso a información en tiempo real, incluyendo casos de propagación con puntos de reflexión lejanos a la sonda.

4.7.3.4.2 Software para la localización

Los programas informáticos de radiogoniometría pueden proporcionar los siguientes resultados elementales de mediciones:

– acimut en grados;

– elevación en grados;

– número de mediciones integradas para obtener la media;

– nivel en ondas decamétricas a la entrada del receptor, en dBm;

– errores de distancia lateral y longitudinal.

Todos estos elementos de datos pueden aparecer en la pantalla del operador.

4.7.3.4.3 Programa de generación de predicciones

Para poder determinar la posición de un transmisor, el software de localización deberá incluir ficheros sobre predicciones ionosféricas, además de o en lugar de, monogramas medidos. Los programas informáticos de predicción permiten generar estos ficheros de predicciones ionosféricas para un emplazamiento geográfico seleccionado. El establecimiento del modelo se llevó a cabo de acuerdo con lo dispuesto en las Recomendaciones UIT-R P.1239 y P.1240.

Los trayectos de propagación ionosférica se determinan mediante un programa de trazado radial que parte del conocimiento de la distribución vertical de la densidad electrónica. Como la ionosfera es un medio anisótropo, existen dos ondas características asociadas con un ángulo del trayecto de los datos: la onda ordinaria (O) y la onda extraordinaria (X). Por consiguiente, es necesario generar las predicciones relativas a los modos utilizados por el SSL. El fichero de predicción proporciona para una hora, fecha, frecuencia y lugar determinados, todas las distancias correspondientes a las elevaciones solicitadas (histogramas).

4.7.3.4.4 Cálculo de las distancias de localización

Pueden utilizarse programas informáticos sobre localización para introducir los siguientes parámetros:

– resultados elementales de la radiogoniometría;

– hora y fecha actuales;

– frecuencia de funcionamiento;

– mediciones ionosféricas o fichero de predicción pertinentes.

Las diferentes etapas del proceso de cálculo de distancias para un transmisor en ondas decamétricas son las siguientes:

a) Histogramas de elevación.

b) Filtrado de los histogramas de elevación.

c) Determinación de los paquetes.

d) Procesamiento de las elevaciones "bajas".

e) Obtención de mediciones ionosféricas o generación de predicciones.

f) Determinación de las cuatro distancias básicas.

g) Determinación de la distancia final.

A partir de las cuatro distancias, se extrae una distancia final mediante trilateración (véase la Fig. 4.7-22).

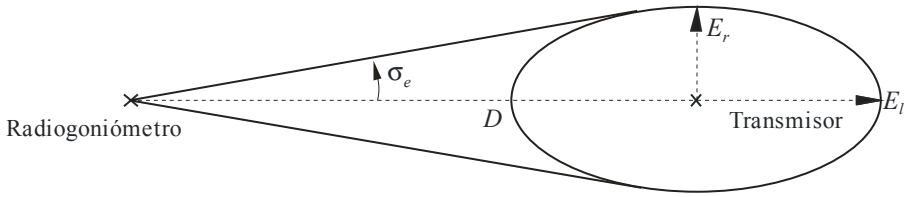
h) Cálculo de las coordenadas geográficas.

i) Integración de localizaciones elementales.

j) Resultados de la localización.

FIGURA 4.7-22

Determinación de la distancia



Spectrum-4.7-22

Para cada emisión, los cálculos de la localización arrojan los siguientes resultados:

– acimut medio, en grados;

– número de mediciones elementales;

– nivel medio de la señal en ondas decamétricas;

– error radial;

– error longitudinal;

– coordenadas geográficas del transmisor.

Los resultados son accesibles a través de presentación gráfica e impresora.

4.7.3.4.5 Validez

La validez del método SSL clásico radica en la validez de determinadas hipótesis:

1. Que el campo magnético terrestre pueda despreciarse al calcular el valor de f_v.

2. Que la altura virtual obtenida a partir del ionograma de incidencia vertical local sea la misma que la contenida en el punto medio del circuito.

3. Que el espejo de reflexión equivalente sea horizontal.

Para circuitos de mayor longitud, la hipótesis 2) empieza a no ser válida, y en algún punto es necesario pasar a un procedimiento de retrazado del rayo utilizando un modelo de la ionosfera actualizado que sea coherente con el ionograma local. Tales modelos ya existen y son objeto de continuo perfeccionamiento por científicos de todo el mundo que estudian la ionosfera, incluyendo la consideración de los efectos del campo magnético de la Tierra de la hipótesis 1). Conforme aumente la potencia y la velocidad de los computadores, es posible

utilizar procedimientos multidimensionales de retrazado del rayo haciendo uso de modelos ionosféricos extremadamente complejos, lo cual reducirá el número de hipótesis con respecto a las necesarias actualmente. Los actuales programas de predicción de la propagación en ondas decamétricas, tales como Ioncap y otros, son útiles a efectos de planificación pero tienen un valor limitado en aplicaciones SSL, puesto que se basan en promedios tomados a lo largo de 12 meses y no tienen debidamente en cuenta el estado de la ionosfera en tiempo real.

La hipótesis 3) relativa a la horizontalidad del espejo de reflexión equivalente da lugar a errores más elevados en circuitos cortos. Este error es inversamente proporcional al coseno del ángulo de elevación. En la práctica, la superficie ionosférica reflectora puede tener una inclinación de hasta 4 ó 5º con respecto a la horizontal debido a gradientes a gran escala (como los que se producen a la salida del sol o en las proximidades de la anomalía ecuatorial) y gradientes a pequeña escala ("inclinaciones") asociados a perturbaciones ionosféricas itinerantes. En consecuencia, para poder aplicar el método SSL a circuitos cortos, es preciso que la ionosonda también sea capaz de medir las inclinaciones ionosféricas locales, para que éstas puedan tenerse en cuenta. No obstante, existen algunas evidencias de que la medición de inclinaciones no mejora los resultados de la línea de marcación [BRAMELY, 1953].

4.7.3.4.6 Ángulo de elevación para SSL

Con excepción del hecho de tener en cuenta el campo magnético de la Tierra para calcular el valor de la frecuencia vertical equivalente, las hipótesis que determinan la validez del método SSL clásico empiezan a fallar en función de la distancia al emisor de ondas decamétricas, fundamentalmente en los dos extremos correspondientes al corto alcance y al largo alcance. Una vez entendidas las razones por las que empiezan a no ser válidas las hipótesis del método clásico, se han desarrollado métodos SSL para dar validez a las estimaciones de distancia en estos dos extremos. Para discutir estos métodos, el espectro puede dividirse en tres categorías: corto alcance, alcance medio y largo alcance.

4.7.3.5 Comparación de métodos de localización

CUADRO 4.7-7

Comparación de métodos de localización

Elemento	Radiorrecalada / marcaciones separadas	Triangulación	Localización TDOA	SSL (sólo ondas decamétricas)
Número necesario de estaciones	1 si se dispone de funcionalidades de radiorrecalada o de marcaciones separadas	2 para localización mediante AOA 3 para localizaciones sin ambigüedades	Se necesitan al menos 3 estaciones y estaciones adicionales contribuyen a resolver la ambigüedad	1
Material necesario	Antena de radiogoniometría sobre un vehículo No se necesita red	Un radiogoniómetros por emplazamiento Red de baja velocidad de datos para el intercambio de coordenadas y de resultados de AOA	Red de datos para transferir señales digitales Requisitos poco exigentes para antena y receptores Sincronización compartida (normalmente se trata de sistemas GPS)	1 estación que mide elevación y acimut, y un método de caracterización ionosférica tal como el de sondas ionosféricas, predicación o calibración

Elemento	Radiorrecalada / marcaciones separadas	Triangulación	Localización TDOA	SSL (sólo ondas decamétricas)
Las prestaciones dependen de la geometría del sistema de transmisor/localiza-ción	No aplica	La precisión es mejor en el centro del triángulo si se utilizan 3 radiogoniómetros Fuera del triángulo la precisión de la localización disminuye progresivamente.	La precisión es mejor en la zona limitada por los emplazamientos receptores. Fuera del triángulo la precisión disminuye a aproximadamente la de una única línea de marcación	SSL solamente no tiene ambigüedades para una señal de un único salto
Las prestaciones dependen de la anchura de banda de la señal entrante	No Requiere señales permanentes o de larga duración	En función del método utilizado	TDOA puede no ser adecuada para anchuras de banda muy estrechas o señales no moduladas	No
Dedicado para estaciones móviles o fijas	Sólo móvil	Fija y móvil	Fija y móvil; móvil puede no ser práctica función de los requisitos relativos a los enlaces de datos	Fija
Puede resolver señales de trayectos múltiples y de fuentes múltiples	No es lo normal, ya que a menudo utiliza métodos convencionales tales como los interferómetros	Véase el Cuadro 4.7-5 sobre fuentes parcialmente coherentes	Sí con técnicas de procesamiento TDOA avanzadas	Véase el Cuadro 4.7-5 sobre fuentes parcialmente coherentes

4.7.3.6 Métodos de localización combinados

En general no existe un único método, tal como los basados en la diferencia de tiempos de llegada (TDOA) y en el ángulo de llegada (AOA), que proporcione una estimación de localización precisa en cualquier circunstancia. Cada método tiene sus ventajes y limitaciones en términos de precisión de la localización.

El método de localización basado en la diferencia de tiempos de llegada (TDOA) proporciona, por lo general, una precisión de localización mejor para señales de banda amplia que el método de localización basado en el AOA.

No obstante, para la localización de emisores los métodos basados en TDOA requieren un número de estaciones relativamente superior que los métodos basados en AOA. Por ejemplo, los métodos basados en TDOA requieren disponer de al menos tres estaciones adecuadamente distribuidas para la localización.

Por otro lado, los métodos basados en AOA requieren dos estaciones para la localización. No obstante, si la estación está a mucha distancia del transmisor un pequeño error en el ángulo de medida da lugar a un error importante de localización.

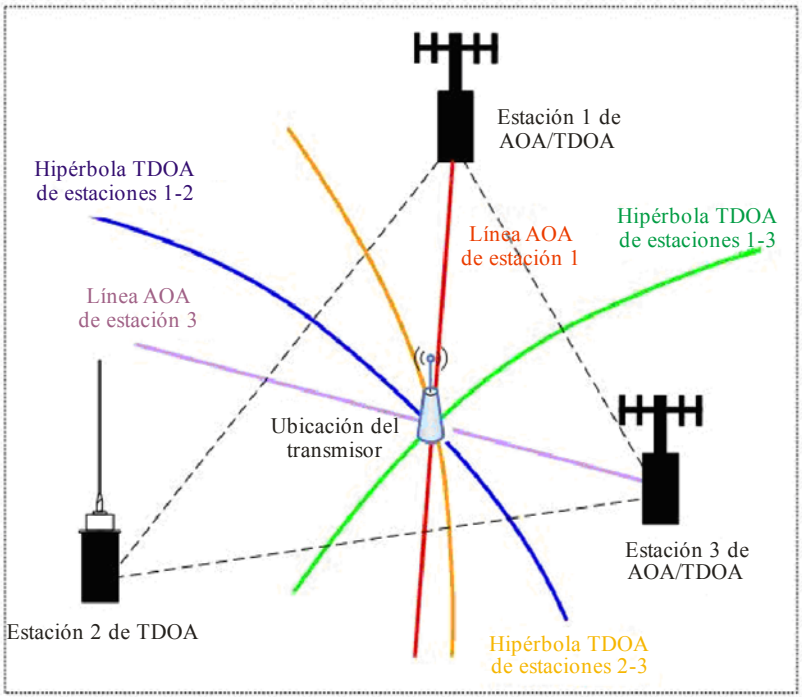
Por tanto, para mejorar la precisión de la localización, debe considerarse la utilización de dos o más métodos de localización que se complementen mutuamente.

La localización se realiza mediante el procesado de la información disponible en cada estación, incluyendo mediciones de AOA, mediciones de TDOA e información sobre la posición de la estación.

La combinación de los métodos AOA y TDOA contribuye a eliminar la ambigüedad de la localización asociada a la utilización exclusiva del método TDOA y puede mejorar la precisión de la localización. Esto se ilustra en la Fig. 4.7-23.

FIGURA 4.7-23

Resultados mejorados basado en la utilización combinada de AOA y TDOA



Spectrum-4.7-23

Referencias bibliográficas

BARFIELD, R. H. [1947] Statistical plotting methods for radio direction-finding. J. Inst. Elec. Engrs., Vol. 94, Part IIIA, p. 15, 673.

BIENVENU G. , KOPP L. [1983] – "Optimality of High Resolution Array Processing using the Eigenvalue Approach" IEEE trans – ASSP vol ASSP-31n°5, Act. 1983.

BRAMLEY, E. N. [1953] Direction-finding studies of large-scale ionospheric irregularities, *Proceedings of the Royal Society*, Londres, 1953.

BULL, J. R. [1990] A Compact Antenna Array for Direction-finding in the HF Band. Proc. of the Tactical Communications Conference, Vol. 1, Ft. Wayne, Indiana, Estados unidos de América 24-26 Abril 1990. IEEE Cat. No. 90TH0258-4.

DAVIES, K. [1990] *Ionospheric radio.*Peter Peregrinus Ltd., Londres, Reino Unido.

DICK, M. I. y BRADLEY, P. A. [Noviembre, 1992] The R.A.L. Multi-Quasiparabolic Model Ionosphere. *Electron.Lett.,* Vol. 28 No. 23, p. 2123-2125.

E. WALACH [1984] – "on Super-Resolution Effects in Maximum Likelyhood Adaptive Antenna Arrays" IEEE-trans-AP vol AP-32 n°3 march 1984.

GETHING, P. J. [1991] *Radio Direction-finding and Superresolution,* Peter Peregrinus Ltd. on behalf of the Institution of Electrical Engineers, Londres, Reino Unido.

ITU HANDBOOK [2005] – Computer-Aided Techniques for Spectrum Management (CAT), Geneva.

HAYKIN, S., REILLY, J. P., KEZYS, V. and VERTATSHITSCH, E. [1992] Some aspects of array signal processing. *Proc.IEE,* Part F, Vol. 139, No. 1, p. 1-26.

JEFFREY, Z. R., MIDDLETON, P. T. and WINKLER, C. [1988] Accurate measurements of the total angle of arrival of HF skywaves. AGARD Symp.Proc., Ionospheric structure and variability on a global scale and interaction with atmosphere, magnetosphere. Munich, Alemania.

KOGAN V.V., PAVLIOUK A.P. [2004a] – Methodology of spectrum monitoring networks planning – Proceedings of the Seventeenth International Wroclaw Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility, EMC-2004. Wroclaw, Polonia.

KOGAN V.V., PAVLIOUK A.P. [2004b] – Analysis of location coverage templates in spectrum monitoring – Proceedings of the Seventeenth International Wroclaw Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility, EMC-2004. Wroclaw, Polonia.

KRUTOVA O.E., KOGAN V.V., PAVLIOUK A.P.[2005] – Advanced software for planning and optimization of spectrum monitoring networks – Proceedings of the Sixth International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology, San Petesburgo, Federación de Rusia.

KRUTOVA O.E., LUTHERW., PAVLYUK A.P. [2006] – Location characteristics of the USA HF international spectrum monitoring network using new software – Proceedings of the Eighteenth International Wroclaw Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility, EMC-2006. Wroclaw, Polonia.

MCNAMARA, L. F. [1988a] Ionospheric limitations to the accuracy of SSL estimates of HF transmitter positions. AGARD Symp.Proc., Ionospheric structure and variability on a global scale and interaction with atmosphere, magnetosphere. Munich, Alemania.

MCNAMARA, L. F. [1988b] Ionospheric modelling in support of single station location of long-range transmitters. Accepted for publication by *J. Atmos. Terr. Physics*.

MCNAMARA, L. F. [June 1992] Procedures for Determining the Location of an HF Radio Transmitter. A paper presented at the AGARD Symposium on Radio Location Techniques, Londres, Reino Unido.

MCNAMARA, L. F. [1992] *The Ionosphere Communications, Surveillance, and Direction-finding*. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, Estados Unidos de Amércia.

MILL, D. S. [1990] Multiple signal DF using superresolution: a practical assessment.*Electron.and Comm. Eng. J.*

MUGGLETON [1975] A method for predicting foE at a determined moment and in any place.*J. des télécommunications.*Vol. 42.

NURMATOV B.N., TITOV A.V.[2005]– Influence of frequency, direction finder parameters and actual terrain topography on features of Kogan-Pavliouk location templates – Proceedings of the Sixth International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology, Saint-Petersburg, Russia.

PRIME-URSI [May 1992] Workshop on Ionospheric Modelling and Mapping. Maquetes, Spain.

RICE, R. W. *et al.*[1981] Remote control of the FCC long range HF direction-finders. Georgia Institute of Technology, Estados Unidos de América.

ROSS, W. [1947] The estimation of the probable accuracy of high-frequency radio direction-finding bearings. *J. Inst. Elec. Engrs.,* Vol. 94, Part IIIA, **15**, 722.

SCHMIDT, R. D. [1986] Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation.*IEEETrans. on Ant. Prop.,* Vol. AP-34, No. 3, p. 276-280.

S.O. PILLAY & B.H JOHNSON [1989] – "Performance Analysis of MUSIC type High Resolution Estimators for Direction Finding in Correlated and Coherent Sources". IEEE trans ASSP vol 37 n°8, Aug 1989.

TOURÉ, H.I. [2004] Possibilities of known emission sources use for correcting data on the current ionospheric characteristics. Elektrosvyaz, No 9. Moscú, Federación de Rusia.

W.F. GABRIEL [1980] – "Spectral Analysis and Adaptative Array Super-Resolution techniques" Proc IEEE vol 68 n°6, pp 6546-666 Junio 1980.

ZATMAN, M. A., STRANGEWAYS, H. J. and WARRINGTON, E. M. [1993] Resolution of multi-moded HF transmissions using the DOSE algorithm. IEE conference Publication 370, 8th Conference, Antennas and Propagation, p. 415-418.

ZATMAN, M. A. and STRANGEWAYS, H. J. [1993] Super-resolution direction-finding algorithms for the characterisation of multi-moded signals. Proc. of 53rd AGARD Electromagnetic wave propagation panel (EPP), Rotterdam, Países Bajos.

ZATMAN, M. A. and STRANGEWAYS, H. J. [1994] Bearing measurements on multi-moded signals using single snapshot data.1994 International Symposium Digest, *Ant. and Prop.*, Vol. 3, p. 934-937, IEEE Catalog No. 94CH3466-0.

Recomendaciones del UIT-R

NOTA – En todos los casos se debe utilizar la última edición disponible de la Recomendación.

Recomendación UIT-R M.428 - Radiogoniometría y radio-recalada en la banda de 2 MHz a bordo de los barcos.

Recomendación UIT-R M.489 - Características técnicas de los equipos de radiotelefonía en ondas métricas utilizados en el servicio móvil marítimo con una separación de 25 kHz entre canales adyacentes.

Recomendación UIT-R M.589 - Características técnicas de los métodos de transmisión de datos y de protección contra la interferencia para los servicios de radionavegación en las bandas de frecuencias comprendidas entre 70 y 130 kHz.

Recomendación UIT-R P.1239 - Características ionosféricas de referencia del UIT-R.

Recomendación UIT-R P.1240 - Métodos del UIT-R para la predicción de la MUF básica, de la MUF operacional (o MUF de explotación) y trayecto del rayo.

Recomendación UIT-R SM.854 - Estaciones de radio y de comprobación de señales por debajo de 30 MHz.

Recomendación UIT-R TF.767 - Utilización de los sistemas globales de navegación por satélite para la transferencia de señales horarias de gran precisión.

Informe UIT-R SM.2125 – Parámetros y procedimientos de medición de las estaciones y receptores de comprobación técnica en las bandas de ondas decamétricas/métricas/decimétricas.

4.8 Análisis de la señal e identificación del transmisor

4.8.1 Introducción

La comprobación técnica radioeléctrica está cambiando. Hoy en día las señales no solamente tienden a ser digitales en su mayoría sino que también se explota la "capacidad residual" de las señales convencionales a fin de transmitir información adicional. Además, se utilizan nuevos desarrollos y técnicas para realizar las tareas de forma más eficiente. Por todo ello, el análisis de la señal es una herramienta cada vez más importante para la comprobación técnica y, en particular, resulta de gran ayuda para la identificación del transmisor. El análisis de la señal extrae cualquier información posible de una señal transmitida. Ello permite la caracterización de la señal transmitida (frecuencia, modulación, etc.), del transmisor (su ubicación) y/o la extracción de información transmitida.

El análisis que se presenta a continuación está relacionado con señales de banda estrecha, como las de redes móviles privadas (PMR) analógicas o redes PACTOR y señales de banda ancha, como UMTS, y señales de impulsos o señales moduladas con MDFO.

El análisis de la señal es una tarea compleja de la comprobación técnica del espectro que deben realizarla expertos en comprobación técnica especialmente capacitados. A tal fin, los expertos deben manejar hardware y software que, en caso de no estar comercialmente disponibles, debe ser ensamblado por los ellos mismos.

4.8.1.1 La identificación en el marco de la reglamentación de comprobación técnica del espectro

Con el objetivo de enfatizar la necesidad de la identificación en términos reglamentarios, el Artículo 19 (Identificación de las estaciones) del Reglamento de Radiocomunicaciones, establece en su número 19.1 que

"Todas las transmisiones deben poder ser identificadas por medio de señales de identificación o por otros medios".

Ello puede incluir como medio de identificación directa el distintivo de llamada, nombre de la estación, nombre del organismo de explotación, identidad del servicio móvil marítimo, matrícula, número de identificación de vuelo, número de identificación de llamada selectiva o cualquier otro rasgo distintivo que permita una fácil identificación internacional. Otra forma es analizar las características de una señal o una emisión y deducir de ello la identificación.

No obstante, el número 19.1.1 del RR también reconoce que no siempre es posible la transmisión de las señales de identificación en algunos sistemas radioeléctricos (por ejemplo, radiodeterminación, sistemas de radioenlaces y estaciones espaciales). La clase de emisión puede utilizarse en cualquier caso como forma de identificación. A modo de ejemplo, en el Anexo 1 se presentan varios códigos desarrollados para los servicios móviles marítimo y marítimo por satélite. En el Anexo 2 se muestra una posible ampliación de códigos mediante caracteres suplementarios para aumentar las posibilidades de clasificación e identificación.

4.8.1.2 Necesidad de identificación para actividades de comprobación técnica del espectro

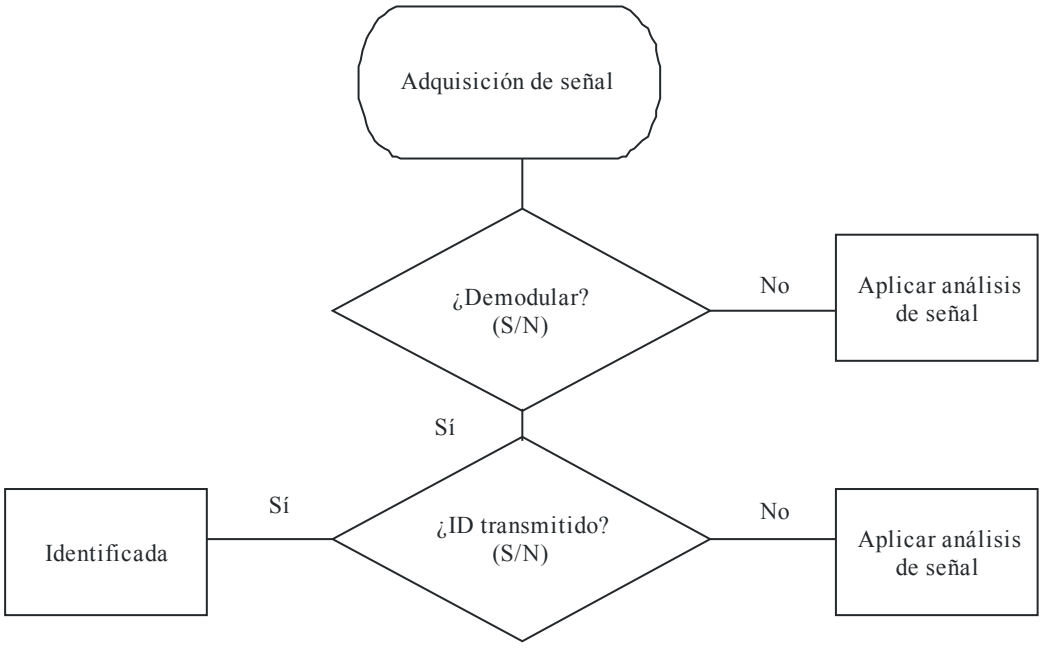
En el marco de las competencias de un departamento de comprobación técnica del espectro, la identificación puede ser necesaria para las siguientes tareas:

– identificación de usuarios del espectro;
– determinación de la utilización del espectro;
– verificación de la observancia de las condiciones de las licencias otorgadas;
– eficiencia de la utilización del espectro;
– detección e identificación de usos ilícitos;
– detección e identificación de emisiones interferentes;
– localización del origen de las señales.

En la Fig. 4.8-1 se muestra un proceso básico para la identificación del emisor en base a su señal.

FIGURA 4.8-1

Tareas básicas para la identificación de un transmisor



4.8.1.3 Aplicaciones del análisis de señal en la comprobación técnica del espectro

En las tareas de comprobación técnica del espectro el análisis de la señal se utiliza a menudo para la identificación de señales y es especialmente necesario cuando las herramientas básicas de comprobación técnica del espectro no son suficientes para identificar una señal, tal como se recoge en la Fig. 4.8-1. El análisis de la señal consiste en la detección, análisis espectral, identificación de la modulación, demodulación analógica y digital, identificación de código y decodificación del canal. El análisis de la correlación, la criptografía y la esteganografía (técnica de ocultación de mensajes) son, hasta cierto punto, parte de este análisis. Algunas de estas técnicas conexas se describen en otros Capítulos de este Manual. Las legislaciones nacionales pueden establecer la prohibición de algunas de estas técnicas

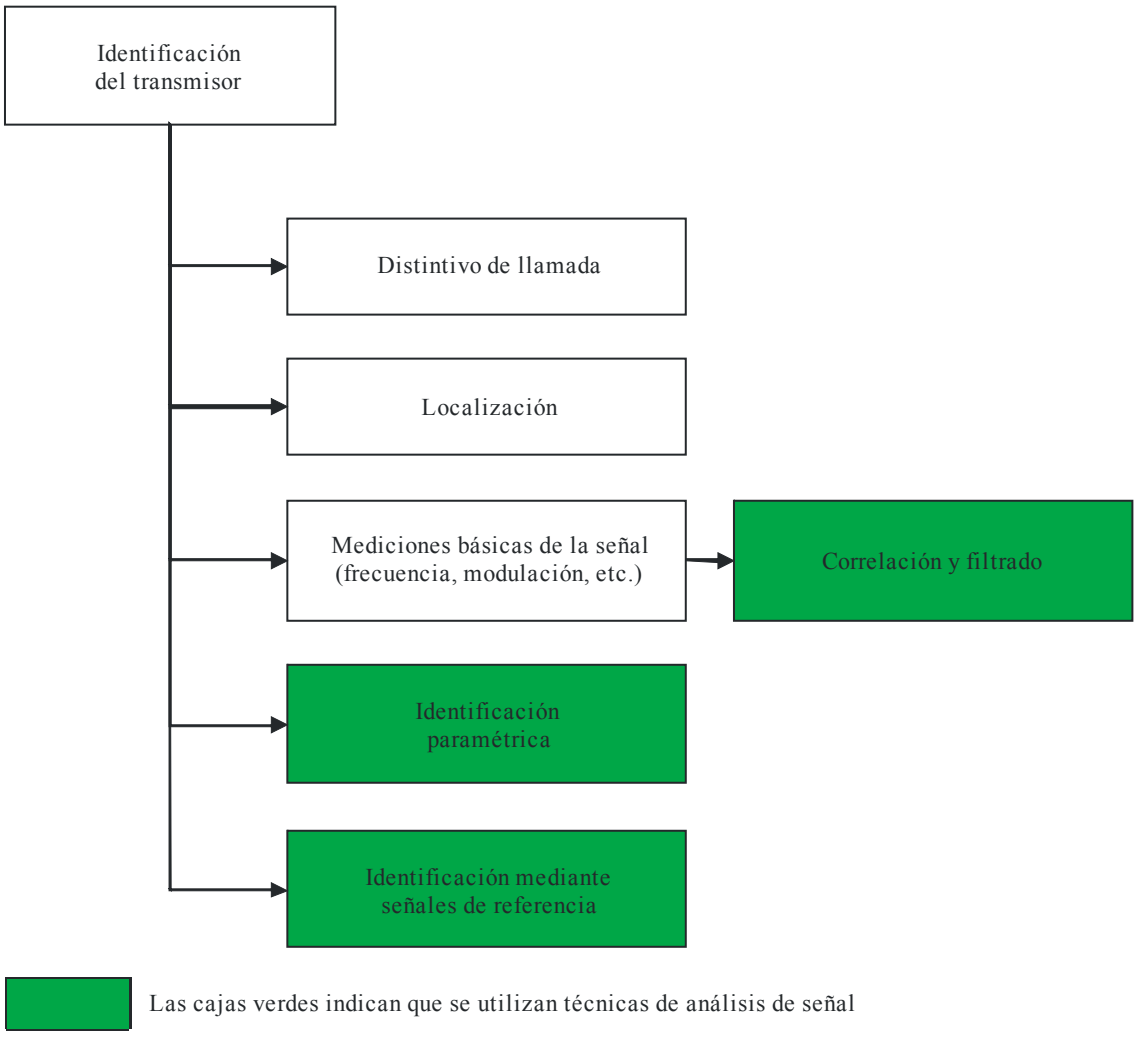
El análisis de la señal no es necesariamente una tarea compleja y la escucha de estaciones de radio con objetivos de identificación puede considerarse una tarea de análisis de señal.

Aunque las tareas pueden realizarse manualmente, la mayoría pueden automatizarse para mejorar el proceso, particularmente, por ejemplo, en términos de tiempo de procesado.

Para la identificación de un transmisor o de una señal, se utilizan diferentes métodos. En la Fig. 4.8-2 se resumen los principales.

FIGURA 4.8-2

Identificación de un transmisor



Spectrum-4.8-02

4.8.2 Identificación mediante distintivo de llamada o mediciones básicas de la señal

4.8.2.1 Método de reconocimiento del identificador o de identificación mediante la identificación del distintivo de llamada

Estas técnicas permiten identificar una emisión y un transmisor realizando la medición de un único parámetro.

Formación de distintivos de llamada

Para formar los distintivos de llamada se utilizan las series internacionales atribuidas a los países de acuerdo con el Cuadro que figura en el Apéndice 42 del RR. En la Sección III del Artículo 19 del RR y en la Resolución 13 (Rev.CMR-97) aparece información adicional sobre la formación de los distintivos de llamada para los diversos servicios.

En el Anexo 1 se incluye un ejemplo de dichas transmisiones.

Sistemas radiotelegráficos

Las transmisiones pueden emplear un solo canal, un sistema de múltiplex por división en el tiempo, un sistema de división de frecuencia o una combinación de ellos. Cuando se trata de transmisión en un solo canal, el distintivo de llamada puede transmitirse en código Morse o en un código de teleimpresor con el mismo tipo de modulación utilizado para el tráfico en ese canal concreto. A menudo se emplea entrelazado de bits (por ejemplo, TORG-10 o FEC-100). En los sistemas con múltiplex por división de frecuencia, en los que se transmiten muchos canales de tráfico distintos, a veces se decide que un canal sea utilizado por los propios técnicos para trabajos de ingeniería. A menudo se trata del único canal utilizado a efectos de identificación, especialmente si se ha llegado a un acuerdo para proteger las comunicaciones mediante dispositivos aleatorizadores o de cifrado de los canales de tráfico. Normalmente los canales de servicio destinados a trabajos de ingeniería se dejan abiertos.

Sistemas radiotelefónicos

El método más común de identificación consiste en transmitir el distintivo de llamada en lenguaje claro; sin embargo, en las transmisiones telefónicas en banda lateral única, puede recurrirse al método de superponer el distintivo de llamada con modulación de amplitud de la portadora reducida en código Morse.

Sistemas radioeléctricos que aseguran un servicio mixto

Un sistema mixto típicamente emplea emisiones de banda lateral única para uno o varios canales telegráficos dispuestos en múltiplex por división de tiempo o de frecuencia, y uno o más canales telefónicos que modulan la misma portadora de radiofrecuencia, que puede estar completa, reducida o suprimida.

En los canales de un servicio mixto, puede emplearse cualquiera de los métodos indicados para la identificación las estaciones que trabajan en múltiplex con división en el tiempo o múltiplex con división de frecuencia.

4.8.2.2 Mediciones de señal básicas para la identificación de transmisores sin el distintivo de llamada

Cuando no se dispone de distintivo de llamada, la identificación puede realizarse mediante la localización del transmisor (véase la sección 4.7 sobre radiogoniometría y localización) o caracterizando la señal recibida (con receptor o analizador de espectro).

En algunos casos, la identificación puede hacerse demodulando la señal. No obstante, los servicios móviles marítimos y los utilizados en las comunicaciones para defensa a menudo utilizan modernos aleatorizadores de voz. Éstos utilizan diversas técnicas que, esencialmente, reconfiguran el espectro vocal en frecuencia y tiempo. De esta forma, los equipos de recepción comunes no permiten escuchar la señal de voz si no se dispone de un equipamiento especial. Normalmente en los equipos de transmisión se utilizan técnicas criptográficas modernas complejas y resulta difícil identificar la presencia de una señal vocal en la señal recibida.

La caracterización de una señal implica medir cada parámetro básico como frecuencia, modulación y todos los parámetros que puedan utilizarse para especificar la forma de onda de la señal. En la sección 4.9 se incluye, a modo de ejemplo, información para la caracterización de una señal de impulsos.

En algunos casos puede utilizarse un osciloscopio para obtener algún tipo de patrón reconocible que pueda identificarse y catalogarse para su utilización futura. Dicho procedimiento es esencial para crear una base de datos de señales detectadas a fin de facilitar futuras identificaciones.

Durante las observaciones de comprobación técnica pueden almacenarse parámetros de las señales detectadas (incluida frecuencia, desplazamiento, velocidad en baudios, marcación, grupo de usuarios, etc.) en ficheros informatizados.

Esta base de datos, que forma parte de los resúmenes que se envían a la Oficina de Radiocomunicaciones de la UIT de conformidad con el Artículo 16 del RR, puede realizarse en el formato que se desee. Gracias a ello, la búsqueda de espectro vacante de cualquier tamaño se convierte en algo sencillo y además resulta de utilidad para la identificación de interferencias.

Otros ejemplos de ficheros de apoyo para la elaboración de la base de datos son el Artículo 5 del RR (Cuadro de atribución de bandas de frecuencias) incluidas las notas, un resumen de la Lista Internacional de Frecuencias (LIF) y una lista de todas las estaciones conocidas que transmiten boletines de prensa.

Es preferible utilizar ficheros automatizados porque facilitan la búsqueda o selección de ciertos parámetros. No obstante, aún existen "manuales" elaborados por organizaciones de comprobación técnica que contienen abundante información no fácilmente recopilable en ficheros. Dichas publicaciones son muy útiles a efectos de identificación.

4.8.3 Enfoque general del proceso de análisis de la señal

La identificación, en términos de proceso de análisis de señal, puede describirse con ayuda de la Fig. 4.8-3. En el contexto de la comprobación técnica del espectro, normalmente se considera que el análisis de la señal conlleva la realización de las tareas siguientes (en relación con la detección espectral):

- asignar un nombre si se trata de un sistema conocido;
- si es posible, extraer información oculta;
- determinar parámetros de la señal en caso de ser requerido (si no es posible la opción anterior):
  - características de modulación (como velocidad de símbolos, desplazamiento de frecuencia, modulación lineal/no lineal, tipo de modulación: analógica/digital, modulación de fase, frecuencia o amplitud, número de estados de modulación, constelación para modulación lineal);
  - características temporales (forma de onda de las ráfagas);
  - o características espectrales (banda estrecha/amplia, señales de portadora única o de múltiples portadoras, etc.).

El tiempo de arranque y parada y la duración de la emisión también pueden utilizarse para describir la señal.

Teniendo en cuenta el diagrama de la Fig. 4.8-3, el primer paso para identificar la señal es analizar y verificar si la ésta puede medirse fácilmente. El paso siguiente es determinar si puede ser demodulada y, en ese caso, cuál es el demodulador adecuado que puede aplicarse.

Seguidamente, puede analizarse la información demodulada, pudiendo ser necesaria una etapa de decodificación para el procesado posterior de los datos, es decir, la extracción de información del flujo de datos demodulados. Si la demodulación no es posible, la señal se especifica mediante sus parámetros intrínsecos (frecuencia, anchura de banda, etc.).

En la Fig. 4.8-4 se ilustran, mediante un ejemplo que muestra una secuencia de tareas para identificar una señal de banda estrecha contenida en una señal de banda ancha, los dos primeros pasos del proceso de análisis de la señal. Para ello se utilizan herramientas dedicadas al análisis de la señal descritas con detalle en el punto siguiente.

4.8.4 Consideraciones sobre las capacidades de un sistema para el análisis de la señal

A continuación se resumen los requerimientos:

– modularidad del hardware y del software;

– utilización de sistemas normalizados de propósito general (por ejemplo, PCI, enlaces normalizados DSP, LAN, LXI…);

– capacidad en tiempo real, cuando sea necesario, mediante sistemas operativos en tiempo real y sistemas operativos DSP;

– capacidad de canal dual, para aquellas aplicaciones que la necesiten (por ejemplo, el proceso de correlación);

– componentes y algoritmos de procesamiento de la señal optimizados para gamas de frecuencias específicas, tales como ondas decamétricas, métricas/decimétricas o centimétricas;

– grabación y reproducción de señales de banda ancha y (o) de banda estrecha; la anchura de banda de la señal y la duración de la grabación determinan las características técnicas del sistema, por ejemplo, el tamaño de la memoria;

– control remoto desde una estación de trabajo con una interfaz de usuario potente y reconfigurable;

– opcionalmente, conexión de baja velocidad, por ejemplo, sobre una línea telefónica adaptada alas necesidades del usuario;

– posibilidades de interfaz con equipos existentes, tales como receptores y grabadores;

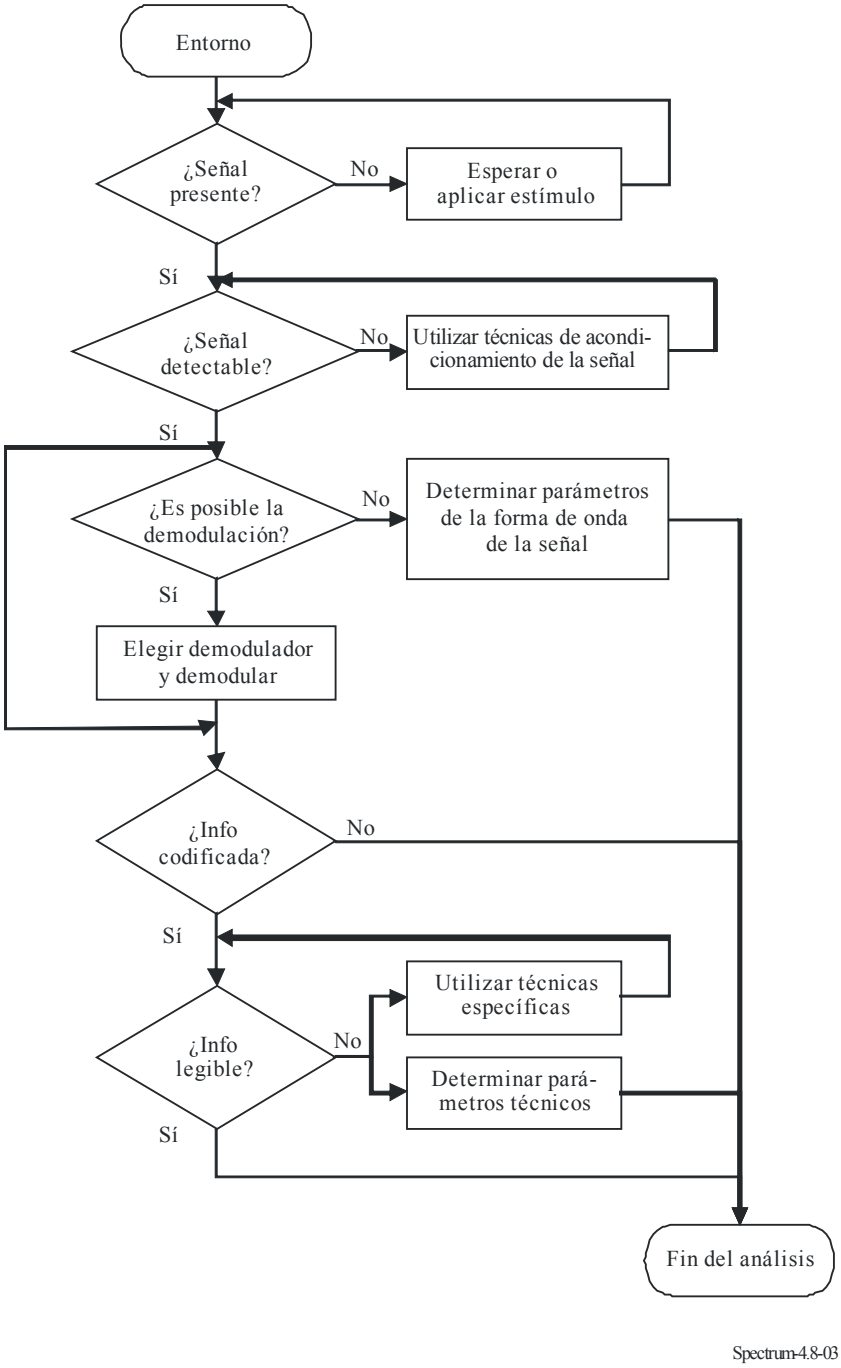
– capacitación por parte de los suministradores;

– software ampliable por el usuario y por el fabricante cuando sea necesario.

Algunas herramientas de análisis no pueden trabajar en tiempo real debido a la potencia de procesamiento requerida y a los costos asociados. Otras herramientas requieren un ajuste manual que exige mucho tiempo, lo cual no es recomendable cuando la señal solamente se presenta de forma fortuita. Por lo tanto, es necesario disponer de algún dispositivo de grabación que permita grabar las señales de banda ancha o de banda estrecha. Los elementos más importantes de dichos dispositivos son la anchura de banda, el margen dinámico y el máximo tiempo de grabación no atendida. Otro motivo por el que se recomienda utilizar grabadores es que no todos los sistemas de análisis de señal son portables, que en ocasiones puede ser una característica necesaria.

FIGURA 4.8-3

Proceso de análisis de señal



4.8.5 Herramientas de análisis de la señal

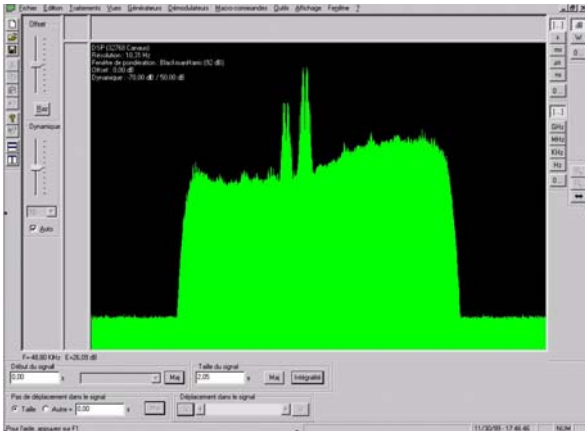
Las tareas del proceso de análisis de la señal pueden realizarse de forma manual o automática mediante un sistema dedicado. Esta última solución puede ser abierta y flexible en términos de la arquitectura hardware y de las funcionalidades conexas a fin de adaptar su capacidad de análisis de señal a nuevas señales y técnicas.

El análisis de la señal comienza en la práctica con la identificación de la misma, normalmente mediante la medición de la frecuencia. La identificación de señales y las técnicas de medición deben estar basadas en representaciones adecuadas de la señal muestreada. Las herramientas y las facilidades, tales como zoom, copiar/pegar en el dominio del tiempo y de la frecuencia, deben ser implementadas en la interfaz. En la Fig.

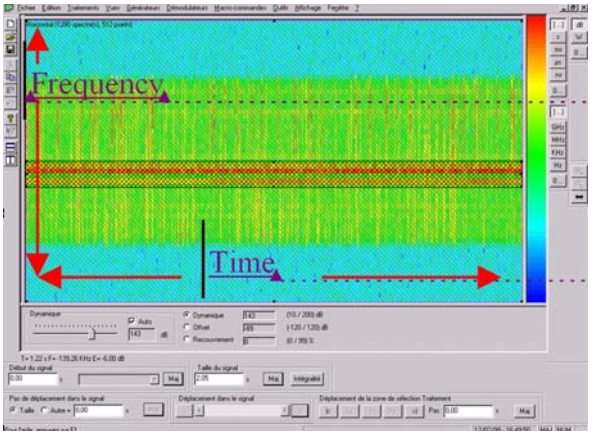
4.8-5 se muestra un ejemplo. Dichas herramientas son particularmente adecuadas para aislar la señal analizada.

FIGURA 4.8-4

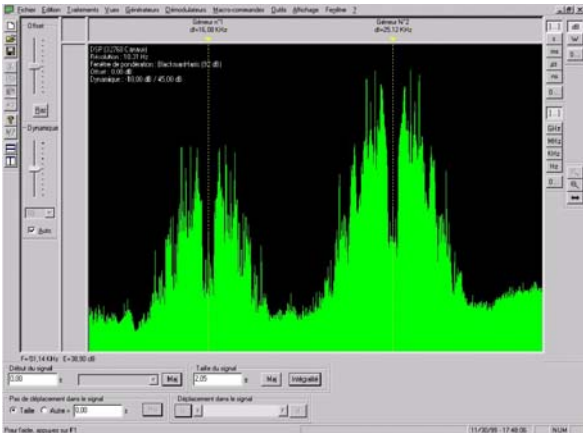
Ejemplo de extracción de una señal de banda estrecha de una señal de banda ancha



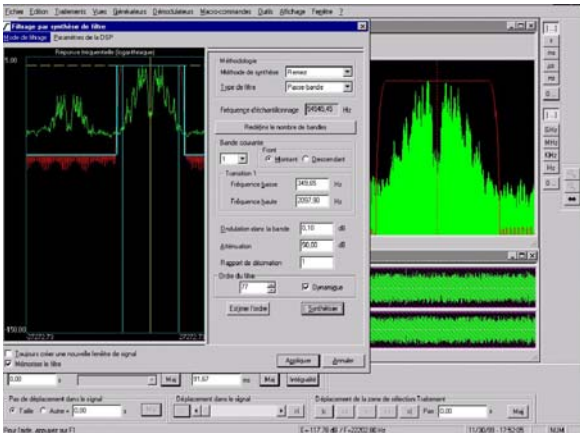
Paso 1: Detección de la señal de banda estrecha en el monitor de banda ancha



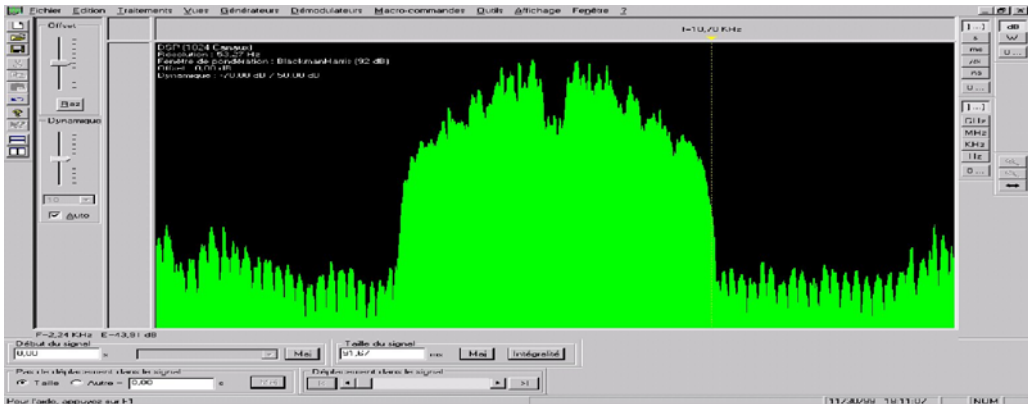
Paso 2: Análisis de la persistencia de la señal mediante un espectrograma



Paso 3: Visión de las señales de banda base extraídas (dos señales)



Paso 4: Diseño de un filtro digital para las mediciones sobre una única señal



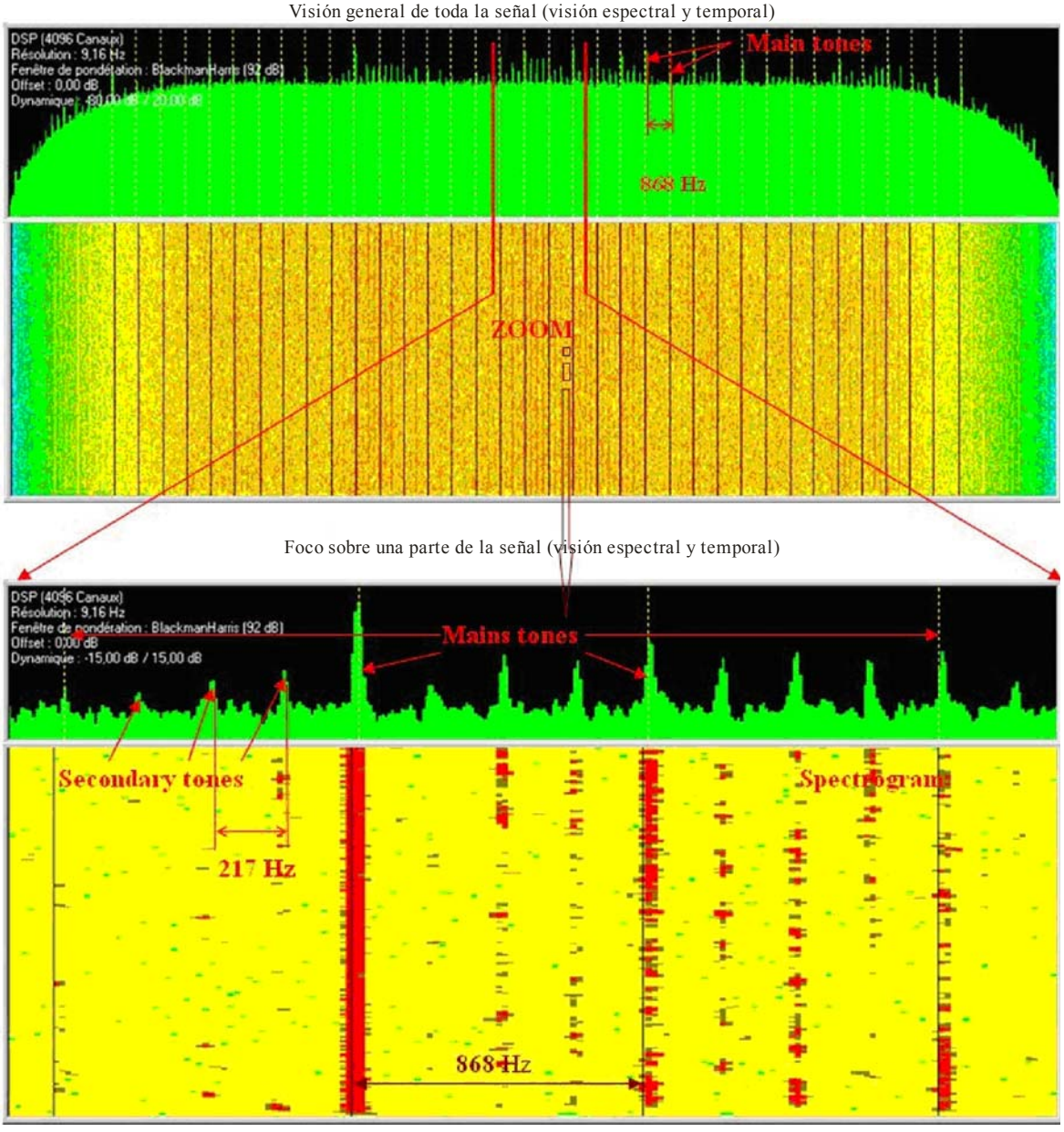
Paso 5: Representación del espectro final de la señal filtrada

En la Fig. 4.8-5 una representación espectral de la señal y el análisis del espectro permiten clasificar la señal examinando la portadora y las subportadoras. Por ejemplo, puede utilizarse una función de comparación espectral para realizar la identificación automática de sistemas de comunicaciones con un espectro definido. Para realizar una búsqueda automática de portadoras y su contabilización, así como para la medición de la anchura de banda de emisión, puede utilizarse un monitor de visualización espectral de alta resolución y varios algoritmos de búsqueda. Se recomienda disponer de una representación panorámica de la señal con resolución espectral y tiempo de integración variables. Una representación mixta espectral y temporal de las señales ayuda a reconocer y medir señales caracterizadas de ráfagas.

Con dichas herramientas es fácil extraer información básica directamente de la forma espectral de la señal (en los dominios de tiempo y frecuencia). No obstante, algunas de ellas requieren herramientas de procesado más avanzadas que constan esencialmente de herramientas matemáticas, como se describe en los puntos siguientes. En el resto de este punto se señalan las diferencias entre parámetros básicos y avanzados. Los parámetros básicos son aquellos que pueden deducirse de la forma espectral de la señal en bruto, mientras que los parámetros avanzados de una señal son aquellos que están disponibles una vez que la señal ha sido demodulada.

FIGURA 4.8-5

Ejemplos de interfaces específicos para soportar el análisis, identificación y medición



Spectrum-4.8-05

4.8.5.1 Determinación de parámetros básicos de la señal

Aunque los parámetros básicos de la señal pueden determinarse por medios gráficos, tal como se ha descrito anteriormente, también pueden utilizarse algunas herramientas matemáticas. Algunas de ellas se presentan en este punto. Una de las posibles técnicas es la estimación de los momentos de 2º y 4º orden de la señal.

Ello proporciona una determinación precisa de la portadora, las velocidades de símbolos y las velocidades de datos codificados para señales de portadora única, de múltiples portadoras y señales de pseudoruido/AMDC. En la mayoría de los casos, una señal modulada puede identificarse gracias a la determinación de algunas de sus características técnicas, como por ejemplo, la duración de los símbolos T_S, el tiempo de guarda T_g y el número de subportadoras.

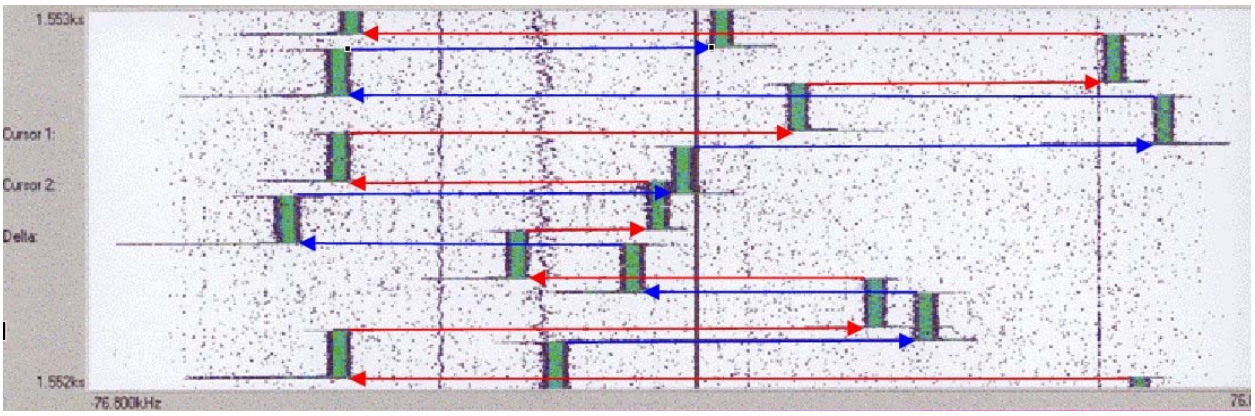
Estos aspectos se analizan en la sección 4.6. Dichas técnicas "ciegas" proporcionan elementos de identificación muy útiles para un análisis ulterior en el caso de señales de banda ancha o señales complejas.

En la Fig. 4.8-6 se muestra un ejemplo de análisis de la señal para determinar parámetros básicos mediante la caracterización de una señal con salto de frecuencia.

La Fig. 4.8-6 ilustra la capacidad del análisis en el dominio del tiempo para discriminar dos señales con diferentes patrones de salto de frecuencia. Cada patrón (flechas roja y azul) se ha identificado de forma manual. También puede hacerse de forma automática.

FIGURA 4.8-6

Ejemplo de caracterización de una señal con salto de frecuencia



Spectrum-4.8-06

Tras dicho análisis puede verificarse la conformidad con la norma y la señal puede demodularse utilizando un demodulador convencional. Si no fuera posible demodular la señal, puede realizarse una descripción técnica de la señal mediante parámetros como la frecuencia, amplitud y fase instantáneas.

Por ejemplo, una señal común de radar puede describirse mediante su señal en el dominio del tiempo y el salto de frecuencia mediante su patrón de salto de frecuencia (tiempo y frecuencia).

En el Cuadro 4.8-1 se resumen algunos métodos de extracción de la frecuencia central, la velocidad de símbolos y otros parámetros técnicos de señales digitales.

Dichos parámetros también pueden utilizarse para clasificar señales no digitales convencionales.

Para ilustrar el contenido del Cuadro 4.8-1, la velocidad de símbolos de una señal MAQ puede determinarse mediante el espectro de la amplitud instantánea A_i.

Los gráficos que siguen ilustran los resultados de la estimación de la velocidad de símbolos de una señal MAQ (en el caso de una señal MAQ-16 con una velocidad de símbolos de 62,5 KHz).

CUADRO 4.8-1

Algunos métodos para extraer información técnica en función de la modulación de la señal analizada

Parámetros que deben medirse	Herramientas de análisis	Tipo de modulación
PRF o longitud de ráfaga	Señal temporal de amplitud	MOO, Radar

Parámetros que deben medirse	**Herramientas de análisis**	**Tipo de modulación**
Presencia de señal	Correlación cruzada de la amplitud instantánea A_i con la señal de referencia	Cualquier tipo de modulación, pero especialmente para señales de espectro ensanchado de secuencia directa (DSSS)
	Densidad espectral de potencia	Cualquier tipo de modulación
Modulación – velocidad de la modulación síncrona o asíncrona (velocidad de símbolos)	Histograma de la duración de la amplitud instantánea, A_i, frecuencia instantánea, F_i, y fase instantánea, Φ_i	MOO MDF no filtrada, MDP no filtrada
	Espectro de la amplitud instantánea, A_i	MDP filtrada o no filtrada MDC no filtrada o tras un filtrado severo MAQ filtrada o no filtrada
	Espectro de la frecuencia instantánea, F_i elevada a la potencia N-ésima N (= 2(MDF2), 4 (MDF4))	MDF no filtrada
	Espectro de cruces por cero a la frecuencia instantánea, F_i	MDF filtrada o no filtrada MDP, MAQ, MDM
	Espectro del módulo de señal elevado a la potencia N (= 2 ó 4)	MDP & MAQ filtrada o no filtrada
	Espectro del módulo de señal elevado a la potencia N tras un filtrado severo en frecuencia	MDF filtrada o no filtrada
	Espectro de la señal elevada a la potencia N (N= 1/h)	MDC filtrada o no filtrad
Frecuencia de la portadora Frecuencias de las subportadoras	Densidad espectral de potencia	Cualquier tipo de modulación
	Histograma de la frecuencia instantánea, F_i	MDF
	Media de la frecuencia instantánea, F_i	MDF
	Espectro elevado a la potencia N (= 2 (MDP), 4 (MAQ) o 1/h para MDC)	MDP, MAQ, MPC
	Método de correlación espectral y de los momentos	MDA, MDP, MAQ
Anchura de banda de la emisión	Densidad espectral de potencia Comparación con la máscara o función de línea límite	Cualquier tipo de modulación
Distancia en frecuencia entre subportadoras (desplazamiento en caso de MDF)	Densidad espectral de potencia Búsqueda de armónicos y/o generadores de armónicos	MDF, MDFO, MDFO-C
	Histograma de la frecuencia instantánea, F_i	

La Fig. 4.8-8 proporciona un ejemplo en el que se obtiene una velocidad de símbolos de 62,5 kHz de una señal MDF-2 a partir de la frecuencia instantánea F_i elevada a la segunda potencia.

4.8.5.2 Determinación de parámetros de señal avanzados

Para caracterizar el esquema de modulación de la señal, pueden utilizarse los métodos/herramientas siguientes (después de determinar la frecuencia portadora y el comportamiento temporal de la señal):

– visualización de la sincronización de símbolos, tales como el diagrama de ojos y/o la constelación del diagrama de fases, de acuerdo con el tipo de modulación;

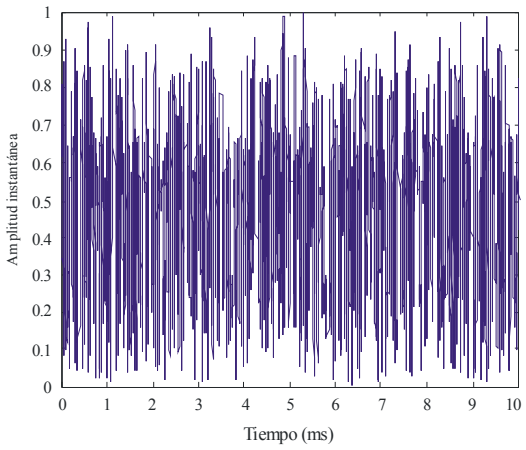
– representación polar para los tipos de modulación lineal (validación de la sincronización, determinación de los puntos de la constelación y las transiciones entre símbolos);

– representaciones mediante histogramas de las modulaciones de fase o de frecuencia (validación de la sincronización, determinación del número de subportadoras).

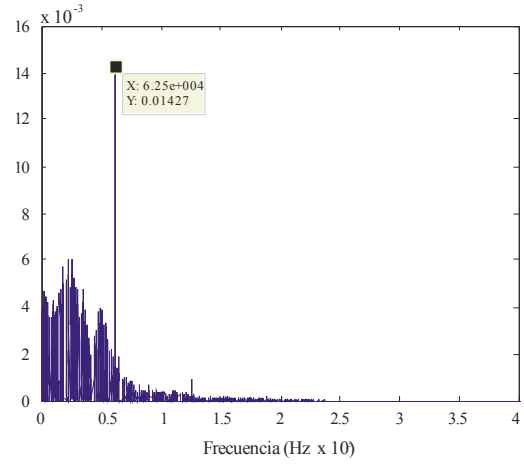
En el Cuadro 4.8-2 se resumen algunos de los algoritmos para la estimación de parámetros de modulación digital. Nótese que muchos de dichos métodos también son útiles para caracterizar señales analógicas.

FIGURA 4.8-7

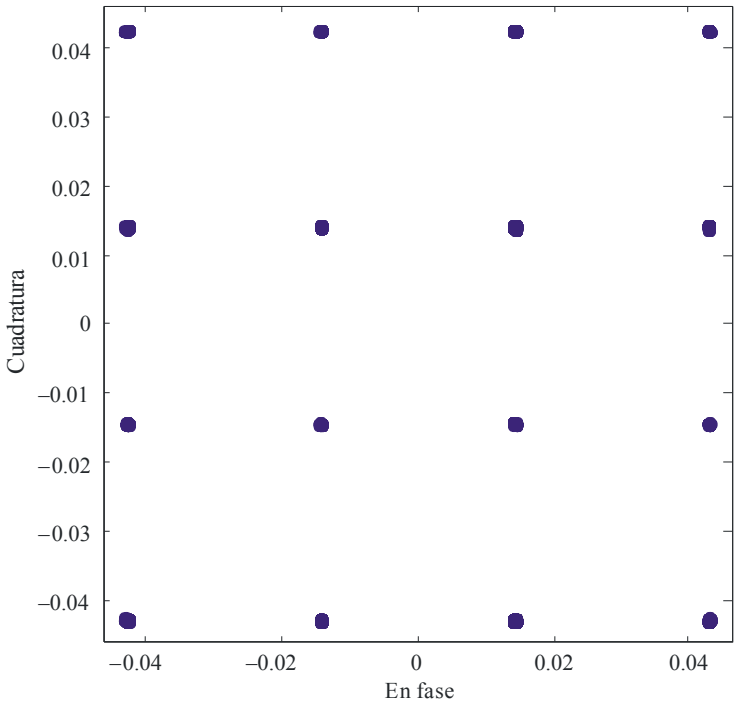
Ejemplo de determinación de la velocidad de símbolos de una señal MAQ-16 mediante su amplitud instantánea



Amplitud instantánea, A_i



Espectro de la amplitud instantánea, A_i

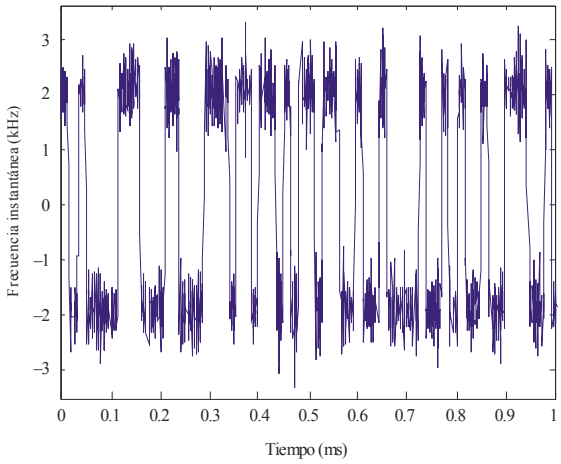


Constelación de una señal MAQ-16

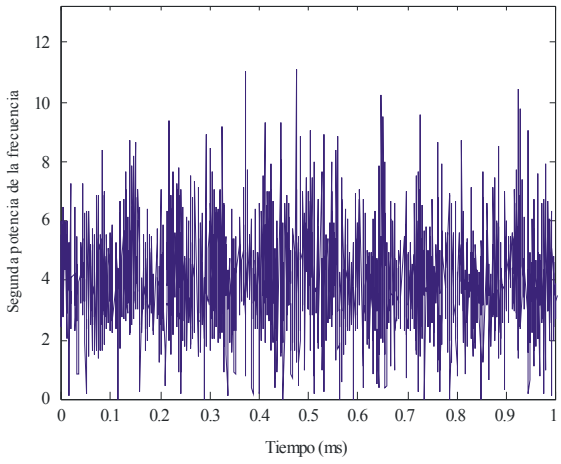
Spectrum-4.8-07

FIGURA 4.8-8

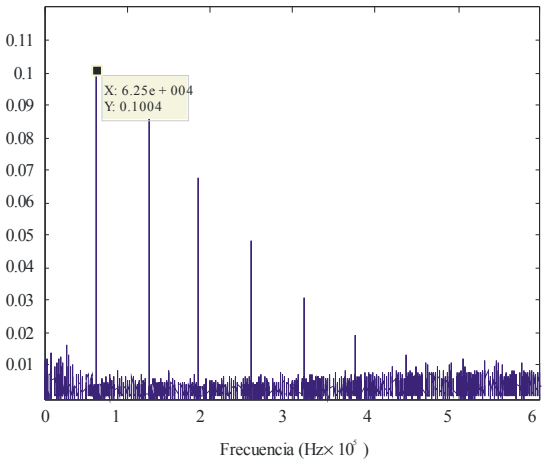
Ejemplo de determinación de la velocidad de símbolos de una señal MDF-2 mediante su frecuencia instantánea elevada a la segunda potencia



Frecuencia instantánea, F_i



Frecuencia instantánea, F_i elevada a la segunda potencia



Espectro de la frecuencia instantánea, F_i elevada a la segunda potencia

Spectrum-4.8-08

CUADRO 4.8-2

Algunos métodos para determinar los parámetros avanzados de una señal en función de la modulación de la señal analizada

Parámetros que deben estimarse	Herramientas de análisis	Tipo de modulación
Número de estados	Diagrama de la constelación y diagrama vector	MDP, MDPSQ, π/2 MDPDB, π/4 MDPQ, MAQ
	Histograma de la amplitud instantánea, A_i	MOO, MDA
	Histograma de la frecuencia instantánea, F_i	MDF
	Histograma de la fase instantánea, Φ_i	MDP
	Densidad espectral de potencia	Multiplexación MDFO, MDFCO
Número de subportadoras o de tonos	Densidad espectral de potencia	Cualquier modulación
	Histograma de la frecuencia instantánea, F_i	MDF
Sincronización de símbolos	Diagrama de ojos I/Q, A_i/F_i + diagrama vector	MDP y MAQ filtrado o no
	Diagrama de ojos A_i/F_i + frecuencia del visualización del histograma, F_i	MDF filtrado o no
	Diagrama de la constelación + histograma de frecuencia, F_i y fase, Φ_i	MDC filtrado o no

A título de ejemplo, en la Fig. 4.8-9 se muestra la extracción de los parámetros de modulación y la caracterización de la modulación para una señal MAQ-16.

4.8.5.3 Demodulación y decodificación

Uno de los últimos pasos es la extracción de información real. Un demodulador debe tener un analizador del tren de bits que aplique técnicas de correlación al flujo de bits a fin de determinar el esquema de codificación utilizado.

Debe intentar establecerse una correspondencia entre el tren binario y distintas unidades de información, tales como un alfabeto.

En la Fig. 4.8-10 se muestra un ejemplo de demodulador digital que visualiza el analizador del tren binario para uno o más tipos de modulación más convencionales (MDF).

4.8.5.4 Correlación cruzada con una señal de prueba

Puede implementarse otra forma eficiente de identificación y medición de señales utilizando técnicas de correlación cruzada con señales de prueba y funciones de búsqueda adquiridas por correlación cruzada.

El valor de cresta de la correlación cruzada de la señal analizada y una señal de prueba permite detectar la presencia de la señal de prueba en la señal analizada.

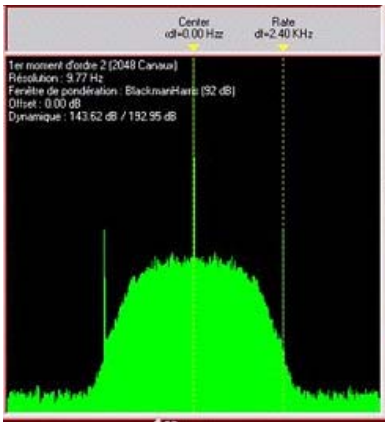
Fácilmente puede obtenerse información adicional tal como la respuesta impulsiva del canal, la verificación de la calidad de demodulación e información de ocupación del canal o de los intervalos de tiempo.

El método puede también utilizarse para sincronización o en secuencias piloto con fines de decodificación e identificación.

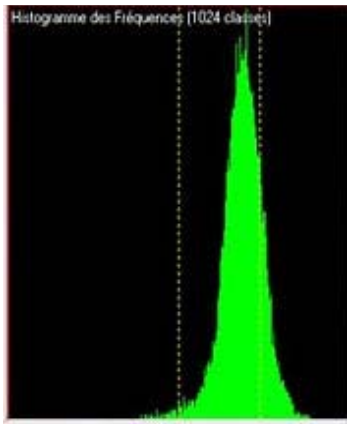
Puede utilizarse una señal de prueba de una base de datos o generada utilizando una señal de referencia. Técnicas como ésta pueden también aplicarse a sistemas convencionales (analógicos).

FIGURA 4.8-9

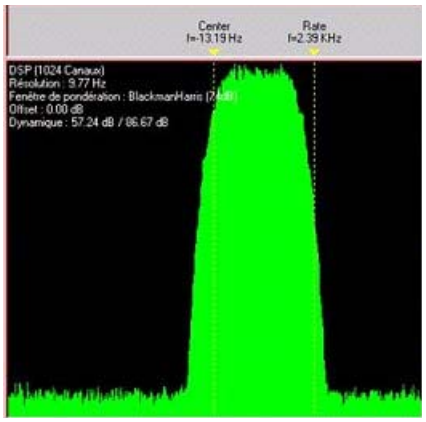
Ejemplos de caracterización completa de una señal digital



Extracción de parámetros técnicos (portadora, velocidad de símbolos, etc.)



Histograma (A_i, F_i, Φ_i)



Densidad espectral de potencia

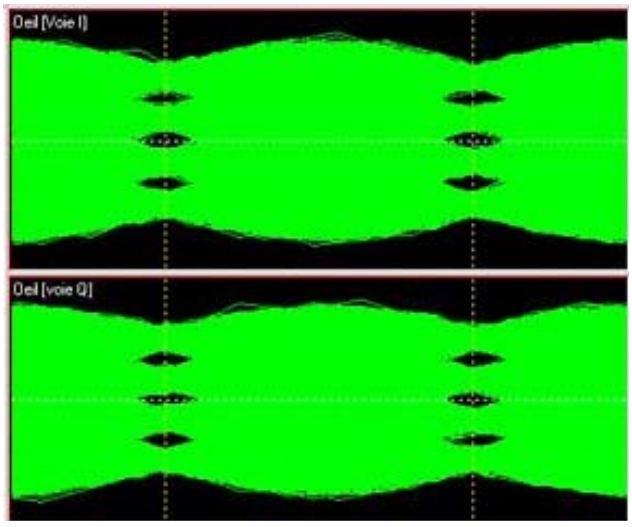


Diagrama de ojos (I, Q o A_i, Φ_i etc.)

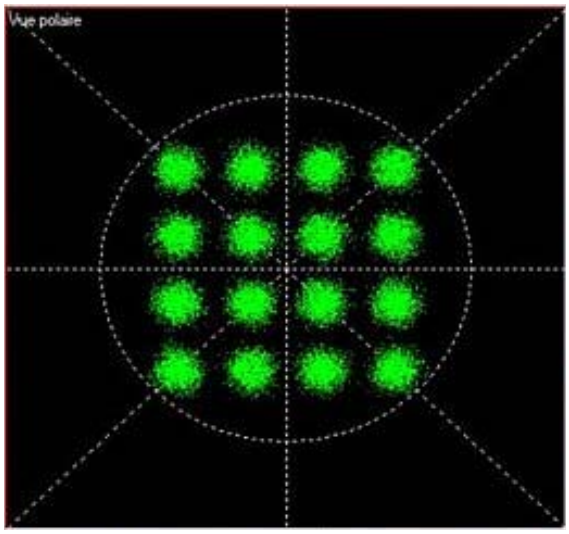
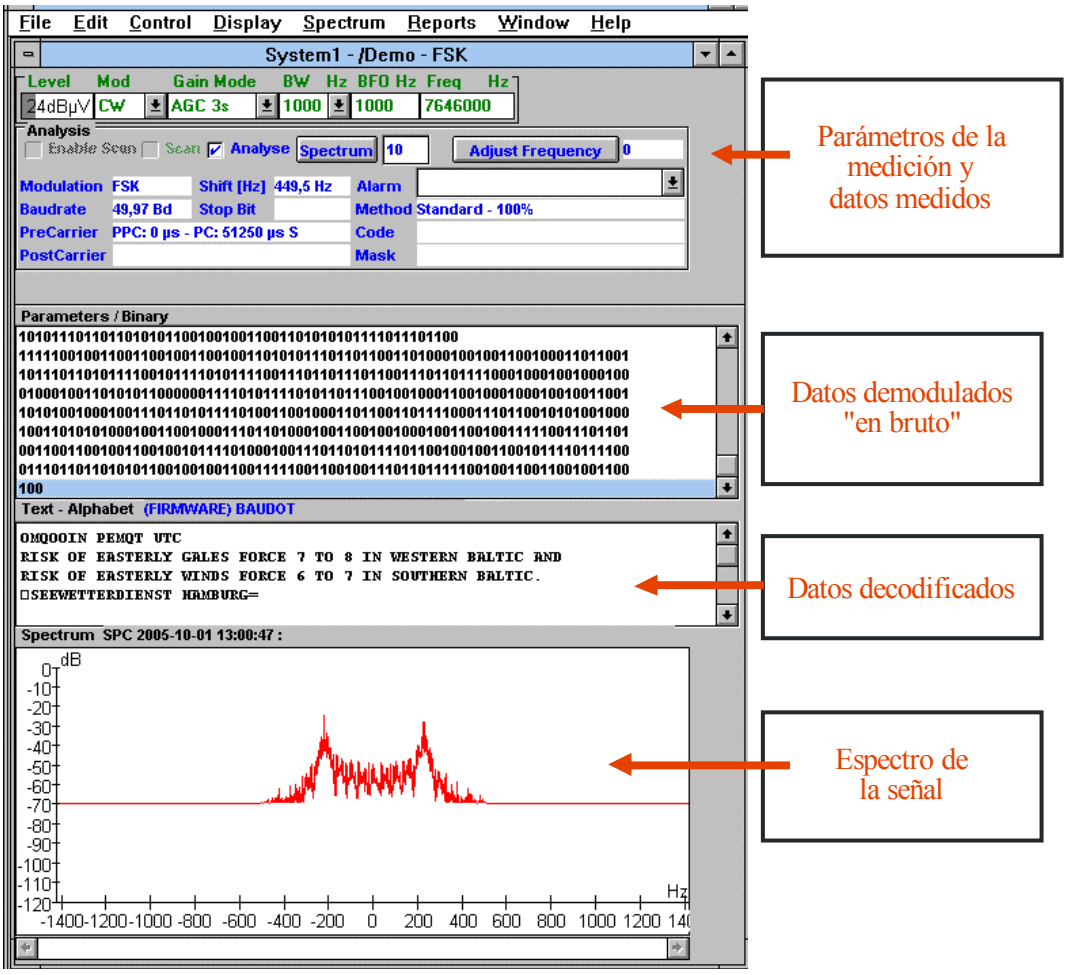


Diagrama de la constelación

Spectrum-4.8-09

FIGURA 4.8-10

Ejemplo de demodulador digital con analizador y decodificador del tren binario



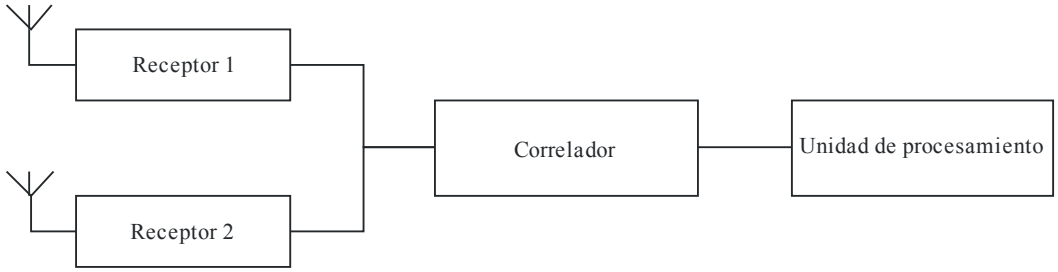
Spectrum-4.8-10

4.8.5.5 Técnicas de correlación cruzada para el análisis de interferencias

El método de correlación cruzada implementado en un sistema de análisis de señal puede utilizarse para aclarar cómo se forma la interferencia y para identificar sus fuentes. En la Fig. 4.8-11 se muestra un diagrama simplificado.

FIGURA 4.8-11

Sistema de correlación cruzada para el análisis de la interferencia



Spectrum-4.8-11

El proceso de correlación cruzada es realizado por un correlador. Se utilizan dos receptores separados; uno se sintoniza a la señal interferida y el otro a las señales sospechosas de ser interferentes. El cálculo de los coeficientes de correlación entre las señales de frecuencia intermedia o las señales demoduladas, permite identificar la señal interferente. Los tipos de interferencia que pueden detectarse son los siguientes:

– emisiones no esenciales;
– emisiones de intermodulación;
– canales con señales no esenciales y de intermodulación de un receptor;
– efectos de bloqueo y modulación cruzada;
– interferencia del canal adyacente.

Las técnicas de correlación no sólo se aplican a la investigación de interferencias sino también a otras tareas de comprobación técnica.

En [Kharchenko, 1984] y [Ralnikov y Kharchenko, 2001] puede obtenerse información detallada del método de correlación

4.8.5.6 Técnicas de filtrado adaptativo para separación de fuentes de señales AMDT y AMDC

La aplicación de técnicas adaptables permite en un contexto de múltiples fuentes y en condiciones de interferencia severa realizar la sincronización del tráfico y de los canales de baliza de la señal AMDT y AMDC, así como la medición del nivel y de las relaciones *C/I* para dichas señales, junto con la demodulación y la decodificación de los mensajes contenidos en los canales de señalización, permitiendo así su identificación.

En las Figs. 4.8-12 a) y b) se presenta un caso real para señales de tráfico GSM. La Fig. 4.8-12 a) muestra que es posible detectar las señales y obtener la identidad de las fuentes incluso con una relación *C/I* muy baja, de aproximadamente –16 dB en el caso de la señal identificada como canal de tráfico 4 (TCH4 (BS21)). En este ejemplo, se ha identificado que el canal de tráfico interferido es TCH4.

La identificación del canal de tráfico interferido se realiza utilizando información extraída del canal de radiodifusión conexo de la estación base.

La Fig. 4.8-12 b) muestra la demodulación y decodificación exitosa de una fuente recibida con una *C/I* muy negativa, de aproximadamente –16 dB, y un nivel de señal de –103 dBm. Las técnicas adaptables son especialmente adecuadas y efectivas en situaciones difíciles de interferencia, tanto para señales continuas como para señales a ráfagas, tales como la propagación en entornos urbanos densos, reutilización intensiva de frecuencias en las redes, errores de ingeniería de red, etc.

donde:

– TCH1 (BS1): canal de tráfico 1 de la estación base BS1.
– TCH4 (BS2): canal de tráfico 4 de la estación base BS2.

4.8.5.7 Mediciones (de densidad de flujo de potencia) por debajo del ruido de fondo

Introducción

Se trata de servicios pasivos que requieren protección frente a emisiones no deseadas por debajo del umbral de ruido, debido a que sus observaciones se producen con niveles de densidad de flujo de potencia (dfp) por debajo del umbral de ruido. Los servicios pasivos, tales como los servicios de radioastronomía, utilizan, por tanto, técnicas basadas en múltiples sondas de medida que se almacenan y se procesan de forma que el ruido aleatorio se compense y cancele a sí mismo, mientras que las señales deseadas aparecen destacadas sobre el ruido disminuido. Por dicho motivo los límites de dfp han sido acordados internacionalmente, con valores que se encuentran por debajo del ruido. Sin embargo, partes interesadas, como los radioastrónomos, mantienen sus quejas de que la radioastronomía quedará inutilizada si no se realiza la comprobación técnica de la interferencia y no se toman las medidas pertinentes. En consecuencia, la comprobación técnica, especialmente la de las comunicaciones por satélite, debe utilizar técnicas similares para descubrir la interferencia oculta en el ruido.

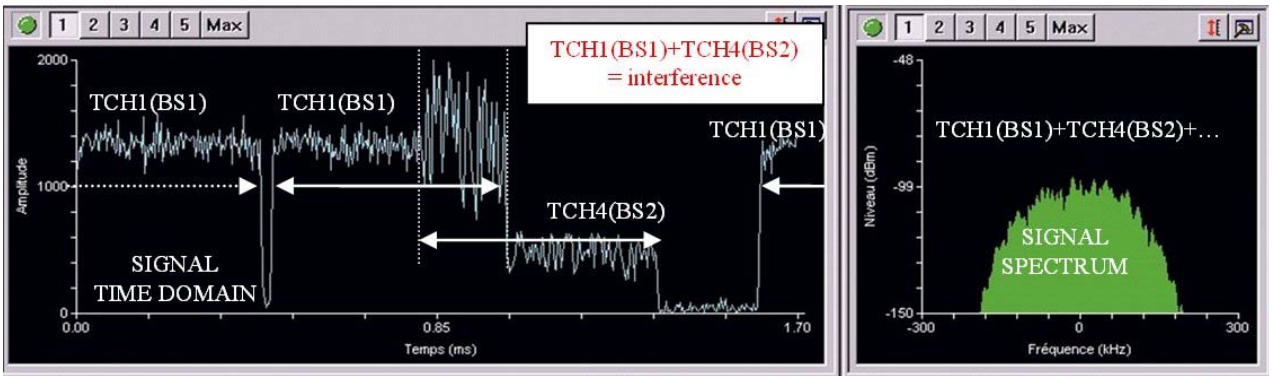
Principio

Para realizar la comprobación técnica de las señales deseadas por debajo del nivel de ruido, deben tomarse, digitalizarse, almacenarse y promediarse una serie de medidas de un gran número de señales espectrales (del orden de decenas de miles) en las que esté presente la señal deseadas. Debe tomarse también un número similar de señales espectrales que no incluyan la señal deseada sino el mismo tipo de ruido aleatorio, que deben digitalizarse, almacenarse y promediarse, pero a continuación invertirse. Ambas series de señales espectrales pueden conseguirse cambiando la dirección de apuntamiento de la antena o, si la señal deseada es a ráfagas, realizando las medidas durante momentos de actividad y de inactividad. En los dos tipos de espectros resultantes procesados, el ruido se suprime considerablemente. Cuando se vuelven a procesar ambos tipos de espectros previamente procesados, la inversión mencionada hace que se compensen otras señales de origen desconocido. En la Recomendación UIT-R SM 1681 se incluye información adicional.

FIGURA 4.8-12

Ilustración de los resultados del análisis de interferencia y separación de fuentes de TCH GSM utilizando técnicas adaptables con señales GSM en áreas urbanas

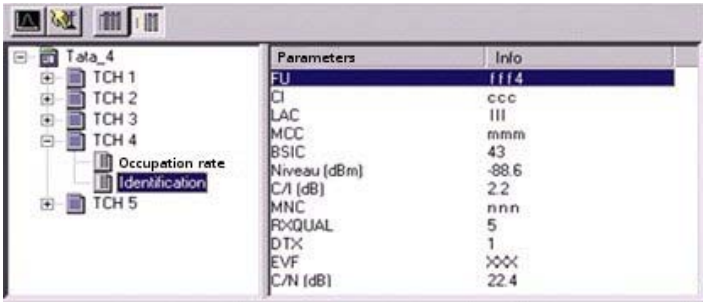
a) Ejemplo de situación de interferencia en la frecuencia de un canal de tráfico TCH de GSM



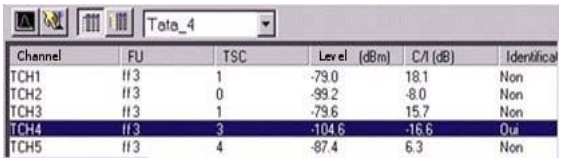
Representación en el dominio del tiempo

Representación panorámica

b) Resultado del análisis de interferencia mediante filtrado adaptativo



Identificación de la fuente emisora



Canal de tráfico detectado

Spectrum-4.8-12

4.8.6 Análisis de la señal para la identificación de las señales transmitidas

Una vez descritas las herramientas de análisis de la señal, en los apartados siguientes se presenta información más detallada sobre el proceso de análisis de la señal para la identificación de la señal transmitida. Estas técnicas no son necesarias en todos los casos, pero pueden ser útiles para la identificación de señales digitales complejas.

4.8.6.1 Equipo necesario

En el mercado existen herramientas de análisis en tiempo real/en línea y fuera de línea.

Los sistemas en tiempo real/ en línea incluyen:

– decodificadores específicos para un pequeño número de códigos;

– decodificadores paramétricos o demoduladores-decodificadores con o sin capacidades de medición;

– demoduladores-decodificadores automáticos, con capacidades de medición y reconocimiento.

Si fracasa el análisis en tiempo real, los operadores deben procesar la señal con dispositivos de análisis fuera de línea, que comprenden:

– herramientas de análisis de la señal (demoduladores programables en el dominio del tiempo, en el dominio de la frecuencia y en el dominio de la fase);

– análisis del tren de bits, es decir, instrumentos para intentar descifrar la estructura del código y determinar la expresión alfabética de entrada;

– métodos para la descripción del código mediante operaciones matemáticas, que pueden luego utilizarse para programar un decodificador programable con miras a una futura decodificación en línea.

Si tiene éxito la decodificación y la selección del alfabeto, el operador podrá conseguir un texto que cada vez más se presenta cifrado, salvo a veces durante la transmisión de la identificación.

4.8.6.2 Prácticas de identificación

Para la identificación pueden utilizarse varios métodos en función de si el transmisor utiliza o no distintivo de llamada u otras formas de identificación:

1. Si la transmisión no utiliza medios dedicados para la identificación, puede utilizarse el método de identificación paramétrica. Dicha identificación mide los parámetros de la señal transmitida: parámetros de modulación, p.i.r.e., frecuencia portadora, etc, así como la dirección de llegada de la señal o la posición del transmisor.
2. Si la transmisión no utiliza medios dedicados de identificación, puede utilizarse el método de identificación mediante señales de referencia. Dicha identificación compara la estructura y característica de la transmisión con un modelo disponible en una base de datos.
3. Si la transmisión utiliza medios para la identificación, puede utilizarse el método de reconocimiento del identificador. Dicha identificación consiste en la decodificación de la información transmitida como parte de la señal, por ejemplo, el distintivo de llamada, el nombre de la estación, el identificador del servicio móvil marítimo etc., tal como se describe en el punto 4.8.2.

Estos métodos suponen que previamente al análisis se ha adquirido la señal, que, por tanto, está disponible. No obstante, en muchos casos de interferencia y en relación con otros aspectos de interés para el servicio de comprobación técnica, la transmisión puede ser intermitente o bien no conocerse su frecuencia exacta, por lo que la transmisión puede no estar fácilmente disponible. En esos casos, puede ser necesario utilizar equipos de grabación como los enumerados en 4.8.6.1 para registrar una anchura de banda amplia del espectro que presumiblemente incluya la transmisión de interés para que un operador entrenado la analice posteriormente.

4.8.6.2.1 Identificación paramétrica

La identificación paramétrica analiza los parámetros de la señal. Para sistemas públicos normalizados la identificación paramétrica puede realizarse aplicando los tres pasos descritos en la Fig. 4.8-13.

1. Los parámetros técnicos de la modulación se miden utilizando métodos descritos en la sección 4.6 para señales analógicas y digitales.
2. Una vez que se han medido todos los parámetros, se realiza un análisis para reconocer el tipo de modulación de entre una lista de posibles candidatos.
3. Una vez que se ha reconocido el tipo de modulación, la señal se demodula utilizando los parámetros de modulación estimados. La señal demodulada puede utilizarse entonces para el reconocimiento de características de audio o de códigos digitales.

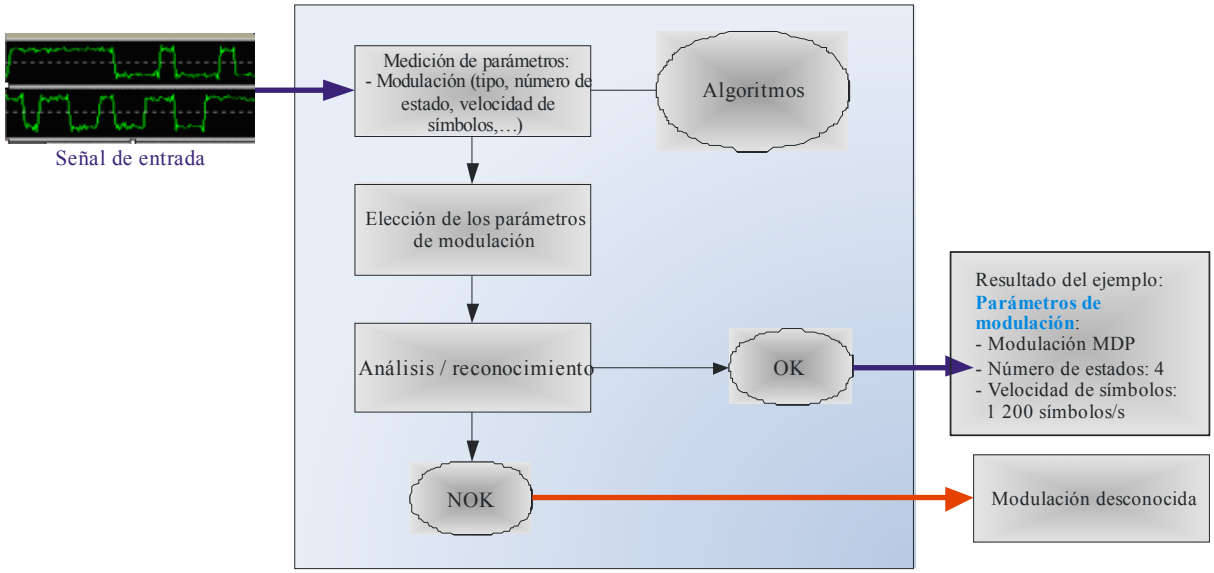
Limitaciones de la identificación paramétrica

El método de identificación paramétrica tiene varias limitaciones debido a que el resultado de la misma es una lista de parámetros técnicos sin indicación del tipo de sistema de que se trata (celular, aeronáutico...).

Este inconveniente se ilustra en la Fig. 4.8-14 para el caso de una señal VOR (radiofaro omnidireccional en ondas métricas). Una señal VOR consta de tres subportadoras, cada una de las cuales está modulada con un esquema diferente. Para dichas señales, la identificación paramétrica sólo caracteriza las tres señales pero no puede identificar que se trata de un sistema VOR.

FIGURA 4.8-13

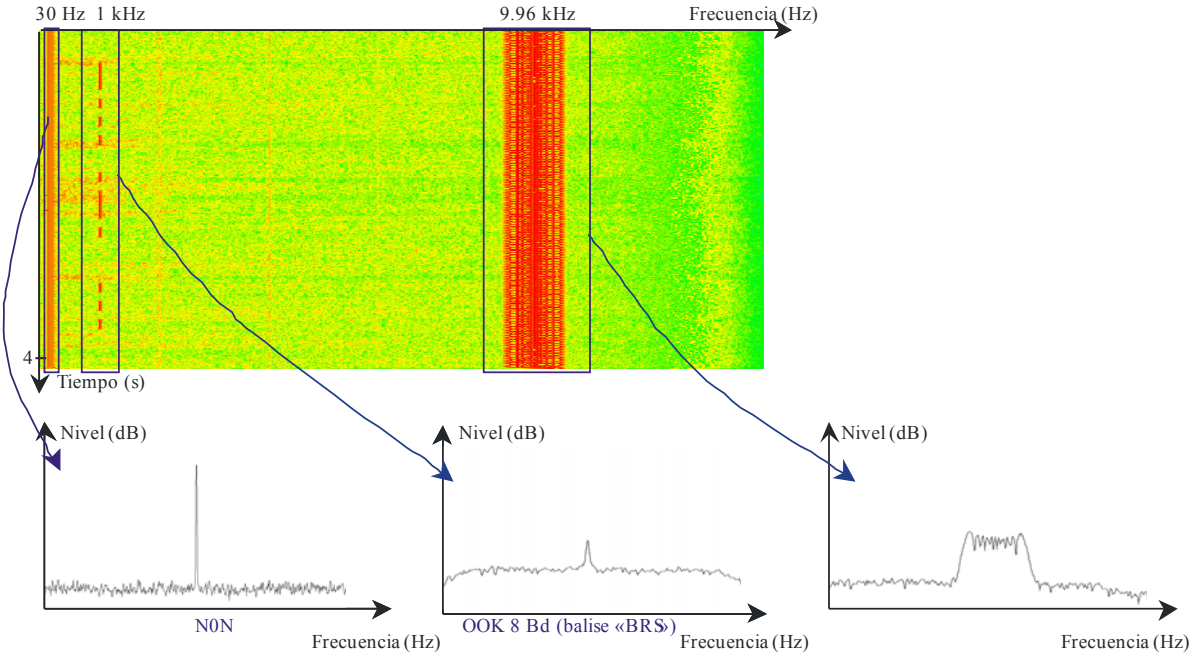
Flujo de actividades de la identificación paramétrica



Spectrum-4.8-13

FIGURA 4.8-14

Identificación de una señal VOR



Spectrum-4.8-14

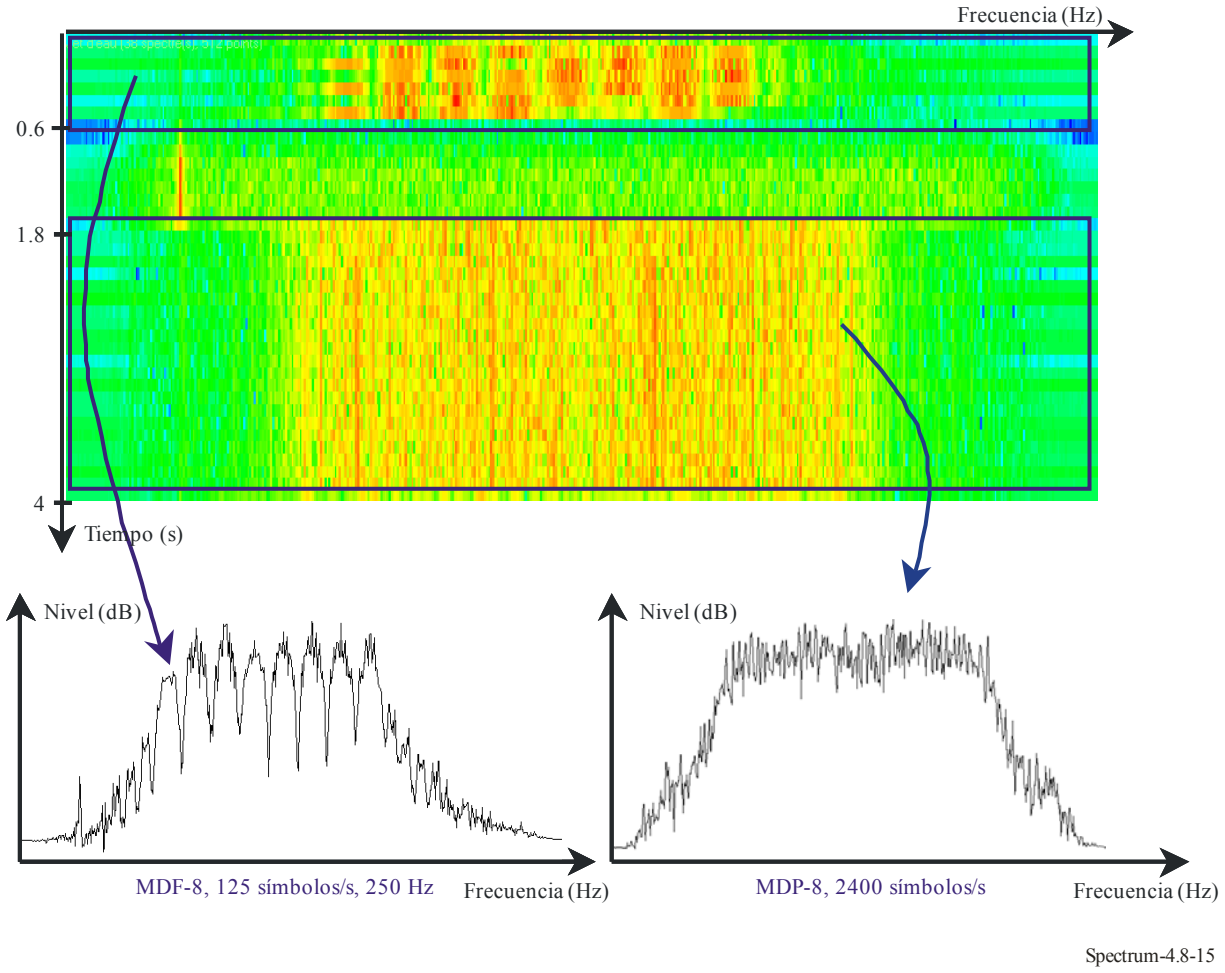
Como primer paso, puede probarse que las tres señales pertenecen a la misma emisión mediante grabadores de espectro y radiogoniómetros de banda estrecha o de banda ancha. Las señales con el mismo acimut y una activación y desactivación simultánea sugieren que se trata de la misma fuente. Esta información permite acometer el segundo paso del proceso de identificación.

Además, el método no ofrece ningún resultado si la señal no está incluida en la lista de modulaciones soportadas por el método y la señal de entada no tiene una duración mínima que permita un análisis y medición completa de todos los parámetros de modulación (tipo de modulación, número de estados, velocidad de símbolos, etc.).

Por ejemplo, tal como se muestra en la Fig. 4.8-15, cuando la transmisión se compone de dos señales consecutivas, cada una con una modulación distinta, el método de identificación paramétrica no permite identificar el sistema de que se trata.

FIGURA 4.8-15

Señal con modulación que cambia a lo largo del tiempo



Identificación paramétrica de una señal analógica

Para identificar una señal analógica, se realiza un proceso en cuatro pasos:

Paso 1: Ajustar la configuración de medición de forma adecuada.

Paso 2: Verificar si la señal tiene una modulación conocida que puede hacer que tras la demodulación, la señal sea audible o visible.

Paso 3: El tercer paso es un método automático: identificar que se trata de una conversación utilizando las características a largo plazo de una conversación mediante cálculos y el histograma de la varianza del valor de cresta de la señal.

Paso 4: Simultáneamente con los métodos precedentes:

– Se disponen representaciones panorámicas y representación de la frecuencia en función del tiempo de la señal para determinar su naturaleza (MA, BLU, MF, etc).
– Una consulta básica de la base de datos de las señales analógicas de radiocomunicaciones.
– Técnicas de medida previamente recomendadas para determinar los parámetros de modulación:
  – frecuencia portadora y subportadora en el caso de protocolos de múltiplex por división de frecuencia;
  – anchura de banda de la señal;
  – características de la modulación (profundidad de amplitud, desviaciones de frecuencia y de fase) medidas de conformidad con las Recomendaciones UIT-R en vigor.

Identificación paramétrica de una señal digital

Para identificar una señal digital, se realiza un proceso en tres pasos:

Paso 1: medir los parámetros de modulación. Véanse en la sección 4.6 las descripciones de métodos de medición de modulaciones MDA, MDP, MDF, MAQ, MDC y MDFO.

Paso 2: dibujar la constelación una vez medidos los parámetros de modulación, que se compara entonces con la constelación teórica.

Puede utilizarse la magnitud del vector de error (EVM) para ajustar los parámetros de las mediciones y obtener la constelación óptima.

Paso 3: realizar la demodulación con los parámetros correctos.

4.8.6.2.2 Identificación mediante señales de referencia

Principios de la identificación mediante señales de referencia

En este método se utiliza como referencia una base de datos de señales públicas estandarizadas (denominadas modelos). Cada modelo de la base de datos tiene un conjunto de parámetros. La identificación mediante señales de referencia se basa en comparar la estructura y características de la señal en prueba con la estructura y características de modelos candidatos de la base de datos. El modelo seleccionado será el que presente la mayor coincidencia con la señal en prueba.

Un modelo puede describirse mediante los parámetros siguientes:

– gama de frecuencias;
– anchura de banda de la señal;
– "actividad" temporal (seña continua, a ráfagas, AMDT, etc.);
– modulación;
– método de codificación;
– información de identificación (distintivo de llamada, número de identificación, etc.).

La identificación mediante señales de referencia ofrece las ventajas siguientes:

– proporciona información del sistema en si mismo (no se limita a las características técnicas de la señal), de forma que el usuario dispone de información operativa adicional;
– mejora la sensibilidad y el tiempo de respuesta pues no se realiza ninguna medición precisa (como son las mediciones de los parámetros de modulación) sino que sólo se compara un modelo de referencia y la señal que se desea identificar;
– permite reducir el tiempo de análisis;
– puede centrarse exclusivamente en modelos que sean de interés para el operador;
– pueden añadirse fácilmente nuevas características del sistema a la base de datos del modelo candidato.

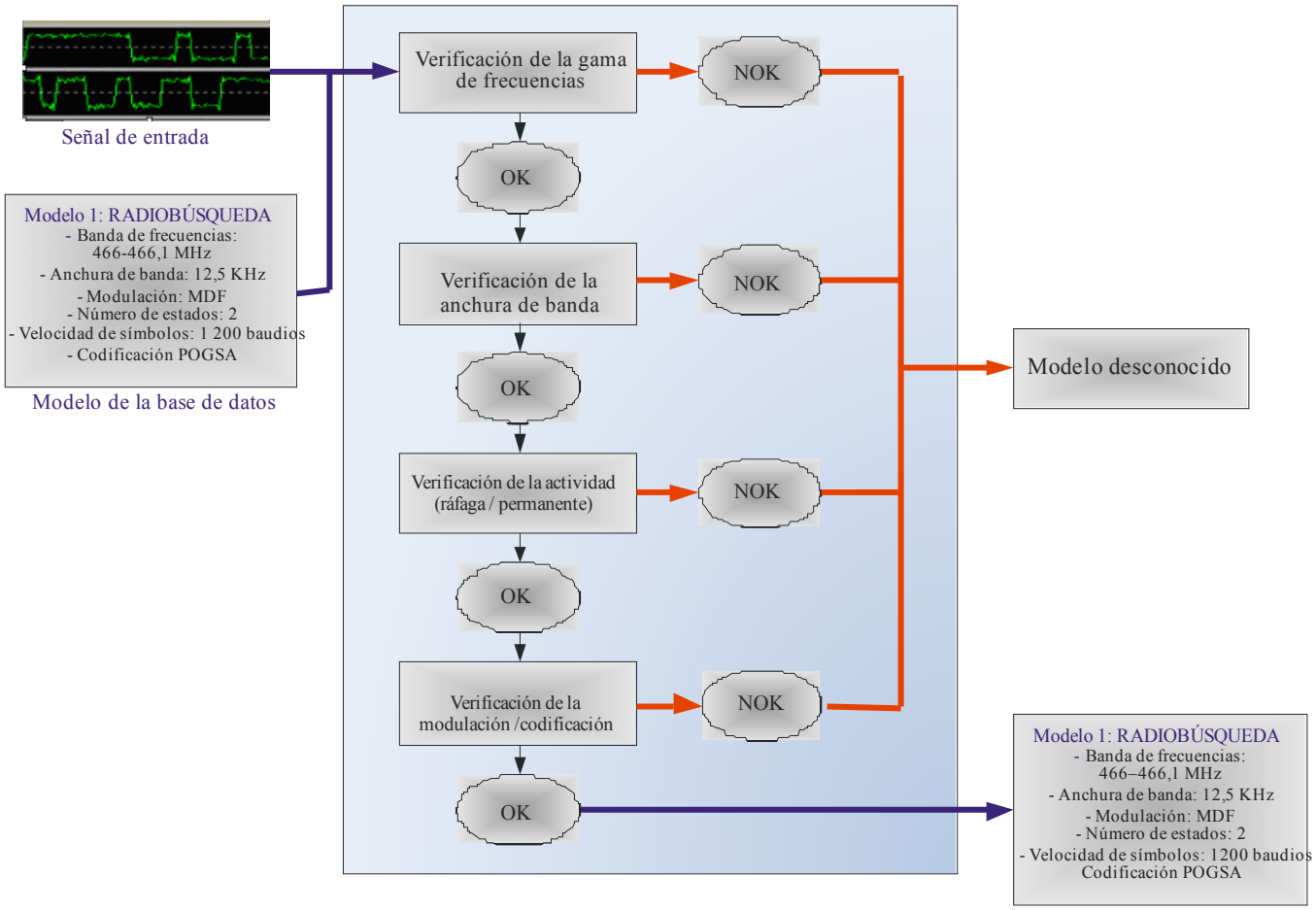
Sin embargo, tiene las limitaciones siguientes:

– cada sistema candidato debe tener un modelo en la base de datos para poder ser identificado;

– cuanto mayor sea el número de modelos de sistemas candidatos para poder establecer comparaciones, mayor será el tiempo de computación requerido

FIGURA 4.8-16

Flujo de actividades de la identificación con señales de referencia



Spectrum-4.8-16

ANEXO 1

Llamada selectiva en los servicios móvil marítimo y móvil marítimo por satélite

El procedimiento se describe en el Artículo 54, número 54.2, del Reglamento de Radiocomunicaciones.

1 Formación de los números de llamada selectiva de estación de barco y de estación costera

Los números de llamada de las estaciones de barco constan de cinco cifras. Los números de llamada de las estaciones costeras son de cuatro cifras. Véase la Recomendación UIT-R M.257. Cada cifra se representa por una audiofrecuencia comprendida entre 1 124 y 2 110 Hz de acuerdo con el siguiente cuadro:

Cifra	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**0**	**Repetición de la cifra**
Audiofrecuencia	1 124	1 197	1 275	1 358	1 446	1 540	1 640	1 747	1 860	1 981	2 110 Hz

La duración de cada tono es de 100 ms. Un número de llamada selectiva de un barco transmitido por una estación costera dura 500 ms y va seguida de un intervalo de 900 ms tras el cual se repite el número de llamada selectiva del barco. (Recomendación UIT-R M.257.)

En las estaciones de barco que utilizan impresión directa de banda estrecha de acuerdo con la Recomendación UIT-R M.476, la identificación de cinco cifras se convierte a cuatro caracteres de acuerdo con la Recomendación UIT-R M.491 (Anexo 1). En las estaciones costeras, el número de cuatro cifras también se convierte a un código de cuatro caracteres.

De conformidad con la recomendación UIT-R M.257 "el sistema de llamada selectiva secuencial de una sola frecuencia puede utilizarse para llamar a los barcos hasta su sustitución por el sistema de llamada selectiva digital definido en las Recomendaciones UIT-R M.493 y UIT-R M.541" (véase también el número 54.2 del RR).

2 Identidades del servicio móvil marítimo en los servicios marítimos

Las identidades deben cumplir las disposiciones del Artículo 19 del RR, números 19.108-19.117. Las identidades del servicio móvil marítimo (MMSI, *maritime mobile service identities*) están constituidas por nueve cifras que se transmiten por el trayecto radioeléctrico. A continuación figura un ejemplo de un código de nueve cifras que constituyen la identidad de una estación de barco:

M1 I2 D3 X4 X5 X6 X7 X8 X9,

donde **M1 I2 D3** representan las Cifras de Identificación Marítima (MID, *maritime identification digit*) y **X** es una cifra comprendida entre 0 y 9. Las Cifras de Identificación Marítima reflejan la nacionalidad de la estación. Por ejemplo, MID 203 será atribuida a Austria y MID 244 a los Países Bajos.

La impresión directa de banda estrecha no sólo se utiliza de conformidad con la Recomendación UIT-R M.476, sino también de acuerdo con la Recomendación UIT-R M.625. Esta última Recomendación sobre impresión directa de banda estrecha es compatible con la Recomendación UIT-R M.476 y utiliza la identidad de cinco cifras (convertidas a un código de cuatro caracteres) así como el código de nueve cifras. Este número de identidad de nueve cifras del barco puede traducirse a una identidad de siete señales conforme al Anexo II de la Recomendación UIT-R M.491. Por ejemplo, la identidad de nueve cifras 364775427 se convierte a "PEARDBY" que, en el caso de llamada a esta estación de barco por una estación costera, se transmite en tres bloques de tres caracteres en modo TOR símplex de la forma siguiente:

bloque 1:	P	RQ	E
bloque 2:	RQ	A	R
bloque 3:	D	B	Y

RQ = petición o repetición de la señal (YBBYYBB)

3 Identidades del servicio móvil marítimo en el servicio móvil marítimo por satélite

Las identidades deben satisfacer las disposiciones de la Sección VI del Artículo 19 del RR. A los barcos que cumplan lo dispuesto en el Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar y a otros barcos equipados con radiocomunicaciones automatizadas, incluida la llamada selectiva digital, y/o que incorporen dispositivos de alerta del Sistema Mundial de Socorro y Seguridad Marítimos, (SMSSM) deberán asignárseles identidades de estación de barco, como se indica en el Artículo 19, números 19.100-19.126, del Reglamento de Radiocomunicaciones, de acuerdo con el Anexo I a la Recomendación UIT-R M.585.

NOTA 1 – Los números 19.117 a 19.126 del Artículo 19 del RR fueron suprimidos por la CMR-07.

4 Sistema automático de identificación del transmisor

Algunos países utilizan un sistema automático de identificación del transmisor (ATIS, *automatic transmitter identification system*) para las frecuencias que figuran en el Apéndice 18 del Reglamento de Radiocomunicaciones utilizadas en aguas interiores y para las transmisiones de señales de vídeo por el enlace ascendente del satélite. El sistema proporciona la transmisión automática de la identificación al final de cada transmisión y periódicamente durante el curso de las mismas. Una secuencia ATIS puede basarse en la Recomendación UIT-R M.493 o en la Recomendación 7 del Acuerdo Regional de Basilea. El distintivo de llamada radioeléctrica puede convertirse en una identidad de 10 cifras:

Z1 M2 I3 D4 X5 X6 X7 X8 X9 X10,

donde:

Z: la cifra 9 que únicamente se utilizan en aguas interiores

MID: cifras de identificación de acuerdo con el Artículo 19 del RR.

X5 a **X6**: cifras que representan la segunda letra del distintivo de llamada; 01 representa A, 02 representa B, etc.

X7 a **X10**: el número del distintivo de llamada

Por ejemplo, el distintivo de llamada PC 8075 se convierte en: **9 2 4 4 0 3 8 0 7 5**

5 Identidades de las radiobalizas de localización de siniestros

Las emisiones de las radiobalizas de localización de siniestros (RLS) que participan en el sistema COSPAS-SARSAT, consistente en satélites en órbita polar baja que transmiten en la frecuencia de 406,025 MHz, incluyen la identidad de nueve cifras. La RLS de 406 MHz también puede incluir un transmisor de radiorrecalada en 121,5 MHz. El sistema COSPAS-SARSAT funciona a escala mundial.

La RLS de 1,6 GHz (RLS en banda L o INMARSAT-E) también emplea esta identidad de nueve cifras y utiliza el sistema INMARSAT. Como dicho sistema emplea satélites geoestacionarios situados sobre el ecuador, su cobertura no es mundial sino que, en la práctica, está limitada a la superficie de la Tierra comprendida entre las latitudes 70° Norte y 70° Sur.

Existen diversos medios de identificación en los servicios marítimos. El *recomienda* 6 de la Recomendación UIT-R M.585 indica que "la concepción de todo futuro sistema marítimo automático de telecomunicaciones internacionales prevea el empleo de identidades de estación de barco de nueve cifras en el trayecto radioeléctrico".

ANEXO 2

Caracteres del código suplementario, símbolos sexto y séptimo

El sexto carácter indica un grupo de sistemas. Se utilizan las características y grupos siguientes:

Morse	A
Arrítmica (arranque-parada)	C
Sistemas ARQ con tren impulsos no interrumpido	E
Sistemas ARQ del tipo ráfaga	F
Twinplex	H
Desconocido (pero se conoce el número de bits en una trama)	J
Corrección de errores en recepción	K
Multitono	M
Radionavegación y localización	N

El séptimo carácter indica el sistema dentro de uno de los grupos mencionados y es una indicación exacta del sistema en el grupo. Permite definir 26 sistemas diferentes en cada grupo (por ejemplo, grupo A, grupo C, grupo E, etc.). Por ejemplo, el séptimo carácter B indica el sistema Telex Baudot del grupo C y ARQ E3 en el grupo E.

En el cuadro siguiente se presentan los sistemas conocidos:

CÓDIGO	NOMBRE	ALF	BITS	DETEC/CORR	M/CYC	DUR/DIS/NUM
	Morse	Morse				
C-	ARRANQUE PARADA					
CB	télex Baudot	ITA2	7,5			
CC	télex Ruso	ITA2_RUS	7,5			
CD	télex Árabe	ITA2_ARAB	7,5			
CK	télex ASCII	ITA5	10	paridad		
E-	Tren de pulsos ARQ					
EA	ARQ-1000 dúplex	ITA2_P	7	paridad	RQ	4 5 8
EB	ARQ-E3	ITA3	7	m/s = 3:4	RQ	4 8 3
EC	342 TOR 1 kan	ITA3	7	m/s = 3:4	RQ	4 8 3
ED	342 TOR 2 kan	ITA3	7	m/s = 3:4	RQ	4 8 3
EE	342 TOR 4 kan	ITA3	7	m/s = 3:4	RQ	4 8 3
EF	242 TOR 2 kan	ITA3	7	m/s = 3:4	RQ	2 ?
EK	ARQ-N	ITA2_P	7	paridad	RQ	
EL	POL-ARQ	SITOR	7	m/s = 3:4	RQ	
EM	TORG 10 – 11	ITA2-R11	11			

Bibliografía

Application Note 243 [2000] *The fundamentals of signal analysis. Agilent Technologies*, Santa Rosa, Estados Unidos de América, descargable en [http://www.agilent.com/].

KOLB, H. -J. [1996] *Breitband – Such- und Empfangsanlagen*. MEDAV, ISBN 3-9804152-1-X, para más información véase [http://www.medav.de/].

MARVEN, G. and EWERS, G. [1993] *A simple approach to digital signal processing*. Texas Instruments, ISBN 0-904047-00-8.

POULARIKAS, A. D. and SEELY, S. [1985] *Signals and systems*. PWS Engineering Boston, ISBN 0-534-03402-0.

QUIAN, S. and CHEN, D. [1996] *Joint time frequency analysis*. Prentice Hall, ISBN 0-13-2543842.

RABINER, L. R. and GOLD, B. [1975] *Theory and application of digital signal processing*. ISBN 0-13-9141014.

THALES [1999a] *Characterization and measurement of interference in radiocommunication networks of TDMA technology*.

THALES [1999b] *A test procedure for measuring EPFD levels generated into an operational GSO earth station*.

THALES [1999c] *Technical measurements of discontinuous signals of type TDMA, TDD and frequency hopping*.

THALES [1999d] *Monitoring of digital broadcasting signals*.

VAN MAANEN, E. [1998a] *Hidden information in A3E modulated broadcasting transmitters*. Dutch Radiocommunications Agency.

VAN MAANEN, E. [1998b] *Introduction cryptography and signal analysis in radiomonitoring*. Dutch Radiocommunications Agency.

Recomendaciones del UIT-R

NOTA – Siempre debe utilizarse la versión más actualizada de cada Recomendación.

Recomendación UIT-R M.257 – Sistema de llamada selectiva secuencial de una sola frecuencia para el servicio móvil marítimo.

Recomendación UIT-R M.476 – Equipos telegráficos de impresión directa en el servicio móvil marítimo.

Recomendación UIT-R M.491 – Traducción de un número de identidad en señales de identidad para la telegrafía de impresión directa en el servicio móvil marítimo.

Recomendación UIT-R M.493 – Sistema de llamada selectiva digital para el servicio móvil marítimo.

Recomendación UIT-R M.541 – Procedimientos de explotación para la utilización de equipos de llamada selectiva digital en el servicio móvil marítimo.

Recomendación UIT-R M.585 – Asignación y uso de identidades del servicio móvil marítimo.

Recomendación UIT-R M.625 – Equipos telegráficos de impresión directa que emplean la identificación automática en el servicio móvil marítimo.

Recomendación UIT-R M.633 – Características de transmisión de un sistema de radiobalizas de localización de siniestros por satélite (RLS por satélite) que utiliza un sistema de satélites en la banda de 406 MHz.

Recomendación UIT-R SM.1052 – Identificación automática de las estaciones radioeléctricas.

Recomendación UIT-R SM.1600 – Identificación técnica de las señales digitales.

Recomendación UIT-R SM.1681 – Medición de emisiones de bajo nivel procedentes de estaciones espaciales en las estaciones terrenas de comprobación técnica utilizando técnicas de reducción del ruido.

4.9 Medición de impulsos

4.9.1 Introducción

Las emisiones de impulsos pueden tener diversas fuentes, incluyendo las siguientes:

– Emisiones radar.

– Emisiones de sistemas AMDT digitales.

– Emisiones de equipos eléctricos y electrónicos.

Para caracterizar una emisión de impulsos, es necesaria la medición de los mismos parámetros que para otras emisiones, tal como se describe en otros capítulos de este Manual. Ello incluye:

– Nivel medio de la intensidad de campo.

– Frecuencia.

– Anchura de banda.

En la sección 4.9 se incluye información específica sobre la medición del nivel de los impulsos y sobre la medición de otros parámetros básicos de las emisiones de impulsos.

4.9.2 Parámetros básicos de las señales de impulsos

– Nivel de cresta (A).

– Duración del impulso (τ).

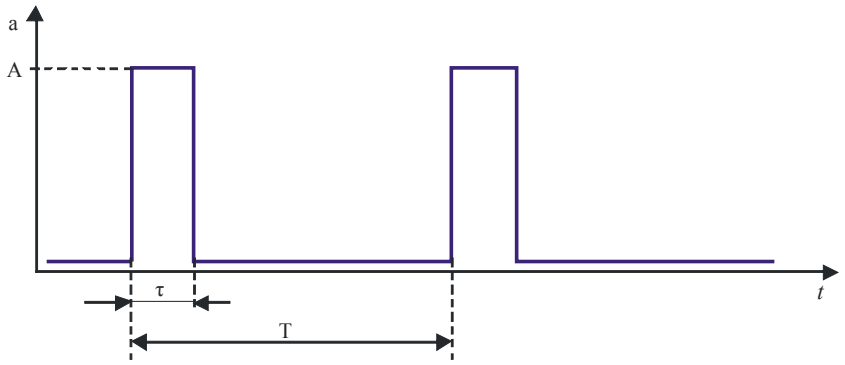
– Periodo del impulse T o frecuencia de repetición del impulso (PRF = 1/T).

– Tiempo de subida y caída de los impulsos (t_r y t_f).

Los impulsos se describen matemáticamente con una forma rectangular en el dominio del tiempo, tal como se muestra en la Fig. 4.9-1.

FIGURA 4.9-1

Señal de impulsos rectangulares en el dominio del tiempo



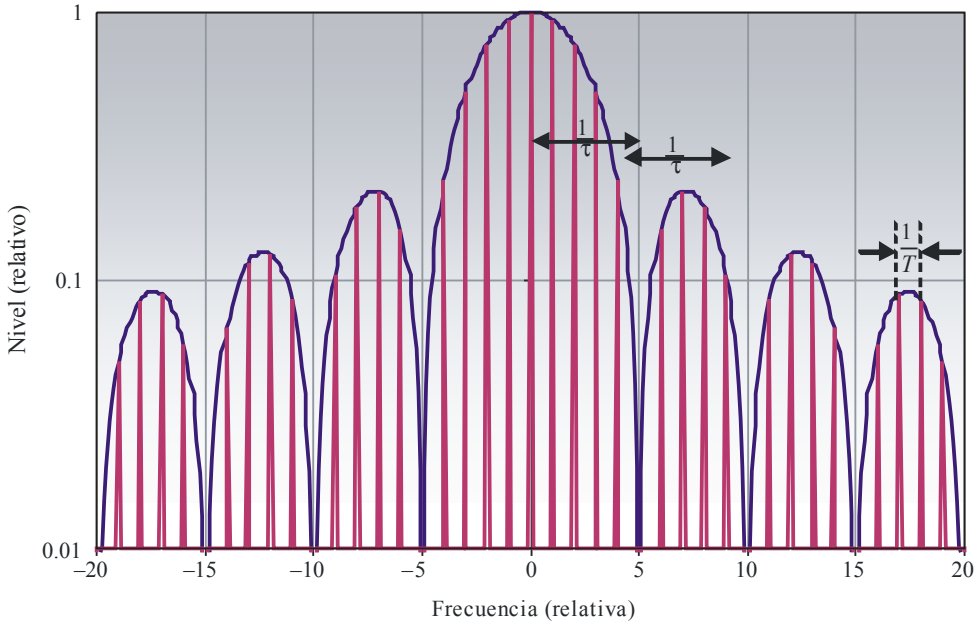
Spectrum-4.9-01

La aplicación de la Transformada de Fourier a la señal en el domino del tiempo de la Fig. 4.9-1 resulta en la señal en el dominio de la frecuencia representada en la Fig. 4.9-2.

El espectro real consta de líneas espectrales separadas 1/T. Las crestas de estas líneas espectrales siguen una función sen(x)/x con una separación mínima entre ellas de 1/τ. El "lóbulo principal" en la frecuencia central tiene una anchura de 2/τ.

FIGURA 4.9-2

Señal de impulse rectangular en el dominio de la frecuencia

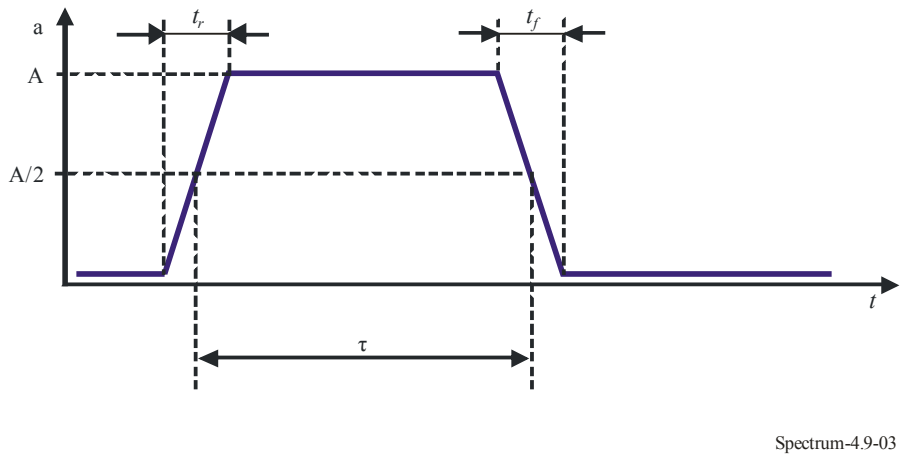


Los impulsos reales no pueden subir y caer en un tiempo infinitamente corto. Se produce una forma característica en el dominio del tiempo al comienzo y final de cada impulso durante la que la potencia aumenta al nivel de cresta y vuelve a cero de nuevo.

Aunque sigue siendo una representación parcialmente ideal, por lo general el impulso se describe con una forma trapezoidal.

FIGURA 4.9-3

Impulso trapezoidal en el dominio del tiempo



La duración del impulso se define, por lo general, entre los puntos cuya amplitud es la mitad de la amplitud de cresta.

Los tiempos de subida t_r y de caída t_f influyen en el espectro real y en su anchura. Se trata, por tanto, de parámetros importantes que pueden medirse para caracterizar completamente la emisión. Puesto que los

"bordes" de las pendientes de subida y caída de los impulsos reales no tienen una forma ideal, es necesario determinar los niveles utilizados para la medición de los tiempos de subida y caída. Son habituales valores del 10%-90% para el tiempo de subida y del 90%-10% para el tiempo de caída.

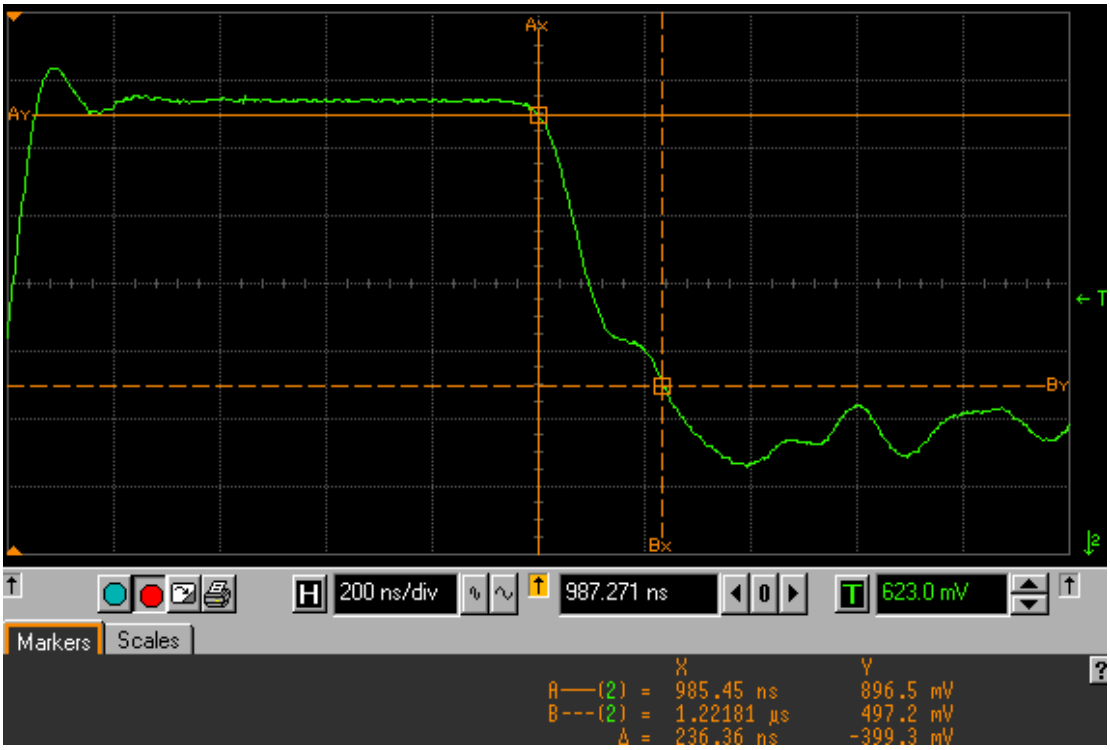
4.9.3 Mediciones en el dominio del tiempo

Todos los parámetros del impulso mencionados en el punto 4.9.2 pueden medirse en el dominio del tiempo. Normalmente, se utiliza un osciloscopio conectado a la salida de video de un receptor. Es importante que el nivel de dicha salida de FI no tenga control automático de ganancia y que su anchura de banda sea suficiente para no influir en la mediciones de tiempo (véase 4.9.6). Hoy en día existen osciloscopios muy rápidos que pueden capturar y mostrar directamente en pantalla la señal de radiofrecuencia.

El tiempo de caída del impulso representado en la Fig. 4.9-4 es la diferencia entre las dos marcas que se muestra en la parte inferior, $\Delta = 236{,}36$ ns. Los tiempos de subida y caída de la mayor parte de las emisiones de impulsos son muy pequeños y la medición de los mismos requiere que los equipos tengan una anchura de banda elevada. Cuando la medición se realiza directamente sobre la señal radioeléctrica, la señal deseada debe tener una elevada intensidad de campo comparada con otras señales en frecuencias vecinas.

FIGURA 4.9-4

Medición del tiempo de caída de un impulse con un osciloscopio



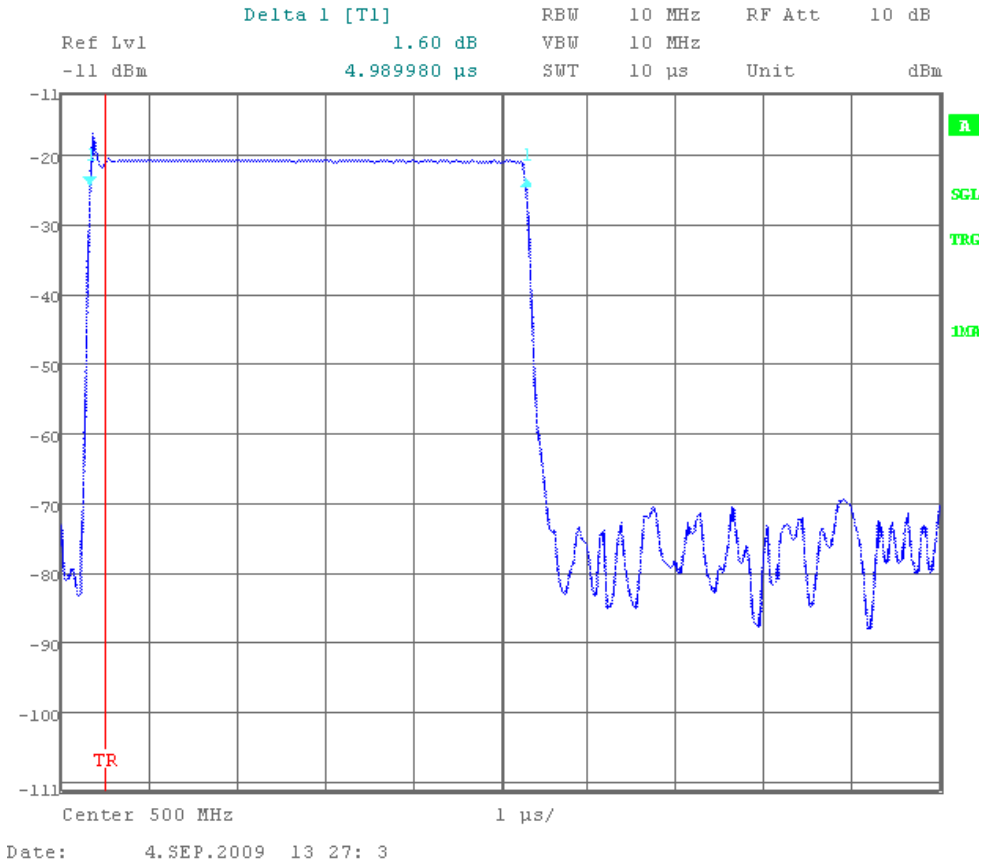
Spectrum-4.9-04

Cuando se utiliza un osciloscopio, debe tenerse en cuenta que en la visualización se utilizan unidades lineales, no logarítmicas. Sin embargo, la visualización final sólo es lineal cuando el osciloscopio está conectado a una salida de video lineal del receptor o del analizador. Muchos receptores y analizadores de espectro de comprobación técnica sólo tiene una salida de video logarítmica. En este caso, el la visualización del nivel del osciloscopio es logarítmica. En la medición de la duración del impulso puede despreciarse el error que ello introduce. No obstante, en ese caso no son válidas las rutinas de medición automática de los tiempos de subida y caída. En su lugar, las mediciones deben realizarse manualmente. Los parámetros temporales pueden leerse directamente en la pantalla del osciloscopio.

Los analizadores de espectro modernos a menudo utilizan tiempos de barrido muy cortos en el modo de margen cero, lo cual permite la representación de la señal en el dominio del tiempo. Junto a ello, una resolución de anchura de banda (RBW) suficiente permite realizar mediciones de los impulsos en el domino del tiempo (véase la Fig. 4.9-5).

FIGURA 4.9-5

Medición de la duración de un impulse con un analizador de espectro



Spectrum-4.9-05

Obsérvese que cuando se mide la duración de un impulso con un analizador de espectro con escala logarítmica, los puntos correctos para fijar los marcadores están a 3 dB por debajo del nivel de cresta.

Cuando se realizan mediciones de tiempos de impulsos con un analizador de espectro es importante utilizar la resolución de anchura de banda (RBW) más alta posible. Debe tenerse la precaución de no influir en la representación de la forma del impulso debido a anchuras de banda de medición excesivamente estrechas. La anchura de banda necesaria depende de las características temporales del impulso. Para más información, véase el punto 4.9.6.

La forma más adecuada de medir el nivel de cresta de un impulso es utilizando el detector de cresta del receptor o analizador de espectro de medida. No obstante, con algunas consideraciones adicionales, también puede medirse con un osciloscopio.

En primer lugar, se anota el nivel correspondiente al punto más alto de la curva. Si bien un osciloscopio normalmente muestra la tensión de cresta a cresta (U_{pp}), el detector de cresta de un receptor o analizador de espectro de medida muestra el nivel de potencia eficaz de la lectura (o la tensión de entrada del receptor equivalente, u). Ello se calcula multiplicando la lectura de cresta a cresta por $1/\sqrt{2}$.

Para mediciones en radiofrecuencia, es habitual representar los resultados en unidades logarítmicas, por lo que la tensión de entrada lineal *u* debe convertirse a una unidad de tensión logarítmica, *U*:

$$U(\text{dB}(\mu\text{V})) = 20*\log(u(\mu\text{V})) \qquad (4.9\text{-}1)$$

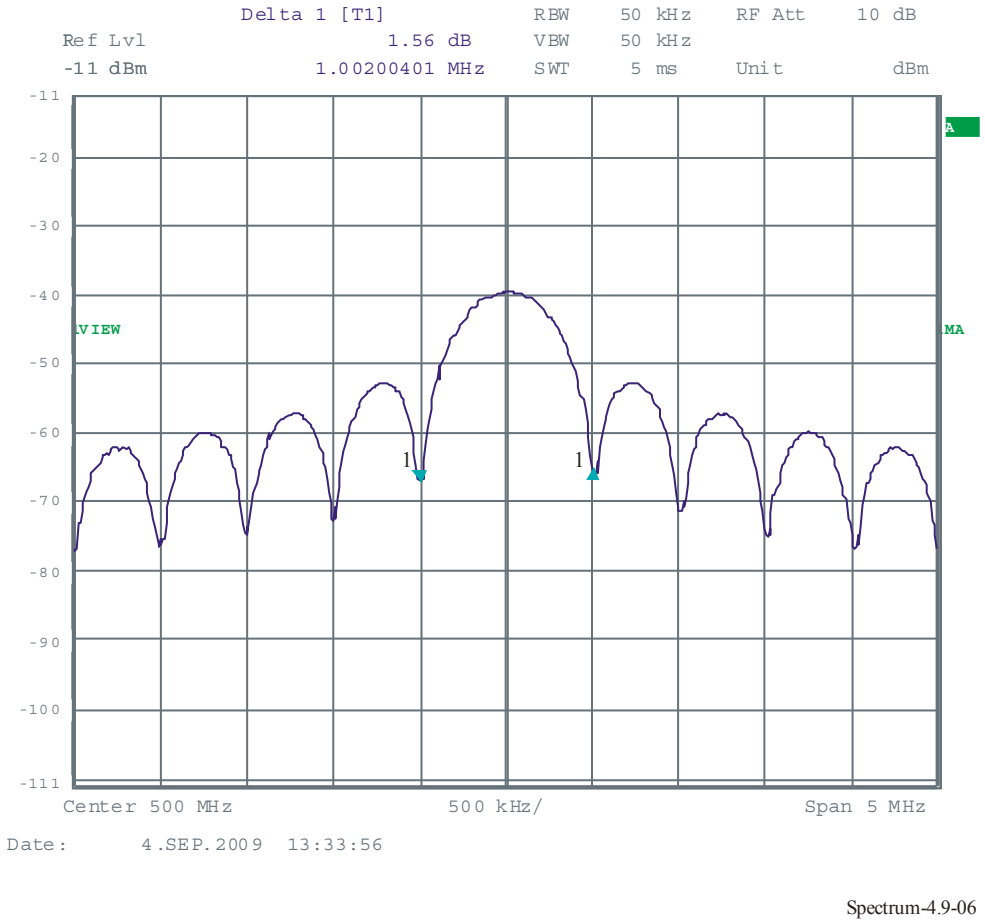
Para calcular la tensión de entrada de la señal en el receptor de RF, debe conocerse la amplificación del receptor hasta la salida de video. El resultado de la medición se reduce en el valor de dicha amplificación.

4.9.4 Mediciones en el dominio de la frecuencia

Tal como se ha mencionado, el espectro de una señal de impulsos permite realizar la medición de algunos parámetros característicos. Sin embargo, incluso con los analizadores de espectro más modernos, en el dominio de la frecuencia sólo es puede medirse el nivel de cresta y la duración del impulso. Ello se debe a que el analizador no puede diferenciar las líneas espectrales que componen el espectro. En la Fig. 4.9-6 se muestra un ejemplo de medición de la duración de un impulso.

FIGURA 4.9-6

Medición de la duración del impulse en el dominio de la frecuencia



Spectrum-4.9-06

Los marcadores que se muestran en la Fig. 4.9-6 se han situado en los dos primeros mínimos cercanos a la frecuencia central. Su distancia (delta) es de 1 MHz, que es dos veces la distancia a los mínimos siguientes. La duración del impulso es por tanto 2/1 MHz = 200 µs (véase el texto en la parte inferior de la Fig. 4.9-2).

Para disponer de una buena resolución en frecuencia cuando se represente el espectro verdadero de la emisión, es recomendable una resolución de anchura de banda (RBW) estrecha, del orden de 1/500 del

margen. No obstante, con este ajuste no puede realizarse ninguna medición de nivel. Para medir el nivel de cresta del impulso, la RBW debe ser al menos 1/duración del impulso.

En cualquier caso, las mediciones en el dominio de la frecuencia de las señales de impulsos con un analizador de espectro deben utilizar la función *MaxHold* (retención de máximos).

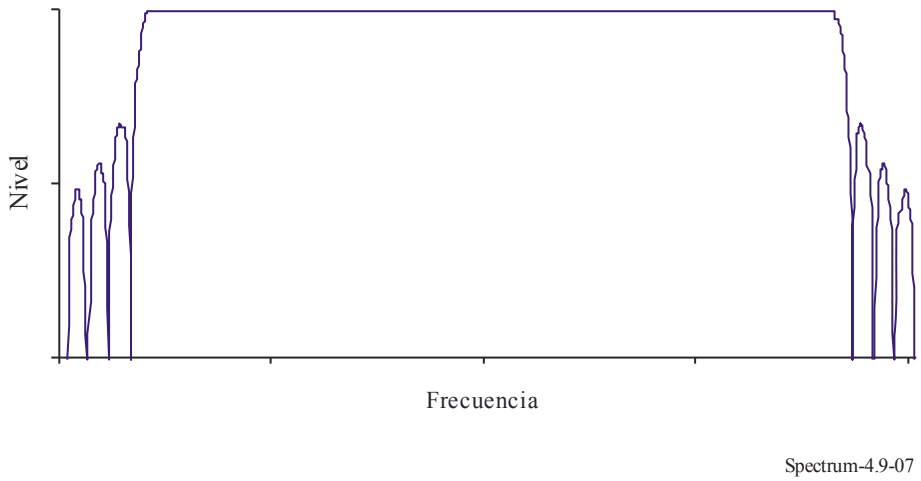
Debido a que las líneas del espectro del impulso están correladas en fase, el nivel espectral indicado aumenta 20 dB si la RBW se aumenta en un factor de 10, mientras que el ruido de fondo aumenta sólo 10 dB. Por tanto, la relación señal/ruido máxima se logra cuando RBW es igual a $1/\tau$. En consecuencia, la visualización óptima del espectro es un compromiso entre una elevada *S/N* y una buena resolución de frecuencia.

4.9.5 Características de impulsos especiales

La aplicación más común de las emisiones (deseadas) de impulsos es el radar. Además de los impulsos trapezoidales, algunos sistemas de radar especiales modulan los impulsos en amplitud, fase y frecuencia. Dichas emisiones radar tienen espectros especiales que pueden diferir significativamete del espectro de las Figs 4.9-2 y 4.9-6. A título de ejemplo, la Fig. 4.9-7 muestra el espectro de un radar cuya frecuencia varía durante el impulso transmitido ("radar de compresión de impulsos", "*chirp radar*")

FIGURA 4.9-7

Espectro principal con función MaxHold de un radar de compresión de impulsos



En el caso de un radar de compresión de impulsos, su anchura de banda y forma espectral están fundamentalmente determinados por la modulación, mientras que las partes residuales del espectro a izquierda y derecha, que tienen una amplitud notablemente menor, están básicamente determinadas por el periodo de repetición de impulsos. Los mismos principios son de aplicación a los radares basados en impulsos modulados digitalmente.

Algunos sistemas radar utilizan duraciones de impulsos y/o frecuencias de repetición de impulsos (PRF) alternativas. Cuando se mide el espectro de dicho tipo de radar, los niveles mínimos y máximos pueden no ser tan dispares como los indicados en la Fig. 4.9-2. A modo de ejemplo, en la Fig. 4.9-8 se muestra el espectro de un sistema con dos duraciones de impulsos diferentes.

Es claro que para emisiones que pueden presentar duraciones de impulsos alternativas, este parámetro no puede medirse en el dominio de la frecuencia. En lugar de ello, deben realizarse mediciones en el dominio del tiempo en las que cada impulso se visualice y mida por separado.

4.9.6 Requisitos de los equipos

Junto a requisitos normalizados como la capacidad de sintonizar la frecuencia deseada, medir con precisión el nivel de cresta y otras, la anchura de banda (o resolución de anchura de banda, RBW) es el parámetro más crítico en las mediciones de impulsos. Para medir correctamente los tiempos de subida y caída de un

impulso, la anchura de banda necesaria del conjunto de equipo de recepción y medición (receptor, analizador de espectro, salida de video, osciloscopio) debe ser lo suficientemente alta como para seguir correctamente el nivel del impulso durante esos periodos de tiempo.

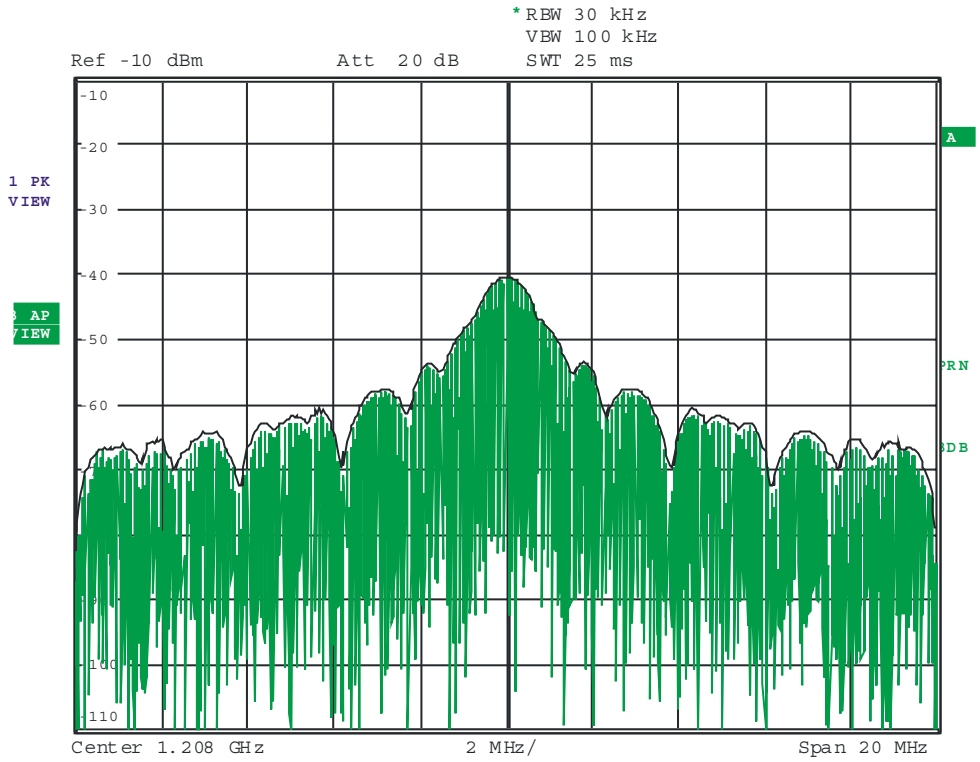
Este requisito impone condiciones altamente exigentes en la mayoría de los equipos modernos. La medición de los tiempos de subida y caída puede resultar imposible con receptores y/o analizadores de espectro convencionales.

Sin embargo, la anchura de banda de un equipo convencional es por lo general suficientemente elevada como para medir el nivel, la duración y la frecuencia de repetición de los impulsos.

En el Cuadro 4.9-1 se muestran los requisitos de anchura de banda mínimos para la medición de los distintos parámetros de los impulsos.

FIGURA 4.9-8

Espectro de un radar con duraciones de impulsos alternativas



Spectrum-4.9-08

CUADRO 4.9-1

Anchura de banda de medición mínima

Medición de	Anchura de banda mínima	Observaciones
Forma espectral, anchura de banda y duración de impulsos en el dominio de la frecuencia	– ninguna –	El máximo recomendado de RBW es 1/100 del margen

Medición de	Anchura de banda mínima	Observaciones
Nivel de cresta del impulso	$\frac{1}{\tau}$	Para sistemas con diversas duraciones de impulsos: 1/duración mínima
Frecuencia de repetición de impulsos	$\frac{1}{\tau}$	Para sistemas con diversas duraciones de impulsos: 1/duración mínima La precisión de la medición aumenta con la anchura de banda
Duración del impulso	$\frac{1}{10\tau}$	La precisión de la medición aumenta con la anchura de banda
Tiempos de subida y caída	$Min\ (\frac{1}{10t_r};\frac{1}{10t_f})$	La precisión de la medición aumenta con la anchura de banda

Debido a la velocidad de barrido relativamente lenta de los analizadores de espectro convencionales y a que la mayoría de las señales de impulsos presentan una duración de impulsos muy corta y una frecuencia de repetición (PRF) baja, un espectro como el que se muestra en la Fig. 4.9-6 sólo podrá observarse tras permanecer un tiempo relativamente prolongado en el modo de retención de máximos (MaxHold). Debido a la lenta rotación de la antena y la baja relación entre impulso y pausa de los sistemas de radar, el tiempo de observación puede oscilar entre minutos y horas. Sin embargo, con los analizadores de FFT el espectro se visualiza tras la captura de un único impulso. Si además el equipo permite la captura continua durante un periodo completo, el analizador de FFT también puede medir la longitud del impulso en el dominio del tiempo para sistema radar con duraciones de impulsos alternativas. Junto con una anchura de banda de adquisición amplia, los analizadores FFT o los equipos con capacidad completa de análisis FFT, son los preferidos para las mediciones de impulsos.

4.10 Mediciones de ocupación del espectro

4.10.1 Generalidades

El término mediciones de la ocupación del espectro se refiere al registro de emisiones durante un periodo de tiempo. A partir de los datos en bruto adquiridos pueden elaborarse un número casi ilimitado de gráficos, cuadros, etc, como por ejemplo, la ocupación calculada por banda de frecuencias o por canal que supere un nivel umbral dado. Las cuestiones relativas a la identificación de quién, dónde y cuándo se ocupa un canal o banda de radiofrecuencias no forman parte del concepto de ocupación del espectro y se analizan en la sección 4.8 (Análisis de la señal e identificación del transmisor).

El equipo receptor puede estar formado por receptores de medición (de banda ancha o banda estrecha) o analizadores de espectro conformes con las Recomendaciones UIT-R pertinentes.

Para realizar mediciones adecuadas de la ocupación espectral deben tenerse en cuenta las Recomendaciones UIT-R mencionadas en la bibliografía.

4.10.2 Técnicas de medición

El inventario de la utilización del espectro radioeléctrico proporciona información a los responsables de la gestión de frecuencias sobre la utilización real del espectro y les brinda la posibilidad de realizar nuevas asignaciones de frecuencias en una determinada banda de frecuencias. Igualmente ofrece información al departamento de gestión del espectro sobre las tendencias en la utilización del mismo. Esta información puede utilizarse para preparar los puntos de vista nacionales de cara a las conferencias internacionales.

La comprobación técnica del espectro puede realizarse de forma manual, automática o simultáneamente de ambas formas.

Cuando es necesario analizar e identificar emisiones observadas (véase 4.8) se realizan comprobaciones técnicas manuales complementarias a la comprobación técnica automática. Sin embargo, puesto que la comprobación técnica manual es una actividad intensiva en mano de obra y tiempo, se recurrirá a ella cuando no puedan registrarse automáticamente las características básicas.

Los periodos de utilización de los datos o el alcance de la ocupación de una banda de frecuencias no se obtienen adecuadamente por medios manuales.

Cuando no se desea utilizar la técnica de almacenamiento manual, se utiliza una técnica de registro automático basada en las destintas tareas de comprobación técnica de ocupación del espectro. Existen tres métodos de medición para la comprobación técnica automática:

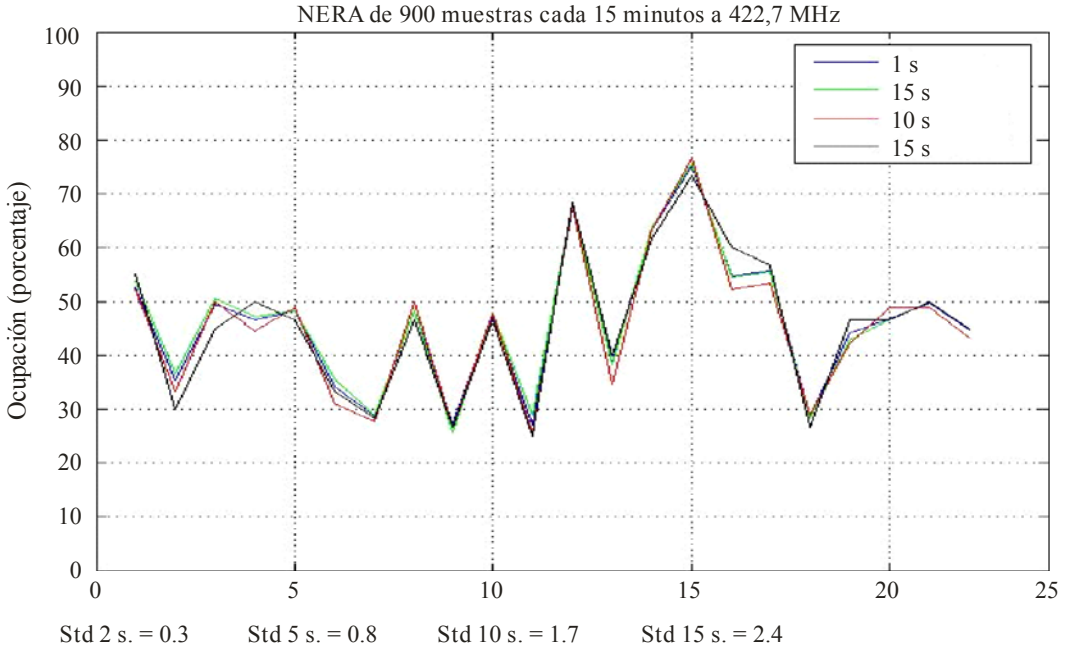
– Exploración de una determinada banda de frecuencias entre dos frecuencias, F-inicio y F-fin, en un conjunto de pasos de frecuencia, por ejemplo, 1 000, con una velocidad de exploración dada (tiempo de barrido o entre dos mediciones consecutivas de la misma frecuencia), por ejemplo, 10 s con un determinado filtro de anchura de banda. Normalmente se utiliza con un analizador de espectro o un receptor (rápido) de comprobación técnica. Los resultados, representados en una serie de gráficos y cuadros, ofrecen información de la ocupación de dicha banda de frecuencias, en particular durante un periodo de tiempo generalmente de 24 h. Estas mediciones se denominan mediciones de ocupación de banda de frecuencias (FBO, *frequency band occupancy*) o registros de bandas de frecuencias (Recomendación UIT-R SM.1809).

– Medición de un número de canales predeterminados, que pueden no tener una separación uniforme entre ellos. Estas mediciones se realizan normalmente con un receptor y se denominan mediciones de ocupación de canales de frecuencias (Recomendación UIT-R SM.1536).

– Mediciones de la ocupación de canales de frecuencias (FCO, *frequency channel occupancy*), que utiliza las mediciones de bandas de frecuencias antes descritas. Supóngase que la banda entre las dos frecuencias (F-inicio y F-fin) que delimitan la observación se divide en 100 pasos de frecuencia. A estos efectos, dichos pasos pueden considerarse canales. Si el tiempo de barrido/de exploración/entre mediciones consecutivas de la misma frecuencia es, por ejemplo, 10s, en un plazo de 24 h se tomarán 8 630 muestras para el conjunto de 1000 canales. Dichos resultados pueden procesarse fácilmente como mediciones de ocupación de canales de frecuencia (Recomendación UIT-R SM.1793). Los estudios realizados muestran que un aumento del tiempo entre mediciones consecutivas de la misma frecuencia de 1 s a 10 s no influye demasiado en los resultados, tal como se refleja en la Fig. 4.10-1.

FIGURA 4.10-1

Comparación de distintos tiempos entre mediciones consecutivas de la misma frecuencia



Numerosos parámetros de una emisión, como la intensidad de la señal (mínima, máxima o media) y el porcentaje del tiempo durante el que la señal está por encima de un determinado umbral, pueden evaluarse para todo el periodo de medición o bien, para periodos más reducidos, por ejemplo 1 hora. Los parámetros registrables se determinan en función de las mediciones de la ocupación de la banda de frecuencias o de los canales de frecuencias y no están ligados a métodos específicos.

La comprobación técnica de la ocupación del espectro puede realizarse con un analizador de espectro o con un receptor de comprobación técnica, ambos controlador por computador. Una combinación de ambos tendría poco sentido. Un analizador de espectro o un receptor de comprobación técnica de banda ancha tienen la ventaja de una velocidad de exploración superior, mientras que un receptor de comprobación técnica permite realizar la comprobación técnica de frecuencias individuales de forma aleatoria.

La gama de frecuencias sujetas a comprobación técnica dependen de los sistemas utilizados en la banda de frecuencias a medir (por ejemplo, duración y anchura de banda de la transmisión) y del equipo utilizado. La ocupación es una función del tiempo durante el que las señales permanecen por encima de un umbral dado.

La comprobación técnica automática de las emisiones ofrece información sobre lo siguiente:

Visión general del espectro

– No incluye el grado de ocupación expresado en términos porcentuales sino información de uso general. Ello incluye, entre otras cosas, la presentación del nivel a lo largo del tiempo, por ejemplo, mediante espectrogramas, valores mínimos/máximos/mediana/promedios, gráficos en cascada, etc.

Ocupación del canal

– Es una medición clásica de la ocupación, refleja la ocupación del canal durante un periodo cualquiera de tiempo (%) (normalmente se toman 15 min).

Carga de tráfico

– Los datos de ocupación promediados sobre periodos de 60 min pueden expresarse como intensidad de tráfico en erlangs. El comportamiento variable con el tiempo del tráfico puede servir de base para determinar los requisitos del canal y para la evaluación de la calidad de servicio (QoS). En este contexto resulta especialmente significativa la determinación de la hora punta. La hora punta/hora cargada se determina a partir del comienzo del intervalo de medición relevante, por ejemplo, las 13:15, y establecen la ocupación del canal durante el intervalo de medición, por ejemplo, de 13:15 a 14:15.

Los análisis de ocupación del espectro no se limitan necesariamente al registro de emisiones en el espectro de interés, sino que también pueden aplicarse a datos registrados por otros equipos de medición, como los analizadores de protocolo.

Además, los análisis de ocupación del espectro junto con diversas fuentes de datos permiten registrar otros muchos parámetros y presentar las evaluaciones en distintos formatos. La información de usuario recogida de herramientas de planificación y de bases de datos de usuarios, así como las observaciones de diversas comprobaciones técnicas manuales simultáneas permite elaborar (automáticamente) gráficos y cuadros.

A continuación se presentan algunos ejemplos:

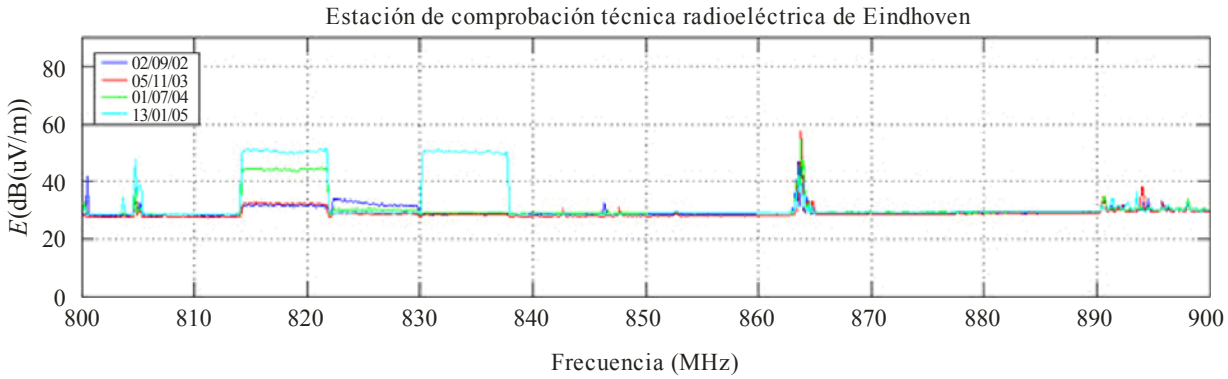
– Determinación del número de usuarios o distribución espacial de las aplicaciones.

– Comportamiento de utilización de acuerdo con funciones de distribución de la duración de las secuencias de ocupación. Para este tipo de determinación de la ocupación es esencial un buen conocimiento del comportamiento de los usuarios.

– Determinación de la variabilidad o estabilidad del uso mediante la correlación de los datos de mediciones realizadas durante periodos idénticos. A esto se denomina comprobación técnica Delta (comparación de los resultados de diferentes mediciones en la misma banda de frecuencias y en fechas distintas, representado todas las curvas en una gráfica).

FIGURA 4.10-2

Ejemplo de comprobación técnica Delta



4.10.3 Receptores para la comprobación técnica de la ocupación del espectro

Los receptores y los analizadores de espectro de comprobación técnica utilizados para esta aplicación deben satisfacer, como requisito mínimo, las recomendaciones contenidas en otros capítulos del presente Manual. El receptor de comprobación técnica utilizado para medir la ocupación del espectro deberá reunir las siguientes características

– una elevada selectividad en RF (en particular, debe haber suficientes filtros de RF adecuadamente distribuidos en la banda de funcionamiento de los receptores para evitar, en la medida de lo posible, la formación de productos de intermodulación);

– deben estar dotados de filtros en FI de banda suficientemente estrecha y/o de una salida I/Q para el filtrado de FI mediante procesamiento digital de la señal externo;
– deben ir equipados con un atenuador variable;
– deben poder utilizar un patrón de frecuencia externo;
– deben poder medir con precisión la intensidad de campo;
– deben poder explorar rápidamente los canales seleccionados de banda de frecuencias, especialmente por encima de 30 MHz.

En función de la tarea, se determina la necesidad del dato exacto de intensidad de campo en una medición de ocupación. En la mayoría de los casos, basta con un valor de tensión de entrada para detectar una ocupación.

En la selección del receptor debe tenerse en cuenta el diseño del equipo de medida, pues afecta al resultado de la medición: los receptores con sintetizador pueden ajustarse a cualquier frecuencia. No obstante, su proceso de exploración es más lento que el de sistemas de banda ancha basados en la FFT. Si se utiliza la FFT, la anchura de banda de medición se divide en un número fijo de puntos de cálculo Por tanto, no es posible la medición de una frecuencia concreta. El ajuste del equipo de medición debe tenerse en cuenta, especialmente para mediciones de la ocupación de un canal, debiendo elegirse uno en particular en el que los puntos de la FFT coincidan con las frecuencias a medir.

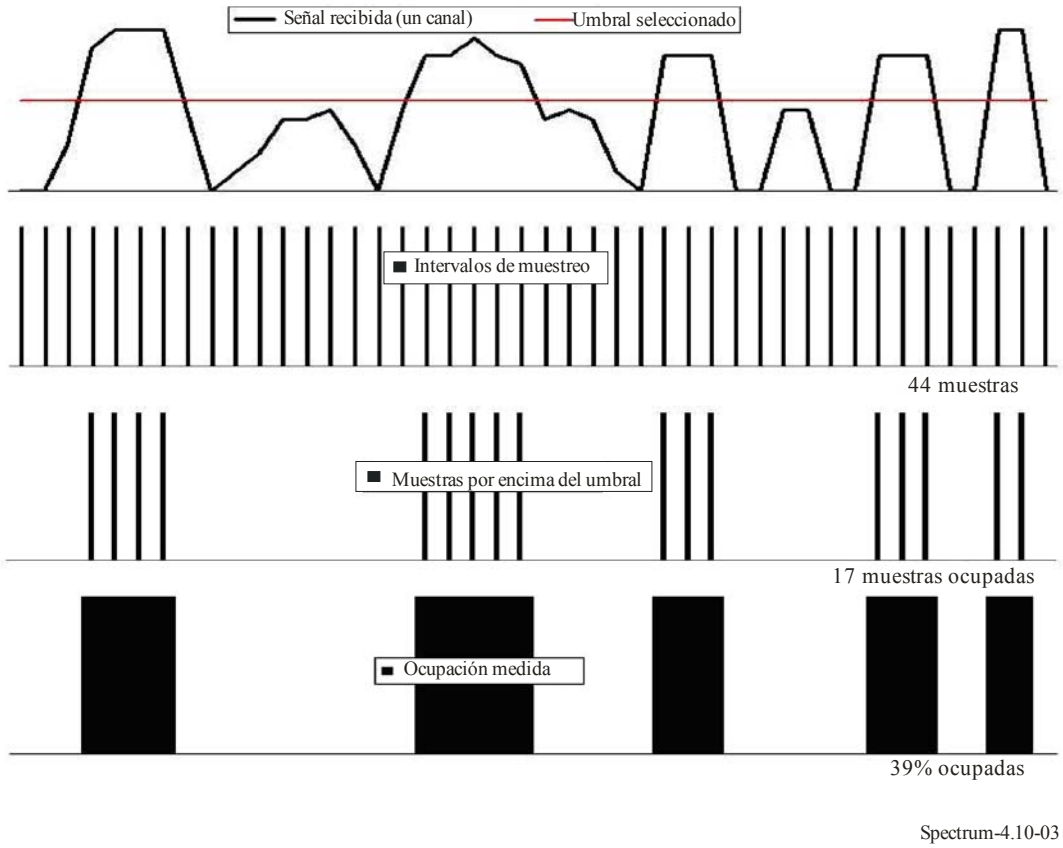
4.10.4 Principios básicos y parámetros de medida

4.10.4.1 Principios de muestreo

En la Fig. 4.10-3 se representa una señal de intensidad variable típica con el umbral indicado. Los instantes de muestreo y las muestras que registran el estado de "ocupado" se representan conjuntamente. En este ejemplo 17 de los 44 periodos de muestreo quedaron ocupados, lo que supuso una tasa de ocupación del 39%. Estos datos pueden resumirse para intervalos de 1, 5, 15 minutos, 3h, 6h, 12h o 24h, según se prefiera.

FIGURA 4.10-3

Señal de intensidad variable típica



La técnica de muestreo proporciona normalmente una buena estimación de la ocupación de canal siempre que se tome un número suficiente de muestras para obtener resultados estadísticamente significativos. En el Cuadro 4.10-1 se indica el número de muestras necesarias para que los resultados tengan un grado de confianza razonable.

CUADRO 4.10-1

Número de muestras dependientes e independientes para conseguir una precisión relativa del ±10% y un nivel de confianza del 95% para diversos porcentajes de ocupación (se supone un periodo de muestreo de 4 s)

Ocupación (%)	Número de muestras independientes requeridas	Número de muestras dependientes requeridas	Horas requeridas de muestreo dependiente
6,67	5 368	16 641	18,5
10	3 461	10 730	12,0
15	2 117	6 563	7,3
20	1 535	4 759	5,3
30	849	2 632	2,9
40	573	1 777	2,0

Ocupación (%)	Número de muestras independientes requeridas	Número de muestras dependientes requeridas	Horas requeridas de muestreo dependiente
50	381	1 182	1,3
60	253	785	0,9
70	162	166	0,2

Para conseguir una precisión con un intervalo de confianza estadística fiable es necesario un número mínimo de muestras. Si la ocupación del canal es del 100%, sólo con unas pocas muestras se consigue una buena precisión. Con un nivel de ocupación bajo, se necesita un número mayor de muestras para conseguir la misma precisión y confianza estadística. La finalidad del cuadro es mostrar que la precisión en relación con el número de muestras a lo largo del tiempo depende en gran medida de la duración de la transmisión en la banda de frecuencias deseada y cuán a menudo se realicen emisiones. Por ejemplo, un usuario de un sistema radioeléctrico móvil privado (por ejemplo, un taxi) emite una hora de cada 12, por lo que la comprobación técnica debe realizarse durante un periodo mayor para conseguir una cierta precisión, frente a una estación de radiodifusión que transmite de forma continuada.

Normalmente, los valores del Cuadro 4.10-1 son suficientes para determinar el nivel de confianza. En el caso de aplicaciones especiales, como por ejemplo, una ocupación muy baja, un tiempo de barrido muy largo, etc., debe consultarse el texto "On the Definition and Estimation of Spectrum Occupancy" [Spaulding/Hagn, 1977].

El número de muestras del Cuadro 4.10-1 se refiere siempre al periodo de toma de datos necesario para conseguir la correspondiente precisión. En otras palabras, si se realiza un muestreo dependiente (siempre en el mismo intervalo), cuando se prevea una ocupación del 20% deberán tomarse 4 759 muestras por intervalo. Si se necesitan datos de carga de tráfico, el intervalo requerido es de 60 min. Si en un muestreo de larga duración es suficiente disponer de 4 valores por día (es decir, uno cada 6h), el intervalo es de 6h.

La velocidad de medición necesaria es, por tanto, función del intervalo en cuestión. En el ejemplo utilizado, para intervalos de 15 min las muestras deberían tomarse al menos cada 0,15 s, para intervalos de 60 min cada 0,6 s y para intervalos de 6h cada 3,5 s.

Desde el punto de vista de la gestión de frecuencias, no resulta muy crítica la medición de ocupaciones bajas. Sin embargo, pueden ser de interés ocupaciones de corta duración, por ejemplo, cuando el propósito es sólo determinar la utilización de frecuencias. Las declaraciones del tipo "no utilizada" y "utilización ocasional" pertenecen a ámbitos muy distintos.

4.10.4.2 Parámetros del sistema

Para realizar una estimación sobre la ocupación del mayor número de radiocanales posible, deben recopilarse y procesarse un gran número de datos. Por ejemplo, el receptor de exploración puede programarse para tomar 50 muestras cada 2 segundos, todas ellas de distintos radiocanales. Ello significa que el tiempo entre cada dos observaciones consecutivas del sistema es de 2 segundos. Se requiere un cierto tiempo para sintonizar dicho receptor al canal adecuado y obtener una resultado fiable. El periodo de observación o tiempo de permanencia por canal de este ejemplo es de unos 5 ms. El tiempo de observación de cada canal depende de la velocidad de exploración del equipo.

Cuando se programa el sistema de medición, debe tenerse en cuenta que si se utilizan distintos tipos de receptores y para disponer de resultados comparables, los ajustes deben ser los mismos.

4.10.4.2.1 Duración de la transmisión

Los distintos tipos de usuarios realizan transmisiones de distinta duración. Normalmente, las ráfagas de datos tienen menor duración que una señal de conversación. Las diferentes densidades de usuarios en zonas urbanas o rurales influyen en la duración de la transmisión y en las estadísticas de ocupación.

Debe distinguirse entre el tiempo de medición, durante el que se realiza una emisión, y el tiempo durante el que una comunicación ocupa el canal. Por ejemplo, en el caso de canales símplex, la conmutación entre los equipos de radiocomunicación implicados debe incluirse en el tiempo de utilización del canal. Los sistemas de grabación inteligente pueden registrar dichos tiempos y añadirlos a los periodos reales de ocupación.

4.10.4.2.2 Relación entre algunos parámetros relevantes

Existe una estrecha relación entre tiempo de observación, número de canales, longitud media de transmisión, precisión deseada y duración de la comprobación técnica.

El tiempo entre dos mediciones consecutivas es función del tiempo de observación y del número de canales

$$\text{Tiempo entre mediciones} = (\text{tiempo de observación por canal}) \times (\text{número de canales})$$

Para este tipo de mediciones el tiempo entre medidas debe ser (mucho) más corto que la longitud media de la transmisión. Para mantener un tiempo entre medidas consecutivas razonablemente corto con un equipo relativamente lento. Debe reducirse el número de canales a medir.

El sistema de comprobación técnica debe realizar la exploración a una velocidad aceptable para detectar transmisiones cortas individuales a fin de obtener información con una precisión y confianza que sean conformes con la Recomendación UIT-R SM.182, tal como se menciona en § 4.10.4.1.

4.10.4.3 Resolución de las mediciones

Dado el gran volumen de datos y la dificultad de su procesamiento, no es recomendable registrar datos en bruto. Por tanto, es razonable reducir los datos a un intervalo especificado durante la medición real. En función del objetivo perseguido y de la duración de la medición, un compromiso aceptable entre el registro de todos los datos y una pérdida de compresión demasiado elevada puede ser aplicar intervalos de 1 min, es decir, 1 440 registros de datos por día. Si dicha resolución no fuera necesaria o si el periodo de comprobación técnica resulta muy largo (por ejemplo, de varios meses), puede ser adecuado utilizar periodos más largos de 5, 15 ó 60 min. Sin embargo, en esos casos la resolución temporal del equipo de medición debería ser mucho mayor a fin de obtener una precisión mayor cuando se calculan medias móviles.

Por tanto, el software de comprobación técnica debe poder generar los datos de ocupación para valores de resolución seleccionables.

4.10.4.4 Consideraciones sobre la ubicación

Cuando se selecciona la ubicación para realizar mediciones de ocupación de canales de frecuencia deben tenerse en cuenta diversos factores.

Al igual que ocurre con la mayoría de las ubicaciones utilizadas para la recepción de señales, el equipo de comprobación técnica debe situarse en una ubicación que esté:

- alejada de transmisiones de radio de elevado nivel;
- alejada de estructuras y edificios que pudieran causar reflexiones;
- dentro de la zona de servicio del sistema radioeléctrico que se debe supervisar. Un software de predicción de cobertura puede ser una herramienta útil para determinar el rango de recepción;
- alejada de fuentes de ruido eléctrico, es decir, computadoras, controladores de velocidad de motores, etc.

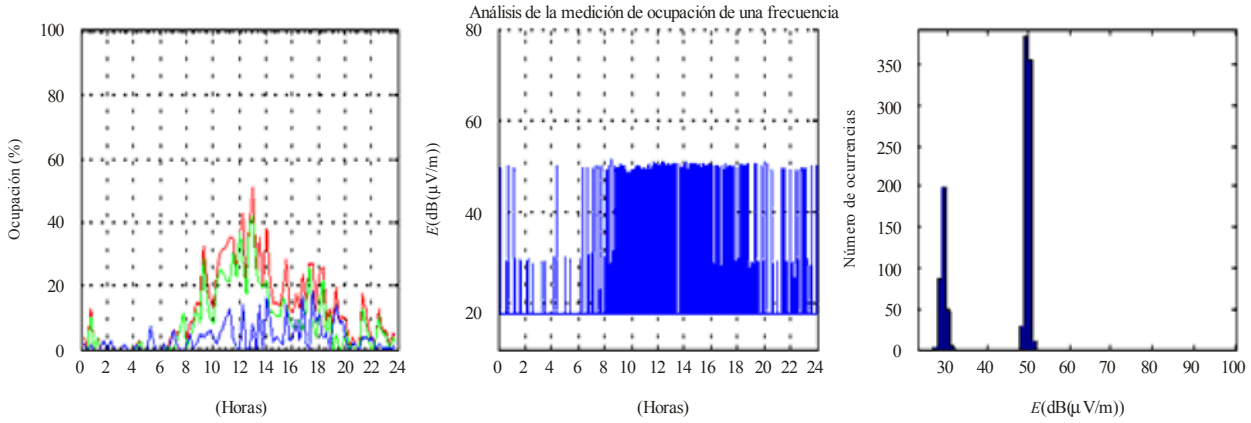
4.10.4.5 Limitaciones de la comprobación técnica y posibles soluciones

Aunque sea previsible obtener resultados de ocupación precisos, es conveniente tener en cuenta las limitaciones asociadas con la comprobación técnica automática de la ocupación y las zonas en las que pueden producirse imprecisiones en las mediciones. Un sistema de comprobación técnica automático sencillo no distingue entre las señales recibidas de una estación A y las señales recibidas desde una estación B (emisiones deseadas y no deseadas respectivamente).

La comprobación técnica automática avanzada discrimina las señales de distintas estaciones. La ocupación de las diferentes estaciones que funcionan en el mismo canal de frecuencias puede ser representada en un gráfico tal como se muestra en la Fig. 4.10-4.

FIGURA 4.10-4

Ejemplo de determinación de transmisores fijos



En la figura se identifican dos usuarios, el usuario verde, que se recibe con un nivel de unos 50 dB(µV/m), y la estación cuya ocupación se representa con la línea azul (con un nivel de unos 30 dB(µV/m). La línea roja muestra la ocupación total (verde + azul).

Para conseguir resultados bien diferenciados (crestas muy marcadas del diagrama de la derecha de la Fig. 4.10-4) es recomendable disponer de un número reducido de niveles con un elevado número de ocurrencias en cada uno.

4.10.4.5.1 Señales no deseadas

La mayoría de los sistemas automáticos de comprobación técnica de la ocupación utilizan un nivel umbral para determinar cuándo está ocupada una frecuencia.

Aunque el propósito evidente es registrar la actividad de las señales deseadas, la comprobación automática simple no puede discriminar entre emisiones deseadas e indeseadas. Ambos tipos de emisiones se tratan como una ocupación legítima del canal.

Las señales indeseadas pueden ser originadas por cualquiera de las fuentes siguientes:

– transmisiones no autorizadas;
– usuarios de elevado nivel del canal adyacente;
– emisiones no esenciales y fuera de banda de transmisores;
– interferencia producida por el hombre (por ejemplo, motores eléctricos);
– condiciones de propagación reforzadas debido a condiciones meteorológicas o ambientales;
– usuarios cocanal en una ubicación distante.

Sin embargo, desde la perspectiva de un usuario se considera que todos los tipos de señales suponen una ocupación y como tales, no son críticas en lo que a la medición se refiere.

Debe tenerse especial cuidado en la fase de diseño del sistema para evitar los productos de intermodulación en el receptor y para identificar dichos productos al objeto de que sean suprimidos mediante algoritmos informáticos. Para tratar un producto de intermodulación se inserta de forma automática una atenuación fija y conocida en radiofrecuencia en exploraciones alternativas suprimiendo todas las señales registradas que hayan sufrido una atenuación superior. Sin embargo, esta técnica de medición reduce a la mitad el tiempo de registro. Tampoco es absolutamente fiable ya que supone que las emisiones no cambian entre dos barridos consecutivos.

4.10.4.5.2 Ocupación total

Aunque el sistema de comprobación técnica no sufra los problemas antes mencionados y solamente reciba señales legítimas, los resultados relativos a la ocupación deben tratarse con precaución.

Si en una frecuencia y dentro de la zona de cobertura del sistema de comprobación técnica hay activos varios usuarios, la ocupación registrada es la combinación del tráfico radiocomunicaciones de cada usuario.

Puede ocurrir que una unidad móvil deseada (móvil A) se encuentre significativamente más lejos de la ubicación del sistema de comprobación que de la correspondiente estación base (Base A), por lo que la intensidad de campo de la señal recibida puede ser menor que el valor umbral de referencia de la comprobación, a pesar de que en la ubicación de la estación base sea suficientemente elevado como para poder ser utilizado. Por el contrario, una estación móvil de un usuario que se encuentre fuera de su zona (móvil B) puede ser recibida en la ubicación del sistema de comprobación pero no ser detectada en la estación base de dicho usuario.

Cualquiera de las dos situaciones descritas puede llevar a interpretaciones erróneas de los resultados de ocupación. La posibilidad de dichos errores debe evaluarse y documentarse en un informe sobre la medición. La selección de la ubicación de medición y la calidad de la cadena de recepción tienen un impacto significativo en el resultado de la medición.

4.10.4.6 Fijación del umbral

Se distingue entre fijación de umbral fijo o dinámico.

Un umbral fijo se define como la intensidad de campo mínima necesaria para la cobertura radioeléctrica. Por tanto, emula la situación de una estación de la red sujeta a comprobación técnica. Cuando se utiliza un valor de umbral fijo, pueden compararse los resultados de las últimas mediciones con mediciones anteriores. Si se utiliza un nivel dinámico (cambiante), no pueden compararse los resultados.

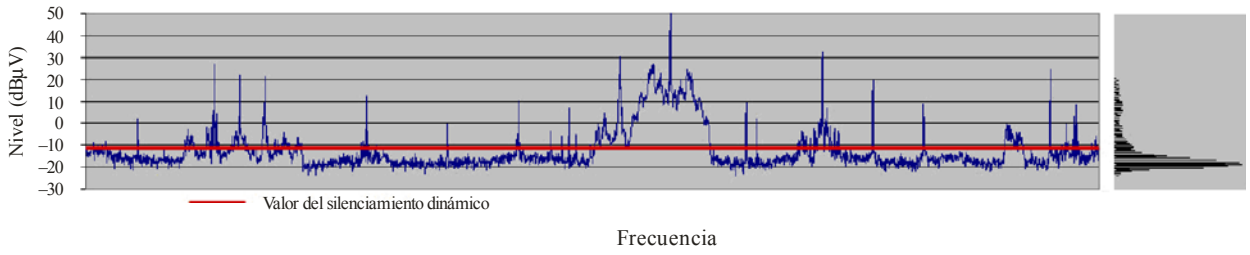
El umbral también puede definirse en virtud del conocimiento de los niveles de señal en el emplazamiento de medición. Para determinar el umbral, debe añadirse un margen de 8-12 dB al ruido. El valor real que debe añadirse al nivel de ruido depende de "qué se espera ver". Si es necesario identificar todas las señales en la zona de cobertura del receptor, no deberían añadirse más de 3 dB, hasta un máximo de 5 dB, al nivel de ruido calculado. En el caso de un umbral fijo, debe determinarse el nivel de ruido de todos los (receptores) emplazamientos (distantes) y almacenarlos en una base de datos sencilla. Los valores de dicha base de datos se utilizan una vez procesados los datos.

Es obvio que el nivel de ruido de fondo para el procesamiento de resultados en la banda de radiodifusión con MF de 87,5 MHz a 108 MHz será distinto al de la banda de frecuencias de 118 MHz a 133 MHz del servicio aeronáutico.

Si las mediciones se realizan con un analizador de espectro o un receptor, existen varios algoritmos para calcular el valor de silenciamiento dinámico. La forma más sencilla es a partir de la distribución de las muestras de un barrido. Se añade un margen de 5-10 dB al nivel del valor discreto más frecuente de todos los valores detectados en el barrido. De esta forma, se determina el umbral de detección de ocupación mediante barrido.

FIGURA 4.10-5

Determinación del silenciamiento dinámico



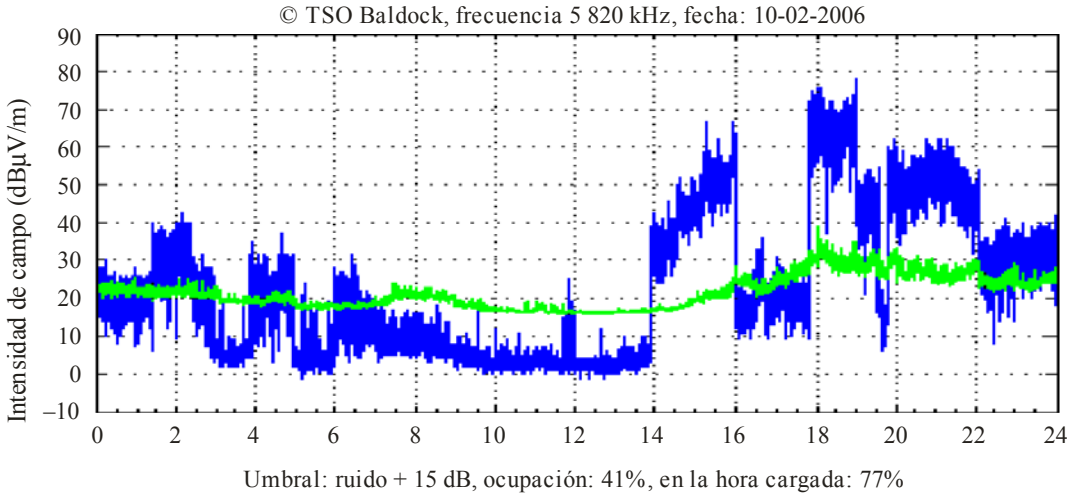
Spectrum-4.10-05

De esta forma se calcula un nuevo umbral para cada barrido. Este método ofrece una gran ventaja cuando los ciclos de medición tienen una mayor duración. Los cambios en el nivel de ruido o señales no deseadas de banda ancha no falsifica la medición de la ocupación ni la hace inutilizable. No obstante, debe tenerse una especial precaución en garantizar que el espectro registrado contiene un número suficiente de muestras que replican al ruido. En las bandas en ondas métricas, decimétricas y centimétricas el ruido de fondo cambia ligeramente con el tiempo. No obstante, el cambio se considera normal si no es superior a unos pocos dB. Añadir al ruido unos pocos dB (de 3 a 5 dB) no tiene influencia. Por tanto, no siempre es necesario calcular un nuevo umbral para cada barrido. Si el ruido de fondo cambia en más de 5 dB, se considera que existen condiciones (de propagación) excepcionales y que los resultados pueden estar corrompidos y no ser fiables.

En las bandas de frecuencias decamétricas la situación es completamente diferente. El nivel de ruido se modifica con el día y la estación, existiendo grandes diferencias a lo largo de 24 h. En ese caso, debe calcularse un umbral dinámico en función del tiempo, debiendo añadirse al nivel de ruido un número mayor de dB para determinar el umbral. En la Fig. 4.10-6 se añaden 15 dB.

FIGURA 4.10-6

Variación del ruido en ondas decamétricas durante un día



Spectrum-4.10-06

No es conveniente modificar posteriormente el valor del umbral pues sería necesario registrar nuevos datos en bruto

Si el periodo de medición es de 24 h, un tiempo de barrido de 500 ms y 1000 pasos produciría un volumen de datos de unos 700 MB (1000 puntos de datos con 4 bytes cada uno por cada barrido o exploración del espectro). Es decir, 172 800 puntos espectrales en 24 h * 4 kB = 700 MB aproximadamente).

En función de la duración de la transmisión de señales en la banda de frecuencias a medir, no siempre es necesario utilizar un tiempo de barrido de 500 ms. Por ejemplo, la medición en las bandas de frecuencias de radiodifusión puede hacerse con tiempos de barrido de 10s (tamaño aproximado del fichero de 35 MB). No obstante, incluso en el caso de 500ms, la compresión permite reducir un fichero de 700 MB a aproximadamente 230 MB.

Los discos duros de 1 TB están ampliamente disponibles y permiten almacenar más de 4 000 ficheros comprimidos, cada uno de ellos con mediciones de 24 h con barridos de 500 ms.

Aunque exista suficiente espacio de almacenamiento, guardar tal cantidad de datos es problemático y complica la evaluación. Por diversas razones es conveniente reducir los datos durante la fase de recopilación, aunque ello no implica que los parámetros que deben fijarse tengan que ser conocidos antes del comienzo de la medición.

4.10.5 Mediciones en las bandas de frecuencias

En principio, las mediciones de ocupación del espectro se realizan de igual forma, con independencia de que las frecuencias sean inferiores o superiores a 30 MHz. Tal como se describe en la Recomendación UIT-R SM.1809, puede utilizarse la misma metodología para todo el espectro.

Para frecuencias por debajo de 30 MHz, no se realizan normalmente mediciones de ocupación del canal de frecuencias (una excepción ha sido la medición de la ocupación de canales de radiodifusión en ondas decamétricas realizadas durante las campañas europeas de comprobación técnica de preparación de la CMR-2007).

Para la medición de la ocupación de canales de frecuencia por encima de 30 MHz, normalmente se aplica el método de medición descrito en la Recomendación UIT-R SM.1536 o las mediciones de bandas de frecuencias descritas en la Recomendación UIT-R SM.1809, junto con el método de procesamiento de la Recomendación UIT-R SM.1703, que ofrece la posibilidad de discriminar entre más de un usuario en el mismo canal.

4.10.5.1 Frecuencias por debajo de 30 MHz

Para realizar una comprobación técnica manual de la ocupación del espectro por debajo de 30 MHz, el equipo de análisis debe ofrecer una adecuada variedad de los filtros de análisis, con anchura de banda entre unos 100 Hz y 10 kHz. La medición de frecuencias (con una precisión de hasta 1 Hz) es de gran ayuda para examinar la ocupación, especialmente para la identificación de las señales.

Como regla general, el equipo de medición debe poder ajustarse para registrar correctamente las emisiones Para aumentar la sensibilidad de la determinación de la ocupación, también puede medirse en una banda más estrecha.

El periodo de medición y el número asociado de muestras/intervalos de medición depende de la tarea a acometer. Puede ser suficiente realizar mediciones durante un breve periodo de tiempo (por ejemplo, un día) pero con una resolución superior para, por ejemplo, identificar la hora cresta de tráfico, o en el caso de mediciones a largo plazo durante semanas o meses, tomar el mismo número de muestras durante intervalos más prolongados.

Las mediciones de ocupación pueden basarse en canales o frecuencias. Este último caso sólo tiene sentido si se utiliza un analizador de espectro. Si la ocupación de un determinado canal o frecuencia no es de interés para el objetivo perseguido, es preferible realizar mediciones asociadas a una banda de frecuencias. En principio, en dichas mediciones se suman las ocupaciones individuales y se extrae información de la banda de frecuencias y los canales observados. La pérdida de información de canales/frecuencias concretas reduce la varianza de los resultados.

4.10.5.2 Frecuencias por encima de 30 MHz

Las mediciones de frecuencias por encima de 30 MHz pueden utilizarse para tareas relacionadas con la gestión de frecuencias y con las obligaciones legales conexas:

– Registro de la ocupación del canal.
– Registro de la banda de frecuencias.
– Análisis de tráfico.
– Demostración de la disponibilidad de una banda de frecuencias para nuevos usos tras un proceso de "reordenación del espectro".
– Identificación de utilizaciones ilícitas de frecuencias.
– Prevención de la interferencia.
– Análisis a largo plazo.
– Análisis de redes celulares con asignación dinámica de canales (determinación del comportamiento de una célula en su conjunto).

4.10.5.2.1 Mediciones de la ocupación de canales de frecuencias

En la mayoría de los países, las bandas de frecuencias por encima de 30 MHz están planificadas de acuerdo con sistemas de planificación bien determinados, por ejemplo los de estructura de tipo panal. Los radiocanales se asignan a los usuarios de acuerdo con su disponibilidad. La información relativa a los usuarios con licencia que se recopila de bases de datos de gestión de frecuencias solamente indica que está autorizada la utilización de la frecuencia. El número de asignaciones en una frecuencia no siempre proporciona información adecuada sobre la utilización real de dicha frecuencia en particular.

Por lo tanto, en zonas congestionadas es necesario que las asignaciones de frecuencias se basen en datos más realistas. Las mediciones de densidad de tráfico en los radiocanales permiten disponer de valores más precisos sobre la ocupación de los mismos. La repetición de dichas medidas a intervalos regulares permite a los gestores de frecuencias establecer tendencias a partir de datos históricos.

4.10.5.2.2 Servicios

Los servicios de radiocomunicaciones móviles privadas se han basado tradicionalmente en la transmisión analógica de señales vocales. Sin embargo, la transmisión de datos se ha introducido como una facilidad adicional o como un medio principal de comunicación. Cuando los usuarios desean incorporar a sus redes móviles existentes la posibilidad de intercambiar mensajes de datos, los datos se transmiten en radiocanales compartidos. En ese caso, el organismo regulador deberá conocer las características del radiocanal para determinar cómo ha de comportarse el sistema de comunicaciones de datos. Es posible que los requisitos de algunos usuarios sólo puedan satisfacerse mediante la asignación de radiocanales más adecuados.

Por regla general, los nuevos servicios también tendrán repercusión sobre la ocupación de un radiocanal según la estación móvil incorporada al mismo. Ello normalmente aumenta el volumen total de tráfico en el radiocanal. Como este hecho no se refleja en un sistema administrativo que registra únicamente el número de estaciones móviles, deben tenerse en cuenta información adicional.

4.10.5.2.3 Información adicional sobre determinados usuarios

Además de determinar si la intensidad de campo de la señal es superior a un determinado umbral mediante una declaración en ese sentido o en sentido contrario, deben registrarse muchos otros parámetros tales como la intensidad de campo de la señal, el tipo de modulación e información sobre identificación (por ejemplo, llamadas selectivas).

Además del registro de la ocupación, resulta de utilidad registrar el valor máximo, medio y mínimo en cada intervalo. Ello no solo aporta datos de la ocupación sino que también permite un análisis posterior de la actividad relacionada con las frecuencias ya que, por ejemplo, pueden reconocerse emisiones regulares de corta duración que de otra forma quedarían ocultas por la promediación.

El comportamiento registrado a lo largo del tiempo también permite obtener información sobre el tipo de utilización.

4.10.5.2.4 Exploración lenta de canales

Este método es muy similar a las medidas de ocupación de frecuencias descritas anteriormente excepto en que las frecuencias se exploran a una velocidad mucho menor, por ejemplo, dos frecuencias por segundo. Este método puede utilizarse cuando la identidad del usuario se transmite durante toda la transmisión del mismo, pudiendo obtenerse mediante una exploración realizada en cualquier instante de la transmisión

Es posible realizarla con los sistemas siguientes:

- sistema de señalización controlado por tonos continuos (CTCSS, *continuous tone controlled signalling system*);
- silenciador codificado digitalmente (DCS, *digitally coded squelch*).

Cuando es necesaria una declaración más específica sobre la utilización de las frecuencias, por lo general deben registrarse y evaluarse datos adicionales del protocolo.

En sistemas radioeléctricos digitales de transmisión continua, por ejemplo, TETRA y GSM, el registro del protocolo del canal de control es el único medio para obtener información sobre el nivel de ocupación.

4.10.5.2.5 Comprobación estática de canales

Este método permite recopilar información sobre la longitud de la transmisión, pudiendo utilizarse también en sistemas en los que el usuario final sólo envía su identificación una vez a lo largo de la transmisión. No es posible emplear técnicas de exploración porque el receptor debe permanecer sintonizado a una única frecuencia para no perder información (véase la Fig. 4.10-7).

Es aplicable a los tipos de sistemas siguientes:

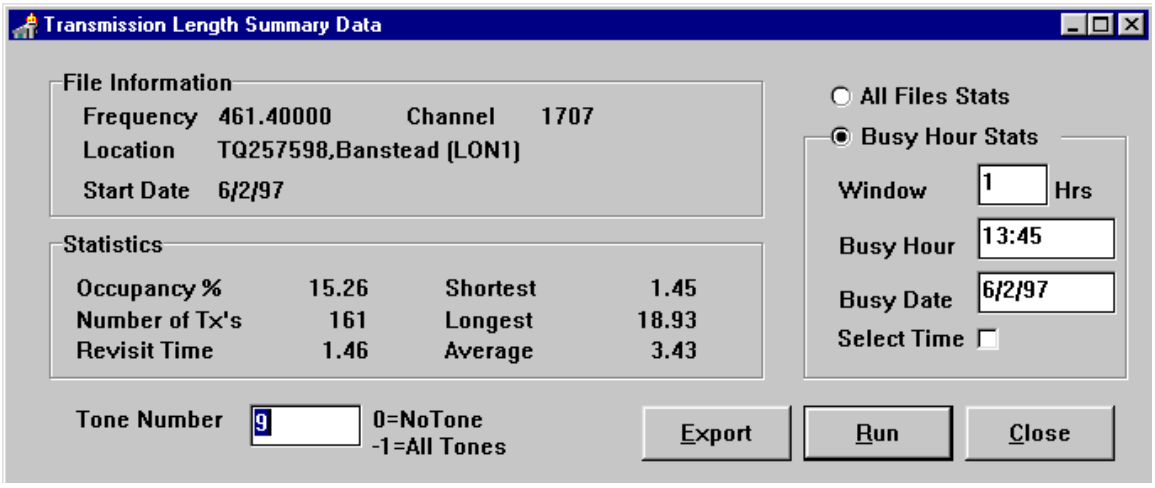
– Llamada selectiva de 5 tonos (SELCAL, *5-tone Selective Calling*).
– Sistema de identificación automática del transmisor (ATIS, *Automatic Transmitter Identification System*).
– Canal de control de sistemas de radiocomunicaciones privadas MPT 1327.
– Radiomensajería POCSAG.

Si se obtiene información adicional sobre usuarios individuales, es posible subdividir la ocupación total de dicha frecuencia en valores de ocupación específicos para cada usuario.

En el caso de aplicaciones que controlan el flujo de tráfico en los canales de control, como por ejemplo, en los sistemas de radiocomunicaciones privadas, o que pueden reducirse a un único canal (por ejemplo, DSC, POCSAG) es posible un análisis de tráfico muy preciso a partir de los datos registrados del protocolo.

FIGURA 4.10-7

Ejemplo de comprobación técnica estática del canal



Spectrum-4.10-07

4.10.5.2.6 Mediciones de ocupación de una banda de frecuencias

El enfoque descrito a continuación es, en general, válido.

La comprobación técnica automática se inicia con la medición de la ocupación de la banda de frecuencias (FBO). Existe un conjunto de representaciones gráficas que no precisan de un umbral (por ejemplo, espectrograma, representación en cascada, valores min/med/máx etc.). Sólo se necesita un nivel umbral para el cálculo de ocupación de una banda de frecuencias.

La primera fase del proceso consiste en mediciones de ocupación de la banda de frecuencias (Recomendación UIT-R SM.1809), aunque si se precisa información más detallada de cada canal, deben realizarse mediciones de ocupación de canales de frecuencia. Los resultados de la medición de ocupación de canales de frecuencia (FCO) que se describe en la Recomendación UIT-R SM.1793 deben procesarse con los formatos y criterios expuestos en la Recomendación UIT-R SM.1809.

Los ajustes del equipo receptor dependen de la banda de frecuencias explorada. El tiempo de exploración es función de la cantidad de datos deseados. El nivel umbral debe fijarse tan bajo como sea posible, evitando, sin embargo, registrar ruido. Resulta de gran utilidad que el nivel umbral pueda modificarse ulteriormente, permitiendo así realizar diferentes tipos de evaluaciones. El nivel de señal se registra durante cada barrido, por ejemplo, en 900 barridos durante 15 minutos a razón de 1 barrido/s. Las frecuencias con niveles superiores al nivel de umbral seleccionado se consideran ocupadas. Mediante software dedicado es asimismo posible tener una visión más detallada de la banda de frecuencias explorada en el dominio del tiempo y de la frecuencia.

Para la realización de mediciones de ocupación del espectro son preferibles los receptores de comprobación técnica con filtros de FI muy selectivos y factor de forma de 2:1 o superior, en lugar de los analizadores de espectro. No obstante, debido a los requisitos de velocidad, a menudo se utilizan analizadores de espectro. Normalmente, para evitar sobreoscilaciones disponen de filtros de FI "gaussianos". Sin embargo, dichos filtros no discriminan adecuadamente las señales en canales adyacentes. No obstante, un filtro "gaussiano" es el mejor compromiso entre velocidad y resolución. En consecuencia, los analizadores de espectro tienden a sobreestimar la ocupación real. Debe existir una correspondencia entre la anchura de banda de los filtros de FI de los receptores de comprobación y la anchura de banda de las bandas canalizadas. Por lo tanto, es necesario disponer de un conjunto de filtros de FI que correspondan con las anchuras de los canales de las bandas sujetas a comprobación técnica. Se recomienda utilizar receptores con factores de ruido bajos.

Asimismo, es muy conveniente disponer de filtros de preselección sintonizables, pudiendo integrar los amplificadores de bajo nivel de ruido en el preselector después del filtro. Pueden ser necesarios filtros de paso de banda especiales para ayudar a mejorar el margen dinámico del sistema de medición en algunas situaciones de supervisión cuando se utilice un receptor de supervisión o un analizador de espectro.

Por ejemplo, dichos filtros pueden ser necesarios para obtener datos de ocupación válidos de canales que contengan señales relativamente pequeñas (de bajo nivel) en bandas adyacentes a las bandas que contengan señales relativamente grandes (por ejemplo, bandas de radiodifusión).

Finalmente, puede ser necesario utilizar un atenuador antes del preamplificador del receptor de comprobación técnica o del analizador de espectro para determinar adecuadamente el margen dinámico del sistema de comprobación técnica cuando se realiza la comprobación de bandas con señales de gran anchura de banda.

Durante cada barrido de este tipo de mediciones de espectro, se registra la intensidad de campo recibida en cada uno de puntos de medición (por ejemplo, 900 puntos). Dichos pasos pueden considerarse como 900 canales. Se pueden procesar los datos de cada canal.

Puede obtenerse fácilmente una representación gráfica de los valores medidos para disponer de una buena indicación del número de estaciones base, la intensidad de campo de la señal recibida a lo largo del tiempo (generalmente durante 24 horas), información sobre longitud media de la conversación, etc.

Debido a que el tamaño del filtro de la anchura de banda de resolución (RBW) es generalmente mayor que los pasos de frecuencia, no pueden utilizarse todos los "canales". Por ejemplo, si la banda a examinar es de 7,5 MHz, y se realiza en 1 000 pasos, el tamaño del paso será de 7,5 kHz. El filtro de la anchura de banda de resolución puede ser de 10 kHz.

Se puede procesar la información cada tres pasos, lo cual da lugar a información de ocupación cada 25 kHz, que podría ser la separación de canales existentes en la anchura de banda medida. Si se utiliza un paso de frecuencia de 12,5 kHz, el proceso puede realizarse en pasos de un segundo.

Otra posible solución es modificar el tamaño del filtro (si ello es posible) a 10 kHz con lo que se soluciona el problema. Esto sólo puede aplicarse al análisis de ocupación de canales de frecuencia porque en cada paso se obvia (no se mide) una pequeña parte del espectro. Para cada canal se observan los valores a -5 y + 5 kHz.

El valor de la ocupación no difiere si se utiliza un filtro de 15 kHz. Debe tenerse en cuenta que en este caso, el tiempo de barrido, que es comparable con el tiempo entre observaciones consecutivas de la ocupación del canal de radiofrecuencia, es de aproximadamente 10 segundos y no puede reducirse de forma ilimitada.

Es importante señalar que pruebas ampliamente utilizadas han mostrado que la precisión no se modifica de forma significativa cuando el tiempo entre observaciones consecutivas de la misma frecuencia se aumenta de 1 s a 10 s (véase 4.10.2).

4.10.6 Presentación y análisis de los datos recopilados

Cuando se han recopilado los datos de ocupación, es necesario analizar los resultados y presentarlos en un formato útil. Los datos deben convertirse en información y en última instancia en conocimiento.

El sistema de comprobación técnica puede disponer de funciones analíticas y de representación integradas en su software. Con independencia de si dichas funciones están incluidas en el software de recopilación de mediciones o si se suministran como una aplicación diferenciada, los procesos son similares.

El proceso completo se describe en tres pasos:

1. Medición y recopilación de datos.
2. Procesamiento y conversión de datos en información (diagramas, gráficos, etc.).
3. Presentación de los resultados para informes, visualización en sitios web, etc.

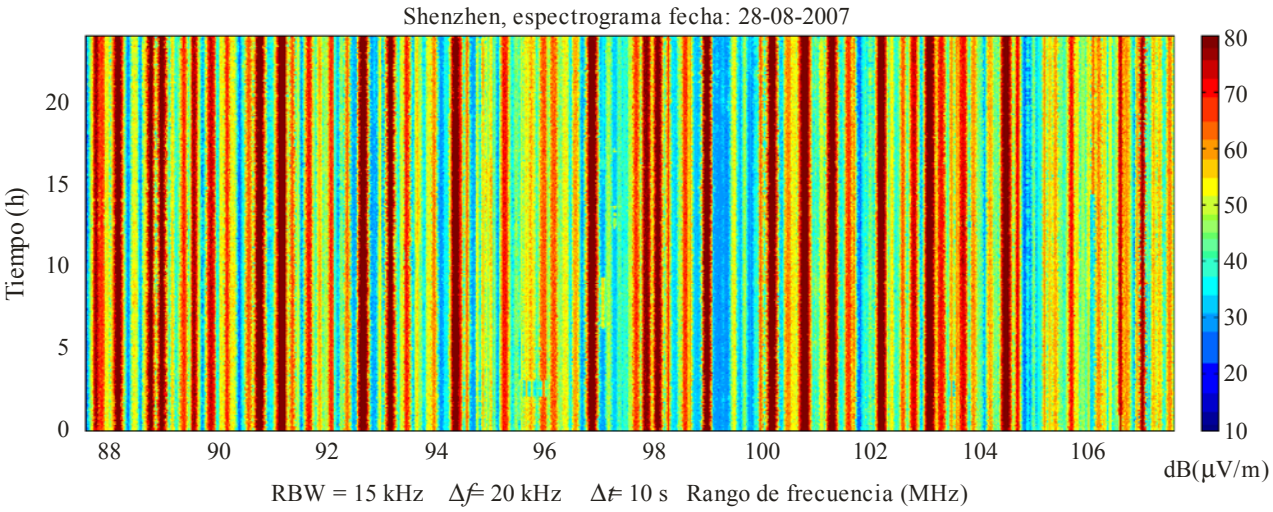
A partir de los datos en bruto recopilados, es posible generar las modalidades de representación siguientes:

– cuadros;
– gráficos textuales;
– gráficos;
– mapas.

A continuación se presentan algunos ejemplos de mediciones de bandas de frecuencias.

FIGURA 4.10-8

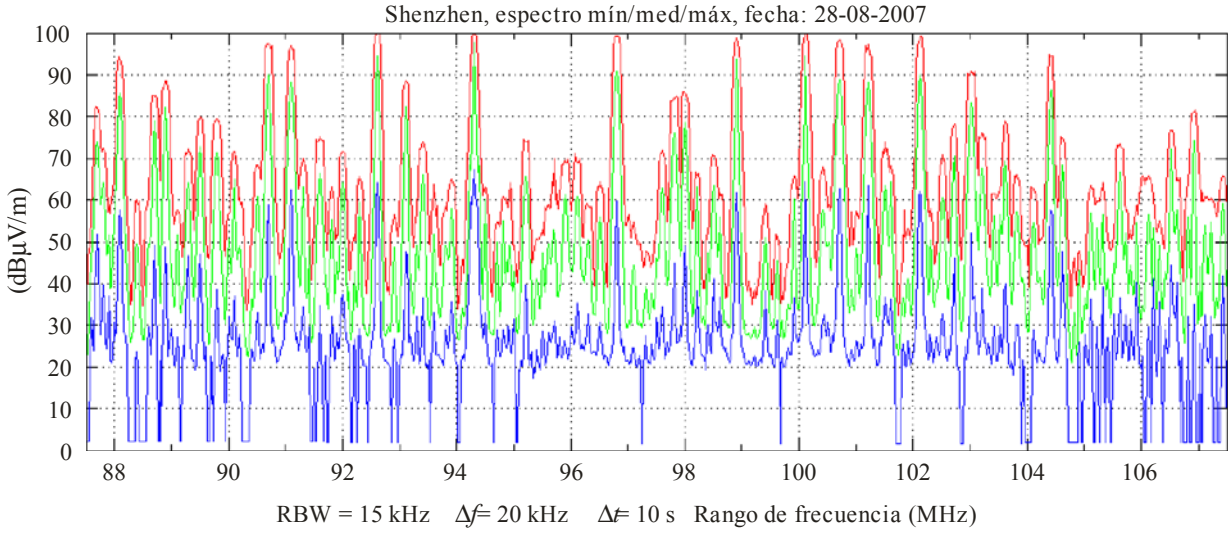
Espectrograma



Spectrum-4.10-08

FIGURA 4.10-9

Curvas máxima, mínima y media
(de la misma base de datos de mediciones que el espectrograma anterior)



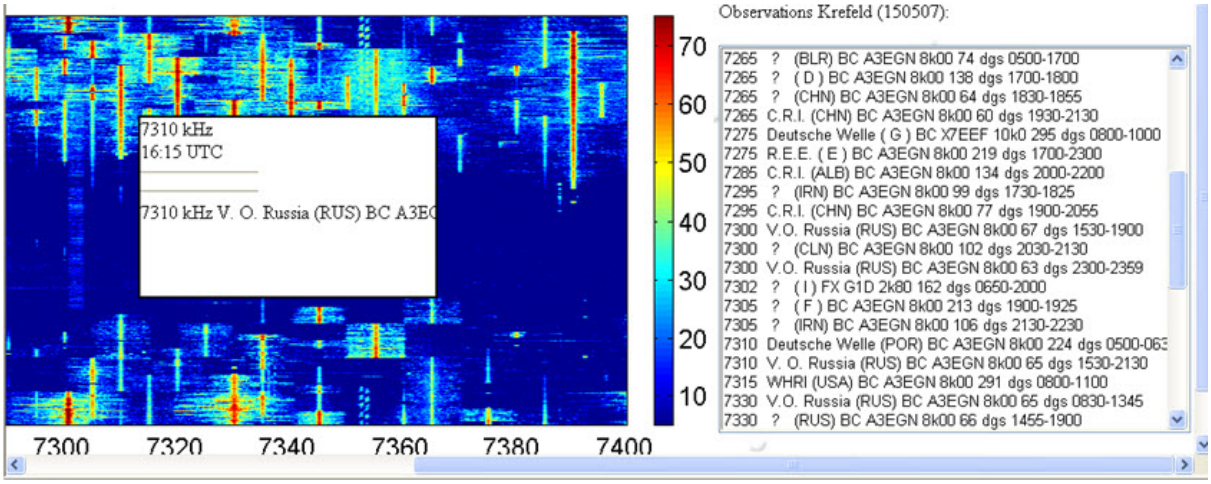
Spectrum-4.10-09

En el caso de mediciones de la ocupación de canales de frecuencia, la presentación debe contener como mínimo la información siguiente:

– ubicación desde donde se realiza la comprobación técnica;
– fecha y periodo de la medición;
– frecuencia;
– tipo(s) de usuario(s);
– ocupación en la hora cargada.

FIGURA 4.10-10

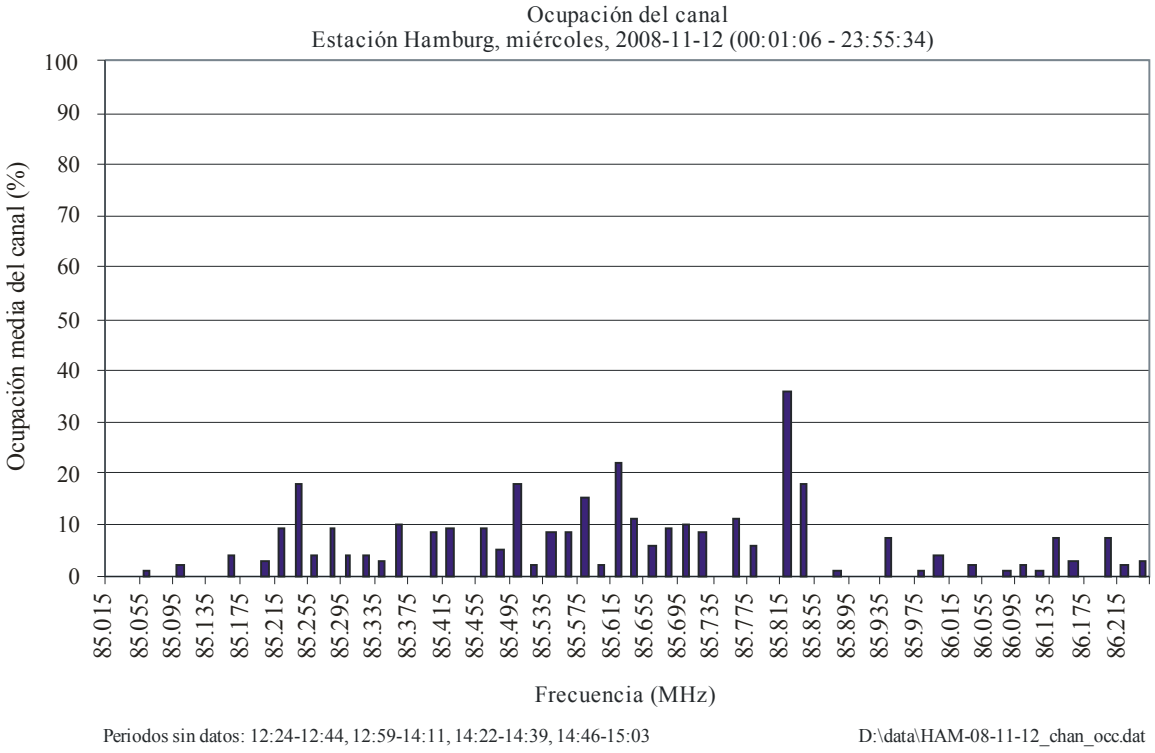
Gráfica instantánea de mediciones en ondas decamétricas combinada con resultados de comprobación técnica manual



Spectrum-4.10-10

FIGURA 4.10-11

Ejemplo de medición de ocupación de un canal



Spectrum-4.10-11

Para muchas de las decisiones que toman los reguladores, puede ser suficiente disponer de una valoración general rápida de la ocupación del canal. Dicha valoración puede obtenerse a partir de los datos de ocupación con la ayuda de una hoja de cálculo (Open Office, Excel). La evaluación puede adaptarse a las condiciones reales mediante dos botones que correspondan a los límites de la evaluación.

FIGURA 4.10-12

Ejemplo de valoración rápida de las mediciones de ocupación de un canal

Valoración general rápida de la
ocupación del canal en el tiempo

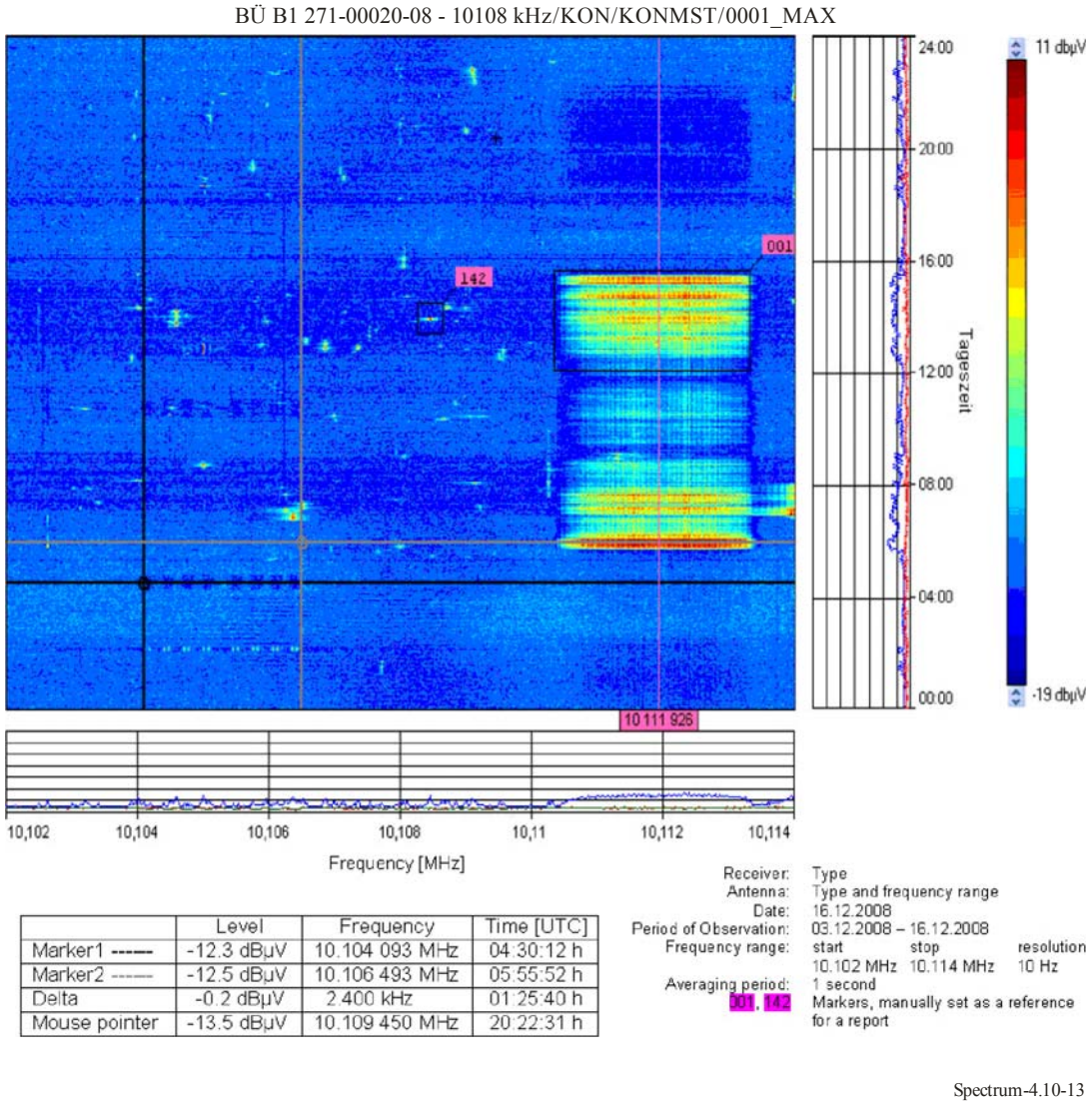
Hours	0..1	1..2	2..3	3..4	4..5	5..6	6..7	7..8	8..9	9..10	10..11	11..12	12..13	13..14	14..15	15..16	16..17	17..18	18..19	19..20	20..21	21..22	22..23	23..24
Channel 01	15%	16%	17%	18%	19%	21%	22%	24%	25%	27%	29%	31%	33%	36%	38%	41%	44%	47%	51%	27%	25%	21%	18%	19%
Channel 02	8%	9%	8%	5%	9%	9%	19%	5%	13%	12%	4%	12%	14%	5%	6%	19%	38%	24%	16%	18%	5%	25%	11%	7%
Channel 03	10%	11%	12%	17%	17%	18%	2%	5%	17%	25%	14%	22%	12%	24%	18%	24%	21%	4%	12%	1%	2%	15%	25%	10%
Channel 04	4%	10%	10%	13%	5%	15%	6%	2%	9%	6%	11%	1%	11%	29%	34%	10%	41%	7%	7%	24%	6%	26%	23%	11%
Channel 05	14%	12%	5%	4%	5%	5%	18%	4%	16%	1%	4%	12%	27%	15%	8%	9%	27%	2%	4%	24%	17%	30%	24%	19%
Channel 06	9%	9%	9%	1%	3%	1%	6%	7%	13%	11%	14%	8%	27%	26%	8%	12%	25%	33%	33%	11%	28%	17%	10%	8%
Channel 07	10%	1%	1%	8%	6%	2%	7%	14%	15%	2%	25%	16%	34%	10%	15%	21%	46%	26%	21%	8%	15%	33%	21%	12%
Channel 08	4%	15%	8%	15%	1%	3%	15%	11%	2%	19%	27%	21%	10%	30%	32%	9%	30%	9%	50%	9%	23%	21%	22%	23%
Channel 09	4%	14%	2%	5%	17%	2%	2%	20%	1%	8%	9%	23%	24%	10%	9%	12%	15%	3%	7%	23%	22%	4%	4%	35%
Channel 10	0%	8%	16%	15%	5%	11%	4%	19%	7%	15%	17%	15%	14%	20%	24%	37%	38%	44%	7%	19%	25%	7%	31%	16%
Channel 11	12%	1%	15%	16%	1%	1%	6%	9%	22%	20%	12%	24%	12%	32%	18%	14%	5%	11%	9%	15%	14%	19%	32%	12%
Channel 12	10%	13%	13%	3%	4%	9%	1%	3%	6%	27%	18%	21%	3%	2%	36%	5%	37%	11%	20%	23%	15%	9%	29%	16%
Channel 13	8%	2%	1%	12%	17%	10%	8%	16%	24%	26%	16%	25%	24%	24%	6%	37%	14%	20%	6%	9%	24%	24%	30%	20%
Channel 14	13%	8%	1%	8%	4%	3%	7%	14%	25%	10%	26%	24%	8%	23%	20%	2%	30%	46%	22%	24%	17%	3%	23%	22%
Channel 15	2%	14%	0%	15%	10%	19%	15%	16%	24%	27%	18%	19%	20%	30%	37%	8%	43%	29%	37%	20%	28%	20%	31%	1%
Channel 16	3%	12%	11%	4%	2%	17%	8%	7%	15%	12%	26%	11%	19%	17%	17%	30%	34%	20%	49%	8%	6%	7%	3%	5%
Channel 17	14%	0%	4%	1%	8%	3%	7%	7%	23%	7%	13%	7%	24%	4%	3%	9%	2%	14%	5%	23%	5%	15%	28%	10%
Channel 18	10%	3%	1%	10%	17%	16%	12%	12%	17%	25%	23%	24%	28%	4%	36%	37%	18%	10%	12%	10%	18%	25%	33%	25%
Channel 19	3%	7%	15%	13%	7%	10%	16%	6%	1%	5%	13%	7%	27%	22%	13%	23%	39%	11%	21%	10%	26%	4%	28%	4%
Channel 20	3%	1%	6%	2%	12%	14%	1%	12%	1%	23%	2%	23%	4%	17%	19%	20%	13%	18%	12%	3%	28%	14%	11%	9%

< 10% | 10% <-> 20% | > 20%

Spectrum-4.10-12

FIGURA 4.10-13

Ejemplo de medición de una banda de frecuencias



	Level	Frequency	Time [UTC]
Marker1 -----	-12.3 dBµV	10.104 093 MHz	04:30:12 h
Marker2 -----	-12.5 dBµV	10.106 493 MHz	05:55:52 h
Delta	-0.2 dBµV	2.400 kHz	01:25:40 h
Mouse pointer	-13.5 dBµV	10.109 450 MHz	20:22:31 h

Spectrum-4.10-13

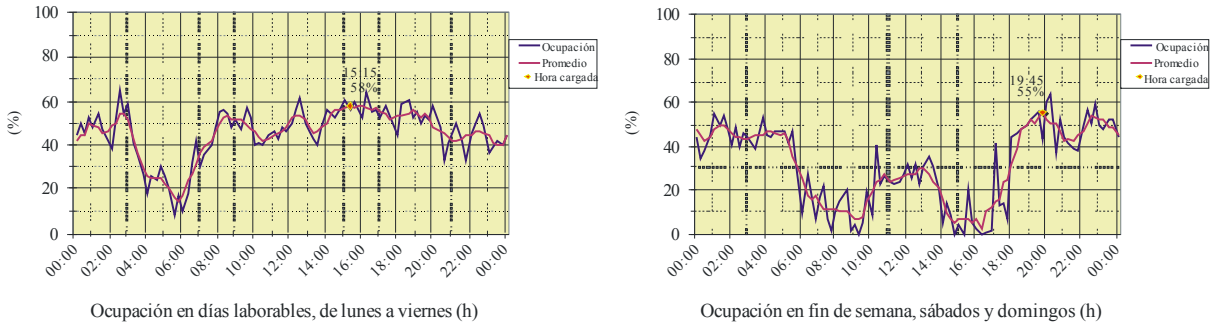
El ejemplo siguiente de presentación de datos muestra el procesamiento correspondiente a los datos de un sistema que sólo indican que la señal observada se encontraba por encima del umbral prefijado.

El receptor puede realizar la comprobación técnica de un conjunto de 50 canales de forma continua mediante mediciones realizadas durante 14 días consecutivos. Los datos recopilados pueden dividirse en dos lotes, uno que contenga datos de días laborables y otro con datos del fin de semana.

Cada lote se procesa tal como se describe en la Fig. 4.10-14.

FIGURA 4.10-14

Informe de ocupación de un canal



Ocupación en días laborables, de lunes a viernes (h)

Ocupación en fin de semana, sábados y domingos (h)

Spectrum-4.10-14

Se promedian las muestras tomadas cada periodo de 15 minutos, lo que da lugar a un total de 96 muestras por día.

El valor de ocupación de cada 15 minutos se utiliza para constituir lo que se denomina media móvil de 1 hora. Es decir, cada cuatro valores consecutivos de muestras de 15 minutos se promedian 96 veces cada día para el valor promediado de una hora.

Todos los valores se representan en un gráfico, para mostrar la ocupación máxima y la media móvil durante los días laborables, y otro gráfico del mismo tipo sirve para reflejar la ocupación durante los fines de semana.

El punto de la línea correspondiente a la media móvil en que se produce la ocupación máxima se denomina hora cargada. A causa de los problemas de interferencia, es conveniente realizar una presentación y revisión diaria (gráfico) del grado de ocupación.

Estos gráficos de presentación diarios pueden ayudar a solucionar problemas de interferencia. Muestran la diferencia de ocupación que suele encontrarse en un canal específico para el servicio de taxis. El lado izquierdo de la Fig. 4.10-14 muestra el gráfico de lunes a viernes y el lado derecho muestra la ocupación en sábados y domingos. La línea superior del gráfico es la de ocupación máxima y la segunda línea, la media móvil. El eje X (abscisas) es el tiempo, y el eje Y (ordenadas) el porcentaje de ocupación. El periodo de medición es de 14 días. La frecuencia de muestreo es de 0,54 Hz. La hora cargada se representa mediante puntos rojos en la Fig. 4.10-14 a las 15.15 horas (diagrama de la izquierda) y a las 20.45 horas (diagrama de la derecha).

4.10.7 Intercambio de datos

Las Administraciones vecinas pueden estar interesadas en intercambiar datos de ocupación, especialmente relativos a regiones próximas a las fronteras del país para facilitar la asignación de frecuencias en dichas zonas. En tales casos es importante utilizar un formato único e inequívoco que permita la correcta interpretación de los datos que se intercambian entre las partes.

A título de ejemplo, la recomendación EEC/ERC(05)01, "Harmonización de los métodos de medición automática y de la transferencia de datos para el registro de bandas de frecuencias" recomienda la utilización de ficheros con formato de datos delimitados por comas (CSV, *comma separated value*) para este fin. La mayoría de los programas que utilizan bases de datos u hojas de cálculo pueden leer dicho formato.

Una sección de cabecera describe la ubicación desde la que se realizan las mediciones, la gama de frecuencias y un conjunto de parámetros técnicos.

La sección de cabecera está separada de los datos reales por una línea en blanco. Cada línea (exploración) de datos comienza con la hora, seguida del valor del nivel (o intensidad de campo) para cada paso de frecuencia, por ejemplo, 1 000. Si el tiempo de exploración o barrido es de 10s, el fichero de datos contendrá > 8 630 líneas.

```
FileType          Bandscan
LocationName      Shenzhen
Latitude          2W23.00
Longitude         5N35.00
FreqStart         87500
FreqStop          107500
AntennaType       HK-014
FilterBandwidth   15
LevelUnits        dBuV/m
Date              2007-08-30
DataPoints        1001
ScanTime          10.0
Detector          Average
Note              Receiver:

00:01:40,19,2.3,19.1,44.5,34,39.9,43.9,63.5,65,66.2,75.1,74.6,63.6,etc
00:01:50,21.5,22,21.8,34.7,32.8,46.5,43.2,62.9,62.4,75.9,76.4,67.4,etc
00:02:00,27.7,22.8,23.2,41.7,35.1,36.4,53.5,51.4,61.6,64.8,64.3,64.5,etc
00:02:10,2.3,19.2,22.1,41.4,33.1,36.4,53.8,47.6,66.4,66.2,76.4,64.1,etc
00:02:20,22.5,20.8,32,32.7,37.8,47.2,49.3,61.1,71,75.1,73.4,73.9,59.2,etc
00:02:30,22.3,22.1,26.6,30.3,39.2,41.9,51.2,44,61.2,67.7,64.8,77.5,59,etc
00:02:40,22.8,28.3,19.3,30.6,40.1,45.4,47.8,52.5,66.7,70.4,74.8,66.5,etc
00:02:50,20.9,20.6,28,29.3,43.4,43.8,47.1,63,64.5,74,72.5,65.4,62.6,etc
00:03:00,22,23.4,23.5,24.3,37.2,46.2,42.3,59.4,65.7,64,73.4,78,62.9,etc
00:03:10,20.8,20.3,2.3,32.7,34.7,45.8,51.7,45.4,63.2,78.1,65.9,62,etc
.......
.......
.......
23:58:50,20.7,20.6,28.9,31.9,38.1,42.8,51,53.5,48.1,81.7,66.5,79.6,etc
23:59:00,23.4,2.3,35.2,24.6,43.4,43.2,49.8,48.8,59.7,72.6,73.2,73.1,etc
23:59:10,22,24.3,2.3,27.1,37.7,43.8,33.6,51.7,58,66.4,78.4,64.3,51.6,etc
23:59:20,21.8,2.3,22.2,30.2,48.3,34.8,57.9,58.5,71.7,73.2,66.8,72.9,etc
23:59:30,20.7,20.9,32,33.3,41.2,46.5,41.7,37.9,72.2,66.9,74.6,61.8,etc
23:59:40,2.3,22.1,20.5,43.2,34.1,42.2,42.2,53.4,58,71.1,78.3,74.9,etc
23:59:50,2.3,20.5,20.2,33,40.5,40.6,51.9,55.2,66.5,50.4,65.3,72.6,etc
```

Otra posibilidad de intercambio e incluso de publicación de datos es utilizar el lenguaje de etiquetado hipertexto (HTML).

Bibliografía

SPAULDING, A. D. & HAGN, G. H. [1977] *On the Definition and Estimation of Spectrum Occupation* IEEE, Vol. EMC-19, No.3, Aug 1977

Recomendaciones del UIT-R

NOTA – Siempre debe utilizarse la versión más actualizada de cada Recomendación.

Recomendación UIT-R SM.182* – Comprobación automática de la ocupación del espectro de frecuencias.

Recomendación UIT-R SM.1536* – Medición de la ocupación de canales de frecuencias.

Recomendación UIT-R SM.1753 – Métodos para medir el ruido radioeléctrico.

Recomendación UIT-R SM.1793* – Medición de la ocupación de canales de frecuencia mediante la técnica utilizada para la medición de bandas de frecuencia.

Recomendación UIT-R SM.1809 – Formato normalizado de intercambio de datos para los registros y mediciones de bandas de frecuencias efectuados en estaciones de comprobación técnica.

**Nota de la Secretaría*: Esta Recomendación ha sido suprimida y sustituida por la Recomendación UIT-R SM.1880 – Mediciones de la ocupación del espectro.

4.11 Mediciones de la cobertura

4.11.1 Introducción

Los servicios de comprobación técnica deben medir la cobertura de los transmisores y redes de radiocomunicaciones con el objetivo de:

– Verificar las predicciones de herramientas informáticas de planificación de red.

– Verificar el cumplimiento de las condiciones de la licencia si ésta incluye que determinada zona o porcentaje de la población esté cubierta por el servicio de radiocomunicaciones.

– Verificar la calidad de servicio en una zona determinada.

– Evaluar las condiciones de recepción en determinadas ubicaciones en las que se informa de la existencia de interferencia.

En el caso de sistemas con modulación analógica puede ser suficiente medir la intensidad de campo. Debido a determinadas circunstancias y a principios inherentes de la recepción de sistemas con modulación digital, la cobertura de las redes terrenales digitales debe medirse de forma diferente a las redes analógicas.

En esta sección se describen los principios de medición, procedimientos y equipos necesarios para la medición de la cobertura por medios fijos y móviles de transmisores y redes de radiocomunicaciones. No obstante, puede ser necesario adaptar la información a los requisitos de cada sistema o a las condiciones de cada licencia.

4.11.2 Predicción de la cobertura

La predicción de la cobertura permite calcular la zona geográfica en la que es posible la recepción del servicio. Se basa en parámetros del transmisor, el terreno y los modelos de propagación, y utiliza herramientas informáticas. El resultado representa la probabilidad temporal de recepción en una ubicación.

Por ejemplo, una zona geográfica se considera "cubierta" por un servicio DVB-T cuando la intensidad media del campo en una emplazamiento de recepción determinado a una altura especificada sobre el nivel del suelo (a menudo 10 m) y la relación de protección alcanzan o superan los valores incluidos en los documentos de planificación relevantes (por ejemplo, el Acuerdo GE06).

El supuesto de que una zona determinada tenga o no cobertura es el resultado de un proceso de cálculo realizado con una herramienta de predicción de cobertura que tenga en cuenta condiciones y/o valores definidos para:

– las condiciones de recepción (por ejemplo, fija o portátil)

– la pérdida de la intensidad de campo con la distancia debido a la topografía y morfología del terreno;
– el modelo del receptor (por ejemplo, su sensibilidad y selectividad);
– la antena receptora (altura, ganancia y directividad);
– el canal de recepción (Gaussiano, Rice o Rayleigh).

Ligada al atributo "cubierto" existe una probabilidad en tiempo y emplazamientos. Mediante herramientas de planificación se calcula la zona de cobertura para dicha probabilidad (por ejemplo, 50% del tiempo y 50% de los emplazamientos). En consecuencia, no puede asumirse que sea posible la recepción con un receptor convencional en cualquier emplazamiento de la zona que se califica como cubierta.

Es importante definir completa e inequívocamente la cobertura de una red antes de conceder la correspondiente licencia. Si no se acuerda previamente entre el operador de red y la autoridad reglamentaria la cobertura real, podrían producirse ulteriormente controversias de resolución compleja.

4.11.3 Principio básico de medición

Por lo general, no es posible medir la intensidad de campo u otros parámetros relevantes en todos los puntos de la zona de interés. Realmente lo que se mide es la conformidad de la predicción con la cobertura real más que la cobertura propiamente dicha.

Normalmente en sistemas analógicos se mide la intensidad de campo en un número estadísticamente suficiente de emplazamientos fijos o a lo largo de rutas utilizadas para desplazamientos habituales. Los factores limitantes son la accesibilidad a los puntos de medición, la disponibilidad en el tiempo y las horas de funcionamiento. Los valores medidos de la intensidad de campo se comparan con los valores previstos de intensidad de campo.

El mismo principio es aplicable a parámetros específicos del sistema o parámetros de calidad de servicio en sistemas digitales. Nótese que definiciones complejas de cobertura dan lugar a mediciones y procedimientos de evaluación complejos.

Como ejemplo de complejidad, cabe citar la Recomendación UIT-R SM.1875 sobre "Mediciones de la cobertura de la DVB-T y verificación de los criterios de planificación" adaptados del Acuerdo GE06.

Antes de realizar las medidas, deben definirse zonas o rutas de referencia que permitan la extrapolación de los resultados de las mediciones en la zona de referencia a la cobertura en toda la zona de interés.

En otras palabras, si existe una estrecha correspondencia entre predicciones y cobertura real en las zonas de referencia, puede suponerse que las predicciones de cobertura comunicadas por el operador de red son también suficientemente precisas fuera de las rutas y zonas de referencia.

La planificación de las rutas de medida puede realizarse de varias formas. Una opción es seguir radiales que comiencen en el centro de la zona de servicio hasta que los parámetros de la señal se degraden de forma consistente, ya sea la intensidad de campo u otros parámetros relevantes.

Otra opción es realizar una verificación en regiones que representen tipos específicos de zonas, tales como zonas urbanas altamente pobladas, suburbanas, industriales o rurales.

Finalmente, para la verificación de la cobertura es importante que las mediciones incluyan zonas en los límites entre regiones cubiertas y no cubiertas.

La Fig. 4.11-1 es un ejemplo de resultado de este tipo de mediciones.

Los colores verde y rojo indican cobertura y no cobertura respectivamente. De conformidad con la herramienta de predicción, la zona gris debería estar cubierta, mientras que para las zonas blancas la predicción era de no cobertura.

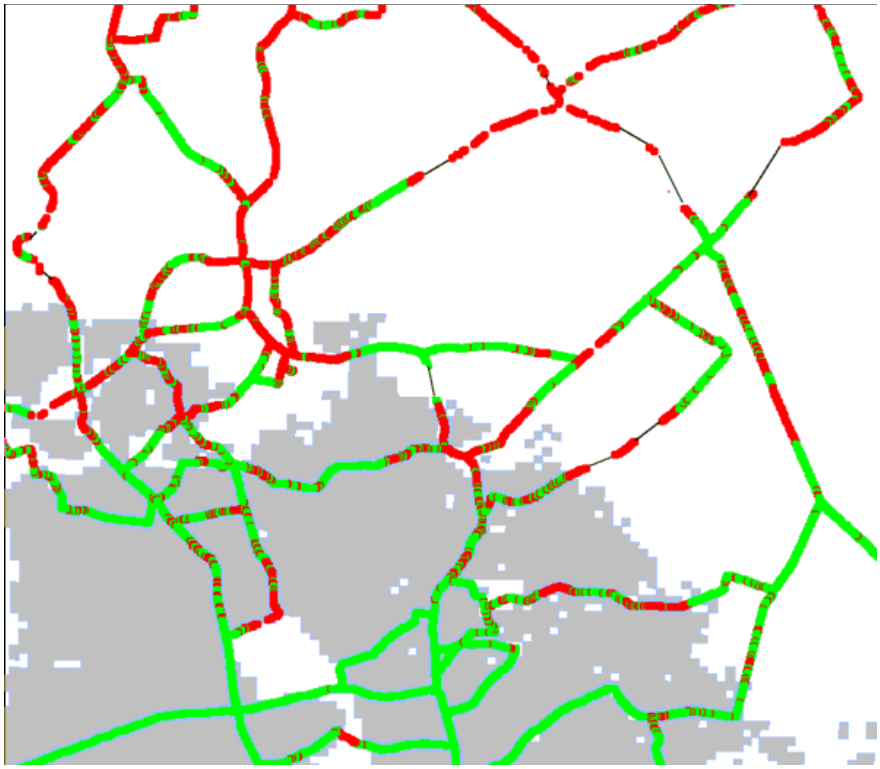
De cara a fines especiales que afecten a la cobertura, puede ser necesario realizar mediciones en puentes, túneles, cerca de infraestructuras de distribución de energía o incluso en el interior de edificios.

4.11.4 Configuración para la medición

La configuración para las mediciones consta normalmente de un receptor, un sistema de posicionamiento y un computador. El computador se utiliza como soporte del proceso de medición mediante el control de los receptores de medida y el registro de datos de medición y posicionamiento, junto con datos específicos del sistema, según convenga.

FIGURA 4.11-1

Muestra de medición realizada a lo largo de una ruta dentro de una zona de referencia



Spectrum-4.11-01

Existen dos alternativas básicas para la configuración de una medición. La primera sería utilizar un equipo terminal de referencia y la segunda utilizar un equipo de comprobación técnica convencional.

La utilización de terminales de referencia puede ofrecer resultados limitados pues sólo identifican el comportamiento del equipo concreto utilizado en un entorno dado. Parámetros tales como la sensibilidad del receptor pueden no ser conocidos y, por tanto, diferir de los parámetros supuestos por la herramienta de predicción.

Por otro lado, dichos resultados pueden proporcionar información valiosa sobre las características de la red y la calidad del servicio al representar la percepción que el usuario tiene de la red.

La utilización simultánea de más de un terminal, incluyendo diferentes modelos, puede considerarse que mejora la fiabilidad de dichas mediciones o puede estar orientada a investigar la cobertura para distintos tipos de terminales, tales como receptores a bordo de automóviles, dispositivos portátiles y transportables.

La otra alternativa, es decir, la utilización de equipos de comprobación técnica convencionales, puede servir para evaluar parámetros técnicos como la intensidad de campo. Es conveniente hacerlo en las mismas condiciones de recepción que las supuestas en la herramienta de planificación, permitiendo así comparaciones posteriores entre mediciones y predicciones.

La antena se monta normalmente sobre el techo de vehículos pequeños para la medición de la cobertura con recepción móvil, mientras que las mediciones a una altura de 10 m o más pueden ser adecuadas para determinar la cobertura de transmisores de radiodifusión.

Los valores de intensidad de campo de mediciones en redes analógicas se obtienen mediante un receptor o un analizador de espectro. Además, estos equipos se utilizan para identificar cualquier interferencia que pueda impedir que las mediciones sean correctas.

Los sistemas de posicionamiento constan de un receptor GPS o de un sistema de navegación a estima. Se utilizan para el seguimiento del movimiento del vehículo, utilizándose también un odómetro y una brújula cuando se pierde la señal GPS, por ejemplo, en un túnel.

Para la medición de la cobertura de un sistema digital se utilizan receptores específicos que proporcionan parámetros como la tasa de errores en los bits (BER) y otros parámetros de calidad, como las llamadas interrumpidas.

4.11.5 Parámetros que deben registrarse para las mediciones de cobertura

Los parámetros a registrar dependen en gran medida del objetivo de las mediciones. La verificación formal de los parámetros de una licencia puede requerir la medición y registro de parámetros diferentes de los necesarios para evaluar una red desde la perspectiva del usuario.

En el marco de la comprobación técnica del espectro es recomendable medir parámetros intrínsecos de la señal así como su impacto en el espectro. Dichos parámetros pueden ser:

– intensidad de campo;
– relación señal a ruido;
– nivel de ruido del canal adyacente.

Además de dichos parámetros, también debe registrarse el contexto de la medición (por ejemplo, el entorno) e informar de datos como coordenadas y sellos de tiempo asociados a las mediciones, eventos específicos como interferencias, e información del entorno (zonas rurales, túneles, edificios altos cercanos, etc.).

Tal como se expone en § 4.11.4, la medición de la cobertura de servicios específicos puede requerir la medición de algunos parámetros adicionales para evaluar la calidad de servicio.

A título de ejemplo, en el caso de una red de comunicaciones móviles podrían medirse los parámetros siguientes:

– tasa de errores en los bits, bloques y/o modulación;
– momento de inicio y duración de una llamada;
– hora de acceso a la red y desconexión de la misma;
– exceso y déficit de una tasa de datos especificada;
– número de llamadas interrumpidas;
– número de llamadas bloqueadas.

Además, cada red tiene sus parámetros específicos para la evaluación de la cobertura. Por ejemplo, RxQual y RxLev son parámetros importantes de las redes GSM, y en el caso de las redes UMTS son importantes diversos parámetros en el dominio del código, tales como la potencia del código de señal recibido, RSCP (*Received Signal Code Power*) y la información de la intensidad de campo de señal recibida, RSSI (*Received Signal Strength Information*).

4.11.6 Verificación de la cobertura

Debe disponerse de un software especial, incluyendo un sistema de información geográfica (SIG) para representar en un mapa los valores medidos junto con las coordenadas geográficas del vehículo en el que se han hecho las mediciones y compararlas con la predicción de cobertura.

Los resultados de cobertura obtenidos a lo largo de las rutas pueden extrapolarse para establecer la previsión de cobertura en una zona. También pueden combinarse con datos de otras fuentes para, por ejemplo, establecer la cobertura en términos de porcentaje de población.

Referencias

Acuerdo GE06 – Las Actas Finales de la Conferencia Regional de Radiocomunicaciones para la planificación del servicio de radiodifusión digital terrenal en partes de las Regiones 1 y 3, en las bandas de frecuencias 174-230 MHz y 470-862 MHz (CRR-06) contienen el Acuerdo Regional GE06, adoptado por la CRR-06, que controla la utilización de las frecuencias del servicio de radiodifusión y otros servicios terrenales primarios en las bandas de frecuencias 174-230 MHz y 470-862 MHz. También contienen los Planes de asignación y adjudicación de frecuencias para el servicio de radiodifusión digital (televisión y radiodifusión sonora), el Plan de televisión analógica aplicable durante el periodo de transición, la lista coordinada de asignaciones a otros servicios terrenales primarios en estas bandas y las Resoluciones adoptadas por la CRR-06. El Acuerdo GE06 es aplicable provisionalmente a partir del 17 de junio de 2006

Véase en: http://www.itu.int/publ/R-ACT-RRC.14-2006/en.

Recomendaciones del UIT-R

NOTA – Siempre debe utilizarse la versión más actualizada de cada Recomendación

Recomendación UIT-R SM.1875 – Mediciones de la cobertura de la DVB-T y verificación de los criterios de planificación.

4.12 Medición de emisiones no deseadas

4.12.1 Introducción

La medición de emisiones no deseadas es una tarea común de los servicios de comprobación técnica. Por un lado, el objetivo de dichas mediciones puede ser verificar la conformidad de una emisión con una máscara de emisión incluida en una norma o una recomendación. Por otro lado, dichas mediciones pueden ser necesarias en el caso de interferencias causadas por una emisión no deseada.

Las emisiones no deseadas son emisiones fuera de la anchura de banda necesaria de una señal, e incluye emisiones fuera de banda y emisiones no esenciales.

La medición de emisiones no deseadas puede ser difícil de realizar debido a que requiere equipos de medida con un margen dinámico muy alto. Según los sistemas objeto de medición, las Recomendaciones del UIT-R y las normas pertinentes describen los requisitos de una configuración óptima de medición.

4.12.2 Definiciones y terminología

Los términos y definiciones siguientes han sido extraídos del Reglamento de Radiocomunicaciones, edición de 2008:

"1.144 *emisión fuera de banda:* Emisión en una o varias frecuencias situadas inmediatamente fuera de la anchura de banda necesaria, resultante del proceso de modulación, excluyendo las emisiones no esenciales."

"1.145 *emisión no esencial:* Emisión en una o varias frecuencias situadas fuera de la anchura de banda necesaria, cuyo nivel puede reducirse sin influir en la transmisión de la información correspondiente. Las emisiones armónicas, las emisiones parásitas, los productos de intermodulación y los productos de la conversión de frecuencia están comprendidos en las emisiones no esenciales, pero están excluidas las emisiones fuera de banda."

"1.146 *emisiones no deseadas:* Conjunto de las emisiones no esenciales y de las emisiones fuera de banda."

"1.146A *dominio fuera de banda (de una emisión):* Gama de frecuencias externa e inmediatamente adyacente a la anchura de banda necesaria pero excluyendo el dominio no esencial, en la que generalmente predominan las emisiones fuera de banda. Las emisiones fuera de banda, definidas en función de su fuente, ocurren en el dominio fuera de banda y, en menor medida, en el dominio no esencial. Las emisiones no esenciales pueden asimismo ocurrir en el dominio fuera de banda así como en el dominio no esencial."

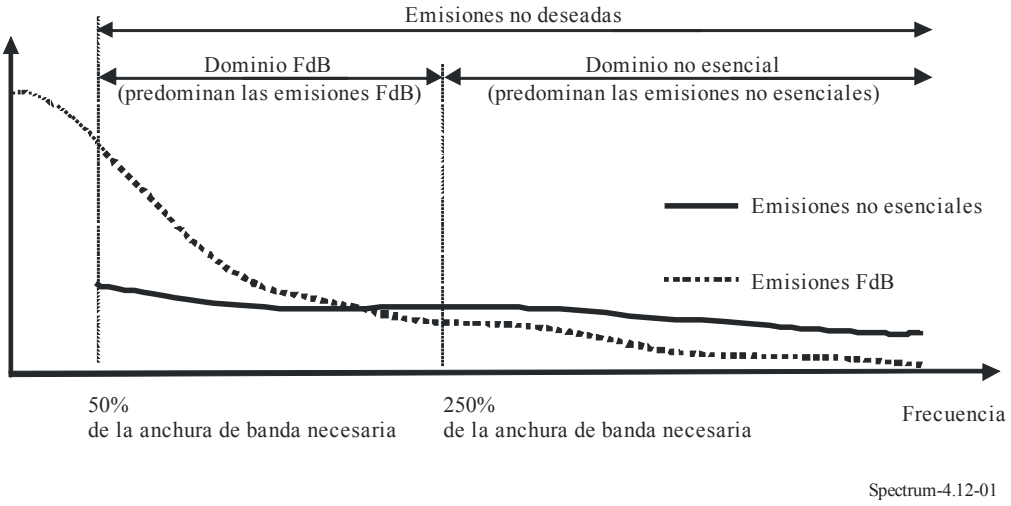
"1.146B *dominio no esencial (de una emisión):* Gama de frecuencias más allá del dominio fuera de banda en la que generalmente predominan las emisiones no esenciales."

"1.152 *anchura de banda necesaria:* Para una clase de emisión dada, anchura de la banda de frecuencias estrictamente suficiente para asegurar la transmisión de la información a la velocidad y con la calidad requeridas en condiciones especificadas."

En la Fig. 4.12-1 se ilustran dichas definiciones. A efectos informativos se señalan los límites entre el dominio de emisiones fuera de banda y emisiones no esenciales (por ejemplo, para sistemas radar normalmente se utiliza el 250%).

FIGURA 4.12-1

Ilustración del dominio fuera de banda (FdB) y no esencial



4.12.3 Gamas de frecuencias de emisiones no deseadas

Existen dos dominios de emisiones no deseadas, a saber:

– dominio fuera de banda;

– dominio no esencial.

Para diferenciar ambos dominios deben definirse los límites entre ellos. La Recomendación UIT-R SM.1539 ofrece algunas orientaciones al respecto: los Cuadros 1 y 2 del Anexo 1 a la Recomendación UIT-R SM 1539 proporcionan valores para evaluar la separación en frecuencia entre la frecuencia central de la señal y el límite de los dominios fuera de banda y no esencial. Esta separación en frecuencia se define mediante dos umbrales que dependen de la naturaleza de la señal (emisiones de banda estrecha (B_L) y de banda ancha (B_U)). En la práctica, en las emisiones con una anchura de banda muy estrecha, el dominio fuera de banda es relativamente más amplio que la anchura de banda necesaria (el límite de las señales no esenciales comienza a una distancia 2,5 veces la anchura de banda necesaria). Por el contrario, en las emisiones con una anchura de banda amplia, el dominio fuera de banda es más estrecho que la anchura de banda necesaria.

Cuando se determina el límite entre el dominio fuera de banda y el dominio no esencial, debe definirse la gama de frecuencias de la medición. Las mediciones de emisiones no deseadas deben realizarse en una amplia gama de frecuencias. El cuadro siguiente se ha extraído de la Recomendación UIT-R SM 329 y proporciona la gama de frecuencias que debe analizarse según la frecuencia del fundamental de la señal.

CUADRO 4.12-1

Gamas de frecuencias para la medición de emisiones no deseadas

Frecuencia fundamental	**Gama de frecuencias para mediciones**	
	Límite inferior	**Límite superior**
9 kHz-100 MHz	9 kHz	1 GHz
100 MHz-300 MHz	9 kHz	10º armónico
300 MHz-600 MHz	30 MHz	3 GHz
600 MHz-5,2 GHz	30 MHz	5º armónico
5,2 GHz-13 GHz	30 MHz	26 GHz
13 GHz-150 GHz	30 MHz	2º armónico
150 GHz-300 GHz	30 MHz	300 GHz

Obsérvese que la medición debe incluir toda la banda de armónicos y no debe truncarse exactamente en la frecuencia superior indicada.

4.12.4 Mediciones en el dominio no esencial

Normalmente, las emisiones no esenciales son señales débiles cuya medición exige equipos con requisitos exigentes. El procedimiento generalmente utilizado atenúa la señal principal lo más posible mediante filtros y explora la gama de frecuencias de interés (véase el Cuadro 4.12-1) utilizando la anchura de banda de medición indicada en la recomendación o norma pertinente. Por lo general, dicha gama de frecuencias es demasiado amplia como para ser registrada en un único paso (por ejemplo, un barrido de un analizador). Los analizadores espectrales modernos permiten visualizar el espectro en pantallas LCD de exploración por puntos. Una característica de dichas representaciones gráficas es el número limitado de pixeles en el eje que representa el nivel de señal y en el eje de la frecuencia, y por tanto, existe una resolución limitada en nivel y frecuencia. La resolución limitada en frecuencia puede producir la pérdida de señales en la pantalla cuando se realizan mediciones en amplias gamas de frecuencias con anchuras de banda de resolución estrechas (más estrechas que un pixel). Algunos equipos permiten que el usuario especifique el número de puntos del barrido. Cuanto mayor sea el número de puntos representados, mayor será la resolución en frecuencia de la medición.

Sin embargo, un número de puntos mayor que la resolución de la pantalla no muestra todos los resultados en la pantalla del equipo. Una mayor resolución en frecuencia sólo es utilizable si los datos de las trazas se exportan y se procesan posteriormente mediante el software adecuado.

En la mayoría de los casos, deben realizarse varias mediciones, cada una de las cuales abarca una parte de la gama de frecuencias.

4.12.5 Mediciones en el dominio fuera de banda

Para la mayoría de los servicios el resultado de la medición de emisiones no deseadas se expresa como la potencia media (r.m.s.) emitida en canales distintos de los canales asignados o como la densidad espectral de potencia (o potencia de componentes discretas) a frecuencias por encima y por debajo de los límites de la anchura de banda necesaria. Para establecer la conformidad de una señal en lo relativo a las emisiones fuera de banda, pueden realizarse dos tipos de mediciones:

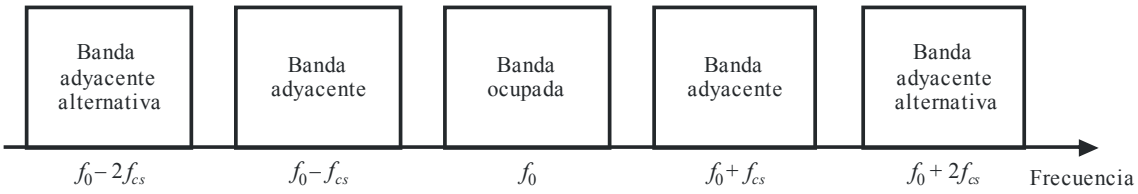
– el método de la potencia del canal adyacente o del canal adyacente alternativo;
– el método de la mascara espectral.

4.12.5.1 Medición de potencia del canal adyacente

Este método consiste en la medición de la potencia media de la señal en las bandas que se ilustran en la Fig. 4.12-2.

FIGURA 4.12-2

Bandas de medición de la potencia



f_{cs}: separación entre frecuencias asignadas.

Spectrum-4.12-02

Por lo general, esta medición se realiza mediante un analizador espectral. La mayoría de los analizadores modernos tienen una función de medición integrada que mide simultáneamente la potencia dentro de banda y en los canales vecinos. La anchura de banda del canal y la separación entre canales deben introducirse manualmente. Sus valores pueden tomarse de los planes de canalización normalizados a nivel nacional o internacional, según sea aplicable al servicio en cuestión. En algunos sistemas, la separación entre canales es mayor que la anchura de banda del canal (bandas de guarda), pero la mayoría de los analizadores permite su introducción por separado.

La potencia media de los canales de interés se mide integrando la densidad espectral de potencia en cada canal por separado una vez que se ha registrado la totalidad del espectro con anchura de banda de resolución relativamente estrecha. Una regla aproximada es que la anchura de banda resolución óptima esté comprendida entre 1/100 y 1/500 del margen total explorado. Debe ponerse especial cuidado en no utilizar el detector de cresta para esta medición.

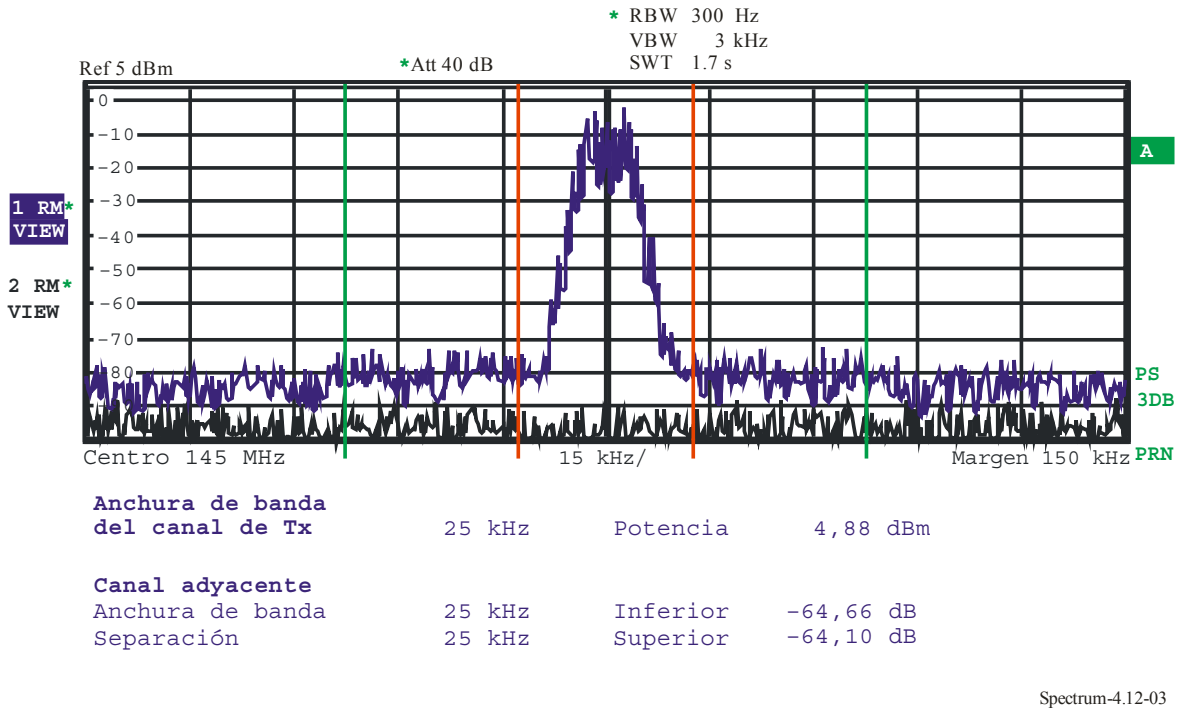
En la mayoría de los servicios, se utiliza el detector de muestras o de RMS en función del equipo de medición, y el modo de traza debe ser borrar/escribir. Si no se dispone de funciones adicionales, como "disparo controlado" ("*gated triger*"), esta medición sólo puede realizarse con emisiones continuas y no es posible en sistemas AMDT. No obstante, debe señalarse que algunos sistemas (como por ejemplo, el radar) requieren que la medición se realice con un detector de cresta y la traza "maxhold" (retención de máximos).

El problema práctico más habitual durante esta medición es que la potencia en los canales adyacente o alternativo sea inferior o próxima al ruido de fondo del analizador/receptor de medida. Para garantizar que el resultado sea válido, debe realizarse una medición preliminar con el transmisor apagado, utilizando los mismos ajustes del equipo que para la medición real. Se toma nota entonces de las potencias que se muestran para el canal adyacente y el canal alternativo. La medición real es válida si las potencias del canal adyacente y el canal alternativo con el transmisor encendido son al menos 10 dB superiores a los valores de la medición preliminar.

En la Fig. 4.12-3 se muestra un ejemplo de medición de potencia del canal adyacente de una estación de radioaficionado. La traza inferior es el nivel de ruido del sistema (DANL) cuando el transmisor en prueba está apagado.

FIGURA 4.12-3

Ejemplo de medición de potencia del canal adyacente



4.12.5.2 Mediciones basadas en máscara espectral

Este método puede aplicarse a emisiones fuera de banda o a emisiones no esenciales. Se basa en la comparación de la densidad espectral de potencia de una emisión en una determinada anchura de banda de medición con una máscara espectral tomada de las recomendaciones o normas pertinentes.

Estrictamente hablando, este método sólo funciona si se define una máscara espectral continua utilizando la misma anchura de banda de referencia. Sin embargo, en mucha normas, los límites fuera de banda están determinados por una combinación de niveles absolutos y relativos. Ello garantiza que la máxima potencia radiada en bandas adyacentes no supere ciertos valores con independencia de la potencia total radiada por el transmisor. En estos casos, en primer lugar debe calcularse la máscara a utilizar como referencia para la comparación con el espectro medido (utilizando niveles relativos). No obstante, esta máscara sólo es válida para una cierta potencia de salida del transmisor.

Existen numerosas normas que aplican anchuras de banda de referencia diferentes para distintas partes del espectro fuera de banda. En esos casos, el método de la máscara espectral no produce resultados precisos según la norma. No obstante, debido a que las emisiones en el dominio fuera de banda normalmente presentan una distribución de densidad espectral continua (es decir, sin distinción entre frecuencias), el método puede aplicarse con una precisión razonable si el cálculo de la mascara espectral relativa incluye la necesaria corrección de la anchura de banda.

Ejemplo:

La norma ETSI EN 125 101 para equipos de usuario UMTS puede servir como ejemplo para ilustrar el cálculo de una máscara espectral. En dicha norma, los requisitos de la máscara son una combinación de niveles absolutos y relativos. Además, se definen dos anchuras de banda de referencia diferentes. En el Cuadro 4.12-2 incluye los datos relevantes de esta norma.

CUADRO 4.12-2

Requisitos de la mascara de emisión espectral para equipos de usuario UMTS

Δf (MHz) (Nota 1)	**Requisito mínimo (Nota 2) Banda I, II, III, IV, V, VI**		**Requisitos adicionales Banda II, Banda IV y Banda V (Nota 3) (dBm)**	**Anchura de banda de medición (Nota 6)**
	Requisito relativo (dBc)	**Requisito absoluto (dBm)**		
2,5-3,5	$\left\{-35-15\cdot\left(\frac{\Delta f}{\text{MHz}}-2.5\right)\right\}$	–71,1	–15	30 kHz (Nota 4)
3,5-7,5	$\left\{-35-1\cdot\left(\frac{\Delta f}{\text{MHz}}-3.5\right)\right\}$	–55,8	–13	1 MHz (Nota 5)
7,5-8,5	$\left\{-39-10\cdot\left(\frac{\Delta f}{\text{MHz}}-7.5\right)\right\}$	–55,8	–13	1 MHz (Nota 5)
8,5-12,5	–49 dBc	–55,8	–13	1 MHz (Nota 5)

NOTA 1 – Δf es la separación entre la frecuencia portadora y el centro de la anchura de banda de medición.

NOTA 2 – El requisito mínimo para las bandas I, II, III, IV, V y VI se calcula a partir del requisito relativo o el requisito absoluto, tomando el que tenga la potencia más elevada.

NOTA 3 – Para el funcionamiento exclusivamente en las bandas II, IV y V, el requisito mínimo se calcula a partir del requisito mínimo indicado en la Nota 2 o el requisito adicional de la banda II, tomando el que corresponda a la potencia más baja.

NOTA 4 – La primera y última posición de medida con un filtro de 30 kHz corresponde a Δf = 2,515 MHz y 3,485 MHz respectivamente

NOTA 5 – La primera y última posición de medida con un filtro de 1 MHz corresponde a Δf = 4 MHz y 12 MHz respectivamente.

NOTA 6 – Como regla general, la anchura de banda de resolución del equipo de medición debe ser igual a la anchura de banda de medición. No obstante, para mejorar la precisión, sensibilidad y eficiencia de la medición, la anchura de banda de resolución puede ser menor que la anchura de banda de medición. En ese caso, el resultado debe integrarse sobre la anchura de banda de medición para obtener la anchura de banda equivalente de ruido de la anchura de banda de medición.

La máscara espectral de un equipo de usuario en la banda I en ondas decimétricas con una potencia máxima de +24 dBm se calcula utilizando el cuadro anterior. La anchura de banda de una emisión UMTS es de 3,84 MHz. La referencia de potencia de la mascara espectral es el nivel r.m.s total (+24 dBm) pero los puntos de discontinuidad en el límite del dominio fuera de banda (fc +/–2,5 MHz) se referencian a una anchura de banda de medición de 30 kHz, lo que significa que la máscara empieza a un nivel absoluto de:

$$24 \text{ dBm} + 10*\log(30 \text{ kHz}/3{,}84 \text{ MHz}) = +3 \text{ dBm}$$

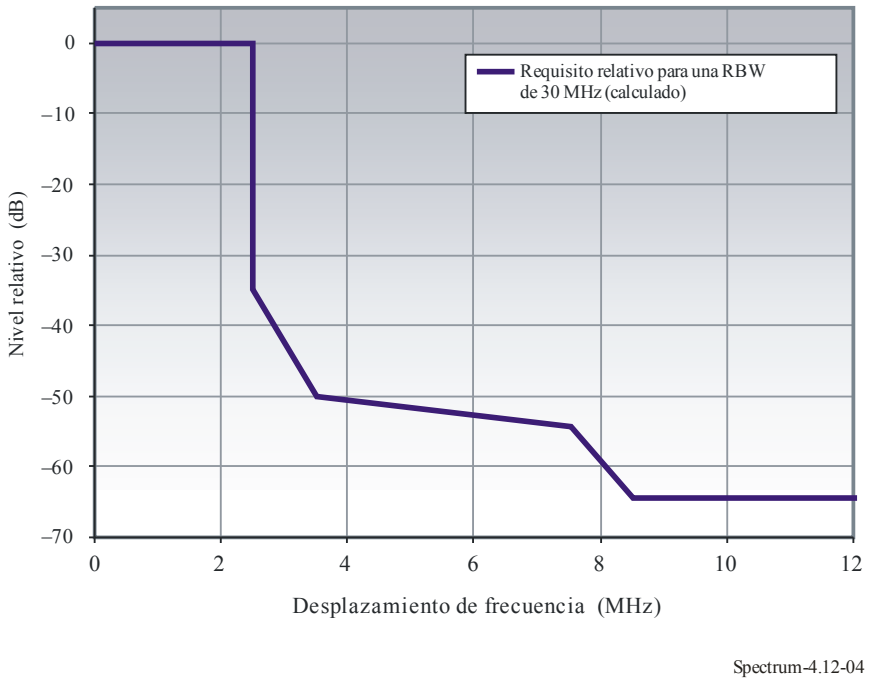
Este valor marca el nivel de referencia de 0 dB para toda la máscara espectral. Para un desplazamiento de 2,5 MHz, la mascara cae 35 dB pues ese es el resultado de la ecuación de la columna "requisito relativo" para 2,5 MHz. Entre 2,5 y 3,5 MHz, la mascara cae a una velocidad de 15 dB/MHz hasta –50 dBc. Para un desplazamiento de 3,5 MHz, la anchura de banda de referencia pasa de 30 kHz a 1 MHz. Sin embargo, con un espectro medido la parte siguiente de la mascara debe recalcularse para una anchura de banda de 30 kHz, lo que significa que todos los niveles deben ser corregidos en $10*\log(30/1\,000) = 15$ dB.

Por tanto, el nivel relativo de la mascara resultante para un desplazamiento de 3,5 MHz es –35 dBc –15 dB = –50 dBc, lo cual proporciona una transición sin discontinuidades desde la parte previa. La mascara cae entonces con una pendiente de 1 dB/MHz hasta –39 dBc para un desplazamiento de 7,5 MHz y así sucesivamente. El nivel final de la columna "requisito relativo" es –49 dBc para desplazamientos superiores a 8,5 MHz. En niveles absolutos (o densidades espectrales de potencia), ello corresponde a +3 dBm –49 dB = –46 dBm en una anchura de banda de 30 kHz.

Parte de los límites absolutos indicados en la columna siguiente también deben corregirse en términos de anchura de banda, de forma que los resultados para una anchura de banda de medición de 30 kHz tengan un nivel constante de –71 dBm para todos los desplazamientos de frecuencia. No obstante, en la Nota 2 se señala que si el nivel relativo es superior, se desprecia el nivel absoluto y viceversa. El requisito adicional para la banda IV resulta en un valor de hasta –28 dBm que, en cualquier caso es superior a los valores relativos. En la Fig. 4.12-4 se muestra la máscara espectral resultante que puede compararse directamente con un espectro medido con una anchura de banda de resolución (RBW) de 30 kHz.

FIGURA 4.12-4

Ejemplo de mascara espectral para un equipo de usuario UMTS

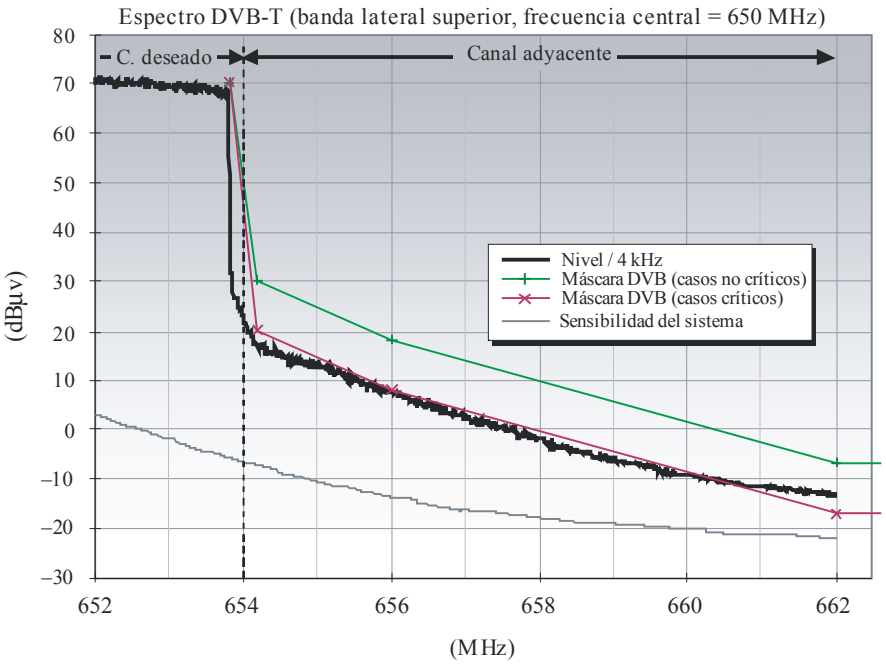


Los resultados de la medición con máscara espectral se presentan en términos de dBsd, dBc o dBpp (véanse las Recomendaciones UIT-R SM.329 y UIT-R SM.1541)

En la Fig. 4.12-5 se muestra un ejemplo de medición de una emisión fuera de banda de un transmisor DVB-T mediante el método de la máscara espectral.

FIGURA 4.12-5

Medición de la emisión fuera de banda de un transmisor DVB-T



4.12.6 Requisitos del equipo, configuración y limitaciones de la medición

La medición de emisiones no deseadas exige un margen dinámico elevado que puede no ser compatible con las especificaciones del equipo para una configuración de medición dada. Por tanto, para dicha medición debe tenerse especial cuidado en optimizar la configuración de medición.

4.12.7 Optimización del margen dinámico de la configuración de medición

A fin de disponer del máximo margen dinámico para las mediciones de emisiones no deseadas, el analizador espectral o el receptor de medida deben estar cargados con el nivel máximo posible en el mezclador de entrada, sin comprimir la señal de transmisión. La atenuación de RF debe fijarse en el valor mínimo posible que no produzca la compresión del trayecto de la señal.

El ruido de fondo del equipo constituye una limitación. El ruido de fondo de un analizador espectral o de un receptor se especifica, por lo general, como el nivel de ruido medio visualizado (DANL, *Displayed Average Noise Level*) en una anchura de banda de resolución de 10 Hz o 1Hz. Esta característica representa la capacidad del analizador de medir una señal débil y el valor de dicha característica limita la señal mínima discernible por el equipo. La potencia de ruido inherente de un analizador espectral o de un receptor es función de los niveles de ajuste de la anchura de banda de resolución (RBW) y del nivel de referencia. Cuanto menor sea la RBW, menor será la potencia de ruido inherente del analizador. No obstante, la RBW se fija, por lo general, en la recomendación o norma pertinente de acuerdo con el tipo de señal objeto de medición.

4.12.8 Equipo requerido

La medición de emisiones no deseadas suele realizarse, en general, utilizando un analizador espectral. No obstante, también pueden utilizarse receptores de medida. Una forma práctica de hacerlo, especialmente para mediciones con máscara espectral en el dominio fuera de banda, es mediante una exploración controlada por computador sobre la gama de frecuencias de interés, utilizando un receptor de medida. Los filtros de preselección normalmente utilizados en los receptores de medida proporcionan a menudo un margen dinámico superior que el conseguido con analizadores espectrales.

Para reducir la potencia de ruido inherente en la medición de emisiones no deseadas pueden utilizarse amplificadores de bajo ruido (LNA) internos o externos. No obstante, el máximo nivel medible sin sobrecargar el equipo depende de las características del LNA más que del propio analizador espectral o del receptor. Debe tenerse especial cuidado en no sobrecargar ningún componente del sistema de medición.

Si la configuración de la medición permite realizar una medida directa con un margen dinámico suficiente, la medición podrá realizarse directamente y procesar el resultado sin necesidad de tratamiento ulterior.

En muchos casos (como en el ejemplo de una señal DVB-T de la Fig. 4.12-5), la máscara espectral abarca un margen de 100 dB o más, o el nivel de las emisiones no esenciales deben reducirse 100 dB. Las mediciones en dichos dominios sólo son válidas si el ruido del receptor está al menos 10 dB por debajo de la componente de señal más débil que debe medirse. Ello exige rangos dinámicos de medición de al menos 110 dB, que supera las especificaciones de cualquier analizador espectral o receptor. Conforme la entrada del analizador espectral se carga con un nivel elevado de señal a medir, puede observarse una distorsión de la señal debido a la no linealidad del trayecto de la misma en el analizador espectral. En particular, los productos de intermodulación de tercer orden y los productos de distorsión armónica son productos no esenciales que se producen con frecuencia. En esos casos, la señal principal en el canal deseado debe suprimirse mediante filtros. Para frecuencias por encima de 1 GHz, lo más apropiado es utilizar un filtro YIG ya que puede sintonizarse eléctricamente y sólo deja pasar la gama de frecuencias objeto de medición. Las emisiones no deseadas se miden a través del filtro y la atenuación (medida) del filtro corrige los resultados. Por lo general, ello se hace en postproceso mediante software.

Además, cualquiera que sea la señal deseada y cuando su amplitud varíe con el tiempo (por ejemplo, en el caso de modulaciones de envolvente no constante), en aras de la consistencia pueden utilizarse diez o más mediciones promediadas.

4.12.9 Aspectos prácticos de la medición

Por lo general, la recomendación o norma requiere que la medición se realice a la salida del transmisor. No obstante, si la medición se realiza cuando no hay emisiones reales, debe medirse la intensidad de campo. Ello significa que puede ser necesario utilizar diferentes antenas de medida con factores de corrección distintos. Debe tenerse especial cuidado en que las antenas de medición sólo se utilicen dentro de sus márgenes de funcionamiento definidos.

Uno de los principales problemas prácticos, especialmente cuando las mediciones se realizan sin emisiones reales, es que en los resultados aparecen también las señales de otros transmisores que no pueden suprimirse. Para minimizar sus efectos, pueden realizarse dos mediciones consecutivas en la gama de frecuencias de interés: durante la primera medición el transmisor investigado se apaga y durante la segunda se mantiene encendido. Las emisiones que aparecen en ambas exploraciones son debidas a señales externas y las señales que sólo se detectan en la segunda exploración pueden deberse a emisiones no esenciales del transmisor en prueba. Teniendo en cuenta que las emisiones externas no están siempre activas, este enfoque ofrece mejores resultados cuanto menor sea la separación temporal entre ambas exploraciones. Si el transmisor en prueba emite impulsos, pueden utilizarse las pausas para detectar señales externas. No obstante, este método requiere que el equipo de medición esté sincronizado en el tiempo con el transmisor en prueba.

Las mediciones basadas en el método de la máscara espectral en el dominio fuera de banda se analizan con detalle en el Anexo 1 a la Recomendación UIT-R SM.1541.

En la sección 5.5 de este Manual se describe un ejemplo adicional de medición de emisiones no deseadas de sistemas radar.

Las mediciones de emisiones no deseadas en el dominio no esencial se tratan ampliamente en el Anexo 2 a la Recomendación UIT-R SM.329.

Bibliografía

Nota de aplicación 1EF45_0E, Rohde and Schwarz, "spurious emission measurements on 3GPP Base Station Transmitters", 2002

Recomendación CEPT, REC(02)05, "unwanted emissions".

Recomendaciones del UIT-R

NOTA – Siempre debe utilizarse la versión más actualizada de cada Recomendación.

Recomendación UIT-R SM.328 – Espectros y anchuras de banda de las emisiones.

Recomendación UIT-R SM.329 – Emisiones no deseadas en el dominio no esencial.

Recomendación UIT-R SM.1541 – Emisiones no deseadas en el dominio fuera de banda.

Recomendación UIT-R SM.1792 – Medición de emisiones en banda lateral de los transmisores T-DAB y DVB-T a efectos de comprobación técnica.

CAPÍTULO 5

Sistemas y procedimientos específicos de comprobación técnica

		Página
5.1	Comprobación técnica de las emisiones de vehículos espaciales	425
5.1.1	Tareas y mediciones a realizar	425
5.1.1.1	Tipos de mediciones	427
5.1.1.2	Tipos de interferencias causadas por sistemas por satélite	427
5.1.2	Técnicas de medición	428
5.1.2.1	Consideraciones generales	428
5.1.2.2	Mediciones de frecuencia	428
5.1.2.2.1	Efecto Doppler	428
5.1.2.2.2	Método de medición	430
5.1.2.2.3	Procedimiento de cálculo de la frecuencia y precisión de la medición	430
5.1.2.3	Mediciones de la anchura de banda	430
5.1.2.4	Mediciones de la densidad de flujo de potencia	432
5.1.2.4.1	Mediciones en una anchura de banda de referencia	432
5.1.2.4.2	Medición de la densidad de flujo de potencia total	433
5.1.2.4.3	Procedimiento de medición	433
5.1.2.4.4	Incertidumbre de la medición	434
5.1.2.5	Mediciones de la polarización	435
5.1.2.6	Determinación de posiciones orbitales y elementos orbitales	435
5.1.2.6.1	Satélites OSG	435
5.1.2.6.2	Satélites no OSG	435
5.1.2.7	Localización geográfica de transmisores situados en la Tierra mediante mediciones de la diferencia de tiempo y la diferencia de frecuencia desde dos satélites OSG	436
5.1.2.7.1	Medición de las diferencias de tiempo y de frecuencia	437
5.1.2.7.2	Algoritmo de localización geográfica	438
5.1.2.7.3	Análisis de incertidumbre	438
5.1.2.8	Localización geográfica de transmisores situados en la Tierra utilizando un solo satélite OSG y el desplazamiento Doppler inverso	440
5.1.2.8.1	Algoritmo de localización geográfica	440
5.1.2.8.2	Mediciones de frecuencia (Doppler)	441
5.1.2.8.3	Corrección de la posición y la velocidad	441
5.1.2.9	Mediciones de ocupación de frecuencia y de la ocupación de posición orbital OSG	442

Página

5.1.2.10 Mediciones por debajo del valor mínimo de ruido de fondo 443
5.1.3 Condiciones que han de reunir los equipos e instalaciones 443
5.1.3.1 Consideraciones generales 444
5.1.3.2 Factor de calidad de un sistema de comprobación técnica espacial 444
5.1.3.2.1 Términos que definen *G/T* 445
5.1.3.2.2 Procedimientos de medición de *G/T* 446
5.1.3.3 Sistemas de antena 447
5.1.3.4 Orientación de la antena 448
5.1.3.5 Abertura de haz de la antena necesaria para mediciones angulares 448
5.1.3.6 Polarización del sistema 449
5.1.3.7 Receptores 450
5.1.3.8 Equipo periférico 451
5.1.3.8.1 Equipamiento general 451
5.1.3.8.2 Analizador 451
5.1.3.9 Canal de supervisión de frecuencia intermedia o de radiofrecuencia de banda ancha 451
5.1.3.10 Equipo de registro del espectro de frecuencias radioeléctricas 452
5.1.3.11 Requisitos del equipo informático 452
5.1.4 Documentación y base de datos de apoyo a la comprobación técnica espacial 452
5.1.4.1 Consideraciones generales relativas a la documentación y base de datos 452
5.1.4.2 Base de datos de información general de satélites existentes 452
5.1.4.3 Base de datos de información de comprobación técnica 453
5.1.4.4 Utilización de la documentación y la base de datos para facilitar la comprobación técnica 453
5.1.5 Identificación de estaciones espaciales y localización geográfica de estaciones terrenas 453
5.1.5.1 Resultados de la comprobación técnica que se han de utilizar para la identificación 454
5.1.5.1.1 Evaluación de registros de bandas de frecuencias 454
5.1.5.1.2 Cálculo del periodo de revolución 454
5.1.5.1.3 Radiogoniometría 454
5.1.5.1.4 Cálculo de los datos de las efemérides a partir de mediciones angulares de la antena 454
5.1.5.1.5 Características de la emisión 455
5.1.5.2 Procedimiento de identificación 455
5.1.5.3 Otras posibilidades de identificación de estaciones espaciales 455
5.1.5.4 Consideraciones operacionales relativas a la localización geográfica de enlaces ascendentes de estaciones terrenas hacia satélites geoestacionarios 455
5.1.5.4.1 Adquisición de la información necesaria 456
5.1.5.4.2 Selección del satélite adyacente 456
5.1.5.4.3 Señales de referencia 457

Página

5.1.5.4.4 Datos de efemérides 457
5.1.5.4.5 Establecimiento de transmisores de referencia dedicados adicionales 458
5.1.5.4.6 Transmisor de referencia transportable 458
5.1.6 Ejemplos de soluciones técnicas 459
5.1.6.1 Ejemplo de estación de comprobación técnica de radiocomunicaciones espaciales 459
5.1.6.1.1 Sistema de antena 461
5.1.6.1.2 Facilidades de recepción 468
5.1.6.1.3 Equipo de comprobación técnica 473
5.1.6.1.4 Facilidades de control 477
5.1.6.2 Proceso para la comprobación técnica radioeléctrica de satélites geoestacionarios 481
5.1.6.3 Comprobación técnica precisa de la longitud orbital (radiointerferometría) 482
5.1.6.3.1 Objetivos de la comprobación técnica precisa de la órbita 482
5.1.6.3.2 Hardware de un interferómetro 484
5.1.6.3.3 Funcionamiento de un interferómetro 487
5.1.6.3.4 Calibración del error 488
5.1.7 Ejemplos de resultados de comprobación técnica 489
5.1.7.1 Registro de frecuencias en ondas métricas 489
5.1.7.2 Cálculo de los elementos orbitales a partir de mediciones angulares de antena 492
5.1.7.3 Mediciones de la ocupación del transpondedor 493
5.1.7.4 Inclinación de los satélites geoestacionarios 494
5.1.7.5 Resultado y presentación de una medición de localización geográfica 495
5.2 Comprobación técnica de los servicios de radiodifusión 499
5.2.1 Introducción 499
5.2.1.1 Calidad del servicio 499
5.2.2 Normativa y mediciones de radiodifusión 504
5.2.2.1 Radiodifusión sonora analógica con modulación de amplitud 504
5.2.2.2 Radiodifusión sonora analógica con modulación de frecuencia 504
5.2.2.3 Radiodifusión de televisión analógica 507
5.2.2.4 Radiodifusión sonora digital 508
5.2.2.5 Radiodifusión de televisión digital terrenal 515
5.2.3 Instrumentos específicos para la comprobación técnica de la radiodifusión 520
5.2.3.1 Topología general 520
5.2.3.2 Sistema de antena 521
5.2.3.3 Recepción y decodificación 523
5.2.3.4 Medidor dedicado de parámetros técnicos y de calidad 525
5.2.3.5 Digitalización y compresión 525

Página

5.2.3.6 Análisis preliminar de medios y metadatos 527
5.2.3.7 Distribución y procesamiento de datos 527
5.2.3.8 Almacenamiento de datos 529
5.3 Comprobación técnica de sistemas celulares 531
5.3.1 Introducción 531
5.3.2 Normas y sistemas de radiocomunicaciones celulares 532
5.3.3 Descripción de los sistemas de comunicaciones personales 537
5.3.4 Sistemas de servicios móviles por satélite 538
5.3.5 Accesos de banda ancha inalámbricos 539
5.3.6 Consideraciones sobre las mediciones 542
5.3.6.1 Medición de parámetros de radiofrecuencia 542
5.3.6.2 Mediciones de calidad de servicio 543
5.3.6.3 Mecanismos de interferencia 544
5.3.6.4 Mediciones de cobertura 547
5.3.7 Identificación 548
5.3.7.1 Radiogoniometría y localización del emisor 548
5.3.7.2 Decodificación 549
5.4 Enlaces de microondas y enlaces ascendentes de satélite 552
5.4.1 Introducción general 552
5.4.2 Utilización de enlaces de microondas 552
5.4.2.1 Enlaces analógicos 553
5.4.2.2 Enlaces digitales 554
5.4.2.3 Espectro de salida 554
5.4.2.4 Multiplexación en sistemas de radiocomunicaciones por microondas 555
5.4.2.4.1 Múltiplex por división de frecuencia 555
5.4.2.4.2 Múltiplex por división en el tiempo 556
5.4.2.5 Explotación de la comprobación técnica 556
5.4.3 Técnicas generales de medición 557
5.4.3.1 Sistema de interceptación directa 558
5.4.3.2 Sistema de interceptación con mezcladores de radiofrecuencia 558
5.4.4 Equipamiento de los vehículos de comprobación técnica 559
5.4.4.1 Sistema de antena 560
5.4.4.1.1 Gama de frecuencias de 1 a 18-26 GHz 560
5.4.4.1.2 Gamas de frecuencias de 18-26 GHz y 26-40 GHz 561
5.4.4.2 Equipo analizador 561
5.4.4.3 Equipo de calibración 562

Página

5.4.4.4 Sistemas de navegación y posicionamiento 563
5.4.4.5 Gobierno de la rotación y soportes telescópicos 563
5.4.5 Compartición del servicio fijo por satélite con el servicio fijo 563
5.4.5.1 Interferencia entre el servicio fijo por satélite y el servicio fijo 563
5.4.5.2 Métodos de análisis 564
5.4.5.3 Fase de búsqueda sobre el terreno de la interferencia de un satélite geoestacionario 566
5.4.5.3.1 Generalidades 566
5.4.5.3.2 Métodos convencionales con antenas directivas o antenas omnidireccionales 566
5.4.5.3.3 Utilización de algoritmos de correlación cruzada para mejorar la sensibilidad del sistema 567
5.4.6 Seguridad 568
5.5 Comprobación técnica de emisiones radar 570
5.5.1 Introducción 570
5.5.2 Principios básicos del radar 570
5.5.3 Ecuación de la distancia radar 571
5.5.4 Principales componentes de los sistemas radar 571
5.5.5 Aplicaciones del radar 572
5.5.6 Tecnologías básicas del radar 573
5.5.7 Tipos o clasificación de los radares 573
5.5.8 Principales bandas de frecuencias de sistemas radar 577
5.5.9 Instrumentos para la medición de señales radar 577
5.5.10 Medición de las señales radar 578
5.5.10.1 Principales parámetros de un radar 578
5.5.10.2 Configuración para las mediciones 579
5.5.10.3 Medición de la frecuencia central 581
5.5.10.4 Medición de los parámetros de un impulso 581
5.5.10.5 Medición de la potencia del impulso 582
5.5.10.6 Medición de la anchura de banda ocupada 582
5.5.10.7 Medición de emisiones no deseadas 583
5.5.10.8 Medición de la modulación de fase de un impulso 588
5.6 Medición de radiaciones no ionizantes 590
5.6.1 Introducción 590
5.6.2 Límites de la RNI y coeficiente de exposición 590
5.6.3 Campos eléctrico y magnético 594
5.6.4 Instrumentos para la medición de radiaciones no ionizantes 594
5.6.4.1 Sondas y medidores isotrópicos de banda ancha 594
5.6.4.2 Antenas triaxiales y medidores de intensidad de campo 596

Página

5.6.4.3 Estaciones transportables 597
5.6.4.4 Utilización de equipos convencionales de medición de la intensidad de campo 598
5.6.5 Procedimientos de medición 598
5.6.5.1 Selección del emplazamiento de medición 598
5.6.5.2 Posición de los instrumentos y promediación 599
5.6.5.3 Precauciones en caso de campos eléctricos o magnéticos intensos 599
5.6.5.4 Utilización de sondas y medidores de banda ancha 600
5.6.5.5 Consideraciones generales sobre la evaluación selectiva de frecuencias 600
5.6.5.6 Evaluación general entre 9 kHz y 6 GHz 601
5.6.5.7 Señales por encima de 6 GHz 602
5.6.5.8 Radares y emisiones de impulsos 602
5.6.5.9 Señales discontinuas 603
5.6.5.10 GSM 603
5.6.5.11 Emisiones de banda ancha (televisión analógica/digital; redes digitales...) 603
5.6.5.12 Sistemas AMDC (UMTS...) 604
5.6.6 Incertidumbre 605
5.6.7 Informes 605
5.7 Mediciones del ruido radioeléctrico 607
5.7.1 Introducción y antecedentes 607
5.7.2 Fuentes de ruido radioeléctrico 607
5.7.3 Componentes del ruido radioeléctrico 608
5.7.4 Parámetros fundamentales 609
5.7.5 Tipos de mediciones 609
5.7.6 Emplazamientos y frecuencias de medición 609
5.7.7 Ejemplos de presentación de resultados 610
5.7.8 Banco de datos de ruido radioeléctrico de la UIT 611

5.1 Comprobación técnica de las emisiones de vehículos espaciales

5.1.1 Tareas y mediciones a realizar

En la comprobación técnica de las emisiones radioeléctricas procedentes de vehículos espaciales participaría normalmente un servicio encargado de la aplicación de leyes y reglamentos internos y dedicado a la comprobación técnica internacional, a tenor de lo dispuesto en el Artículo 16 del Reglamento de Radiocomunicaciones, como una ampliación normal y necesaria de sus facilidades, técnicas y actividades habituales de comprobación técnica.

En general, las tareas que realiza una estación de comprobación técnica de las emisiones radioeléctricas para los servicios espaciales no difieren de las correspondientes a una estación de comprobación técnica para los sistemas terrenales. No obstante, para dar cumplimiento a esas tareas es necesario utilizar equipos de medición relativamente más complejos, tales como sistemas de antena más sofisticados, así como procedimientos diferentes de medición y comprobación técnica. Ello se debe básicamente a que una estación espacial se encuentra a bordo de un satélite en el espacio y, por ende, su posición puede depender del tiempo, si no está en la órbita geoestacionaria (OSG). El conocimiento básico de las órbitas de dichos objetos es un requisito previo importante para cualquier tipo de observación o medición de los mismos.

Dado que la comprobación técnica espacial difiere de la comprobación técnica terrenal en sus técnicas de medición y en su terminología, la que hace referencia a la función espacial se denomina "estación de comprobación técnica para servicios de radiocomunicaciones espaciales". Las funciones de esta estación se pueden describir como sigue:

- observación regular y sistemática del espectro de frecuencias radioeléctricas, con el fin de detectar e identificar las emisiones procedentes de estaciones espaciales;
- determinación de la ocupación y utilización porcentual de los transpondedores o los transmisores de las estaciones espaciales;
- medición y registro de las características de las emisiones de las estaciones espaciales;
- investigación y supresión de la interferencia perjudicial causada por las estaciones espaciales, en cooperación con las estaciones terrenales de comprobación técnica y otras estaciones espaciales de comprobación técnica, según proceda;
- investigación y eliminación de la interferencia perjudicial en las frecuencias utilizadas por un estación espacial causada por las emisiones de estaciones terrenales, estaciones terrenas desconocidas u otros satélites, por ejemplo, mediante la observación y medición de una señal interferente de un transpondedor de manera similar a como se realiza con las emisiones procedentes de estaciones espaciales legitimas(véase §5.1.1.1);
- mediciones y registros en el marco de los proyectos técnicos y científicos;
- detección del uso no autorizado de los transpondedores e identificación de la fuente; y
- utilización de técnicas de satélite especiales para localizar emisores en la Tierra.
- comprobación técnica previa al lanzamiento, supervisando durante la fase previa al lanzamiento del satélite las frecuencias utilizadas para la telemetría, telemando y seguimiento con respecto a la posición orbital. Esta comprobación técnica previa al lanzamiento permite que el lanzamiento y la fase orbital inicial, incluyendo el posicionamiento.

Si se quieren observar todos los tipos de vehículos espaciales, es preciso que el sistema de antena sea capaz de efectuar el seguimiento de satélites en órbita baja y muy excéntrica y de apuntar con precisión a cualquier satélite OSG en el segmento visible del arco.

Las comunicaciones por satélite se dividen en los servicios radioeléctricos siguientes

- *Servicio fijo por satélite (SFS)*

  El SFS incluye todos los servicios de comunicaciones por satélite soportados en infraestructura fija mediante redes públicas o privadas para proporcionar servicios de telefonía, facsímil, internet, vídeo y datos.

– *Servicio de radiodifusión por satélite (SRS)*

  Este servicio radioeléctrico se utiliza principalmente para la distribución de televisión y señales de vídeo.

– *Servicio móvil por satélite (SMS)*

  Los servicios SMS son principalmente utilizados para servicios móviles de telefonía y datos, así como en la navegación y la gestión de flotas por satélite.

Los costes globales del sistema deben mantener un equilibrio en relación con las opciones de diseño en la provisión de las capacidades mencionadas: cobertura de frecuencias, sensibilidad del sistema, velocidad de orientación de la antena, precisión del apuntamiento de la antena, facilidad para sustitución del hardware del alimentador de antena en caso de ser necesario, anchura de banda de recepción, grado de sofisticación de la instrumentación de análisis de la señal y grado de automatización de las mediciones. El equipo ideal sería un sistema de comprobación técnica de estaciones espaciales con alto grado de automatización y sofisticación, completamente orientable, con capacidad de funcionamiento en todas las bandas de frecuencias entre, por ejemplo, 1 y 30 GHz y con sensibilidad suficiente para mantener una relación señal a ruido de al menos 26 dB en todas las señales de interés. Sin embargo, aplicando el sentido práctico a dicho ejemplo, las mejoras incrementales de la sensibilidad implica unos costes que crecen casi exponencialmente. Por tanto, cada administración debe analizar sus propias prioridades y necesidades internas en relación con la gestión del espectro y decidir las prioridades en relación con los servicios de comprobación técnica espacial.

El Cuadro 5.1-1 ofrece una visión general de los factores a considerar en la realización de actividades de comprobación técnica que implican señales de satélites. El cuadro está organizado por tipo de satélite y trayecto de señal (enlace ascendente al satélite, enlace descendente desde el satélite).

CUADRO 5.1-1

Factores a considerar en las actividades de comprobación técnica de señales satelitales

Tipo de satélite	Emisiones del vehículo satelital (enlace descendente)	Emisiones de la estación terrena satelital (enlace ascendente)
OSG	Las tareas de comprobación técnica se realizan normalmente desde estaciones de comprobación técnica fijas debido a su mejor calidad de funcionamiento de antena y sensibilidad del sistema. El posicionamiento de antena necesario para satélite OSG está limitado al arco ecuatorial	La comprobación técnica de emisiones desde estaciones terrenas a satélites OSG, incluyendo los terminales de muy pequeña abertura (VSAT) empleados en el ámbito empresarial, se realizan desde vehículos móviles equipados para funcionar en la gama de frecuencias adecuada. La gran directividad de la antena de las estaciones terrenas exige que el equipo de medida esté cerca de la antena transmisora o en algún punto del haz principal.
No-OSG	Las tareas de comprobación técnica se realizan normalmente desde estaciones fijas de comprobación técnica con antenas con capacidad de seguimiento (aunque se pueden utilizar sistemas móviles con capacidad de seguimiento). La antena de la estación de comprobación técnica debe seguir continuamente la posición del satélite utilizando uno de los métodos de seguimiento de satélites descritos en este Capítulo.	La comprobación técnica de las emisiones de estaciones terrenas a satélites no-OSG se realiza desde vehículos móviles. Tal como ocurre en el caso de OSG, la directividad de la antena de las estaciones terrenas exige que el equipo de medida esté cerca de la antena transmisora o en algún punto del haz principal. El hecho de que la antena transmisora se mueva para seguir la órbita del satélite, complicando las mediciones de parámetros relacionados con la amplitud, constituye un factor adicional.

5.1.1.1 Tipos de mediciones

Las principales mediciones y parámetros que han de determinarse en la comprobación técnica de las comunicaciones por satélite son las siguientes:

– Frecuencia
– Desplazamiento de frecuencia Doppler
– Densidad de flujo de potencia (*d.f.p.*) en la anchura de banda de referencia y total
– *p.i.r.e.* total, *p.i.r.e.* por canal y *p.i.r.e.* por portadora
– Relación C/N_0 de cada portadora
– Anchura de banda y anchura de banda de la portadora
– Mediciones de espectro fuera de banda
– Características de la transmisión
– Identificación del tipo de modulación
– Registro de las observaciones espectrales
– Espectrogramas rápidos para visualizar los desplazamientos rápidos de ranuras y las señales de barrido
– Mediciones de la polarización
– Posición orbital del satélite (precisión de la posición orbital de al menos 0.1°)
– Características de banda de base de las señales recibidas, es decir, MDPB, MDPQ, MAQ, MDF/MF
– Relación señal a ruido (*S/N*) recibida.

5.1.1.2 Tipos de interferencias causadas por sistemas por satélite

− Interferencia en el canal adyacente
− Interferencia cocanal
− Interferencia entre canales (polarización cruzada)
− Interferencia con el sistema adyacente.

Estos tipos de interferencias se producen a la entrada de la estación terrena receptora por las portadoras transmitidas por el satélite del sistema considerado (que consta de una estación terrena y un satélite) o por el satélite de otro sistema.

Interferencia en el canal adyacente

Este tipo de interferencia la producen portadoras transmitidas desde el satélite a estaciones terrenas del mismo sistema, situado en el mismo haz de cobertura restringida que la estación terrena considerada, a la que se hace posteriormente referencia como estación terrena víctima, transmitidas en distintas frecuencias pero con la misma polarización.

En los accesos de tipo AMDF y AMDT, estas portadoras interfieren con la portadora víctima debido a la calidad de funcionamiento no ideal del filtro de la estación terrena transmisora.

Interferencia cocanal (copolarización)

La interferencia cocanal la producen portadoras transmitidas desde el satélite a estaciones terrenas del mismo sistema, en la misma frecuencia y con la misma polarización que la portadora víctima.

Estas portadoras interferentes se transmiten, en el caso de AMDF y AMDT, a estaciones terrenas situadas en distintos haces de cobertura restringida que la estación terrena víctima, y en el caso de AMDC, a estaciones terrenas situadas en el mismo haz de cobertura restringida que la estación terrena víctima.

En los casos de AMDF y AMDT, esta interferencia está limitada por el balanceo de la antena satelital del haz de cobertura restringida adyacente en la dirección de la estación terrena víctima, mientras que en AMDC está limitada por las propiedades de correlación de los códigos.

Interferencia entre canales

Este tipo de interferencia la producen portadoras transmitidas desde el satélite a estaciones terrenas del mismo sistema, en la misma frecuencia y con polarización ortogonal a la de la portadora de la estación terrena víctima

Estas portadoras interferentes se transmiten, en caso de polarización simple, a estaciones terrenas situadas en haces de cobertura restringida distintos al de la estación terrena víctima, pero, en caso de doble polarización, a estaciones terrenas situadas en el mismo haz de cobertura restringida que la estación terrena víctima.

En sistemas con polarización simple, esta interferencia está limitada por el balanceo del haz de cobertura restringida adyacente en la dirección de la estación terrena víctima y por el aislamiento de la polarización de la antena del satélite. En caso de reutilización por polarización, está limitada por el aislamiento de polarización de las antenas del satélite y de la estación terrena.

Interferencia con el sistema adyacente

Este tipo de interferencia la producen portadoras transmitidas desde el satélite a estaciones terrenas de otro sistema de comunicaciones por satélite, transmitiendo en la misma frecuencia y polarización que la portadora de la estación terrena víctima.

Esta interferencia está limitada por la separación angular de los dos satélites respecto a la posición de la estación terrena víctima.

5.1.2 Técnicas de medición

5.1.2.1 Consideraciones generales

Los principales factores que obligan a elegir técnicas distintas para la comprobación técnica, observación y medición de emisiones de estaciones espaciales en comparación con las emisiones procedentes de estaciones fijas o móviles, instaladas en la Tierra o cerca de ella son los siguientes:

– la diferencia entre la frecuencia recibida y la frecuencia emitida, y el carácter variable de la frecuencia recibida, como consecuencia del efecto Doppler, en particular para los satélites en órbita no OSG;

– el hecho de que, debido a la distancia y a la generalmente escasa potencia de emisión, la densidad de flujo de potencia en el punto terrestre de recepción sea débil;

– el tiempo relativamente breve durante el cual se pueden recibir, en una estación de comprobación fija, las señales de un satélite que gravite en una órbita cercana a la Tierra;

– la necesidad de variar continuamente la orientación de las antenas muy directivas de las estaciones terrenas, para recibir las emisiones procedentes de estaciones espaciales que no graviten en la órbita OSG.

5.1.2.2 Mediciones de frecuencia

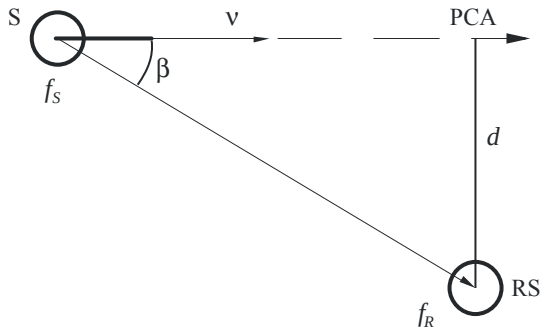
En el caso de las estaciones espaciales OSG, se pueden aplicar los mismos métodos de medición de frecuencia utilizados para las estaciones terrenales. Esos métodos se examinan detalladamente en § 4.2

5.1.2.2.1 Efecto Doppler

Cuando una estación espacial transmisora se mueve a cierta velocidad con relación a una estación de comprobación técnica, el efecto Doppler hace que exista entre las señales emitidas y las señales recibidas una diferencia de frecuencia proporcional a la velocidad relativa. A partir de la Fig. 5.1-1 se obtienen las ecuaciones (5.1-1) y (5.1-2).

FIGURA 5.1-1

Relaciones fundamentales del efecto de desplazamiento Doppler



Spectrum-5.1-01

$$f_R = \frac{cf_S}{c - (v\cos\beta)} \tag{5.1-1}$$

$$\left(\frac{df_R}{dt}\right)_{max} = \frac{f_S}{c} \cdot \frac{v^2}{d} \tag{5.1-2}$$

donde:

S: satélite
RS: estación receptora
PCA: posición de máxima aproximación
f_S: frecuencia de transmisión
f_R: frecuencia de recepción
v: velocidad del satélite
d: distancia mínima en el momento del paso
c: velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas
β: ángulo entre la dirección de vuelo y la línea de visibilidad con la estación receptora.

Estas ecuaciones permiten sacar las siguientes conclusiones:

– la frecuencia recibida es superior a la frecuencia de la fuente cuando el satélite se acerca a la estación de comprobación técnica;

– una medición proporciona la frecuencia de la fuente de satélite correcta únicamente en el "momento de máxima aproximación" (*Time of Closest Approach* - TCA), que coincide con la "posición de máxima aproximación" (*Position of Closest Approach* - PCA);

– durante el TCA se ha de observar la "velocidad máxima de cambio de frecuencia" (*Maximum Rate of Change of Frequency* - MRCF), que proporciona la pendiente de la tangente de inflexión $(df_R/dt)_{máx}$;

– la frecuencia recibida es inferior a la frecuencia de la fuente cuando el satélite retrocede con respecto a la estación de comprobación;

– el efecto Doppler es proporcional a la frecuencia de la fuente del satélite y a la velocidad relativa entre la fuente y la estación de comprobación técnica.

5.1.2.2.2 Método de medición

La precisión que se puede alcanzar en la determinación de la frecuencia emitida desde un satélite depende del tipo de órbita del satélite, el trayecto de propagación, el equipo de medida y el método de evaluación. La medición de la frecuencia de un satélite en órbita no OSG es un procedimiento indirecto, que exige como primer paso el registro del efecto Doppler, y luego la evaluación de la curva Doppler.

Para lograr una precisión de medición adecuada, conviene utilizar preferentemente métodos automáticos. Para mayores detalles sobre una posible solución técnica, véase § 5.1.6.1.

5.1.2.2.3 Procedimiento de cálculo de la frecuencia y precisión de la medición

Para determinar la frecuencia del satélite, el TCA y la MRCF, se pueden utilizar métodos gráficos sencillos (Fig. 5.1-2). La precisión que se puede lograr en la medición de la frecuencia es $\pm 1 \times 10^{-7}$Hz.

Un método modificado permite obtener mayor precisión. Mediante una simple diferenciación de la curva de frecuencia Doppler con respecto al tiempo, se obtiene una parábola cuyo vértice indica el momento de máxima aproximación (TCA), y también la frecuencia de la fuente emisora del satélite.

Para trazar la parábola, basta con utilizar cada uno de los valores medidos dentro del margen de ±30 s del TCA. Los intervalos entre los valores medidos deben elegirse de modo que la forma de la curva está claramente definida, pudiendo ser, por ejemplo, de 5 s como mínimo.

Con este método y otros métodos de evaluación gráfica se puede lograr una precisión de $\pm 5 \times 10^{-9}$ Hz si se utiliza un oscilador de referencia de tipo de cesio, o mejor.

En la Fig. 5.1-3 se muestran los resultados de la determinación de la frecuencia realizada conforme a este método.

En lugar de aplicar métodos de evaluación gráfica que consumen mucho tiempo, sería mejor recurrir a una solución informática capaz de procesar directamente los resultados de la medición de una sola frecuencia en el contador de frecuencia.

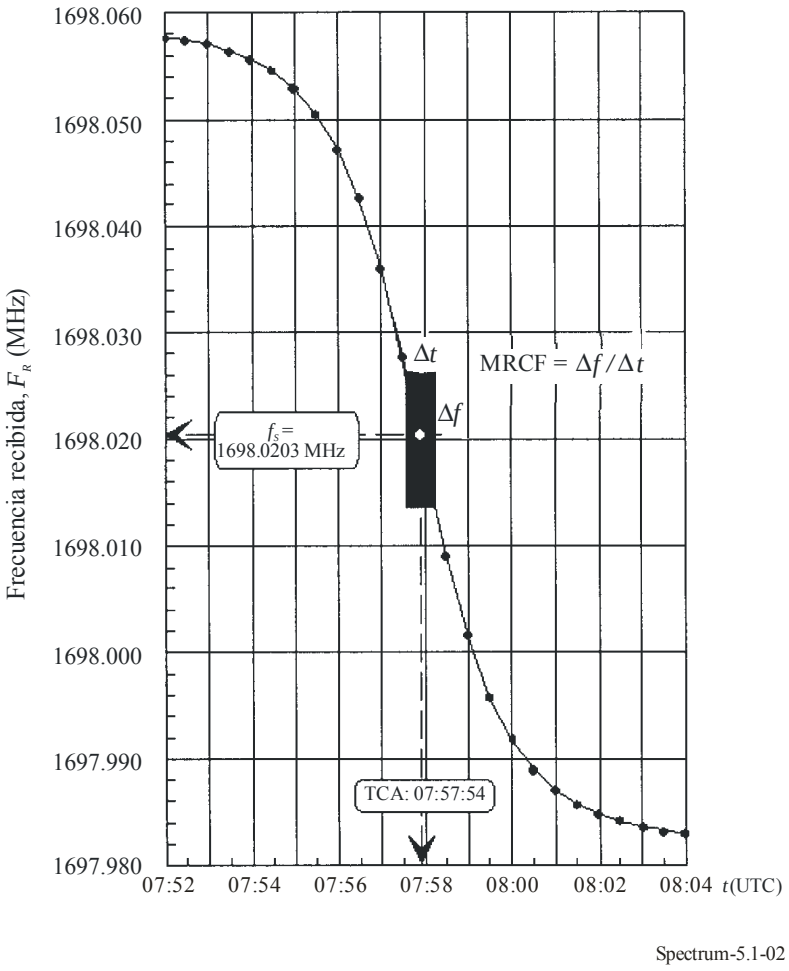
Es evidente que sólo se puede realizar mediciones de frecuencia fiables si el espectro contiene un componente de frecuencia característica con la cual se puede sincronizar el receptor. Por supuesto que esto también se aplica a la medición de las frecuencias de las estaciones terrenales

5.1.2.3 Mediciones de la anchura de banda

En principio, para las mediciones de la anchura de banda de las emisiones de satélites OSG se pueden aplicar los mismos métodos que para la medición de las emisiones terrenales. La sección 4.5 contiene una descripción de estos métodos.

FIGURA 5.1-2

Cálculo de la frecuencia del satélite a partir de la curva Doppler



En los casos en que la estación espacial se mueve a cierta velocidad con respecto a la estación de comprobación técnica, la anchura de banda aparente de una emisión, medida en la estación de comprobación, técnica varía a causa del efecto Doppler de igual modo que el descrito para la frecuencia portadora.

Hay que tener en cuenta los dos factores siguientes:

– el espectro de frecuencia completo se desplaza durante el tiempo necesario para la medición de la anchura de banda;

– el desplazamiento de frecuencia es ligeramente superior para los componentes de la señal cercanos al borde superior del espectro de la emisión que para los componentes próximos al borde inferior. Esta diferencia podría representar centenas de hertzios para anchuras de banda amplias. El efecto hace que varíe ligeramente la anchura de banda aparente observada desde la estación de comprobación técnica.

El desplazamiento de frecuencia debido al efecto Doppler puede compensarse mediante el control automático de frecuencia en el receptor de control. En este caso, pueden utilizarse sin grandes modificaciones los métodos de medida normalmente empleados en las estaciones terrenales de comprobación técnica para determinar la anchura de banda.

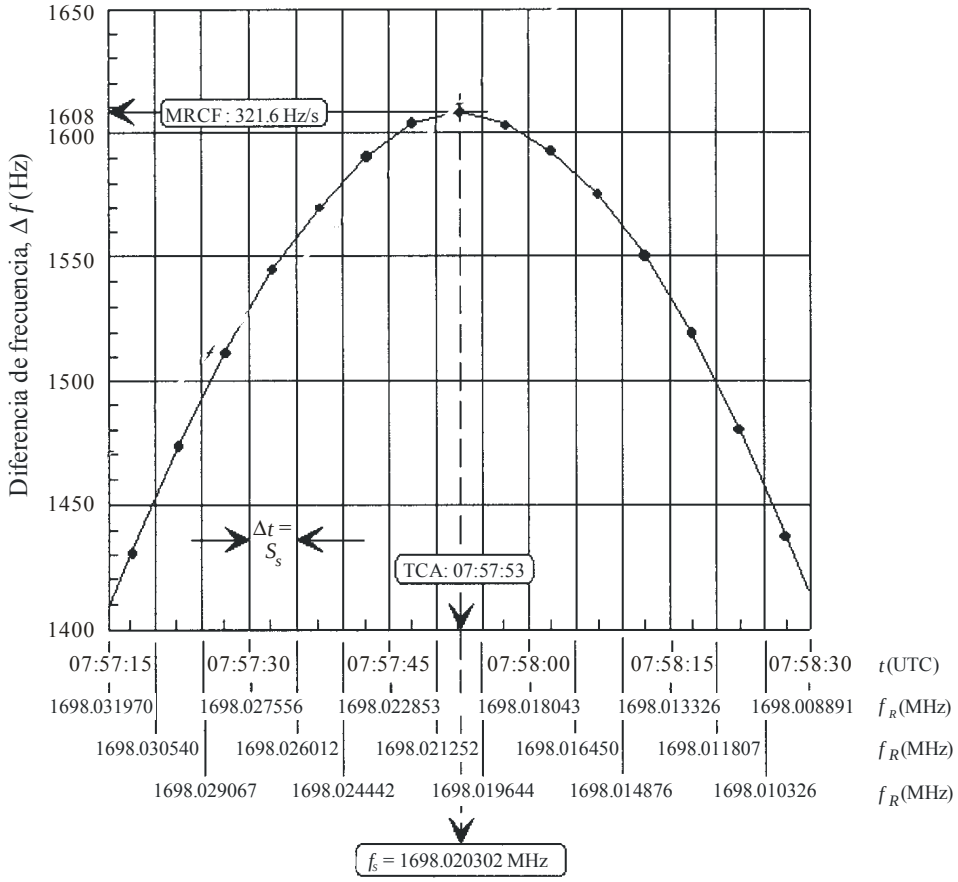
Si la señal recibida es muy débil, es posible asegurar la corrección automática de la frecuencia del oscilador del receptor utilizando como señal de referencia de la emisión una frecuencia portadora o señal piloto emitida desde la estación espacial, que se filtra con un filtro de banda sumamente estrecha.

Si la estación de comprobación técnica para servicios espaciales no dispone de receptores adecuados con control automático de frecuencia, habrá que tener en cuenta el desplazamiento de frecuencia de la estación espacial durante la medición, en caso necesario, efectuando una medición de frecuencia Doppler al mismo tiempo que se determina la anchura de banda.

También puede ser necesario registrar simultáneamente la densidad de flujo de potencia, con el fin de poder suprimir la influencia en el cálculo de las variaciones de la densidad de flujo de potencia que se produzcan durante el análisis del espectro.

FIGURA 5.1-3

Cálculo de la frecuencia del satélite por diferenciación de la curva Doppler



Spectrum-5.1-03

5.1.2.4 Mediciones de la densidad de flujo de potencia

5.1.2.4.1 Mediciones en una anchura de banda de referencia

La coordinación y el funcionamiento exitoso de las estaciones espaciales exigen que no se superen en la superficie de la Tierra determinados valores máximos de la densidad de flujo de potencia (*d.f.p.*) producida por emisiones de una estación espacial, incluidas las emisiones de un satélite reflector.

Dichos valores para las diversas bandas de frecuencias, servicios espaciales, ángulos de llegada y condiciones de compartición están consignados en el Artículo 21**,** Sección V, del RR y deben estar disponibles en la instalación de comprobación técnica de servicios espaciales.

La *d.f.p.* en dB (W/m^2) está relacionada con una anchura de banda particular, en general 4 kHz, 1 MHz ó 1,5 MHz, dependiendo de la frecuencia de la emisión fundamental.

La indicación de la anchura de banda de referencia (RBW) es esencial, porque normalmente la potencia radiada no está concentrada en una sola frecuencia sino distribuida dentro de una banda de frecuencias.

5.1.2.4.2 Medición de la densidad de flujo de potencia total

En este caso, la densidad de flujo de potencia se determina totalmente sobre la base de la anchura de banda ocupada por una emisión.

Por lo tanto, hay que seleccionar en consecuencia la anchura de banda del filtro de medición. Estas mediciones son importantes si se quiere calcular, por ejemplo, la *p.i.r.e.* de una estación espacial.

En el caso de las bandas de frecuencias inferiores a 13 GHz, y siempre que prevalezcan condiciones de cielo despejado, para los cálculos se puede considerar una pérdida atmosférica total de 0,1 - 0,2 dB.

5.1.2.4.3 Procedimiento de medición

Cuando se tiene que medir la densidad de flujo de potencia en la anchura de banda de referencia o la densidad de flujo de potencia total, es preferible determinar la *d.f.p.* mediante la medición directa de la potencia, especialmente en frecuencias superiores a 1 GHz.

Con este método puede determinarse la densidad de flujo de potencia conforme a las ecuaciones (5.1-3a) y (5.1-3b).

$$dfp_{\mathrm{RBW}} = P_{\mathrm{SYS}} - 30 - A\mathrm{e} - K_{\mathrm{BW}} + K_{\mathrm{POL}} \qquad (5.1\text{-}3a)$$

$$dfp_{\mathrm{TOT}} = P_{\mathrm{SYS}} - 30 - A\mathrm{e} + K_{\mathrm{POL}} \qquad (5.1\text{-}3b)$$

donde:

dfp_{RBW}: densidad de flujo de potencia en la anchura de banda de referencia (RBW) (dB(W/m^2))

dfp_{TOT}: densidad de flujo de potencia en la anchura de banda ocupada por la emisión (dB(W/m^2))

P_{SYS}: potencia de entrada del sistema (dBm)

30: factor de conversión de dBm en dBW

A_e: superficie equivalente de la antena (véase la Nota 2) (dBm^2)

K_{BW}: factor de corrección para la anchura de banda de medición (véase la Nota 3) (dB)

K_{POL}: factor de corrección para la polarización (véase la Nota 4) (dB).

La *d.f.p.* obtenida de las ecuaciones (5.1-a3) y (5.1-3b) puede utilizarse la para calcular la *p.i.r.e.* de la estación espacial utilizando la ecuación (5.1-4). Para el cálculo es necesario conocer la distancia oblicua al objeto en el momento de la medición.

$$\text{p.i.r.e.} = \text{d.f.p.} + 10\log(4\pi d^2) + L_{ATM} \qquad (5.1\text{-}4)$$

donde:

p.i.r.e.: potencia isótropa radiada equivalente de la estación espacial (dBW)

d.f.p: densidad de flujo de potencia medida (dB(W/m^2))

d: distancia entre la estación espacial y la estación de recepción (m)

L_{ATM}: pérdida atmosférica relativa al espacio libre (dB).

NOTA 1 – La potencia de entrada se mide con un medidor de potencia térmico, normalmente conectado a la salida de frecuencia intermedia del receptor y precedido de un filtro paso banda de anchura de banda efectiva conocida (medición del valor cuadrático medio). Luego se sustituye la señal de entrada por la señal de un generador calibrado. Antes de la salida de frecuencia intermedia se debe instalar un sistema de compensación de una posible desviación Doppler de la señal de entrada del satélite.

NOTA 2 – La superficie equivalente de la antena (A_e) se puede calcular a partir de la abertura de la antena o de la ganancia de la antena utilizando la ecuación (5.1-5):

$$A_e = 10 \log (A\eta) = 10 \log\left(\frac{\lambda^2}{4\pi}\right) + \ Gi \qquad (5.1\text{-}5)$$

donde:

A_e: superficie equivalente de la antena (dBm^2)

A: abertura de la antena (m^2)

η: eficacia expresada como un número decimal

λ: longitud de onda (m)

G_i: ganancia de la antena isótropa (dBi).

NOTA 3 – La anchura de banda utilizada para la medición puede ser mayor que la anchura de banda de referencia, siempre que la potencia esté uniformemente distribuida por la anchura de banda de medición; ello puede comprobarse mediante análisis del espectro. La anchura de banda de medición es la anchura de banda efectiva del filtro, que no coincide forzosamente con su anchura de banda a 3 dB o 6 dB. El factor de corrección se calcula mediante la ecuación (5.1-6):

$$K_{BW} = 10 \log\left(\frac{B_M}{RBW}\right) \qquad (5.1\text{-}6)$$

donde:

K_{BW}: factor de corrección de la anchura de banda (dB)

B_M: anchura de banda de medición

RBW: anchura de banda de referencia en las mismas unidades que B_M.

NOTA 4 – En caso de polarización adaptada entre la antena receptora y la señal recibida, el factor de corrección de polarización K_{POL} = 0 dB. Si una emisión polarizada circularmente se recibe con polarización lineal, o viceversa, el factor de corrección K_{POL} = 3 dB.

Como la *d.f.p.* varía no solamente en función de la frecuencia sino también del tiempo, hay que determinar su valor máximo. Ello se puede hacer registrando la señal de salida del medidor de potencia durante cierto periodo de tiempo en la frecuencia de interés. La constante de tiempo del sensor de potencia determina la tasa de variación de potencia que se puede detectar. En este Manual se incluye información adicional sobre el cálculo de la p.i.r.e.

5.1.2.4.4 Incertidumbre de la medición

El grado de incertidumbre de las mediciones de la *dfp* está influido básicamente por tres factores:

– la incertidumbre de la ganancia de la antena receptora;

– la incertidumbre de la señal de referencia (generador de referencia de potencia) para calibración de la medición del receptor/analizador de espectro; y

– la precisión del apuntamiento / seguimiento de la antena receptora;

Puesto que la incertidumbre de la fuente de referencia se puede controlar y minimizar en gran medida, el problema real estriba en la calibración exacta de la ganancia de la antena de recepción. Las grandes antenas de reflector parabólico sólo se pueden calibrar tras el montaje en el lugar de la instalación. Por lo tanto, para calcular satisfactoriamente la ganancia de la antena se debe tener en cuenta las condiciones específicas en el emplazamiento de instalación. [Newell *et al.*, 1986] [Newell *et al.*, 1973]; [Satoh y Ogawa, 1982].

La incertidumbre de la medición ampliada (factor de cobertura 2) no debe ser superior a 2 dB. Hay que procurar reducir la incertidumbre de la medición en todas las bandas de frecuencias.

5.1.2.5 Mediciones de la polarización

El conocimiento de la polarización de la señal de satélite es esencial porque su determinación puede facilitar la identificación de emisiones desconocidas. Por consiguiente, es necesario disponer de un sistema de antena que sea capaz de hacer una distinción entre los diferentes tipos de polarización.

En la realización técnica de mediciones de la polarización debe tenerse en cuenta la aplicación generalizada de la técnica de polarización doble en las bandas de frecuencias por encima de 1 GHz utilizadas por el servicio fijo por satélite y el servicio de radiodifusión por satélite.

A fin de lograr condiciones de recepción y medición óptimas para la señal de satélite en lo referente a:

– la máxima relación portadora/ruido (C/N); y

– la máxima relación portadora/interferencia (C/I), mediante una discriminación de polarización suficiente entre las señales de polarización ortogonal;

Debe ser posible hacer coincidir la polarización del sistema de antena receptora de la estación de comprobación técnica con la de la señal entrante. En el caso de doble polarización lineal, el plano de polarización debe tener plena capacidad de orientación. Se ha de proporcionar una discriminación de polarización de 20 dB como mínimo.

5.1.2.6 Determinación de posiciones orbitales y elementos orbitales

La determinación de posiciones orbitales incumbe a los satélites OSG, y la determinación de elementos orbitales incumbe a los satélites no OSG.

5.1.2.6.1 Satélites OSG

Un satélite OSG está sujeto a perturbaciones que tienden a cambiar su posición en la órbita. Estas perturbaciones inducen una rotación espuria del plano orbital y errores del semieje mayor y la excentricidad. El resultado es que, visto desde la Tierra, el satélite muestra un movimiento de oscilación con un periodo de 24 horas. Este movimiento (denominado "figura en ocho") tiene una componente Norte – Sur y una componente coplanar.

Las estaciones espaciales instaladas a bordo de satélites OSG que utilizan frecuencias atribuidas a los servicios fijo por satélite o de radiodifusión por satélite deben mantenerse en posición, a menos de ±0,1° de longitud con relación a su posición nominal (véase la Sección III del Artículo 22 del RR), salvo en el caso de estaciones experimentales instaladas a bordo de satélites OSG, que deberán mantenerse en posición a menos ±0,5° de longitud, y de las estaciones del servicio de radiodifusión por satélite que operan en la banda 11,7-12,75 GHz, que deberán mantenerse en posición dentro de los límites especificados en el Apéndice **30** del RR. Las estaciones espaciales no están obligadas a cumplir con estos límites mientras que la red de satélite no cause interferencia inaceptable a ninguna otra red de satélite cuya estación espacial cumpla con estos límites. Por consiguiente, en el caso de los servicios espaciales, la determinación de la posición de los satélites OSG es tarea que incumbe también a las estaciones de comprobación técnica. En general, la posición orbital se calcula a partir de mediciones angulares en el plano acimutal y el plano de elevación de la antena receptora. El § 5.1.7.4 contiene un ejemplo de este tipo de medición.

5.1.2.6.2 Satélites no OSG

El cálculo de los elementos orbitales de un satélite no OSG (datos de las efemérides) a partir de mediciones con suficiente precisión es un requisito básico para:

– la identificación de una estación espacial desconocida (véase el § 5.1.5);

– la investigación de posibles momentos de recepción; y

– la determinación previa del acimut y la elevación en función del tiempo, por ejemplo para la orientación de una antena controlada por computador, en los casos en los cuales no se han publicado datos oficiales.

Una estación de comprobación técnica para los servicios espaciales que efectúe mediciones en modo pasivo puede proporcionar los siguientes datos de medición situados en el tiempo:

– acimut;

– elevación; y

– desplazamiento Doppler.

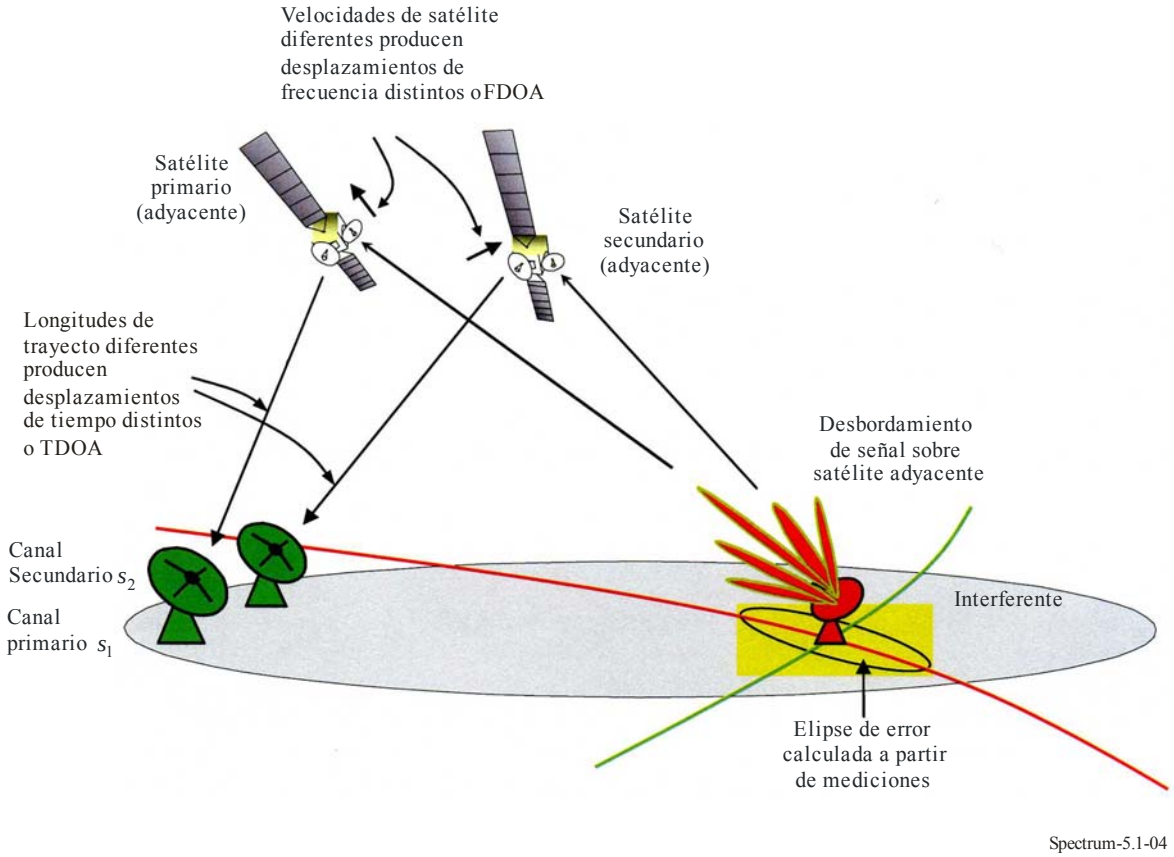
Puesto que la determinación de la órbita exige disponer de al menos seis elementos orbitales (por ejemplo, los elementos orbitales de Kepler), es necesario efectuar múltiples mediciones de las cantidades antes mencionadas. Típicamente, la determinación de la órbita es el resultado de un procedimiento estadístico en el que un mayor volumen de datos de entrada permite una precisión mejorada de los elementos orbitales. Cuando se supervisan frecuencias superiores, es decir por encima de 1 GHz, es preferible utilizar métodos basados en la evaluación de las mediciones angulares en los planos de acimut y de elevación, puesto que en estas frecuencias la abertura del haz de la antena receptora es menor.

5.1.2.7 Localización geográfica de transmisores situados en la Tierra mediante mediciones de la diferencia de tiempo y la diferencia de frecuencia desde dos satélites OSG

Las fuentes interferentes situadas en la Tierra pueden afectar a la señal del enlace ascendente recibida en el satélite. El receptor de la señal deseada percibe la interferencia como una interferencia del enlace descendente. La localización geográfica de los transmisores radioeléctricos que afectan a los satélites de comunicaciones en la órbita OSG es una tarea compleja que normalmente se realiza mediante técnicas de análisis de las mediciones de la diferencia de tiempos de llegada (TDOA, *Time Difference Of Arrival*) y de la diferencia de frecuencia de llegada (FDOA, *Frequency Difference Of Arrival*). Ambas medidas requieren que las transmisiones sean supervisadas por un segundo satélite OSG que esté en la cobertura de haz del transmisor. El satélite OSG afectado por la señal indeseada se denomina “satélite primario” y el segundo satélite “satélite adyacente”. Una medición TDOA permite obtener la diferencia de tiempo con que la misma señal llega a un receptor basado en tierra a través del satélite primario y a otro receptor también basado en tierra a través del satélite adyacente. Una medición FDOA permite obtener la diferencia en frecuencia medida entre las señales recibidas en los dos receptores. Normalmente, ambos receptores están coubicados en el mismo emplazamiento, pero ello no es un requisito (véase la Fig. 5-1.4). En el “modo distribuido”, los dos receptores están separados, pero deben estar en la cobertura del haz del trayecto descendente de cada uno de los satélites. El modo distribuido debe utilizarse cuando las huellas de los enlaces descendentes no intersectan; de hecho, dichos enlaces descendentes pueden recibirse en continentes distintos. Cuando se utiliza el modo distribuido, las mediciones de las señales en bruto deben transferirse a una ubicación común para el posterior procesamiento de localización geográfica.

FIGURA 5.1-4

Localización geográfica de transmisores en la Tierra utilizando TDOA y FDOA desde dos satélites SGO



El tiempo de recepción de la señal varía debido a que la señal transmitida recorre distancias diferentes desde el transmisor, es repetida en dos satélites diferentes y, finalmente, llega al receptor. La frecuencia recibida es diferente porque el movimiento relativo entre cada satélite causa desplazamientos de frecuencia Doppler diferentes en las transmisiones. Aunque a menudo se dice sin excesivo rigor que los satélites OSG permanecen fijos en un punto específico sobre el Ecuador de la Tierra, de hecho se mueven alrededor de su posición nominal dentro de ciertos límites. Este movimiento induce un desplazamiento Doppler medible en la mayoría de los sistemas de satélites. Las frecuencias recibidas difieren también como consecuencia de la deriva de los osciladores que fijan las frecuencias de transmisión del enlace descendente de cada satélite.

Las mediciones de TDOA o de FDOA junto con la configuración de la estación terrena y del satélite describen sendas superficies en las que puede encontrarse el transmisor desconocido. La superficie de la Tierra (donde se encuentran casi todos los transmisores de interés) es una tercera superficie donde debe encontrarse la ubicación desconocida. La intersección de estas tres superficies ofrece una estimación de la señal desconocida a partir de una sola pareja de mediciones de TDOA y FDOA. Puesto que las mediciones o los errores de modelado pueden generar errores en la localización geográfica, las mediciones adicionales de TDOA y FDOA combinadas estadísticamente sirven para reducir dichos errores.

5.1.2.7.1 Medición de las diferencias de tiempo y de frecuencia

Las dos series temporales de la señal transmitida desde cada uno de los dos satélites OSG se registran y se analizan para obtener las diferencias de tiempo y de frecuencia entre ellas (es decir, TDOA y FDOA). Para ello se calcula la función de ambigüedad cruzada (CAF, *Cross Ambiguity Function*) o mapa de correlación en dos dimensiones. El valor de la CAF para una diferencia de tiempo y frecuencia es la correlación cruzada de las dos señales registradas. En el caso especial de emisiones de onda continua (CW), no pueden generarse mediciones de TDOA dado que las dos señales están correladas para todas las diferencias de tiempo.

La CAF se puede visualizar en tres dimensiones, donde el valor del CAF es función de TDOA y de FDOA. En el caso de una única señal interferente en la gama de frecuencias seleccionadas, el valor máximo del CAF en relación con los valores de TDOA y FDOA selecciona dichos desplazamientos en el algoritmo de localización geográfica para calcular la ubicación de un transmisor. En el caso de emisión CW, ello da lugar a una cresta de valores máximos y constantes de FDOA. De forma alternativa, varios transmisores de banda ancha desde diferentes ubicaciones producirán múltiples crestas de CAF. En [Stein, 1981] se puede encontrar una descripción detallada de algoritmos utilizados para calcular y analizar la CAF.

5.1.2.7.2 Algoritmo de localización geográfica

El algoritmo de localización geográfica a menudo utiliza las mediciones de TDOA y/o FDOA con un procedimiento iterativo de mínimos cuadrados para estimar la ubicación donde se origina la señal transmitida. En su forma más simple, se combina una suposición inicial de la ubicación del transmisor y las órbitas de los dos satélites con las leyes físicas de movimiento de los satélites para generar mediciones predictivas de TDOA y FDOA. La diferencia entre los valores de las mediciones de TDOA y FDOA reales y predichas (los residuos) se utilizan como factores de corrección de la posición del transmisor. Esta ubicación corregida del transmisor se utiliza para generar un segundo conjunto de mediciones predictivas de TDOA y FDOA, que implican sucesivas correcciones de la posición del transmisor. Es necesario utilizar una solución iterativa porque el problema es inherentemente no lineal.

Las iteraciones continúan hasta que los ajustes de la posición del transmisor son suficientemente pequeños, y en ese momento se considera que la solución de la localización geográfica ha convergido.

Puesto que las mediciones realizadas de TDOA y FDOA a lo largo del tiempo están ligadas a la ubicación del transmisor a través de las leyes físicas modeladas, las soluciones de localización geográfica también están disponibles para otras combinaciones de tipos de mediciones. Por ejemplo, es posible obtener la localización geográfica de transmisores de CW a partir de una serie de mediciones de FDOA, con una precisión menor que la que se conseguiría con las correspondientes mediciones de TDOA de una señal de banda ancha. Alternativamente, la utilización de un tercer satélite para generar un segundo conjunto de mediciones de TDOA y/o FDOA puede proporcionar soluciones mejoradas, a costa, sin embargo, de utilizar más recursos en términos de antenas receptoras. Utilizando un tercer satélite son posibles soluciones basadas exclusivamente en TDOA, sin embargo, las superficies de TDOA constante obtenidas de dos parejas de satélites son casi paralelas, haciendo que su utilización práctica sea en realidad más dependiente de la precisión de las mediciones de TDOA o de disponer de más tiempo para la recopilación de mediciones.

En la práctica, la precisión de las efemérides de cada uno de los dos satélites limita la precisión de la solución de localización geográfica. La localización geográfica puede mejorarse mediante mediciones de TDOA y FDOA de señales transmisoras diferentes, denominadas a veces localizadores de referencia, originadas en ubicaciones conocidas y que pasan a través de la misma pareja de satélites que las señales de interés. Estos localizadores de referencia pueden utilizarse para refinar las efemérides de uno o ambos satélites, lo que su vez, mejora la precisión de la estimación de ubicación de la señal transmisora de interés.

5.1.2.7.3 Análisis de incertidumbre

El objetivo de un análisis de incertidumbre de un problema de localización geográfica es proporcionar una valoración realista de la precisión de una solución de localización geográfica.

Realizar un análisis de incertidumbre preciso puede resultar complejo y difícil. La precisión de las mediciones individuales de TDOA y FDOA es proporcional a la raíz cuadrada de la S/N obtenida en la solución basada en correlación. La precisión de las mediciones de TDOA y FDOA es también proporcional a la anchura de banda de la señal y al tiempo de medición respectivamente. La solución de localización geográfica de mínimos cuadrados ofrece una estimación formal del error e intervalos de confianza de la ubicación del transmisor basadas en las incertidumbres asignadas a las mediciones de TDOA y FDOA. La fiabilidad de estas incertidumbres de TDOA y FDOA puede contratarse estadísticamente con los correspondientes residuos de mediciones. Alternativamente, si hay disponibles un número suficiente de mediciones de TDOA y FDOA, las incertidumbres de las mediciones de TDOA y FDOA pueden estimarse mediante el mismo procedimiento de soluciones. En [Bardelli et al., 1995] se incluye un ejemplo de análisis de error.

Es necesario hacer dos advertencias. Primero, que las incertidumbres de las mediciones de TDOA y FDOA pueden ser suficientemente grandes como para invalidar el supuesto de que la solución es lineal en el ámbito de validez del parámetro analizado.

Ello significa que los errores formales generados por el algoritmo de localización geográfica basados en un análisis estadístico lineal son menos precisos. En dichos casos pueden utilizarse técnicas de Monte Carlo para generar mejores estimaciones de incertidumbre.

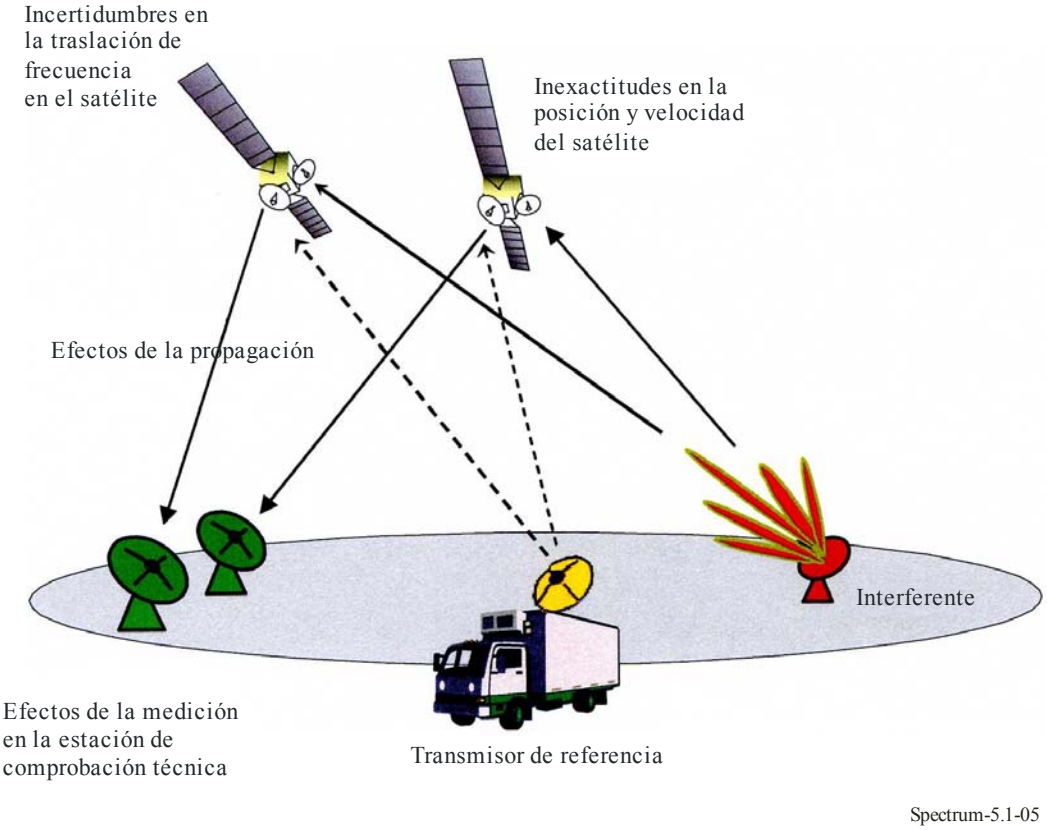
En segundo lugar, las incertidumbres formales tienen en cuenta el error aleatorio y sólo parcialmente errores sistemáticos. Los errores sistemáticos pueden surgir, por ejemplo, por un modelado incompleto de las físicas de las mediciones de TDOA y FDOA o en el modelo de fuerzas empleado para calcular la efemérides del satélite.

El impacto de los errores sistemáticos puede estimarse mediante una simulación completa de la técnica de localización geográfica y de todas sus fuentes de errores sistemáticos.

Existen varias potenciales inexactitudes que producen errores de localización. El error puede reducirse sustancialmente utilizando transmisores cuyas coordenadas geográficas sean conocidas con exactitud (véase la Fig. 5.1-5).

FIGURA 5.1-5

Localización geográfica de transmisores en la Tierra utilizando TDOA y FDOA desde dos satélites SGO y un transmisor de referencia



Las estaciones de referencia desplegadas sobre una zona muy extensa pueden eliminar errores debidos a inexactitudes de la efemérides, mientras que la utilización de estaciones de referencia situadas en la proximidad de la fuente interferente puede minimizar el error de localización (véanse § 5.1.5.4.5 y § 5.1.5.4.6).

5.1.2.8 Localización geográfica de transmisores situados en la Tierra utilizando un solo satélite OSG y el desplazamiento Doppler inverso

La ubicación de un transmisor (o una fuente de interferencia) en la superficie de la Tierra puede determinarse en ciertas condiciones utilizando las señales transmitidas a través de un único satélite de comunicaciones en la OSG. El pequeño desplazamiento Doppler de la frecuencia portadora de la señal, que es inducido por el deslizamiento del satélite con respecto a la Tierra durante el recorrido de una órbita puede aprovecharse para calcular la ubicación del transmisor respecto al punto (dentro de decenas de Km.) en que se pueden desplegar unidades móviles para determinar con precisión la ubicación del transmisor o de la interferencia. La técnica utiliza mediciones de la frecuencia portadora de transmisiones cortas e infrecuentes distribuidas a lo largo de varias horas. Se aplican técnicas de elevada resolución y el procesamiento de la señal para calcular el pequeño desplazamiento Doppler de las señales transmitidas con el grado necesario de exactitud. Las predicciones de la posición y la velocidad de un satélite se pueden refinar utilizando un transmisor de referencia [Koets, Bentley, 1999].

Cuando la inclinación y la excentricidad de una órbita OSG son distintas de cero se induce algún movimiento del satélite con respecto a la superficie de la Tierra. Este movimiento produce un desplazamiento Doppler pequeño, que puede utilizarse para calcular la ubicación del transmisor. La técnica hace también uso de observaciones cortas e infrecuentes de transmisiones a lo largo de un periodo de varias horas. A fin de utilizar este método, las frecuencias portadoras de las transmisiones deberán medirse con una precisión muy elevada. Se aplica a continuación una técnica de estimación iterativa no lineal. En el punto 5.1.2.8.3 y en la Fig. 5.1-6 se analizan los valores de excursión de un satélite OSG.

Por todos estos motivos, la implementación de un método de localización geográfica mediante un satélite es muy difícil. Además, implica la asunción de algunos supuestos relativos al propio transmisor que generalmente no se cumplen, tales como:

– que el transmisor dispone de un oscilador sumamente estable durante un largo periodo de tiempo;

– que el transmisor realiza sus transmisiones durante un largo periodo de tiempo.

5.1.2.8.1 Algoritmo de localización geográfica

El algoritmo de localización geográfica utiliza una expresión matemática (f_R) para predecir la frecuencia portadora de una señal que es retransmitida por un satélite OSG. La expresión incorpora la posición y velocidad conocidas del satélite y la ubicación del receptor, además de la ubicación desconocida del transmisor buscado. Deben tenerse en cuenta los efectos del desplazamiento Doppler del enlace ascendente, la traslación de frecuencia dentro del transpondedor del satélite y el desplazamiento Doppler del enlace descendente.

Todas las magnitudes vectoriales se expresan en el sistema tridimensional de coordenadas cartesianas con origen en el centro de la Tierra

$$f_R = \left[f_T \cdot \left(1 + \frac{\vec{v}_S \cdot (\vec{r} - \vec{r}_S)}{c \cdot \|\vec{r} - \vec{r}_S\|} \right) + \Delta_f \right] \cdot \left(1 + \frac{v_D}{c} \right) \tag{5.1-7}$$

donde:

f_R : frecuencia portadora de la señal recibida

f_T: frecuencia portadora de la señal transmitida

v_S: vector velocidad del satélite en el momento de la observación

r_S: vector posición del satélite en el momento de la observación

r: vector posición del transmisor

Δ_f: traslación de frecuencia en el transpondedor del satélite

v_D: valor escalar de la velocidad de variación de la distancia (velocidad radial) entre el satélite y el receptor

c: velocidad de propagación de la señal.

La expresión (5.1-7) es una función de parámetros conocidos y desconocidos. Los parámetros conocidos son la posición y velocidad del satélite, la traslación de frecuencia y la velocidad de variación de la distancia (velocidad radial) entre el satélite y el receptor. La posición y velocidad del satélite y la velocidad de variación de la distancia dependen del tiempo. El conjunto de parámetros desconocidos está formado por la ubicación y la frecuencia portadora del transmisor. Las mediciones de la frecuencia portadora real de la señal en el receptor se realizan en varios momentos de observación. El algoritmo de localización geográfica estima un conjunto de parámetros desconocidos de modo que la suma de errores cuadráticos entre la frecuencia portadora medida y la frecuencia portadora prevista de la expresión sea mínima.

El algoritmo de localización geográfica utiliza una versión linealizada de la expresión de la frecuencia recibida, que es una ampliación de la ecuación (5.1-7) formada por series de Taylor multidimensionales de primer orden. Se puede formar un conjunto de ecuaciones lineales utilizando esta expresión y reunirlo como la ecuación matriz

$$E = A\Delta \tag{5.1-8}$$

en la cual E es el vector columna de mediciones de la frecuencia portadora de la señal recibida en cada momento de observación, $A = [A_f A_x A_y A_Z]$, donde cada vector A_i es la derivada de la expresión con respecto al parámetro i calculada en cada momento de observación, y Δ el vector de errores entre los valores verdaderos de los parámetros y sus estimaciones iniciales. La ecuación matriz se resuelve para el vector Δ en términos lineales de mínimos cuadrados y este vector de errores se utiliza para repetir y perfeccionar las estimaciones iniciales de los parámetros. Puesto que la ecuación lineal utilizada es solamente una aproximación al modelo, se llevan a cabo varias iteraciones del proceso, utilizando en cada etapa las estimaciones de parámetros obtenidas más recientemente. Los valores de los parámetros convergen hacia las estimaciones definitivas de frecuencia y ubicación.

5.1.2.8.2 Mediciones de frecuencia (Doppler)

Dado que un satélite OSG se mueve lentamente con respecto a un punto fijo de la Tierra, los desplazamientos Doppler observados en un enlace de comunicaciones son pequeños, del orden de decenas de Hertzios. La localización geográfica exacta depende por consiguiente de una estimación muy exacta de la frecuencia portadora (es suficiente el estándar del rubidio).

Para la estimación de la frecuencia se puede utilizar el algoritmo MUSIC (*Múltiple Signal Classification* - clasificación de la señal múltiple). La resolución del estimador de frecuencia viene únicamente limitada por la precisión de la máquina y no por la longitud del conjunto de datos. La exactitud de las estimaciones está restringida por la relación señal/ruido. El algoritmo MUSIC produce una estimación de la frecuencia mucho más precisa que los algoritmos basados en la transformada rápida de Fourier.

5.1.2.8.3 Corrección de la posición y la velocidad

La exactitud de los resultados de la localización geográfica depende del conocimiento exacto de los vectores de posición y de velocidad del satélite en cada momento de la observación. Estos vectores se calculan generalmente utilizando un modelo de propagación orbital y un conjunto de seis elementos orbitales que describen la órbita del satélite. Estos elementos se actualizan periódicamente basándose en observaciones del satélite y en los conjuntos de elementos actualizados ya disponibles. Los algoritmos de propagación orbital modelan los efectos gravitacionales de la Tierra, el sol y la luna para predecir la posición y velocidad del satélite en momentos posteriores al momento en que se calculan estos elementos. Algunas fuerzas que afectan al movimiento de un satélite no son modeladas. Por consiguiente, las estimaciones resultantes de la posición y la velocidad son menos exactas a medida que se hace más grande la diferencia de tiempo entre el momento de la predicción y el momento en que se actualizó el conjunto de elementos. También se conoce de manera imperfecta la traslación de frecuencia que realiza el transpondedor del satélite.

Es necesario refinar las predicciones de la posición y la velocidad del satélite, así como de la frecuencia de traslación, a fin de mejorar la exactitud de las estimaciones de la ubicación. Para el refinamiento de estos valores se puede utilizar un transmisor de referencia situado en una ubicación conocida y con una frecuencia portadora también conocida. Las señales del transmisor de referencia se deben repetir en el satélite durante el mismo periodo de tiempo en el cual se observan las señales de interés. La frecuencia portadora de cada una de las señales de referencia observadas en el receptor se calculan de igual modo que la señal de interés. Estas

frecuencias de referencia observadas se comparan entonces con las frecuencias de referencia previstas por la expresión con la ubicación conocida del transmisor de referencia y las estimaciones iniciales del conjunto de elementos orbitales y de la frecuencia de traslación para refinar los resultados. En la Fig. 5.1-6 se representa la mejora de las predicciones de frecuencia obtenida con los elementos orbitales refinados y la frecuencia de traslación refinada.

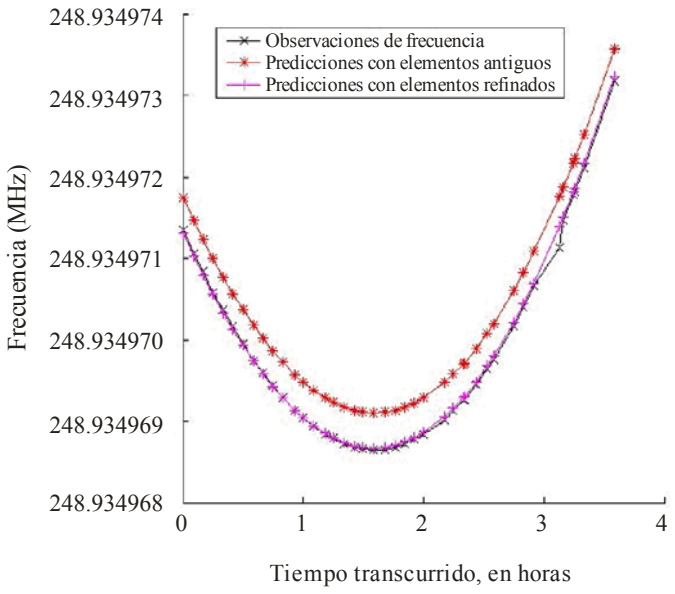
5.1.2.9 Mediciones de ocupación de frecuencia y de la ocupación de posición orbital OSG

Las actividades de planificación de nuevos sistemas de satélite deben incluir investigaciones concretas sobre la ocupación de las frecuencias del enlace descendente por otros sistemas de satélite. Esto se aplica en general, pues no siempre se puede suponer que la utilización de frecuencias ha sido objeto de coordinación o notificación. Por lo tanto, esas mediciones de la ocupación son útiles para evitar interferencias imprevistas.

Los equipos de registro automático del espectro de frecuencias radioeléctricas han resultado muy útiles para la verificación de las emisiones de satélites en órbita baja. Los resultados obtenidos utilizando antenas no direccionales o antenas de haz conformado hemisférico durante un periodo de varios días han permitido determinar la ocupación de la bandas de frecuencia por las emisiones de satélites. Además, es posible determinar aproximadamente las frecuencias de satélites, así como los momentos de recepción previstos, y calcular el periodo de revolución con un grado de precisión considerable. El punto 5.1.7.1 contiene un ejemplo de un registro del espectro de frecuencias radioeléctricas.

FIGURA 5.1-6

Predicciones mejoradas de la frecuencia mediante el refinamiento de los elementos orbitales



Por regla general, los métodos de comprobación de la ocupación de frecuencias que utilizan antenas de ganancia baja no son adecuados para bandas de frecuencia superiores a unos 3 GHz. Para señales de baja densidad de flujo de potencia, se necesitan antenas directivas con una ganancia de antena adecuada. Sin embargo, en el caso de las estaciones espaciales OSG, es posible efectuar mediciones de la ocupación para:

– determinar las posiciones ocupadas por las estaciones espaciales; y

– proporcionar datos sobre las frecuencias y el tiempo en relación con la ocupación de las bandas de frecuencia en posiciones ocupadas.

Con miras a identificar las posiciones ocupadas, se recomienda un proceso interactivo para orientar la antena directiva utilizada en la recepción a lo largo de la órbita OSG dentro de su anchura de haz a potencia mitad, durante el cual se obtienen continuamente mediciones del analizador utilizado para el procesamiento de la señal con miras a controlar el cruce de los valores umbral. Tras la exploración del segmento orbital visible para la estación de comprobación técnica, el analizador se conmuta a la siguiente subbanda de frecuencias y se repite la totalidad del proceso.

Las mediciones de la ocupación relacionadas con el tiempo y la frecuencia para una posición predeterminada permiten variaciones, que se deben coordinar con exactitud con la posición seleccionada. E1 punto 5.1.7.3 incluye un ejemplo.

5.1.2.10 Mediciones por debajo del valor mínimo de ruido de fondo

A menudo es necesario analizar señales radioeléctricas débiles o partes de señales que permanecen ocultas por debajo del ruido de fondo. Esta situación se produce sobre todo en el caso de emisiones radioeléctricas espaciales. La Recomendación UIT-R SM.1681 (Medición de emisiones de bajo nivel procedentes de estaciones espaciales en las estaciones terrenas de comprobación técnica utilizando técnicas de reducción del ruido) se desarrolló para solucionar este problema. En la Fig. 5.1-7 se muestra un diagrama de bloques típico para dichas medidas.

La medición de las emisiones de bajo nivel interiores al ruido de fondo se basa en un método de integración que resta de la señal el espectro de ruido.

Un conversor analógico / digital muestrea la señal en frecuencia intermedia (FI) y la almacena en un disco duro. Esta medida se repite típicamente para registrar 10.000 muestras. Seguidamente, la antena se apunta a una posición orbital adyacente, dejando al satélite fuera del haz de la antena, recibiendo solamente ruido en las mismas condiciones ambientales.

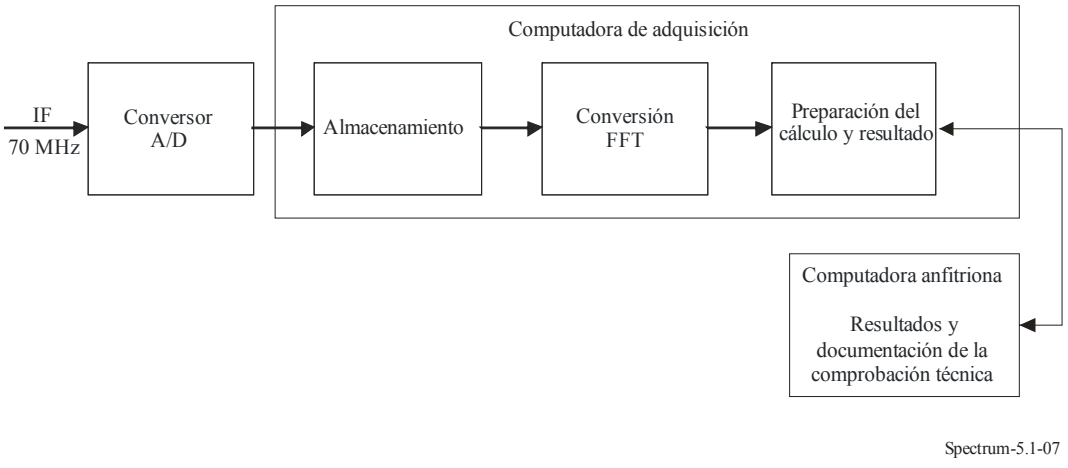
Se recogen y almacenan en el disco duro otras 10.000 muestras. Ambos conjuntos de 10.000 muestras se promedian y se restan entre sí. Ello produce típicamente una reducción de ruido de 10 a 20 dB.

Para ello es necesaria una excelente estabilidad de frecuencia en todo el trayecto de recepción.

Asimismo, cualquier desplazamiento de frecuencia por efecto Doppler del satélite debe ser eliminada o compensada.

FIGURA 5.1-7

Diagrama de bloques para la comprobación técnica de señales por debajo del ruido de fondo



5.1.3 Condiciones que han de reunir los equipos e instalaciones

La finalidad de los siguientes párrafos es poner de relieve algunas características de sistema.

El Manual de comunicaciones por satélite (servicio fijo por satélite) y otras publicaciones enumeradas en la bibliografía contienen información adicional sobre el factor de calidad, los sistemas de antena, la orientación y el seguimiento automático de la antena.

5.1.3.1 Consideraciones generales

E1 concepto técnico de una estación de comprobación de las emisiones radioeléctricas para servicios espaciales está determinado básicamente por las tareas que se han de realizar en función de las necesidades específicas de la administración.

En la fase de planificación del concepto se deben tener en cuenta los nuevos progresos realizados en el ámbito de los servicios espaciales. En el Cuadro 5.1-2 se enumeran algunos aspectos importantes.

Revisten especial importancia las precisiones de medición requeridas, por ejemplo, en las mediciones de frecuencias y de densidad de flujo de potencia y, en particular, en las mediciones angulares para determinar la posición de las estaciones espaciales OSG o los elementos orbitales de los satélites no OSG.

Por lo general, como ocurre en estaciones de comprobación técnica más convencionales, los equipos destinados a la comprobación de las señales procedentes de estaciones espaciales deben tener la flexibilidad necesaria para poder sintonizar una extensa gama de frecuencias, a diferencia de los aparatos que trabajan en una banda muy limitada pero suficiente para las necesidades de un organismo de investigación o de instituciones especializadas en operación espacial.

CUADRO 5.1-2

Tareas y su ámbito de influencia en el concepto técnico de estación de comprobación técnica para servicios espaciales

No.	Tareas	Ámbito de influencia
1	¿Qué parte del espectro de frecuencias radioeléctricas se debe poder someter a comprobación técnica?	Número y tipo de sistemas de antena
2	¿Qué sistemas de satélite se deben incluir en la comprobación técnica? ¿Qué densidades de flujo de potencia producen esos sistemas en el sitio de recepción? ¿Qué relación portadora/ruido se debe lograr?	Factor de calidad del sistema receptor (ganancia de antena, temperatura de ruido del sistema)
3	¿Puede determinarse la posición de los satélites OSG?	Precisión de apuntamiento, tipo de orientación de antena, concepto de receptor
4	¿Pueden determinarse los elementos orbitales de los satélites no OSG?	Precisión de apuntamiento, tipo de orientación de antena, aceleración y velocidad de orientación de la antena, concepto de receptor
5	¿Pueden determinarse las características de polarización y efectuar mediciones en el caso de los sistemas con polarización doble?	Sistema de alimentación de antena

5.1.3.2 Factor de calidad de un sistema de comprobación técnica espacial

La relación portadora/ruido (C/N) que se puede lograr en el momento de la recepción de una emisión espacial depende de los siguientes factores:

– la densidad de flujo de potencia de la señal en el sitio de recepción;
– la ganancia de la antena receptora; y
– la temperatura de ruido del sistema receptor.

El factor de calidad (*G/T*) de un sistema receptor es la relación entre la ganancia de la antena receptora en la dirección de la señal recibida y la temperatura de ruido del sistema de recepción como figura en la ecuación (5.1-9).

$$\left(\frac{G}{T}\right) = G - T_{RS} \tag{5.1-9}$$

$$\left(\frac{G}{T}\right) = \left(\frac{C}{N}\right) - pfd - 10\log\left(\frac{\lambda^2}{4\pi}\right) + 10\log\ (kB) \tag{5.1-10}$$

donde:
- G/T: factor de calidad (dB/K)
- G: ganancia de la antena (dB)
- T_{RS}: temperatura de ruido del sistema receptor (dB(K))
- C/N: relación portadora/ruido deseada en la anchura de banda de medición "B" (dB)
- *dfp.*: densidad de flujo de potencia en la anchura de banda de medición "B" (dB(W/m^2))
- $\lambda^2/4\pi$: superficie equivalente de una antena isótropa (m^2)
- k: constante de Boltzmann ($1{,}38 \times 10^{-23}$ Julio/Kelvin) (W/Hz)
- B: anchura de banda de medición (Hz)

En el caso del servicio fijo por satélite, se conocen con exactitud las condiciones del enlace de un sistema planificado. La relación *G/T* (factor de calidad) requerida para una relación *C/N* determinada se puede calcular utilizando la ecuación (5.1-10). La anchura de banda de medición es equivalente a la anchura de banda de recepción. Corresponde al diseñador del sistema decidir si la *G/T* requerida se ha de lograr por medio de un aumento de la ganancia de antena o mediante una reducción de la temperatura de ruido.

Ahora bien, en la esfera de la comprobación técnica espacial no cabe pretender unas condiciones tan claras. No obstante, el método utilizado es similar. El factor de calidad (*G/T*) deseado se calcula sobre la base de los valores de *d.f.p.* más bajos de las estaciones espaciales respecto de las cuales la estación de comprobación técnica considera que es necesario efectuar el análisis técnico de sus características de emisión

Se prefiere efectuar la medición directa del factor de calidad (*G/T*) de un sistema de comprobación técnica de las emisiones espaciales en vez de calcular la relación de los valores de *G* y *T* medidos por separado, ya que de este modo se reduce la posibilidad de error. Las mediciones separadas de *G* y *T* necesitan además utilizar un generador de señales, el cual introduce innecesariamente un factor adicional de incertidumbre. A menudo se utiliza el sol, en lugar de una radioestrella, para las mediciones de *G/T* destinadas a la calibración de la *d.f.p.* en las estaciones de comprobación técnica debido a que la señal solar es mucho más intensa. Si el sistema receptor fuera, no obstante, suficientemente sensible, el uso de las radioestrellas resultaría mejor.

5.1.3.2.1 Términos que definen *G/T*

El factor de calidad viene normalmente determinado para un ángulo de elevación de 5º y se expresa en unidades dB(K^{-1}), es decir, G/T (dB/K) = 10 log (*G/T* numérico).

G/T (dB/K) = ganancia de la antena (dBi) – 10 log (temperatura de ruido del sistema (K)), (5.1-11)

o

$$\text{G/T (numérico)} = \frac{8\pi k r_1 r_2 f^2 (y_{sol} - 1)}{s c^2 y_x} \tag{5.1-12}$$

donde:

k: constante de Boltzmann (1.38×10^{-23} J/K)

r_1: factor de corrección de la atenuación debida a la atmósfera, para ángulos ≥ 5°, donde

$$r_1 = \text{antilog}\frac{A/\text{sen}\,\theta\,(dB)}{10}$$

A: absorción atmosférica unidireccional en decibelios para un trayecto vertical, y θ el ángulo de elevación del sol en el momento de la medición

r_2: factor de corrección de la abertura del haz a potencia mitad de la antena receptora relativo al diámetro angular del sol, donde $r_2 = 1 + \frac{40{,}4}{\vartheta_h^2}$ y ϑ_h^2 es la abertura del haz a potencia mitad de la antena (mín)

f: frecuencia (Hz)

y_{sol}: valores medidos, expresados en unidades numéricas, donde:

$$y_{sol} = \text{antilog}\frac{Y_{sol}\,(dB)}{10}$$

s: densidad del flujo del sol obtenido de un laboratorio nacional de normas; si no se dispone de la densidad del flujo del sol, s, en la frecuencia (f) de interés directo, se debe utilizar la siguiente ecuación de interpolación, en lugar de la interpolación lineal, para obtener una exactitud mayor:

$$s = \left(\frac{s_1}{s_2}\right)^{R_2}$$

donde:

s_1: es el flujo en la frecuencia inferior (f_1), (J/m^2)

s_2: es el flujo en la frecuencia superior (f_2), (J/m^2)

$$R_2 = \frac{\log\,(f\,/\,f_2)}{\log\,(f_1\,/\,f_2)}$$

c: velocidad de la luz (3×10^8 m/s)

y_x: valores medidos, expresados en unidades numéricas, donde:

$$y_x = \text{antilog}\,\frac{Y_x\,(\text{dB})}{10}$$

5.1.3.2.2 Procedimientos de medición de *G/T*

Se necesita disponer de un receptor como el utilizado normalmente en las estaciones de comprobación técnica con un indicador de la tensión de salida de frecuencia intermedia (FI), por ejemplo, un voltímetro o un osciloscopio. Es muy conveniente que la resolución de tensión del indicador sea de 0,1 dB (1%) o mejor. El receptor debe ser estable y su ganancia no experimentará ningún cambio importante durante el periodo de medición.

Al efectuar las mediciones:

– el circuito de ganancia automática del receptor debe estar apagado;

– la antena estará apuntada hacia el sol y hacia la señal máxima obtenida. El ángulo de elevación del sol será superior a unos 30° para de evitar los efectos de la atmósfera y garantizar que los factores de corrección r_1 y r_2 se vean afectados al mínimo;

– se debe entonces girar la antena, únicamente en acimut, apartándola del sol, por ejemplo algo más de unos pocos grados. Se anotará el nivel de la tensión de FI. Esta tensión corresponde al valor de referencia en condiciones de cielo frío;

– a continuación se girará la antena en el plano acimutal hacia el sol, y se anotará la tensión medida. La diferencia de lecturas es igual a Y_{sol} (dB); y

– se gira después la antena, en el plano de elevación solamente, unos 5º por debajo del sol, y se anota la tensión registrada. La diferencia entre este nivel de tensión y el nivel en condiciones de cielo frío es de Y_x (dB) para un ángulo de elevación de $x°$. Debe señalarse que 5° es un valor de referencia común para el ángulo de elevación ($x°$).

El factor de calidad (*G/T*) puede entonces evaluarse utilizando los valores medidos de y_{sol} e y_x y aplicando los factores de corrección r_1 y r_2. La densidad de flujo del sol, s, se puede obtener en un laboratorio nacional de normalización.

Si se utiliza la ecuación de *G/T*, el valor medio cuadrático de la incertidumbre de la medición es del orden de < 0,5 dB.

Las mediciones deberán realizarse en días soleados y radiantes.

5.1.3.3 Sistemas de antena

La ganancia de la antena debe ser lo más alta posible, para que el equipo de medición tenga un límite de sensibilidad mínima satisfactorio.

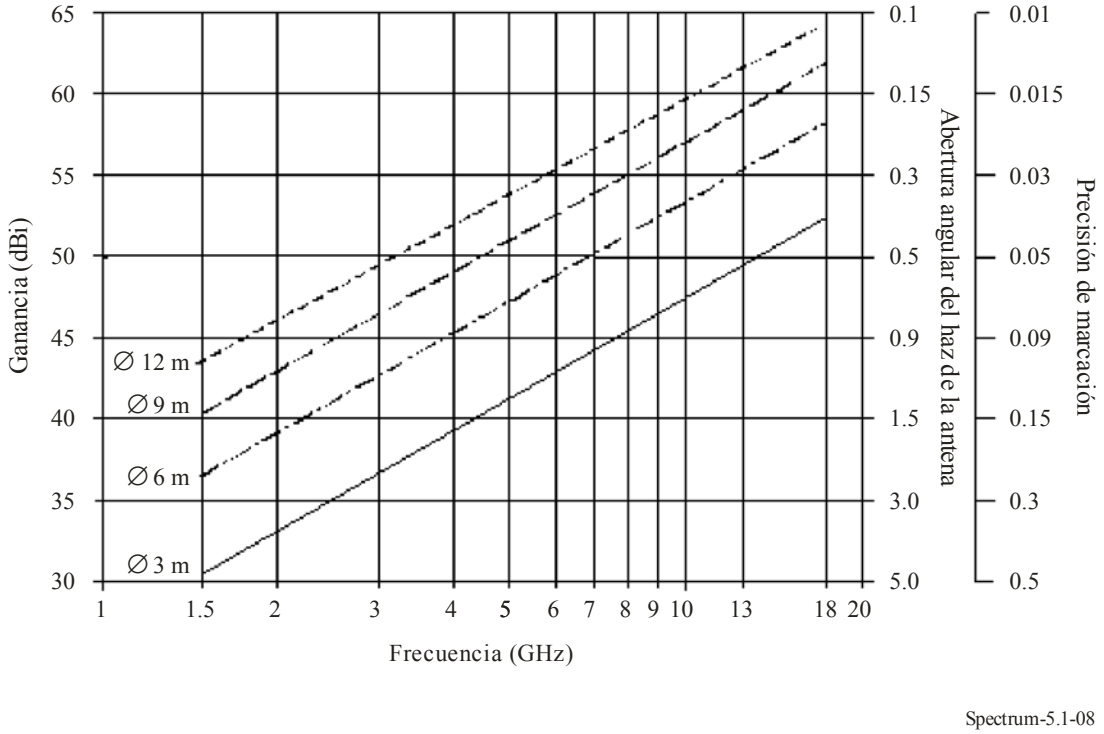
Las antenas helicoidales o las redes de antenas dipolo son adecuadas para la gama de frecuencias de 100 a 1 000 MHz. Como las antenas individuales, proporcionan una ganancia de 12 a 16 dBi.

Para la gama de frecuencias de 1 a 26,5 GHz es conveniente utilizar un reflector parabólico con una fuente primaria de banda ancha. Si se necesitan características de orientabilidad y polarización óptimas, es preferible recurrir a un diseño con fuentes primarias intercambiables. En el punto 5.1.6.1 se proporciona un ejemplo de esta solución técnica.

En la Fig. 5.1-8 se ilustra la ganancia de antena en función de la frecuencia para los diferentes diámetros del reflector parabólico, suponiendo una eficacia de antena típica del 55%. El diámetro del reflector debe ser de 3 m como mínimo. En este caso, se pueden obtener ganancias de antena desde 31 dBi a 1,5 GHz hasta 53 dBi a 18 GHz. Es aplicable la explotación a frecuencias superiores. Por lo general se utilizan antenas con un diámetro que varía entre 6 m y 12 m.

FIGURA 5.1-8

Ganancia de antena, anchura del haz a 3 dB y precisión de apuntamiento en función de la frecuencia para diferentes diámetros (Ø) del reflector parabólico y con una eficacia de antena del 55%



En algunos casos puede ser preferible utilizar antenas log-periódicas. Las antenas de este tipo tienen una cobertura general satisfactoria en una gama de frecuencias de 10 a 1 y se han utilizado para la comprobación técnica por satélite en frecuencias entre 50 y 5 000 MHz. En este caso la desventaja es que la ganancia de antena es independiente de la frecuencia y casi constante, en general menor de 10 dBi.

5.1.3.4 Orientación de la antena

El sistema de guiado de la antena debe permitir el ajuste manual y controlado por ordenador. Si hay que determinar con exactitud la posición de los satélites OSG, o si es preciso calcular los elementos orbitales de una estación espacial sobre la base de mediciones angulares, se necesitarán capacidades de seguimiento automático. Las dos soluciones posibles son el seguimiento por pasos o el monoimpulso.

La técnica de seguimiento por pasos está basada en mediciones de la intensidad de la señal recibida realizadas en posiciones alrededor de la posición esperada del satélite. Mediante un cálculo por pasos se determina el punto óptimo de funcionamiento. La técnica de monoimpulsos se basa en el análisis del tipo de onda entrante en el receptor con seguimiento. El tipo de onda esperado (modo guíaondas) solamente se produce cuando la antena está apuntada directamente hacia el satélite. Otros tipos de onda producen la información de seguimiento necesaria para el apuntamiento adecuado. El seguimiento monopulso se utiliza con satélites OSG y no-OSG y no afecta a las mediciones de potencia.

5.1.3.5 Abertura de haz de la antena necesaria para mediciones angulares

La finalidad de este apartado es establecer una relación entre la abertura del haz a potencia mitad (3 dB) de una antena y la precisión de apuntamiento que se puede lograr. Esto es importante en relación con las técnicas de seguimiento automático para los casos en los cuales se considera que una tarea necesaria de una estación de comprobación técnica de las emisiones radioeléctricas es la verificación del mantenimiento de la

posición de las estaciones espaciales OSG o el cálculo de los elementos orbitales de los satélites no OSG (véase el § 5.1.2.6).

La precisión de apuntamiento es la capacidad de un sistema de antena para determinar el ángulo (acimut, elevación) hacia un objeto con el mayor grado posible de exactitud. A este respecto, existe una diferencia entre las estaciones de comprobación técnica espacial y las estaciones terrenas del servicio fijo por satélite, pues en el caso de estas últimas un error de alineación relativa (con respecto a la estación espacial) por pequeño que sea, reviste suma importancia.

Es posible establecer una relación entre la abertura del haz a potencia mitad de una antena y la máxima precisión de apuntamiento que se puede lograr:

$$R = n \cdot \theta_0 \tag{5.1-13}$$

donde:

R: error de medición angular (grados)

n: factor de mejora

θ_0: abertura del haz a potencia mitad (grados).

Para antenas de banda estrecha optimizada, $n = 0{,}01$. En el caso de una antena de banda ancha del tipo que utilizan generalmente las estaciones de comprobación técnica de las emisiones radioeléctricas para los servicios espaciales, parece realista considerar un factor de 0,1 si se utiliza un sistema de monoimpulso y de 0,15 si se utiliza un sistema de seguimiento por pasos. La variable restante, esto es, la abertura del haz a potencia mitad es una función del diámetro del reflector.

Se debe seleccionar la abertura del haz a potencia mitad adecuada, teniendo en cuenta la tolerancia más pequeña de posición longitudinal de ±0,lº, tal como se estipula en el Reglamento de Radiocomunicaciones. Una tolerancia de ±0,1º de la longitud define un segmento angular del plano orbital ecuatorial. En el caso restrictivo en el cual una estación de comprobación técnica funciona en el ecuador, el mantenimiento de posición tendría que comprobarse mediante mediciones angulares únicamente en el plano de elevación de la antena. Cuando la estación de comprobación técnica se desplaza hacia el Sur o el Norte, se produce una rotación en el plano de acimut de la antena. A 50º de latitud por ejemplo, esto significa que la tolerancia de mantenimiento de la posición longitudinal de una estación espacial OSG se mide predominantemente como una diferencia angular en el plano acimutal de la antena. Ésta alcanza el valor de ±0,13º para una diferencia longitudinal de 0º entre la estación de comprobación técnica y el punto subsatelital, y desciende a ±0,085º para una diferencia longitudinal de 60º. El error de medición de este ejemplo es ±0,0lº, es decir, es inferior en un factor de 10 en comparación con la tolerancia permitida..

En la Fig. 5.1-8 se indican los valores de la abertura del haz a potencia mitad y la precisión de apuntamiento de una antena en función de la frecuencia y el diámetro del reflector. Es evidente que la plena realización de la verificación de la posición como tarea de comprobación técnica está sujeta a limitaciones, especialmente en las bandas de frecuencias inferiores. Los requisitos son menos estrictos en los casos en que sólo se deben identificar divergencias o desviaciones mayores en el mantenimiento de la posición, por ejemplo en investigaciones de interferencia perjudicial, lo que permite la utilización de sistemas de antena más pequeños.

5.1.3.6 Polarización del sistema

En las mediciones de la polarización (punto 5.1.2.5) hay que prestar la debida atención a las características del sistema de antena. Como en las bandas de frecuencias por encima de 1 GHz se utilizan polarizaciones circulares y lineales, y puesto que la polarización doble en las bandas de frecuencias del servicio fijo por satélite es una técnica normal, es necesario que la polarización del sistema receptor se pueda adaptar a la de la señal recibida y que se logre una discriminación de polarización suficiente.

Este sistema, además de permitir obtener las características deseadas de polarización de la señal recibida, también proporcionará una ganancia de antena máxima y una reducción máxima de las señales de diafonía entre los dos planos de polarización ortogonal, lo que constituye un requisito para la mayor parte de las mediciones indicadas en el punto 5.1.2.

5.1.3.7 Receptores

Por razones económicas y puesto que en las estaciones de comprobación técnica se necesita una cobertura general, los receptores de comprobación técnica sintonizables no alcanzan el nivel extremadamente bajo de factor de ruido de los receptores de frecuencia fija utilizados para la investigación espacial y con fines operacionales. No obstante, el factor de ruido del sistema receptor de una estación de comprobación técnica para los servicios espaciales influye en el factor de ruido total del sistema. La reducción del factor de ruido al mínimo valor posible constituye un importante objetivo durante la fase de diseño de una estación de comprobación técnica para los servicios espaciales. Esto se cumple aun cuando prácticamente en todos los casos sea posible mejorar la relación señal/ruido mediante el filtrado de una parte del espectro de emisión con un filtro de banda estrecha.

Para frecuencias inferiores a unos 3 GHz se pueden utilizar receptores de comprobación técnica normales. Por encima de unos 3 GHz, se debe utilizar un sistema de receptor de microondas con diseño modular, para atender a los diversos requisitos. No es posible aplicar el concepto tradicional, según el cual el receptor es una unidad autónoma, pues a causa de las elevadas pérdidas que introducen los cables en la gama de microondas, el paso de entrada del receptor debe estar situado cerca de la antena, mientras que los módulos de baja frecuencia y los dispositivos de control pueden estar en la sala de operaciones. En el Cuadro 5.1-3 se proporcionan algunos ejemplos de especificaciones de sistemas de recepción para las bandas C y K:

CUADRO 5.1-3

Ejemplo de características del sistema receptor

Sintonizador y sintetizador	
Gama de frecuencias	1-18 GHz con varios sintonizadores que se solapan
Anchura de banda de frecuencias de recepción	Frecuencia central ±50 MHz
Error de frecuencia	$< \pm 2{,}5 \times 10^{-8}$
Margen dinámico sin intermodulación	> 66 dB (anchura de banda de 1 MHz)
Ruido de fase del oscilador	<–90 dBc (Hz) (10 kHz de la portadora)
Receptor de banda ancha	
Intervalo mínimo de sintonización	1 kHz
Anchura de banda del filtro de FI	0,05/0,3/1,25/2,5/5/10/20/40 MHz

Cuando se utilizan métodos automáticos de medición del efecto Doppler, que necesitan un contador de frecuencia, el receptor debe proporcionar una señal de salida sin ruido, que represente con exactitud la frecuencia portadora del satélite. A tal fin, el receptor debe disponer de capacidad de sincronización con enganche de fase con la frecuencia portadora del satélite.

La anchura de banda del cuadro debe poder modificarse entre unos pocos hertzios y unos pocos cientos de hertzios. La frecuencia de salida del circuito de enganche de fase también puede utilizarse como frecuencia piloto para ajustar la frecuencia de un segundo receptor durante las mediciones de anchura de banda, tal como se indica en el punto 5.1.2.3.

Con propósitos más generales, si se recibe una señal de satélite sin portadora y la *d.f.p.* de dicha señal es suficiente, puede utilizarse un dispositivo de sintonización automática de frecuencia para evitar la distorsión de la anchura de banda y de las mediciones de la *d.f.p.* debidas al desplazamiento Doppler de la frecuencia de la señal recibida.

Para facilitar las mediciones, el receptor debe tener las interfaces de salida siguientes: salidas en frecuencia intermedia de banda ancha y de banda estrecha, de videofrecuencia, de audiofrecuencia y de banda base (MA/MF). Todos los receptores de una instalación de medición deben tener la misma frecuencia intermedia a fin de que todos ellos utilicen los mismos equipos auxiliares.

5.1.3.8 Equipo periférico

5.1.3.8.1 Equipamiento general

El Cuadro 5.1-4 contiene una lista de algunos de los equipos periféricos que se necesitan para las mediciones antes mencionadas, con inclusión de otros equipos útiles que se pueden incorporar al sistema de recepción.

5.1.3.8.2 Analizador

El analizador de espectro ha resultado ser uno de los instrumentos más eficaces, no sólo para la comprobación técnica general, sino también con fines de supervisión espacial. Para poder utilizarlo en tareas de comprobación técnica, el analizador de espectro debe poder funcionar de manera interactiva con otros equipos controlados por ordenador.

Para realizar una visualización del espectro en tiempo real y mediciones de la potencia, se puede utilizar un analizador vectorial o FFT digital. Las anchuras de banda y las correspondientes curvas de filtro de las diferentes modulaciones (MF, MDPQ, etc.) pueden elegirse mediante programación de filtros digitales. Los análisis FFT muestran un espectro en tiempo real y no necesitan un periodo de tiempo considerable para recorrer la anchura de banda de la señal, como los analizadores de espectro tradicionales.

CUADRO 5.1-4

Equipo periférico

Equipo periférico necesario		**Equipo periférico adicional**	
Tipo de equipo	**Función**	**Tipo de equipo**	**Función**
Patrón de frecuencia/tiempo	Referencia central	Demodulador de televisión	Demodulación de portadoras de televisión moduladas en MF y digitalmente
Contador de frecuencia	Mediciones de frecuencia con efecto Doppler	Decodificador de televisión	Decodificación de señales de televisión en banda base (NTSC, PAL, SECAM, HDTV)
Divisor de tiempo	Impulso de temporización para el contador de frecuencia	Demodulador de la portadora de sonido	Demodulación de subportadoras de sonido de televisión, sintonizable
Analizador de señal	Análisis espectral, mediciones de anchura de banda	Analizador de modulación	Identificación de tipos de modulaciones, mediciones de modulación
Medidor de potencia	Mediciones de d.f.p.		
Generador de señal	Mediciones de d.f.p. de referencia		
Registrador	Fines generales		
Osciloscopio digital	Fines generales		

5.1.3.9 Canal de supervisión de frecuencia intermedia o de radiofrecuencia de banda ancha

En el diseño técnico del sistema receptor de una estación de comprobación técnica para servicios de radiocomunicaciones espaciales se recomienda tener en cuenta la comprobación técnica de banda ancha del espectro frecuencias radioeléctricas. Debe preverse el análisis simultáneo de una anchura de banda mínima de 500 MHz.

5.1.3.10 Equipo de registro del espectro de frecuencias radioeléctricas

Las características técnicas del equipo de registro (véase como referencia el § 5.1.2.9) corresponden a las requeridas para la comprobación técnica terrenal. Puesto que se han de utilizar antenas no directivas, de preferencia con polarización lineal, se tiene que seleccionar una anchura de banda pequeña para el equipo de registro con miras a compensar la pérdida de ganancia de antena. Por regla general, y en particular para las unidades de registro gráfico, la anchura de banda total del espectro analizado no debe ser superior a 2 MHz.

5.1.3.11 Requisitos del equipo informático

Los equipos informáticos se deben considerar como parte integrante de una estación de comprobación técnica para los servicios espaciales. Estos equipos se pueden utilizar, por ejemplo, para:

– el cálculo de los elementos orbitales;
– el cálculo de los ángulos de puntería de la antena a partir de los elementos orbitales;
– la orientación de la antena;
– el almacenamiento de los resultados de la medición; y
– la evaluación de los resultados de la medición.

5.1.4 Documentación y base de datos de apoyo a la comprobación técnica espacial

5.1.4.1 Consideraciones generales relativas a la documentación y base de datos

El buen funcionamiento de una estación de comprobación técnica para servicios espaciales depende de la actualización continua de la documentación. Preferiblemente ello debería realizarse mediante un sistema de bases de datos que no sólo contuviera datos publicados oficialmente por la UIT, es decir,

– la Circular Internacional de información sobre frecuencias de la Oficina de Radiocomunicaciones (BR IFIC), disponible en CD-ROM;
– la Lista de redes de satélite (en línea o en CD-ROM);
– el nomenclator de las estaciones de los servicios de radiocomunicación espacial y del servicio de radioastronomía, en CD-ROM; y
– el Reglamento de Radiocomunicaciones, en papel o en CD-ROM;

sino también un compendio de todos los satélites en órbita, junto con información sobre algunos de sus elementos orbitales más importantes (tiempo de revolución, inclinación, apogeo, perigeo). Los datos de estaciones terrenas con licencia de la administración son de gran valor en la localización geográfica de estaciones terrenas, especialmente para identificar usuarios no autorizados del espectro.

A fin de facilitar las operaciones de comprobación técnica, es necesario establecer una base de datos para registrar dos tipos de informaciones. Una de tipo general aplicable a todos los satélites de interés, y otra con las características de los satélites que se obtendrán mediante la comprobación técnica.

5.1.4.2 Base de datos de información general de satélites existentes

La base de datos de información general de satélites existentes describe principalmente las características y servicios espaciales con licencia de un satélite para el que las capacidades de comprobación técnica de la estación son adecuadas. La información más importante incluye:

– órbita del satélite, incluyendo la longitud nominal de un satélite OSG, tolerancia de la longitud, información de efemérides de un satélite no-OSG, etc.;
– transpondedores, incluyendo su número, anchura de banda, gama de frecuencias, frecuencia de baliza, ganancia máxima de la antena;
– haz del satélite, incluyendo cobertura del haz, zona de servicio, potencia máxima (dBW/m^2).

Adicionalmente, la siguiente información de los satélites resulta de utilidad para la localización geográfica de estaciones terrenas:

– información geográfica, incluyendo longitud, latitud y altitud, etc.;

– información de antena, incluyendo tamaño, ganancia, diagrama de radiación, etc.;

– otras informaciones, incluyendo asignación de frecuencia, anchura de banda, polarización, potencia de transmisión, tipo de servicio, tipo de modulación, horario de funcionamiento, etc.

Las fuentes de dicha información pueden ser los operadores de satélites, las administraciones y los medios de comunicación.

5.1.4.3 Base de datos de información de comprobación técnica

La base de datos de información de comprobación técnica se utiliza para registra el resultado de las mediciones de las estación de comprobación técnica espacial. La medición debe incluir algunos parámetros claves, como la frecuencia, polarización, anchura de banda, *d.f.p.*, tipo de modulación, etc. Un análisis de la ocupación del espectro a largo plazo facilita la planificación del espectro.

Para facilitar el intercambio de datos entre estaciones de comprobación técnica, deben registrarse en la base de datos los parámetros de la comprobación técnica, tales como posición de la antena, parámetros de la antena, hora de medición, condiciones meteorológicas, etc.

5.1.4.4 Utilización de la documentación y la base de datos para facilitar la comprobación técnica

En la comprobación técnica, la documentación y las bases de datos tienen los objetivos siguientes:

Identificación de estaciones espaciales

Las estaciones espaciales pueden ser identificadas por comparación entre la base de datos de información general y los datos de la comprobación técnica. En la sección siguiente se incluye una introducción detallada al proceso de identificación de estaciones espaciales.

Identificación de emisiones ilegales

Los ingenieros dedicados a la comprobación técnica pueden identificar emisiones ilegales por comparación con las correspondientes entradas de la base de datos de información general que ha sido aprobada por la administración. Los sistemas de comprobación técnica pueden hacerlo de forma automática.

Esto sólo es posible cuando la administración dispone de los datos aprobados de las portadoras.

Facilitar la localización geográfica de las emisiones

Los sistemas de base de datos pueden mejorar notablemente la eficiencia de la localización geográfica. El análisis puede realizarse en base a la información de la base de datos, incluyendo lo siguiente:

– análisis del satélite adyacente;

– selección de la señal de referencia;

– análisis de potenciales fuentes de interferencia.

Además, los sistemas de información geográfica (SIG) juegan un papel importante en la comprobación técnica de satélites, de forma que un sistema que combine una base de datos de estaciones y una base de datos de un GIS puede ofrecer al ingeniero de comprobación técnica una buena visión general de la utilización del espectro. Dicho sistema conjunto puede utilizarse para el análisis de potenciales fuentes de interferencia de estaciones espaciales.

5.1.5 Identificación de estaciones espaciales y localización geográfica de estaciones terrenas

Por lo general, la identificación de una estación espacial se basa en la comparación de las características orbitales y de emisión medidas con las existentes en la base de datos y en la documentación de referencia. Dichas referencias consisten en una lista de las características de emisión y características orbitales de todas las estaciones espaciales publicadas o que se han puesto a disposición del servicio de comprobación técnica. Una estación desconocida se identifica a través de la supresión iterativa de aquellas estaciones que no corresponden a las características medidas. En el Cuadro 5.1-5 se indican las características de referencia.

CUADRO 5.1-5

Características de referencia

Características de la emisión	Características orbitales
Frecuencia	Datos de efemérides, o, si no se dispone de estos:
Anchura de banda	– periodo de revolución
Tipo de modulación	– ángulo de inclinación de la órbita
Polarización	– distancias de perigeo y de apogeo
p.i.r.e.	– hora de paso por el Ecuador y longitud geográfica del paso

La amplia utilización de los satélites OSG hace necesario que las administraciones deban poder identificar las estaciones terrenas que transmiten hacia satélites OSG a fin de disponer de información completa sobre la utilización de las estaciones terrenas y eliminar las emisiones perjudiciales o ilegales. Cuando se utiliza el método de localización geográfica descrito en el § 5.1.2.7, las inexactitudes típicas de la determinación de la posición pueden ser de decenas de kilómetros. Esa precisión puede ser suficiente para identificar emisiones de usuarios legales, aunque para las emisiones ilegales puede ser necesario disponer de otros medios de comprobación técnica para localizar y eliminar la interferencia.

5.1.5.1 Resultados de la comprobación técnica que se han de utilizar para la identificación

5.1.5.1.1 Evaluación de registros de bandas de frecuencias

En relación con el § 5.1.2.9 y el ejemplo que figura en § 5.1.7.1, a partir de los registros de bandas de frecuencias pueden obtenerse los valores aproximados de las siguientes características de estación espacial:

– frecuencia;

– momento previsto de recepción de los satélites no OSG; y

– periodo de revolución.

5.1.5.1.2 Cálculo del periodo de revolución

Para calcular el periodo de revolución con un nivel de precisión de varios segundos, se puede obtener un valor aproximado inicial midiendo los momentos de máxima aproximación (TCA, *Time of Closest Approach*) de dos trayectos sucesivos. Un resultado más exacto será el que arrojen varias mediciones adicionales del TCA durante un periodo de uno o dos días.

5.1.5.1.3 Radiogoniometría

Para complementar la determinación del TCA exacto de un satélite a una estación de comprobación técnica, puede trazarse una curva para mostrar el cambio en la dirección de llegada de la señal con el tiempo, determinado por las marcaciones del radiogoniómetro o la orientación de una antena receptora muy directiva. La máxima velocidad angular de variación tendrá lugar cuando el satélite esté más próximo a la estación de comprobación técnica durante un paso particular, y la información obtenida conforme a este método debe ser similar a la información obtenida a partir de la curva resultante del efecto Doppler.

Las mediciones radiogoniométricas son muy adecuadas para determinar el TCA en los casos en los que no existe una frecuencia portadora dentro del espectro. Sin embargo, para las mediciones radiogoniométricas se necesita una *dfp* suficiente en el punto de recepción.

5.1.5.1.4 Cálculo de los datos de las efemérides a partir de mediciones angulares de la antena

Si una estación de comprobación técnica está equipada con un sistema de antena de seguimiento automático, se pueden efectuar mediciones angulares en los planos de acimut y de elevación para calcular los datos de las efemérides del satélite desconocido [Montenbruck, 1989] y [Montenbruck y Pfleger, 1991]. Los programas informáticos necesarios para realizar los cálculos están disponibles en el mercado.

La precisión en la determinación de los datos de las efemérides depende de:

– la precisión general de las mediciones angulares (§ 5.1.3.5);

– el segmento orbital utilizado para las mediciones angulares;

– el tipo de órbita del satélite.

Un importante problema operacional estriba en la necesidad de apuntar la antena rápidamente hacia el satélite no OSG tan pronto como éste entre en la gama de visibilidad de la estación de comprobación técnica. Dado que para lograr una precisión de medición angular satisfactoria es necesario utilizar antenas muy directivas, y que por ello resulta aún más difícil buscar y localizar un satélite en órbita terrestre baja, para las mediciones sólo se puede utilizar una parte efectiva de la órbita visible total. El § 5.1.7.2 contiene un ejemplo del cálculo de los elementos orbitales sobre la base de mediciones angulares.

5.1.5.1.5 Características de la emisión

La medición de las características de emisión descrita en párrafos anteriores puede bastar para identificar una estación espacial. Éste es el caso en particular de las estaciones espaciales que funcionan de conformidad con el Reglamento de Radiocomunicaciones y cuyas características de emisión se notifican o publican.

5.1.5.2 Procedimiento de identificación

Si las características de emisión medidas no permiten identificar una estación espacial, los datos de las efemérides medidos, o una parte de los mismos, pueden ayudar a hacerlo.

Al comparar los datos de las efemérides medidos con los datos de referencia publicados, se seleccionan en primer lugar los objetos en órbita con datos más similares. La posterior comparación de los datos paso por paso deberá conseguir una reducción considerable del número de objetos que se han de examinar. Por último, el cálculo de los tiempos de visibilidad y el TCA de los objetos restantes y su comparación con los resultados verificados debería conducir a una identificación correcta.

5.1.5.3 Otras posibilidades de identificación de estaciones espaciales

Los procedimientos examinados hasta el momento para la identificación de estaciones espaciales se han basado en la comparación de las características de la señal observada y medida con la información publicada, y en la comparación de los datos de las efemérides medidos o de una parte de éstos (tiempo de revolución, ángulo de inclinación, TCA) con los datos de las efemérides publicados. Ahora bien, este procedimiento consume mucho tiempo, y para aplicarlo hay que disponer de los datos de las efemérides de los objetos en órbita.

En ciertas circunstancias, sobre todo cuando se observan incumplimientos de lo dispuesto en el Reglamento de Radiocomunicaciones o de interferencia perjudicial, puede ser preferible aplicar otro procedimiento. En esos casos, la estación de comprobación técnica para servicios espaciales puede registrar toda la información posible sobre las mediciones de frecuencia y anchura de banda y demás características de emisión, junto con los datos de las efemérides, o una parte de éstos, y con esos datos solicitar una identificación a los centros de identificación y seguimiento o a los operadores de redes de satélites.

5.1.5.4 Consideraciones operacionales relativas a la localización geográfica de enlaces ascendentes de estaciones terrenas hacia satélites geoestacionarios

Actualmente existen en el mercado sistemas de localización geográfica comerciales de diversos fabricantes, Dichos sistemas utilizan los principios descritos en § 5.1.2.7 para la localización geográfica de los enlaces ascendentes hacia satélites OSG y han sido adoptados por algunos operadores de satélites y administraciones. En esta sección de presentan algunas consideraciones operacionales relativas a dichos sistemas.

Inicialmente, el operador del sistema de localización geográfica debería determinar la naturaleza de la señal desconocida. Ello puede hacerse de dos formas, a saber, mediante otras facilidades de comprobación técnica u obteniendo información del operador del sistema satelital. Seguidamente, es necesario identificar un satélite adyacente para la prueba. El operador puede tener varias opciones de satélites adyacentes. También debe introducir en el sistema de localización geográfica otras informaciones. Normalmente son necesarios un conjunto de señales de referencia para cancelar las derivas de los osciladores a bordo de los dos satélites o

para ser utilizados en el algoritmo de localización geográfica a fin de corregir inexactitudes fijas de posición consecuencia de errores en la efemérides.

5.1.5.4.1 Adquisición de la información necesaria

El operador debe identificar alguna información de utilidad sobre la señal en prueba. Por ejemplo, el satélite que emite la señal desconocida, los planes de frecuencia de sus transpondedores, la frecuencia central, la anchura de banda, los ciclos de trabajo (señales intermitentes) y las características de movilidad de la frecuencia de la señal desconocida. En base a esa información, el operador seleccionará los parámetros de observación adecuados para maximizar la probabilidad de una localización geográfica exitosa.

La información anterior puede adquirirse mediante otros sistemas de comprobación técnica o, si la señal desconocida produce interferencia perjudicial, puede ser proporcionada por la víctima de la misma.

También resulta de ayuda registrar el transpondedor del satélite interferido con un dispositivo de registro espectral tan pronto como sea posible una vez informada la interferencia a la estación de comprobación técnica. Ello permite "ver" las actividades del interferente y la ocupación del transpondedor.

5.1.5.4.2 Selección del satélite adyacente

Pueden existir varios satélites que sean adecuados como satélites adyacentes. El criterio básico es asegurar que el satélite adyacente seleccionado tenga la adecuada conectividad ascendente y descendente.

A partir de los valores conocidos de frecuencia y polarización del enlace descendente de la señal desconocida, el operador puede inferir las correspondientes frecuencia y polarización de la señal desconocida en sentido ascendente. En el caso de que se utilicen haces ascendentes hemisféricos o de cobertura restringida, el diagrama de radiación del enlace ascendente puede limitar la región geográfica desde la que es probable que tenga su origen la señal desconocida. No obstante, el operador debe tener presente que el origen de la interferencia también puede residir en enlaces ascendentes de antenas de gran tamaño situadas fuera del diagrama de radiación del haz principal ascendente.

El satélite o satélites adyacentes candidatos pueden determinarse a partir de la frecuencia y polarización del enlace ascendente de la señal desconocida, así como de la cobertura de la antena del enlace ascendente del satélite primario. Los criterios para seleccionar el satélite adyacente son los siguientes:

– Misma cobertura de la frecuencia del enlace ascendente que el satélite primario.
– Misma polarización del enlace ascendente que el satélite primario.
– Similar cobertura del haz ascendente que la del satélite primario.
– Separación angular del satélite primario en el arco de los satélites geoestacionarios.
– No utilización de transpondedores con procesado a bordo.

Los criterios de selección primarios anteriores están enumerados de conformidad con su importancia relativa. Los primeros dos criterios, frecuencia ascendente, polarización ascendente y cobertura descendente son prerrequisitos esenciales para que las mediciones sean exitosas.

Una vez que el operador ha identificado uno o más satélites adyacentes candidatos en base a los criterios anteriores, pueden utilizarse criterios secundarios que ayuden a tomar la decisión final,

Los criterios secundarios incluyen los siguientes:

– Disponibilidad de las señales de referencia adecuadas para la pareja de satélites primario / adyacente.
– Calidad de los datos de efemérides disponibles del satélite adyacente.
– Presencia/ausencia de señales en el transpondedor del satélite adyacente correspondientes a la frecuencia de la señal interferente.

A la hora de tomar la decisión final sobre el satélite adyacente, el operador ha de tener presente que la solución geométrica óptima se obtendrá si se seleccionan satélites cuyos datos de efemérides actuales sean de buena calidad y con señales de referencia que sean adecuadas para la pareja de satélites a utilizar.

Las señales de referencia pueden aparecer en el satélite primario o en el adyacente. Si existen señales de referencia adecuadas en el satélite primario, este criterio no ha de dictar necesariamente la decisión sobre el satélite adyacente. También pueden utilizarse transmisores de referencia dedicados, fijos o transportables, para mejorar los resultados de la localización geográfica.

Un factor adicional que puede influir en la selección del satélite adyacente es la orientación de las líneas FDOA para la pareja de satélites elegidos en el momento de realizar las mediciones. A diferencia de las líneas TDOA, la orientación de las líneas FDOA para una determinada pareja de satélites varia significativamente en el transcurso de un periodo orbital (1 día)

La mejor elección es un satélite adyacente sin señales próximas a la señal interferente y a las señales de referencia. Para observar las actividades reales del transpondedor es recomendable registrar el transpondedor del satélite adyacente utilizando medios de grabación del espectro de frecuencia.

Si las mediciones se toman cuando las líneas FDOA son casi paralelas a las líneas TDOA, la zona resultante tendrá una forma muy alargada a lo largo de las líneas de TDOA constante. En dichas circunstancias, el operador debería optar entre seleccionar un satélite adyacente distinto o programar medidas adicionales a una hora en la que la orientación de las líneas FDOA sea más favorable.

5.1.5.4.3 Señales de referencia

Una señal de referencia ideal es un enlace ascendente de banda ancha con funcionamiento continuo, transmitido desde una ubicación geográfica conocida con precisión y que produzca una fuerte correlación entre los dos satélites utilizados. Dicha ubicación precisa puede obtenerse de la base de datos de estaciones terrenas, pero es preferible hacer una comprobación adicional mediante un receptor GPS portátil. Si las señales de referencia son abundantes, el operador debería tratar de utilizar señales de referencia con las características siguientes:

– que enlace ascendente se transmita desde una antena relativamente pequeña;
– que estén bien distribuidas geográficamente;
– que la modulación sea adecuada;
– que la frecuencia pertenezca a partes del transpondedor no utilizadas por los satélites adyacentes.

5.1.5.4.4 Datos de efemérides

La calidad de los datos de efemérides de los satélites primario y adyacente afecta directamente a la calidad del resultado. En la mayoría de los casos, el error de efemérides puede eliminarse en gran medida utilizando dos o más señales de referencia (para más información véase § 5.1.2.7.2). Si el dato de efemérides es especialmente malo, como puede ser inmediatamente después de haberse realizado maniobras orbitales o cuando la época de los datos de efemérides es anterior en algunos días a la fecha de las mediciones, las incertidumbres de la posición pueden ser de hasta varios cientos de kilómetros. En este caso, el operador debe tratar de obtener mejores datos de efemérides o utilizar otro satélite adyacente.

El operador del sistema de localización geográfica puede adquirir los datos de efemérides de la forma siguiente:

– de datos solicitados a operadores satelitales,
– de datos publicados de sitios en internet.

A continuación se contrastan los datos de efemérides con mediciones de localización geográfica de una estación conocida (por ejemplo, de referencia). Si la calidad del resultado no es suficiente, puede aplicarse una compensación del error de efemérides. Esta es una de las posibles formas de compensar los errores de efemérides del satélite.

Las mediciones de localización geográfica pueden realizare con tres o más estaciones de referencia. La compensación del error de efemérides corrige los datos de efemérides con un cálculo inverso a las mediciones de localización geográfica.

5.1.5.4.5 Establecimiento de transmisores de referencia dedicados adicionales

El operador de un sistema de localización geográfica puede considerar que, en algunas circunstancias, el número y distribución geográfica de las señales de referencia no sea suficiente ni produzca resultados precisos. En algunos satélites la mayoría de sus usuarios se encuentran en una o dos grandes ciudades, por lo que el número de señales de referencia disponibles para localización geográfica está muy limitado. Por tanto, es necesario que las administraciones establezcan transmisores de referencia dedicados adicionales para que los operadores de sistemas de localización geográfica dispongan de señales de referencia alternativas. Dichos transmisores deberían satisfacer los requisitos siguientes:

– cumplir los requisitos técnicos de los operadores de satélites;

– poder apuntar a cualquier satélite OSG visible en el arco de la órbita geoestacionaria;

– estar ampliamente distribuidos geográficamente;

– tener antenas de tamaño relativamente pequeño;

– utilizar un o varios tipos de modulación adecuada.

Es recomendable que las administraciones colaboren en el establecimiento de transmisores de referencia dedicados adicionales con ubicaciones diversas y que éstos puedan utilizarse como referencia cuando sea necesario

Antes de utilizar los transmisores de referencia dedicados adicionales para transmitir hacia un determinado satélite, el operador satelital debe dar su consentimiento. También puede ser necesario realizar determinadas pruebas técnicas antes de la transmisión.

5.1.5.4.6 Transmisor de referencia transportable

En general, resulta muy difícil encontrar un transmisor cuando emite hacia un satélite OSG, especialmente en zonas urbanas. Dos son los factores más importantes para que eso ocurra. En primer lugar, el bloqueo de las ondas radioeléctricas por los edificios, en segundo lugar, la normalmente alta directividad de las antenas con lóbulos laterales muy débiles en la dirección del terreno. Por tanto, las mediciones TDOA y FDOA resultan de utilidad para, con la ayuda de transmisores transportable, identificar al transmisor responsable de la interferencia perjudicial.

Tal como se ha mencionado en la sección precedente, antes de transmitir hacia un determinado satélite es necesario el consentimiento del operador del mismo, ya que puede ser necesario realizar algunas pruebas antes de la transmisión.

Teóricamente, dada una pareja de satélites, dos estaciones terrenas que transmitan en frecuencias distintas generan los mismos valores de TDOA y dos valores de FDOA de escasa diferencia. Cuanto más cercano esté el transmisor de referencia de la fuente de interferencia desconocida, mayor será la precisión del algoritmo de localización geográfica.

Antes de utilizar un transmisor de referencia transportable el operador debe haber aprovechado todos los transmisores de referencia fijos disponibles a fin de minimizar las inexactitudes de los resultados y el tamaño de la zona resultante. Seguidamente, debe obtenerse el consentimiento del operador de satélite previo a la transmisión teniendo en cuenta los parámetros técnicos de ésta. Finalmente, se aplican los dos pasos siguientes:

Paso 1: desplazar el transmisor de referencia transportable al centro de la zona resultante y transmitir la señal de referencia tal como se haya acordado con el operador del satélite. Se notifica entonces al operador del sistema de localización geográfica de que puede realizar las mediciones de localización geográfica. También debe notificársele la posición exacta del vehículo.

Paso 2: las mediciones de localización geográfica deberían generar un resultado distinto cuando se utilice el transmisor de referencia transportable.

Los resultados se refinan después del Paso 2 y pudiendo repetirse los pasos para obtener resultados incluso mejores.

El operador del transmisor de referencia transportable debe mantener un estrecho contacto con el operador del sistema de localización geográfica. En la práctica, la elección de la ruta de la transmisión se verá afectada por muchos otros factores que el operador debe tener en cuenta, tales como el estado y regulación del tráfico.

5.1.6 Ejemplos de soluciones técnicas

5.1.6.1 Ejemplo de estación de comprobación técnica de radiocomunicaciones espaciales

En este apartado se describe los elementos principales que componen una estación de comprobación técnica de servicios de radiocomunicaciones espaciales. En principio, técnicamente se compone de cuatro partes principales:

Parte 1: Sistema de antena (véase § 5.1.6.1.1)

Una o más antenas para cubrir todas las bandas de frecuencias de telecomunicaciones y radiocomunicaciones espaciales de interés (antenas directivas y omnidireccionales).

Parte 2: Facilidades de recepción (véase § 5.1.6.1.2)

Sistemas de alimentación de las antenas, unidad de polarización, conversores reductores, sistemas de calibración, fuente de frecuencia de referencia.

Parte 3: Equipo de comprobación técnica (véase § 5.1.6.1.3)

Sistemas de medición automáticos y manuales y facilidades analíticas tales como analizadores de señal, receptores, sistemas de registro espectral y analizadores de modulación que forman parte del equipo de comprobación técnica.

Parte 4: Elementos de control (véase § 5.1.6.1.4)

Para permitir procedimientos de medida automáticos, los elementos de control incluyen el hardware y software de control del apuntamiento de la antena, el ajuste del sistema de recepción y el ajuste del equipo de comprobación técnica.

Generalidades

Ubicación de la estación de comprobación técnica:

La estación de comprobación técnica debe estar tan lejos como sea posible de zonas urbanas e industriales, en las que existe ruido general por la actividad humana, teléfonos celulares y redes de área local radioeléctricas. No debe haber enlaces fijos que crucen el emplazamiento. Debe declararse una zona protegida alrededor de la estación de comprobación técnica que debe mantenerse libre de transmisores terrestres y enlaces fijos.

El terreno alrededor de la estación de comprobación técnica debe ser llano, sin que colinas o edificios obstruyan la visibilidad.

Configuración del emplazamiento:

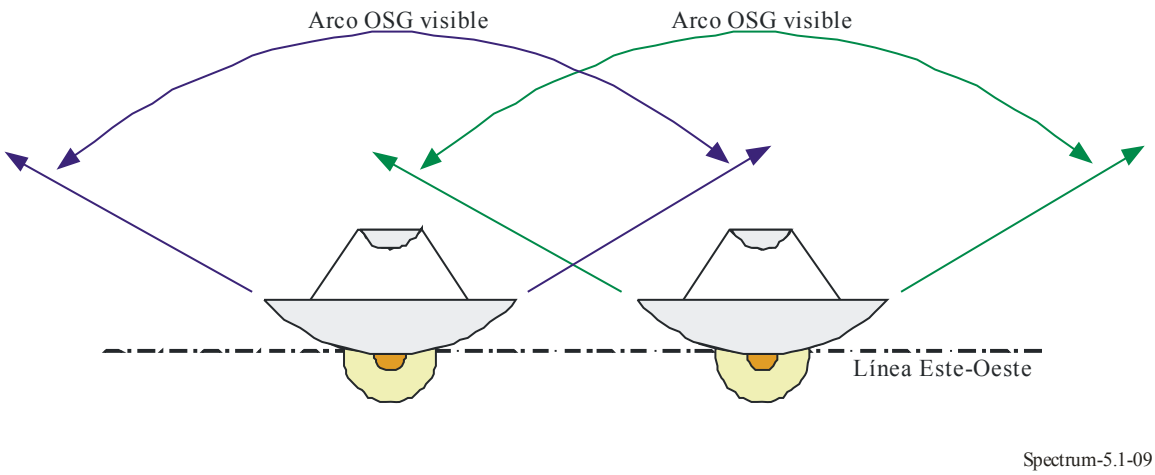
La ubicación de las antenas y de los edificios depende principalmente del objeto de la comprobación técnica (satélites OSG o no-OSG), así como de la parte de la órbita geoestacionaria de interés. Deben preverse ampliaciones futuras.

En condiciones abiertas y de terreno plano, las antenas pueden disponerse en línea, por ejemplo, en una configuración este-oeste.

La distancia entre antenas debe ser suficiente en la dirección hacia los satélites OSG, manteniendo la libre de obstáculos la visión del arco geoestacionario (véase la Fig. 5.1-9).

FIGURA 5.1-9

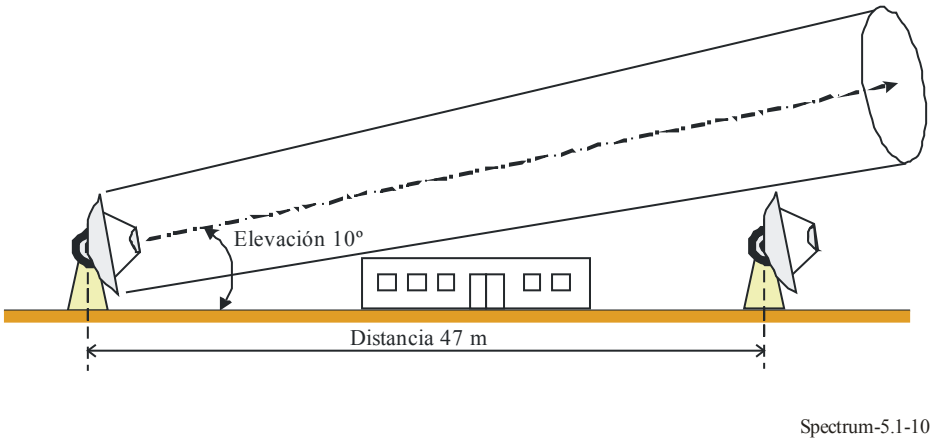
Separación entre antenas de comprobación técnica de satélites OSG



Para una recepción sin obstáculos desde satélites no-OSG, la zona alrededor de la antena desde estar libre de obstáculos en todas las direcciones (antenas, edificios), al menos hasta la elevación mínima requerida (véase la Fig. 5.1-10).

FIGURA 5.1-10

Elevación de antenas de comprobación técnica de satélites no-OSG



En el Cuadro 5.1-6 se muestra la distancia ideal entre dos antenas (de 9 m de diámetro cada una) para tener visibilidad directa con los satélites. El ángulo de elevación es el menor posible para no bloquear la visibilidad del satélite.

Para optimizar el número de antenas necesarias sin degradar significativamente la calidad de funcionamiento, es recomendable poder acceder a varias bandas de frecuencia. Un sistema de medición para localización geográfica requiere dos antenas, cubriendo ambas la banda de frecuencias de interés.

Un conjunto de 3 antenas (1 en banda C/Ku, 1 en banda L/S y 1 en banda Ka) permite recibir, por ejemplo, enlaces de radiodifusión, redes por satélite y, opcionalmente, señales de control y prueba satelitales. También es posible combinar 4 ó 5 bandas de frecuencia utilizando únicamente una antena. Esto puede lograrse

mediante una antena Cassegrain con un sistema de guiaondas y dos cabinas para alojar equipos o mediante un sistema de alimentación de antena rotatorio.

La desventaja de dicha antena multibanda es que en cada instante sólo puede utilizarse una banda de frecuencias.

CUADRO 5.1-6

Distancia entre dos antenas (del mismo tamaño) para mantener visibilidad sin obstáculos con los satélites

Elevación (grados)	Distancia (m)
5	99
10	47
15	30
20	22
25	18
30	16

5.1.6.1.1 Sistema de antena

Conceptos asociados a las antenas

– Antena de movimiento limitado
– Antena de base con capacidad de giro sobre un acimut variable continuo > 180º
– Antena de movimiento completo con eje de elevación por encima del eje de acimut
– Antena de movimiento completo con eje de elevación por encima del eje de acimut y por encima del eje de inclinación
– Antena de movimiento completo con eje de oblicuo por encima del eje de acimut y por encima del eje de inclinación
– Antena de movimiento completo con montaje X-Y
– Hexápodo

La comprobación técnica de satélites OSG y no-OSG requiere distintos tipos de antenas.

Los más utilizados se describen a continuación.

Antenas para comprobación técnica de satélites OSG

Para la comprobación técnica de satélite OSG pueden utilizarse antenas con una velocidad baja tanto en acimut como en elevación.

Los sistemas de seguimiento utilizados son los siguientes:

– Seguimiento informatizado con dos elementos de línea (TLE, *two line elements*)
– Seguimiento por pasos
– Seguimiento monoimpulso

Antenas para comprobación técnica de satélites no-OSG

Deben utilizarse antenas que permitan movimiento completo, con una velocidad de desplazamiento superior y con sistema de seguimiento.

La velocidad y aceleración requeridas son función del tipo de pedestal (elevación por encima del acimut o montaje X-Y).

Los sistemas de seguimiento pueden ser:

– Seguimiento informatizado con dos elementos de línea (TLE, *two line elements*)

– Seguimiento monoimpulso

Antenas con eje de elevación por encima del eje de acimut

Este tipo de antena puede utilizarse para todos los tipos de satélites con órbitas que presentan una elevación de hasta 85º. La antena tiene en su cenit un punto crítico sin visibilidad. Ofrece diversas alternativas para el montaje del equipo de recepción, por ejemplo, una cabina para alojar equipos directamente adosada a la parábola.

La utilización de este tipo de antenas para el seguimiento de órbitas satelitales de hasta 85º de elevación requiere una velocidad en acimut de aproximadamente 15º/s, en función de la altitud del satélite.

En el caso de satélites de órbita baja con ángulos de elevación elevados existe un alto riesgo de pérdida de contacto con el satélite si la velocidad en acimut no es suficiente.

En el diagrama de la Fig. 5.1-13 se muestra la relación entre la órbita del satélite, la velocidad en acimut y el ángulo de elevación.

Para poder reducir la velocidad en acimut, las antenas pueden utilizar el llamado eje de inclinación. Los sistemas con eje de inclinación desplazan el pedestal de la antena completo en sentido oblicuo.

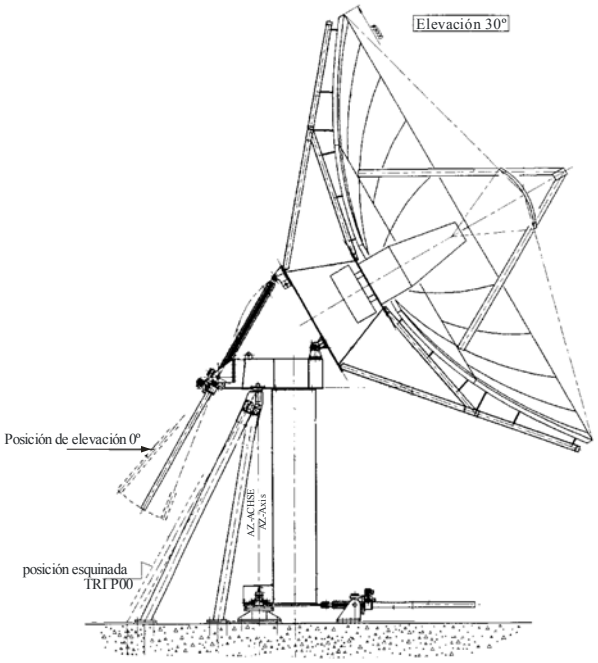
Ello permite el seguimiento de los satélites sin interrupción incluso a una velocidad inferior en acimut.

La órbita del satélite debe ser bien conocida (por ejemplo, de elementos de dos líneas) para poder calcular anticipadamente el ángulo de inclinación. La inclinación no puede utilizarse con satélites cuyos datos orbitales son desconocidos.

Para dichos satélites puede utilizarse el seguimiento mediante monoimpulsos.

FIGURA 5.1-11

Antena de 9 m de movimiento limitado con pedestal Kingpost y gato de tornillo motorizado en acimut y elevación

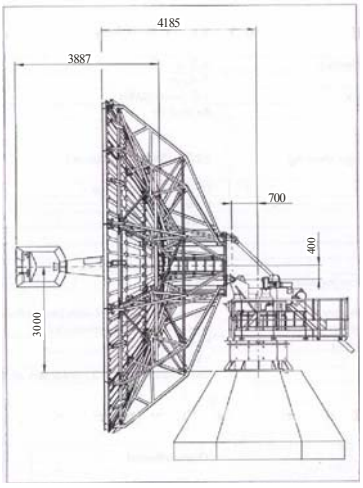


Spectrum-5.1-11

FIGURA 5.1-12

Ejemplo de antena de 9,3 m de cabeza giratoria





Versión de antena de 9.3 m sobre tejado (elevación =0°)

Spectrum-5.1-12

FIGURA 5.1-13

Relación entre órbita del satélite, ángulo de elevación y velocidad en acimut para el tipo de antena con eje de elevación por encima del eje del acimut

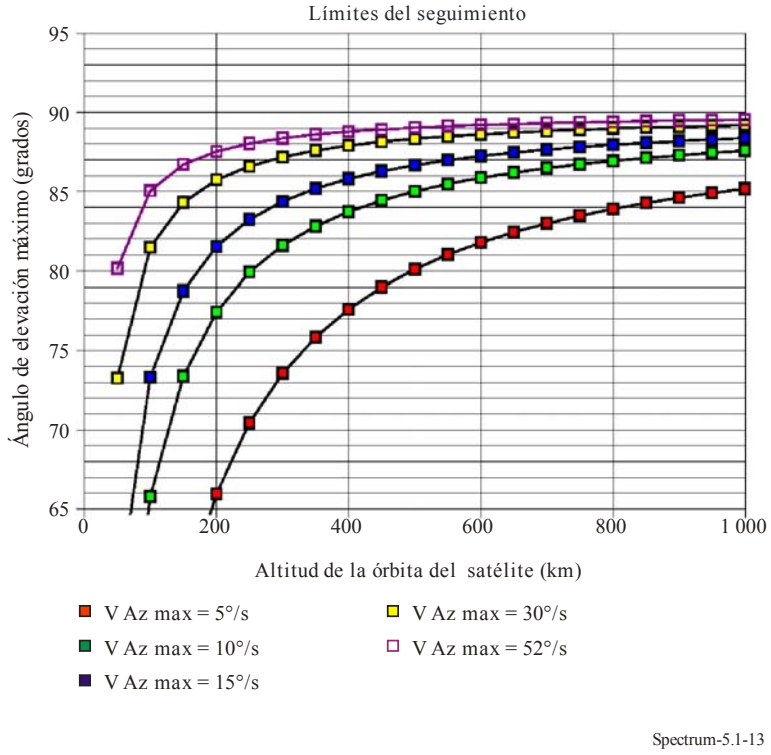


FIGURA 5.1-14

Antena Cassegrain de doce metros con elevación por encima del pedestal en el plano del acimut y dos cabinas adosadas a la parábola para alojar los equipos de recepción



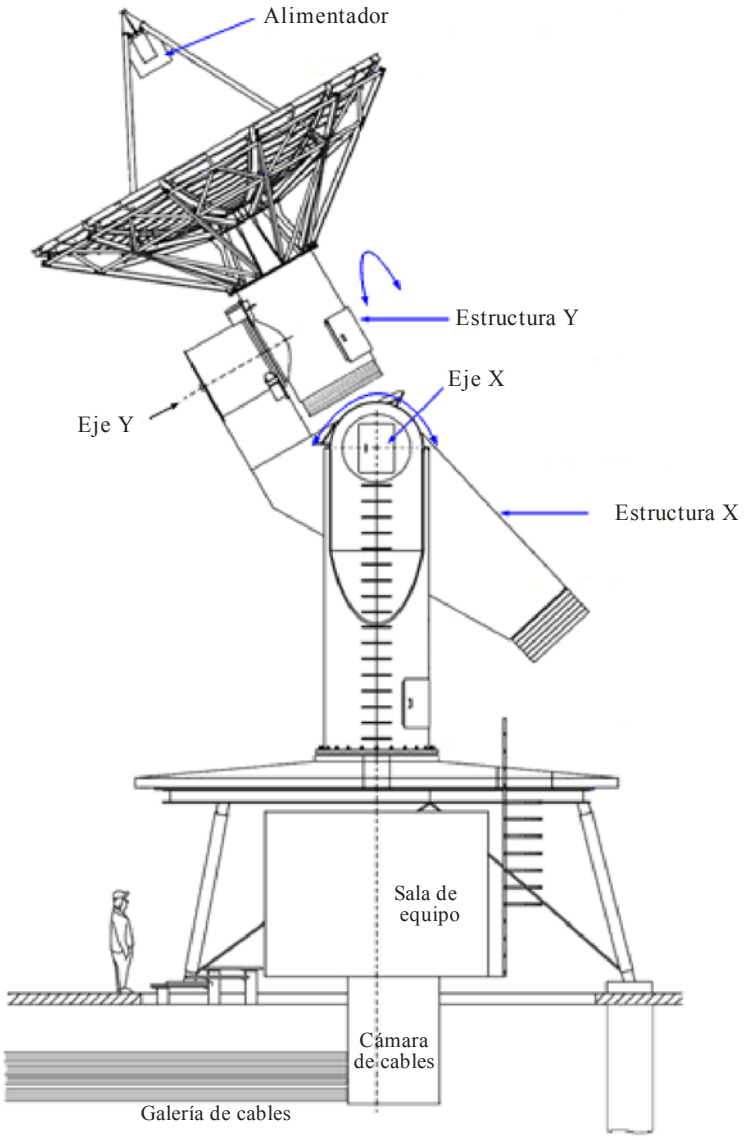
Spectrum-5.1-14

Antena X-Y

Este tipo de antena tiene la ventaja de que puede hacer seguimiento a cualquier tipo de órbita sin puntos críticos de falta de cobertura en su cenit. La especial construcción del eje sólo necesita velocidades y aceleraciones bajas ($\leq 3°/s$). Su inconveniente es lo limitado del espacio a la espalda de la antena para equipo de recepción.

FIGURA 5.1-15

Antena X-Y de siete metros y foco primario



Especificaciones de la antena

En el Cuadro 5.1-7 se incluyen especificaciones técnicas de las antenas de comprobación técnica de satélites. Puesto que cada estación terrena tiene sus propios requisitos, las cifras del cuadro deben considerarse especificaciones mínimas típicas. Los parámetros reales deberán establecerse de acuerdo con los requisitos de medida específicos de cada caso.

CUADRO 5.1-7

Especificaciones técnicas de las antenas de comprobación técnica de satélites

Parámetro		**Valores de calidad de funcionamiento**		
		Bandas L/S/C		**Bandas L/S/C**
Gama de frecuencias		Banda L: 1 452-1 492 y 1 530-1 800 MHz Banda S: 2 100-2 300 MHz 2 500-2 690 MHz Banda C: 3 400-4 200 y 4 500-4 800 MHz	10,70-12,75 GHz	17,30-21,20 GHz
Nivel de señal máximo a la entrada del amplificador de bajo ruido (LNA) (dBm)		≤ –30	≤ –30	≤ –30
Medición de la *d.f.p.* (con *C/N* mínima de 23 dB)		–155 dBW/m^2 en una anchura de banda de 4 kHz	–165 dBW/m^2 en una anchura de banda de 4 kHz	–160 dBW/m^2 en una anchura de banda de 4 kHz
Precisión de la medición de la d.f.p. (dB)		±1	± 1	± 1
Factor de calidad (*G*/*T*) (dB/K)		L = 20 S = 23 C = 28	37	33
Exactitud de la frecuencia de referencia		Envejecimiento: una parte de 10^{10} por día, Temperatura: una parte de 10^9, cambio total de 0° a 50°.		
Polarización		X, Y, circular levógira (LHCP), circular dextrógira (RHCP)		
Resolución de frecuencia (kHz)		1		
Margen dinámico (dB)		≥60		
Antena	Diámetro (m)	≥ 9	≥ 9	≥ 4.5
	Exactitud del apuntamiento (grados)	0,15-0,04	0,02-0,017	0,025-0,02
	Anchura del haz (grados)	1,6-0,5	0,22-0,18	0,27-0,22
	Velocidad del seguimiento por pasos de satélites OSG	0.02-2/ s, control manual y seguimiento automático por escalones (en función de la longitud y latitud del emplazamiento de la antena)		
	Cobertura de satélites OSG (grados)	EL: 0 a 90, AZ: ± 60		
	Cobertura de satélites no-OSG (grados)	EL: 0 a 85, AZ: ± 270°(cobertura completa en acimut 360), almacenar a 90		

NOTA 1 – las gamas de frecuencias en este Cuadro y en § 5.1, tales como las bandas L, S, C, no están definidas en el Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT, pero son ampliamente utilizadas por la comunidad de comunicaciones por satélite. Estas gamas de frecuencias pueden ser definidas de forma ligeramente distinta en función de la fuente

NOTA 2 – para la medición de emisiones fuera de banda, deben ampliarse las bandas de frecuencias comerciales enumeradas. Las emisiones terrenales intensas deben bloquearse con filtros.

5.1.6.1.2 Facilidades de recepción

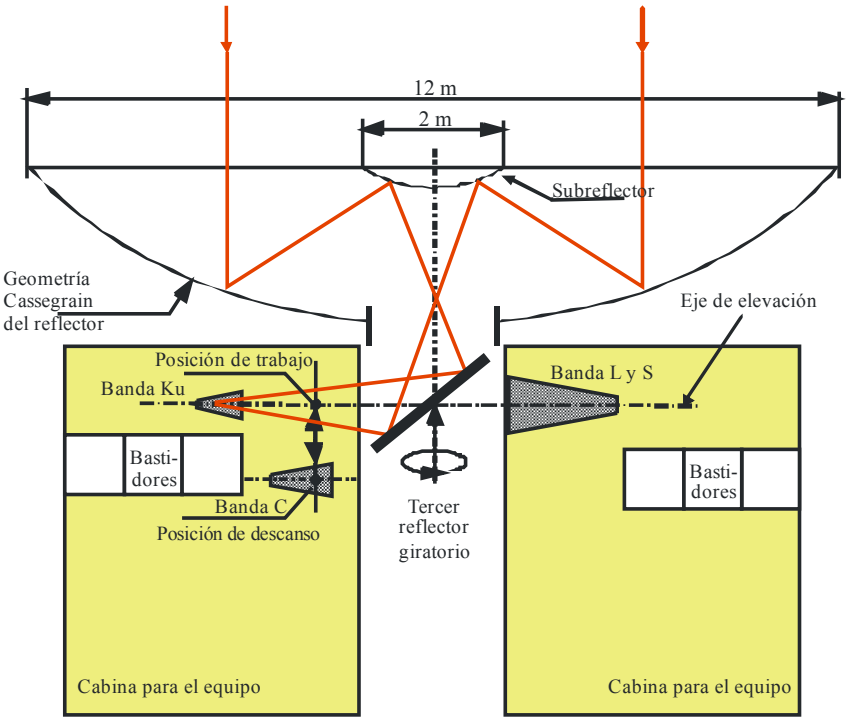
La ventaja de los sistemas de haces conformados mediante guiaondas es que el haz puede orientarse hacia distintos lugares manteniendo unas bajas pérdidas de inserción.

Los alimentadores pueden alojarse en cabinas con suficiente espacio para la instalación y mantenimiento del equipo y del aire acondicionado.

Los sistemas de alimentación de las antenas de comprobación técnica de satélites son relativamente singulares, ya que sólo se utilizan en recepción y generalmente cubren una amplia gama de frecuencias.

FIGURA 5.1-16

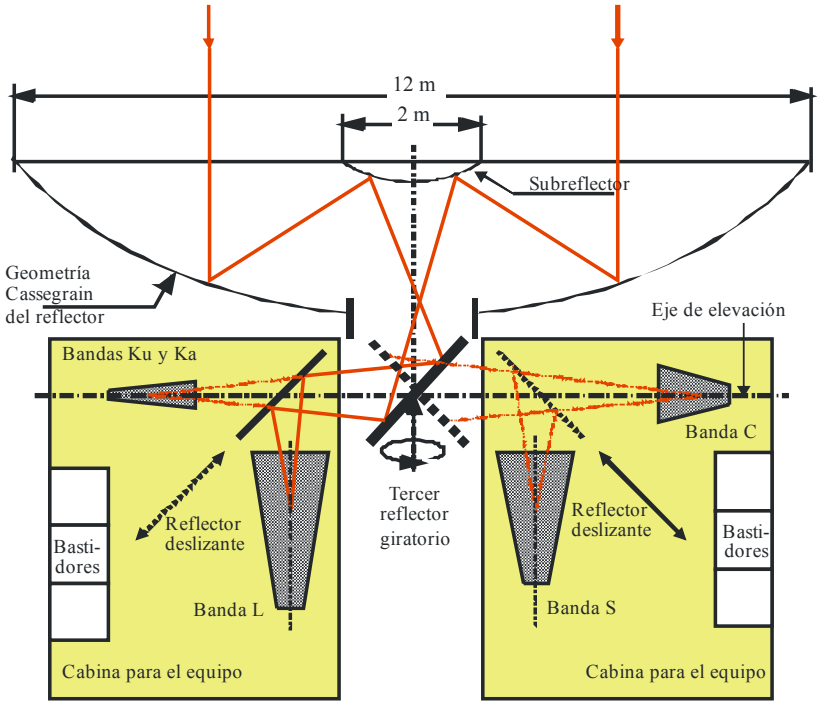
Ejemplo de varios alimentadores desplazables y reflector de selección de 3 bandas de frecuencias en una antena de 12 m y haces conformados con guíaondas



Spectrum-5.1-16

FIGURA 5.1-17

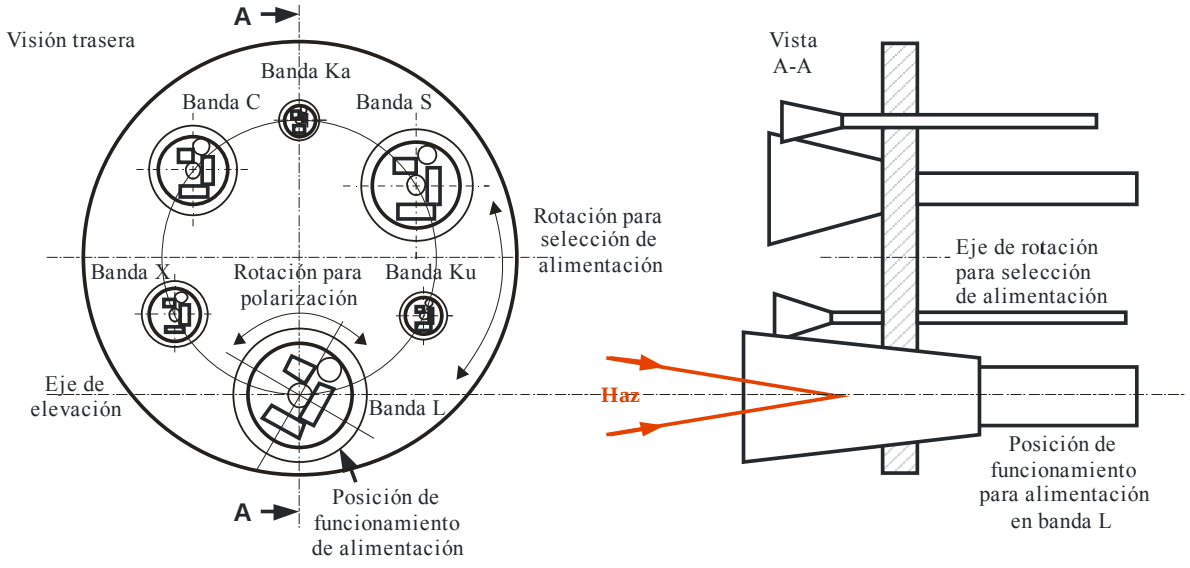
Ejemplo de alimentadores fijos con reflectores desplazables de selección de 5 bandas de frecuencia en una antena de 12 m



Spectrum-5.1-17

FIGURA 5.1-18

Ejemplo de sistema giratorio de alimentación múltiple con 6 alimentadores para una antena de haces conformados con guiaondas



Spectrum-5.1-18

Ejemplo: sistema rotatorio de alimentación múltiple con 8 alimentadores para una antena de alimentación en el foco principal

Gama de frecuencias: 1-26,5 GHz completa.

Los alimentadores 1 a 6 (gama de frecuencias 1-12,75 GHz) son dipolos cruzados con diseño de cavidad

Los alimentadores 7 y 8 (gama de frecuencias 12.5-26.5 GHz) son antenas de bocina.

Dimensión de la caja de intemperie: aproximadamente 700 mm × 700 mm × 500 mm [*ancho* × *fondo* × *alto*].

FIGURA 5.1-19

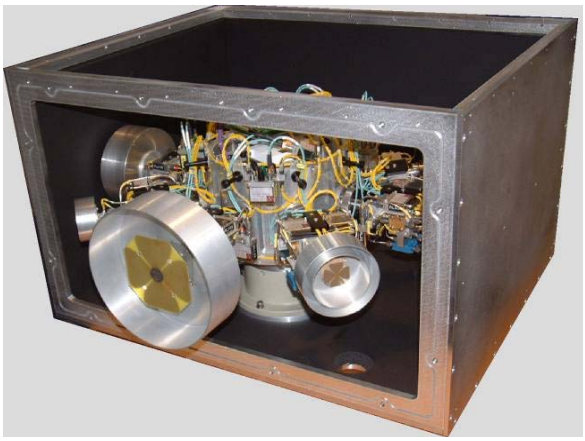
Alimentador múltiple montado en foco principal



Spectrum-5.1-19

FIGURA 5.1-20

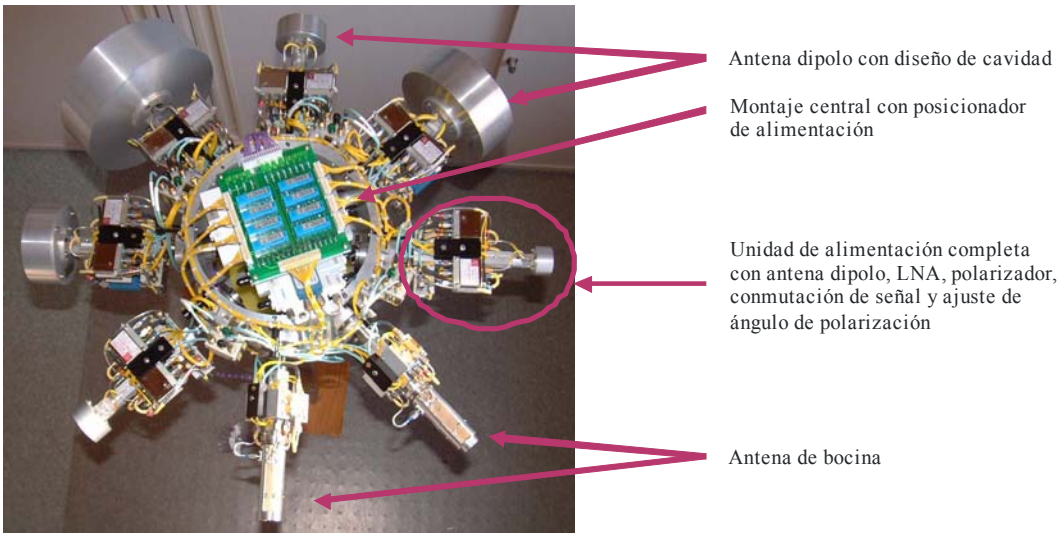
Alimentador múltiple en caja de intemperie



Spectrum-5.1-20

FIGURA 5.1-21

Sistema de alimentación sin caja de intemperie montado alrededor del posicionador de alimentación



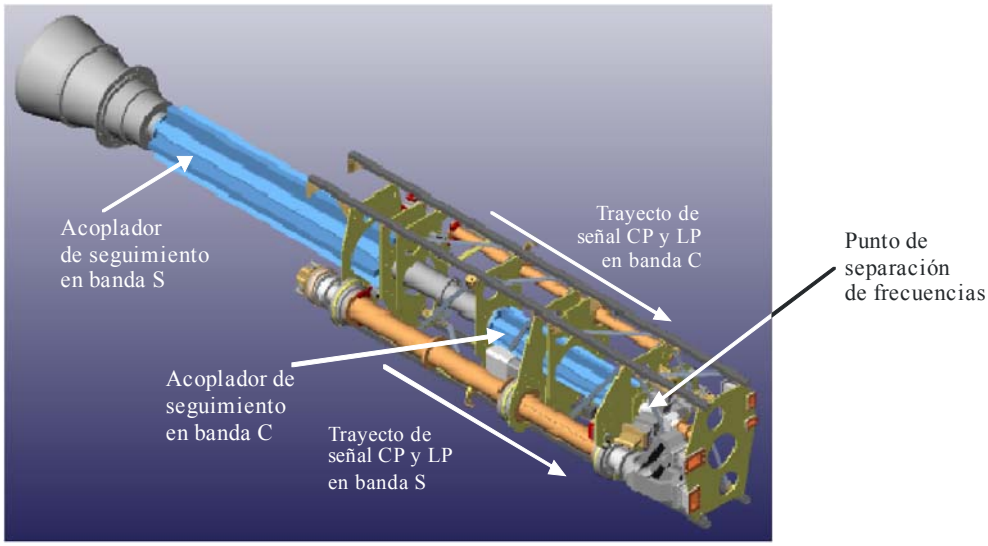
Spectrum-5.1-21

Todos los alimentadores están diseñados con técnica coaxial para polarización lineal y circular, y ajuste de ángulo de polarización de ±95°.

FIGURA 5.1-22

Ejemplo de combinación de 3 bandas de frecuencias en una antena de 12 m

Sistema de alimentación para antenas Cassegrain de 11 m y mayores. Conmutación entre polarización circular (CP) y lineal (LP), ajuste independiente de polarización lineal y seguimiento monoimpulso en las dos bandas.
Banda S: 2,1-2,7 GHz
Banda C: 3,4-4,8 GHz

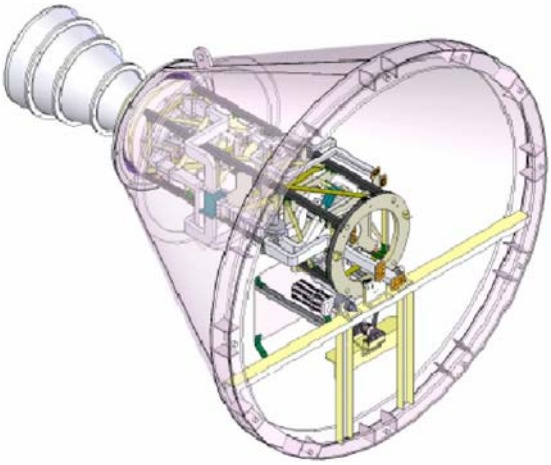


Spectrum-5.1-22

FIGURA 5.1-23

Ejemplo de alimentación en 2 bandas de frecuencias próximas

Sistema de alimentación para configuraciones de antena Cassegrain de 9 m y mayores.
Banda C: 3,4-4,2 GHz, polarización circular/lineal
Banda X: 7,25-8,4 GHz, polarización circular
Banda Ku: 10,9-12,75 GHz, polarización circular/lineal



Spectrum-5.1-23

Equipo de recepción

El equipo de recepción consta de los elementos que figuran en el Cuadro 5.1-8:

CUADRO 5.1-8

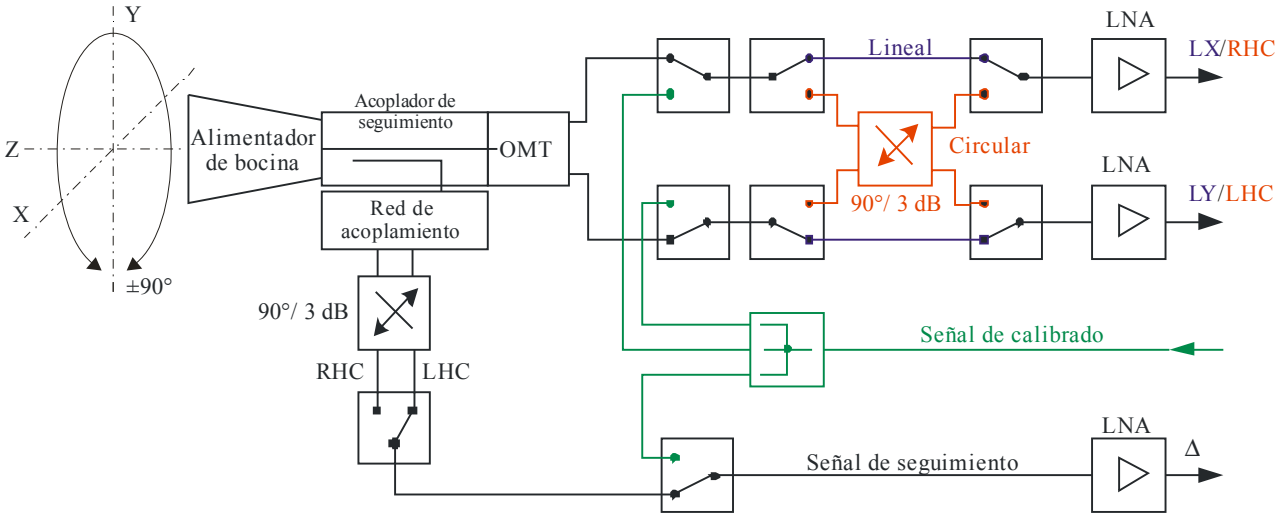
Equipo de recepción de un sistema de antena

Alimentación	Bocina-, dipolo- o antena dipolo cruzada y red de acoplamiento
Acoplador de seguimiento	Acoplamiento del modo TE21 para seguimiento de antena monoimpulso
Ajuste de polarización	Girador para ajustar el ángulo de polarización
Transductor ortomodal (OMT, *Ortho mode transducer*)	Separación de los planos de polarización X e Y en dos canales
Amplificador de bajo ruido	Primer amplificador con factor de ruido tan bajo como sea posible
Polarizador	Combina los canales X e Y con polarización circular dextrógira (RHCP) y levógira (LHCP) en caso de polarización circular
Conversor reductor	Convierte la señal de radiofrecuencia en una FI de banda ancha y/o una FI de banda estrecha, por ejemplo, FI de 70 MHz
Conmutación y postamplificación	Conmuta los distintos trayectos de señal y amplifica la FI para la transmisión al edificio principal del complejo

En función del tipo de antena, estos componentes pueden estar separados espacialmente.

FIGURA 5.1-24

Ejemplo de diagrama de bloques de un sistema de alimentación con acoplador de seguimiento y polarizador



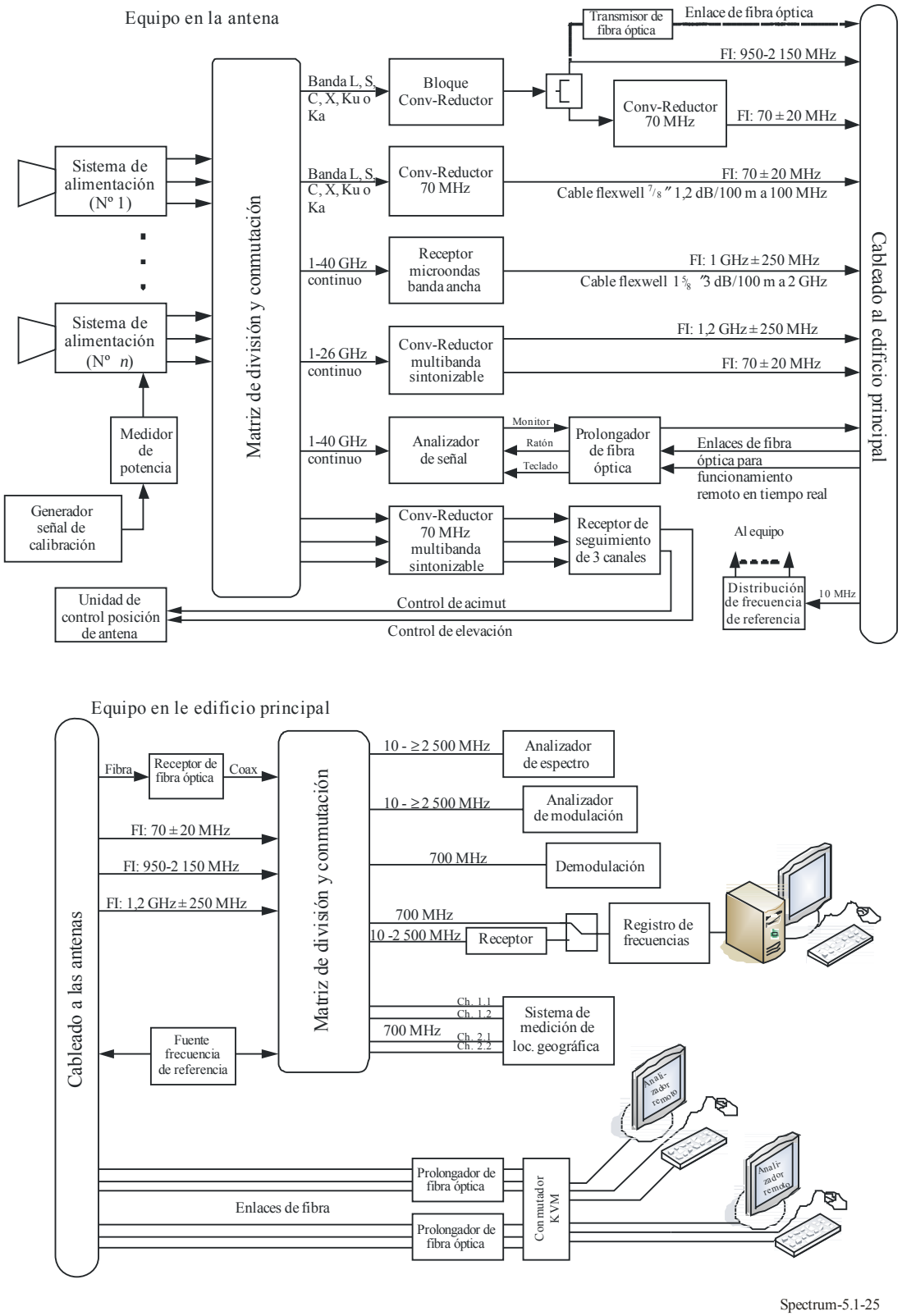
Spectrum-5.1-24

5.1.6.1.3 Equipo de comprobación técnica

Los diagramas de la Fig. 5.1-25 muestran ejemplos de integración del equipo de comprobación técnica.

FIGURA 5.1-25

Integración del equipo de comprobación técnica



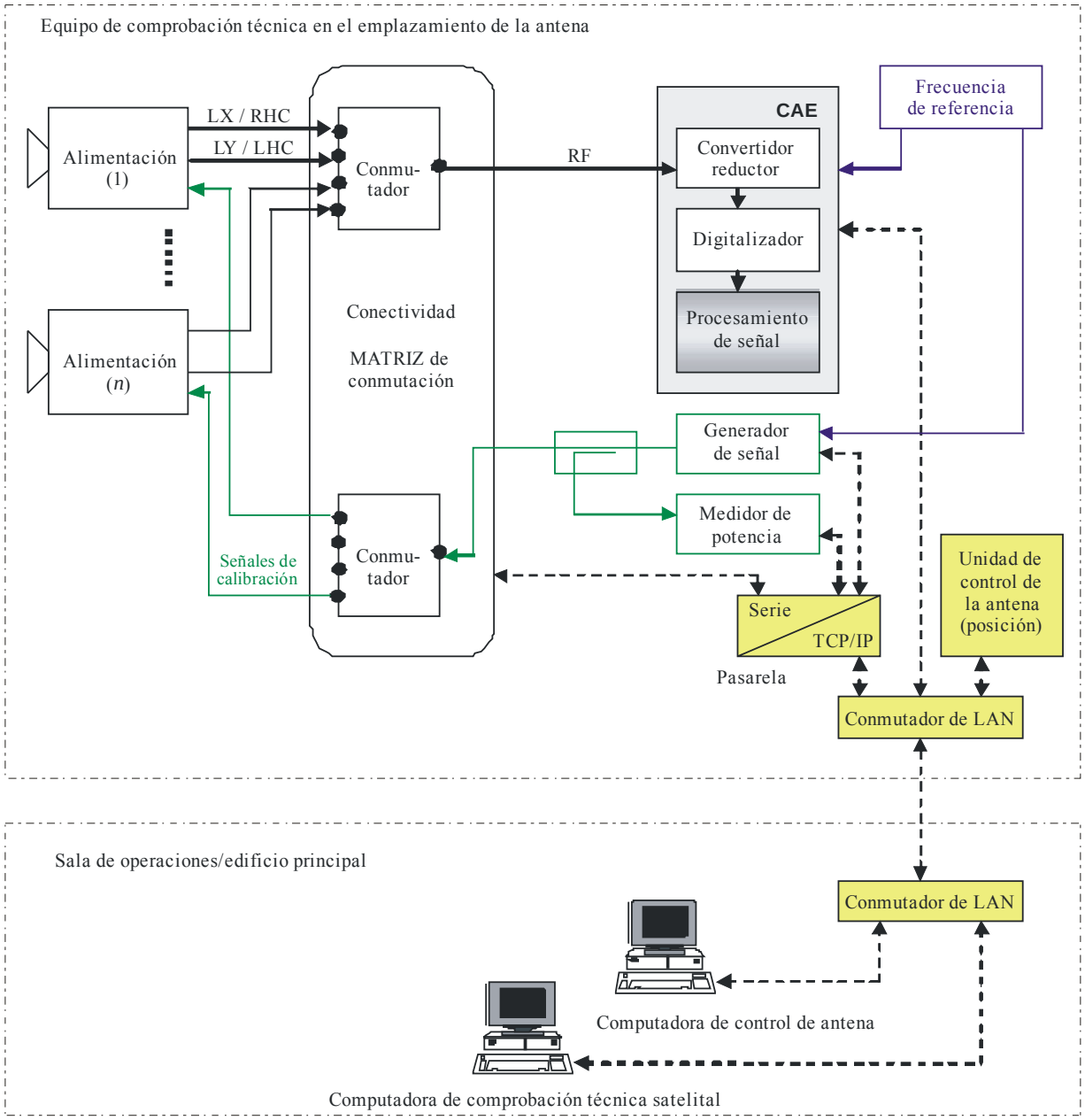
Spectrum-5.1-25

Sistema de comprobación técnica de satélite automatizada

En la Fig. 5.1-26 se muestra un sistema de comprobación técnica automatizada para la adquisición de portadora. La arquitectura del equipo de adquisición de portadora (CAE, *carrier acquisition equipment*) para comprobación técnica satelital utiliza un sistema de calibración y puntos de inyección que también se muestran en la figura. El medidor de potencia controla la señal de calibración procedente del generador de señal.

FIGURA 5.1-26

Ejemplo de un equipo de comprobación técnica de satélite automatizada



Spectrum-5.1-26

El equipo de adquisición de portadora (CAE) puede realizar las siguientes funciones:

– adquisición en las bandas de frecuencia satelitales L, S, C, Ku y Ka;

– detección de todas las portadoras con un nivel superior al ruido de fondo (típicamente de 6 a 10 dB por encima de éste);

– obtención de parámetros de RF de cada portadora;

– clasificación completa de la portadora, incluyendo todos los parámetros digitales utilizados por el modulador así como la norma utilizada.

El equipo de adquisición de portadora deberá poder analizar y clasificar portadoras con una anchura de banda de hasta 80 MHz; ello incluye a la mayoría de los transpondedores de uso civil.

Cuando se conoce el tráfico del satélite, el equipo de adquisición de portadora detecta portadoras no deseadas y, opcionalmente, localiza los transmisores utilizando métodos FDOA y TDOA.

Para la comprobación técnica de satélites, es recomendable realizar las mediciones siguientes:

– Mediciones en radiofrecuencia:
  - Potencia de la portadora en el equipo
  - p.i.r.e. de la portadora en el satélite
  - Relación C/N_0 de la portadora
  - Frecuencia de la portadora mediante los métodos de baricentro, recuperación, forma de portadora y detección de cresta
  - Anchura de banda de la portadora: por el método de *x* dB, método del β% de la potencia total, o a partir del cálculo de la velocidad de símbolos
  - Observaciones del espectro y herramientas de análisis (marcadores, zoom, espectrograma, selectores)
  - p.i.r.e. del transpondedor en el satélite.

– Mediciones digitales:
  - Caracterización de la portadora
  - Tipo de modulación
  - Velocidad binaria (velocidad de transmisión)
  - Tasa de FEC
  - Tasa Reed Solomon
  - Norma utilizada
  - Diagrama de demodulación de la portadora.

– Detección de portadora basada en la detección de la densidad de potencia (típicamente de 6 a 10 dB por encima del ruido de fondo):
  - Actualización subsiguiente de la base de datos
  - Detección de la portadora definida internamente (la capacidad de rechazo de portadora será mayor de 13 dB).

– Observaciones del espectro, observaciones virtuales del espectro simulando la *G/T* del usuario final.

– Espectrograma rápido para visualizar derivas rápidas de intervalos (por ejemplo, acceso AMDT MF).

– Parámetros orbitales (precisión de la posición orbital de al menos ±0.1°).

– La calibración se utilizará para determinar la ganancia de la cadena de recepción.

El software de la computadora de comprobación técnica de satélite debe realizar mediciones interactivas y automatizadas.

Las mediciones interactivas permiten al operador analizar rápidamente las señales. Incluyen observaciones de varias bandas en diversos formatos, traspaso de señales para la medición de portadoras y control del analizador de espectro y, opcionalmente, del receptor, grabador de cintas, impresora y trazador gráfico.

Las mediciones automáticas deben producirse cuando ocurren determinados eventos (véase la Nota 1) o ser programadas sin que se requiera la presencia de un operador. La programación de tareas permite coordinar la presencia de señales, las mediciones de portadoras, la medición de la ocupación del espectro y las mediciones estadísticas.

NOTA 1 − Por ejemplo, el registro automático de una señal objetivo y de una señal de referencia pueden iniciarse en cuanto se detecta una señal no deseada. Ello sirve de referencia al módulo de localización geográfica.

En la Fig. 5.1-27 se muestra un ejemplo de pantalla de sistema de comprobación técnica con información del espectro y un espectrograma.

FIGURA 5.1-27

Ejemplo de pantalla de comprobación técnica en una computadora de comprobación técnica satelital



Spectrum-5.1-27

5.1.6.1.4 Facilidades de control

Modos de funcionamiento de un sistema de control de antena

El funcionamiento de un sistema de comprobación técnica de señales radioeléctricas espaciales requiere un control eficiente y sencillo de las antenas. Es recomendable disponer de un amplio número de modos de

funcionamiento que permitan apuntar eficientemente la antena hacia constelaciones de satélites de difícil acceso.

En el Cuadro 5.1-9 se enumeran las funciones de control de antena más comunes.

CUADRO 5.1-9

Modos de funcionamiento de un sistema de control de antena

Modos	Descripción	Comentario
PRESET	Movimiento hacia una posición predefinida Entrada: valores de acimut y elevación	
GEO PRESET	Movimiento hacia una posición predefinida Entrada: posición del satélite, por ejemplo, 19,2° E	Fijar la antena a un posición de la OSG sin cálculo de valores de acimut y elevación
POSITION	Movimiento en un ángulo definido por el usuario alrededor de la posición real de la antena	Mover la antena en Acimut y elevación mediante 4 pulsadores con flechas o con botones de ajuste manual
RATE	Movimiento a velocidad constante definida por el usuario	Principalmente para mediciones de calibración y prueba
PROGRAM TRACK	Seguimiento de un objeto a lo largo de un trayecto predefinido con registros de datos de acimut, elevación y tiempo	
TLE TRACK	Seguimiento de un objeto a lo largo de un trayecto predefinido con datos orbitales TLE de la NORAD	
STAR TRACK	Seguimiento de objetivos astronómicos	Opción para mediciones de calibración y prueba
AUTO-TRACK	Seguimiento de un objeto utilizando señales de error de seguimiento (seguimiento monoimpulso)	Se necesita un acoplador para seguimiento monoimpulso en el sistema de alimentación y un receptor de seguimiento monoimpulso
STEP TRACK	Seguimiento de un objeto utilizando un receptor de seguimiento por pasos	Se necesita un receptor de seguimiento por pasos pero sin otros componentes adicionales en el sistema de alimentación
ORBIT PREDICTION TRACKING	Seguimiento por pasos inteligente	Opción para mejorar la precisión del apuntamiento del seguimiento por pasos
MEMORY TRACK	Seguimiento utilizando los últimos datos de posición registrados del satélite	
SECTOR SCAN	Exploración horizontal y vertical de un sector definido por el usuario	De utilidad para encontrar un satélite, por ejemplo, un satélite en órbita muy inclinada
SEARCH SPIRAL	Espiral pulsante alrededor de la posición actual	De utilidad para encontrar un satélite, por ejemplo, un satélite en órbita muy inclinada
GEOSYNC	Apuntamiento a una posición predefinida en la OSG y movimiento a lo largo del arco de la OSG	Movimiento manual con pulsadores este / oeste a lo largo del arco de la OSG

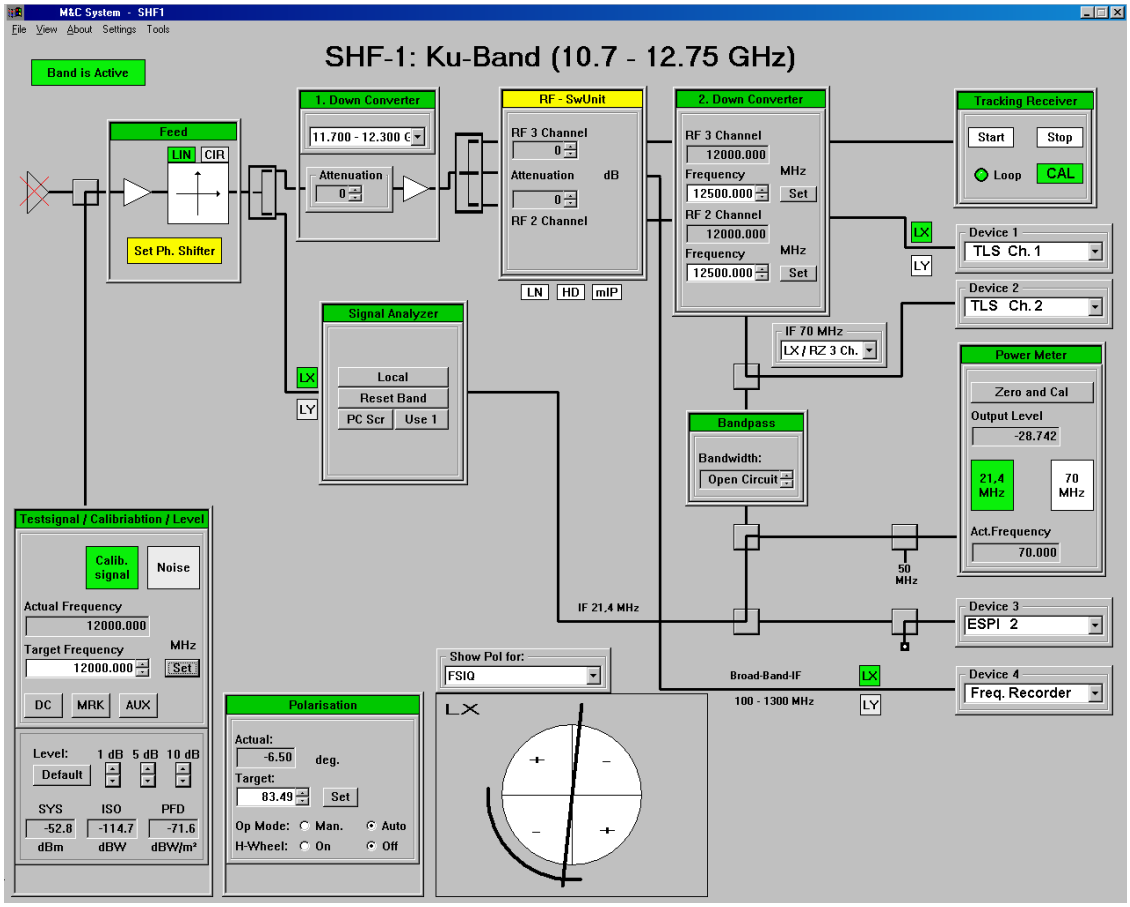
Supervisión y sistema de control

El sistema de supervisión y control es un sistema informatizado centralizado para controlar todas las facilidades de la estación de comprobación técnica. Mediante un sistema de interfaz gráfica de usuario (GUI) se puede representar en cada puesto de operador disponible de forma esquemática y ordenada el equipo y su estado de conmutación (véase la Fig. 5.1-28). Para evitar colisiones por acceso simultáneo al equipo, el sistema debe incluir un modo de asignación y bloqueo. Las unidades de medición pueden ser función del sistema de desarrollo del sistema de supervisión y control, de forma que los requisitos son controlados

íntegramente por el sistema o, en caso de actuación manual, pueden ser conectados al trayecto de señal del sistema de supervisión y control. Para permitir un flujo de trabajo eficiente, deben utilizarse dos pantallas para operar el sistema de posicionamiento de la antena y el control de los dispositivos.

FIGURA 5.1-28

Ejemplo de pantalla de interfaz gráfica de usuario del sistema de supervisión y control



Spectrum-5.1-28

Las labores de control e inspección se ejercen sobre los equipos siguientes:

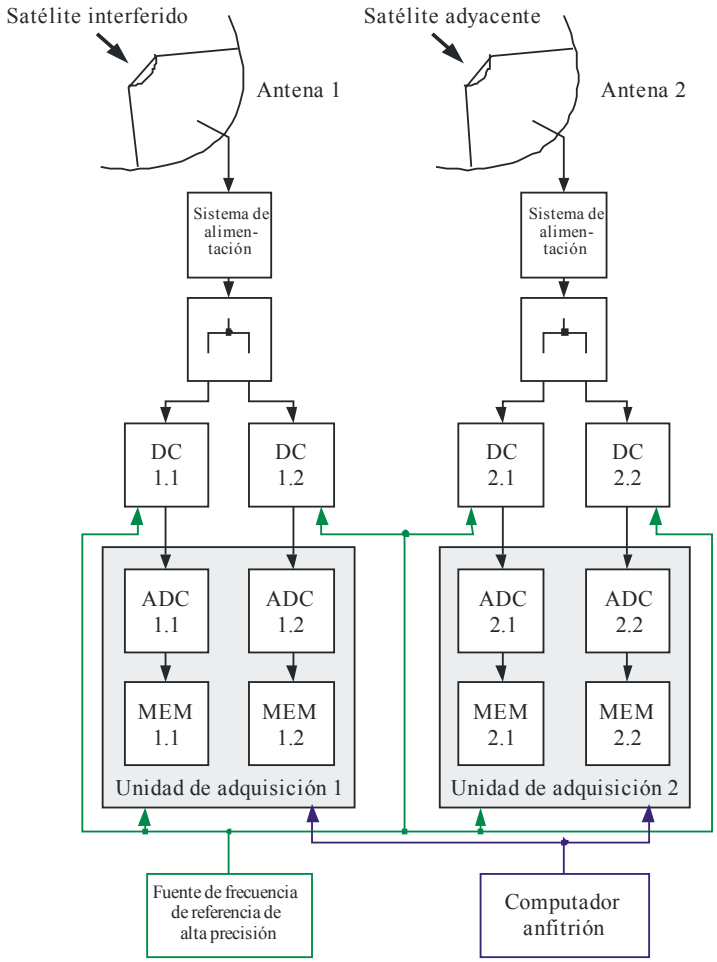
– Sistema de control de antena para funciones de apuntamiento y seguimiento.
– Sistema de seguimiento de antena, con receptores de seguimiento monoimpulso o por pasos.
– Sistema de alimentación, con conmutación de polarización y ajuste del ángulo de polarización.
– Conversores reductores, filtros y postamplificador.
– Todas las unidades de conmutación para la conexión y distribución de señales de RF y FI.
– Conexión y ajustes de las unidades de medición y analíticas empleadas.
– Software para el inicio automático de mediciones

Las señales 1.1 y 1.2 son recibidas por la antena 1 del satélite interferido. Las señales 2.1 y 2.2 son recibidas por la antena 2 del satélite adyacente.

Las señales 1.1 y 2.1 constituyen la señal interferente.

FIGURA 5.1-29

Sistema de medición para localización geográfica



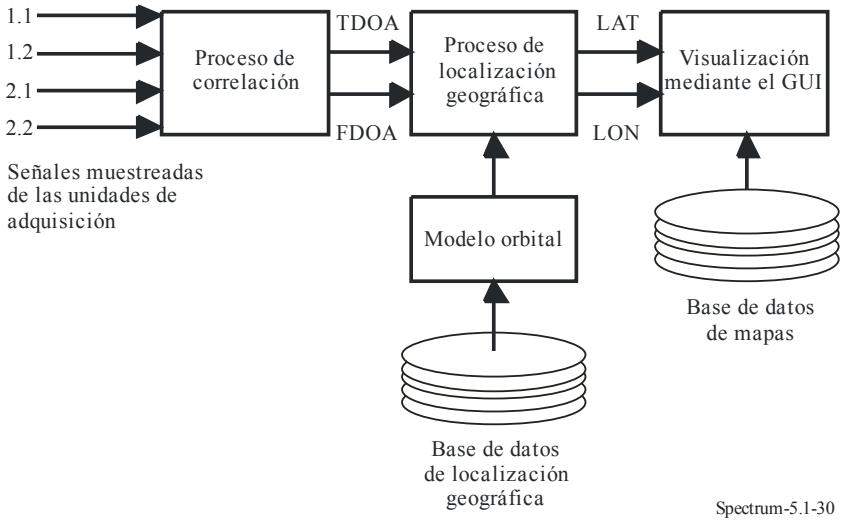
DC: Conversor reductor
ADC: Conversor analógico digital
MEM: Memoria/almacenamiento

Nº: x.1: Señal interferente
Nº: x.2: Señal de referencia

Spectrum-5.1-29

FIGURA 5.1-30

Procedimiento de cálculo de localización geográfica en el computador anfitrión



5.1.6.2 Proceso para la comprobación técnica radioeléctrica de satélites geoestacionarios

A continuación se describe un sistema automatizado para la comprobación técnica de satélites OSG. El sistema pretende minimizar, mediante diversas técnicas, las tareas del operador en lo que se refiere a la medición de la órbita y la calidad de la señal radioeléctrica.

El sistema automatizado de comprobación técnica consta de un programa informático que tiene las funciones siguientes:

– Control, para establecer la prioridad de funcionamiento.
– Registro, para programar las mediciones individuales.
– Detección de errores del software del sistema con una función de generación de informes para los operadores.
– Búsqueda y medición.
– Calibración del sistema e inspección, para verificar si la facilidad de comprobación técnica funciona correctamente.
– Información de los resultados de las mediciones a los operadores.
– Almacenamiento en la base de datos de los satélites registrados y de los resultados de las mediciones.

Los operadores de la estación deben programar las actividades de comprobación técnica para que las tareas se realicen de forma rutinaria de acuerdo con el plan de comprobación técnica.

Los modos semiautomático y manual pueden funcionar simultáneamente para desarrollar las tareas de detección de fuentes de interferencia prejudicial, la comprobación técnica de nuevos satélites y la medición de la ocupación del espectro.

La programación de la comprobación técnica especifica elementos tales como la hora de la comprobación técnica, selección de modo automático o semiautomático, nombre del satélite, número comprobaciones técnicas, prioridades de las tareas, etc.

En la Fig. 5.1-31 se muestra un ejemplo de proceso secuencial de comprobación técnica.

Los elementos de la medición a programar incluyen la posición orbital del satélite, la polarización, la frecuencia central, la *d.f.p.,* la anchura de banda ocupada y algunos otros elementos. Es importante que las facilidades de comprobación técnica de señales espaciales incluyan técnicas como el seguimiento rápido, la

elección de polarización mediante algoritmos de comparación, la localización de las frecuencias centrales para la medición de la anchura de banda ocupada y la medición de la potencia de la portadora.

La polarización se determina verificando repetidamente las mediciones de entrada frente el criterio de polarización.

Normalmente se prefieren los métodos de seguimiento monoimpulso, pero también se utilizan otros métodos, como el seguimiento por pasos.

Para identificar el satélite se compara el resultado de las mediciones con la base de datos de satélites.

Para mejorar la precisión y fiabilidad de los resultados de las medidas es necesario repetir las mediciones y hacer correcciones.

Las tareas de medición deben realizarse con una fiabilidad muy alta, teniendo presentes las características de propagación a altas frecuencias y la débil señal del satélite que se recibe en la Tierra. Las estaciones de comprobación técnica deben verificar si el satélite opera de conformidad con las normas técnicas y la reglamentación pertinentes.

Además, los operadores registran o revisan el plan operativo ante nuevas peticiones de comprobación técnica o de tareas especiales. Los procesos de registro pueden simplificarse manteniendo almacenados y accesibles un conjunto de procedimientos normalizados.

5.1.6.3 Comprobación técnica precisa de la longitud orbital (radiointerferometría)

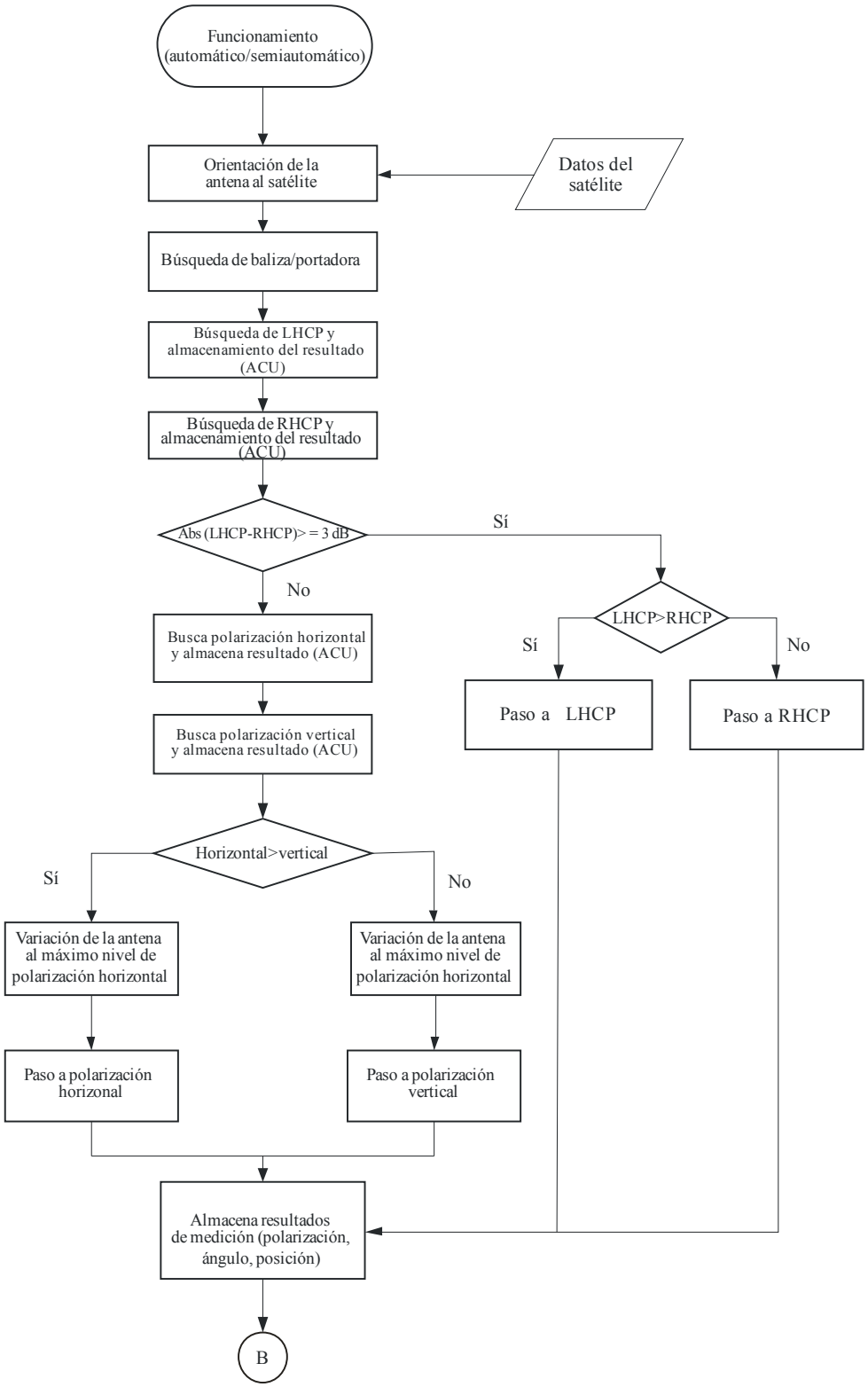
5.1.6.3.1 Objetivos de la comprobación técnica precisa de la órbita

El creciente número de satélites en órbita geosíncrona genera una demanda cada vez mayor de comprobación técnica de precisión. Los satélites situados en posiciones orbitales próximas entre sí necesitan un control estricto de su posición orbital, sin la cual podrían acercarse excesivamente. En consecuencia, la precisión de la comprobación técnica de la posición orbital debe ser superior al nivel convencional de ±0,1°.

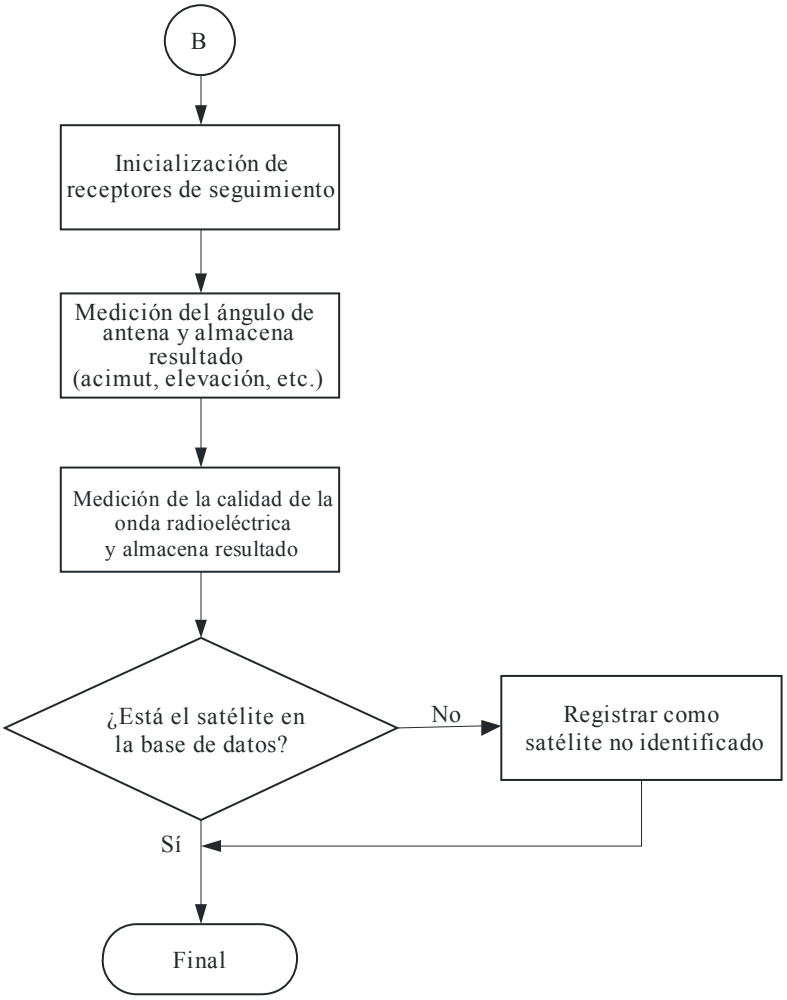
En algunas ocasiones, dos o más satélites se encuentran situados en la misma longitud orbital. En tal caso, el intervalo orbital de ±0,1° se divide en subintervalos, de forma que a cada satélite se le atribuye un único subintervalo. En esos casos, la comprobación técnica debe ser incluso más precisa.

FIGURA 5.1-31

Proceso secuencial de comprobación técnica



Spectrum-5.1-31



Spectrum-5.1-31-cont

La comprobación técnica precisa de la posición orbital es también esencial para la geolocalización de transmisores, ya que ésta descansa en información precisa de los seis elementos que determinan la órbita de los satélites. Una estación de comprobación técnica que se ocupe de la geolocalización de un transmisor debe ser capaz de generar, preferiblemente, información orbital a través de los enlaces descendentes recibidos por satélite.

Existe una creciente demanda de comprobación técnica precisa de la posición orbital de los satélites geoestacionarios. La radio interferometría es una técnica prometedora que puede utilizarse a tal fin. En el apartado siguiente se presenta un ejemplo de radio interferometría, incluyendo sus especificaciones técnicas y procedimientos operacionales.

5.1.6.3.2 Hardware de un interferómetro

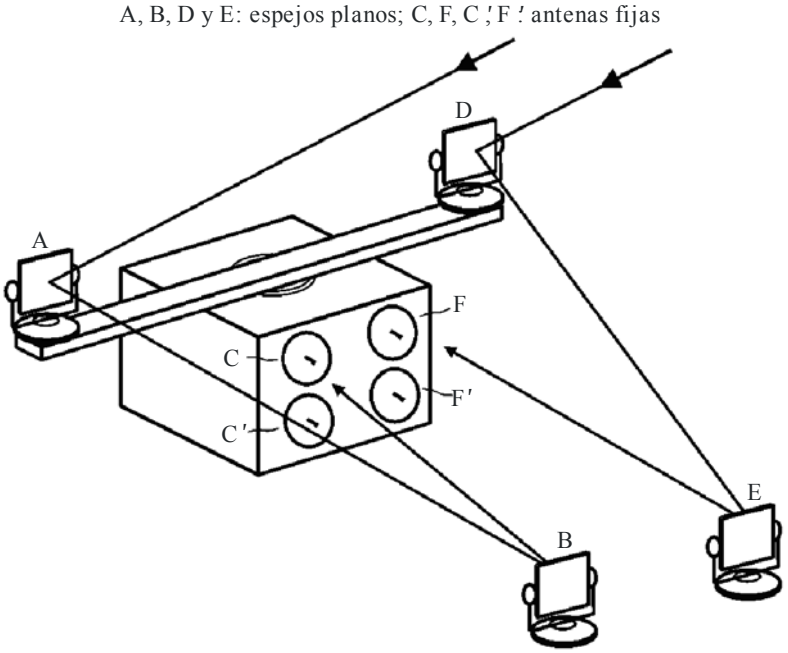
Un interferómetro es básicamente un sistema con dos antenas de recepción para la medición de diferencias de fase; en la Fig. 5.1-32 se muestra una estructura real de interferómetro para la comprobación técnica de la órbita. En primera instancia, un espejo A refleja el enlace descendente del satélite objetivo y posteriormente lo hace el espejo B, antes de su recepción por la antena C. Los espejos son planos. Igualmente, el haz de microondas se refleja en los espejos D y E, antes de su recepción por la antena F.

Se mide la diferencia de fase entre las antenas C y F. Tras la corrección de los retardos de fase sobre los trayectos A-B-C y D-E-F, puede asumirse que las antenas receptoras se encuentran en A y D. La línea AD se convierte entonces en la línea de base del interferómetro.

Los espejos A y D se colocan en un brazo rotatorio horizontal por los motivos que más adelante se exponen. Conforme el brazo cambia su orientación, los espejos se reapuntan de forma que los enlaces de microondas se dirigen de forma precisa hacia las antenas receptoras. Las dos parejas de antenas (C, F y C', F') se utilizan para dos bandas de frecuencias diferentes. Los espejos B y E se inclinan para seleccionar la pareja de antenas deseada.

FIGURA 5.1-32

Radiointerferómetro para la comprobación técnica de la posición en la órbita geoestacionaria



Spectrum-5.1-32

En la Fig. 5.1-33 se ilustra la medición de la diferencia de fase entre las antenas para una banda de frecuencias dada. En cada ruta de recepción, las señales se someten a una conversión-reducción antes de entrar al módulo que realiza la FFT. Los convertidores reductores se sincronizan en fase mediante las señales locales procedentes de un oscilador común (LO). Se realiza la multiplicación e integración en el tiempo de los datos de la transformada de Fourier; este proceso se denomina procesado de correlación. Puesto que las señales de ruido se suprimen mediante integración en el tiempo, las fases se miden con una *S/N* mejorada, que equivale a mejorar el factor de calidad, *G/T*, de la antena receptora.

El procesador de correlación tiene una anchura de banda de 20 MHz, pudiendo elegirse cualquier señal en dicha anchura de banda como objetivo de medición (señales baliza o señales de comunicación en su banda de paso). Las señales de referencia de un oscilador común (RO) se acoplan en los amplificadores de bajo ruido a fin de compensar posibles variaciones en las rutas de recepción.

En el Cuadro 5.1-10 se enumeran las especificaciones del interferómetro. En la Fig. 5.1-34 se muestran las antenas fijas y el brazo rotatorio con espejos. Tal como se muestra en la Fig. 5.1-35, existen otros espejos situados a 16 m de distancia de las antenas fijas. Inicialmente, el interferómetro tiene dos bandas de frecuencias, aunque se puede añadir una banda adicional instalando otro par de antenas de recepción y de convertidores reductores.

El equipo de recepción que se muestra en la Fig. 5.1-35 utiliza antenas y componentes de estaciones terrenas convencionales, mientras que el procesador de correlación es específico de este interferómetro.

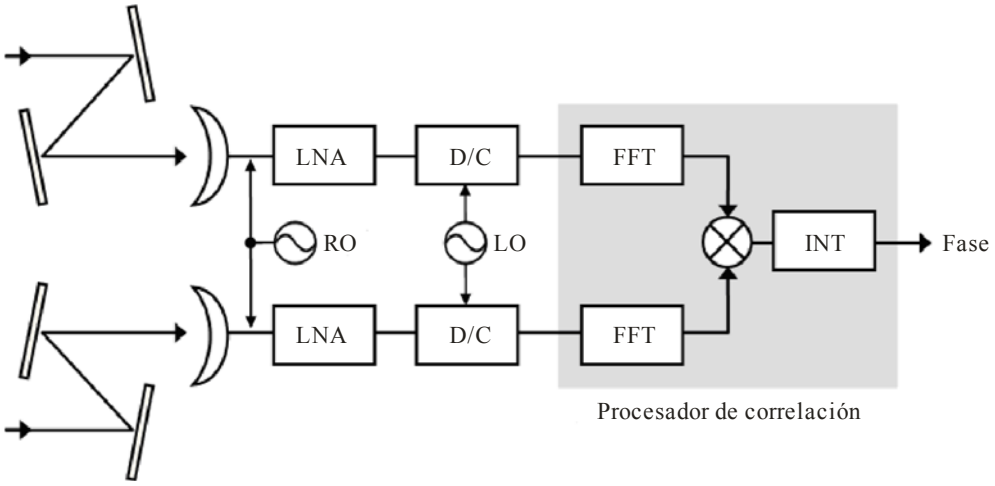
Si el interferómetro se diseña de forma que las antenas receptoras puedan montarse sobre el brazo en A y D, según la Fig. 5.1-32, los cables entre las antenas y las unidades del equipo se trenzarían con el giro del brazo, causando errores de fase.

La utilización de espejos orientables permite situar las antenas C y F (y C' y F') una junto a otra; por tanto, la longitud de los cables puede acortarse lo suficiente para garantizar la estabilidad de fase cuando cambia la temperatura ambiente. Además, los espejos B y E son útiles para conmutar la banda. El brazo y los espejos pueden incluir pesos de equilibrio alrededor de sus pivotes rotatorios debido a sus formas simétricas. Por tanto, el guiado puede realizarse con pequeños motores.

FIGURA 5.1-33

Diagrama de bloques para la medición de la diferencia de fase

LNA: amplificador de bajo ruido; D/C: convertidor reductor; FFT: transformada rápida de Fourier;
RO: oscilador de referencia; LO: oscilador local; INT: tiempo de integración



Spectrum-5.1-33

FIGURA 5.1-34

Brazo rotatorio, espejos planos y antenas fijas (arriba: banda Ku; abajo: banda C)



Spectrum-5.1-34

FIGURA 5.1-35

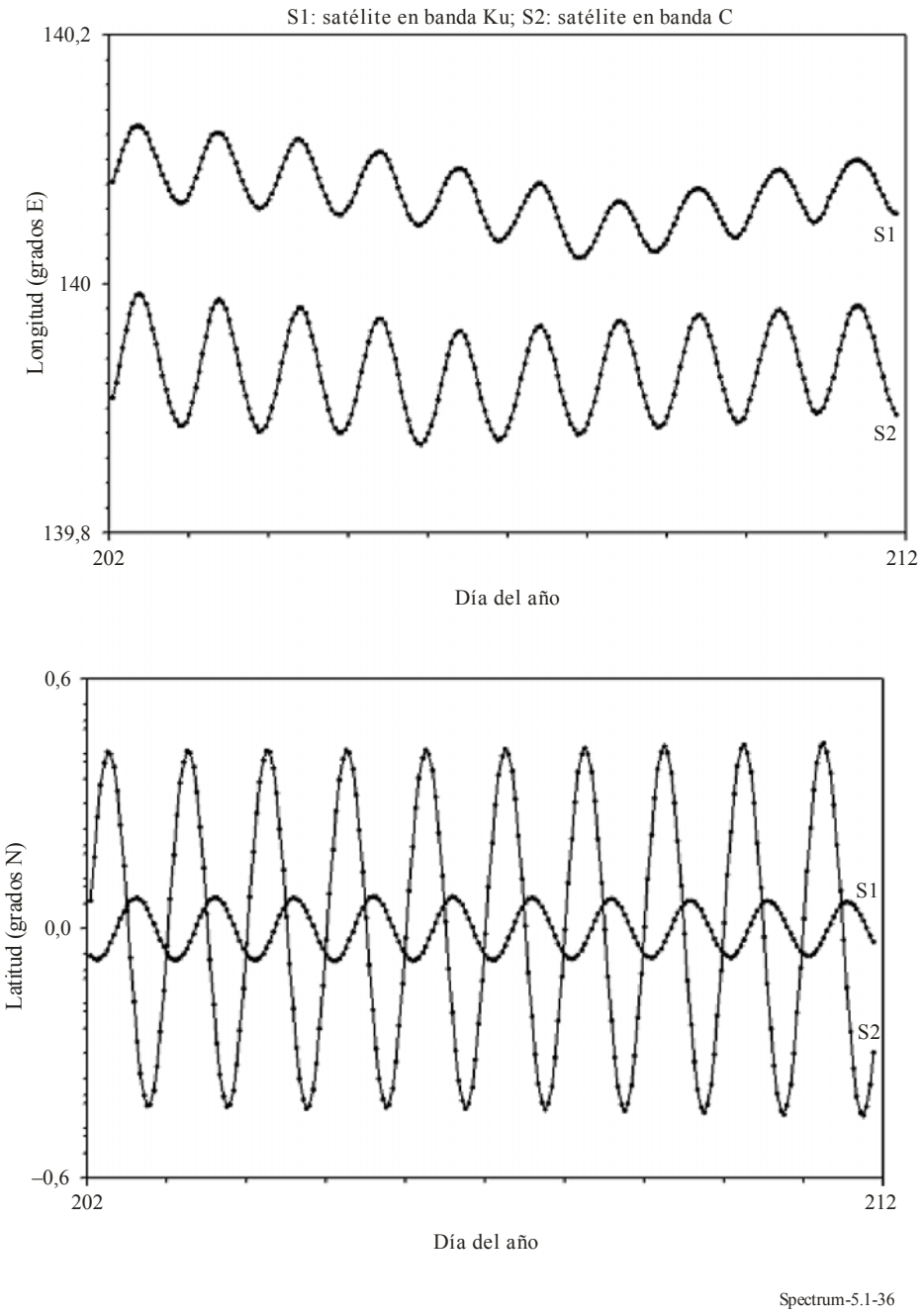
Espejos planos para la conmutación de banda



Spectrum-5.1-35

FIGURA 5.1-36

Ejemplo de comprobación técnica de la posición satelital



5.1.6.3.3 Funcionamiento de un interferómetro

Un interferómetro puede funcionar de distintas formas según sean los propósitos de la comprobación técnica; dichas formas de funcionamiento se enumeran en el Cuadro 5.1-11.

El modo rotatorio se utiliza en el arranque del proceso de comprobación técnica de un satélite desconocido. El brazo completa una revolución con paradas cada 15º. En cada parada del brazo se recopilan datos de fase. Una revolución completa de recopilación de datos de un satélite tarda unos 15 min en realizarse. Los datos de fase se procesan para determinar el acimut y elevación del satélite. El modo rotatorio es esencial para resolver la ambigüedad de fase. Si x es la fase medida en grados, puede ser equivalente a $x \pm 360$, $x \pm 720$, etc. La recopilación de datos de fase para diferentes ángulos del brazo permite determinar inequívocamente la dirección del satélite.

Al final del modo rotatorio, la comprobación técnica del satélite en cuestión puede continuar en el modo rápido. Los datos de fase se recopilan cada hora con dos ángulos de orientación del brazo que tengan una diferencia de 90º. Los datos recopilados constituyen una entrada recurrente a un programa de estimación de la órbita que genera la posición del satélite en longitud y latitud.

En la Fig. 5.1-36 se muestra un ejemplo de este tipo de comprobación técnica de la posición, en la que dos satélites operan en longitudes adyacentes. También es posible efectuar la comprobación técnica paralela de tres o incluso más satélites, ya que la recopilación del conjunto de datos de un satélite se realiza en unos minutos. Si los datos de entrada son suficientes pueden obtenerse los seis elementos orbitales. La recopilación de datos debe realizarse al menos durante medio día, si bien para lograr unos buenos elementos orbitales debe hacerse durante un día completo.

El modo fijo se utiliza para la comprobación técnica de la longitud de los satélites. El brazo se orienta de este a oeste y se fija en dicha posición, si bien el ángulo de orientación concreto es función de la posición del satélite objetivo. Los datos de fase se convierten en longitudes satelitales mediante una función de correspondencia lineal.

Para iniciar el proceso y antes que el modo fijo, debe llevarse a cabo el modo rotatorio. El modo fijo es útil para la comprobación técnica de longitud de la posición orbital a largo plazo de los satélites.

5.1.6.3.4 Calibración del error

Dado que un interferómetro tiene componentes móviles, son inevitables errores de posicionamiento mecánicos. Los principales errores se modelan mediante los parámetros siguientes:

– Longitud efectiva del brazo.

– Sesgo del ángulo de orientación del brazo.

– Inclinación respecto a la horizontal del brazo en el sentido este-oeste.

– Inclinación respecto a la horizontal del brazo en el sentido norte-sur.

Para la calibración de los parámetros de error, se eligen como referencia cinco satélites en diferentes posiciones orbitales. Se supone que se conoce el acimut y la elevación de dichos satélites de referencia. Los parámetros de error se ajustan entonces de forma que los datos de acimut y elevación del interferómetro coincidan con los datos de referencia.

Los errores se calibran anualmente a fin de mantener una precisión conforme con el nivel especificado en el Cuadro 5.1-10.

CUADRO 5.1-10

Especificaciones del interferómetro

Banda de frecuencias	C: 3 400-4 200 MHz Ku: 11 700-12 750 MHz
Antenas fijas	Diámetro: 1.8 m *G*/*T*: 16.8 dB/K (C) *G*/*T*: 23.2 dB/K (Ku)
Brazo rotatorio	Longitud: 13m Precisión de apuntamiento: 0.001°
Espejos planos	Cuadrado de 2m de lado Precisión de apuntamiento: 0,01°
Procesador de correlación	Anchura de banda : 20 MHz Señal objetivo: baliza o banda de paso mejora de la *S*/*N*: 23 dB (tiempo de integración 1s)
Precisión de la radiogoniometría	0,005°

CUADRO 5.1-11

Modos de funcionamiento del interferómetro

Modo rotatorio	El brazo gira una vez Determina la dirección de acimut y elevación Modo de arranque para los modos rápido y fijo
Modo rápido	El brazo gira entre dos ángulos de orientación Se obtiene la posición en longitud y latitud Se obtienen los seis elementos orbitales
Modo fijo	El brazo está fijo en sentido este-oeste Se obtiene la longitud del satélite

5.1.7 Ejemplos de resultados de comprobación técnica

5.1.7.1 Registro de frecuencias en ondas métricas

Los sistemas de registro del espectro de frecuencias son particularmente adecuados para comprobar la ocupación de bandas de frecuencia inferiores a 1 000 MHz por emisiones procedentes de estaciones espaciales en órbita baja utilizando una antena omnidireccional.

La estructura del modelo de ocupación (curva Doppler) depende de los elementos orbitales del satélite y es de carácter exclusivo.

Además de la frecuencia receptora, se puede diferenciar el periodo de revolución (PERIOD raw), considerado como el promedio de varias revoluciones consecutivas, de los momentos previstos de recepción. A efectos de determinar el periodo de revolución con un grado de precisión satisfactorio (PERIOD fine), se recomienda aplicar un método iterativo en virtud del cual se efectúan registros durante un periodo de varios días sobre la base de las siguientes ecuaciones:

$$PERIOD\,\text{raw} = T2 - T1 \tag{5.1-14}$$

$$PERIOD\,\text{fine} = (Tx - T1)/n \tag{5.1-15}$$

Tx es el punto central de la ventana de recepción uno o varios días después. El divisor "*n*" es un número ficticio de revoluciones en el caso de la ecuación (5.1-15).

Este número se altera sistemáticamente hasta lograr una divergencia mínima entre el resultado deseado de *PERIOD* fine y *PERIOD* raw. De este modo, tras un periodo de apenas 24 horas, el error de medición del tiempo de revolución se puede reducir a unas décimas de minuto. El tiempo de revolución y las características de la configuración de registro son fiables para la identificación de un satélite.

Otro método consiste en utilizar una retícula de línea de tiempo ajustable superpuesta en el espectrograma de las emisiones satelitales registradas durante un periodo de dos o más días. Si las líneas de tiempo se corresponden con las emisiones del satélite, se determina *PERIOD* raw**.** En el ejemplo de la Fig. 5.1-43, *PERIOD* raw = 112 min.

Para determinar la duración del periodo con exactitud, es necesario un segundo paso consistente en consultar la base de datos de la NASA.

Una vez que se dispone del dato de 112 min, pueden buscarse los satélites con periodo de revolución de 112 min. En la Fig. 5.1-38 se muestra la base de datos NASA-SSR en la que se han marcado los satélites con periodos cercanos a 112 min.

Con los elementos de dos líneas relacionados, se calcula la hora de visibilidad de dichos satélites desde la ubicación de la estación de comprobación técnica.

El sistema de registro de frecuencias puede mostrar dichas ventanas de visibilidad superpuestas con el espectrograma de la emisión recibida del satélite.

El satélite se considera identificado si todas las emisiones del satélite concuerdan con la ventana de visibilidad. En la Fig. 5.1-39 se ilustra la ventana de visibilidad para el satélite S80/T, con un periodo de revolución de 111,9 min.

Conocidos los datos de la órbita, una antena directiva puede hacer el seguimiento del satélite para ulteriores mediciones.

FIGURA 5.1-37

Registro de ocupación de frecuencias, determinación aproximada del tiempo de revolución

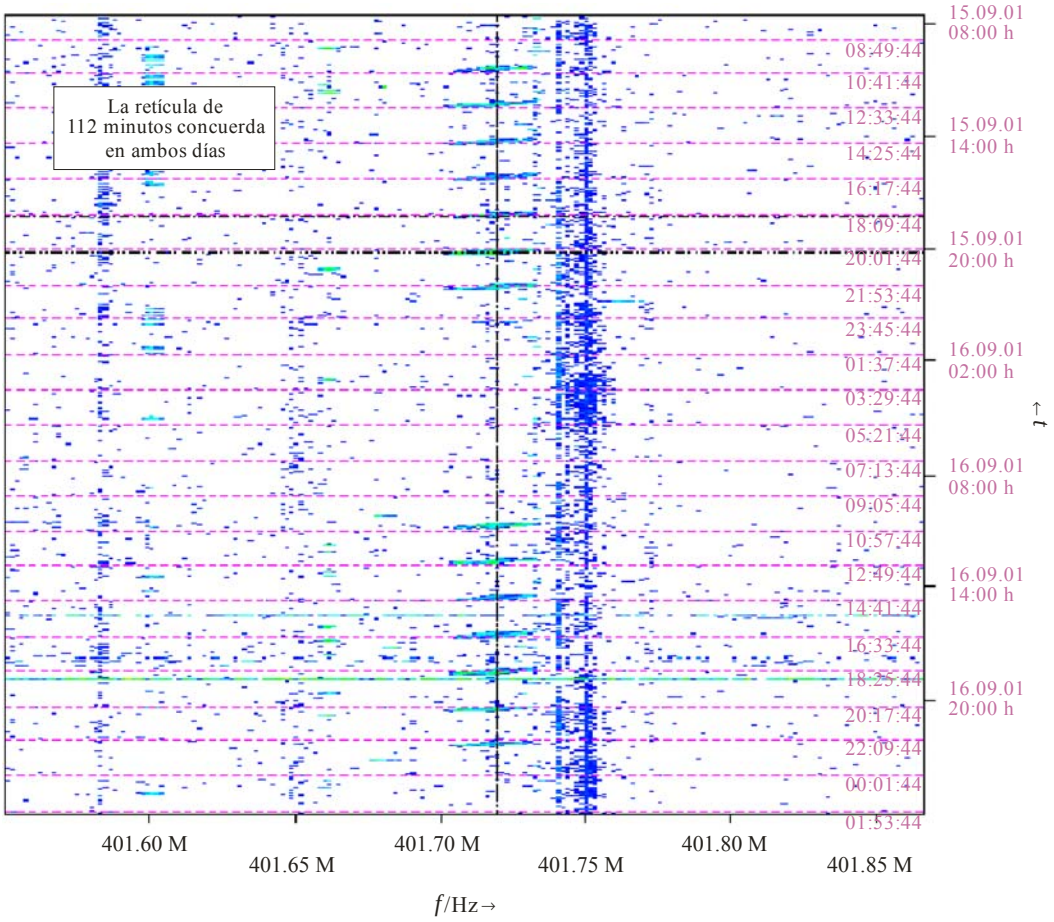


FIGURA 5.1-38

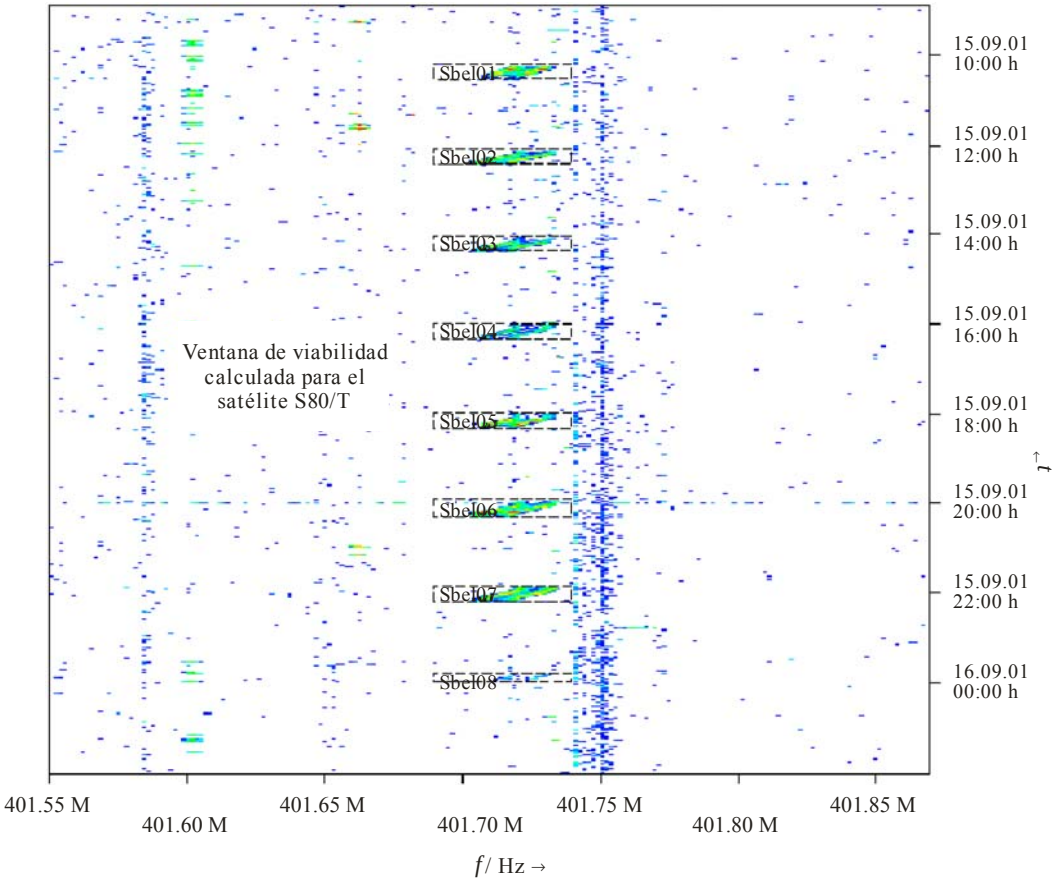
Búsqueda en NASA-SSR

INT-ID	CAT	SRC	PERIOD	INCL	APOG.	PERIG.	RCS	NAME	DATE
1990-114F	21033	CIS	113,7	82,6	1410	1386	2,2032	COSMOS 2119	22.12.90
1989-074B	20233	CIS	113,7	82,6	1410	1386	1,7514	COSMOS 2039	14.09.89
1988-002F	18793	CIS	113,7	82,6	1411	1384	1,9042	COSMOS 1914	15.01.88
1987-074A	18334	CIS	113,7	82,6	1409	1387	2,1058	COSMOS 1875	07.09.87
1987-026B	17583	CIS	113,7	82,6	1411	1385	2,2787	COSMOS 1828	13.03.87
1985-003C	15471	CIS	113,7	82,6	1413	1383	1,3662	COSMOS 1619	15.01.85
1992-052A	22076	US	112,4	66	1344	1332	10,6361	TOPEX/POSEIDON	10.08.92
1990-013C	20480	JPN	112,2	99,1	1744	912	0,3319	JAS 1B (FUJI 2)	07.02.90
1990-013B	20479	JPN	112,2	99,1	1743	912	0,4893	DEBUT (ORIZURU)	07.02.90
1992-052C	22078	FR	111,9	66,1	1325	1305	0,4416	S80/T	10.08.92
1992-052B	22077	KOR	111,9	66,1	1325	1307	0,2912	OSCAR 23 (KITSAT 1)	10.08.92
1994-046A	23191	US	110,6	70	2156	355	3,8606	APEX	03.08.94
2000-075C	26621	SWED	110,5	95,4	1799	701	0,1528	MUNIN	21.11.00
1989-086A	20305	CIS	110,4	82,6	1251	1238	11,6301	METEOR 3-3	24.10.89
1995-059B	23711	US	109,7	100,5	1493	934	13,2018	SURFSAT	04.11.95
1994-003B	22970	GER	109,4	82,6	1208	1185	7,6481	TUBSAT B	25.01.94
1994-003A	22969	CIS	109,4	82,6	1208	1186	41,1628	METEOR 3-6	25.01.94
1991-030A	21232	CIS	109,4	82,6	1208	1188	9,5992	METEOR 3-4	24.04.91
1991-056A	21655	CIS	109,3	82,6	1206	1187	7,8738	METEOR 3-5	15.08.91
1988-064A	19336	CIS	109,3	82,5	1208	1184	8,0195	METEOR 3-2	26.07.88

Spectrum-5.1-38

FIGURA 5.1-39

Ventanas de visibilidad en el registro de ocupación de frecuencias



Spectrum-5.1-39

5.1.7.2 Cálculo de los elementos orbitales a partir de mediciones angulares de antena

El conocimiento de los elementos orbitales, calculados a partir de mediciones angulares de antena, facilita la identificación de un satélite y, en algunos casos, es lo único que posibilita esa identificación. Establecer si el grado de precisión de la determinación realizada es suficiente depende en gran medida de la precisión de las mediciones angulares de antena, y de la longitud y el tipo de arco orbital objeto de seguimiento. El ejemplo que figura a continuación permitirá extraer conclusiones sobre la precisión que se puede alcanzar en el cálculo, pero al mismo tiempo puede no ser aplicable con carácter universal. El ejemplo se basa en una comparación entre los datos de las efemérides de la estación espacial NOAA 10, publicados con un buen grado de precisión y por ende utilizados como datos de referencia, con los datos de las efemérides obtenidos a partir de las mediciones angulares de antena, y en otra comparación entre los periodos de visibilidad y los ángulos de acimut y de elevación calculados sobre la base de ambas series de datos de efemérides para un trayecto, aproximadamente 24 horas más tarde.

La precisión de la medición angular de una antena de reflector parabólico de 12 m disponible, aplicando la técnica de monoimpulsos, es de 0,12º aproximadamente, en la banda de frecuencias utilizada de 1 700 MHz (véase también § 5.1.3.5). El ángulo de elevación máximo de la órbita sometida a seguimiento por encima del plano horizontal es de alrededor de 60º.

Para la determinación matemática inicial de la órbita, se utilizan tres series de datos de medición angular de la antena (acimut/elevación/tiempo), y luego se calculan los elementos orbitales. Con el fin de mejorar los resultados, se efectúa después un cálculo paramétrico, buscando obtener una solución que corresponda lo más estrechamente posible a los valores de medición angular de la antena para la citada serie de mediciones [Montenbruck, 1989] [Montenbruck y Pfleger, 1991].

El Cuadro 5.1-12 y la Fig. 5.1-40 ilustran los resultados de estas comparaciones. Cuando se utilizan como ayuda para la identificación, los datos del Cuadro 5.1-12 pueden facilitar considerablemente la identificación de un satélite. Sin embargo, cuando los datos de las efemérides en conjunto se utilizan para la predeterminación del acimut y la elevación en función del tiempo, se observan desviaciones de tiempo, que crecen con el intervalo según la época. La razón de ello son las limitaciones de la precisión con las cuales se tropieza al calcular los elementos orbitales sobre la base de las mediciones angulares de un solo trayecto de satélite. No obstante, la captación del satélite durante los trayectos siguientes se mejora notablemente. En la Fig. 5.1-40 se muestra la divergencia del acimut y la elevación para un trayecto de satélite 24 horas más tarde (después de 14 revoluciones), sobre la base de la determinación orbital inicial. Las curvas calculadas están desplazadas en –1 minuto para compensar el retardo de tiempo.

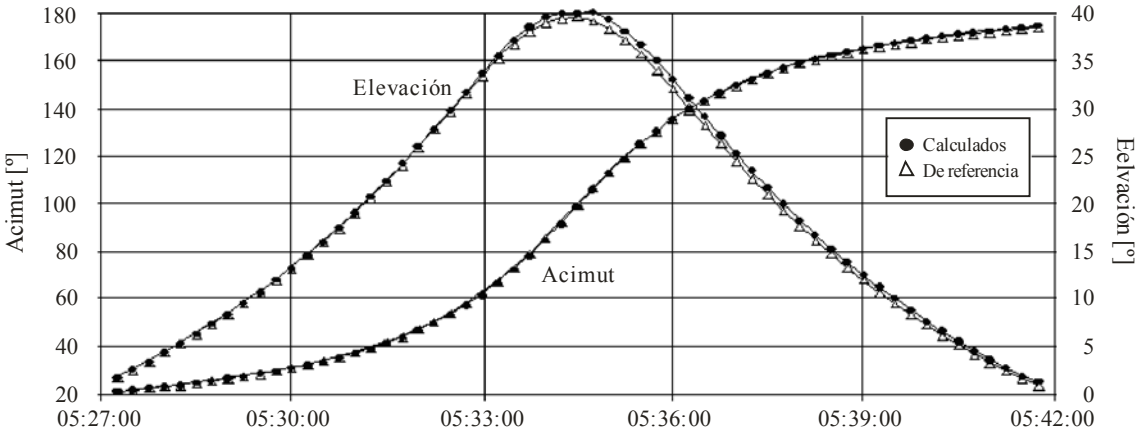
CUADRO 5.1-12

Comparación entre los elementos orbitales de referencia y los elementos orbitales calculados (determinación inicial de la órbita)

Elementos orbitales NOAA10	Elementos de referencia	Elementos calculados
Perigeo (km)	807	808
Apogeo (km)	825	830
Semieje mayor (km)	7 187	7 190
Excentricidad	0,0012156	0,0015
Inclinación (°)	98,5121	98,78
Tiempo de revolución (mín)	100,781	100,85

FIGURA 5.1-40

Comparación entre los ángulos de antena calculados a partir de los elementos orbitales de referencia y de los elementos orbitales medidos



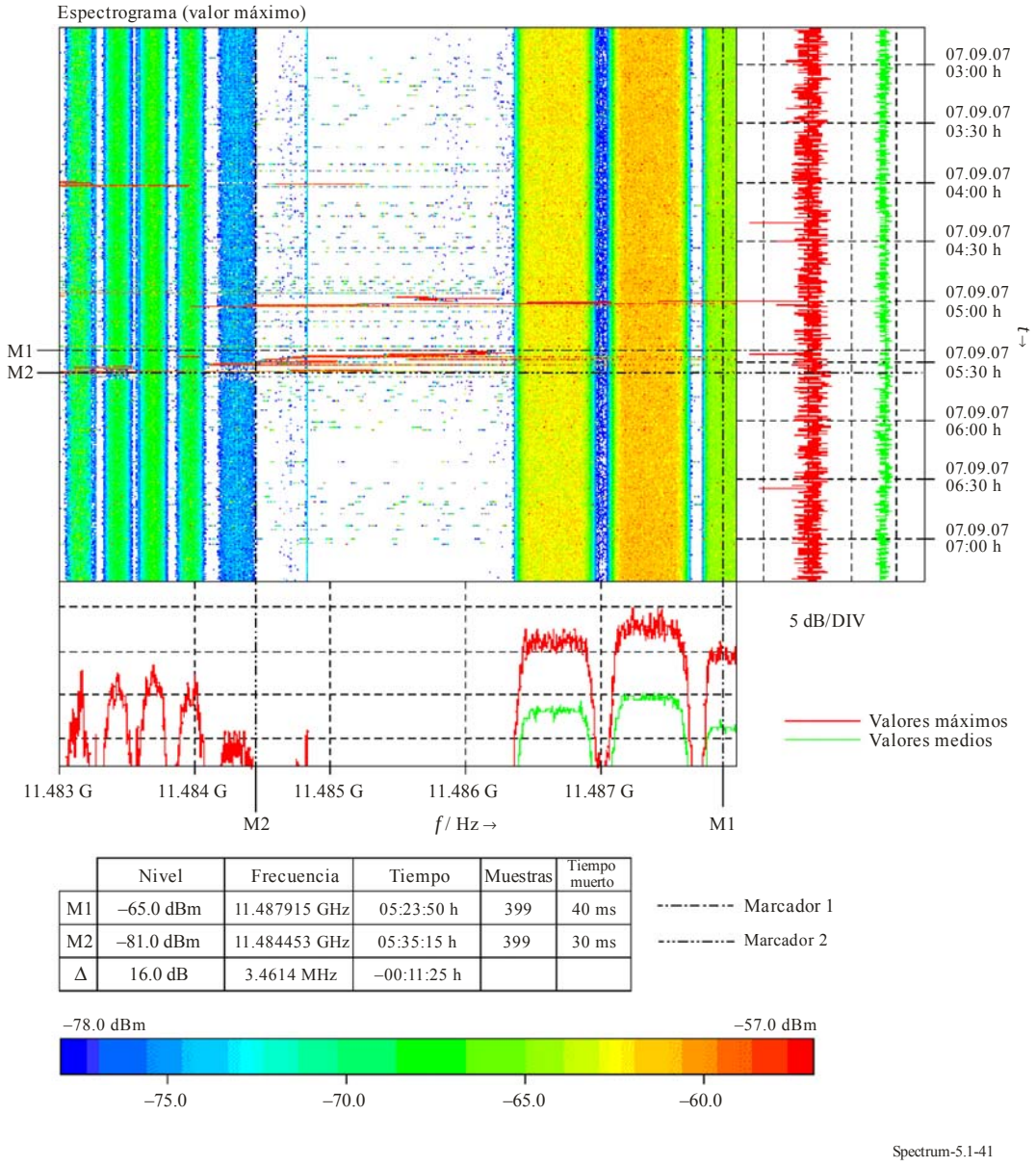
Spectrum-5.1-40

5.1.7.3 Mediciones de la ocupación del transpondedor

La Fig. 5.1-41 ilustra los resultados obtenidos mediante un sistema de medición de la ocupación del transpondedor con un sistema de registro de frecuencias. El espectrograma muestra la ocupación del transpondedor de un satélite con una sección del mismo no utilizada en el centro de la gama de frecuencias que se muestra y una señal interferente de alta potencia de aparición temporal. La señal interferente cruza rápidamente todo el transpondedor hacia arriba y abajo. La señal, recibida con una antena directiva, es conectada al elemento de registro de frecuencias en la gama de la frecuencia intermedia. La señal se digitaliza y se representa en línea utilizando la FFT como un espectrograma en el elemento de registro de frecuencias. Los espectros se almacenen continuamente en un disco duro y quedan disponibles para un ulterior procesamiento fuera de línea. Los distintos colores del espectrograma representan el nivel de potencia. La gama del nivel de potencia que se visualiza puede ajustarse mediante la gama de colores. La gama de frecuencias y la hora de grabación del espectrograma pueden modificarse haciendo zoom para que un periodo de observación breve se represente con gran detalle, o haciendo zoom inverso para visualizar un periodo más largo y tener una visión más general. La posición de las líneas de marcación de frecuencia y de tiempo está en el lado derecho y por debajo de espectrograma visualizado para el correspondiente espectro.

FIGURA 5.1-41

Mediciones de la ocupación de un transpondedor

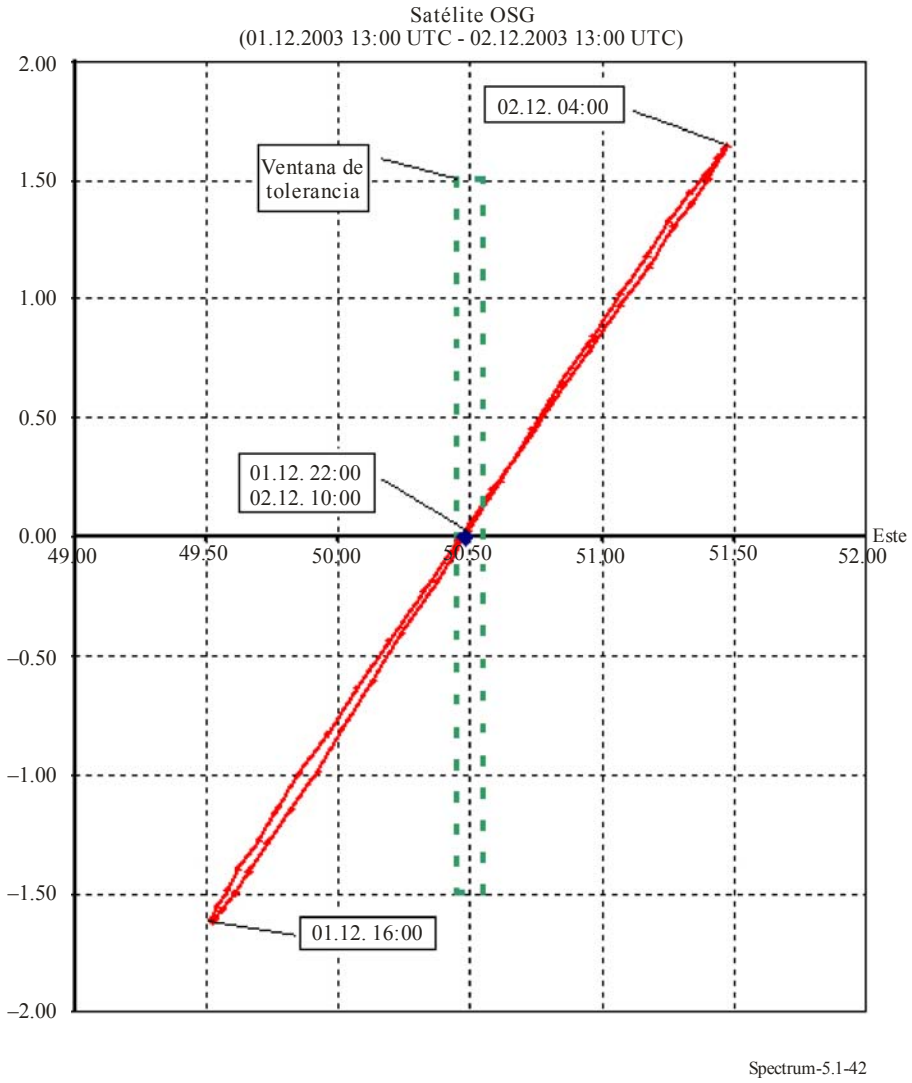


5.1.7.4 Inclinación de los satélites geoestacionarios

El trazado gráfico de la Fig. 5.1-42 es el resultado de la observación de la posición de un satélite OSG a intervalos de 30 minutos, utilizando una antena parabólica de 12 m con una abertura de haz de 0,15º. Con arreglo a un procedimiento de seguimiento monoimpulso los datos de apuntamiento de la antena se adquieren automáticamente, mediante la localización inicial del satélite de forma manual. Cada una de las posiciones se registra durante un periodo de 24 horas, y los resultados se calculan para producir un diagrama en forma de ocho. La información obtenida muestra la excursión del satélite desde su posición orbital nominal y constituye una referencia para futuras observaciones.

FIGURA 5.1-42

Inclinación de los satélites geoestacionarios (diagrama en forma de "8")



5.1.7.5 Resultado y presentación de una medición de localización geográfica

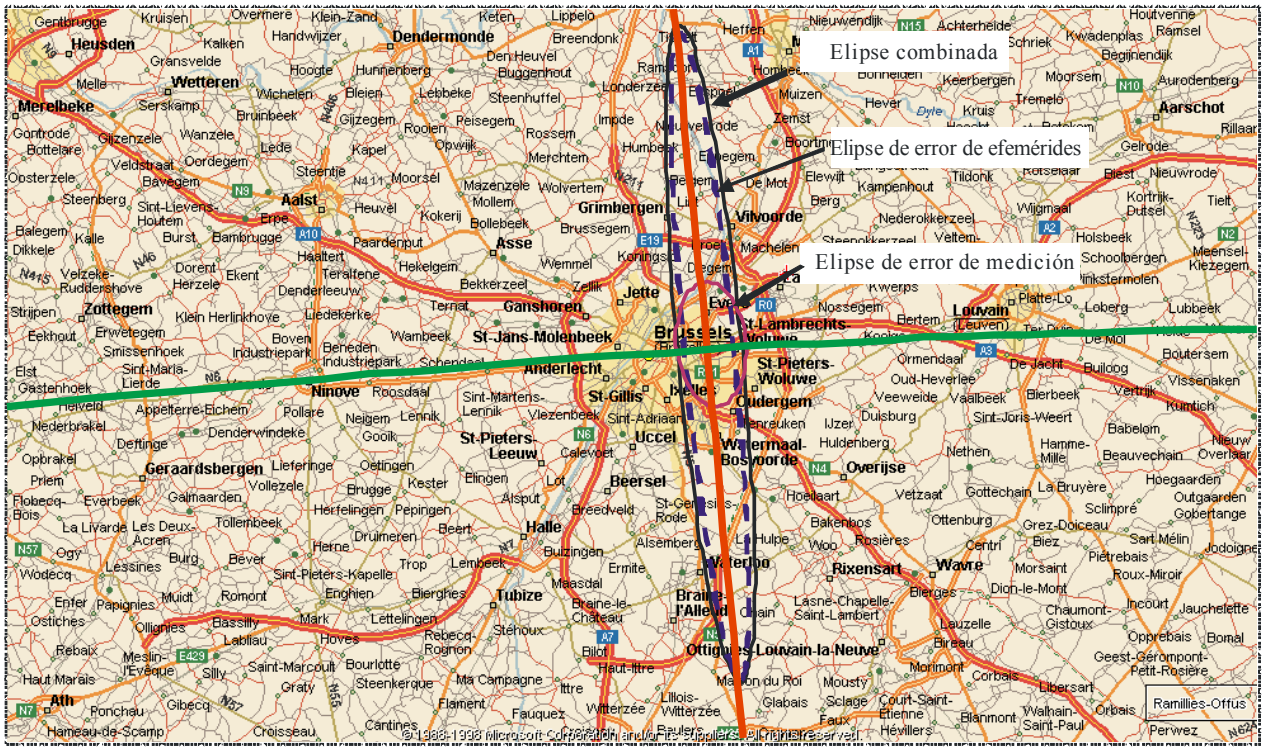
La Fig. 5.1-43 se obtiene a partir de las mediciones de localización geográfica TDOA y FDOA del enlace ascendente de una estación terrena desconocida. El resultado se presenta normalmente como una zona de forma elíptica que se superpone sobre un mapa digital para una mejor comprensión. La forma y orientación de la elipse puede cambiar significativamente debido al número de mediciones realizadas, la hora del día de las mismas, el tipo de modulación de la señal en prueba, la *S/N* de correlación, etc. Los factores necesarios para definir la elipse incluyen:

– la longitud del semieje mayor.
– la longitud del semieje menor.
– El ángulo del semieje mayor (o del semieje menor) con una dirección de referencia.
– Coordenadas del centro.
– Nivel de confianza.

La Fig. 5.1-43 muestra la representación sobre un mapa de una medición de localización geográfica con la elipse de error. La enorme elipse de errores de efemérides refleja que existen inexactitudes en la posición y velocidad del satélite. En este caso, se debe realizar una medición de compensación del error de efemérides.

FIGURA 5.1-43

Resultados de la localización geográfica de una estación terrena que transmite a un satélite OSG



Referencias

BARDELLI, R., HAWORTH, D. and SMITH, N. [1995] Interference Localisation for the EUTELSAT Satellite System. Proc. GLOBECOM-95, Singapur.

DÜSPOHL, K. [2006] Vertex, Monitoring Ground Station Antennas. 9th International Space Radio Monitoring Meeting, Mainz, Alemania.

KAWASE S. [2005] Interferometric monitoring of satellite longitudes, International Journal of satellite communications and networking, Vol. 23, pp. 67-76 (enero 2005).

KAWASE S. [2007] Radio interferometer for geosynchronous-satellite direction finding, IEEE Transactions on aerospace and electronic systems, Vol. 43, pp. 443-449 (abril 2007).

KOETS, M. A. y BENTLEY, R. T. [1999] Satellite Based Geolocation Using a Single Geosynchronous Satellite and an Inverse Doppler Technique. Southwest Research Institute, San Antonio, Estados Unidos de América.

LEUPELT, U. y GIEFING, A. [1981] 12-m-Cassegrain-Antenne mit umschaltbarem Speisesystem (A 12 m Cassegrain antenna with switchable feeder). *NTZ*, Vol. 34, p. 570-575.

MAHNER, H. [1970] Telemetrie- und Trackingempfänger für Satelliten-Bodenstationen (Telemetry and Tracking Receiver for Satellite Earth Stations), Siemens-Zeitschrift 44, Special Issue "Beiträge zur Raumfahrt", p. 108-112.

MONTENBRUCK, O. [1989] Practical Ephemeris Calculations. Springer Verlag, Heidelberg.

MONTENBRUCK, O. y PFLEGER, T. [1991] Astronomy on the Personal Computer. Springer Verlag Heidelberg.

NEWELL, A. C., BAIRD, R. C. y WACKER, P. F. [1973] Accurate Measurement of Antenna Gain and Polarization at Reduced Distances by an Extrapolation Technique. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-21, No. 4, p. 418-430.

NEWELL, A. C., STUBENRAUCH, C. F. y BAIRD, R. C. [1986] Calibration of Microwave Antenna Gain Standards. *Proc. IEEE*, Vol. 74, No. 1, p. 129-132.

SATOH, T. y OGAWA, A. [1982] Exact gain measurement of large aperture antennas using celestial radio sources. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-30, No. 1, p. 157-161.

SCHILLER, M. y SIGL, G. [2006] Sinan, Design and Advantages of a Compact Multiple Band Feed System. 9th International Space Radio Monitoring Meeting, Mainz, Alemania.

SCHWERDTFEGER, R.[2006] Vertex RSI, Multi-function Earth Station Antennas.9th International Space Radio Monitoring Meeting, Mainz, Alemania.

STEIN, S. [1981] Algorithms for Ambiguity Function Processing. *IEEE Trans. Acoustics*, Speech, and Signal Processing, Vol. ASSP-29, No. 3.

Bibliografía

BENTLEY, R. T., JOHNSON, R. y CASTLES, M. P. [1996] Southwest Research Institute, San Antonio, Texas, Estados Unidos de América.

BUCERIUS, H. y SCHNEIDER, M. [1966] Himmelsmechanik I-II (Sperical Trigonometry I-II); Bd. 143/144, Bibliographisches Institut; Mannheim. Alemania.

CAPELLARI, J. O., VELEZ, C. E. y FUCHS, A. J. [1976] Mathematical Theory of the Goddard Trajectory Determination System; Goddard Space flight center; Greenbelt, Maryland. Estados Unidos de América

GOULD, R. G. and LUM, Y. F. [1976] *Communications satellite systems: An overview of the technology*. IEEE Press.

GREEN, R. M. [1985] *Spherical Astronomy*; Cambridge University Press; Cambridge.

HARTL, P. *Fernwirktechnik der Raumfahrt* (Remote control in astronautics). Springer Verlag, Berlin/Heidelberg/New York/Tokyo.

HERTLER, E. and RUPP, H. *Nachrichtentechnik über Satelliten* (Telecommunication via Satellite). Springer Verlag, Berlin/Heidelberg/Nueva York/Tokio.

UIT [1988] Especificación de sistemas de transmisión para el servicio de radiodifusión por satélite.

Manual del UIT-R– *Comunicaciones por satélite*, Tercera Edición, 2002, Wiley, Nueva York, Estados Unidos de América.

KAISER, W. y LOHMAR, U. [1981] *Kommunikation über Satelliten* (Communication via Satellite). Springer Verlag, Berlin/Heidelberg/ Nueva York/Tokio.

KOCH, G. [1972] Antennenprobleme beim Weltraumfunk (Problems in designing antennas for space communications). *NTG-Fachberichte*, Vol. 43, p. 101-123.

KRIETENSTEIN, K. [1994] Das Ohr am Orbit, Eine Darstellung von Arbeitsweisen der Funkmeßstelle Leeheim des BAPT (The Ear at Orbit, A Presentation of the Measurement Methods of the Leeheim Monitoring Station for Space Radiocommunication Services of the German Federal Office for Posts and Telecommunications), telekom praxis, 8/94, Schiele & Schön GmbH, 10969 Berlin. Alemania.

MAHNER, H. [1970] Telemetrie- und Trackingempfänger für Satelliten-Bodenstationen (Telemetry and tracking receiver for satellite earth stations), Siemens-Zeitschrift 44, Special Issue "Beiträge zur Raumfahrt", p. 108-112.

MIYA, K. [1975] Satellite Communications Engineering. Lattice Co., Tokio, Japón.

MOENS, C. y ROESEMS, K. [1974] Nachführ- und Datenempfänger für Bodenstationen von Satellitensystemen (Tracking and data receiver for earth stations of satellite systems), *Elektrisches Nachrichtenwesen*, International Telephone and Telegraph Corporation, Vol. 49, No. **3**, p. 315-323.

ÖHL, H. y GÖSSL, H. [1978] Die Eigenschaften der Antennen der zentralen Deutschen Bodenstation (ZDBS) (Characteristics of the antennas of the Federal Republic of Germany's Central Earth Station (ZDBS)). *Mikrowellenmagazin*, Vol. 4, 1, p. 10-14.

SIEMENS-ZEITSCHRIFT [1970] Beiheft, Beiträge zur Raumfahrt (Papers on Astronautics). Vol. 44.

Transmitter Location Systems, LLC [2005] TLS Model 2000 Operation and Maintenance Manual.

UNGER, J. W. H. [1976] *Literature survey of communication satellite systems and technology*. IEEE Press.

WOOD, P.J. [1980] *Reflector antenna analysis and design*. Peter Peregrinus Ltd., Stevenage, Reino Unido.

Recomendaciones del UIT-R

NOTA – Se insta al lector a que utilice la última edición de cada una de las Recomendaciones referenciadas

Recomendación UIT-R S.446 – Dispersión de la energía de la portadora para los sistemas que emplean modulación angular y señales analógicas o modulación digital en el servicio fijo por satélite

Recomendación UIT-R S.484 – Mantenimiento de la posición en longitud de los satélites geoestacionarios del servicio fijo por satélite.

Recomendación UIT-R BO.650 – Normas relativas a los sistemas de televisión convencional para la radiodifusión por satélite en los canales definidos por el Apéndice 30 del Reglamento de Radiocomunicaciones.

Recomendación UIT-R S.673 – Términos y definiciones relativos a radiocomunicaciones espaciales.

Recomendación UIT-R SM.1681 – Medición de emisiones de bajo nivel procedentes de estaciones espaciales en las estaciones terrenas de comprobación técnica utilizando técnicas de reducción del ruido.

5.2 Comprobación técnica de los servicios de radiodifusión

5.2.1 Introducción

A primera vista podría considerarse que los procedimientos de comprobación técnica normalizados incluyen adecuadamente los servicios de radiodifusión, radio y televisión. De hecho, los procedimientos descritos en los capítulos anteriores abarcan la mayor parte de las mediciones básicas aplicables a los servicios de radiodifusión. No obstante, debido a la importancia de dichos servicios como formas de comunicación de masas y, que como tales tienen un papel muy relevante como herramientas para la educación y promoción de valores culturales regionales y nacionales, varios países aplican reglamentaciones especiales a los mismos, incluyendo parámetros como la calidad de servicio, restricciones sobre los contenidos, por ejemplo, limitaciones temporales a la publicidad, cantidad mínima de programas culturales, educativos o de noticias, etc.

Dichas restricciones reglamentarias exigen procedimientos y equipos de comprobación técnica específicos. Aunque los receptores de comprobación técnica convencionales tienen, por lo general, capacidades de demodulación que permiten la recepción y registro de programas de radiodifusión, la utilización de instrumentos de medición caros en tareas de menor importancia es económicamente ineficiente e inadecuado pues las características de recepción pueden no ser convenientes en términos de calidad. Por ejemplo, los receptores de comprobación técnica no pueden, por lo general, registrar canales estereofónicos o presentar la imagen decodificada. Durante la mayor parte del tiempo, los instrumentos de medición no proporcionan una correlación adecuada en términos de prestaciones, selectividad y calidad a los productos de consumo específicamente diseñados para acceder a dichos servicios.

En base a ello, en este capítulo se presentan directrices generales para la ampliación de los medios de comprobación técnica mediante la implementación de canales adicionales adecuados para la comprobación técnica de los contenidos. Dichos subsistemas son, en general, esenciales para realizar actividades tales como la evaluación de la cobertura y la calidad del servicio, proporcionar características de recepción más próximas a la experiencia del usuario final y, por ende, pueden resultar de gran valor para la comprobación técnica simultánea de varios canales a un costo relativamente bajo.

En relación con la utilización del espectro, también es importante señalar que los servicios de radiodifusión, especialmente la difusión de audio y de TV con MF, utilizan normalmente una potencia de transmisión extremadamente elevada en gran parte del espectro en ondas métricas y en la parte baja de las ondas decimétricas, en rangos muy próximos al espectro de aplicaciones críticas como la navegación aeronáutica y las comunicaciones, aumentando así la importancia de realizar un estrecho control de las emisiones de armónicos y de no esenciales, y reforzando la importancia de las actividades de comprobación técnica en la prevención de las interferencias sobre otros servicios. En relación con este asunto, en este capítulo se presentan brevemente las características de las principales normas de radiodifusión utilizadas, a modo de referencia para el análisis de dichos sistemas.

5.2.1.1 Calidad del servicio

En el campo de la psicología, la calidad de servicio se define como la diferencia entre percepciones y expectativas [Llosa, *et al.*, 1998]. Aunque aún existen desacuerdos sobre la implementación de dichos conceptos, especialmente sobre los elementos de su formulación, se han elaborado varios métodos para definir cuantitativamente la calidad de los productos y servicios.

En general, pueden considerarse tres métodos de evaluación de la calidad aplicables a la radiodifusión y las telecomunicaciones:

1. *Calidad intrínseca*, que tiene en cuenta los parámetros técnicos del servicio, por ejemplo, la relación señal a ruido (SNR), la relación entre señal e interferencia (SIR), la relación entre señal e interferencia más ruido (SINR), la distorsión armónica total (THD), los niveles relativos de la señal de banda base, la tasa de errores en los bits (BER), la tasa de errores de la modulación (MER), la tasa de errores en las tramas (FER), etc.

En general, la evaluación de la calidad intrínseca es directamente relevante para el entorno radioeléctrico y el funcionamiento adecuado del sistema, y está estrechamente relacionada con la norma de radiodifusión empleada, el diseño de la red de radiodifusión y, en algunos casos, con la tecnología utilizada en los receptores y decodificadores de TV.

Obsérvese que la calidad intrínseca es una condición fundamental para el funcionamiento de un sistema, aunque normalmente presenta una correlación menor con la percepción real del usuario, especialmente en el caso de sistemas y códecs modernos cuyo funcionamiento explota los límites de la percepción humana para mejorar la calidad empleando una anchura de banda reducida y transformaciones no lineales y no estacionarias.

2. *Calidad percibida por métodos subjetivos*, que utiliza instrumentos psicológicos y estadísticos para evaluar la percepción del usuario en relación con un medio dado, en base a la opinión real de los usuarios, calificada en un entorno, condiciones e instrumentos controlados. Estos procedimientos son independientes de la tecnología y pueden aplicarse sin solución de continuidad desde emisiones radioeléctricas de banda estrecha a sistemas de TV digital de alta definición, proporcionan un resultado fiable si se utilizan adecuadamente y constituyen la referencia básica para las restantes evaluaciones de calidad, pero con el inconveniente de ser caros y requerir mucho tiempo.
3. *Calidad percibida por métodos objetivos*, que utiliza algoritmos creados para combinar varios indicadores de calidad paramétricos con el fin de proporcionar la calidad específica que presente la mejor correlación con una evaluación subjetiva. Se trata de un desarrollo reciente sobre la evaluación de la calidad de servicio que pretende combinar los beneficios independientes de la tecnología propios del análisis subjetivo con la facilidad de uso de los procedimientos de evaluación paramétricos.

Normalmente, los tres procedimientos se basan en la inserción de una señal o patrón de prueba al sistema de transmisión/recepción y el análisis de la salida del mismo. El análisis puede realizarse con o sin conocimiento o medición de la señal de entrada.

Por lo general, las mediciones objetivas de la calidad percibida exigen una comparación con la señal de referencia. Los métodos subjetivos pueden utilizar o no utilizar la referencia considerando las alternativas cuando la evaluación se basa en la inteligibilidad y en la percepción subjetiva del grupo elegido para la prueba de escucha. La evaluación intrínseca puede estar basada en características específicas de la señal, como los códigos de redundancia cíclica (CRC) o la potencia eficaz (r.m.s.) y, como tal, no requiere que la señal de entrada genere un resultado, o puede necesitar patrones de prueba de referencia para proporcionar resultados específicos.

La calidad percibida, especialmente en caso de evaluación subjetiva, también puede dividirse en dos clases: "evaluación de la calidad", cuando el objetivo es la evaluación del sistema en condiciones óptimas; y "evaluación de la degradación", cuando el objetivo es evaluar el efecto sobre la calidad de la señal de la codificación, transmisión o emisión.

En los apartados siguientes se describen los parámetros de calidad para audio y vídeo, con especial atención a los procedimientos de evaluación subjetivos y objetivos de la calidad descritos en el marco de la UIT, ya que son los más relevantes en esta área y su evaluación paramétrica se ha descrito en el punto anterior junto con la descripción de las normas actualmente utilizadas.

Normalmente se obtiene un análisis completo de la calidad de funcionamiento combinando evaluaciones de calidad intrínseca y percibida con mediciones tradicionales de la intensidad de campo y de las relaciones entre portadora y ruido para normas analógicas, junto con parámetros adicionales de propagación radioeléctrica, tales como relaciones entre señal e interferencia, dispersión del retardo de propagación, dispersión del retardo de sincronización, etc. Dicha evaluación es especialmente crítica teniendo en cuenta la migración de sistemas analógicos a digitales realizada en varios países.

Un error bastante generalizado sobre este asunto es la creencia de que calidad significa satisfacción del usuario. De hecho, puede considerarse que la satisfacción del usuario sólo es proporcional a la calidad cuando dicha calidad está correlada con las expectativas y deseos del consumidor en un sentido amplio, es decir, un usuario puede sentirse satisfecho con una llamada telefónica de calidad relativamente mala si el precio de la misma es muy inferior al de otras alternativas, como por ejemplo, en el caso de las aplicaciones

de mensajería vocal sobre Internet, o alternativamente, puede no darse importancia a una excelente calidad de vídeo si la información que se presenta es irrelevante.

Los costos asociados a la comprobación técnica deben tenerse en cuenta siempre que se realice un esfuerzo reglamentario en relación con la calidad, debiendo quedar claros los beneficios esperados para el usuario.

a. Calidad de audio percibida

La medición de la calidad subjetiva de audio ha sido un asunto relevante en las aplicaciones de radiodifusión y telecomunicaciones y, en ese sentido se han elaborado varias Recomendación UIT-R y UIT-T.

En relación con el audio en radiodifusión sonora, la Recomendación UIT-R BS.1283, que resume varias recomendaciones sobre evaluación subjetiva de la calidad sonora, puede considerarse un punto de partida excelente y la base más fiable para la evaluación de la calidad.

En general, la evaluación subjetiva utiliza escalas de 5 ó 7 grados y es aplicable a la comparación de parejas de grabaciones, con valoraciones que van desde excelente a mala calidad, desde degradación imperceptible a degradación muy molesta o desde mucho mejor a mucho peor.

Cuando se utilizan dichas escalas, grupos de prueba seleccionados realizan audiciones en entornos especialmente diseñados, registrándose su opinión sobre la evaluación de cada grabación o de la comparación entre dos grabaciones Los resultados de la evaluación se procesan estadísticamente para obtener la puntuación final o grado, libre de tendencias individuales y con una elevada correlación con la opinión del usuario final. Normalmente, en el proceso se evalúan grabaciones de referencia y "distorsionadas". La diferencia de apreciación entre la entrada de referencia y la salida resultante del sistema en prueba se denomina "grado de diferencia subjetiva" (SDG, *subjective difference grade*) con una escala de 0 (degradación imperceptible) a -4 (degradación muy molesta).

La Recomendación UIT-R BS.1116 es la referencia básica de la UIT para el diseño de experimentos de evaluación subjetiva, y establece condiciones experimentales estrictas que son especialmente importantes para la determinación de degradaciones pequeñas de la calidad de audio. Para reducir los costos derivados de la aplicación de dicha Recomendación, puede utilizarse la Recomendación UIT-R BS.1285 para coordinar los procedimientos de preselección de las grabaciones, lo cual reduce la cantidad de medios a evaluar.

La Recomendación UIT-R BS.1284 se ha definido tomando como referencia principal la Recomendación UIT-R BS.1116, aunque considera parámetros más flexibles y, como tal, es más recomendable para aplicaciones generales en las que la degradación de audio es de mayor magnitud, pese a lo que se considera un sistema de audio de alta calidad.

Para sistemas de calidad intermedia, como los trenes de bits de audio de Internet, los reproductores de estado sólido y los sistemas de radiodifusión digital, se ha desarrollado la Recomendación UIT-R BS.1534, que puede ser más efectiva para la evaluación de calidades de audio cuya valoración corresponda a la mitad inferior de los grados de la Recomendación UIT-R BS.1116.

Para sistemas de baja calidad y de banda estrecha como los utilizados en las comunicaciones vocales, también pueden utilizarse las Recomendaciones UIT-T P.800, P.810 y P.830. En estas recomendaciones se describe la metodología de pruebas destinadas a obtener una nota media de opinión (MOS, *mean opinión score*), que es la referencia subjetiva normalizada utilizada para servicios de telecomunicaciones como la telefonía.

Finalmente, para complementar las recomendaciones anteriores puede utilizarse la Recomendación UIT-R BS.1286 cuando el sonido está acompañado de imagen, asociando los principios de evaluación de la calidad sonora a un entorno en el que también está presente la imagen, como ocurre en la televisión. Estudios realizados demuestran que la percepción humana del sonido se ve afectada por la visión conexa. Por tanto, para la evaluación completa de un sistema de televisión y programas multimedios, no deben considerarse separadamente los contenidos de audio y vídeo asociados.

Recientemente se han desarrollado varios algoritmos y programas informáticos que tratan de imitar los resultados y procedimientos de las evaluaciones subjetivas, con el objetivo de obtener beneficios en términos de reducción de costos y flexibilidad en las actividades de comprobación técnica, tal como se describe en este Manual.

Para sistemas de alta calidad, la Recomendación UIT-R BS.1387 es una referencia básica para la evaluación de la calidad objetiva. Esta Recomendación valida y consolida seis métodos previamente existentes: índice de perturbación (DIX, *disturbance index*), relación ruido a máscara (NMR, *noise-to-mask ratio*), medición perceptiva de la calidad de audio (PAQM, *perceptual audio quality measure*), evaluación perceptiva (PERCEVAL, *perceptual evaluation*), medición objetiva perceptiva (POM, *perceptual objective measure*) y el enfoque basado en un juego de herramientas ("*toolbox*").

El proceso de validación utiliza varios registros sonoros naturales de 10 a 20 s de duración, con instrumentos musicales y voces humanas. El grado de diferencia subjetiva (SDG) se correla con el grado de diferencia objetiva a fin de optimizar los algoritmos descritos en la Recomendación. Los algoritmos pueden ser utilizados con dichas señales de prueba o con cualquier otra secuencia, como por ejemplo un tintineo utilizado en el programa normal, sin que la realización de pruebas exija la interrupción del funcionamiento normal del equipo.

La Recomendación UIT-T P.862 presenta otro método objetivo denominado "Evaluación de la calidad vocal por percepción" (PESQ, *perceptual evaluation of speech quality*). Se utiliza para la evaluación de la calidad vocal de redes telefónicas de banda estrecha (3,1 kHz) y códecs vocales. El PESQ funciona de forma similar a otros métodos, comparando las señales de entrada y de salida del sistema en prueba. El proceso de validación del PESQ es similar al utilizado en la Recomendación UIT-R BS.1387, pero aplicando solamente secuencias vocales de banda estrecha y utilizando mediciones MOS como referencia.

Alternativamente, la Recomendación UIT-T P.563 presenta un método que no requiere el procesamiento de la señal de entrada. El algoritmo realiza un análisis sofisticado de la señal vocal que reconstruye una señal de referencia estimada basada en la señal distorsionada y, a partir de ésta, estima un grado MOS equivalente.

El usuario de estos métodos objetivos debe ser consciente de sus limitaciones, la mayoría de las cuales se definen en las Recomendaciones pertinentes.

Por ejemplo, la Recomendación UIT-R BS.1387 requiere muestras sincronizadas y, por sí sola no puede evaluar el retardo de transmisión. Por otro lado, las Recomendaciones UIT-T P.563 y P.862, no sólo no pueden evaluar los retardos, sino tampoco las distorsiones de nivel, ya que las primeras etapas de los algoritmos procesan y eliminan dichas distorsiones. Incluso algunas distorsiones causadas por limitaciones en la respuesta en frecuencia del sistema pueden pasar desapercibidas.

En general, los algoritmos objetivos no pueden aún imitar las múltiples facetas de la percepción humana y se recomienda aplicarlos con cautela, contrastando siempre que sea posible los resultados obtenidos con métodos más fiables o, al menos, realizar una rápida evaluación por parte del operador cuando los resultados sean incompatibles con la experiencia, considerando la propagación y características del sistema evaluado.

b. Calidad de vídeo percibida

La principal referencia en el marco de la UIT para la evaluación subjetiva de la calidad del vídeo es la Recomendación UIT-R BT.500. Esta Recomendación describe varios métodos que pueden aplicarse a la evaluación de la calidad. Básicamente, varían en la forma de presentación del estímulo, el tipo de escala y el tipo de medios/imagen utilizados. En general, las pruebas consisten en la presentación de secuencias de vídeo a un grupo de no menos de 15 voluntarios, que en la recomendación se denominan asesores, y que anotan en una escala su percepción durante sesiones de visualización de aproximadamente media hora. Posteriormente, las notas registradas se procesan estadísticamente. Cada paso de dichos procedimientos se describe concienzudamente.

En términos de estímulo, estos métodos pueden dividirse en métodos de estímulo único y de estímulo doble. En el caso de estímulo único, se pide al asesor que evalúe una imagen, una secuencia de imágenes o un segmento de vídeo, y que describa su impresión de cada segmento. En el caso del estímulo doble, se pide al asesor que evalúe parejas de imágenes o de secuencias de vídeo que se presentan alternativamente o una junto a otra, una de ellas degradada y la otra extraída directamente de la fuente. Para este tipo de estímulo, la escala puede definirse en términos de degradación, comparando ambas imágenes en una escala relativa o en términos de calidad mediante una escala normalizada. Por lo general, el método de estímulo doble presenta una respuesta con una varianza menor, pero también exige mayores cautelas y puede no ser aplicable en condiciones específicas o para determinados sistemas, tal como se analiza en las Recomendaciones UIT-T

J.140 y J.245, que aplican métodos de estímulo único en el entendido de que constituyen una mejor aproximación a las condiciones de observadores reales en un hogar que utilicen un aparato de televisión convencional o un computador.

En términos de escala, las Recomendaciones del UIT mencionadas en este apartado describen básicamente cuatro tipos de evaluaciones:

– En primer lugar, los que utilizan escalas numéricas, con cinco, siete e incluso once grados, que varían entre excelente y malo en los métodos de estímulo único o entre mucho mejor y mucho peor en los métodos de estímulo doble.
– En segundo lugar, métodos que aplican simplemente juicios con categorías adjetivadas sin una asociación numérica, y en los que el asesor elige el adjetivo más adecuado de entre el conjunto que se le ofrece.
– En tercer lugar, los que utilizan una escala gráfica que normalmente se define como una línea o línea segmentada que conecta un adjetivo en el lado superior, por ejemplo excelente, con otro en el lado inferior, por ejemplo malo. Se pide al asesor que trace una marca en el punto de la escala que corresponde con su percepción.
– En cuarto lugar, los que utilizan un dispositivo electrónico que registra la percepción subjetiva de forma similar a la escala gráfica pero con la ventaja de hacerlo de forma continua, registrando la percepción a lo largo del tiempo, algo particularmente importante para le evaluación de imágenes en movimiento.

En relación con los medios, la Recomendación UIT-R BT.500 describe procedimientos de evaluación de imágenes estáticas y en movimiento. Las imágenes estáticas han sido tradicionalmente más valiosas en la evaluación de sistemas analógicos y sus degradaciones, ya que dichos efectos no dependen de la escena ni presentan una variación temporal como la observada con los modernos algoritmos de compresión de vídeo digital, que exigen la creación de los denominados procedimientos de evaluación continua.

Teniendo en cuenta estas variaciones, en la Recomendación UIT-R BT.500 se han definido los métodos siguientes:

– Escala de degradación de estímulo doble, o método UER;
– Escala de calidad continua de estímulo doble;
– Juicio basado en categorías adjetivadas de estímulo único; escala de categorías numéricas de estímulo único (SSNCS, *single-stimulus numerical categorical scale*);
– Juicio de estímulo único no categórico con escala continua;
– Juicio de estímulo único no categórico con escala numérica;
– Evaluación de calidad continua de estímulo único (SSCQE, *single stimulus continuous quality evaluation*);
– Estímulo doble simultáneo para evaluación continua (SDSCE, *simultaneous double stimulus for continuous evaluation*).

Además de los anteriores, en la literatura técnica y en la propia UIT se han identificado otros métodos. Por ejemplo, en la Recomendación UIT-R BT.710 se presenta información adicional, tales como condiciones de visualización y elección de alternativas de evaluación relativas a la utilización de los métodos de prueba de la Recomendación UIT-R BT.500 para TV de alta definición. La Recomendación UIT-R BT.1128 proporciona información similar para sistemas de televisión convencionales y la Recomendación UIT-R BT.1129 para sistemas digitales, principalmente para aplicaciones de estudio.

Igualmente, la UIT dispone de material para pruebas que puede utilizarse en la evaluación de la calidad o en demostraciones como las que se incluyen en la Recomendación UIT-R BT.1210. Este material normalizado también se utiliza en numerosas referencias a fin de proporcionar una base común de comparación entre métodos alternativos.

El gran número de pruebas disponibles puede parecer confuso. De hecho, ello es consecuencia de la gran variedad de tipos posibles de medios y degradaciones a tener en cuenta. Cada método de prueba tiene sus fortalezas y debilidades, pudiendo resultar más adecuado para ciertos tipos de evaluación. La ayuda de

personal experimentado junto una cuidadosa planificación y, a menudo, el uso de distintos métodos, son factores esenciales para obtener e interpretar los resultados de una evaluación. En el Informe UIT-R BT.1082 se presenta un análisis interesante sobre los métodos de prueba disponibles, y aunque esté un tanto desactualizado, aún constituye una referencia útil para una mejor comprensión de los métodos clásicos descritos en la Recomendación UIT-R BT.500.

En relación con las técnicas objetivas de medición de la calidad percibida, una referencia principal en la UIT es el grupo de expertos de la calidad del vídeo (VQEG), creado en 1997 aglutinando expertos del UIT-T y UIT-R de diversos orígenes. Este grupo especializado ha elaborado recomendaciones como las siguientes:

– Recomendación UIT-T J.144 - Técnicas de medición objetiva de la percepción de la calidad vídeo en televisión digital por cable en presencia de una referencia completa
– Recomendación UIT-T J.149 - Método para especificar la precisión y la calibración cruzada de métricas de la calidad de vídeo
– Recomendación UIT-T J.1683 - Técnicas de medición objetiva de la calidad de vídeo perceptual para la radiodifusión de televisión digital de definición convencional en presencia de una referencia completa

En el sitio de la UIT se encuentra disponible para su descarga gratuita material didáctico completo sobre este asunto, publicado por el UIT-T en 2004 (sólo disponible en inglés) "*Objective perceptual assessment of video quality: Full reference television*" ("Evaluación objetiva de la percepción de la calidad de vídeo: referencia completa para televisión").

5.2.2 Normativa y mediciones de radiodifusión

En este punto se presentan las características de las principales normas utilizadas a nivel mundial para sistemas de radiodifusión. Se describen las características de la ocupación del espectro y los principales parámetros de calidad intrínsecos que pueden utilizarse con cada norma, con énfasis en las aplicaciones de comprobación técnica del espectro.

5.2.2.1 Radiodifusión sonora analógica con modulación de amplitud

La radiodifusión sonora analógica con modulación de amplitud (MA) es el servicio de radiodifusión más tradicional, que ha existido desde el inicio de las transmisiones de radiodifusión hace casi cien años.

La radiodifusión sonora con MA utiliza normalmente la modulación de amplitud de doble banda lateral y portadora, permitiendo la utilización de receptores muy sencillos, una característica fundamental de estos sistemas. Las características de la señal y las técnicas de medición se describen de forma genérica en el punto 4.6.3.1 de este Manual.

Tal como se describe en la Recomendación UIT-R BS.706, se ha desarrollado un sistema de datos similar al sistema radiocomunicación de datos (RDS) implementado en la banda en ondas métricas (Recomendación UIT-R BS.643) para los servicios de radiodifusión sonora con MA en bandas por debajo de 30 MHz. El sistema, denominado AMDS, se ha implementado en algunos países, especialmente de Europa Occidental, utilizando modulación de fase sobre la portadora principal de sonido y permitiendo velocidades de datos de hasta 200 bit/s. La utilización de AMDS no interfiere con las características de ocupación del espectro normalizadas del servicio de radiodifusión sonora en MA.

5.2.2.2 Radiodifusión sonora analógica con modulación de frecuencia

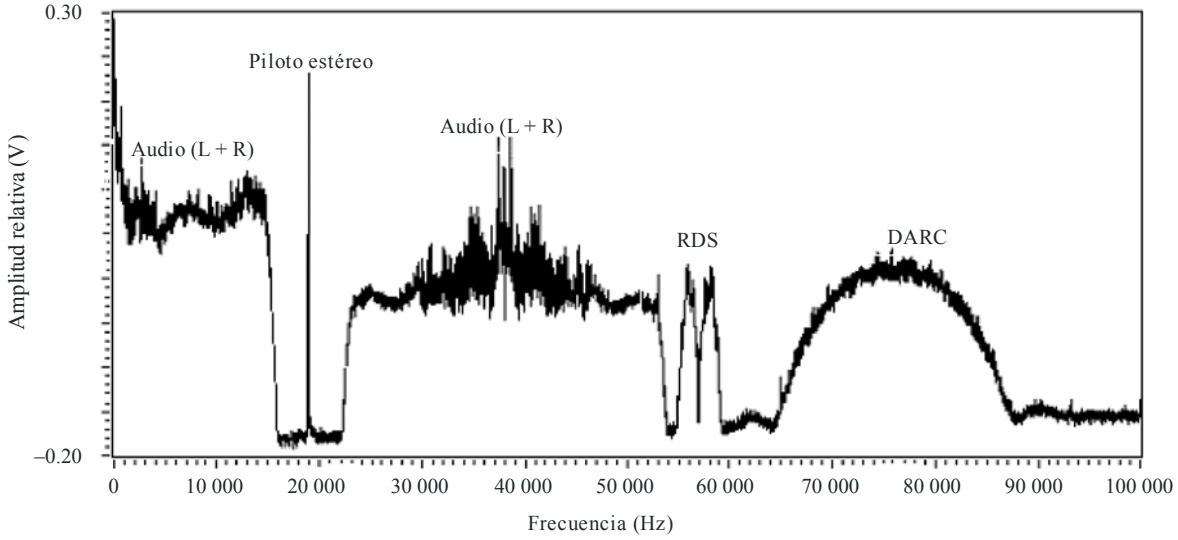
La radiodifusión sonora analógica con modulación de frecuencia ha sido un desarrollo relativamente tardío en la historia de las radiocomunicaciones. La UIT estableció las disposiciones básicas sobre la utilización de la banda en ondas métricas para radiodifusión con MF durante los años sesenta y el número de oyentes en MF superó a los oyentes en MA en los años setenta.

La Recomendación UIT-R BS.450 es una referencia fundamental para las normas de radiodifusión con MF que se utiliza mundialmente. Dicha Recomendación presenta las normas para radiodifusión en MF en la banda en ondas métricas, incluyendo las frecuencias utilizadas, el pre-énfasis y las características generales del sistema.

La señal estereofónica con MF se compone básicamente de un conjunto de portadoras multiplexadas en la señal de banda de base, a saber, audio monofónico (canales izquierdo y derecho), tono piloto, audio estereofónico (izquierdo – derecho), sistema de radiocomunicación de datos (RDS, RBDS), SCA (canal auxiliar, autoridad de comunicación subsidiaria) y sistemas de datos de alta velocidad (por ejemplo, HSDS, DARC, C2R, FMeXtra). La señal multiplexada completa puede constar de la señal monofónica de 0 a 15 kHz, tono piloto a 19 kHz, señal estereofónica de 23 a 53 kHz, RDS a 57 kHz y, por ejemplo, DARC de 76 a 86 kHz.

FIGURA 5.2-1

Espectro en banda de base de la señal multiplexada con MF



El sistema de radiocomunicación de datos (RDS) se desarrolló en el seno de la Unión Europea de Radiodifusión en 1984, y fue posteriormente adoptado con mejoras por la Unión Europea como la norma EN 50067 y por la UIT como la Recomendación UIT-R BS.643.

El sistema RDS utiliza modulación de amplitud con portadora suprimida por una señal de datos bifase sobre una frecuencia subportadora de 57 kHz, enganchada en fase o en cuadratura con el tercer armónico del tono piloto a 19 kHz. El resultado de esta señal modulada es equivalente a una transmisión MDP con velocidades de datos de aproximadamente 1187,5 bit/s.

El sistema de radiodifusión de datos (RBDS) se implementó en los Estados Unidos de América sobre la base del RDS pero con modificaciones introducidas por la NRSC en 1992. Las características de modulación de RBDS son las mismas que las de RDS y los receptores diseñados para RDS funcionan, por lo general, con RDBS. Las diferencias residen fundamentalmente en las tablas de tipo de programa y otras funcionalidades, sin afectar a la modulación ni a las capas de transmisión.

También se han desarrollados otros sistemas para alcanzar velocidades de datos superiores (16 a 30 kbits/s), entre los que cabe mencionar los siguientes: HSDS, DARC, C2R, FMExtra. Estos sistemas han tenido un éxito limitado y no se analizarán en este capítulo.

Para minimizar las interferencias entre canales de radiodifusión sonora con MF adyacentes, la Recomendación UIT-R BS.412 limita la máxima desviación de frecuencia a ± 75 kHz y la potencia de la señal múltiplex (potencia MPX) al nivel de AF de un tono sinusoidal con una desviación de 19 kHz.

No debe superarse esta potencia MPX de referencia de 0 dB, promediada durante un periodo de 60 s.

Uno de los problemas más críticos relacionados con la radiodifusión sonora analógica con MF es la intermodulación generada en receptores de navegación aeronáutica (ILS y VOR) debido a las múltiples

señales presentes en frecuencias cercanas a 108 MHz. La Recomendación UIT-R SM.1009 describe en detalle los mecanismos y procedimientos de cálculo involucrados.

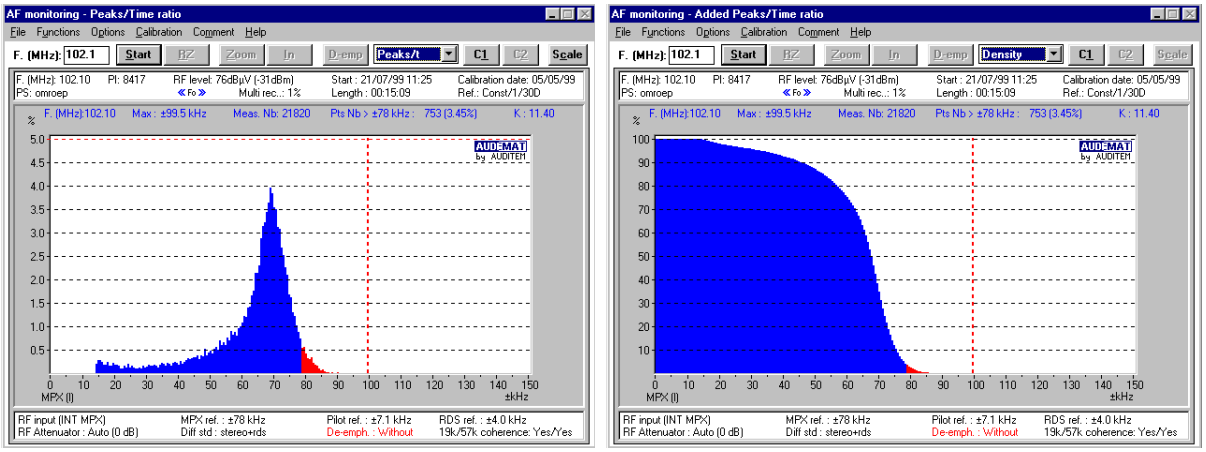
Debido a que el espectro de las señales de radiodifusión sonora analógica es mucho más amplio que la anchura de banda de un receptor ILS o VOR, la interferencia denominada "B1" puede afectar a más de un canal de radionavegación aeronáutica. La importancia de la interferencia y el número de canales ILS o VOR afectados dependen de la potencia de entrada al receptor y de la anchura del espectro máxima y media de los transmisores de radiodifusión sonora con MF.

La desviación máxima determina la anchura máxima del espectro de radiofrecuencia y la potencia MPX determina el espectro medio. El servicio de comprobación técnica deben medir la desviación y la potencia MPX a fin de evitar interferencias innecesarias, especialmente sobre los servicios de seguridad de la vida como VOR e ILS. Para conseguir resultados precisos, junto con información detallada sobre la propia medición, el equipo utilizado en las mediciones debe satisfacer requisitos específicos descritos en la Recomendación UIT-R SM.1268.

En la Recomendación UIT-R SM.1268 se establece que la observación de las emisiones de radiodifusión con MF se realice durante un periodo de 15 min. Los valores medidos, incluidos los valores de cresta de la desviación en 50 ms, deben procesarse y pueden presentarse en un gráfico de distribución junto con una función de distribución acumulativa complementaria (CCDF) de forma similar a las figuras siguientes. Nota: la representación de las curvas de distribución estadística dependen del equipo de medición utilizado. Es necesario que el equipo sea conforme a la Recomendación UIT-R SM.1268.

FIGURA 5.2-2

(a) Gráfico de la distribución y (b) función de distribución complementaria de la desviación de frecuencia en radiodifusión con MF



a) b)

Spectrum-5.2-02

La propagación por trayectos múltiples es un problema general para las señales con MF en las bandas de ondas métricas y frecuencias superiores. El efecto de la propagación por trayectos múltiples en sistemas con MF es una distorsión inaceptable de la señal modulada, que puede modificar el valor indicado en el medidor de modulación MF en un factor de hasta 2.

Debido a la propagación por trayectos múltiples, la MF se convierte en un cierto porcentaje de modulación en amplitud por adición vectorial en la antena receptora. En consecuencia, es posible identificar la propagación por trayectos múltiples midiendo la modulación en amplitud de una portadora modulada en frecuencia. Para este fin, el medidor de modulación tiene que medir simultáneamente la MA y la MF/MP.

A tal efecto, los instrumentos utilizados permiten mediciones paralelas de la desviación y la profundidad de modulación, calculando de forma directa el factor de conversión expresado como un % de la profundidad de modulación respecto a la desviación en kHz de la señal MF.

En la Recomendación UIT-R SM.1268 se definen valores máximos de la cantidad de MA así como otros prerrequisitos para una medición precisa.

5.2.2.3 Radiodifusión de televisión analógica

Las principales normas de radiodifusión de televisión analógica definidas en la UIT son NTSC; PAL y SECAM, cuyas señales en banda de base se definen en la Recomendación UIT-R BT.1700. Las características de la banda base definen parámetros que pueden ser utilizados por instrumentos especializados en el análisis objetivo de la calidad de vídeo.

La Recomendación UIT-R BT.1439 describe métodos de medición de parámetros de calidad intrínseca aplicables a los sistemas de televisión analógicos, incluyendo mediciones de estudio específicas. En dicha Recomendación se incluyen procedimientos de medición de la ganancia de inserción, más aplicables a señales de estudio, ruido (continuo, de baja frecuencia, ruido periódico, ruido impulsivo), y de distorsión lineal y no lineal.

En los diagramas siguientes, elaborados a partir de los de la Recomendación UIT-R BT.1439, se presenta un breve resumen de los parámetros que pueden medirse en radiodifusión de televisión analógica, clasificados según los efectos observados.

FIGURA 5.2-3

Clasificación de la distorsión lineal de las señales de vídeo analógicas

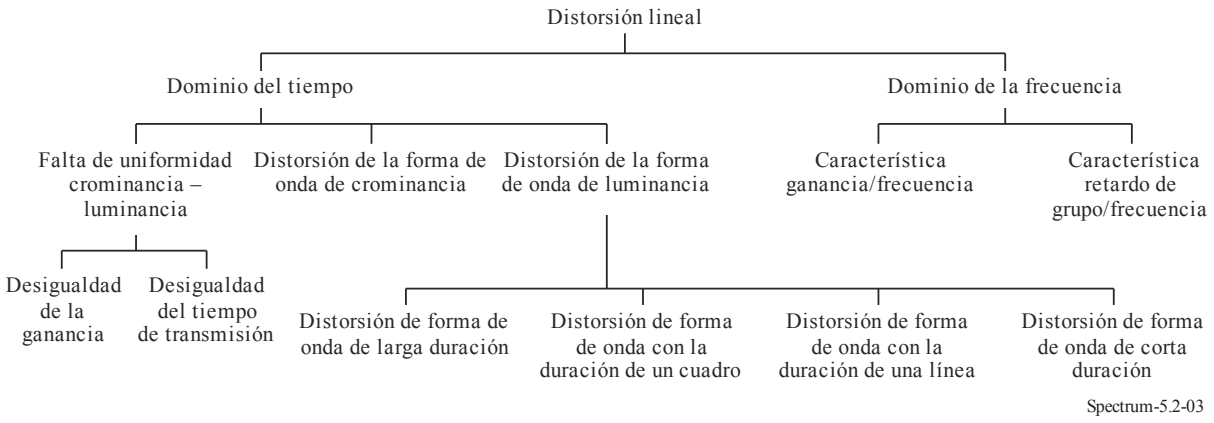
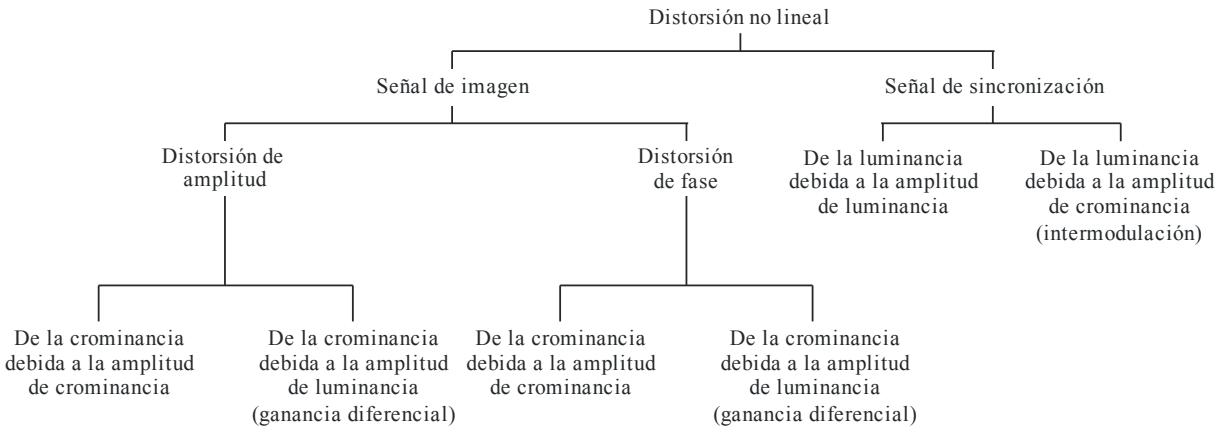


FIGURA 5.2-4

Clasificación de la distorsión no lineal de las señales de vídeo analógicas



Para medir estos efectos de forma concisa, tal como describe Fisher (2008), es por lo general necesario utilizar patrones de la señal de prueba. Dichas pruebas también pueden describirse en términos del patrón utilizado (es decir, amplitud de la barra blanca; amplitud de sincronismo; amplitud de ráfaga, inclinación de la barra de blanco, amplitud del impulso de duración 2T, factor K para 2T, amplitud y retardo de luminancia-crominancia en el impulso de duración 20T, no linealidad estática en la escala de grises; ganancia y fase diferencial de la escala de grises con subportadora de color; relación de señal de luminancia ponderada y no ponderada a ruido y zumbido).

Los receptores de prueba analógicos pueden proporcionar información sobre el nivel de la portadora de imagen, nivel de la portadora de sonido, desviación de las portadoras de sonido, frecuencias de las portadoras de imagen y sonido, portadora residual de imagen, modulación incidental de fase (ICPM). La mayoría de estas mediciones también pueden realizarse mediante equipos de comprobación técnica del espectro comunes que proporcionan información básica de las características de la señal, principalmente mediante la evaluación del nivel, la frecuencia y las relaciones diferenciales de dichos parámetros. Otras informaciones, como la modulación de fase incidental requieren un sistema con capacidad de análisis vectorial.

En la Recomendación UIT-R BT.1701 se incluyen las características espectrales de diversas variantes de las normas más utilizadas en distintos países para anchuras de banda de 6 a 8 MHz.

5.2.2.4 Radiodifusión sonora digital

La radiodifusión sonora digital ha estado en evolución desde los años ochenta, pero su implantación ha sido más lenta que la de la radiodifusión de televisión digital.

No obstante, tal como se señala en la Recomendación UIT-R BS.774 y a pesar de su mayor lentitud de implantación, es previsible que la utilización de tecnologías digitales proporcione numerosos beneficios, incluida la mejora del audio que permite la recepción con calidad CD, una utilización del espectro más eficiente, mejores prestaciones en entornos de trayectos múltiples, capacidad de crear redes de frecuencia única y servicios más sofisticados, como comunicaciones de datos, incluidas imágenes, metadatos de los contenidos, información de tráfico, radiobúsqueda, etc.

La Recomendación UIT-R BS.1114 presenta tres normas para las bandas de ondas métricas y decimétricas. En la presente Recomendación se hace referencia a dichos sistemas como Sistemas Digitales A, F y C, respectivamente, comercialmente conocidos como Eureka 147 – DAB, ISDB-T_{SB}, e IBOC DSB. Los tres sistemas utilizan MDFO para la codifican de los canales, con corrección de errores en el caso del sistema DAB, y proporcionan una recepción con "calidad MF" y una anchura de banda inferior a 200 kHz para cada programa de audio codificado, mejorando así la eficiencia del espectro.

La Recomendación UIT-R BS.1615 incluye dos normas para las bandas de ondas decamétricas, hectométricas y kilométricas, a saber, DRM (*Digital Radio Mondial*) y, de nuevo, IBOC DSB. Aunque dicha Recomendación se centra en frecuencias inferiores a 30 MHz, la DRM utiliza MDFO y, con la denominación de DRM+, amplía su funcionamiento a la banda inferior de las ondas métricas hasta 120 MHz, utilizando canales con una anchura de banda de 100 kHz. Ambos sistemas mejoran la calidad de la recepción del sonido manteniendo la misma anchura de banda que los servicios analógicos originales que pretenden sustituir.

La evaluación de la calidad intrínseca de estos sistemas se realiza, por lo general, midiendo, para los sistemas A, F y DRM la tasa de errores en los bits (BER) y para el sistema C la relación señal a ruido (*SNR*), la tasa de errores en los bloques (BLER) y la *S/N*. Si bien la medición de la relación *S/N* puede hacerse utilizando equipos de comprobación técnica comunes, la correlación teórica de dicha relación con la tasa de errores puede extrapolarse a partir de estudios de laboratorio, como el que recoge la Recomendación UIT-R BS.1114 para sistemas por encima de 30 MH y la Recomendación UIT-R BS.1615 para sistemas por debajo de 30 MHz. Una medición adecuada de la tasa de errores debe realizarse utilizando equipos especializados integrados en el correspondiente decodificador.

La medición de la *SNR* es ciertamente problemática, ya que la presencia de la señal hace imposible evaluar el nivel real de ruido. Una alternativa es apagar temporalmente el receptor, algo que es imposible en la mayoría de los casos de comprobación técnica, excepto con fines experimentales y en las pruebas de puesta en funcionamiento. Otra alternativa es extrapolar el nivel de ruido considerando mediciones realizadas sobre canales adyacentes vacíos, suficientemente lejanos como para evitar emisiones no esenciales de la portadora evaluada pero suficientemente cercanos para mantener una correlación razonable con el valor original de ruido en el canal. Algunos sistemas de medición automática para sistemas digitales denominan *SNR* a otro tipo de medición de errores, cuya denominación más correcta es tasa de errores de modulación (*MER*)

La MER se calcula como la relación entre la potencia de una señal IQ y la potencia del vector de error, donde el vector error se calcula como la diferencia entre la señal recibida y los valores previsibles de IQ, teniendo en cuenta la constelación ideal estimada por el receptor. Las mediciones de la MER deben ser idénticas a las de SNR cuando el único ruido que afecta a la señal es ruido gaussiano blanco, situación que no se produce en el mundo real, donde normalmente se observan trayectos múltiples y efectos de distorsión no lineal.

Los cuadros y elementos expuestos a continuación presentan las principales características de ajuste de equipos de comprobación técnica destinados a evaluar características espectrales de las principales normas de radiodifusión sonora digital.

La asignación de canales es función de la reglamentación regional.

Cuando se evalúan sistemas híbridos, que radiodifunden al mismo tiempo señales analógicas y digitales (radiodifusión simultánea), tal como se propone en la radio de alta definición y en DRM, es posible realizar una medición objetiva y sencilla de la calidad registrando los instantes en que se conmuta entre la modulación analógica y la digital.

En dichos sistemas, el receptor conmuta automáticamente de analógico a digital cuando la tasa de errores supera un umbral predefinido.

Aunque dicha alternativa proporciona algunos beneficios en términos de simplificación del sistema y de procedimientos, su uso debe planificarse y utilizarse con sumo cuidado ya que los resultados obtenidos pueden estar limitados a las condiciones específicas de los receptores utilizados, haciendo difícil la comparación de dichos resultados con otros cuyas características de calidad de funcionamiento sean diferentes.

En cualquier caso, es muy recomendable tener un buen conocimiento de las características del receptor, tales como la sensibilidad y la tasa de errores máxima aceptable.

a) Recomendación UIT-R BS.1114, Sistema A – Eureka 147 – DAB

Modulación	MDFOC con MDPD-4 π/4
Bandas de frecuencia	Ondas métricas y decimétricas
Anchura de banda del canal	1,54 MHz
Portadoras por canal	
Modo I	1 536 con separación de 1kHz
Modo II	384 con separación de 4kHz
Modo III	192 con separación de 8kHz
Modo IV	768 con separación de 2kHz
BER crítica con ruido gaussiano blanco aditivo	1×10^{-4}
SPAN para visualización de un solo canal	2 MHz
Anchura de banda de referencia o filtro por BIN	4 kHz
Velocidad de barrido/tiempo de integración	Lenta (2 s)

Utilizando una anchura de banda de medición de 4 kHz se aplica la máscara espectral siguiente:

	Frecuencia respecto al centro del canal (kHz)	**Diferencia de nivel respecto al nivel de cresta en el canal (dB)**
Transmisores funcionando en situaciones no críticas o en la banda de 1,5 GHz	± 970	–0
	± 970	–30
	± 3 000	–80
Transmisores funcionando en situaciones críticas	± 770	–0
	± 970	–45
	± 1 750	–80
	± 3 000	–80
Transmisores funcionando en zonas donde se utiliza el bloque de frecuencias 12 D	± 770	–0
	± 970	–52
	± 2 200	–101
	± 3 000	–101

b) Recomendación UIT-R BS.1114, Sistema F – ISDB-TSB

Modulación	MDFO con MDPD-4, MDP-4, MAQ-16, MAQ-64
Bandas de frecuencia	Ondas métricas y decimétricas
Anchura de banda del canal	429 kHz, 500 kHz ó 572 kHz, en función del tamaño del raster del canal de referencia (6, 7 ó 8 MHz)
Portadoras por canal	En función del número de segmentos utilizados por canal, simple o triple
Modo 1	109 ó 325
Modo 2	217 ó 649
Modo 3	433 ó 1297
BER crítica con ruido gaussiano blanco aditivo	1×10^{-4}
SPAN para visualización de un solo canal	6 MHz
Anchura de banda de referencia o filtro por BIN	10 kHz
Velocidad de barrido/tiempo de integración	Lenta (2 s)

Utilizando una anchura de banda de medición de 10 kHz se aplica la máscara espectral siguiente:

	Frecuencia respecto al centro del canal (kHz)	**Diferencia de nivel respecto al nivel de cresta en el canal (dB)**
Segmento único de canal de 429 kHz (Raster del canal de 6 MHz)	± 220	0
	± 290	–20
	± 360	–30
	± 1 790	–50
Segmento triple de canal de 429 kHz. (Raster del canal de 6 MHz)	± 650	0
	± 720	–20
	± 790	–30
	± 2 220	–50
Segmento único de canal de 500 kHz. (Raster del canal de 7 MHz)	± 255,5	0
	± 325,5	–20
	± 395,5	–30
	± 1 825,5	–50

	Frecuencia respecto al centro del canal (kHz)	**Diferencia de nivel respecto al nivel de cresta en el canal (dB)**
Segmento triple de canal de 500 kHz. (Raster del canal de 7 MHz)	± 756,5	0
	± 826,5	–20
	± 896,5	–30
	± 2 326,5	–50
Segmento único de canal de 572 kHz. (Raster del canal de 8 MHz)	± 291,5	0
	± 361,5	–20
	± 431,5	–30
	± 1 861,5	–50
Segmento triple de canal de 572 kHz. (Raster del canal de 8 MHz)	± 864,5	0
	± 934,5	–20
	± 1 004,5	–30
	± 2 434,5	–50

c) Recomendación UIT-R BS.1114, Sistema C – IBOC DSB

Modulación	MDFO con MDP-4
Bandas de frecuencia	Ondas métricas
Anchura de banda del canal	400 kHz
Portadoras por canal	
MP1 (híbrido)	380 dividido en 20 particiones de frecuencia
MP2 a MP3(híbrido ampliado)	Hasta 530 dividido en 28 particiones de frecuencia
MP5, MP6, MS1 a MS4 (todos digitales)	Hasta 1093 dividido en 58 particiones de frecuencia
BER crítica con ruido gaussiano blanco aditivo	0,16
SPAN para visualización de un solo canal	1,3 MHz
Anchura de banda de referencia o filtro por BIN	1 kHz
Velocidad de barrido/tiempo de integración	Lento (2 s)

Utilizando una anchura de banda de medición de 1 kHz se aplica la máscara espectral siguiente:

	Frecuencia respecto al centro del canal (kHz)	**Diferencia de nivel respecto al nivel de cresta en el canal (dB)**
Señal digital en modo híbrido	0 a ± 50	–83.39
	± 50 a ± 95	{–83,39 + (|frecuencia (kHz)| – 50 kHz) × 0,2}
	± 95 a ± 100	{–61,39 + (|frecuencia (kHz)| – 100 kHz) × 2,6}
	± 200 a ± 205	{–61,39 – (|frecuencia (kHz)| – 200 kHz) × 2,6}
	± 205 a ± 250	{–74,39 – (|frecuencia (kHz)| – 205 kHz) × 0,2}
Señal en modo todo digital	± 200 a ± 207,5	{–51,39 – (|frecuencia (kHz)| – 200 kHz) × 1,733}
	± 207.5 a ± 250	{–64,39 – (|frecuencia (kHz)| – 207,5 kHz) × 0,2118}
	± 250 a ± 300	{–73,39 – (|frecuencia (kHz)| – 250 kHz) × 0,56}
	± 300 a ± 600	–101,39
	> 600	–111,39

d) Recomendación UIT-R BS.1615 – DRM por debajo de 30 MHz

Modulación	MDFOC con MAQ-64, MAQ-16 o MAQ-4
Bandas de frecuencia	Ondas kilométricas, hectométricas, decimétricas y para baja de las ondas métricas (120 MHz)
Anchura de banda del canal	4,5; 5,0; 9,0; 10,0; 18,0 ó 20,0 kHz en función del tipo de ocupación seleccionada.
Portadoras por canal	Valores máximos para una anchura de banda del canal de 4,5 a 20kHz respectivamente
Modo A	98; 110; 202; 226; 410; 458
Modo B	90; 102; 182; 206; 366; 410
Modo C	- ; - ; - ; 138; - ; 280
Modo D	- ; - ; - ; 88; - ; 178
BER crítica con ruido gaussiano blanco aditivo	1×10^{-4}
SPAN para visualización de un solo canal	40 kHz
Anchura de banda de referencia o filtro por BIN	300 Hz
Velocidad de barrido/tiempo de integración	Lenta (2 s)

Utilizando estos parámetros debe aplicarse la máscara espectral siguiente:

	Frecuencia respecto al centro del canal (kHz)	**Diferencia de nivel respecto al nivel de cresta en el canal (dB)**
Ocupación del espectro 0 (4,5 kHz en la mitad superior o inferior del canal analógico con MA tradicional)	< ±2,385	0
	±2,385	–30
	>± 2,385	–12 dB/octava a –60 dB
	~ 13,49	–60dB
Ocupación del espectro 1 (5 kHz en la mitad superior o inferior del canal analógico con MA tradicional)	<± 2,65	0
	± 2,65	–30
	>± 2,65	–12 dB/octava a –60 dB
	~ 14,99	–60dB
Ocupación del espectro 2 (9 kHz en el canal analógico con MA tradicional)	<± 4,77	0
	± 4,77	–30
	>± 4,77	–12 dB/octava a –60 dB
	~ 26,98	–60 dB
Ocupación del espectro 3 (10 kHz en el canal analógico con MA tradicional)	<± 5,3	0
	± 5,3	–30
	>± 5,3	–12 dB/octava a –60 dB
	~ 29,98	–60 dB
Ocupación del espectro 4 (18 kHz utilizando dos de los canales analógicos en MA tradicionales)	<± 9,54	0
	± 9,54	–30
	>± 9,54	–12 dB/octava a –60 dB
	~ 53,97	–60 dB
Ocupación del espectro 5 (20 kHz utilizando dos de los canales analógicos en MA tradicionales)	<± 10,6	0
	± 10,6	–30
	>± 10,6	–12 dB/octava a –60 dB
	~ 59,96	–60 dB

e) Recomendación UIT-R BS.1615 – IBOC DSB

Modulación	MDFO con MDP-4
Bandas de frecuencia	Ondas métricas
Anchura de banda del canal	400 kHz
Portadoras por canal	
MP1 (híbrido)	380 dividido en 20 particiones de frecuencia

MP2 a MP3(híbrido ampliado)	Hasta 530 dividido en 28 particiones de frecuencia
MP5, MP6, MS1 a MS4 (todos digitales)	Hasta 1093 dividido en 58 particiones de frecuencia
BER crítica con ruido gaussiano blanco aditivo	0,16
SPAN para visualización de un solo canal	1,3 MHz
Anchura de banda de referencia o filtro por BIN	1 kHz
Velocidad de barrido/tiempo de integración	Lento (2 s)

Utilizando estos parámetros debe aplicarse la máscara espectral siguiente:

	Frecuencia respecto al centro del canal (kHz)	**Diferencia de nivel respecto al nivel de cresta en el canal (dB)**
Señal digital en modo híbrido	0 a ± 50	–83,39
	± 50 a ± 95	{–83,39 + (|frecuencia (kHz)| – 50 kHz) × 0,2}
	± 95 a ± 100	{–61,39 + (|frecuencia (kHz)| – 100 kHz) × 2,6}
	± 200 a ± 205	{–61,39 – (|frecuencia (kHz)| – 200 kHz) × 2,6}
	± 205 a ± 250	{–74,39 – (|frecuencia (kHz)| – 205 kHz) × 0,2}
Señal en modo todo digital	± 200 a ± 207,5	{–51,39 – (|frecuencia (kHz)| – 200 kHz) × 1,733}
	± 207,5 a ± 250	{–64,39 – (|frecuencia (kHz)| – 207,5 kHz) × 0,2118}
	± 250 a ± 300	{–73,39 – (|frecuencia (kHz)| – 250 kHz) × 0,56}
	± 300 a ± 600	–101,39
	>600	–111,39

5.2.2.5 Radiodifusión de televisión digital terrenal

Existen varias normas de radiodifusión de televisión digital terrenal en todo el mundo. Dichas normas comparten la misma banda y canales utilizados para la televisión analógica. Por este motivo, la ocupación del espectro sigue las mismas definiciones que para los sistemas preexistentes. Ello ha quedado recogido en la Recomendación UIT-R BT 798 y posteriormente ha sido explícitamente incluido en forma de máscaras de protección en la Recomendación UIT-R BT.1206. Debido a dicha definición, todas las normas analizadas disponen de alternativas con anchuras de banda de canal de 6 MHz, 7 MHz ó 8 MHz, con el fin de adaptarse a la anchura de banda para radiodifusión de televisión previamente utilizada.

En este punto se describen las normas que han sido objeto de un análisis más detallado en la UIT, a saber, ATSC, DVB-T y ISDB-T, teniendo como referencia la Recomendación UIT-R BT.1368, que define los criterios de planificación para los servicios de televisión digital terrenal y la Recomendación UIT-R BT.1306, donde se define la corrección de errores, la configuración de la trama de datos y los métodos de modulación y emisión de dichos sistemas. Otra de referencias utilizada para la descripción que se expone es el libro de Fisher [2008].

Otra norma que no figura en las recomendaciones mencionadas y que no se analiza a fondo en este Manual es la radiodifusión de multimedios digital terrenal (DTMB), conocida previamente como DMB-T/H. Utiliza

MDFO síncrona en el dominio del tiempo, ofreciendo dos modos de funcionamiento multiportadora para aplicaciones fijas y móviles. Puede obtenerse información adicional de este sistema de la Administración de Normalización de China.

Considerando los parámetros de calidad intrínsecos de las normas de radiodifusión de televisión digital de las diversas topologías y opciones técnicas de las redes de transmisores y, adicionalmente, los numerosos escenarios de migración de analógico a digital y de compartición de frecuencias entre redes de radiodifusión, el diagnóstico avanzado de la calidad intrínseca puede ser fundamental para una adecuada utilización de recursos de comprobación técnica del espectro, especialmente para resolver interferencias y promover la utilización eficiente del espectro.

Una característica especial de alguna de las normas de modulación digital es la posibilidad de desplegar redes de frecuencia única (SFN, *single frequency networks*), en las que varios transmisores funcionan en la misma frecuencia a pesar de su vecindad, transmitiendo el mismo contenido. El objetivo básico de dichas redes es lograr una mejor cobertura en una zona utilizando transmisores de menor potencia, resolver las limitaciones de propagación, tales como las debidas a las características topográficas y/o la distancia, y proporcionar una mejor eficiencia espectral.

Ello es posible gracias a la capacidad de los sistemas de transmisión digitales de cancelar las señales debidas a trayectos múltiples y considerar los diversos transmisores como un caso grave de propagación por trayectos múltiples; es decir, en la medida en que los símbolos transmitidos sean los mismos, la frecuencia sea la misma y la diferencia temporal entre transmisores se encuentre dentro de límites aceptables, los receptores pueden decodificar la señal sin errores. Esta técnica es similar al traspaso flexible ("soft") o traspaso con continuidad de las redes de comunicaciones móviles basadas en AMDC.

De hecho, la capacidad de operar en modo SFN es inherente a cualquier esquema de transmisión digital que proporcione características robustas contra la propagación por trayectos múltiples y, por tanto, también puede utilizarse fácilmente en la mayoría de los sistemas de transmisión con MDFO, tanto para radiodifusión sonora como de televisión, aunque se aplique más frecuentemente para esta última.

La explotación de una red SFN requiere equipos especializados que permitan un análisis detallado del sistema con el fin de evaluar correctamente la calidad de servicio de la red, principalmente porque las mediciones del nivel de una señal simple no permiten determinar si la red cumple sus requisitos de modulación ni si las interferencias que sufren algunas zonas son debidas a restricciones técnicas de la SFN o a otras causas.

En el proyecto IST-2000-26222 ANTIUM "*DVB-T field trial repor"* se incluye un caso de estudio de interferencia en sistemas DVB-T.

a) ATSC – Comité para Sistemas de Televisión Avanzados

Modulación	Banda lateral residual con codificación de Trellis de ocho niveles (BLR-8)
Mediciones de la calidad intrínseca	– BER (3 tipos: antes Viterbi; después Viterbi y después Reed-Solomon) – MER (tasa de errores de modulación) – Atenuación de los hombros del espectro – Respuesta en frecuencia de la amplitud – Amplitud del piloto de la portadora – Harmónicos – Retardo de grupo – Respuesta de fase
Bandas de frecuencias	Ondas métricas y decimétricas
Portadoras por canal	1

BLER crítica en condiciones de RBGA	1×10^{-6} tras la decodificación Reed-Solomon
Relación portadora / ruido en un canal con ruido gaussiano blanco aditivo (AWGN)	En función de la modulación y código de canal: 3.1-20.1 dB. Obtenido a partir simulación con estimación de canal perfecto en situación de BLER crítica
SPAN para la visualización de un solo canal	10 MHz
Anchura de banda de referencia o filtro por BIN	10 kHz
Velocidad de barrido/ tiempo de integración	Promedio (300 ms)

Si la anchura de banda de medición es 500 kHz, debe aplicarse la máscara espectral siguiente. Para información adicional sobre las medidas de este sistema véase IEEE P1631/D3:

	Diferencia de frecuencia en relación con el borde del canal Δf (MHz)	**Diferencia de nivel en relación con potencia media total en el canal (dB)**
Transmisores de servicio completo (FCC 47CFR § 73.622(h))	Hasta 0,5	–47
	Entre 0,5 y 3,0	$-11.5 \times (\Delta f + 3.6)$
	> 3,0	–110
Emisiones con máscara estricta, de conformidad con FCC 47CFR § 74.794(a)	Hasta 0,5	–47
	Entre 0,5 y 3,0	$-\{[11.5 \times (\Delta f - 0.5)] + 47\}$
	> 3,0	–76
Emisiones con máscara sencilla, de conformidad con FCC 47CFR § 74.794(a)	Hasta ± 3.0	$-[(\Delta f^2 \div 1.44) + 46]$
	> ± 6,0	–71

b) DVB-T/H – Difusión de vídeo digital – Terrenal y portátil

Modulación	MDFO con MDP-4, MAQ-16, MAQ-64, MAQ-16-MR, MAQ-64-MR
Mediciones de la calidad intrínseca	– BER (3 tipos: antes de Viterbi; después de Viterbi y después de Reed-Solomon) – MER (tasa de errores de modulación) – Relación señal a ruido – AWGN (ruido gaussiano blanco aditivo) – Variación de retardo de fase – Desequilibrio de amplitud de I/Q – Error de fase de I/Q – Factor de cresta – Amplitud, fase y retardo de grupo – Respuesta impulsiva – Atenuación de los hombros del espectro
Bandas de frecuencias	Ondas métricas y decimétricas

Portadoras por canal	1 705 (modo 2k– T/H) 3 409 (modo 4k – H) 6 817 (modo 8k – T/H)
BLER crítica en condiciones de RBGA	1×10^{-4} antes de la decodificación Reed-Solomon
Relación portadora / ruido en un canal con ruido gaussiano blanco aditivo (AWGN)	En función de la modulación y código del canal, 5,0-23 dB. Obtenido mediante una prueba con un sistema prototipo y en situación de BLER crítica
SPAN para la visualización de un solo canal	10 MHz
Anchura de banda de referencia o filtro por BIN	10 kHz
Velocidad de barrido/ tiempo de integración	Promedio (300 ms)

Si la anchura de banda de medición es 4 kHz, debe aplicarse la máscara espectral siguiente, de conformidad con las Actas Finales del Acuerdo GE06, Anexo2. Para más información véase también la Recomendación UIT-R SM.1792.

	Frecuencia relativa al centro del canal (MHz)	**Diferencia de nivel en relación con el nivel de cresta en el canal (dB)**
Transmisores funcionando con una separación de canales de 7 MHz en situaciones no críticas	± 3,35	0
	± 3,7	–40
	± 5,25	–52
	± 10,5	–77
Transmisores funcionando con una separación de canales de 7 MHz en situaciones críticas	± 3,35	0
	± 3,7	–50
	± 5,25	–62
	± 10,5	–87
Transmisores funcionando con una separación de canales de 8 MHz en situaciones no críticas	± 3,9	0
	± 4,2	–40
	± 6,0	–52
	± 12,0	–77
Transmisores funcionando con una separación de canales de 8 MHz en situaciones críticas	± 3,9	0
	± 4,2	–50
	± 6,0	–62
	± 12,0	–87

c) ISDB-T – Radiodifusión digital de servicios integrados – Terrenal

Modulación	MDFO con MDP-4, MAQ-16, MAQ-64
Mediciones de la calidad intrínseca	– BER (3 tipos: antes de Viterbi; después de Viterbi y después de Reed-Solomon), puede presentarse para cada modo de transmisión – MER (tasa de errores de modulación) – Relación señal a ruido – AWGN (ruido gaussiano blanco aditivo) – Variación de retardo de fase – Desequilibrio de amplitud de I/Q – Error de fase de I/Q – Factor de cresta – Amplitud, fase y retardo de grupo – Respuesta impulsiva – Atenuación de los hombros del espectro
Bandas de frecuencias	Ondas métricas y decimétricas
Portadoras por canal	1405 (Modo 1) 2809 (Modo 2) 5617 (Modo 3)
BLER crítica en condiciones de RBGA	2×10^{-4} antes de la decodificación Reed-Solomon
Relación portadora / ruido en un canal con ruido gaussiano blanco aditivo (AWGN)	En función de la modulación y código del canal, 5,0-23 dB. Obtenido mediante una prueba con un sistema prototipo y en situación de BLER crítica
SPAN para la visualización de un solo canal	10 MHz
Anchura de banda de referencia o filtro por BIN	10 kHz
Velocidad de barrido/ tiempo de integración	Promedio (300 ms)

En el cuadro siguiente se presentan las máscaras espectrales para ISDB-T con una anchura de banda de 6 MHz (5,7 MHz). En la Recomendación UIT-R BT.1206 se presentan máscaras simplificadas para otras anchuras de banda.

	Frecuencia relativa al centro del canal (MHz)	**Diferencia de nivel en relación con el nivel de cresta en el canal (dB)**
Transmisor con menos de 0,25W (ARIB STD-B31 Versión 1.6)	± 2,79	0
	± 2,86	–20
	± 3,00	–27
	± 4,36	–44
Transmisor con potencia entre 0,25 W y 2,5 W (ARIB STD-B31 Versión 1.6)	± 2,79	0
	± 2,86	–20
	± 3,00	–27
	± 4,36	–50

Máscara subcrítica (ABNT NBR 15601:2007)	± 2,79	0
	± 2,86	–20
	± 3,00	–27
	± 3,15	–36
	± 4,5	–53
	± 9	–83
Máscara no crítica (ABNT NBR 15601:2007)	± 2,79	0
	± 2,86	–20
	± 3,00	–27
	± 3,15	–36
	± 4,5	–53
	± 9	–83
Máscara crítica (ABNT NBR 15601:2007)	± 2,79	0
	± 2,86	–20
	± 3,00	–34
	± 3,15	–50
	± 4,5	–67
	± 9	–97

5.2.3 Instrumentos específicos para la comprobación técnica de la radiodifusión

Tal como se señala en la parte introductoria de la sección 5.2, en este punto se describen orientaciones para la ampliación de los medios de comprobación técnica mediante canales de comprobación técnica adicionales adecuados a la comprobación técnica de la señal radioeléctrica y de los contenidos.

La información registrada mediante los canales adicionales puede utilizarse para identificar los transmisores, establecer la conformidad con reglamentación específica de contenidos, como el uso comercial de canales sin licencia comercial, e incluso para evaluar las características de transmisión, como por ejemplo, el horario de funcionamiento y la ocupación del espectro, la reducción de la potencia nocturna para la radiodifusión en ondas decamétricas o los parámetros de la calidad objetiva de la imagen y el sonido.

En función de las necesidades nacionales, una red de ese tipo de estaciones puede proporcionar capacidades de auditoría a organizaciones que evalúen las obligaciones de proveedores de servicios de radiodifusión, incluyendo los impuestos sobre la producción de medios, la protección del derecho de autor o incluso los derechos civiles.

De forma similar a lo establecido para la comprobación técnica del espectro, el regulador puede desplegar distintos tipos de estaciones de comprobación técnica de contenidos. En la mayoría de los casos, dado el tamaño reducido de dichas estaciones, puede resultar de interés implementarlas como un recurso adicional de las estaciones de comprobación técnica del espectro. Por ejemplo, una vez que se detecta una transmisión, se activa un elemento de grabación secundario, liberando así al receptor de comprobación técnica a fin de que pueda continuar su exploración en un rango de frecuencias más amplio.

5.2.3.1 Topología general

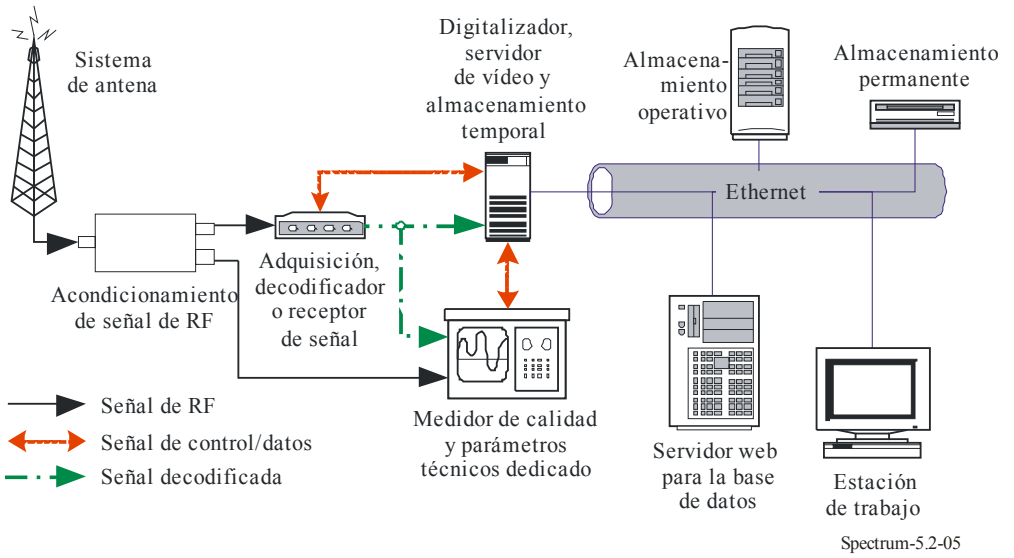
Los sistemas de comprobación técnica modernos pueden beneficiarse ampliamente de las prácticas de diseño de software más actualizadas, incluyendo el uso de componentes software escalables y reutilizables, tales como los API, los componentes del navegador y las técnicas y normas de comunicaciones como TCP/IP, HTML y servicios Web, a fin de proporcionar una plataforma más flexible y de integración más sencilla.

Debido a sus limitaciones en términos de operación y mantenimiento, actualmente no es razonable, aunque sea posible, utilizar sistemas de registro y distribución analógicos para las actividades de comprobación técnica, y, por consiguiente, no se tendrán en consideración en este capítulo.

En la representación esquemática siguiente se presenta una arquitectura simplificada de plataforma para la comprobación técnica de contenidos. En los apartados siguientes se proporciona información adicional de cada uno de los elementos de la misma.

FIGURA 5.2-5

Arquitectura simplificada de plataforma para la comprobación técnica de contenidos



Dicha plataforma puede implementarse como una estación fija o ser integrada en estaciones móviles o transportables. Varias de las funciones anteriores pueden integrarse en un único dispositivo.

5.2.3.2 Sistema de antena

El número, tamaño y tipo de antenas debe elegirse a tal forma que se admitan características de señal y condiciones de instalación específicas.

La Recomendación UIT-R BS.599 propone la utilización de antenas directivas en instalaciones de comprobación técnica de la radiodifusión. Este tipo de antena reduce significativamente la probabilidad de interferencia y aumenta la sensibilidad. En la Fig. 5.2-7 se representa la máscara de la directividad para radiodifusión sonora de dicha recomendación aplicable a las polarizaciones horizontal y vertical.

Aunque no existe una recomendación clara sobre el tipo de antena ni sobre la directividad para otros servicios, especialmente para mediciones específicas de la señal en la interfaz radioeléctrica, el concepto sigue siendo aplicable y es recomendable utilizar antenas directivas para reducir el impacto de efectos de propagación no deseables.

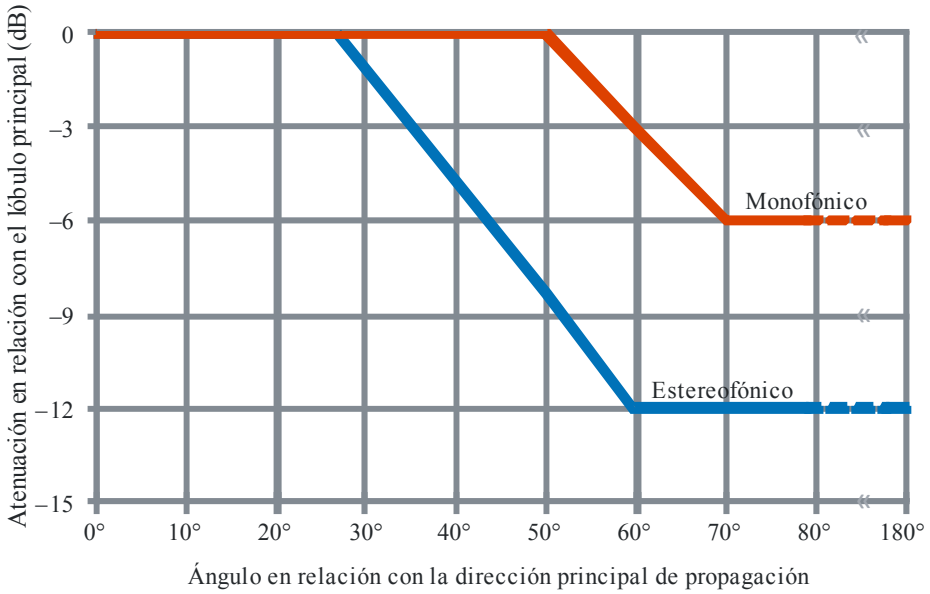
Los dispositivos móviles de comprobación técnica de contenidos utilizan preferentemente antenas no direccionales o redes de antenas, al menos en el plano horizontal. Normalmente, se utilizan monopolos o redes de antenas. Los monopolos, dipolos y antenas disco-cono son buenas alternativas como antenas pasivas en las bandas de frecuencias en ondas métricas.

En el caso de sistemas móviles más especializados, como los destinados al análisis de interferencias en redes SFN, o para tareas de optimización de redes, es conveniente utilizar redes de antenas y procesamiento espacial adaptativo con capacidad de mitigar la interferencia, ya que ofrecen una mayor flexibilidad y

mejores prestaciones en términos de rechazo de la interferencia, incluso en casos de señales correladas en la misma frecuencia, como las de las redes SFN.

FIGURA 5.2-6

Directividad de la antena receptora de un emplazamiento de comprobación técnica fija



En relación con la especificación de la ganancia para instalaciones fijas, la Recomendación UIT-R BT.804 propone los valores siguientes para las bandas de televisión:

Banda	Frecuencia (MHz)	Ganancia de antena (dB)
I	41-68	3,5
III	162-230	7,5
IV	470-582	10
V	582-960	12

Tal como se establece en las recomendaciones de referencia, estos valores se utilizan por lo general como referencias para la planificación y, como tales, pueden utilizarse para la integración de una estación de referencia que sea adecuada para el usuario genérico.

La Recomendación UIT-R BT.1368 propone valores similares para sistemas de televisión digital, con una ganancia que en ocasiones es ligeramente superior en bandas de frecuencias más bajas. Los cuadros que se proporcionan más adelante en este mismo punto deben tenerse en cuenta para una selección adecuada del sistema de antena teniendo en cuenta los requisitos de sensibilidad del receptor y los dispositivos de acondicionamiento de RF disponibles.

Acondicionamiento de la radiofrecuencia:

Los dispositivos de acondicionamiento de RF incluyen conmutador, sistema de distribución, cableado, amplificadores de bajo ruido y filtros para tratar de lograr de una calidad de recepción óptima al tiempo que se mantienen condiciones de utilización realistas.

Los niveles de sensibilidad analizados a continuación deben tomarse como referencia en el diseño de este subsistema.

5.2.3.3 Recepción y decodificación

En los casos más sencillos, la recepción y decodificación de la señal se realizan, por lo general, mediante receptores/sintonizadores y decodificadores comerciales de vídeo y audio convencionales.

Si se precisa un análisis más profundo, tal como se ha descrito anteriormente, la recepción y decodificación de la señal pueden incluir filtros espaciales adaptables para mejorar la calidad de funcionamiento de la demodulación y la decodificación.

Idealmente, el sistema debe ser suficientemente flexible para ser fácilmente integrado en receptores y decodificadores comerciales convencionales, facilitando la comprobación técnica de las distintas normas de radiodifusión digital y para servicios codificados de televisión de pago por cable, satélite o medios terrenales.

De conformidad con las Recomendaciones UIT-R BS.703 (radiodifusión analógica con MA), BS.1615 (radiodifusión sonora digital en frecuencias por debajo de 30 MHz) y BS.704 (radiodifusión con MF), la sensibilidad de la adquisición de la señal debe cumplir lo indicado en el Cuadro 5.2-1, teniendo en cuenta los receptores, el acondicionamiento de RF y los sistemas de antena.

CUADRO 5.2-1

Sensibilidad del receptor de radiodifusión sonora

Sistema	Banda de frecuencias	Anchura de banda del filtro	Intensidad de campo mínima (dB(µV/m))
Sonido DSB con MA	30 kHz-300 kHz	10 kHz	66,0
Sonido digital	30 kHz-300 kHz	9 kHz	39,1[(1)]
Sonido DSB con MA	300 kHz-3 MHz	10 kHz	60,0[(2)]
Sonido digital	300 kHz-3 MHz	10 kHz	33,1[(3)]
Sonido DSB con MA	3 MHz-30 MHz	10 kHz	40,0[(4)]
Sonido digital	3 MHz-30 MHz	10 kHz	19,1[(5)]
Sonido con MF – monofónico	66 MHz-108 MHz	150 kHz ó 100 kHz[(6)]	30,0
Sonido con MF – estereofónico	66 MHz-108 MHz	150 kHz ó 100 kHz	50,0

(1) Valor inferior estimado para DRM (modo de funcionamiento más robusto), pueden utilizarse valores de hasta 49,2 dB(µV/m) para aumentar la calidad de la transmisión. Para un modo con una ocupación espectral más estrecha, la intensidad de campo mínima utilizable es ligeramente superior. Para una descripción más detallada véase la Recomendación UIT-R BS.1615.

(2) También se soportan valores de 54 dB(µV/m) y 40 dB(µV/m).

(3) Valor inferior estimado para DRM (modo de funcionamiento más robusto) considerando exclusivamente ondas de superficie. Pueden utilizarse valores de hasta 46,5 dB(µV/m) para aumentar la calidad de la transmisión utilizando ondas ionosféricas. Para un modo con una ocupación espectral más estrecha, la intensidad de campo mínima utilizable es ligeramente superior. Para una descripción más detallada véase la Recomendación UIT-R BS.1615.

(4) La CAMR (Conferencia de Radiodifusión por Ondas Decamétricas-87, Ginebra, 1987) adoptó este valor para la recepción de DBL y BLU.

(5) Valor inferior estimado para DRM (modo de funcionamiento más robusto), pueden utilizarse valores de hasta 29.9 dB(µV/m) para aumentar la calidad de la transmisión. Para un modo con una ocupación espectral más estrecha, la intensidad de campo mínima utilizable es ligeramente superior. Para una descripción más detallada véase la Recomendación UIT-R BS.1615.

(6) 150 kHz para el sistema del tono piloto o sistema de modulación polar de 100 kHz, según el sistema local utilizado

De conformidad con las Recomendaciones UIT-R BT.804 (radiodifusión de TV analógica) y BT.1368 (radiodifusión de TV digital), la adquisición de la señal debe tener una sensibilidad que cumpla lo indicado en el Cuadro 5.2-2, teniendo en cuenta los receptores, el acondicionamiento de RF y los sistemas de antena.

CUADRO 5.2-2

Sensibilidad del receptor para radiodifusión de televisión

Sistema	Banda de frecuencias (MHz)	Anchura de banda del filtro (MHz)	Intensidad de campo mínima (dB(µV/m))
TV analógica	41-68	6, 7 ó 8	47
TV analógica	162-230	6, 7 ó 8 (1)	53
TV analógica	470-582	6, 7 ó 8	62(2)
TV analógica	582-960	6, 7 ó 8	67
TV digital – ATSC	54-88	6	35(3)
TV digital – ATSC	174-216	6	33(3)
TV digital – ATSC	470-806	6	39(3)
TV digital – DVB-T MDP-4	200	8	27(4)
TV digital – DVB-T MDP-4	550	8	33
TV digital – DVB-T MDP-4	700	8	35
TV digital – DVB-T MAQ-16	200	8	33
TV digital – DVB-T MAQ-16	550	8	39(5)
TV digital – DVB-T MAQ-16	700	8	41
TV digital – DVB-T MAQ-64	200	8	39
TV digital – DVB-T MAQ-64	550	8	45
TV digital – DVB-T MAQ-64	700	8	47
TV digital – ISDB-T MDPD-4	100	6	20,7(6)
TV digital – ISDB-T MDP-4	100	6	23,4
TV digital – ISDB-T MAQ-16	100	6	29,1
TV digital – ISDB-T MAQ-64	100	6	36,1
TV digital – ISDB-T MDPD-4	200	6	24,7
TV digital – ISDB-T MDP-4	200	6	23,4
TV digital – ISDB-T MAQ-16	200	6	33,1
TV digital – ISDB-T MAQ-64	200	6	40,5
TV digital – ISDB-T MDPD-4	600	6	30,2
TV digital – ISDB-T MDP-4	600	6	28,9
TV digital – ISDB-T MAQ-16	600	6	38,6
TV digital – ISDB-T MAQ-64	600	6	46,0

(1) La anchura de banda debe ser 6, 7 u 8 MHz, de acuerdo con el sistema local utilizado.

(2) Los valores límite en la bandas IV y V deben aumentarse en 2 dB para sistemas en banda K.

(3) Los valores límite se calculan de conformidad con las expresiones de la Recomendación UIT-R BT.1368. Los presentados están calculados para una anchura de banda de canal de 6 MHz y frecuencias de 69, 194 y 615 MHz, respectivamente.

(4) Los valores límite se calculan de conformidad con las expresiones de la Recomendación UIT-R BT.1368. Los valores presentados están calculados para una anchura de banda de canal de 8 MHz.

(5) Los valores límite se calculan de conformidad con las expresiones de la Recomendación UIT-R BT.1368. Los valores presentados están calculados para una anchura de banda de canal de 8 MHz en las frecuencias representativas seleccionadas.

(6) Los valores límite se calculan de conformidad con las expresiones de la Recomendación UIT-R BT.1368. Los valores presentados están calculados para una anchura de banda de canal de 6 MHz en las frecuencias representativas seleccionadas.

El canal adicional de comprobación técnica de contenidos también puede implementarse mediante la integración de escáneres de radiofrecuencia, como los utilizados por los radioaficionados. En comparación con los receptores de radiodifusión comercial, dichos escáneres pueden carecer de capacidades de decodificación adecuadas pero pueden ofrecer ventajas tales como una gama de frecuencias operativas más extensa y recursos para la automatización, permitiendo la provisión de una interfaz de usuario transparente para un sistema de comprobación técnica mixto compuesto de canales de medición normalizados, como los descritos en el Capítulo 3, y canales adicionales para la comprobación técnica de contenidos.

5.2.3.4 Medidor dedicado de parámetros técnicos y de calidad

En la mayoría de los casos, la evaluación de servicios básicos, como cobertura y máscara espectral, puede realizarse mediante equipos de comprobación técnica convencionales con receptores/sintonizadores y decodificadores de audio y vídeo comerciales. En el ámbito de la radiodifusión digital, pueden encontrarse receptores comerciales más sofisticados que realicen algunas mediciones básicas de calidad intrínseca, tales como la BER, aunque para evaluar completamente las características de las redes de radiodifusión pueden ser necesarios equipos más especializados, especialmente para resolver casos de interferencia complejos, como los observados en redes SFN.

Estudios experimentales, tales como el Proyecto IST-2000-26222 ANTIUM "*DVB-T multi-channel processing report*", indican que dichos sistemas, incluyendo receptor, decodificador y antenas deben proporcionar una capacidad de rechazo a la interferencia 10 a 20 dB superior a los terminales normales, de forma que pueda lograrse una medición de señales y un diagnóstico de la interferencia fiables, incluyendo la adecuada decodificación del canal de señalización y permitiendo la identificación de parámetros fundamentales tales como el tiempo de guarda, la modulación y los esquemas de codificación.

5.2.3.5 Digitalización y compresión

En la elección del sistema de digitalización, deben tenerse en cuenta las características de ruido intrínsecas, seleccionando sistemas con mejores prestaciones para aplicaciones tales como la evaluación de la calidad de los medios, es decir, con una relación de bits por muestra superior y mejores características de filtrado de entrada, o sistemas con menores prestaciones para la comprobación técnica de contenidos estándar y la clasificación de medios. En relación con sistemas actualmente disponibles, por un lado deben evitarse los que tengan menos de 8 bits por muestra y, por otro, los sistemas con más de 10 bits por muestra pueden suponer un esfuerzo innecesario para la mayoría de las aplicaciones.

En términos de resolución y escala basadas en sistemas analógicos, el formato intermedio común (CIF *common intermediate format*) define un cuadro de imagen de 352×288 pixeles. La televisión convencional se define con aproximadamente 4CIF, es decir, 704 × 576 pixeles y la televisión de alta definición con aproximadamente 16CIF, es decir, 1408×1152 pixeles. También se definen otras resoluciones inferiores, tales como QCIF, cuarto de CIF, con 176 × 144 pixeles y SQCIF, subcuarto de CIF, con 128 × 96 pixeles.

En un cálculo básico, considerando 8 bits por componente de color y 24 bits por píxel, multiplicando dichos 24 bits por los 101.376 pixeles de un cuadro CIF, se obtienen 2.433.024 bits por cuadro, es decir, 72.990.720 bits para una secuencia de vídeo de 30 cuadros por segundo. A la vista de estas cifras, se concluye fácilmente la importancia de los algoritmos de compresión de vídeo.

Los algoritmos de compresión aprovechan la redundancia natural de la información para reducir su tamaño. La redundancia puede estar asociada exclusivamente a la representación digital elegida, por lo que pueden desarrollarse algoritmos de compresión sin pérdidas, o puede incluir redundancia de la propia información, como por ejemplo, segmentos de cuadros invariantes con el tiempo, la diferencia entre la resolución de la luminancia y la resolución de la crominancia necesaria para la representación de una determinada escena, las

características espectrales de la información en relación con las limitaciones de la percepción humana. Los algoritmos que suprimen o reducen dichas redundancias producen una compresión con pérdidas. Por lo general, los algoritmos de compresión de vídeo y audio combinan ambos métodos para conseguir una mayor compresión.

Varias Recomendaciones de la UIT versan sobre la compresión de vídeo. La Recomendación UIT-T H.120 (1ª edición, 1988) centrada en la videoconferencia, fue la primera de una serie de normas UIT-T de códecs de vídeo. Le siguió la Recomendación UIT-T H.261 (1ª edición, 1990), centrada en la transmisión en canales PDH (con una velocidad de n x 64 kbit/s) y en aplicaciones como la videoconferencia.

Posteriormente, la UIT desarrolló conjuntamente con ISO/CEI en 1992 la Recomendación UIT-T H.262, comúnmente conocida como MPEG-2, que abordaba la necesidad de un códec genérico de mayor calidad y más adecuado para aplicaciones tales como la difusión y el almacenamiento en medios digitales.

La Recomendación UIT-T H.263 (1ª edición, 1996) mejoró la especificación del códec de la Recomendación UIT-T H.261, que incluía una mejor transformación y predicción entre cuadros para reducir redundancias espaciales y temporales y conseguir una mayor compresión.

La última y más destacable Recomendación de esta serie de Recomendaciones de la UIT es la Recomendación UIT-T H.264, aprobada en 2003 y modificada posteriormente en 2009. Se trata de una Recomendación desarrollada conjuntamente por el Grupo de expertos en codificación digital (VCEG) y el Grupo de expertos en imágenes en movimiento del ISO/CEI (MPEG), para lo que se estableció el Equipo Mixto de Vídeo (JVT). La norma ISO/CEI idéntica a la Recomendación UIT-T H.264 es la norma ISO/CEI 14496, también conocida como MPEG-4.

Esta última norma proporciona mejores prestaciones que la anterior, con una reducción del tamaño del fichero de hasta el 64% en comparación con la Recomendación UIT-T H.262 y del 49% en comparación con la Recomendación UIT-T H.263. La distorsión medida en términos de relación de señal de cresta a ruido (PSNR) de una secuencia de vídeo codificada a aproximadamente 768 kbit/s, es unos 4dB mayor que en la Recomendación UIT-T H.262 y 3dB mayor que en la Recomendación UIT-T H.263.

El análisis de este apartado se centra en las señales de vídeo por su mayor demanda de capacidad de procesamiento, transmisión y almacenamiento de información. Las señales de audio tienen los mismos problemas de muestreo y cuantificación, pero la transmisión y almacenamiento de los datos en bruto es factible y puede considerarse para aplicaciones de altas prestaciones. En sistemas de computadores, la norma de ficheros WAV corresponde a dicho formato digital en bruto.

Por lo general, las normas de vídeo descritas anteriormente también incluyen una capa de compresión para audio, utilizándose los mismos algoritmos para compresión de audio, aunque no esté acompañada de vídeo. Ese es el caso de formatos de conocimiento generalizado, como MP3, acrónimo de Capa 3 de MPEG, que corresponde con la capa de audio para la norma de compresión de MPEG.

En conclusión, parece clara la importancia de la compresión en la comprobación técnica y registro de contenidos. Por otro lado, puesto que la mayoría de los algoritmos de compresión también introducen ruido y distorsión, deben tenerse presentes los objetivos específicos del sistema en cuestión.

El enfoque más recomendable es considerar una solución que integre varias opciones e incluso varios códecs, permitiendo la elección del códec y la velocidad más adecuados en función de la utilización prevista de los medios

La experiencia de uso con dicho sistema ha demostrado que para aplicaciones como la navegación, el flujo continuo de bits y la identificación y clasificación de contenidos, pueden conseguirse resultados aceptables con velocidades de datos comprimidos de hasta 16 kbit/s para audio y 180 kbit/s para vídeo. Con ello pueden conseguirse calidades de audio y vídeo similares a las de aplicaciones de videoconferencia.

Para la evaluación de la calidad del vídeo debe considerarse una velocidad binaria mucho mayor, por encima de 4 Mbit/s, utilizando códecs como los de las Recomendaciones UIT-T H.264 y H.262 que ofrecen una calidad similar a la televisión digital o a un DVD. Para la evaluación de la calidad de la difusión sonora puede considerarse la utilización de un formato digital en bruto.

También es recomendable disponer de alternativas adicionales para una calidad de servicio intermedia entre las altas prestaciones para la evaluación de la calidad y las necesidades básicas para la navegación web y clasificación, ofreciendo al usuario del sistema la posibilidad de una adaptación más adecuada a sus necesidades.

Una alternativa interesante es que dicho parámetro sea configurable durante la programación de actividades.

5.2.3.6 Análisis preliminar de medios y metadatos

El análisis preliminar de medios de audio y/o vídeo comprende la creación de campos de metadatos que son fundamentales para mejorar las prestaciones de los algoritmos de búsqueda de medios y de clasificación y anotación de la información recopilada por un operador humano siempre que dicha tarea sea necesaria.

Actualmente, la información de metadatos puede incluir no sólo información básica proporcionada directamente por los receptores y sistemas accesorios, tales como sello de tiempo original, frecuencia, nivel de señal, información RDS, subtítulos codificados y tasa de errores, sino también información más compleja derivada de algoritmos de análisis especializados tales como detección de cuadros esenciales, detección de imágenes de referencia, detección de secuencias de sonidos de referencia (denominados "jingle", o "sintonía" para la identificación de programas), evaluación de la calidad, identificador del hablante, clasificación rítmica, etc.

La generación en tiempo real de metadatos avanzados puede ser de utilidad o incluso obligatoria cuando, por ejemplo, se analizan los parámetros de calidad de vídeo o se trata de identificar o clasificar características especiales (identificación de cuadros), puesto que la ulterior compresión y almacenamiento puede afectar a las características originales de la información, por ejemplo, reduciendo el número de cuadros por segundo de una secuencia de vídeo y aumentando la tasa de errores de la anotación automática de la detección de cuadros.

El diseño del sistema debe perseguir un compromiso entre el coste del procesamiento en tiempo real necesario para el análisis preliminar de medios y los beneficios de los metadatos recopilados que ayuden en un posterior procesamiento. Hasta la fecha no se conoce de ningún estudio que haya analizado este asunto, pero de hecho la constante evolución de los algoritmos y la potencia de computación harán que la balanza se incline de forma persistente en el sentido de aumentar la capacidad de los sistemas para realizar clasificaciones de medios en tiempo real.

Existen varias formas de almacenar los metadatos recopilados o producidos, que tradicionalmente se almacenarían en sistemas de base de datos con mecanismos sencillos de recuperación mediante algoritmos de consultas integrados. Este concepto sigue siendo de utilidad y puede aplicarse a la implementación de un portal de medios integrado que permita que varios usuarios accedan a los medios.

El principal inconveniente de los sistemas de base de datos sencillos es que una vez que los medios se han recuperado pueden perder sus enlaces con los metadatos; asimismo puede ser problemática la distribución y almacenamiento permanente de los medios fuera del sistema de base de datos. Para superar este problema se recomienda utilizar esquemas normalizados de descripción de multimedios, como por ejemplo MPEG-7.

MPEG-7 se describe en la norma ISO/CEI 15398 y proporciona un amplio conjunto de herramientas para la descripción de los metadatos así como herramientas para manjar la información asociada. Con MPEG-7 los metadatos pueden ser almacenados en una estructura XML incluida en el flujo de datos, permitiendo que la transmisión y almacenamiento de la información sea fácil y segura.

5.2.3.7 Distribución y procesamiento de datos

Tal como se ha analizado al inicio de esta sección, para aprovechar las ventajas de los datos de medios registrados digitalmente, los sistemas deben tener en cuenta los recursos de red para la distribución y procesamiento de la información recopilada.

Aunque la capacidad de transmisión de las redes está en continuo aumento, la utilización de la red debe plantearse con suma cautela cuando se considere la implementación de un sistema de comprobación técnica de contenidos, especialmente en términos de costos a corto y largo plazo. Siempre que sea posible, deberán utilizarse las tasas de compresión más elevadas posibles para un uso más eficiente de los recursos.

En la figura siguiente se presenta, en términos de procesamiento, un ejemplo de flujo de trabajo para dicho sistema, considerando la automatización total de tareas básicas. Este esquema presenta la interacción entre tareas automáticas y manuales para el procesamiento de medios.

Las tareas del diagrama de la Fig. 5.2-7 pueden resumirse de la forma siguiente:

Paso 1: un supervisor programa la ejecución de las tareas. La programación puede tener distintos niveles de prioridad y diferentes características de registro para acomodar los diferentes objetivos y lograr una mayor usabilidad del sistema. El sistema de adquisición automática registra la señal que se almacena en una base de datos temporal para su análisis posterior.

Paso 2: el supervisor realiza un análisis preliminar de los medios registrados para establecer su relevancia para estudios ulteriores y/o su almacenamiento.

Paso 3: procesamiento de medios por analistas y aplicaciones especializadas.

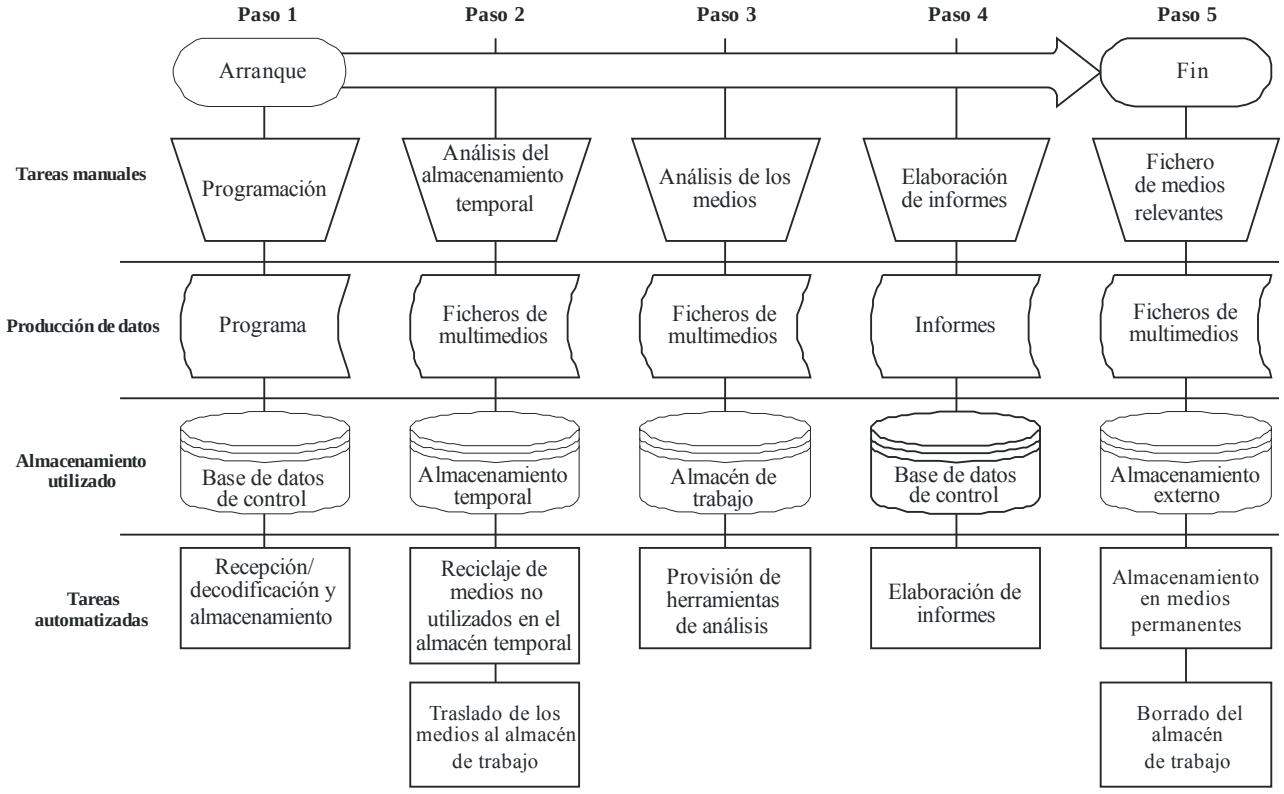
Paso 4: generación automática de informes.

Paso 5: almacenamiento permanente en medios de mayor capacidad de forma que las bases de datos de trabajo dispongan de capacidad para tareas futuras.

Debe tenerse en cuenta que con la evolución de nuevos algoritmos y técnicas de evaluación y clasificación automática de medios, el volumen de datos a analizar debería reducirse, si bien no existe actualmente perspectiva, incluso a medio plazo, de que puedan suprimirse completamente las tareas manuales.

FIGURA 5.2-7

Ejemplo de flujo de trabajo para el procesamiento de datos



Spectrum-5.2-07

5.2.3.8 Almacenamiento de datos

Tal como se describe en el diagrama del punto anterior, en un sistema de comprobación técnica de contenidos pueden definirse tres elementos de almacenamiento principales, a saber, un almacén temporal donde los medios se almacenan durante e inmediatamente después de su captura; un almacén de trabajo, donde los datos se almacenan para su ulterior procesamiento y un almacén permanente, donde los medios se almacenan una vez realizado todo el procesamiento.

El tamaño y tipo del sistema de almacenamiento varía notablemente en función de la solución adoptada. Por lo general, el cálculo del tamaño del sistema de almacenamiento debe tener en cuenta la velocidad de los datos de acuerdo con los algoritmos de compresión utilizados y la cantidad de tiempo de medios que se desea almacenar para cada paso del ulterior procesamiento de medios

No obstante, independientemente del tiempo de disponibilidad de medios considerado, la capacidad de almacenamiento tiende a agotarse en un plazo relativamente breve de tiempo. Por tanto, la ejecución de cualquier proyecto debe considerar seriamente las alternativas para el almacenamiento permanente de medios, tales como cintas, DVD y robots de medios para un almacenamiento de gran tamaño y baja velocidad.

En la implementación de este tipo de sistemas de almacenamiento, deben considerarse las formas de indexación y acceso a la información, complementando el sistema de almacenamiento de datos con una base de datos adecuada para la indexación del almacén de medios.

Referencias

ABNT NBR 15601:2007 [2008] Digital terrestrial television – Transmission system. Versión de abril de 2007.

ARIB STD – B31 [November 30, 2005] Transmission System for Digital Terrestrial Television Broadcasting. Version 1.6-E2.

BOUTOU, P.; MASSE, D. [2003] DVB-T field trial report, Project IST-2000-26222 ANTIUM: deliverable D5021 D3031b. Version 1.0.

ETSI ES 201 980 [2008] ETSI Standard – Digital Radio Mondiale (DRM) System Specification, V2.3.1.

FCC Rules – 47 CFR 73.622 (h) – That codifies FCC Memorandum Opinion and Order on Reconsideration of the 6th Report and Order, Released 23 February 1998; MM Docket No. 87-268.

FISCHER, W. [2008] Digital Video and Audio Broadcasting Technology: A Practical Engineering Guide; Springer-Verlag Berlin Heideberg.

GE06 – Acuerdo Regional RRC-06 [17 de junio, 2006] – Actas Finales de la Conferencia Regional de Radiocomunicaciones para la planificación del servicio de radiodifusión digital terrenal en partes de las Regiones 1 y 3 en las bandas de frecuencias de 174-230 MHz y 470-862 MHz, Ginebra.

IEEE P1631/D3 [February, 2008] Draft Recommended Practice for Measurement of 8-VSB Digital Television Mask Transmission Compliance for the USA.

LOUBATON, P.; MASSE, D.; MHIRI, R.; SCHAFHUBER, D. [2003] DVB-T multi-channel processing report; Project IST-2000-26222 ANTIUM : deliverable D3031b; Version 1.0.

Technical Instruction [1982] No. 5R4, [07.1982], issued by ARD and ZDF, available from Institut für Rundfunktechnik GmbH, Floriansmühlstraße 60, D-80939 Munich (en alemán).

Recomendaciones e Informes del UIT-R

NOTA – Siempre debe utilizarse la versión más actualizada de cada Recomendación.

Recomendación UIT-R BS.412 – Normas para la planificación de la radiodifusión sonora con modulación de frecuencia en ondas métricas.

Recomendación UIT-R BS.599 – Directividad de las antenas de recepción en radiodifusión sonora en la banda 8 (ondas métricas).

Recomendación UIT-R BS.643 – Sistema de radiocomunicaciones de datos para la sintonía automática y aplicaciones otras en los receptores radiofónicos con modulación de frecuencia para su utilización con el sistema de frecuencia piloto.

Recomendación UIT-R BS.703 – Características de los receptores de referencia de radiodifusión sonora con modulación de amplitud para fines de planificación.

Recomendación UIT-R BS.704 – Características de los receptores de referencia de radiodifusión sonora con modulación de frecuencia para fines de planificación.

Recomendación UIT-R BS.706 – Sistema de transmisión de datos en radiodifusión sonora monofónica con modulación de amplitud (AMDS).

Recomendación UIT-R BS.774 – Necesidades del servicio relativo a la radiodifusión sonora digital para receptores a bordo de vehículos, portátiles y fijos, mediante transmisores terrenales, en las bandas de ondas métricas y decimétricas.

Recomendación UIT-R BS.1114 – Sistemas de radiodifusión sonora digital terrenal para receptores en vehículos, portátiles y fijos en la gama de frecuencias 30-3 000 MHz.

Recomendación UIT-R BS.1116 – Métodos para la evaluación subjetiva de pequeñas degradaciones en los sistemas de audio incluyendo los sistemas de sonido multicanal.

Recomendación UIT-R BS.1283 – Guía de las Recomendaciones UIT-R sobre la evaluación subjetiva de la calidad de sonido.

Recomendación UIT-R BS.1284 – Métodos generales para la evaluación subjetiva de la calidad de sonido.

Recomendación UIT-R BS.1285 – Métodos de preselección para la evaluación subjetiva de pequeñas degradaciones en los sistemas de audio.

Recomendación UIT-R BS.1286 – Métodos para la evaluación subjetiva de los sistemas de audio con acompañamiento de imagen.

Recomendación UIT-R BS.1387 – Método para mediciones objetivas de la calidad de audio percibida.

Recomendación UIT-R BS.1534 – Método para la evaluación subjetiva del nivel de calidad intermedia de los sistemas de codificación.

Recomendación UIT-R BS.1615 – "Parámetros de planificación" para la radiodifusión sonora digital en frecuencias inferiores a 30 MHz.

Recomendación UIT-R BT.500 – Metodología para la evaluación subjetiva de la calidad de las imágenes de televisión.

Recomendación UIT-R BT.710 – Métodos de evaluación subjetiva de la calidad de las imágenes en sistemas de televisión de alta definición.

Recomendación UIT-R BT.798 – Radiodifusión terrenal de TV digital en las bandas de ondas métricas y decimétricas.

Recomendación UIT-R BT.804 – Características de los receptores de televisión que resultan esenciales para la planificación de frecuencias de los sistemas de televisión PAL/SECAM/NTSC.

Recomendación UIT-R BT.1128 – Evaluación subjetiva de los sistemas de televisión convencional.

Recomendación UIT-R BT.1129 – Evaluación subjetiva de sistemas de televisión digital con definición normalizada (SDTV).

Recomendación UIT-R BT.1206 – Límites de conformación del espectro para la radiodifusión de televisión terrenal.

Recomendación UIT-R BT.1210 – Materiales de prueba que han de utilizarse en las evaluaciones de la calidad de imagen.

Recomendación UIT-R BT.1306 – Métodos de corrección de errores, de configuración de trama de datos, de modulación y de emisión para la radiodifusión de televisión digital terrenal.

Recomendación UIT-R BT.1368 – Criterios para la planificación, incluidas las relaciones de protección, de los servicios de televisión digital terrenal en las bandas de ondas métricas/decimétricas.

Recomendación UIT-R BT.1439 – Métodos de medición aplicables en los estudios de televisión analógica para el conjunto del sistema de televisión analógica.

Recomendación UIT-R BT.1700 – Características de las señales de vídeo compuestas para los sistemas de televisión analógica convencional.

Recomendación UIT-R BT.1701 – Características de las señales radiadas de los sistemas de televisión analógica convencional.

Recomendación UIT-R SM.1009 – Compatibilidad entre el servicio de radiodifusión sonora en la banda de aproximadamente 87-108 MHz y los servicios aeronáuticos en la banda 108-137 MHz..

Recomendación UIT-R SM.1268 – Método de medición de la máxima desviación de frecuencia de las emisiones de radiodifusión en frecuencia modulada (FM) a utilizar en las estaciones de comprobación técnica.

Recomendación UIT-R SM.1792 – Medición de emisiones en banda lateral de los transmisores T-DAB y DVB-T a efectos de comprobación técnica.

Informe UIT-R BT.1082 – Modificación para unificar la metodología de evaluación de la calidad de la imagen.

Recomendaciones del UIT-T y material didáctico

Recomendación UIT-T H.120 – Códecs para videoconferencia con transmisión de grupo digital primario.

Recomendación UIT-T H.261 – Códec vídeo para servicios audiovisuales a p x 64 kbit/s.

Recomendación UIT-T H.262 – Tecnología de la información - Codificación genérica de imágenes en movimiento e información de audio asociada: Vídeo.

Recomendación UIT-T H.263 – Codificación de vídeo para comunicación a baja velocidad binaria.

Recomendación UIT-T H.264 – Codificación de vídeo avanzada para los servicios audiovisuales genéricos.

Recomendación UIT-T P.563 – Método basado en un solo extremo para la evaluación objetiva de la calidad vocal en aplicaciones de telefonía de banda estrecha.

Recomendación UIT-T P.800 – Métodos de determinación subjetiva de la calidad de transmisión.

Recomendación UIT-T P.810 – Aparato de referencia para ruido modulado.

Recomendación UIT-T P.830 – Evaluación subjetiva de la calidad de funcionamiento de los códecs digitales de banda telefónica y de banda ancha.

Recomendación UIT-T P.862 – Evaluación de la calidad vocal por percepción: Un método objetivo para la evaluación de la calidad vocal de extremo a extremo de redes telefónicas de banda estrecha y códecs vocales

Material didáctico del UIT-T [2004] Evaluación objetiva perceptual de la calidad de vídeo: televisión de referencia completa.

5.3 Comprobación técnica de sistemas celulares

5.3.1 Introducción

En el contexto de esta sección, el término "sistema celular" se utiliza para designar a todos los sistemas de radiocomunicaciones móviles que proporcionan acceso directo o indirecto a redes públicas de

telecomunicaciones, como la red telefónica pública o Internet. Teniendo en cuenta las diferencias en arquitectura de red y en grado de movilidad que afectan a las tareas y procedimientos de comprobación técnica radioeléctrica, los sistemas celulares se dividen en las categorías siguientes:

– Sistemas de radiocomunicaciones celulares.
– Sistemas de comunicaciones personales (PCS, *personal communication systems*).
– Sistemas móviles por satélite.
– Accesos de banda ancha inalámbricos (BWA, *broadband wireless access*).

5.3.2 Normas y sistemas de radiocomunicaciones celulares

Los sistemas de radiocomunicaciones celulares proporcionan acceso móvil a otros usuarios móviles y a la red telefónica pública conmutada (RTPC). Actualmente existen en todo el mundo normas muy diferentes de dichos sistemas. Se seguirán desplegando sistemas perfeccionados en función del aumento de la demanda de servicios móviles de telefonía y datos de alta calidad. Sin embargo, estos nuevos sistemas suponen una carga adicional para las administraciones de telecomunicaciones responsables de la comprobación técnica del espectro y del cumplimiento de la reglamentación. Las estaciones tradicionales de comprobación técnica de las emisiones radioeléctricas tropiezan con dificultades en la detección y supervisión de los sistemas de radiocomunicaciones celulares. En esas estaciones deben instalarse nuevos equipos y aplicar nuevas técnicas para mantener el ritmo de los progresos en el diseño de sistemas de radiocomunicaciones celulares.

Los sistemas de radiocomunicaciones celulares difieren de otros sistemas de comunicaciones telefónicas móviles terrestres en varios aspectos importantes, por cuanto:

– tienen mayor capacidad, gracias a lo cual pueden dar cabida a un mayor número de usuarios;
– su calidad de servicio es superior en zonas geográficas más vastas;
– utilizan el espectro de frecuencias de una manera más eficaz.

Los sistemas de radiocomunicaciones celulares que utilizan normas analógicas han estado en funcionamiento en el pasado en muchas regiones del mundo. Sin embargo, dichos sistemas han sido sustituidos por sistemas de radiocomunicaciones celulares digitales en casi todo el mundo. Las normas analógicas se conocen como sistemas de radiocomunicaciones celulares de primera generación. En este punto no se trata en detalle la comprobación técnica de dichos sistemas.

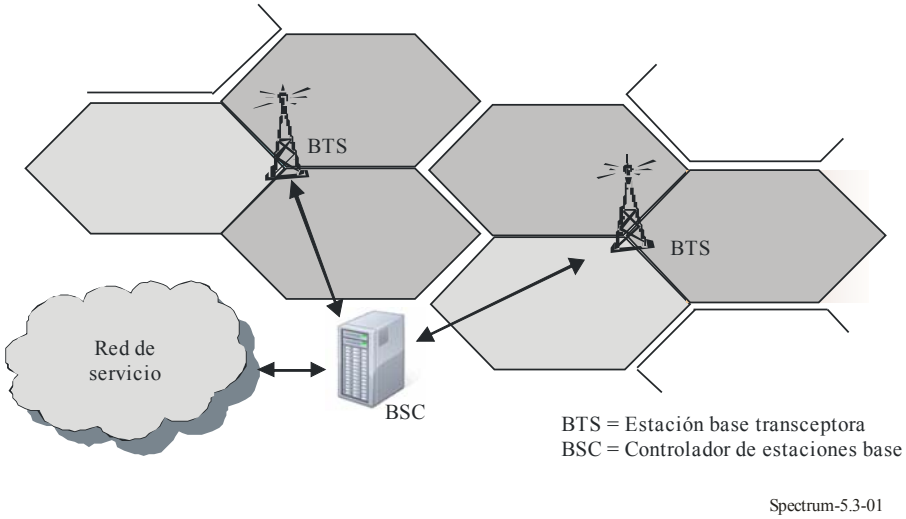
Una limitación básica de todos los sistemas de radiocomunicaciones celulares es la disponibilidad de espectro de radiofrecuencias. Todos los sistemas de radiocomunicaciones celulares aplican la reutilización de frecuencias (canales) y el traspaso controlado entre zonas geográficas conocidas como células. El tamaño de una célula está determinado por la zona de cobertura geográfica de una señal de una intensidad dada procedente del transmisor de una estación de base que funciona dentro de esa célula.

En la Fig. 5.3-1 se muestra la arquitectura simplificada del sistema de radiocomunicaciones celular digital GSM.

Para minimizar el número de estaciones base, éstas se sitúan por lo general en la intersección de tres células de forma hexagonal cada una de las cuales está atendida por antenas sectoriales direccionales con ángulos de abertura de 120º.

FIGURA 5.3-1

Arquitectura de red GSM



El proceso de traspaso controla la conmutación automática del terminal móvil (terminal telefónico u otro equipo de usuario móvil) y su conexión a la célula adyacente cuando se mueve hacia una nueva zona geográfica cubierta por otra estación base transceptora (BTS) que generalmente funciona con una o más de las técnicas siguientes:

– en un canal de radiofrecuencia distinto en el caso de acceso múltiple por división de frecuencia (AMDF);
– en un intervalo de tiempo distinto en el caso de acceso múltiple por división en el tiempo (AMDT);
– con códigos de ensanchamiento del espectro ortogonales en el mismo canal de radiofrecuencia en el caso de acceso múltiple por división de código (AMDC).

En redes AMDC es posible atender a una unidad móvil simultáneamente desde más de un estación base. El denominado "traspaso con continuidad" (*soft handover*) encamina el flujo de datos del usuario hacia dos o tres estaciones base simultáneamente en función de la situación de recepción en la ubicación del terminal móvil.

En la sección 6.6 se incluye una descripción más detallada de los métodos de multiplexación mencionados.

Existen seis normas principales de sistemas de radiocomunicaciones celulares digitales que han sido desplegados antes del año 2000.

Dichos sistemas se denominan sistemas de segunda generación (2G):

– la norma definida por el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicación (ETSI) – conocida como Sistema mundial para comunicaciones móviles (GSM);
– la norma AMDT de la Asociación de Industrias de Telecomunicación / Asociación de Industrias de Electrónicas de Norteamérica – conocida como IS-54 (reemplazada por la norma TIA/EIA-136);
– la norma AMDT del Centro de investigación y desarrollo de sistemas de radiocomunicaciones de Japón (RCR), RCR STD-27 – conocida sistema de comunicaciones celulares digital personal (PDC);
– la norma AMDC de la Asociación de Industrias de Telecomunicación / Asociación de Industrias de Electrónicas de Norteamérica – conocida como IS-95 (reemplazada por la norma TIA/EIA-95);
– la norma AMDC de la Asociación de Industrias y Empresas de Radiocomunicaciones de Japón (ARIB) ARIB T-53;

– la norma AMDC de la Asociación de tecnología de telecomunicaciones de Corea (TTA) TTA.KO-.06.0003.

La norma europea GSM sustituye a numerosos sistemas celulares analógicos incompatibles que se utilizaron previamente en toda Europa por una única red digital, que permite la itinerancia a través de las fronteras internacionales.

El GSM también se ha desplegado en Europa en la banda de 1 800 MHz y en las Américas en las bandas de 1 900 MHz y 850 MHz.

Las normas provisionales para América del Norte IS-54 e IS-95 (sustituidas hoy por las TIA/EIA-136-A y TIA/EIA-95-C) necesitaban inicialmente redes celulares digitales en las mismas bandas de frecuencias que las redes celulares analógicas.

Los proveedores de servicios sustituirán gradualmente los equipos analógicos existentes por servicios digitales, según las necesidades, para atender la demanda en los emplazamientos de las células.

La norma PDC es similar a la IS-54, aunque ha sido aplicada en una nueva banda especializada en 1 500 MHz, además de en una banda digital en 800 MHz.

Desde el año 2000 se han desarrollado nuevas normas para conformar la familia de normas IMT mediante varias ampliaciones 2G y desarrollos de sistemas de tercera generación (3G):

– Servicio General de Radiocomunicaciones por Paquetes (GPRS) y el servicio de velocidades de datos mejoradas para la evolución de GSM (EDGE): estos sistemas 2.5G son ampliaciones de velocidad media a alta de la norma GSM.

– UMTS (Sistema de Telecomunicaciones Móviles Universales), es una norma europea 3G basada en varias formas de onda AMDC (modo dúplex por división de frecuencia, DDF) y formas de onda mixtas AMDT/AMDC (modo dúplex por división en el tiempo, DDT), normalizada por las organizaciones ETSI y 3GPP. El UMTS terrenal funciona principalmente a 2 000-2 100 MHz, con varias extensiones en rangos de frecuencias de 900 MHz y 450 MHz.

– UMTS soporta numerosos servicios de radiocomunicaciones móviles (voz sobre IP, vídeo móvil, etc.). Recientemente se ha aumentado la velocidad de datos disponible y la flexibilidad del sistema mediante los modos de datos de alta velocidad, tales como el acceso por paquetes de alta velocidad en el enlace descendente (HSDPA) acceso por paquetes de alta velocidad en el enlace ascendente (HSUPA), y las evoluciones actuales hacia sistemas 4G (evolución a largo plazo, LTE).

– AMDC–2000, es una norma 3G de los Estados Unidos de América, basada en varias formas de onda AMDC (principalmente en modo DDF), que incluye las normas AMDC de segunda generación IS 95 A y B, que ha sido normalizado por las organizaciones TIA/EIA y 3GPP2. El AMDC 2000 comprende varias configuraciones radioeléctricas que abarcan la mayoría de los servicios de radiocomunicaciones móviles, incluyendo modos de paquetes de alta velocidad. Actualmente está en análisis la convergencia de las normas 3GPP2 y 3GPP.

El Cuadro 5.3-1 recoge información relativa a la interfaz aérea y el espectro de sistemas de radiocomunicaciones celulares digitales.

CUADRO 5.3-1

Características de la interfaz aérea de sistemas de radiocomunicaciones celulares digitales

Norma	GSM 850	GSM 900	GSM 1 800 (DCS-1 800) GSM 1 900 (PCS-1 900)	TIA/EIA-136 (antes IS-54)	PDC	TIA/EIA-95 (IS-95)	UMTS AMDC 2000	LTE
Método de acceso	AMDT/AMDF (FHSS)			AMDT/AMDF	AMDT/AMDF	AMDC/AMDF (DSSS)	AMCD/AMDF (DSSS)	AMDFO / SC-AMDF
Banda de frecuencias (MHz) – Base a móvil – Móvil a base	869,2-893,8 824,2-848,8	935-960 estándar 925-960 ampliada 890-915 estándar 880-985 ampliada	DCS: 1 805-1 880 PCS: 1 930-1 990 DCS: 1 710-1 785 PCS: 1 850-1 910	869-894 1 930-1 990 824-849 1 850-1 910	810-888 1 477-1 501 893-958 1 429-1 453	869-894 1 930-1 990 824-849 1 850-1 910	(véase Cuadro 5.3-4)	(según la región)
Tipo dúplex Separación dúplex (MHz)	DDF 45		DDF DCS: 95PCS: 80	DDF 45 o 80	DDF 83 o 48	DDF 45 o 80	DDF / DDT (véase Cuadro 5.3-4)	DDF / DDT
Modulación	0,3 GMSK			MDPD-4 π/4	MDPD-4 π/4	MDP-4 (enlace directo) OQPSK/HPSK (enlace inverso)	MDP-4/ MAQ-16	MDP-4/ MAQ-64
Número de portadoras	124	124 174 (ext)	DCS: 374PCS: 299	832 para la banda más baja 1 841 para la banda más alta	1600	20	(véase Cuadro 5.3-4)	(según la región)
Separación entre portadoras (kHz)	200			30	25	1 250	5 000	Hasta 20 000
Canales por portadora	8 (velocidad completa) 16 (media velocidad)			3 (velocidad completa) 6 (media velocidad)	3 (velocidad completa) 6 (media velocidad)	64	64	Variable
Potencia máxima de transmisión del móvil (W) en función de la clase de potencia declarada por el fabricante	(el valor más utilizado es el subrayado) 0,8; 2; 5; 8 En modo EDGE: 0,2; 0,5; 2		(el valor más utilizado es el subrayado) DCS: 0,25; 1; 4 PCS: 0,25; 1; 2 En modo EDGE para DCS y para PCS: 0,16; 0,4; 1	0,6; 1,6; 4	0,3; 0,8; 2; 3	1,0; 2,5; 6,3	0,125 ; 0,2 ; 0,25 ; 0,5 ; 2	
Potencia de transmisión de la base (W)	2.5 –<640			hasta 100	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado

Norma	GSM 850	GSM 900	GSM 1 800 (DCS-1 800) GSM 1 900 (PCS-1 900)	TIA/EIA-136 (antes IS-54)	PDC	TIA/EIA-95 (IS-95)	UMTS AMDC 2000	LTE
Velocidad máxima de datos (kbit/s)	14,4 GPRS: 171,2 EDGE: 384			48,6	9,6 en datos sobre circuitos conmutados 28,8 en modo paquete	14,4 (IS-95A) 115,2 (IS-95B)	UMTS: 2 000 HSDPA: 14 000 en enlace descendente HSUPA: 5 800 en enlace ascendente	> 10 000
Duración de trama (ms)	4.615			40	40	20	10	10
Estructura de trama	Intervalo de 0,577 ms 8 intervalos por trama			Intervalo de 6,66 ms 6 intervalos por trama	Intervalo de 6,66 ms 6 intervalos por trama	PCG de 1,25 ms 16 PCG por trama		

5.3.3 Descripción de los sistemas de comunicaciones personales

A diferencia de los sistemas de radiocomunicaciones celulares antes descritos, los sistemas de comunicaciones personales (PCS) son sistemas de movilidad baja. Las normas más relevantes son las siguientes:

– la norma definida por el ETSI de telecomunicaciones digitales europeas sin cordón (DECT);

– la norma RCR STD-28, conocida como PHS (*personal handyphone system*), del Centro de investigación y desarrollo de sistemas de radiocomunicaciones (RCR) de Japón.

Estos sistemas se utilizan por lo general para establecer una conexión radioeléctrica entre el equipo portátil del usuario (microteléfono, auriculares, etc.) y una estación base conectada a la RTPC mediante cable. Por tanto, aunque tienen cierta movilidad, generalmente proporcionan acceso radioeléctrico a un nivel relativamente local. El PCS puede ser punto a punto o punto a multipunto en configuraciones terrenales y satelitales.

Al igual que ocurre con los sistemas de radiocomunicaciones celulares, actualmente la mayoría de los PCS utilizan técnicas de modulación digitales. En el Cuadro 5.3-2 se proporciona información sobre algunos parámetros que afectan a la interfaz aérea.

CUADRO 5.3-2

Características de la interfaz aérea de sistemas de comunicaciones personales

Norma	DECT	PHS
Método de acceso	AMDT/AMDF	AMDT/AMDF
Banda de frecuencias (MHz) – Base a móvil – Móvil a base	 1 880-1 990 1 880-1 990	 1895-1907 1895-1907
Tipo de dúplex Separación dúplex (MHz)	DDT 0	DDT 0
Modulación	MDFG	MDPD-4 π/4
Número de portadoras	10	77
Separación entre portadoras (kHz)	1728	300
Canales por portadora	12	4
Potencia de transmisión del móvil (mW)	250	10
Potencia de transmisión de la estación base (mW)	250	10 privada 500 pública
Velocidad de datos (kbit/s)	1 152	384
Duración de trama (ms)	10	5
Estructura de trama	Intervalo de 417 υs 24 intervalos por trama	0,625 ms 8 intervalos por trama

Los servicios más comunes correspondientes al término PCS son los servicios "microcelulares" de telefonía y datos punto a multipunto, destinados a proporcionar a un usuario a pié en el hogar, la oficina o la calle, una

gama completa de servicios de voz y datos. Las células pequeñas proporcionan cobertura mejorada y capacidad. Se han desarrollado nuevas tecnologías denominadas servicio de distribución local multipunto (LMDS) y servicio de distribución multimedios (MMDS). Estos sistemas funcionan con una configuración celular y proporcionan servicios interactivos de vídeo y de datos.

El DECT añadió mejoras significativas a la tecnología precedente, denominada CT2, y se desarrolló para dar cobertura a peatones en la calle, al igual que CT2, con una arquitectura que también pudiera manejar redes inalámbricas en el interior de edificios como PABX y LAN, DECT también proporciona llamadas bidireccionales, itinerancia automática y capacidades de traspaso.

PHS es un sistema telefónico digital sin cordón similar a DECT. Una estación personal puede utilizarse con una estación base telefónica inalámbrica o con una estación celular pública.

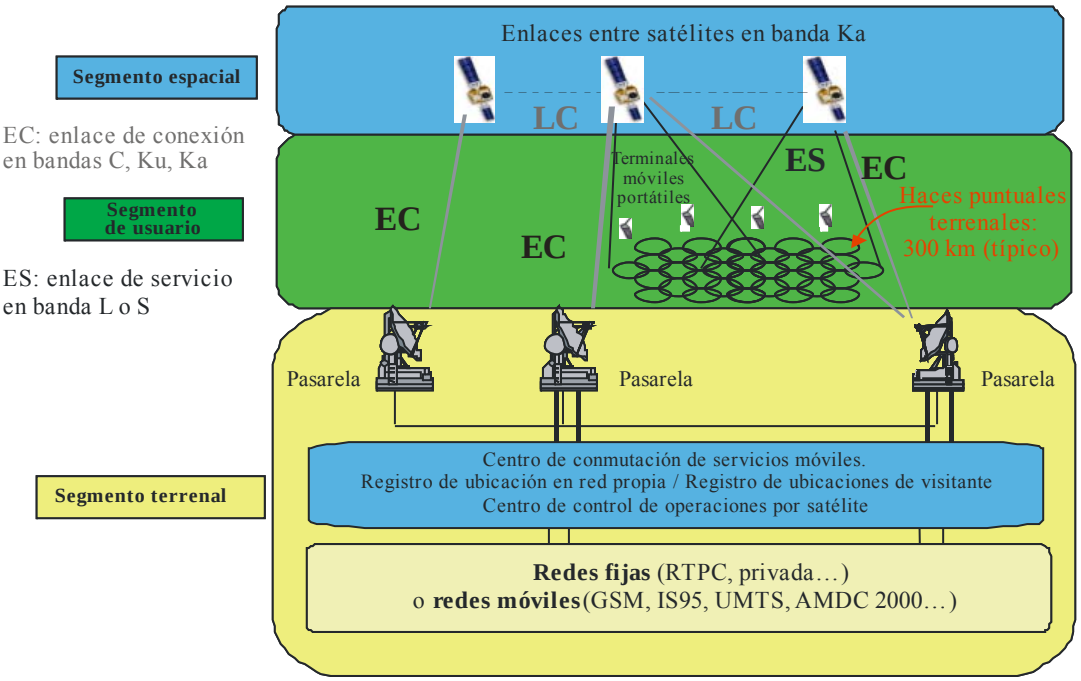
Todas las estaciones DECT y PHS supervisan continuamente el canal para detectar posibles errores. Si el número de intervalos de tiempo con errores en un periodo de tiempo definido supera un umbral, se toman medidas de prevención de la interferencia. Ello incluye la conmutación a otro intervalo de tiempo de la misma portadora, la conmutación a otra portadora, la conmutación a otra estación celular, la detención temporal la transmisión y la liberación de la línea radioeléctrica.

5.3.4 Sistemas de servicios móviles por satélite

Los sistemas del servicio móvil por satélite (SMS) utilizan satélites en órbita geoestacionaria (OSG) o no geoestacionaria (no-OSG) con características orbitales diferentes. Las unidades móviles se comunican directamente con el satélite que pasa sobre la zona y éste retransmite las comunicaciones a otro satélite o a una estación terrena para su posterior encaminamiento. Las estaciones de control hacen un seguimiento de los satélites a lo largo de sus órbitas y actúan como enlaces de conexión para el tráfico RTPC. En la Fig. 5.3-2 se ilustran los componentes principales de los sistemas del SMS.

FIGURA 5.3-2

Componentes principales de los sistemas del servicio móvil por satélite



Spectrum-5.3-02

5.3.5 Accesos de banda ancha inalámbricos

Los sistemas de acceso de banda ancha inalámbricos (BWA, *broadband wireless access*) están diseñados para proporcionar accesos de alta velocidad a servicios de datos como Internet, utilizando tecnología de radiocomunicaciones, en ubicaciones donde las líneas de telecomunicaciones de banda ancha no están disponibles o no son comercialmente viables. A diferencia de los sistemas telefónicos celulares descritos en el punto 5.3.2, los sistemas BWA normalmente asumen que el equipo de usuario está en situación cuasi estacionaria y por tanto, puede que no siempre se apliquen procedimientos de traspaso.

No obstante, se incluyen en esta sección porque la modulación, el acceso múltiple y los principios de la estructura de celdas de los sistemas BWA son similares a los de otros sistemas de radiocomunicaciones celulares y, hasta cierto punto, requieren los mismos equipos y procedimientos de comprobación técnica.

Las tecnologías de acceso de banda ancha inalámbricas más comúnmente utilizadas en los sistemas celulares son las siguientes:

– derivados de UMTS/AMCD;

– WiMAX (IEEE 802.16);

– LTE.

Debido a que el principal objetivo de los sistemas de acceso de banda ancha inalámbricos es lograr una transmisión de velocidad binaria elevada hacia y desde el cliente, los sistemas modernos están altamente optimizados para conseguir las mejores prestaciones, incluso en condiciones de propagación cambiantes. Además, y especialmente en el enlace descendente, es necesario compartir la anchura de banda disponible entre muchos usuarios de una forma muy eficiente.

Ello incluye la adaptación continua de la modulación, la anchura de banda y los instantes de transmisión de cada usuario. Los métodos de acceso sofisticados, como AMDFO, utilizados en WiMAX y LTE permiten que la estación base organice el tráfico en bloques, cada uno de los cuales con un pequeño número de subportadoras MDFO y un tiempo de transmisión breve.

Cada ráfaga del enlace descendente puede por tanto construirse como un rompecabezas que aglutine todos los bloques de recursos con una anchura de banda y tiempos de transmisión variables para cada usuario.

El resultado es una señal de radiofrecuencia muy dinámica y en ráfagas, cuyo nivel, anchura de banda y forma espectral cambian continuamente haciendo especialmente complejas las mediciones con fines de comprobación técnica.

En el Cuadro 5.2-3 se proporciona información sobre algunos parámetros que afectan a la interfaz aérea.

Puesto que el número de bandas de frecuencias utilizadas para estos sistemas varía a lo largo y ancho del mundo, no se presenta una visión completa de las frecuencias utilizadas.

CUADRO 5.3-3

Características de la interfaz aérea de los sistemas WIMAX y LTE

Tecnología	WiMAX	LTE
Método de acceso	AMDFO	AMDFO/SC-AMDF
Bandas de frecuencias (MHz)	Varias, por ejemplo, 2 300-2 400 2 500-2 690 2 545-2 575 2 595-2 625 3 410-3 594 5 200-5 800	Varias, por ejemplo 791-862 2 500-2 690
Tipo de duplexación	DDF (DDT)	DDF (DDT)
Modulación	MDFO	MDFO

Tecnología	**WiMAX**	**LTE**
Número de portadoras	Variable	Variable
Separación de canales (MHz)	1,25 ... 20	5, 10, 20
Potencia de transmisión del móvil (mW)	250	250
Duración de trama (ms)	10	10

CUADRO.3-4

Características de la interfaz aérea de los sistemas UMTS

Norma	**UMTS**									
	Banda I	**Banda II**	**Banda III**	**Banda IV**	**Banda V**	**Banda VI**	**Banda VII**	**Banda VIII**	**Banda IX**	**Banda X**
Método de acceso	AMDC/AMDF									
Bandas de frecuencias (MHz) – Estación base a móvil – Móvil a estación base	2110-2170 1920-1980	1930-1990 1850-1910	1805-1880 1710-1785	2110-2175 1710-1775	869-894 824-849	875-885 830-840	2620-2690 2500-2570	925 – 960 880 – 915	1844.9-1879.9 1749.9-1784.9	2110-2170 1710-1770
Tipo de duplexación Separación dúplex (MHz)	DDF 190	DDF 80	DDF 95	DDF 400	DDF 45	DDF 45	DDF 120	DDF 45	DDF 95	DDF 400
Modulación	MDP-4 (HSPA: MDP-4/MAQ-16)									
Número de canales	12	12	15	12	5	2	14	7	7	12
Anchura de banda del canal (MHz)	5									

5.3.6 Consideraciones sobre las mediciones

La planificación, establecimiento y funcionamiento satisfactorio de los sistemas de radiocomunicaciones celulares es una tarea compleja que conlleva la utilización de sofisticadas herramientas de planificación asistida por computador y sistemas para la medición de numerosos parámetros. La mayor parte de las tareas asociadas, incluyendo las mediciones, son responsabilidad de los operadores de red. En general, los servicios de comprobación técnica sólo precisan evaluar la cobertura e investigar la interferencia externa. Es poco habitual que los servicios de comprobación técnica tengan que disponer de sistemas avanzados capaces de medir y analizar todos los posibles parámetros relevantes para el uso de la red, por lo que no se detallan en esta sección. Lo mismo es de aplicación a los métodos de comprobación técnica que sólo pueden realizarse con la colaboración del operador de red.

5.3.6.1 Medición de parámetros de radiofrecuencia

En general, la medición de parámetros de RF de estaciones de sistemas celulares es similar a las de otros servicios y se considera incluida en el Capítulo 4.

No obstante, en este punto se describen algunas consideraciones especiales y dificultades que pueden surgir en la medición de estaciones de sistemas celulares.

Nivel de radiofrecuencia e intensidad de campo

Debido a que en la mayoría de los sistemas celulares digitales la transmisión se realiza mediante ráfagas, el nivel de radiofrecuencia relevante y la intensidad de campo de interés es el nivel medio de la ráfaga, es decir, el nivel eficaz (RMS) durante una ráfaga. Los analizadores de barrido de propósito general sólo pueden medir este nivel en el dominio del tiempo (véase 4.3.7). No obstante, la anchura de banda de medición necesaria no debe sufrir interferencia de frecuencias vecinas. Normalmente, ello es difícil en las bandas de sistemas celulares, ya que en muchas zonas todos los canales están ocupados. Por tanto, es necesaria una cuidadosa selección de los emplazamientos de medición y la utilización de antenas directivas. En sistemas celulares que utilizan AMDF y AMDT, como el GSM, es posible aprovechar el hecho de que las ráfagas en frecuencias vecinas no se producen (siempre) en el mismo intervalo de tiempo que en el canal deseado. Ello permite una medición correcta de la potencia en el dominio del tiempo incluso en el caso de canales solapados y parcialmente ocupados por frecuencias vecinas.

En sistemas AMDC, el receptor deseado recupera la energía útil recibida una vez realizado el proceso de desensanchado. Ello mejora considerablemente la relación *S/N* en una magnitud denominada ganancia de ensanchamiento espectral. No obstante, un equipo de comprobación técnica común no puede utilizar esta ganancia, por lo que sólo es capaz de apreciar el espectro de radiofrecuencia ensanchado que tiene un nivel muy bajo, lo que hace que sea difícilmente detectable. Ello aplica especialmente a enlaces AMDC en sentido ascendente. Además del control de potencia necesario, la señal deseada de los móviles está tan próxima al nivel del ruido de fondo, incluso junto al emplazamiento de la estación base, que no es posible realizar mediciones del nivel de potencia. Cuando es necesario disponer del nivel máximo posible de una estación AMDC, la medición debe realizarse en el dominio del código, utilizando un receptor de medida que pueda recuperar la señal mediante su desensanchado. Las señales resultantes se diferencian por su código de canal y pueden medirse individualmente. Existe al menos un canal lógico cuya misión es organizar la transmisión (por ejemplo, el CPICH), que siempre se transmite con el nivel constante de potencia más elevado, independientemente de la carga de tráfico de la estación. En sistemas UMTS el nivel total máximo posible de la estación es un valor fijo relativo al nivel del canal CPICH. Aunque por lo general se admite que dicha relación sea de 10 dB, algunos operadores de redes utilizan valores diferentes para diferentes estaciones base. Dichos valores pueden superar los 10 dB y, por tanto, si se aplica el valor de 10 dB puede infravalorarse la potencia máxima posible de la estación.

En sistemas AMDFO, es difícil de medir incluso el valor medio de ráfaga de la estación base dado que cambia durante la propia ráfaga. Normalmente, el servicio de comprobación técnica tiene por objetivo determinar el nivel máximo posible de la emisión, por ejemplo, cuando se comparan los resultados con la potencia máxima permitida. En dichos casos, la primera parte de cada ráfaga debe medirse coincidiendo con la transmisión del preámbulo y la información de sincronismo, que siempre presentan el nivel más alto de potencia, con independencia de la carga de tráfico de la estación base.

Modulación

La medición de parámetros de modulación de sistemas celulares, como la tasa de errores de modulación (MER), es básicamente la misma que para otros sistemas digitales y se describe en la sección 4.6. No obstante, los sistemas celulares que utilizan técnicas AMDC o LTE a menudo se diseñan de forma que se superponen las zonas de servicio de las estaciones base. Puesto que todas ellas transmiten en una única frecuencia, a menudo es difícil identificar un emplazamiento de medición y una configuración que permita diferenciar la emisión de la estación en prueba de las emisiones de otras estaciones. Si no es posible encontrar un emplazamiento de medida adecuado, incluso utilizando antenas direccionales, puede ser que la única forma práctica es realizar una medición en modo conducido a la salida (de prueba) del transmisor.

5.3.6.2 Mediciones de calidad de servicio

Los sistemas de radiocomunicaciones celulares, con su densa red de estaciones base, son particularmente propensos a que interferencia interna o externa a la red degrade determinados parámetros de calidad de servicio (QoS). Dichos parámetros solo pueden medirse con equipos de comprobación técnica especializados diseñados a medida de cada sistema celular.

La lista siguiente, no exhaustiva, presenta parámetros que afectan a la usabilidad real de una red celular en una ubicación dada:

– Relación señal a ruido (S/N) y relación señal a ruido+interferencia ($SINR$).

– Tasa de errores en los bits / tasa de paquetes erróneos / tasa de símbolos erróneos.

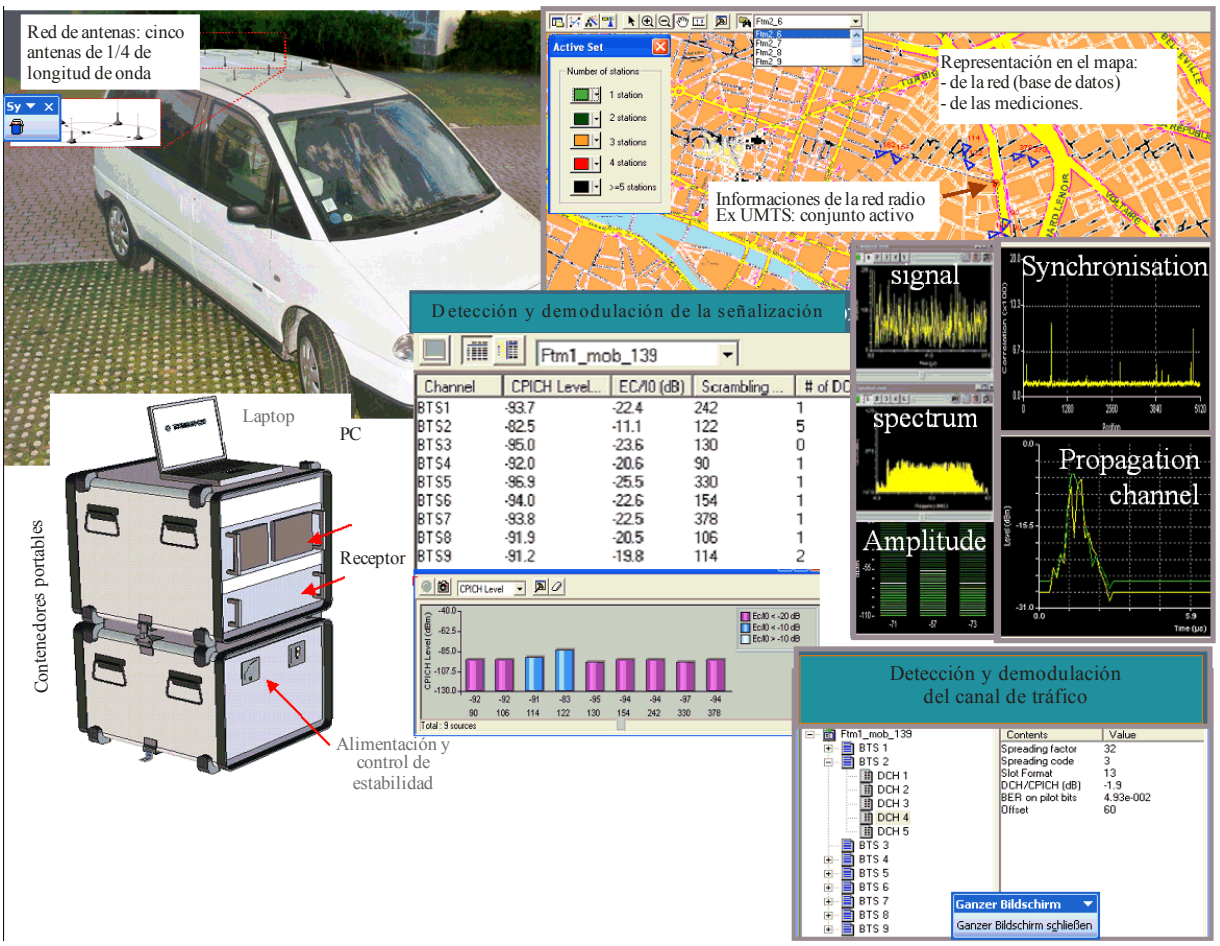
– Retardo de señales reflejadas por condiciones de trayectos múltiples / respuesta impulsiva del canal.

– Condiciones del traspaso.

Puesto que los valores de los parámetros de QoS dependen de la ubicación concreta, es conveniente utilizar sistemas de comprobación técnica sobre vehículos adaptados para realizar mediciones. En la Fig. 5.3-3 se muestra un ejemplo de un sistema de ese tipo junto con algunas de las posibles representaciones gráficas de evaluación de las mediciones.

FIGURA 5.3-3

Ejemplo de un sistema de medición para redes de radiocomunicaciones celulares



Spectrum-5.3-03

Dichos sistemas de medición especializados pueden utilizarse para detectar problemas en caso de interferencia, especialmente interferencia procedente de transmisores de la misma red debida a malas condiciones de propagación (interferencia intrared) detectada al comparar los parámetros de QoS medidos con los requisitos mínimos del sistema. Dichos equipos utilizan métodos de procesamiento de la señal que pueden ejecutarse mediante varios receptores y equipos de muestreo síncronos de canales de radiofrecuencia, asociados a redes de antenas y filtros espaciales adaptables y cooperativos. Estas técnicas mejoran la precisión y fiabilidad de las mediciones así como la calidad de funcionamiento de la demodulación y decodificación mediante técnicas cooperativas basadas en la recuperación de señales conocidas.

En las Recomendaciones UIT-R SM. 1598 y UIT-R SM.1600 se incluye información adicional sobre el filtrado adaptable y el procesamiento cooperativo.

5.3.6.3 Mecanismos de interferencia

En este punto se analiza la interferencia en redes de radiocomunicaciones celulares en diversas situaciones de interferencia.

Interferencia co-canal: Interferencia generada por múltiples transmisores funcionando en la misma frecuencia en células vecinas, como por ejemplo, el caso de un repetidor GSM que funciona sin la autorización del operador de red.

Interferencia de canal adyacente: Interferencia generada por el desbordamiento de la energía de radiofrecuencia de canales próximos o adyacentes o de varios canales.

Además de las técnicas de medición normalizadas para la resolución de interferencias descritas en el Capítulo 4, los apartados siguientes proporcionan ejemplos de situaciones habituales de interferencia y de posibles técnicas de medición específicas de redes celulares.

PCS: Demasiadas estaciones en una zona

Las limitaciones de la selectividad de los receptores y la falta de sincronización temporal entre estaciones de diferentes redes que funcionan en la misma frecuencia impiden utilizar sin interferencia todos los canales teóricamente disponibles en una ubicación dada. Por ejemplo, en Europa, el servicio DECT tiene asignados 10 canales de frecuencia, estando dicho sistema diseñado para utilizar 12 intervalos de tiempo pareados en cada frecuencia.

Por tanto, en teoría pueden coexistir 120 estaciones DECT en una ubicación dada. Sin embargo, en la práctica se producen interferencias importantes cuando funcionan simultáneamente más de unas 10 estaciones. Ello es a menudo sorprendente para los usuarios e incluso para los técnicos, aunque dicha situación se produce con frecuencia en zonas de elevada densidad de oficinas en las que grandes empresas utilizan muchos teléfonos DECT.

Una forma adecuada de identificar esta situación mediante un analizador de espectro convencional es visualizando una única frecuencia de radiofrecuencia en modo de margen cero, tomando como referencia de disparo la señal más intensa. Las ráfagas de otras estaciones en la misma frecuencia desplazarán lentamente su posición en el tiempo hasta que lleguen a coincidir con la estación de que genera el disparo de referencia. En la Fig. 5.3-4 se muestra un ejemplo de esta situación. La parte superior muestra una visión general de la banda DECT en el dominio de la frecuencia.

Todos los canales están ocupados. La parte inferior es una representación en el dominio del tiempo a la frecuencia de referencia de la figura superior (1 895,6 MHz) que muestra una trama DECT (10 ms). En este canal existe una conversación activa (1) y varias señales en reposo de otras estaciones base no sincronizadas. Las dos señaladas con (2) tienen una separación inferior a un intervalo de tiempo y en breve se interferirán mutuamente.

Si la ocupación real de la banda ya es elevada, las conexiones en colisión no encontrarán una frecuencia y/o intervalo de tiempo alternativo y serán descartadas. La única solución posible es reducir el número de estaciones PCS.

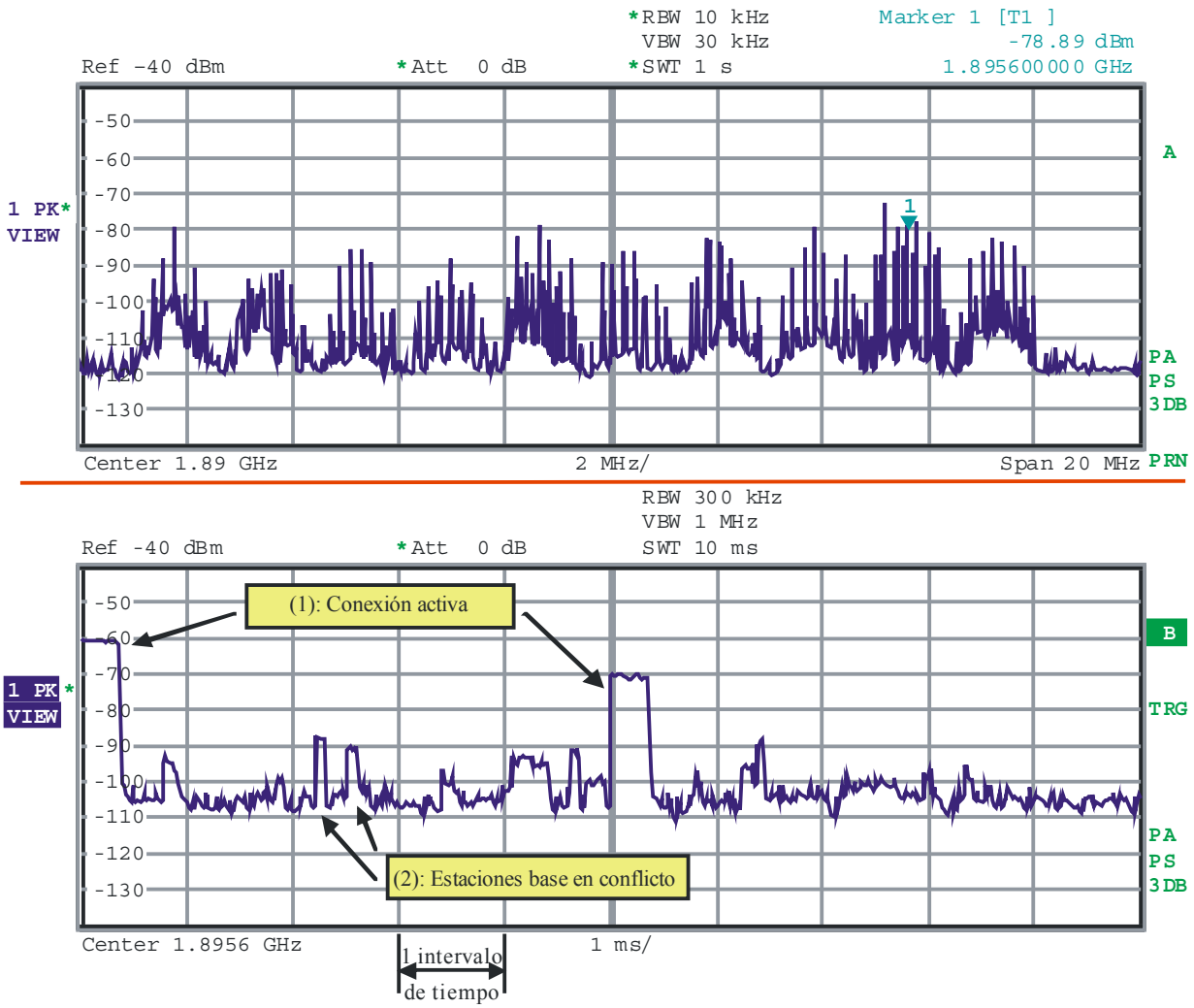
AMDC: Interferencia de fuentes externas

El principio de funcionamiento del AMDC requiere que todas las estaciones transmitan simultáneamente en la misma frecuencia y que la estación base las reciba con el mismo nivel. Ello se consigue mediante un control rápido de potencia de transmisión de las estaciones móviles. Si una estación base recibe una señal interferente de un dispositivo externo, eleva la potencia de las estaciones móviles hasta que éste supere el de la interferencia en el dominio del código.

Por lo general, la señal interferente está bastante por encima de la señal deseada en el dominio de la frecuencia.

FIGURA 5.3-4

Múltiples conexiones DECT no sincronizadas a la misma frecuencia



Spectrum-5.3-04

El primer método consiste en tratar de capturar la señal interferente utilizando un vehículo de comprobación técnica con un equipo de medición convencional, como un analizador de espectro. Si ello no es posible, por ejemplo, porque la antena de comprobación técnica no puede situarse lo suficientemente cerca de la fuente de señal interferente débil, puede utilizarse un equipo de medición especial con el fin de detectar e identificar señales interferentes por debajo del nivel de ruido y poder aislar así la señal interferente. Si este método falla, o no se dispone de un equipo especializado, el analizador de espectro o el receptor de comprobación técnica pueden conectarse a la antena del sector interferido. Por lo general, ello es posible utilizando salidas de medida en paralelo con el receptor de la red celular. De esta forma la medición puede realizarse sin interrumpir el servicio regular.

Cuando se conecta un equipo estándar de comprobación técnica, como un analizador de espectro, a la antena de la estación AMDC interferente, las interferencias externas se ponen de manifiesto como un nivel de señal deseada procedente de móviles que es sensiblemente superior al ruido de fondo. Si se trata de una interferencia de banda ancha, esta puede ser la única indicación de su presencia. En ese caso, sólo es posible identificar la fuente interferente mediante la localización de una ubicación en la que el nivel de señal interferente en una antena de medición (directiva) sea más elevado que la señal de los móviles activos. No obstante, en muchos casos la señal interferente tiene una anchura de banda muy inferior a la señal AMDC. En este caso, cuando la señal realmente interfiere al servicio tiene un nivel claramente superior a las señales

de los móviles activos debido a la ganancia del sistema (véanse la descripciones de 5.3.6.1 y 6.6.4.3). Por tanto, la localización de la fuente de interferencia mediante métodos convencionales es relativamente fácil.

Sin servicio en el interior de la zona de cobertura

Las sombras y especialmente las reflexiones en obstáculos circundantes, como edificios o montañas, pueden causar interrupciones, algo que ocurre en todas las redes de radiocomunicaciones, aunque el usuario se encuentre claramente dentro de la zona de cobertura teórica. Estos casos a menudo se identifican como interferencias, pero cuando el servicio de comprobación técnica examina la situación sobre el terreno, la intensidad de campo puede ser suficiente, sin que se detecte una señal interferente externa. La causa más probable de dicho problema es un caso extremo de recepción por trayectos múltiples (en redes MDFO una reflexión fuera del intervalo de guarda o la pérdida de sincronización entre dos transmisores dentro de una SFN). Dicha situación puede verificarse midiendo la respuesta impulsiva del canal, aunque ello requiere disponer de un equipo de medición especializado.

Interferencia co-canal por una estación desconocida del mismo servicio

Incluso en los casos en que un operador utilice en exclusiva una frecuencia puede ocurrir que el servicio sea interferido por una estación no autorizada de la misma tecnología. El nivel de la señal interferente puede estar por debajo del nivel de la señal útil en cuyo caso un equipo de medición convencional, como un analizador de espectro o un receptor, no puede separar o identificar la señal interferente. En ese caso, pueden utilizarse equipos especializados para identificar la interferencia mediante técnicas de correlación y métodos de análisis estadístico.

Utilización de equipo especializado para el análisis de la interferencia

Aunque la mayoría de los casos de interferencia pueden solucionarse con equipos de comprobación técnica convencionales, en ocasiones pueden utilizarse sistemas de medición especializados como los que se muestran en la Fig. 5.5-3, a fin de detectar problemas e identificar la fuente de forma más rápida y sencilla.

Dichos equipos tienen la capacidad de medir señales incluso cuando los valores de SNR y SINR están notablemente degradados en comparación con las prestaciones de terminales de recepción convencionales. Dichas prestaciones mejoradas permiten rechazar la interferencia, medir los parámetros radioeléctricos y decodificar los canales comunes de señalización incluso en condiciones de fuerte interferencia.

5.3.6.4 Mediciones de cobertura

Debido a que no existe una definición única del término cobertura, ésta depende de la interpretación del proveedor de servicio y/o organismo regulador en cuyo ámbito se declara que una ubicación está en cobertura de un servicio de radiocomunicaciones dado. Las herramientas de planificación a menudo calculan zonas con una intensidad de campo mínima en las que es previsible que los equipos comerciales funcionen adecuadamente. En consecuencia, cuando se evalúa una zona de cobertura sólo debe medirse la intensidad campo (por ejemplo, la de un canal de organización de la transmisión). Esto se describe en detalle en el Informe 103 del Comité de Comunicaciones Electrónicas (*ECC Report 103*) apoyándose en el caso de las redes UMTS.

No obstante, en ocasiones, se considera que, por definición, una ubicación sólo está cubierta cuando se cumplen un conjunto mínimo de requisitos. En las redes celulares, son comunes los estados de usabilidad de red siguientes, enumerados en orden ascendente de intensidad de señal y de calidad requerida:

1. El móvil se desregistra de la red.
2. Se pierde una conexión activa con el móvil, aunque éste permanece registrado en la red.
3. El móvil puede registrarse en la red.
4. El móvil puede establecer una nueva conexión.
5. Se alcanza una cierta velocidad de datos.

Cada uno de dichos estados requiere ciertos valores de intensidad de campo de la estación base y de parámetros de calidad de servicio.

Para medir la cobertura de un sistema celular con exactitud e independencia del tipo de equipo de usuario utilizado, son necesarios equipos de comprobación técnica especiales que puedan medir de forma continua los parámetros relevantes del sistema a lo largo de una ruta. Los sistemas como los descritos en 5.3.6.2 son normalmente adecuados para esta tarea.

Un enfoque mucho más sencillo para medir la cobertura de una red celular utiliza un método estadístico: haciendo uso de un equipo móvil comercialmente disponible para el servicio en cuestión, se visita un gran número de ubicaciones elegidas aleatoriamente. En cada ubicación se verifica si el equipo puede registrarse en la red, establecer una conexión y, si procede, se mide la velocidad de datos disponible. Los cálculos estadísticos demuestran que cuando se miden datos en 400 ubicaciones, la zona de cobertura resultante se determina con un nivel de confianza del 95%. Este enfoque tiene la ventaja de no necesitar equipos de comprobación técnica especializados y puede realizarlo cualquiera que pueda operar un equipo móvil. No obstante, el método depende de equipo móvil en particular que se haya utilizado para las pruebas y, desde ese punto de vista, no es objetivo. Por ejemplo, el tamaño de la zona de cobertura calculada de acuerdo con este método de medición dependería de la sensibilidad de los quipos móviles utilizados. Por tanto, el método sólo puede considerarse suficiente si los resultados no justifican una actuación legal contra el operador de red por no proporcionar una cobertura satisfactoria.

5.3.7 Identificación

Se han desarrollado diversos métodos para la identificación positiva de las señales transmitidas que no se basan en decodificar el tren de datos transmitido. Uno de dichos métodos identifica unívocamente una transmisión en particular midiendo la huella electrónica individual del transmisor. Cada transmisor emite con características de transmisión singulares (una versión electrónica de una huella dactilar humana), que no puede ser duplicada. Dichas características corresponden al número de identificación del móvil y al número de serie del teléfono móvil que permiten disponer de un patrón único para cada usuario legítimo. Esta capacidad de generación de una huella proporciona un método para la identificación individual positiva de estaciones móviles. No obstante, el método no está por lo general disponible en los servicios de comprobación técnica del espectro.

La Recomendación UIT-R SM.1600 proporciona información sobre mediciones para la identificación técnica de señales digitales.

5.3.7.1 Radiogoniometría y localización del emisor

En las secciones 3.4, 3.6 y 3.7 se describen métodos generales de radiogoniometría y de localización de transmisores de radiocomunicaciones.

El concepto de reutilización de frecuencia aplicado a sistemas celulares y a PCS supone un reto complicado para cualquier equipo de radiogoniometría. Dichos equipos deben funcionar en presencia de interferencia co-canal y proporcionar líneas de marcación inequívocas de múltiples transmisores que funcionen en la misma frecuencia.

La radiogoniometría en sistemas AMDT, tal como DECT y GSM, requiere la sincronización temporal del equipo de radiogoniometría con la estación base que debe localizarse. Además, el tiempo mínimo para obtener el resultado de un radiogoniómetro no debe superar la duración de una ráfaga.

A menudo, en redes AMDC la radiogoniometría sólo es posible si se dispone de sistemas de radiogoniometría de banda ancha combinados con software de procesamiento y de representación gráfica diseñados para el análisis de emisiones de espectro ensanchado. Debido a que el espectro de potencia de una señal DSSS aparenta ser ruido blanco, y en la mayoría de los casos con un nivel cercano o incluso inferior al umbral de ruido del sistema, la radiogoniometría de transmisiones DSSS requiere la utilización como equipo de radiogoniometría de un interferómetro correlativo de gran anchura de banda ($\geq$ 10MHz). Una excepción es la localización de estaciones base cuando sólo una de ellas es dominante en el emplazamiento de la antena de radiogoniometría. En tal caso, puede utilizarse equipos y procedimientos radiogoniométricos convencionales.

La Recomendación UIT-R SM.1598 proporciona información más detallada sobre la radiogoniometría con señales AMDT y AMDC.

5.3.7.2 Decodificación

En los sistemas celulares modernos la información del usuario así como la señal vocal y los datos transmitidos se cifran mediante una clave única negociada entre la estación base y el terminal móvil al comienzo de la conexión. Por tanto, es imposible interceptar y decodificar los datos de usuario o la señal vocal en el aire. La única forma de interceptar y decodificar los datos de usuario es situando una estación de interceptación activa entre el usuario y la red celular. Desde el punto de vista del usuario móvil, la estación de interceptación puede parecer un repetidor o incluso una estación base real. La dificultad práctica para el despliegue satisfactorio de este modelo es el hecho de que la estación de interceptación debe mantenerse siempre muy próxima al equipo de usuario de interés pues su señal debe recibirse como la señal de RF de mayor nivel en el terminal móvil a fin de evitar que se produzca un traspaso. Debe señalarse que las leyes nacionales pueden no permitir la comprobación técnica con este tipo de equipo.

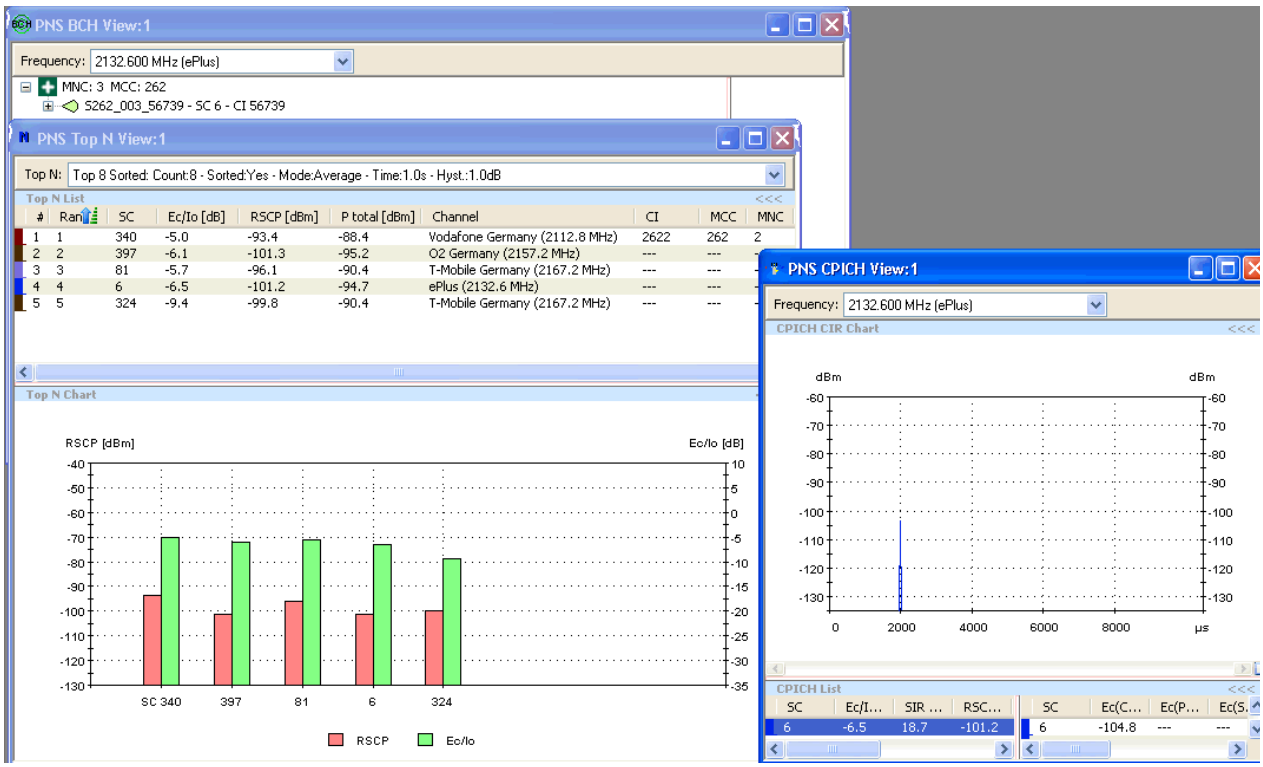
No obstante, la mayoría de las tareas de comprobación técnica sólo requieren identificar la red o la estación o estaciones base que transmiten la señal objeto de medición. En las redes de radiocomunicación celulares cada estación base tiene un número de identificación único que se transmite sin cifrado de forma más o menos continua a través de los canales de difusión y de organización. Para leer esta información, el sistema de comprobación técnica debe poder sincronizarse con el tren de datos y decodificarlo, sin que sea necesario participar activamente en el servicio o estar registrado en la red.

En las redes AMDF/AMDT tales como GSM, los sistemas de comprobación técnica normalmente exploran múltiples frecuencias disponibles a fin de visualizar no sólo los datos de la estación base que presta el servicio, sino también de células vecinas.

En sistemas AMDC, el código de ensanchamiento espectral es conocido o bien puede ser determinado mediante los denominados escáneres de señales de seudo ruido (escáneres PN). Si se reciben señales de más de una estación base con un nivel suficiente de relación portadora a interferencia (C/I), el sistema de comprobación técnica puede por lo general detectar y mostrar todos los códigos de aleatorización utilizados. La Fig. 5.3-5 muestra un ejemplo de pantalla utilizada para la identificación de estaciones base mediante los resultados del escáner PN en una red UMTS. En el ejemplo, se pueden recibir cinco estaciones base UMTS. Los códigos de cifrado se identifican con la abreviatura "SC" ("*scrambling code*"). En la parte izquierda de la pantalla se muestra, para cada estación, la potencia del código de señal recibida (RSCP) del canal de control y la *C/I* equivalente (E_c/I_0). La respuesta impulsiva del canal sintonizado (2 132,6 MHz) se muestra en la ventana de la derecha.

FIGURA 5.3-5

Identificación de estaciones base en una red UMTS



Spectrum-5.3-05

Las capacidades mencionadas están, por lo general, disponibles en los sistemas de comprobación técnica dedicados a servicios de radiocomunicaciones celulares como los descritos en 5.3.6.2.

Los sistemas celulares digitales y PCS modernos, tienen características de seguridad mejoradas que minimizan o eliminan la necesidad de transmitir por medios radioeléctricos datos sensibles de identificación de abonados. En dichos sistemas digitales, la información del usuario sólo está disponible en el entorno cooperativo del centro de la célula. En el sistema GSM, los módulos de identidad de abonados (SIM) que incluyen el número personal asignado al usuario móvil proporcionan el mecanismo de movilidad personal.

La identificación puede realizarse mediante comprobación técnica y decodificación de los canales de control del enlace ascendente a fin de obtener el número SIM de los equipos móviles activos en ese momento.

Bibliografía

BOUCHER, N. Cellular Radio Handbook, Quantum Publishers.

BUES, D. and RIEDEL, P.[1993] Planning digital radio networks using Impulse Response Analyzer PCS and test transmitter system. *News from Rohde & Schwarz*, No. 141, p. 26-27.

CEPT/ECC Report 103 [Niza, 2007].

COX, D. [December, 1992] Wireless Network Access for Personal Communications. *IEEE Communication Magazine*, p. 96-115.

FEHER, K. [1995] *Wireless Digital Communications: Modulation and Spread Spectrum Applications*. Prentice Hall PTR.

FEHER, K. and HEWLETT PACKARD ENGINEERS [1997] Telecommunications Measurements, Analysis, and Instrumentation. Noble Publishing Co.

GARG, V. K. [1999] IS-95 CDMA and cdma2000: Cellular/PCs Systems Implementation, Pearson Higher Education.

GIBSON, J. D. [1996] The mobile communications handbook, CRC Press.

GOODMAN, D. [June, 1991] Trends in Cellular and Cordless Communications. *IEEE Communication Magazine*, p. 31-40.

LEE, W. C. Y. [1986] *Mobile Communications Design Fundamentals*. Howard W. Sams & Co., Indianapolis 1986, ISBN 0-672-22305.

LEE, W. C. Y. [1989] *Mobile Cellular Telecommunications Systems.* McGraw-Hill Book Co.

MOULEY, M. and PAUTET, M. [1992] The GSM System for Mobile Communications, Cell & Sys, Palaiseau, Francia.

MUROTA, K. and HIRADE, K. [July, 1981] GMSK Modulation for Digital Mobile Radio Telephony. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-29, No. **7**, p. 1044-1050.

POTTER, A. R. [December, 1992] Implementation of PCNs Using DCS1800. *IEEE Communication Magazine*, Vol. 30, No. **12**, p. 32-36.

RAHNEMA, M. [April, 1993] Overview of the GSM System and Protocol Architecture. *IEEE Communication Magazine*, p. 92-100.

RAPPAPORT, T. S. [1996] Wireless Communications Principles & Practice. IEEE Press, Prentice Hall, New York, Estados Unidos de América .

STÖCKL, P. [December, 1992] GSM/DCS 1800 Coverage Measurement Systems. Proc. of the Fifth Nordic Seminar on Digital Mobile Radio Communications, Helsinki.

STOKKE, K. N. [April, 1986] *EBU Rev. Techn.*, No. 216, p. 81-87.

WEBB, W. T. [December, 1992] Modulation Methods for PCNs. *Communication Magazine*, Vol. 30, No. **12**, p. 90-95.

WOLF, J. [1993] Test receivers ESN and ESVN: Top-rounders for signal and EMI measurements. *News from Rohde & Schwarz*, No. 141, p. 11-13.

ZOBB, B. [June, 1993] Personal Wireless. *IEEE Spectrum*, p. 20-25.

Project IST-2000-26222 ANTIUM (Advanced NeTwork radio Identification equipment for Universal Mobile communications): deliverable D3011b "UMTS multi-channel processing report", deliverable D6012 "Advantage of the Antium tool in comparison to standard measurement systems".http://www.ist-world.org/ProjectDetails.aspx?ProjectId=6c910dd880a24b468f976e98fa24c3df.

Recomendaciones y Manuales del UIT-R

NOTA – Siempre debe utilizarse la versión más actualizada de cada Recomendación.

Recomendación UIT-R SM.1598 – Métodos de radiogoniometría y localización de señales de acceso múltiple por división en tiempo y acceso múltiple por división de código.

Recomendación UIT-R SM.1600 – Identificación técnica de las señales digitales.

Manual del UIT-R [Noviembre 1996] Manual sobre el servicio móvil terrestre (incluido acceso inalámbrico). Vol 1.

5.4 Enlaces de microondas y enlaces ascendentes de satélite

5.4.1 Introducción general

Salvo en el caso de un limitado número de enlaces radioeléctricos o sistemas de microondas que funcionan a frecuencias inferiores a 1 GHz, en general se supone que los enlaces de microondas funcionan por encima de dicha frecuencia. En este punto del Manual se trata de estos sistemas, cuya detección y control es muy diferente a la de los enlaces radioeléctricos tradicionales.

La tecnología de los sistemas radioeléctricos de microondas se basa en las posibilidades que ofrecen las frecuencias muy elevadas, desde 1 a 100 GHz, a las que corresponden longitudes de onda muy cortas, denominadas microondas (30 cm >λ > 3 mm). Estos dos aspectos permiten obtener a la vez bandas de base muy amplias y radiaciones muy directivas, especialmente adecuadas para transmitir de punto a punto grandes cantidades de señales o datos. Se utilizan tres tipos de propagación:

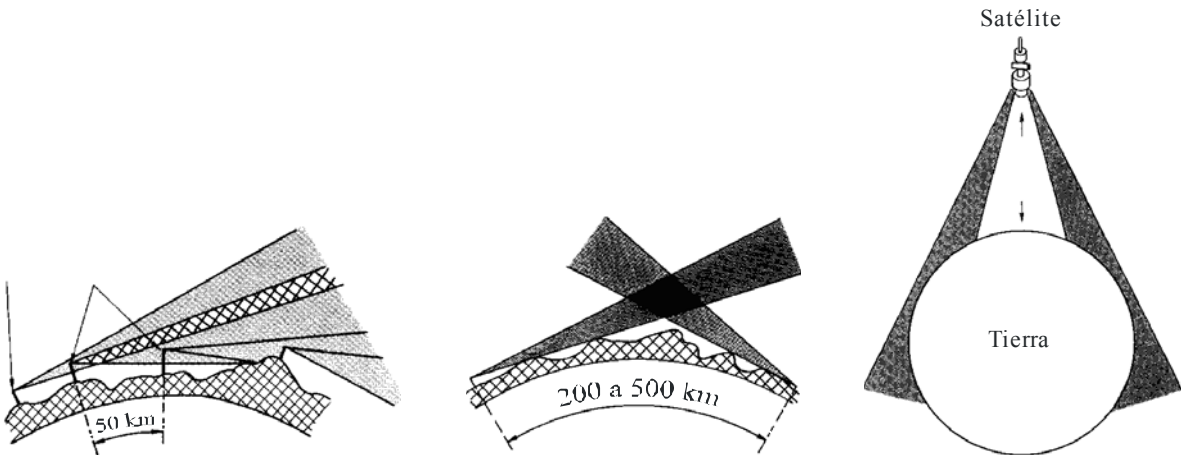
– Línea de visibilidad directa (LOS): para salvar el obstáculo de la redondez de la Tierra, los repetidores, receptores y transmisores se instalan cada 50 km aproximadamente. Se llama radioenlace a una serie de tramos radioeléctricos consecutivos (véase la Figura 5.4-1a). La propagación es muy estable.

– Dispersión troposférica: tiene por objeto alcanzar la extremidad de un tramo radioeléctrico situada más allá del horizonte óptico (véase la Figura 5.4-1b). La recepción es débil y fluctúa.

– Visibilidad directa con un satélite artificial, que estaría situado en una órbita de satélites geoestacionarios (OSG), a una altura de 36 000 km (véase la Figura 5.4-1c) y contendría un repetidor activo y antenas orientadas hacia la Tierra.

FIGURA 5.4-1

Tipos de propgación



a) Línea de visibilidad directa b) Dispersión hacia adelante c) Comunicación por satélite

Spectrum-5.4-01

5.4.2 Utilización de enlaces de microondas

Los enlaces de microondas son generalmente enlaces punto a punto (a menudo con múltiples enlaces o cadenas de repetidores), y se están adoptando sistemas de punto a multipunto que utilizan la tecnología más reciente. La distancia entre repetidores varía, dependiendo del mecanismo de propagación y de la frecuencia, desde varios kilómetros (en LOS) hasta decenas de miles de kilómetros (por satélite). La aplicación de técnicas digitales para regenerar la señal, que normalmente tiene una baja relación señal/ruido en el extremo lejano del enlace, permite aumentar esa distancia.

La directividad de la señal transmitida también permite aumentar la distancia. Actualmente existen sistemas que funcionan en frecuencias tan elevadas como las de ondas milimétricas (EHF), por ejemplo 70 GHz, en las que actualmente se establecen enlaces del orden de 200 metros para cámaras de vídeo.

En cuanto a la comunicación por dispersión troposférica, se hace uso de la capacidad de la troposfera, como medio reflector, para proporcionar comunicación entre dos puntos separados por largas distancias, de centenares de kilómetros. El Cuadro 5.4-1 presenta información comparativa entre los dos tipos de propagación, en visibilidad directa y dispersión troposférica.

CUADRO 5.4-1

Comparación entre microondas en LOS y dispersión troposférica

Parámetro	LoS	Dispersión troposférica
Canales telefónicos	Hasta 1 800/2 700 por portadora	Hasta 240 por portadora
Velocidad binaria	90 Mbit/s o mayor por portadora	De 2 400 bit/s a 4 Mbit/s por portadora
Longitud del trayecto (km)	De 1,6 a 80	De 80 a 800
Potencia de transmisión (W)	De 0,1 a 10	De 100 a 50 000
Factor de ruido del receptor (dB)	De 4 a 12	Menos de 4
Diversidad	Ninguna o doble	Doble o cuádruple
Tamaño de abertura de antena (m)	De 0,3 a 4	De 1,5 a 40

El tercer tipo de "propagación" empleado en la comunicación en microondas es la transmisión y recepción de un enlace de telecomunicación a través de satélite.

La configuración general de una estación terrena no difiere sustancialmente de la de un terminal de radioenlace, pero la atenuación muy elevada (unos 200 dB) que experimentan las ondas radioeléctricas en su trayecto por el espacio libre entre la estación y el satélite (aproximadamente 36 000 km) generalmente exige que los subsistemas principales de la estación terrena tengan una calidad de funcionamiento muy superior a la del terminal de radioenlace.

Una gran ventaja de los enlaces de microondas es que se pueden utilizar con grandes anchuras de banda para velocidades de datos elevadas (en general, desde más de 2 Mbit/s hasta 200 Mbit/s, y aún mayores). A menudo se emplean para transmitir información digital, señales de audio y de vídeo, señales de audiofrecuencia multiplexadas o de televisión codificadas, o cualquier otro tipo de transmisión que necesite una velocidad de datos alta o una gran anchura de banda.

La modulación en radiofrecuencia de los enlaces de microondas se clasifica en dos tipos claramente definidos: analógico y digital. Muchos de los nuevos enlaces son digitales, pero los enlaces analógicos se mantendrán en el futuro previsible.

5.4.2.1 Enlaces analógicos

En general, los enlaces analógicos están modulados en frecuencia, con una señal de banda de base compuesta de algunos o muchos canales de tráfico multiplexados. Para las comunicaciones de audio multicanal, la estructura de banda de base está en conformidad con los convenios de grupo primario, secundario y terciario definidos por el Sector de Normalización de las Telecomunicaciones (UIT-T). Cada una de las señales independientes de audiofrecuencia se puede mezclar para producir una señal de banda lateral única con portadora suprimida (J3E) sobre portadoras espaciadas a 4 kHz.

Un grupo de 24 canales de telefonía puede ocupar el espectro de banda de base, de 12 kHz a 60 kHz (los 12 primeros canales) y de 60 kHz a 108 kHz (los 12 últimos canales). Es posible ocupar bandas de base de varios MHz con grandes grupos de canales de audiofrecuencia multiplexados. Otras señales, como las de televisión, se pueden multiplexar de manera similar.

5.4.2.2 Enlaces digitales

Los enlaces digitales sólo muestran una banda de ocupación espectral visualmente similar al ruido blanco filtrado. Por esta razón, el espectro en radiofrecuencia no ofrece evidencia inmediata de que uno de los canales de banda de base individuales esté ocupado o no. Antes de entrar en cualquier análisis, es preciso examinar la conformación de esas señales.

Por lo general, la fuente es una sola señal digital multiplexada, como se indica en la Recomendación UIT-T G.703. En esa recomendación se describe el protocolo de datos y de alineación de trama de los enlaces digitales de "línea terrestre". Puesto que el transmisor no controla la naturaleza de la señal digital, esa señal está gobernada exclusivamente por una secuencia digital seudoaleatoria que se genera dentro del sistema. La razón de ello es evitar señales de microondas sin contenido de datos (dispersión espectral) y, en algunos casos, proporcionar suficientes transiciones digitales para la recuperación de reloj. No hay ninguna especificación general para esta secuencia de aleatorización, que varía según la clase de equipo y el fabricante.

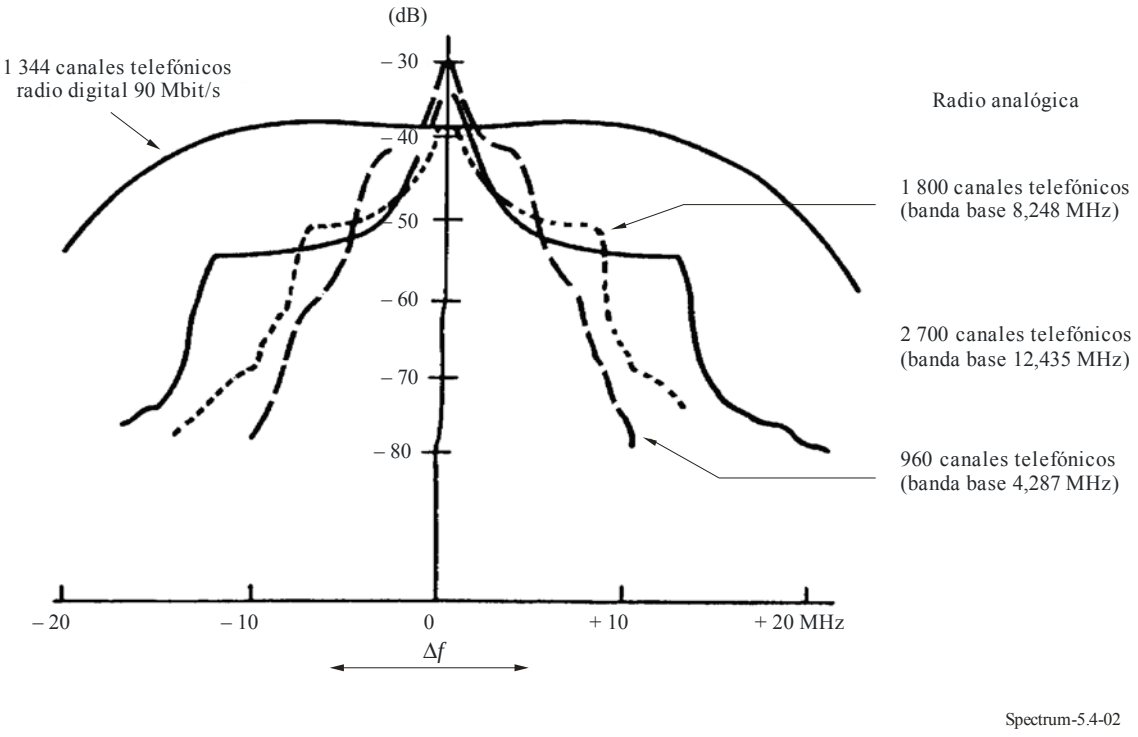
De manera similar, los métodos de modulación digital son igualmente variados, pero pueden ser coherentes en cualquier banda determinada, dependiendo de la política nacional de gestión del espectro. La modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (MDPQ) o la MDPQ diferencial son comunes, pero también se emplean otras técnicas de modulación de amplitud en cuadratura (MAQ), que representan diversas maneras de utilizar el espectro de forma más racional y mejorar el diseño del sistema.

5.4.2.3 Espectro de salida

El espectro de las señales analógicas en una radiocomunicación por microondas (AMR) difiere del espectro de las señales digitales (DMR) como se muestra en la Figura 5.4-2.

FIGURA 5.4-2

Comparación de los espectros AMR y DMR de radiofrecuencia



Obsérvese que el espectro DMR llena casi enteramente la banda, mientras que el espectro AMR presenta una cresta en la frecuencia portadora y las bandas laterales disminuyen gradualmente de amplitud al separarse las

frecuencias de la portadora. Esta característica es la que determina que las AMR sean vulnerables a la interferencia de las DMR. Si la banda de frecuencias de una DMR es demasiado próxima a la de una AMR, la gran amplitud de la DMR en los bordes de la banda puede interferir gravemente las bandas laterales, de amplitud mucho menor, de la AMR y producir el fallo de ésta. Esta circunstancia resalta la necesidad de filtrar adecuadamente en RF y FI las señales de microondas que funcionen en bandas muy próximas dentro de la misma ruta.

5.4.2.4 Multiplexación en sistemas de radiocomunicaciones por microondas

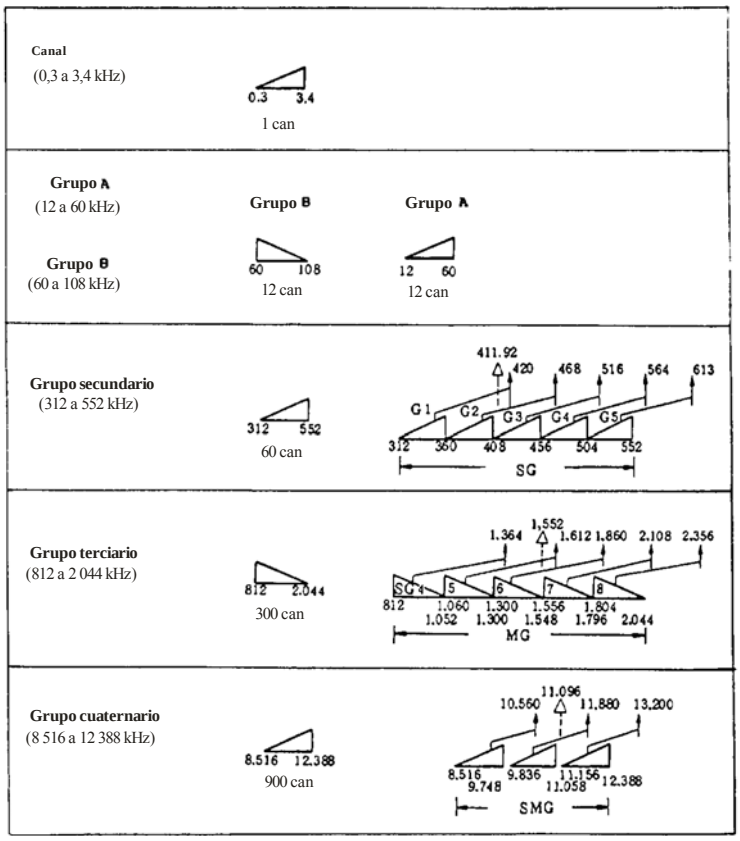
Multiplexación es el envío conjunto de varias señales independientes, sobre la misma portadora, simultáneamente y sin interferirse entre sí.

5.4.2.4.1 Múltiplex por división de frecuencia

El múltiplex por división de frecuencia (MDF) (véase la Figura 5.4-3) consiste en la combinación de señales continuas (analógicas). Puede considerarse como un desarrollo de la transmisión por bandas laterales independientes, a escala muy aumentada. Como puede verse, 12 ó 16 canales se combinan en un grupo primario, 5 de estos grupos en un grupo secundario, y así sucesivamente, utilizando frecuencias y configuraciones que están normalizadas mundialmente. Cada grupo primario, secundario o agrupación mayor se transmite luego como una unidad completa por un enlace de microondas, cable u otro sistema de banda ancha.

FIGURA 5.4-3

Agrupación de frecuencias en el MDF



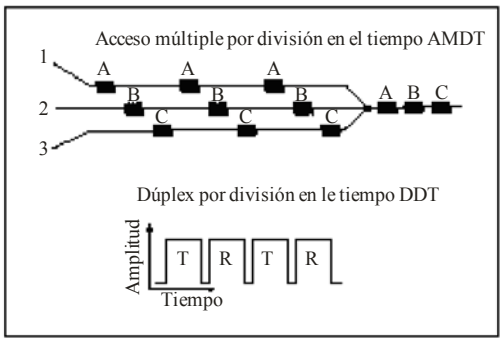
Spectrum-5.4-03

5.4.2.4.2 Múltiplex por división en el tiempo

El múltiplex por división en el tiempo (MDT) (véase la Figura 5.4-4) es un método mediante el cual se entrelazan, en el dominio del tiempo, impulsos que pertenecen a transmisiones diferentes. Dado que generalmente los impulsos son estrechos y están separados entre sí por intervalos bastante amplios, es posible, si los dos extremos de un enlace están sincronizados, utilizar esos amplios espacios para impulsos pertenecientes a otras transmisiones.

FIGURA 5.4-4

Multiplexación en el tiempo



Spectrum-5.4-04

5.4.2.5 Explotación de la comprobación técnica

Al compás de los avances tecnológicos, el uso de transmisiones de microondas en banda ancha se extenderá en los próximos años, por ejemplo, a los servicios fijos de acceso inalámbrico. Las administraciones deben tener en cuenta las interferencias entre estos sistemas con miras a gestionar y controlar la parte del espectro que ocupan las microondas. Esto comprende:

– investigación y supresión de la interferencia perjudicial causada por otros sistemas de microondas;
– investigación y supresión de la interferencia perjudicial causada por sistemas que no son de microondas;
– conformidad con los parámetros técnicos;
– detección de las transmisiones ilegales.

El principal obstáculo a salvar para hacer cumplir la reglamentación relativa a estos sistemas es la dificultad de detectar las transmisiones ilegales debido a su alta directividad.

La comprobación de estas emisiones debe hacerse desde unidades móviles, dada la limitación y estrechez del área geográfica cubierta por la señal transmitida a niveles susceptibles de recepción. Normalmente, para medir un sistema de este tipo la antena de comprobación técnica tiene que estar dentro del haz procedente de la antena transmisora de microondas, o de lo contrario tener un acoplamiento muy próximo con el transmisor o la línea de alimentación. Un método fiable para conseguirlo consiste en localizar la señal mediante un ajuste aproximado de la orientación de la antena, tanto en acimut como en elevación. Para localizar la señal de cresta con un analizador de espectro, puede reducirse a cero el margen del analizador y ampliarse hasta unos 60 segundos el tiempo de barrido (el tiempo de barrido no es crítico, pero proporciona una traza visual de referencia). Se hallará el valor de cresta mediante el ajuste de la antena, cada vez en un eje. Es importante explorar más allá de la primera cresta con el fin de comprobar la alineación con el lóbulo principal. A uno y otro lado del lóbulo principal se han de ver los lóbulos laterales. Una vez hallado el valor de cresta, se repetirá el procedimiento para el otro eje. Si se utiliza un receptor, será necesario llevar memoria de los valores de intensidad de señal que vaya midiendo para identificar los valores de cresta. Optimizada ya la dirección de la antena, pueden restablecerse en el analizador de espectro el margen, la anchura de banda, etcétera, habiendo fijado los modos de detección apropiados.

5.4.3 Técnicas generales de medición

Las administraciones necesitan comprobar los enlaces de microondas en función de la estrategia de gestión que adopten. En general, los parámetros básicos que han de medirse son:

– frecuencia de la portadora;
– intensidad de campo o densidad de flujo de potencia;
– anchura de banda ocupada;
– excursión de la frecuencia asignada;
– polarización observada;
– clase de emisión;
– identificación de la fuente de la señal.

Con miras a modelar la interferencia, es deseable tener capacidad para realizar mediciones y observaciones adicionales que vayan más allá de las anteriormente señaladas. La incorporación de esta capacidad aumenta la efectividad de una instalación de comprobación técnica como instrumento de gestión del espectro. Los parámetros adicionales susceptibles de medición u observación dependen del tipo de emisión, como se detallan en el Cuadro 5.4-2.

CUADRO 5.4-2

Parámetros de emisión sujetos a mediciones adicionales

Emisión	Parámetro
MDF-MF	Frecuencia y amplitud de las señales de banda de base
	Número de canales de telefonía o de otro tipo
	Excursión de cresta de la portadora
	Frecuencia y amplitud de la señal de dispersión de energía
Televisión-MF	Frecuencia y amplitud de las señales de banda de base
	Excursión de cresta de la portadora
	Frecuencia y amplitud de la señal de dispersión de energía
	Características de preacentuación utilizadas
USCP-MF USCP (un solo canal por portadora)	Excursión de cresta de las portadoras
	Máxima frecuencia de modulación
	Separación de portadoras
	Número de portadoras por transpondedor
	Anchura de banda ocupada del canal
	Potencia relativa por portadora
Digital (MDP, MDF, USCP, etc.)	Velocidad binaria
	Número de fases
	Número de niveles de amplitud
	Número de portadoras por transpondedor
	Separación de portadoras
	Anchura de banda ocupada de los canales
	Potencia relativa por portadora

Esto puede lograrse utilizando:

– un sistema de interceptación directa; o

– un sistema de interceptación que utilice mezcladores de radiofrecuencia.

5.4.3.1 Sistema de interceptación directa

En este método, la señal a medir o la banda a examinar se aplican directamente al analizador de espectro o al receptor a través de la antena, el filtro y la línea de alimentación, y no se produce ninguna conversión de señal. El sistema presenta las ventajas de que es sencillo de configurar y calibrar, su tiempo de montaje es breve y permite observar fácilmente las mediciones (véase la Figura 5.4-5).

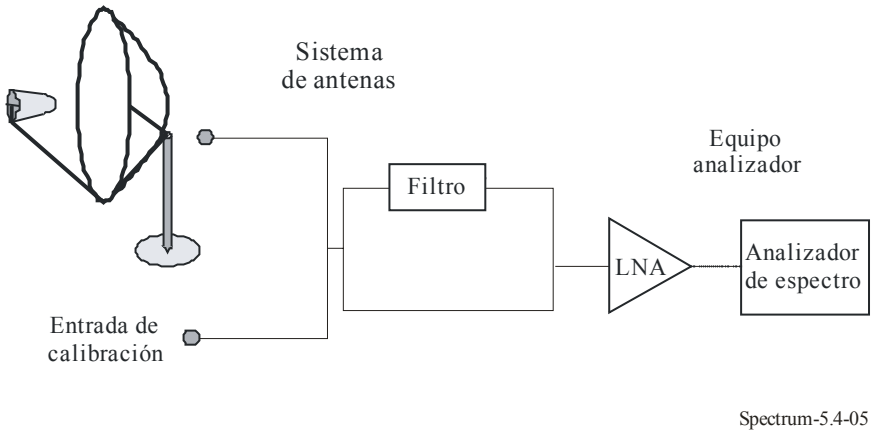
Podría insertarse un filtro con miras a reducir los productos de intermodulación interferentes, siendo también muy corriente insertar un amplificador de bajo nivel de ruido (LNA) para mejorar las características de ganancia y ruido del sistema de medición. La incorporación de estos dos elementos proporciona una excelente configuración para medir señales de bajo nivel en presencia de emisiones adyacentes.

La limitación del margen de medición de frecuencias en este método se debe esencialmente a la limitación del equipo analizador (que con la tecnología disponible alcanza hasta 40 GHz aproximadamente).

Las desventajas consisten en que, a frecuencias superiores a 10 GHz, las pérdidas en los alimentadores pueden ser considerables y afectar negativamente a la sensibilidad del sistema de medición. Es esencial que los alimentadores utilizados en estos sistemas sean de la mejor calidad y que se revisen con regularidad las características de radiofrecuencia y el estado físico del cable. En la mayoría de los casos en que se requieran mediciones por encima de los 10 GHz, la línea de alimentación tendrá que ser de longitud inferior a 1 metro.

FIGURA 5.4-5

Sistema de interceptación directa

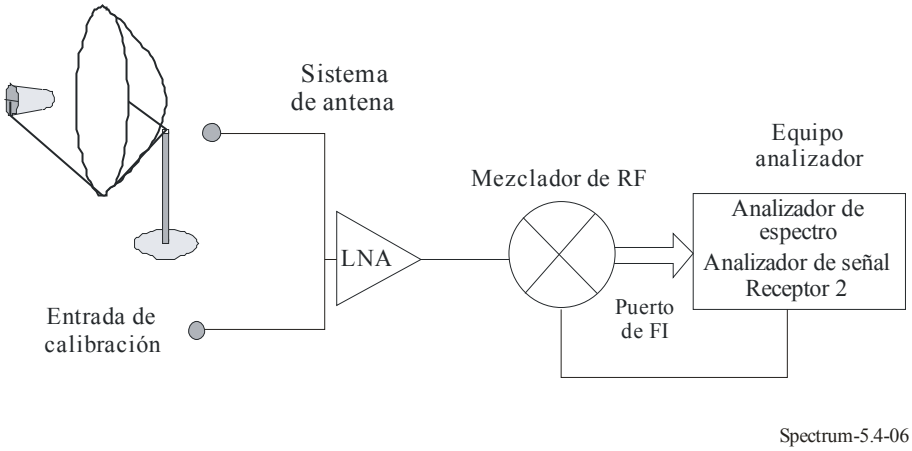


5.4.3.2 Sistema de interceptación con mezcladores de radiofrecuencia

En este método, la señal a medir o la banda a examinar se aplican directamente a un mezclador o reductor de frecuencia a través de la antena, el filtro y la línea de alimentación. Tras la conversión de la señal, ésta se aplica luego al analizador de espectro o al receptor a una frecuencia más baja (véase la Figura 5.4-6).

FIGURA 5.4-6

Sistema de interceptación con mezcladores de RF



Tradicionalmente se inserta un amplificador de bajo nivel de ruido (LNA) para mejorar las características de ganancia y ruido del sistema de medición.

El mezclador de radiofrecuencia amplía el margen de frecuencias del equipo analizador. Se puede elegir entre dos diseños: el mezclador de diodo simple y el de diodo doble. Los mezcladores de diodo doble se caracterizan por una respuesta de frecuencia plana y por no necesitar polarización adicional, lo que les hace especialmente adecuados para mediciones automatizadas.

En este método, se cubre un margen de frecuencias mucho más amplio (por ejemplo, de 18 GHz a 325 GHz) que en el método de comprobación técnica por interceptación directa, dependiendo de las características del mezclador de RF, el amplificador LNA y el sistema de antena utilizado para la comprobación técnica.

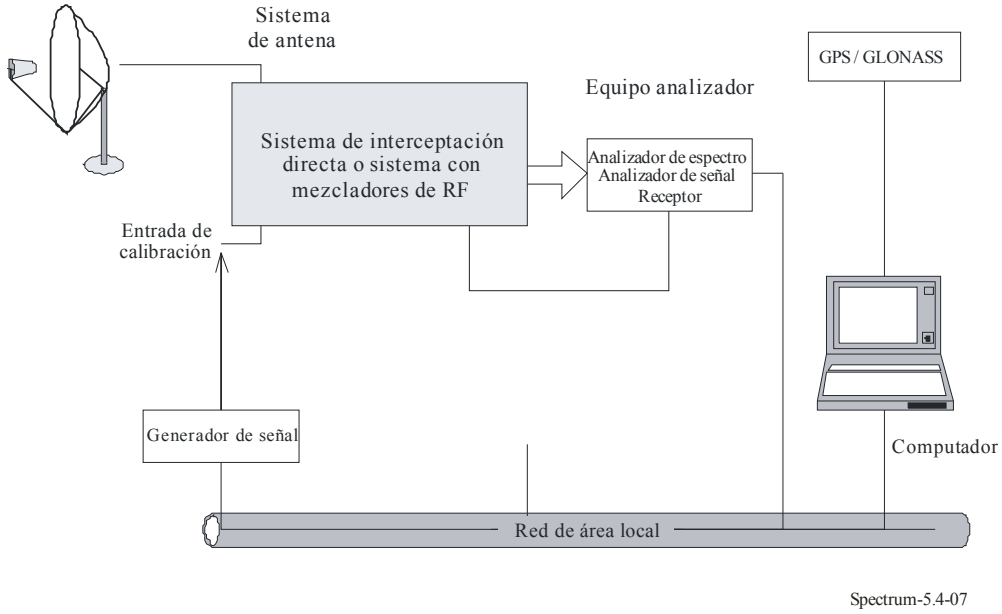
Como desventajas cabe señalar la menor sensibilidad del sistema de medición causada por las pérdidas de conversión y el alto factor de ruido del mezclador, la inseguridad de calibración debida a las características de deriva del mezclador y el aplanamiento de la banda, los problemas de intermodulación, y la posible interferencia de sistemas de alta potencia que funcionen a la frecuencia de conversión reductora o en sus proximidades.

5.4.4 Equipamiento de los vehículos de comprobación técnica

En la Figura 5.4-7 se presenta un diagrama de bloque de una unidad de comprobación técnica en microondas.

FIGURA 5.4-7

Unidad de comprobación técnica en microondas



5.4.4.1 Sistema de antena

El tipo de antena elegido dependerá de la medición que haya de realizarse. Ciertos tipos de antenas tendrán características más apropiadas para una tarea de medición determinada. Así, por ejemplo, una antena de bocina sería la más adecuada para un examen polar que determine las señales presentes en una banda de 360º alrededor del lugar de la medición, y en cambio convendría más una antena parabólica para la localización radiogoniométrica de una fuente de señal única.

Las antenas de bocina tienden a ser más robustas y de menor peso que las parabólicas, y suelen ser más fáciles de instalar cuando han de transportarse de un lugar a otro. También son más estables ante los vientos, tan frecuentes en los elevados emplazamientos desde los cuales se mide. La comparación entre las antenas de bocina y las de reflector parabólico revela que las parabólicas generalmente superan en ganancia a las de bocina, pero la estabilidad de la antena también será un factor importante a frecuencias más elevadas, cuando la abertura del haz es pequeña.

Atendidas estas consideraciones generales, puede formularse la recomendación siguiente, de acuerdo con la gama de frecuencias utilizada.

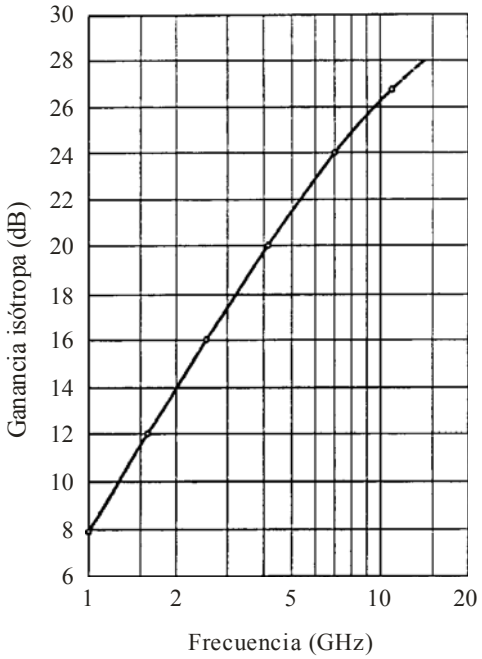
5.4.4.1.1 Gama de frecuencias de 1 a 18-26 GHz

Se necesita una antena parabólica de banda ancha con un diámetro de 90 cm aproximadamente, o una antena log-periódica, junto con un preamplificador integrado y una red de conmutación de la polarización en el punto alimentador. Debe poder elegirse entre polarización lineal X, lineal Y, circular levógira o dextrógira.

En el vehículo pueden incluirse los elementos siguientes: un filtro YIG con una anchura de banda a 3 dB de al menos de 35 MHz, un sintonizador de frecuencias de 1 a 18 GHz, y un amplificador de bajo nivel de ruido con ganancia típica de 40 dB. En la Figura 5.4-8 se muestra la ganancia normal de una antena del tipo mencionado, entre 1 y 20 GHz.

FIGURA 5.4-8

Ganancia típica de una antena log-periódica directiva calibrada con reflector de 60 cm de diámetro, en función de la frecuencia



5.4.4.1.2 Gamas de frecuencias de 18-26 GHz y 26-40 GHz

Se puede utilizar una antena de bocina de ganancia normal, con un diámetro de reflector de alrededor de 1/3 metro. Las unidades de antena para las gamas de frecuencias de 18-26 GHz y 26-40 GHz podrían formar una unidad junto con la bocina. El vehículo podría contener los siguientes elementos: un LNA con ganancia típica de 30 dB y un reductor de frecuencia.

5.4.4.2 Equipo analizador

Se han de considerar dos casos principales, dependiendo del tipo de interceptación:

– Sistema de interceptación directa

  Pueden utilizarse receptores tradicionales que sintonicen hasta 3 GHz con diversos filtros y detectores, por ejemplo, BLU, BLI etc., cuyo margen de cobertura descienda hasta 12 kHz para demodular canales de audio individuales. Existen actualmente analizadores de espectro que llegan hasta 40 GHz como mínimo.

– Sistema de interceptación con mezcladores de RF

  Es posible utilizar todo el equipo de comprobación técnica disponible (analizador de señal/espectro o receptor tradicionales) que cubra la banda de FI. Los puertos de salida de FI del sistema deben igualarse en amplitud y enclavarse en fase con el subsistema de RF, permitiendo así un análisis preciso de la señal de RF a la frecuencia intermedia, reducida por conversión.

Los siguientes dispositivos pueden conectarse al puerto de salida de FI:

– Analizador de impulsos: para la medición precisa de impulsos de radar (resolución de hasta 1 ns)

– Osciloscopio digital: osciloscopio de 500 MHz para análisis de señales repetitivas

– Analizador de intervalos de frecuencia y tiempo: analizador en tiempo real capaz de 250 millones de muestras/s, con anchura de banda del orden de 110 MHz

Para el análisis de las señales moduladas puede utilizarse un analizador vectorial de señal o un analizador de espectro FFT que proporcionen una demodulación precisa (MA, MF, MP, digital), mediciones de espectro en banda estrecha (300 Hz – 3 MHz) y mediciones con alta resolución de frecuencia (<0,001 Hz) y precisión (<±0,1 ppm).

5.4.4.3 Equipo de calibración

Antes de proceder a las mediciones se puede calibrar el sistema de medición o confirmar su seguridad por varios procedimientos.

a) Método de la radiobaliza

El procedimiento a seguir consiste en emplazar un generador provisional (radiobaliza) que funcione en una frecuencia lo más cercana posible a la señal de RF o en la banda que se está investigando (teniendo en cuenta los demás usuarios y la posible interferencia a los usuarios autorizados).

La antena del generador y la utilizada para medición tienen que estar apuntadas con precisión para conseguir una calibración exacta. Es preciso medir con exactitud la distancia entre una y otra antena con miras a poder calcular la pérdida del trayecto en el espacio libre que las une, a la frecuencia de calibración. Para excitar la antena de la radiobaliza se necesita un divisor de señal calibrado, un generador de señal y un medidor de potencia.

La potencia recibida puede compararse con el resultado de los cálculos efectuados con los datos de sistema tomados de gráficos de antenas, amplificadores y cables.

El método de la radiobaliza es sumamente adecuado para inspecciones prolongadas y permite una revisión constante del sistema de medición a lo largo del periodo de inspección. Como desventaja cabe señalar que la calibración requiere una considerable cantidad de equipos de prueba, y esto podría crear dificultades cuando haya que colocar el equipo en emplazamientos como tejados o terrazas, donde además puede haber limitación de espacio.

El método evalúa todos los componentes del sistema de medición, incluida la antena.

b) Método de sustitución de la señal

En este método, la antena de medición se sustituye por un punto en el que se inyecta una señal de nivel conocido procedente de un generador calibrado. De este modo se calibrará el sistema de medición, incluidos filtros, amplificadores y alimentadores. La antena de medición necesitará ser calibrada una vez al año, como mínimo, desde un centro de pruebas. Para inyectar la señal de calibración en los sistemas de medición equipados con bocinas y amplificadores de guiaondas, puede utilizarse un acoplador transversalmente fijado al guiaondas entre la salida de la bocina y la entrada del amplificador. La antena de bocina necesitará asimismo el certificado de calibración de un centro de pruebas.

Es deseable conocer la característica de respuesta de la antena con el cable de conexión, y la ganancia de cualquier preamplificador existente, de manera que puedan medirse los niveles de señal en radiofrecuencia con precisión situada entre 3 dB y 6 dB (en el caso más desfavorable).

La finalidad del generador de señal consiste en producir señales de referencia; se recomienda que sus características sean las siguientes:

– sintetizador de frecuencias de pureza espectral;
– gama de frecuencias 0,01-40 GHz;
– impulso externo, modulación de amplitud y de frecuencia;
– resolución de frecuencia de 1 Hz;
– margen dinámico del nivel de salida de –90 a +10 dBm, aproximadamente;
– armónicos < –20 dBc.

c) Medición de una fuente conocida

Al realizar mediciones con equipo transportable en emplazamientos tales como las terrazas de edificios elevados, no siempre es posible disponer del equipo de calibración. Para conseguir una confianza esencial en

lugares tan insospechados, puede a veces medirse un generador de señal estable conocido que funcione en la banda de frecuencias medida o en sus proximidades. En tales circunstancias, las señales de satélite pueden constituir una fuente básica fiable para la calibración.

5.4.4.4 Sistemas de navegación y posicionamiento

El vehículo de comprobación técnica debe estar equipado con un sistema de navegación y posicionamiento que permita determinar con exactitud la posición (coordenadas geográficas) y la marcación (orientación acimutal) del vehículo. En el § 6.1 puede hallarse una descripción detallada de este sistema.

El receptor del sistema de posicionamiento instalado en el vehículo puede desempeñar otras funciones:

– proporcionar un patrón de frecuencias (con precisión de frecuencia de 1×10^{-11})

– dar información actualizada de fecha y hora (YY-MM-DD y hh : mm : ss).

5.4.4.5 Gobierno de la rotación y soportes telescópicos

Las antenas de medición pueden instalarse directamente en una plataforma giratoria biaxial (características típicas: acimut, 370º; elevación, –20º a +90º; precisión de puntería, 0,1º), que está sujeta a un mástil. La base del mástil ha de ser giratoria. El equipo estará configurado de manera que se instale y desmonte con rapidez para ser transportado.

El vehículo puede estar equipado con soportes telescópicos o ajustables para asegurar que el plano de rotación sea horizontal. Se podrán ajustar los soportes desde el interior del vehículo. La coordinación de la plataforma giratoria con el Norte geográfico se logra con la ayuda de una brújula giroscópica.

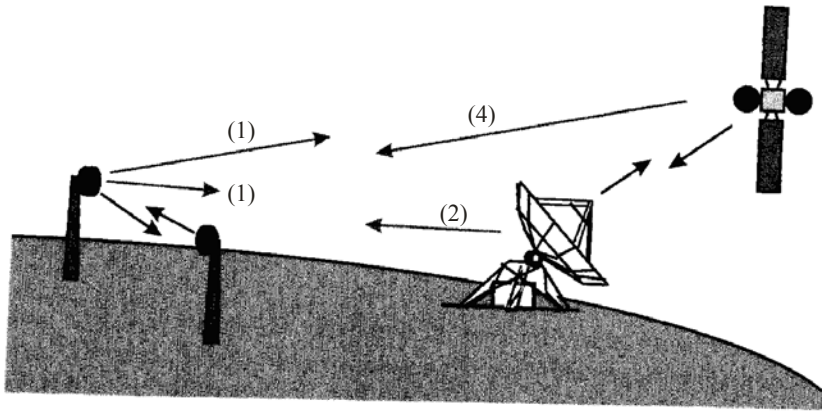
5.4.5 Compartición del servicio fijo por satélite con el servicio fijo

5.4.5.1 Interferencia entre el servicio fijo por satélite y el servicio fijo

En las comunicaciones de microondas por satélite y terrenales se definen varios tipos de trayectos de interferencia, llamados mecanismos de interferencia (véase la Figura 5.4-9). Estos trayectos se controlan a través de diversos procedimientos reglamentados, entre ellos la coordinación de frecuencias. El funcionamiento normal de los respectivos enlaces está indicado por flechas cortas de trazo continuo, que proporcionan una transmisión en dúplex completo.

FIGURA 5.4-9

Posibles interferencias entre enlaces de satélite y enlaces terrenales en microondas que utilizan la misma banda de frecuencias



Spectrum-5.4-09

Los trayectos de interferencia, señalados con los números 1 al 4, pueden describirse como sigue:

Trayecto 1: interferencia de la radiocomunicación terrenal al receptor del enlace ascendente del satélite. El satélite está protegido por una limitación de la potencia máxima radiada por la antena terrenal de microondas y por una estipulación que establece que estas antenas no deben dirigirse a la órbita de los satélites geoestacionarios. Dada la baja potencia a que emiten las estaciones terrestres, este tipo de interferencia suele ser inapreciable en la práctica. La única excepción posible son los enlaces de dispersión troposférica a elevada potencia, que utilizan antenas grandes como las carteleras de anuncios.

Trayecto 2: Interferencia de la estación terrena al receptor de la radiocomunicación terrenal. Este es el caso de interferencia más importante para determinar si puede hacerse funcionar una estación terrena transmisora en un emplazamiento determinado. La radiación por el Trayecto 2 está dentro de los lóbulos laterales de la estación terrena y se propaga por una diversidad de trayectos hacia el receptor terrestre. La UIT ha establecido reglas y procedimientos para coordinar las estaciones terrenas de un país que puedan interferir con enlaces terrenales de microondas en los países contiguos.

Trayecto 3: Interferencia de la radiocomunicación terrenal al receptor del enlace descendente de la estación terrena. La antena de la estación terrena deberá blindarse contra las radiaciones del transmisor terrestre, técnica que también se ha aplicado al Trayecto 2.

Trayecto 4: Interferencia del satélite al receptor de la radiocomunicación terrenal. El nivel de la radiación procedente de un satélite es demasiado débil para preocupar a los receptores terrestres. El Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT normalmente fija una densidad de flujo de potencia (*dfp*) máxima procedente del satélite sobre la superficie terrestre.

El Trayecto 2 es materia de preocupación para las estaciones terrenas transmisoras, mientras que el Trayecto 3 se ha de considerar para cualquier sistema receptor de satélites situado en tierra.

5.4.5.2 Métodos de análisis

La interferencia a las estaciones de comunicaciones de satélite situadas en la superficie terrestre, así como a las estaciones terrenales que comparten las mismas bandas de frecuencias, puede evaluarse aplicando la técnica de cálculo de la relación de portadora a interferencia (*C*/*I*). Para la disposición geométrica de la recepción en la estación terrena que se ilustra en la Figura 5.4-9, la relación *C*/*I* puede expresarse en dB de la manera siguiente:

$$C/I = \left(G(0) - G(\theta)\right) + \left(P_t - P_t'\right) + (G_s - G') - 20\log\left(\frac{R}{R'}\right)$$

donde:

$G(0)$: ganancia de la antena de la estación terrena en dirección al satélite

$G(\theta)$: ganancia de la antena de la estación terrena en dirección a la estación terrenal

P_t: potencia de transmisión del satélite hacia su antena

P_t': potencia de transmisión de la estación terrenal hacia su antena

G_s: ganancia de la antena del satélite en dirección a la estación terrena

G': ganancia de la antena terrenal en dirección a la estación terrena

R y R': distancias respectivas de la estación terrena al satélite y a la estación terrenal.

La ecuación muestra las diferencias (en dB) entre los términos correspondientes a la señal deseada y a la interferente. Un modo más sencillo de examinar el problema consiste en expresarlo como un balance de interferencia, que en realidad son dos balances de enlace: uno para el trayecto deseado y el otro para el trayecto no deseado (interferente). La relación *C/I* es la diferencia, en dB, entre las potencias recibidas de la señal deseada y la señal interferente.

En el Cuadro 5.4-3 se presenta un ejemplo de balance de interferencia que corresponde a la disposición geométrica ilustrada en la Figura 5.4-10.

Se plantean varias cuestiones importantes al evaluar *C/I* de esta manera. Algunas de ellas se relacionan con las características físicas reales que se están representando en modelo (por ejemplo, la ganancia de lóbulo lateral de las antenas de estación terrena y de la transmisión terrenal en microondas y el nivel de blindaje o bloqueo debido al terreno que se espera conseguir), mientras que otras son de naturaleza estadística (como la absorción atmosférica y la propagación por dispersión troposférica de la señal de microondas terrenal).

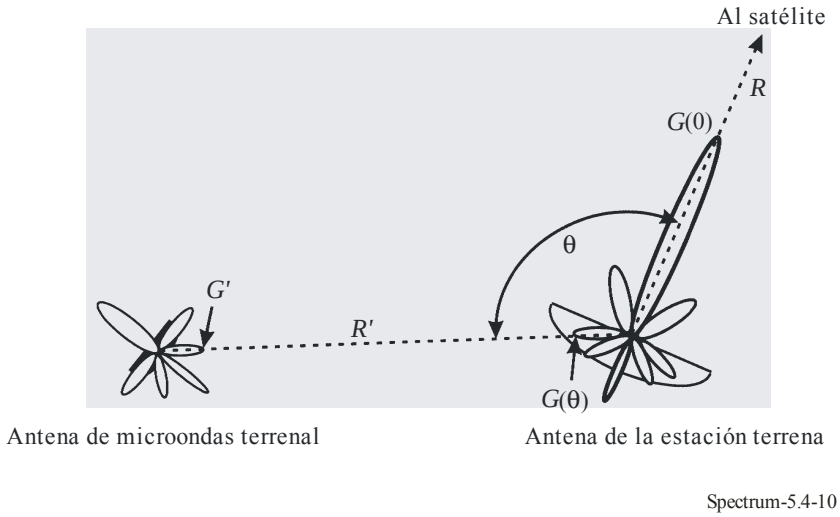
El análisis contenido en el Cuadro 5.4-3 parte de ciertas hipótesis sobre la intensidad de la interferencia. La estación terrenal dista 8,5 km de la estación terrena, y el trayecto está parcialmente obstruido (por ejemplo, con 20 dB de blindaje producido por colinas). Con una *C/I* de 28,6 dB, la interferencia sería detectable y tal vez tendría que tratarse con más detalle.

Las pérdidas de propagación que no sean pérdidas en el espacio libre, pueden plantear un reto notable a todo el que estime un balance de interferencia realista antes poder efectuar mediciones de campo.

Otros factores también difíciles de evaluar se refieren a la calidad de funcionamiento de las antenas de la estación terrena y la estación terrenal, especialmente en las regiones del lóbulo posterior y los lóbulos laterales.

FIGURA 5.4-10

Configuración geométrica de interferencia terrenal a la recepción en una estación terrena con antena de gran diámetro



CUADRO 5.4-3

Balance de interferencia de transmisión para un enlace digital de vídeo interferido por un enlace de microondas terrenal (los transmisores funcionan en la misma frecuencia)

Factor	Valor
Señal deseada (transmitida por satélite)	
Potencia de transmisión del satélite por portadora en el puerto de antena (W)	20
Ganancia de la antena del satélite en dirección a la estación terrena (dBi)	30
p.i.r.e. del satélite en dirección a la estación terrena (dBW)	43
Pérdida en el espacio libre (dB)	196,2
Pérdida en la atmósfera (sin lluvia) (dB)	0,1
Ganancia de antena de la estación terrena (parábola de 3m) (dBi)	39,8
Potencia de portadora recibida de la señal deseada (dBW)	–113,5

Señal no deseada (transmitida por estación de microondas terrenal)	
Potencia transmitida por portadora en el puerto de antena (W)	10
Ganancia de la antena transmisora en dirección a la estación terrena (dBi)	0
p.i.r.e. de microondas en dirección a la estación terrena (dBW)	10
Pérdida en el espacio libre (trayecto de 8,5 km) (dB)	132,1
Blindaje debido al terreno (dB)	20
Ganancia de antena de la estación terrena en dirección a la estación de microondas terrenal (dBi)	0
Potencia de interferencia recibida (dBW)	–142,1
Relación de portadora a interferencia (C/I) (dB)	28,6

5.4.5.3 Fase de búsqueda sobre el terreno de la interferencia de un satélite geoestacionario

5.4.5.3.1 Generalidades

La interferencia supone una gran amenaza para las comunicaciones por satélites OSG y para el negocio de la radiodifusión. Mediante medidas de geolocalización, descritas en la sección 5.1 de este Manual, puede localizarse la interferencia dentro de una zona elíptica que abarca de decenas a cientos de kilómetros cuadrados. Ello supone una gran mejora en comparación con la cobertura del enlace ascendente del satélite que puede ser el origen de la interferencia. En muchos casos, el resultado de la geolocalización contribuye a que el operador satelital identifique la fuente de interferencia por medios técnicos o de procedimiento, especialmente la causada por los usuarios que utilicen equipos averiados. No obstante, en los casos en que la interferencia sea intencionada, o bien el operador satelital no puede identificarla, es necesaria una investigación que se conoce como "búsqueda sobre el terreno". La recepción de señales débiles procedentes de los lóbulos laterales del transmisor es un problema importante para el personal de comprobación técnica. Por lo general, la comprobación técnica de señales débiles transmitidas por los lóbulos laterales de un transmisor se realiza con equipos portátiles o con equipos instalados en vehículos. La fase de búsqueda sobre el terreno de la investigación de una interferencia puede realizarse mediante métodos convencionales o bien aplicando algoritmos avanzados de procesamiento digital de la señal que mejoren la sensibilidad del sistema de medición. Estos métodos se analizan en el apartado siguiente.

5.4.5.3.2 Métodos convencionales con antenas directivas o antenas omnidireccionales

La detección de la interferencia puede realizarse con una antena de recepción directiva, por ejemplo una antena de bocina, un amplificador de bajo nivel de ruido (LNA) y un equipo receptor, como por ejemplo un analizador de espectro. Para evitar en la mayor medida posible reflexiones, el equipo portátil debe situarse en ubicaciones elevadas. El operador puede identificar el emplazamiento del transmisor combinando varios resultados de radiogoniometría. Típicamente ello conlleva una dificultad notable debido a la necesidad de realizar mediciones desde el techo de edificios altos, sobre todo en zonas urbanas. Otro inconveniente es que no siempre se dispone de corriente alterna en dichas zonas de los edificios, por lo que se necesitan baterías de larga duración para el analizador de espectro. En la búsqueda sobre el terreno también pueden utilizarse antenas omnidireccionales. En la mayoría de las ocasiones, para la detección de las señales del transmisor se utiliza un vehículo adaptado a tareas de comprobación técnica con una antena receptora omnidireccional, un LNA y un analizador de espectro. No obstante, la utilización de una antena omnidireccional presenta dos inconvenientes que deben considerarse, a saber, su menor ganancia y que sólo sea posible realizar la comprobación técnica a lo largo de carreteras puesto que el equipo por lo general se instala en vehículos.

FIGURA 5.4-11

Ejemplo de vehículo de comprobación técnica con capacidad de recepción de señales espaciales y terrenales



Spectrum-5.4-11

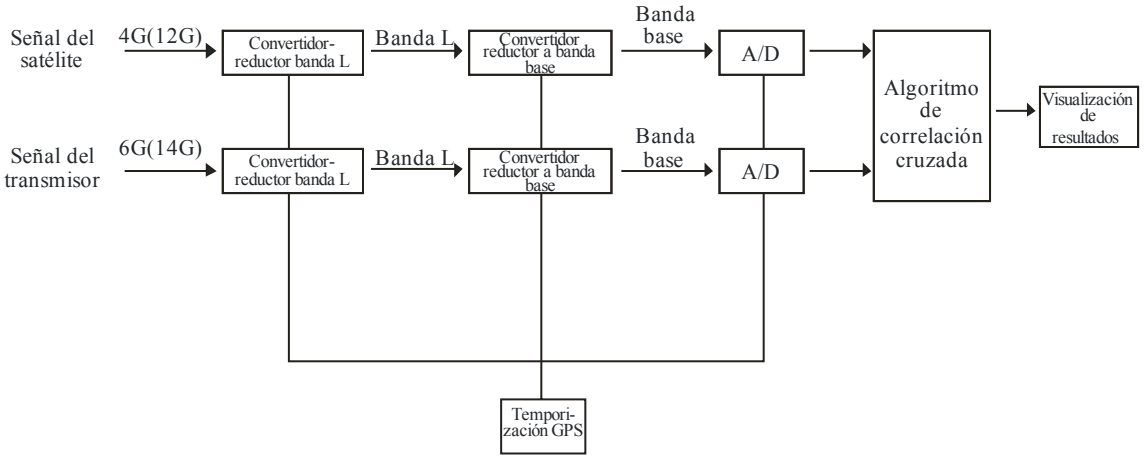
5.4.5.3.3 Utilización de algoritmos de correlación cruzada para mejorar la sensibilidad del sistema

En el proceso de búsqueda sobre el terreno también puede utilizarse un vehículo con capacidad de recepción de señales espaciales y terrenales (en la Fig. 5.4-11 se muestra un ejemplo de dicho tipo de vehículo). En este caso, en lugar de un analizador de espectro, se utiliza un módulo de procesado digital de la señal (DSP) para capturar las señales que están por debajo del nivel ruido de fondo a fin de mejorar la sensibilidad del sistema de comprobación técnica. En la Fig. 5.4-12 se representa un diagrama de bloques de este sistema. En este caso, el módulo DSP utiliza un algoritmo de correlación cruzada para procesar por separado las señales procedentes del satélite recibidas por una antena parabólica y las señales del transmisor terrenal recibidas por una antena de bocina o una antena omnidireccional.

A continuación se muestra un diagrama de bloques de dicha solución.

FIGURA 5.4-12

Diagrama de bloques de una solución de correlación cruzada



Spectrum-5.4-12

En la práctica, la antena directiva gira un cierto ángulo y a continuación se realiza un proceso de correlación. Tras rotar 360º, el operador identifica la dirección del transmisor cuando se maximiza la SNR de la correlación de ambos canales (espacial y terrenal), incluso aunque el nivel de la señal terrenal sea demasiado débil como para ser observada en un analizador de espectro (véase la Fig. 5.4-13).

5.4.6 Seguridad

Existen numerosos aspectos de seguridad asociados a este tipo de mediciones. Se deben tanto a los riesgos de exposición a la radiofrecuencia como al tipo de entornos en los que se instalan los equipos de medición. Una gran parte de las mediciones necesitarán la instalación de equipos en terrazas de edificios elevados o incluso en plataformas sobre mástiles de comunicaciones.

Este tipo de mediciones comportan toda serie de riesgos. También puede haber riesgos de exposición a la radiofrecuencia producida por otros sistemas de microondas que funcionen cerca del emplazamiento de medición. Se aconseja realizar una evaluación completa de los riesgos antes de proceder a las mediciones.

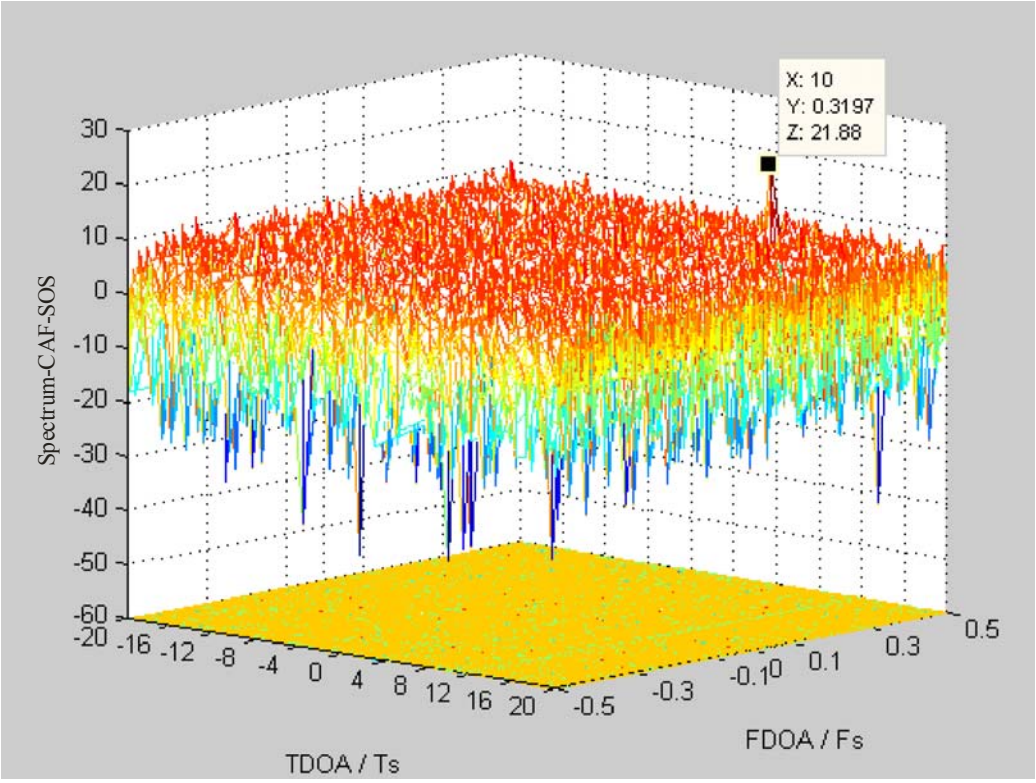
Toda persona debe tener garantías de que su trabajo se realiza en condiciones seguras. Esto adquiere especial importancia cuando se trabaja en ambientes no familiares o se soportan intensas presiones para resolver interferencias o aplacar preocupaciones de índole política. El personal de medición tiene que estar seguro de comprender los riesgos asociados al entorno y las mediciones que realizan. También deben asegurarse de que las demás personas presentes sean conscientes de los posibles riesgos y hayan adoptado las medidas pertinentes para protegerse a ellos mismos y a cualesquiera otros.

La seguridad reviste una importancia primordial, no solamente para el personal de medición sino para todos los demás que trabajen o estén presentes en el emplazamiento de la medición o sus cercanías. Todos los cables, antenas y equipos de prueba deberán estar claramente marcados para evitar accidentes. En el caso de emisores de elevada potencia, deberá realizarse una prueba esencial de exposición a la radiofrecuencia midiendo la intensidad del campo en las posiciones en las que trabajan los operarios.

Para evaluar el riesgo puede utilizarse una sonda o un dosímetro calibrado. Si los niveles fuesen preocupantes, deberán efectuarse mediciones de exposición calibrada utilizando un mínimo de personal hasta que la situación pueda cuantificarse.

FIGURA 5.4-13

Ejemplo de superficie de correlación



Spectrum-5.4-13

Bibliografía

DU CASTEL [1961] Propagation troposphérique et faisceaux hertziens transhorizons. Ed. Chiron, Paris.

FERNANDEZ, E. y MATHIEU, M. [1991] Les faisceaux hertziens analogiques et numériques, Ed. Dunod. Paris.

VERRE, J. [1986] Digital microwave links in the French telecommunication network. Ed. ECCR, Munich.

5.5 Comprobación técnica de emisiones radar

5.5.1 Introducción

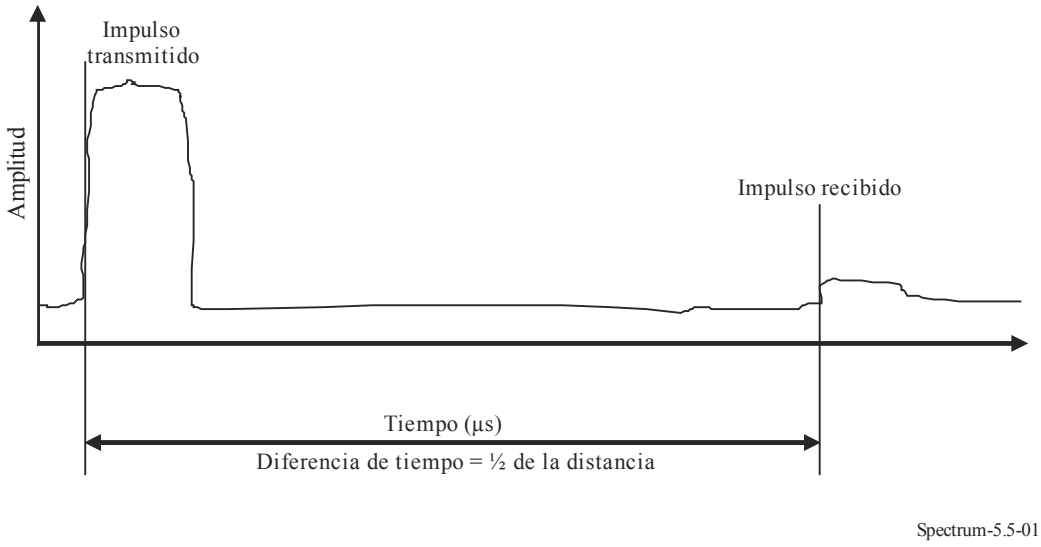
El radar, que responde al acrónimo en inglés de *radio detection and ranging* (detección y medición de distancia por medios radioeléctricos), tuvo su primera aplicación en el ámbito militar para la detección de aeronaves en la década de 1930. Actualmente, las aplicaciones del radar son omnipresentes. Sus características típicas, tales como la utilización de altas frecuencias, impulsos cortos y antenas rotatorias requieren técnicas de comprobación técnica específicas.

5.5.2 Principios básicos del radar

El principio de funcionamiento del radar se basa en la transmisión de un impulso electromagnético y la verificación mediante un receptor de la eventual recepción de una señal reflejada. Si la onda electromagnética (el impulso transmitido) encuentra un objeto en su trayectoria, por ejemplo una aeronave, un coche, pájaros, nubes, montañas, agua, el impulso será reflejado con mayor o menor intensidad en función de la sección cruzada efectiva del objeto. La reflexión del impulso emite una radiación en todas direcciones, es decir, también en la dirección de transmisor. El receptor del radar detecta el impulso reflejado, lo amplifica y evalúa.

FIGURA 5.5-1

Impulso radar típico



El tiempo que media entre la radiación del impulso por la antena hasta la recepción del impulso reflejado puede convertirse en distancia, puesto que se conoce la velocidad de la onda electromagnética. Además, el receptor conoce la dirección de la antena en cada instante y, por ende, puede determinar la dirección del obstáculo que causa la reflexión. En el caso de objetos en movimiento, por ejemplo, objetos voladores, la velocidad relativa del objeto produce un desplazamiento de la frecuencia del impulso reflejado en relación con el impulso transmitido, denominado efecto Doppler. La velocidad relativa del objeto puede calcularse a partir del desplazamiento de frecuencia. Si los impulsos recibidos se representan como puntos en un mapa, la concatenación de varias mediciones permite determinar la trayectoria del objeto. Los radares modernos equipados con equipos de evaluación adecuados son incluso capaces de representar gráficamente la posición, tamaño y contorno de un objeto y, posiblemente, reconocer el tipo o clase de objeto.

Los impulsos transmitidos se componen de varios impulsos de forma cuadrada (secuencia de impulsos). A título de ejemplo, se considera un radar de medio alcance como el utilizado en aeropuertos para el control del tráfico aéreo. Este tipo de radar por lo general transmite en la gama de frecuencias de 2,7-2,9 MHz y tiene

una potencia de impulsos de, por ejemplo, 1 Mw (90 dBm). La duración del impulso de dicho sistema es típicamente de 1 μs y la frecuencia de repetición de impulsos de 1 ms. Por tanto, la potencia media del transmisor es de 1 kW. Ello significa que puede cubrirse una zona de 50 a 60 millas náuticas (de 93 a 111 km). El nivel de potencia mínima de recepción puede ser de 10^{-13}W (–100 dBm). Por tanto, la potencia del transmisor supera en 190dB la potencia recibida.

5.5.3 Ecuación de la distancia radar

La ecuación de la distancia radar en su formulación genérica indica cuál es la distancia máxima hasta la que puede detectarse un objetivo. Se supone que no existe radiación de potencia perturbadora, que se dan condiciones de propagación de espacio libre y que se utiliza una antena para transmisión y recepción.

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_T \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{P_{R\,min} \cdot (4 \cdot \pi)^3}}$$

donde:

P_T: potencia transmitida

G: Ganancia de antena (antena de transmisión = antena de recepción)

λ: longitud de onda

σ: sección transversal radar

$P_{R\,min}$: potencia mínima recibida

Esta ecuación muestra que para duplicar el alcance es necesario cuadruplicar la ganancia de la antena o multiplicar por dieciséis la potencia del transmisor. El alcance del radar también depende de la sección transversal efectiva del objetivo. En función de la aplicación radar de que se trate, el alcance puede aumentarse o disminuirse de forma artificial.

5.5.4 Principales componentes de los sistemas radar

El transmisor consta de un generador de forma de onda y un amplificador de potencia. La etapa final consta de un klystron, un magnetrón o una etapa de salida de semiconductores.

El multiplexor garantiza una rápida conmutación de la antena entre transmisor y receptor, en ambos sentidos.

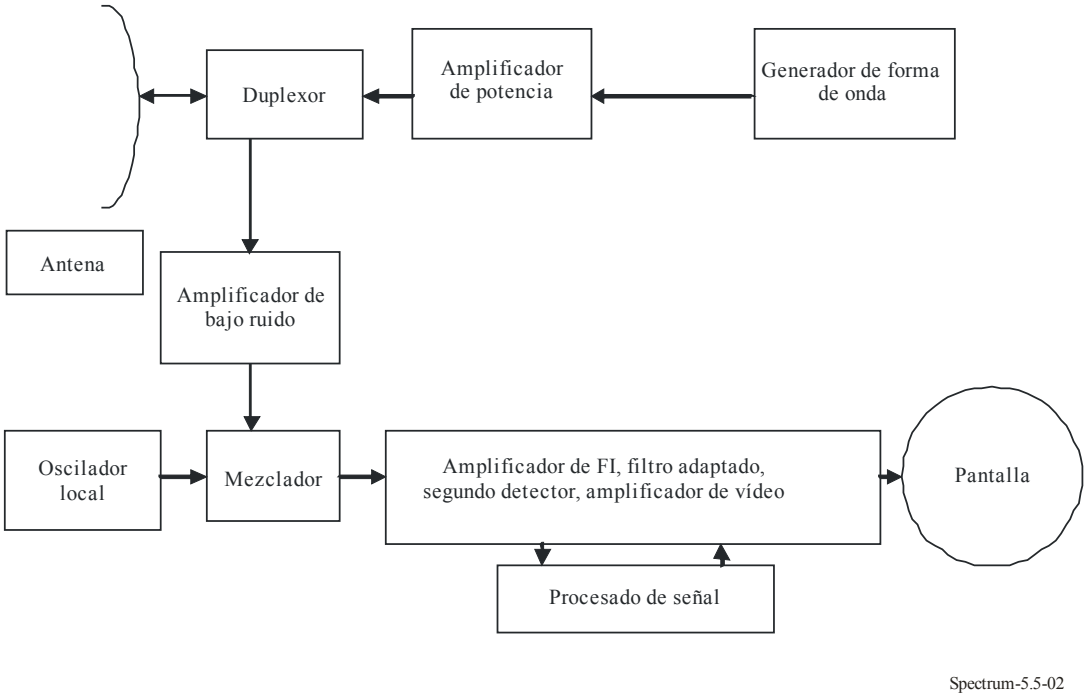
La antena transmite y recibe los impulsos. En los radares de vigilancia la antena se monta sobre un elemento rotatorio equipado con un dispositivo que proporciona al receptor información sobre su dirección de apuntamiento en cada momento. En otros radares, la antena apunta en una única dirección.

El receptor debe amplificar la débil señal recibida y suprimir las componentes de ruido en la mayor medida posible (amplificador de bajo ruido).

Los ecos no deseados (por ejemplo, los debidos a las montañas) se separan de los ecos deseados (por ejemplo, de una aeronave) mediante el procesado de la señal. A tal fin, la evaluación del efecto Doppler permite conocer la velocidad relativa del objeto en movimiento, con lo que se distinguen los objetos estáticos de los objetos en movimiento. Igualmente, se considera la dirección de la antena. En una pantalla se visualizan todas las señales que superan un umbral preestablecido.

FIGURA 5.5-2

Diagrama esquemático de un radar con un amplificador de potencia



Los datos medidos se visualizan gráficamente en la pantalla del radar. En el caso de objetos en movimiento, no sólo se representa su posición sino también la dirección en que se desplazan.

5.5.5 Aplicaciones del radar

Actualmente la ingeniería radar se utiliza en numerosos ámbitos. No obstante, sus principales usuarios siguen siendo la aviación, la navegación y las fuerzas armadas. La ingeniería radar es también el pilar de la meteorología (radares de precipitaciones o de nubes, radares de perfil de viento). La policía utiliza radares para supervisar la velocidad de los vehículos. En la industria y en las tecnologías de vehículos a motor existen radares para la medición de distancias, radares de sondas de nivel, etc. Finalmente, pero no menos importante, la tecnología radar también se utiliza en la investigación y en la tecnología espacial.

Radares a bordo de buques, en puertos, dársenas y faros

En estos casos los radares permiten determinar la distancia y posición de otros barcos, icebergs, tierra, etc. Los rangos de frecuencias y niveles de potencia varían en función de la aplicación y tamaño del buque.

Radares en aeronaves, aeropuertos, etc. (control de tráfico aéreo)

Los radares a bordo de aeronaves se utilizan para determinar la distancia (radares anticolisión) a otras aeronaves, a la superficie de la tierra o a otros obstáculos (radioaltímetros). Muchas aeronaves están también equipadas con un radar meteorológico (radares meteorológicos de aeronaves). En los aeropuertos se despliegan radares de ayuda al aterrizaje y de corto alcance, y en emplazamientos situados a una altitud elevada se utilizan radares de vigilancia aérea de largo alcance.

Radares de observación meteorológica

Los radares de perfil de viento se utilizan para determinar la velocidad y dirección del viento a diferentes altitudes. Los radares de precipitaciones o de nubes miden el movimiento de las tormentas, la acumulación de nubes y las precipitaciones. Estos radares se instalan asimismo en aeropuertos, en radares meteorológicos doppler de terminal (TDWR) y en grandes aeronaves para alertas de turbulencias importantes.

Mediciones de velocidades de vehículos

En este caso se utiliza el efecto Doppler para la medición de la velocidad de un objeto.

Utilización de radares en la industria, tecnología espacial, etc.

La ingeniería radar se utiliza en la industria, por ejemplo, para el examen no destructivo de materiales de construcción, como radares de control del nivel de llenado o radares para la detección de movimiento. También se utilizan para la investigación de formaciones geológicas (radares para el sondeo del terreno). En la industria de la tecnología de vehículos a motor, se utilizan radares para la medición de la distancia. En la tecnología espacial y en la astronomía los radares se utilizan para la detección a distancia (la prospección y establecimiento de mapas planetarios) y para la vigilancia de los desechos espaciales.

5.5.6 Tecnologías básicas del radar

Existen dos tecnologías radar básicas:

– Radares de tubos. Este tipo de radar utiliza magnetrones, klystrons, tubos de ondas progresivas (TWTs) etc. Se han utilizado durante medio siglo y aún siguen siendo muy populares.

– Radares de estado sólido. Han sido muy populares en los últimos veinte años. Los radares de estado sólido ofrecen ventajas en términos de costo y mantenimiento, aunque pueden ser más pesados que los radares de tubos y no pueden desarrollar tanta potencia de cresta como los radares de tubos.

En el Cuadro 5.5-1 se muestran las ventajas e inconvenientes de las distintas tecnologías.

5.5.7 Tipos o clasificación de los radares

Los radares pueden clasificarse según criterios muy distintos, como por ejemplo:

– Ubicación (sobre el terreno, en el aire, en el espacio, a bordo de buques, etc.)

– Banda de frecuencias.

– Función del radar (para medición de distancia, meteorológico, para la medición de velocidad, etc.).

– Forma de la señal (de impulsos, de onda continua (CW), de CW modulada en frecuencia, FMCW).

CUADRO 5.5-1

Ventajas e inconvenientes de las distintas tecnologías radar

Tecnología radar	Ventajas	Inconvenientes
Magnetrón	Elevada potencia del transmisor Barato Amplia gama de frecuencias ajustable.	Elevado nivel de ruido No adecuado para radares con compresión de impulsos o para la utilización del efecto Doppler (medición de velocidad)
Klystron y TWT	Elevada potencia del transmisor Estabilidad satisfactoria Bajo nivel de ruido Adecuado para su utilización con el efecto Doppler.	Más caro que un Magnetrón Radiación X debida al elevado voltaje.
Transmisores de estado sólido	Excelente estabilidad Adecuado para la modulación de impulsos y para utilizar el efecto Doppler (medición de velocidad) No emite radiación-X Gran durabilidad y fácil mantenimiento (periodos fuera de servicio muy breves)	Potencias más bajas que las de un Klystron. Menor eficiencia energética A menudo más pesado y más caro que un Klystron

Radar primario

Un radar primario transmite una señal electromagnética, recibe la reflexión de la señal, evalúa el resultado y lo representa gráficamente. Es el tipo de radar más común.

Radar secundario

Un radar secundario responde activamente a una señal, que interpreta como una petición. Si el radar secundario recibe un impulso radar, responde al mismo enviando su código junto con otros datos. Ello aumenta sustancialmente el alcance de un radar. Los radares secundarios actúan de esta forma en el ámbito de la aviación a nivel mundial.

La petición se transmite a 1 030 MHz y la respuesta a 1 090 MHz. El equipo de medición de distancia (DME) también funciona como un radar secundario. Una aeronave transmite un impulso al que responde una estación terrena, utilizando el retardo de la respuesta para calcular la distancia exacta. En el ámbito de la navegación, las balizas radar se instalan a menudo en las marcas de navegación.

Éstas responden a la señal radar con un código único para la representación de marcas de navegación más pequeñas, que no serían detectadas por el radar ni serían visibles en la pantalla del mismo.

Radar de onda continua

Un radar de onda continua transmite continuamente una señal radar al tiempo que también recibe el eco de forma continua.

Se evalúa el desplazamiento de frecuencias que causa el objeto en movimiento (desplazamiento de frecuencia Doppler). Dicho desplazamiento es utilizado por el radar de medición de velocidad.

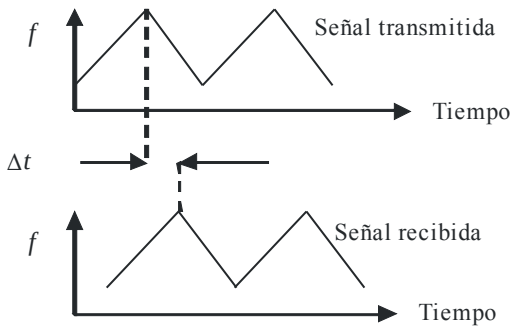
Radar de onda continua modulada en frecuencia (FM-CW)

Un radar de onda continua modulada en frecuencia (FM-CW) también trasmite una señal continua pero se trata de una señal modulada en frecuencia. El retardo de la señal causa un desplazamiento de la frecuencia que puede convertirse fácilmente en distancia.

Este principio es utilizado por radioaltímetros basados en onda continua modulada en frecuencia.

FIGURA 5.5-3

Principio del radar de onda continua modulada en frecuencia



Spectrum-5.5-03

Radar de impulsos cortos

Este radar es el más utilizado. Si un radar no incluye una identificación es porque se trata de este tipo de radar, que transmite un impulso corto.

Tras emitir el impulso, la antena conmuta al modo de recepción y espera la señal reflejada. Se evalúan la dirección, intensidad de campo y, por lo general, el desplazamiento de frecuencia (efecto Doppler debido a objetos en movimiento) de la señal recibida.

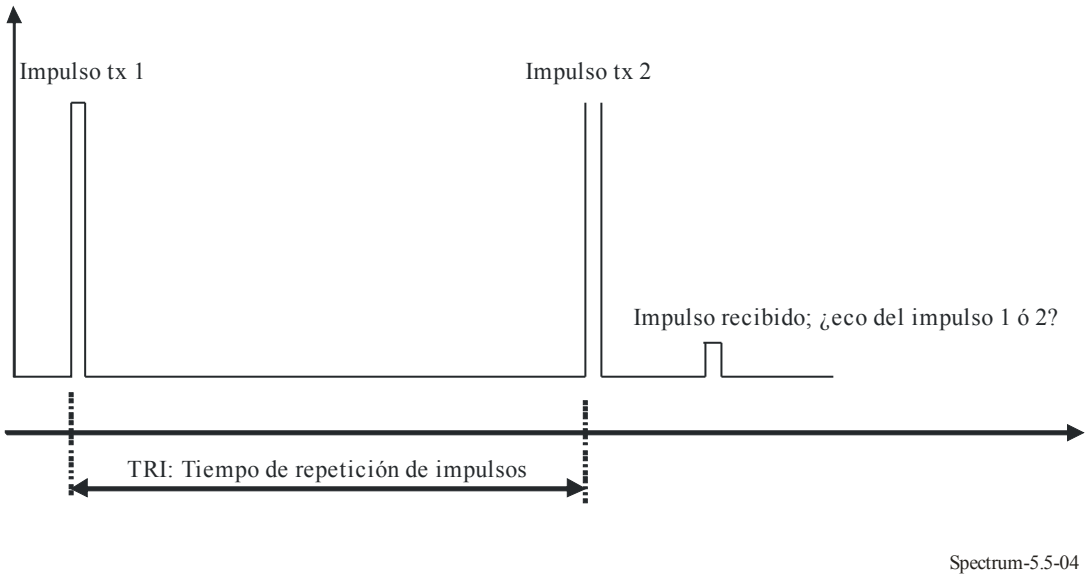
Los radares utilizados para la identificación de objetos en movimiento (indicación de blancos móviles, MTI) se basan, por lo general, en tiempos de repetición de impulsos diferentes para reconocer impulsos parásitos y mediciones incorrectas debidas a retardos prolongados.

Los impulsos parásitos se producen cuando se utiliza el efecto Doppler para suprimir objetivos fijos. Si la velocidad relativa de un objeto en movimiento causa un desplazamiento de fase de 360º o un valor múltiple de éste respecto a la señal transmitida, el objeto se reconocería como fijo y, por tanto, no sería visualizado gráficamente.

Tomando como referencia la Fig. 5.5-4, cuando se recibe un eco, no está claro si se trata de una sobreoscilación debida a la recepción del Impulso 1 o de la recepción normal debida al Impulso 2. Si se modificara el tiempo de repetición de impulsos, en el caso de una sobreoscilación el impulso de eco reaparece en cualquier otro momento. Por el contrario, en caso de recepción normal, el efecto sería que se mantendría la distancia entre el impulso transmitido y el impulso eco.

FIGURA 5.5-4

Ambigüedad de los impulsos detectados

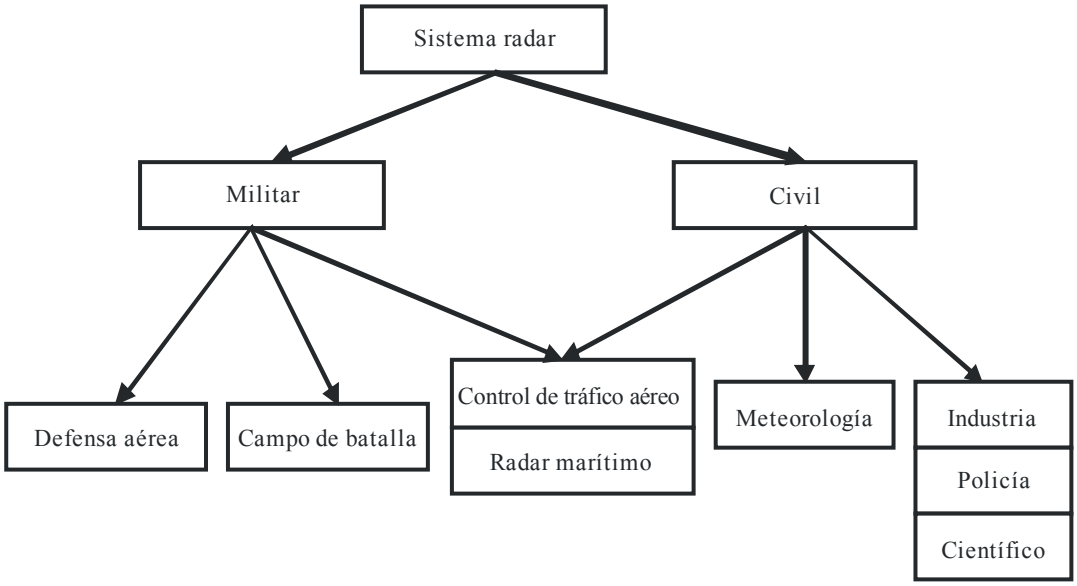


Radares de compresión de impulsos

En este tipo de radares se modula la frecuencia o la fase de un impulso largo para conseguir el alcance de un impulso largo junto con la resolución de distancia de un impulso corto.

FIGURA 5.5-5

Clasificación según la utilización del radar



Spectrum-5.5-05

Las fotos siguientes muestran algunos tipos de radares:

FIGURA 5.5-6

Radar de vigilancia aérea de largo alcance con una antena de radar secundario sobre la misma



Spectrum-5.5-06

FIGURA 5.5-7

Radar de vigilancia marítima y navegación



Spectrum-5.5-07

5.5.8 Principales bandas de frecuencias de sistemas radar

En el Cuadro 5.5-2 se enumeran las principales bandas de frecuencias de sistemas radar y sus aplicaciones.

CUADRO 5.5-2

Principales bandas de frecuencias para sistemas radar

Frecuencia	Banda	Aplicación
5-25 MHz	Decamétricas	Radar transhorizonte
420-450 MHz	Decimétricas	Radiolocalización, por ejemplo, de perfil de viento
960-1 215 MHz	L	Búsqueda aérea (aplicación de equipo de medición de distancia, DME)
1 030/1 090 MHz	L	Radar primario / secundario
1 250-1 350 MHz	L	Radar de vigilancia aérea de larga distancia
2 700-2 900 MHz	S	Control de tráfico aéreo en aeropuertos
2 900-3 100 MHz	S	Navegación de buques
3 100-3 600 MHz	S	Vigilancia aérea
4 200-4 400 MHz	C	Radioaltímetro de corto alcance
5 000-5 850 MHz	C	Navegación y vigilancia aérea
8 500-10 500 MHz	X	Radiolocalización, vigilancia aérea y marítima
13,25-14 GHz	Ku	Detección de movimiento por radar , radiolocalización
15,4-17,7 GHz	Ku	Navegación y vigilancia aérea
24,0-24,25 GHz	K	Detección de movimiento por radar , industria, radiolocalización
31,8-36 GHz	Ka	Detección de movimiento por radar , industria, radiolocalización
59,3-64 GHz	V	Detección de movimiento por radar , industria, radiolocalización

5.5.9 Instrumentos para la medición de señales radar

Para la realización de mediciones de señales radar es necesario disponer de los equipos siguientes:

Analizador de espectro

Numerosas características de los radares, tales como la anchura, frecuencia de repetición de impulsos y potencia de los impulsos, la velocidad de rotación, la frecuencia central, la anchura de banda ocupada y las emisiones no deseadas, pueden medirse con un analizador de espectro. El analizador también puede utilizarse para medir las pendientes de subida y de bajada, permitiendo determinar la suficiencia de la anchura de banda de los filtros de radiofrecuencia.

Osciloscopio digital

Un osciloscopio digital junto con un demodulador de banda ancha es muy adecuado para la medición de la duración de un impulso, las pendientes de subida y bajada y la longitud del impulso. A tal fin muchos dispositivos están equipados con funciones de medición especiales.

Con la ayuda del método de sustitución también es posible la medición de la potencia del impulso. Asimismo, también puede, al menos, determinarse la modulación de fase.

No obstante, un prerrequisito para a la utilización del osciloscopio para dichas mediciones es que exista un nivel adecuado de señal y que no haya otras emisiones a la entrada del osciloscopio. Ese es siempre el caso si la medición se realiza en el radar.

Analizador de señal vectorial o de FFT

Un analizador de señal vectorial o de FFT complementa las funciones de medición del analizador de espectro pues visualiza la fase o la frecuencia en función del tiempo, permitiendo medir la modulación de fase o de frecuencia de un impulso. A diferencia del analizador de espectro, en este caso el espectro puede capturarse y visualizarse completamente tras una única rotación del radar, para lo que un analizador de espectro necesitaría un tiempo muy prolongado. Debido a los requisitos especiales descritos en 5.5.10.7, un analizador de FFT puede no resultar adecuado para realizar en todos los casos las mediciones de emisiones no deseadas.

Medidor de potencia (medidor de potencia térmico)

Con un medidor de potencia térmico moderno es posible medir la potencia media y la potencia del impulso directamente a la salida de un radar. A partir de la potencia media puede calcularse la potencia del impulso utilizando para ello el ciclo de trabajo.

Analizador de impulsos

Los analizadores de impulsos escanean los impulsos a alta velocidad, los digitalizan y evalúan automáticamente el resultado. Para cada impulso de entrada se mide la frecuencia, amplitud, anchura del impulso y frecuencia de repetición.

Este método de medida permite examinar con precisión y en un periodo de tiempo breve los principales parámetros de un radar. Su aplicación es particularmente sencilla en los radares con frecuencia de interrogación variable ("*staggered radars*"), es decir, radares en los que la longitud del impulso o el periodo de repetición no son constantes.

5.5.10 Medición de las señales radar

5.5.10.1 Principales parámetros de un radar

– Frecuencia central;
– duración del impulso (anchura del impulso);
– tiempo de subida y bajada del impulso;
– frecuencia de repetición de impulsos (velocidad de impulsos);
– velocidad de rotación del radar;
– potencia del impulso (potencia de cresta);
– anchura de banda ocupada;
– emisiones no deseadas (emisiones no esenciales y emisiones fuera de banda);

– modulación del impulso.

5.5.10.2 Configuración para las mediciones

Consideraciones generales

Básicamente, existen dos formas de analizar las características de un radar: en la interfaz de medida del equipo o en la interfaz radioeléctrica (medición en condiciones de espacio libre)

Para determinar la velocidad de rotación de la antena transmisora, la medición debe realizarse en la interfaz radioeléctrica. Ello también aplica cuando debe analizarse el diagrama de radiación.

Si las emisiones no deseadas deben medirse en la salida de medida del radar, debe conocerse el diagrama de radiación para distintas frecuencias (véase la Recomendación UIT-R M.1177-3) ya que la antena puede amplificar las emisiones no deseadas en frecuencias adyacentes de forma diferente a las de la emisión principal.

No todos los radares más pequeños tienen una salida de medida, por lo que en esos casos la medición debe realizarse en la interfaz radioeléctrica.

Medición en la salida de medida del radar

A menudo la potencia del transmisor de un radar sólo puede medirse en la salida de medida puesto que, como es especialmente el caso de los radares estacionarios utilizados en aviación, el ángulo de elevación de la antena del radar no puede reducirse lo suficiente como para realizar la medición en el lóbulo principal del diagrama de radiación de la misma.

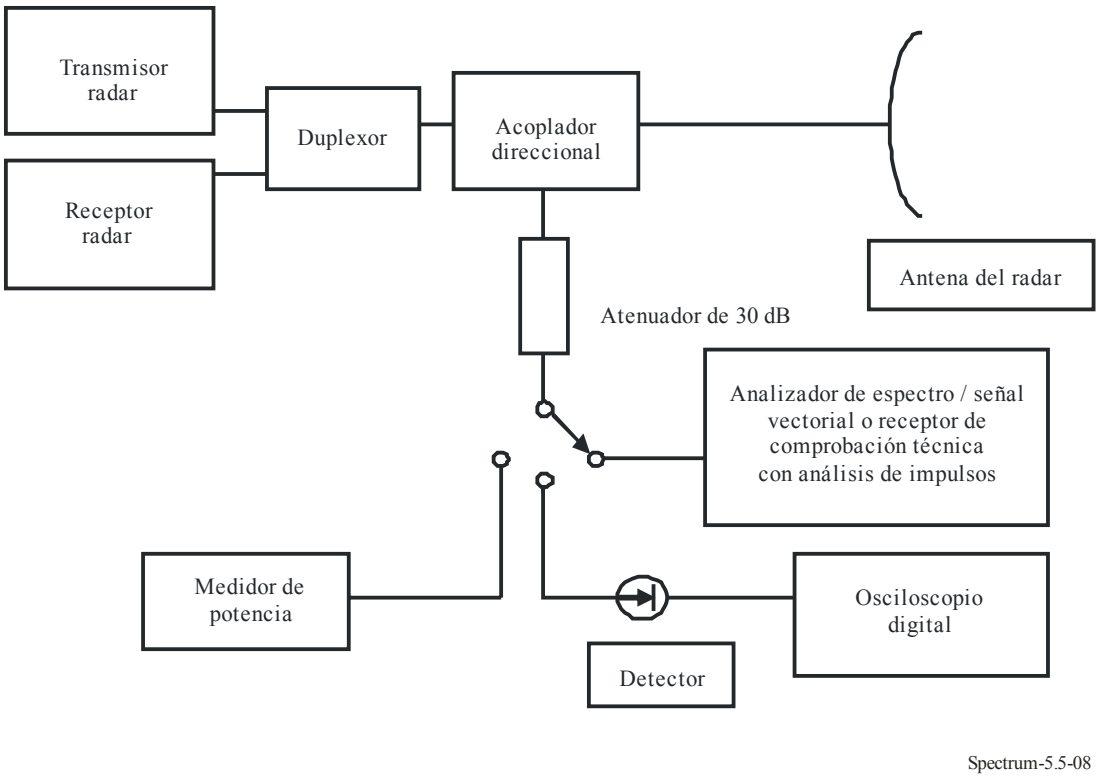
La medición en la salida de medida del radar garantiza que sólo se miden los componentes de frecuencia del radar real. Ello hace que dichas mediciones sean menos problemáticas que las realizadas en la interfaz radioeléctrica.

No obstante, deben conocerse con detalle las características de la antena a fin de poder calcular tanto la potencia del transmisor como la potencia de las señales no deseadas.

A tal fin, la mayoría de los radares tienen una salida de medida. Entre el transmisor y la antena del radar se instala un acoplador direccional con una atenuación de acoplamiento de 30 dB.

FIGURA 5.5-8

Diagrama esquemático para la medición de las características típicas del radar en la interfaz de medida del equipo



Medición en la interfaz radioeléctrica (medición en condiciones de espacio libre)

La antena de medición debe ser estable y estar orientada con precisión hacia la antena transmisora del radar (en acimut y elevación). No deben existir obstáculos entre las antenas transmisora y receptora, y deben cumplirse las condiciones de campo lejano.

En el caso de antenas de gran tamaño, la condición de campo lejano se obtiene de la fórmula siguiente:

$$\frac{2D^2}{\lambda} \qquad (4.2\text{-}1)$$

donde:

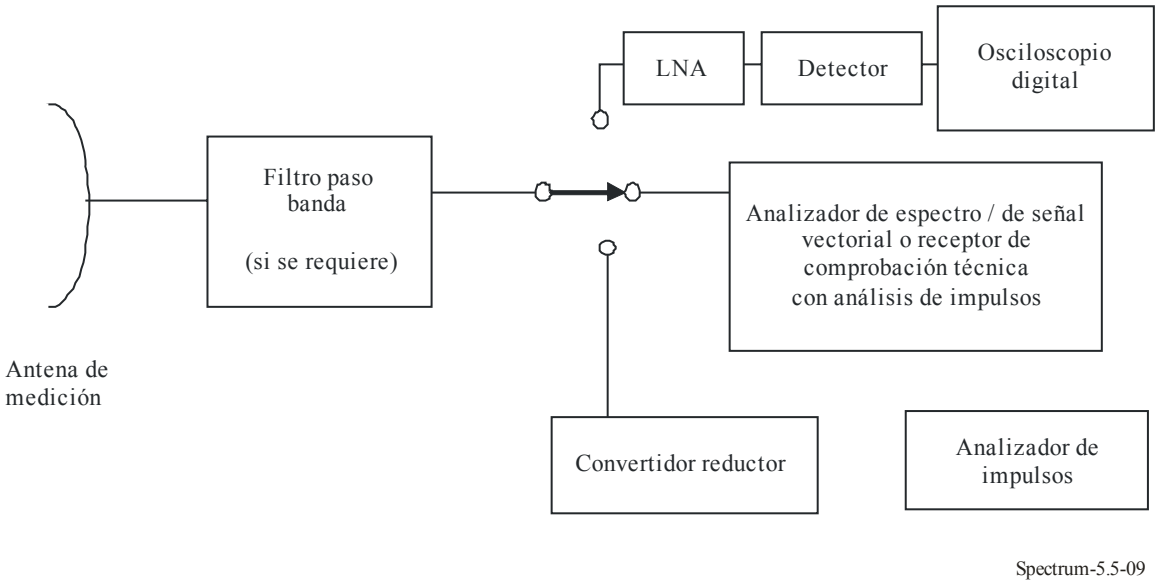
D: diámetro de la antena

λ: longitud de onda

Por ejemplo: un radar de vigilancia aérea de largo alcance tiene un diámetro de antena de 6 m y una frecuencia de 1 300 MHz. La condición de campo lejano se cumple a partir de 312 m.

FIGURA 5.5-9

Diagrama esquemático de la medición del radar mediante la interfaz radioeléctrica (medición en condiciones de espacio libre)



5.5.10.3 Medición de la frecuencia central

La frecuencia central se obtiene mediante un analizador de espectro que funcione durante algún tiempo en el modo de detección de "cresta positiva" y en el modo de visualización de "retención de máximos" ("*maximum-hold"*). Cuanto menor sea la anchura de banda de RF del filtro de medida, más precisa será la lectura de la frecuencia central.

La representación del espectro mejora cuando cada punto de barrido horizontal del analizador recibe una vez la potencia máxima del radar. Sin embargo, con un analizador de espectro convencional esta medición requiere bastante tiempo.

Por ejemplo, un radar de vigilancia aérea de largo alcance gira una vez cada 11,6 s y el analizador tiene 500 puntos de barrido; por tanto, la medición precisa al menos 1,5 h.

El tiempo de medición se reduce mucho si se utiliza un analizador FFT. En ese caso, todo el espectro se visualiza tras una rotación, ya que el analizador FFT procesa y muestra la anchura de banda de frecuencia requerida durante una única exploración.

5.5.10.4 Medición de los parámetros de un impulso

Los parámetros a medir son la duración, tiempos de subida y de bajada y frecuencia de repetición de impulsos y la velocidad de rotación. El método de medición se describe ampliamente en la sección 4.9. Para medir la velocidad de rotación sólo es necesario aumentar el tiempo de barrido del analizador hasta que pueda medirse al menos una rotación en el modo de margen cero.

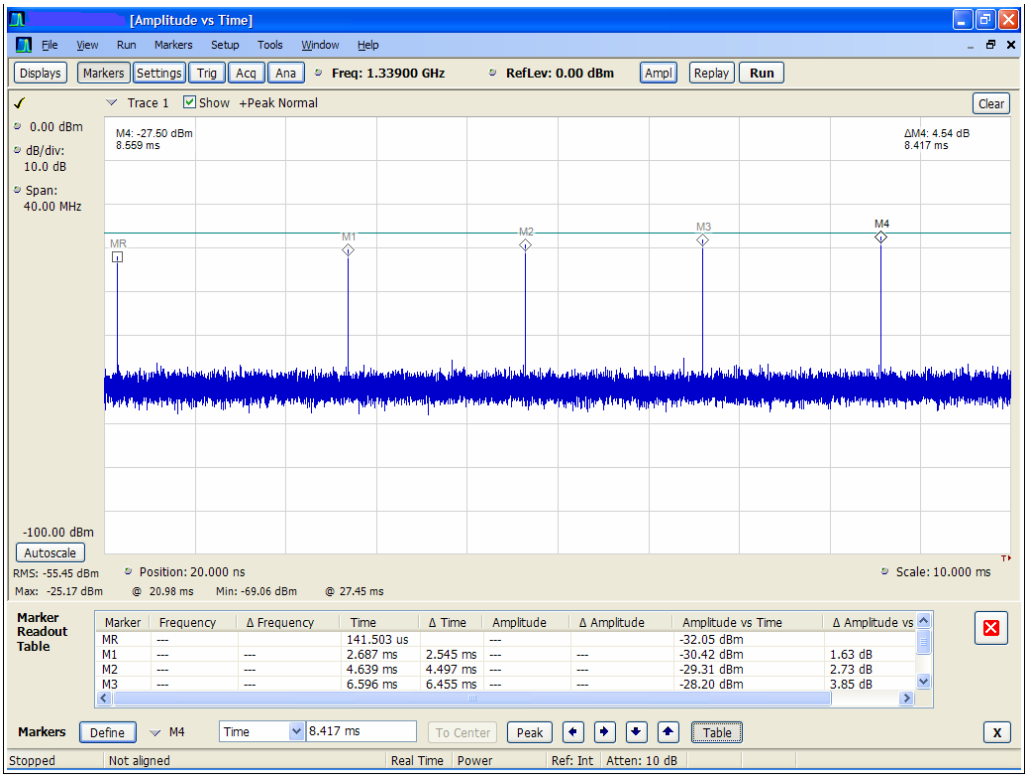
Para poder medir con un analizador de espectro un radar de frecuencia de interrogación variable, deben capturarse varios impulsos secuencialmente. Su número debe ser suficientemente grande como para que los diferentes tiempos de repetición de impulsos se repitan.

En la Fig. 5.5-10 se ilustra el ejemplo de un radar de vigilancia aérea de largo alcance que utiliza 14 longitudes de impulsos diferentes. En la pantalla se aprecia claramente una secuencia de 5 de 14 impulsos a intervalos de 2,545 ms, 1,952 ms, 1,957 ms y 1, 963 ms.

Lógicamente, es más sencillo utilizar un analizador de impulsos para dicha medición ya que se captura un mayor número de impulsos (por ejemplo, 1024) y se obtienen la longitud del impulso, la frecuencia de repetición de impulsos y otros parámetros.

FIGURA 5.5-10

Medición de impulsos de un radar de vigilancia aérea de largo alcance



Spectrum-5.5-10

5.5.10.5 Medición de la potencia del impulso

La potencia de cresta de salida del transmisor (potencia del impulso) puede medirse directamente en el radar utilizando un acoplador de prueba. Puede utilizarse un analizador de espectro o un medidor de potencia térmico.

A tal fin, el medidor de potencia debe poder medir la potencia exclusivamente durante la duración del impulso o bien, se utilizan la potencia media y el ciclo de trabajo para calcular la potencia del impulso mediante la fórmula siguiente: "potencia media / ciclo de trabajo = potencia del impulso".

Por ejemplo, cuando la potencia media de un radar es 1 Kw y el ciclo de trabajo es de 1/ 1 000, la potencia del impulso es de 1 MW.

La *p.i.r.e.* se determina añadiendo la ganancia de la antena G_i y teniendo en cuenta la pérdida de la línea.

Si fuera posible orientar la antena transmisora hacia el lóbulo principal de la antena receptora, la potencia del impulso también podría medirse en la interfaz radioeléctrica. Para ello es necesario que se den condiciones de campo lejano y de espacio libre. El analizador de espectro se utiliza para la medición de la potencia. La potencia y la duración del impulso pueden medirse simultáneamente. Para las mediciones de los impulsos véase la sección 4.9. La potencia radiada puede calcularse mediante la fórmula que figura en 6.3.2.1.

5.5.10.6 Medición de la anchura de banda ocupada

La medición de la anchura de banda ocupada es relevante en relación con la medición de las emisiones no deseadas. Según la Recomendación UIT-R M.1177, los radares no deben superar una anchura de banda máxima de B_{-40}, es decir, 40 dB por debajo de la potencia en la cresta de la envolvente (PEP, *peak envelope power*). Esta potencia se calcula a partir de la duración del impulso y del tiempo de subida o bajada, en función de cuál sea menor. La anchura de banda ocupada debe estar dentro de la anchura de banda calculada.

La fórmula para la medición de la anchura de banda B_{-40} se describe con detalle en el Anexo 8 de la Recomendación UIT-R SM.1541.

Cuando se mide la anchura de banda ocupada debe tenerse en cuenta que la anchura de banda máxima del filtro de medida depende del tipo de modulación, duración del impulso, duración de la fluctuación de fase y gama de frecuencias de barrido. En la Recomendación UIT-R M.1177 puede encontrarse información detallada.

Según el Anexo 1 a la Recomendación UIT-R M.1177, el filtro de medida utilizado para la medición de las emisiones no deseadas y con ellas la anchura de banda ocupada, es un filtro mayor que el normalmente utilizado en otras aplicaciones de radiocomunicaciones. La anchura de banda calculada B_{-40} ya tiene en cuenta el subsiguiente error de medición. Por ejemplo, en el caso de radares sin codificación por impulsos, la anchura de banda de medición B_m, es $\leq 1/T$ donde T = duración del impulso. Si la duración del impulso es 1 µs, se obtiene un valor de B_m de 1 MHz. Esta anchura de banda de medición es importante para la correcta medición del nivel total de emisiones no deseadas y, por tanto, de la anchura de banda ocupada.

La anchura de banda ocupada puede medirse en la interfaz radioeléctrica y en la interfaz de medida del radar. Las mediciones en la interfaz radioeléctrica deben realizarse con una antena radar no giratoria.

5.5.10.7 Medición de emisiones no deseadas

a) Consideraciones generales

Se distingue entre "emisiones fuera de banda", es decir, emisiones fuera de la anchura de banda necesaria que son resultado de la modulación y, por tanto, inevitables, y "emisiones no esenciales", que no están directamente relacionadas con las emisiones reales. Las emisiones no esenciales incluyen emisiones de armónicos, emisiones parásitas, productos de intermodulación y productos debidos a la conversión de frecuencias.

Para cada radar debe calcularse una máscara que debe respetarse y que está conformada por los límites de B_{-40}, los límites fuera de banda y los límites de las emisiones no esenciales. Este procedimiento se describe con detalle en la Recomendación UIT-R M.1177.

Las mediciones de la anchura de banda ocupada y de las emisiones no esenciales se realiza con un analizador de espectro o un analizador de FFT. Debe tenerse especial cuidado en garantizar que si se utiliza un amplificador éste no esté sobrecargado y que exista un margen dinámico suficiente para la medición de las emisiones no deseadas. El ruido del receptor debe ser visible en los bordes del espectro.

En la Fig. 5.5-11 se muestra un ejemplo de máscara espectral calculada y del espectro medido según la Recomendación UIT-R M.1177-3. Con fines de demostración, se registró la curva del filtro con una anchura de banda de medición de 100 kHz, aunque hubiera sido más adecuado una anchura de banda de medición próxima a 1 MHz. Debido a que la medición se realizó con una anchura de banda de medida más estrecha, se aplicaron factores de corrección en el dominio no esencial y en la determinación de la potencia en la cresta en la envolvente (PEP).

Las máscaras espectrales para emisiones radar tienen una gama de niveles de al menos 60 dB, y a veces de hasta 100 dB. Suponiendo que el nivel más bajo de una emisión no deseada debe ser al menos 10 dB superior a la sensibilidad del equipo, se requiere que el ajuste de la medición tenga un margen dinámico mínimo de más de 70 dB (hasta 110 dB), lo cual queda fuera de la especificación de receptores de medida o analizadores de espectro comercialmente disponibles.

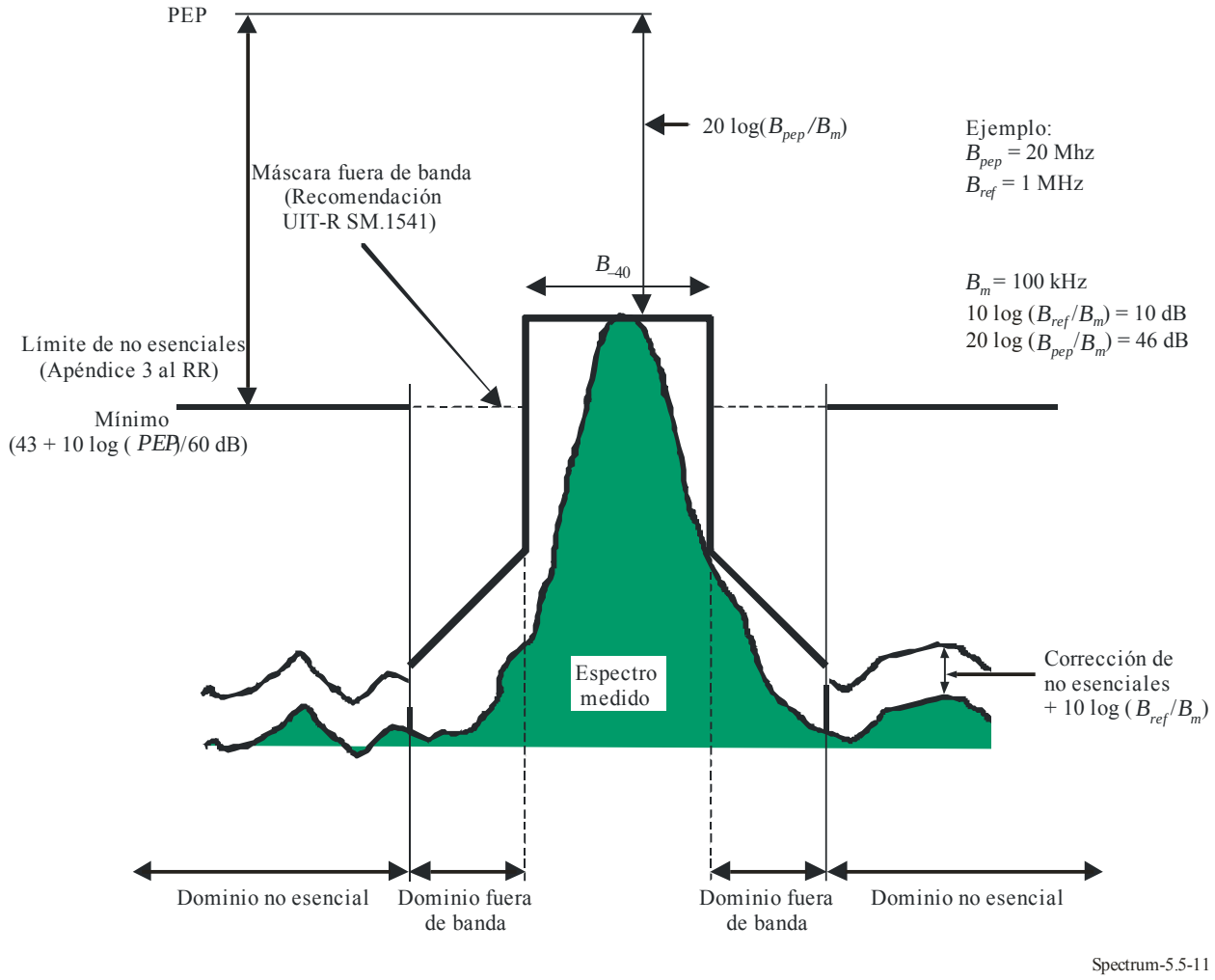
Por tanto, la medición debe hacerse utilizando un filtro que suprima la emisión principal y deje pasar prácticamente sin atenuación toda la gama de frecuencias de interés.

La gama de emisiones no deseadas de un radar que deben medirse abarca muchos GHz. A menudo, los filtros de rechazo de banda (filtros selectivos de ranura) sintonizados a la frecuencia principal del radar no son adecuados pues no proporcionan una atenuación "casi cero" en toda la gama de frecuencias. Puesto que las emisiones radar y, por tanto, la gama de frecuencias a medir están normalmente por encima de 1 GHz, los filtros YIG resultan más adecuados ya que son eléctricamente sintonizables y funcionan como filtros paso banda de banda estrecha. No obstante, la utilización de dichos filtros paso banda requiere que la medición se realice en pasos y que la frecuencia de sintonización del filtro paso banda esté sincronizada con la frecuencia

de medición del analizador. Los analizadores de barrido son los que mejor cumplen este requisito, mientras que los analizadores FFT, con una anchura de banda instantánea amplia, pueden no ser adecuados.

FIGURA 5.5-11

Ejemplo de una máscara espectral calculada



b) Ejemplo de medición de emisiones no deseadas de un radar

Teniendo en cuenta la información descrita en 4.1.2 sobre medición de emisiones no deseadas, los párrafos siguientes ofrecen una visión general del enfoque que debe asumirse cuando se realice la medición de una emisión no deseada en un sistema radar. El ejemplo está basado en la medición de las emisiones de un radar en la banda de 5 GHz sobre el terreno y con la antena del radar detenida.

Consideraciones preliminares

En primer lugar, es necesario determinar teóricamente la definición y evaluación adecuada de la cadena de medición.

– el Cuadro 1 de la Recomendación UIT-R SM.329 define la gama de frecuencias que deben tenerse en cuenta (para un radar en 5,6 GHz, la frecuencia superior de la medición debería ser 26 GHz, y la frecuencia más baja 30 MHz).

La frecuencia más baja obliga a utilizar una antena de grandes dimensiones. Dada la amplia gama de frecuencias que debe cubrirse, se necesitan dos antenas de medición.

– En la Recomendación UIT-R M.1177 se define la configuración necesaria para la medición (anchura de banda de referencia de 1 MHz), un margen de máscara aplicable de 60 dB y un límite frontera entre el dominio fuera de banda y el dominio no esencial.

La máscara requiere que la cadena de medición tenga un rango dinámico de al menos 70 dB.

– El Anexo 8 a la Recomendación UIT-R SM.1541 proporciona algunas orientaciones para la definición de la anchura de banda necesaria (igual a la anchura de banda a –40 dB). Según los parámetros del radar de este ejemplo, B_{-40} es 15,5 MHz.

Hechas estas consideraciones, es necesario establecer el balance del enlace para encontrar un emplazamiento adecuado para la medición, teniendo en cuenta la *p.i.r.e.* y el margen dinámico de 70 dB. Dicho balance también permite definir la ganancia necesaria de las antenas de medida. En la selección del emplazamiento de medición, debe tenerse en cuenta el entorno (no existencia de obstáculos en la primera zona de Fresnel y visibilidad directa hasta la antena del radar).

Una vez seleccionado el emplazamiento, debe establecerse un balance final del enlace para calcular el máximo nivel de señal que puede recibirse en el emplazamiento de medición. Esta información es útil para ajustar el ángulo óptimo de la antena radar a fin de optimizar el margen dinámico de la medición.

CUADRO 5.5-3

Balance del enlace

Potencia nominal del radar (dBm)	81
Ganancia de la antena radar (dBi)	43,8
p.i.r.e. (dBm)	124,8
Trayecto de pérdidas (3,3 km, espacio libre) (dB)	117,8
Nivel a la entrada de la cadena de medición (dBm)	7
Ganancia de la antena de medición a la frecuencia central del radar (dBi)	8,5
Pérdidas del cable (dB)	6
Nivel máximo a la entrada del analizador (dBm)	9,5

El emplazamiento se valida teniendo en cuenta que para un analizador de espectro típico la potencia de entrada máxima es + 20dBm (con la atenuación máxima) y que el nivel de ruido medio visualizado en una anchura de banda de referencia (RBW) de 1 MHz es de unos -90 dBm (sin atenuación).

Se ha desarrollado un programa informático para esta medición destinado a controlar el analizador de espectro y recopilar datos. El programa de comprobación técnica se basa en lo siguiente:

– la configuración del analizador de espectro (RBW de 1 MHz, nivel de cresta del detector, seguimiento de los valores de la retención de máximos (*maxhold*), atenuación 0 dB);

– el espectro de frecuencias se divide en segmentos de 100 MHz;

– el analizador de espectro mide cada segmento con un tiempo de integración de 15 s;

– tras cada medición, los datos se registran en el computador (PC).

Medición

Antes de iniciar la medición, el radar debe girarse hacia el emplazamiento de medición. Para optimizar la orientación del radar, se miden los parámetros fundamentales. La dirección del radar debe ajustarse tanto como sea posible a la que corresponde al nivel de potencia del radar determinado por el balance del enlace.

La medición se basa en lo siguiente:

Paso 1: Captura del espectro de la señal radar alrededor de su frecuencia central.

Paso 2: Realización de mediciones de 30 MHz a 26 GHz con el radar encendido.

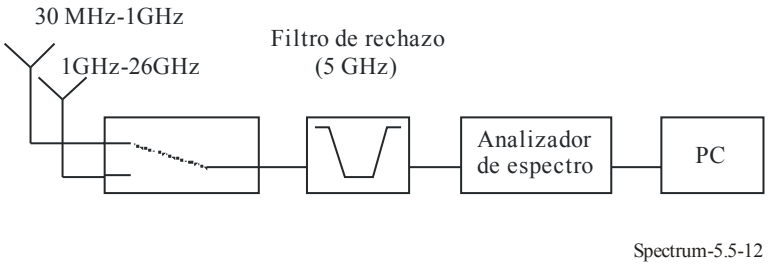
Paso 3: Realización de mediciones de 30 MHz a 26 GHz con el radar apagado (OFF).

El primer paso se realiza con un analizador de espectro (atenuación máxima, RBW de 1 MHz, margen de 50 Hz, frecuencia central según los parámetros fundamentales del radar, nivel de cresta del detector, seguimiento de la retención de máximos (*maxhold*)). Se realiza entonces un primer registro de valores.

Los otros dos pasos se realizan con la ayuda del programa informático desarrollado al efecto. En la Fig. 5.5-12 se ilustra la configuración de la medición.

FIGURA 5.5-12

Configuración de la medición



Spectrum-5.5-12

Post-proceso

El postproceso se realiza en tres pasos:

Paso 1: Corrección del nivel de las distintas mediciones.

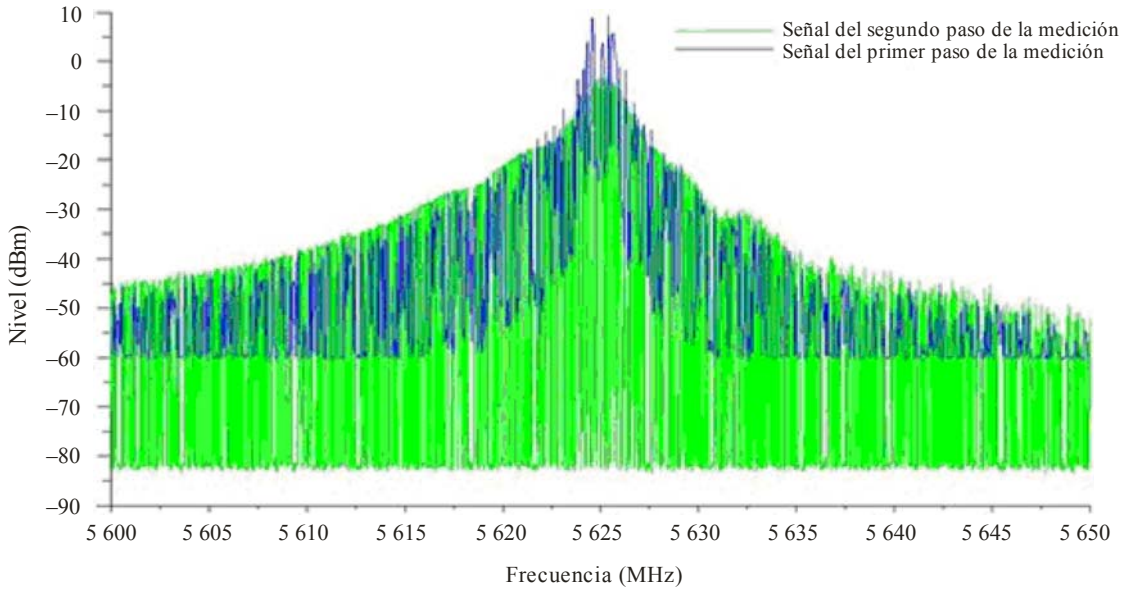
Paso 2: Proceso de correlación.

Paso 3: Aplicación de la máscara espectral a la señal radar medida.

El primer paso iguala el nivel de las tres mediciones, teniendo en cuenta la atenuación del filtro y la diferente atenuación del analizador de espectro. El resultado de este primer paso se ilustra en la Fig. 5.5-13.

FIGURA 5.5-13

Corrección del nivel en la frecuencia central del radar

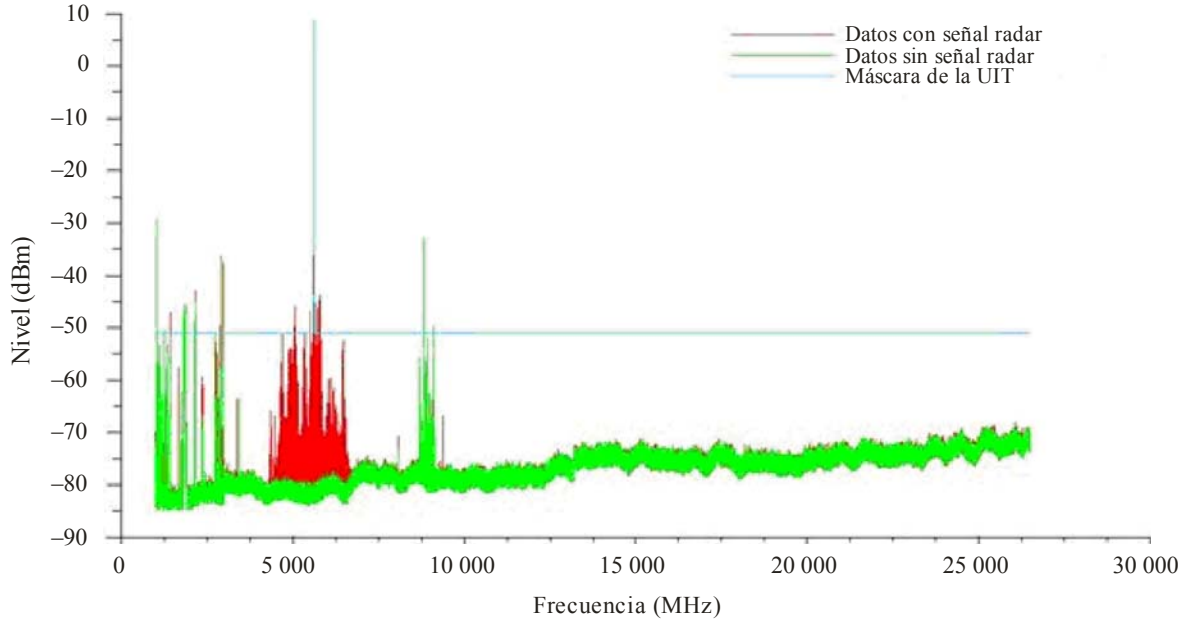


Spectrum-5.5-13

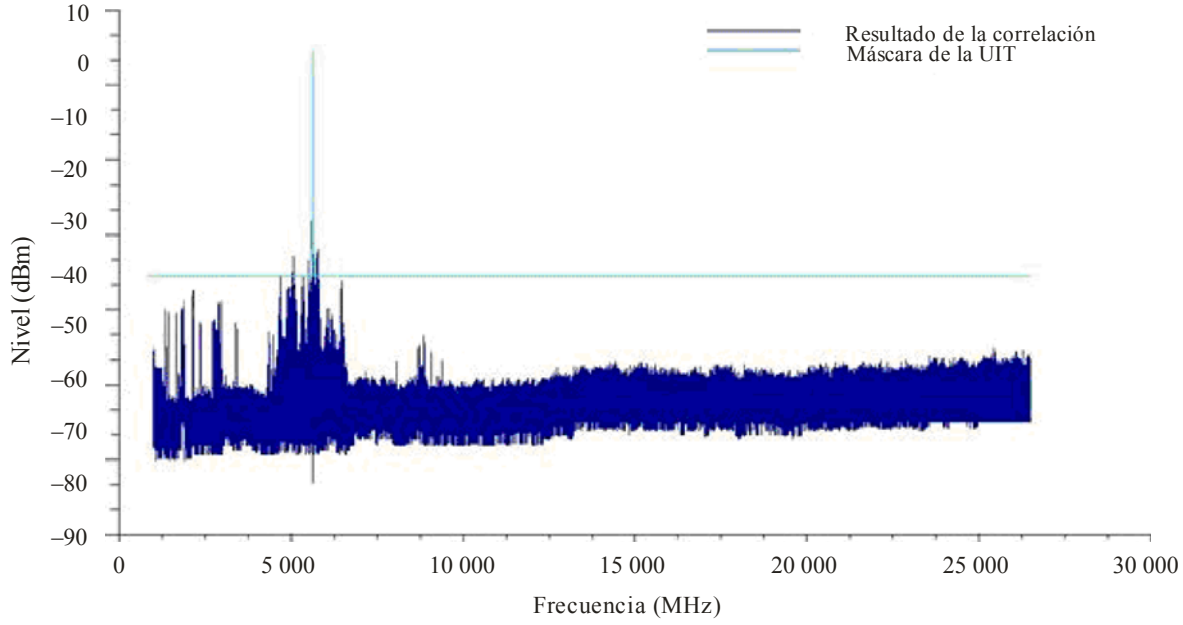
El proceso de correlación se aplica a los datos adquiridos con y sin la señal radar. Este paso mejora el margen dinámico y debe eliminar las emisiones que no hayan sido originadas por el radar. En las Figs. 5.5-14 y 5.5-15 se ilustra este funcionamiento.

FIGURA 5.5-14

Proceso de correlación



Representación de dos series de datos recopilados



Resultado del proceso de correlación

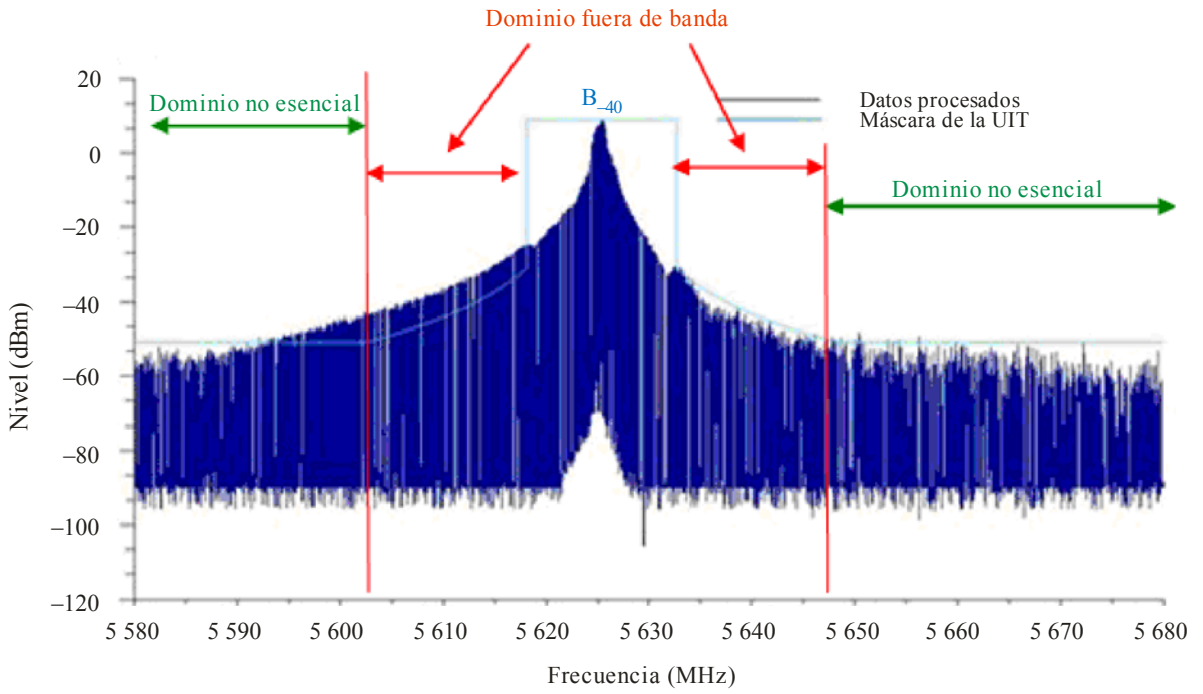
Spectrum-5.5-14

En este caso, no se han podido eliminar todas las señales externas. Algunas posibles razones de ello pueden ser un tiempo de integración demasiado corto y un tiempo entre las mediciones 2 y 3 relativamente largo.

El último paso consiste en la aplicación de la máscara espectral a los datos procesados, tal como se muestra en la Fig. 5.5-15.

FIGURA 5.5-15

Máscara UIT y señal radar



Spectrum-5.5-15

5.5.10.8 Medición de la modulación de fase de un impulso

La ingeniería radar más reciente utiliza cada vez más la compresión de impulsos para conseguir una buena calidad de resolución de objetos a pesar del cada vez mayor alcance de los radares (impulsos largos).

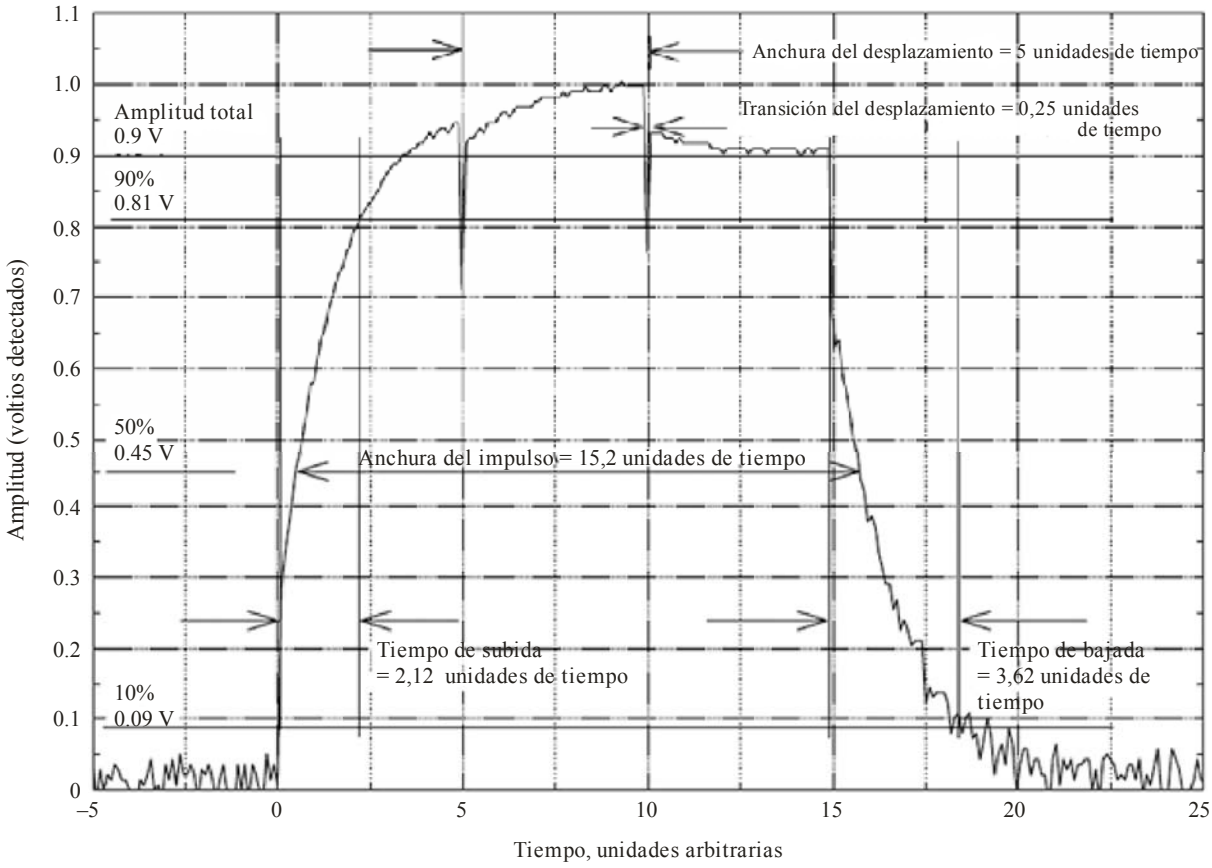
Dicha compresión de impulsos puede conseguirse mediante la modulación de fase o de frecuencia del impulso.

La modulación de un impulso puede medirse con un analizador vectorial de señal. A diferencia de un analizador de espectro, no sólo se visualiza la amplitud en función de la frecuencia, sino también la fase o la frecuencia en función del tiempo.

Estas características también pueden visualizarse con un osciloscopio si no se produce un número excesivo de desplazamientos de fase.

FIGURA 5.5-16

Ejemplo de impulso modulado en fase



Spectrum-5.5-16

Ejemplo de modulación de fase con tres desplazamientos de fase.

(Fuente: Detection and Measurement of Radar Signals de Frank H. Sanders.)

Referencias

Detection and Measurement of Radar Signals, NTIA Institute for Telecommunication Siences, Frank Sanders.

Radar Handbuch Third Edition by Merrill Skolnik.

Radar Measurements Application Note from Agilent.

Spektrum-Analysator-Meßtechnik-Seminar für Hochfrequenz- and Mikrowellentechnik, Hewlett Packard, septiembre 1981.

Recomendaciones del UIT-R

NOTA – Siempre debe utilizarse la versión más actualizada de cada Recomendación.

Recomendación UIT-R M.1177 – Técnicas para la medición de emisiones no deseadas en los sistemas de radar.

Recomendación UIT-R SM.1541 – Emisiones no deseadas en el dominio fuera de banda.

5.6 Medición de radiaciones no ionizantes

5.6.1 Introducción

La enorme popularidad de los teléfonos móviles y la disponibilidad de accesos inalámbricos a Internet viene acompañada de un aumento del número de estaciones base. Este fenómeno, junto con investigaciones realizadas en las últimas décadas, ha aumentado el grado de concienciación pública sobre los posibles efectos indeseables de la radiación no ionizante (RNI) (véase la Nota 1) emitida por las estaciones base, las estaciones de radiodifusión y otros dispositivos de radiocomunicaciones que pueden percibirse como un posible peligro para la salud pública. La preocupación de la opinión pública por este fenómeno ha crecido durante los últimos años en un número cada vez mayor de países.

NOTA 1 – La abreviatura en inglés de campo electromagnético, EMF (*electromagnetic field*) se utiliza en diversas referencias sobre este asunto en lugar de la aquí utilizada, RNI (radiación no ionizante). Se ha considerado más conveniente adoptar este enfoque para que quede más clara la distinción entre los aspectos especializados que se tratan en esta sección y los tratados en otras secciones del Manual, de carácter más general en términos de mediciones del campo electromagnético.

Desde 1974 se han realizado estudios sobre este asunto en el seno de la Asociación Internacional de Protección contra las Radiaciones (IRPA, *International Radiation Protection Association*), creándose en 1977 el Comité Internacional para las Radiaciones No-Ionizantes (INIRC) y finalmente en 1992 la Comisión Internacional de Protección contra la Radiación no Ionizante (ICINRP). Dichos estudios han servido para establecer las directrices sobre la RNI de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y proporcionan la base del marco reglamentario sobre este asunto en muchos países.

Numerosas administraciones han establecido en su marco reglamentario obligaciones relativas a niveles máximos de RNI procedentes de dispositivos de telecomunicación, cuyo cumplimiento debe ser vigilado por la autoridad responsable de la gestión del espectro aprovechando su experiencia. Por tanto, los servicios de comprobación técnica y de inspección nacionales han recibido la tarea de medir los niveles de RNI.

Las mediciones de RNI pueden realizarse:

– asociadas a la concesión de una licencia de radiocomunicaciones;
– de forma periódica, de conformidad con el plan de comprobación técnica y control de las RNI; o
– cuando exista una causa justificada, es decir, por una demanda pública o a iniciativa oficial.

En principio, las mediciones de las RNI son simplemente mediciones de intensidad de campo. No obstante, deben tenerse en cuenta algunas limitaciones que condicionan la evaluación de los resultados. Teniendo en cuenta dichos factores específicos, en la sección 5.6 se proporciona apoyo adicional al personal y organizaciones responsables de la comprobación técnica del espectro sobre cómo realizar dicha tarea. Se describen los principios básicos y se incluyen referencias para mediciones sobre el terreno destinadas a evaluar los campos electromagnéticos y verificar el cumplimiento de los límites de la exposición humana a los mismos. Finalmente, no son aplicables a casos con una exposición crítica muy localizada, por ejemplo, terminales telefónicos celulares en relación con la cabeza humana.

En las Recomendaciones UIT-T K.52, K.61, K.70 y en la Recomendación UIT-R BS.1698 se dispone de información adicional relevante sobre características de los campos electromagnéticos, mediciones (procedimientos e instrumentos), comparaciones entre predicciones y mediciones, así como ejemplos de intensidad de campo calculada, límites y niveles.

5.6.2 Límites de la RNI y coeficiente de exposición

Existen dos tipos de límites, a saber, las restricciones básicas y los niveles de referencia. Las restricciones básicas están directamente relacionadas con los efectos biológicos, pero en ocasiones se expresan en cantidades que son difíciles de medir (por ejemplo, densidad de corriente en el cuerpo humano). Los niveles de referencia se obtienen de las restricciones básicas y se formulan en cantidades fácilmente medibles. Las definiciones exactas son las expuestas a continuación.

Las restricciones a la exposición a campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos variables con el tiempo basadas directamente en efectos sobre la salud se denominan "restricciones básicas". En función de la frecuencia del campo, las cantidades físicas utilizadas para especificar dichas restricciones son las siguientes:

– densidad de corriente (J);

– índice de absorción específica de energía (SAR *specific energy absorption rate*);

– densidad de potencia (S).

En individuos expuestos sólo es posible medir la densidad de potencia en el aire, fuera del cuerpo.

Los niveles de referencia sirven para evaluar la exposición real y determinar si es probable que se superen las restricciones básicas. Algunos de los niveles de referencia se obtienen a partir de las restricciones básicas pertinentes utilizando mediciones y/o técnicas de cálculo, y algunos de ellos tratan de la percepción y efectos indirectos adversos de la exposición a campos electromagnéticos.

Los valores obtenidos son los relativos a la intensidad del campo electromagnético (E), la intensidad del campo magnético (M), la densidad de flujo magnético (B) y la densidad de potencia (S). En cualquier situación particular de exposición, los valores medidos o calculados de dichos parámetros pueden compararse con el nivel de referencia adecuado.

El cumplimiento del nivel de referencia asegura el respeto de la correspondiente restricción básica. Si las cantidades de los valores medidos son mayores que los niveles de referencia, eso no quiere decir necesariamente que se hayan sobrepasado las restricciones básicas.

No obstante, siempre que se supere un nivel de referencia es necesario verificar el cumplimiento de la correspondiente restricción básica y determinar si son necesarias medidas de protección adicionales.

Los niveles de referencia aplicables a una exposición ocupacional o del público en general derivan de los límites básicos de exposición de los seres humanos a campos electromagnéticos adoptados por los organismos competentes en comparación con los campos electromagnéticos medidos. Las mediciones por debajo del nivel de referencia garantizan que se no se superan los límites de exposición.

Los límites a la exposición ocupacional pueden tener valores más relajados. Los niveles de referencia son dependientes de la frecuencia y pueden tomarse de los documentos nacionales, regionales o internacionales relevantes. A título de ejemplo véanse las directrices del ICNIRP incluidas en el Cuadro 5.6-1, aunque la reglamentación nacional tendrá, en todo caso, prioridad.

Aunque los niveles de referencia se presentan en valores eficaces (RMS), también existen limitaciones en términos de valores de cresta (véanse las Notas 3 y 4 del Cuadro 5.6-1). Dichos parámetros son importantes cuando la relación entre el valor de cresta y el valor eficaz (RMS) es elevada (por ejemplo, para señales de radares de impulsos).

El coeficiente de exposición es la relación entre la densidad de potencia electromagnética máxima medida o intensidad de campo (intensidades de campos E y H, o S) y el nivel de referencia correcto a una frecuencia dada. Un valor mayor que "1" significa que los niveles a los que pueden estar expuestas las personas superan el nivel de referencia.

Para una frecuencia dada, pueden ser de aplicación varios niveles de referencia y, por tanto, varios coeficientes de exposición (por ejemplo, campos E y H), pudiendo ser aplicables varios coeficientes a lo largo de la banda de frecuencias de interés.

El coeficiente de exposición total es la suma de todos los coeficientes de exposición para cada frecuencia en la banda de frecuencias de medición en un emplazamiento determinado. El cálculo de dicho valor a partir de los coeficientes de frecuencias individuales se define en los límites de la exposición. Pueden ser aplicables varios coeficientes de exposición total (por ejemplo, para E y H).

A continuación se muestran algunos ejemplos de cálculo de coeficientes de exposición total referenciados a las directrices de la ICNIRP.

En las gamas de frecuencias en las que dominan los efectos de la estimulación eléctrica, el cálculo del coeficiente de exposición total se basa directamente en los valores de la intensidad de campo (véase el segundo ejemplo). En las gamas de frecuencias en las que dominan los efectos térmicos, dicho cálculo se

basa en el cuadrado de la intensidad de campo (véase el tercer ejemplo) o en las densidades de flujo de potencia (primer ejemplo). En los dos últimos ejemplos se observa que las respectivas gamas de frecuencias se superponen. Si existen componentes espectrales en la parte común de ambas gamas (100 KHz – 10 MHz), deben calcularse ambos tipos de coeficientes de exposición total y el valor de ambos debe ser inferior a uno.

– Coeficiente de exposición total (o relación de exposición acumulativa) basada en la *dfp*:

$$\sum_{i=1}^{N} \frac{S_i^{meas}}{S_i^{guid}} = \frac{S_1^{meas}}{S_1^{guid}} + \frac{S_2^{meas}}{S_2^{guid}} + \frac{S_3^{meas}}{S_3^{guid}} + \ldots\ldots + \frac{S_N^{meas}}{S_N^{guid}} \quad < 1$$

donde:

S_i^{meas}: *dfp* medida de índice *i*

S_i^{guid}: límite de *dfp* de conformidad con la directriz aplicada, a la misma frecuencia que S_i^{meas}

N: número total de mediciones consideradas.

CUADRO 5.6-1

ICNIRP 1998: Niveles de referencia para la exposición ocupacional y pública en general a campos eléctricos y magnéticos que varían con el tiempo.

Tipo de exposición	Gama de frecuencias	Intensidad de campo eléctrico (V/m)	Intensidad de campo magnético (A/m)	Densidad de potencia equivalente de onda plana S_{eq} (W/m^2)
Exposición ocupacional	Hasta 1 Hz	–	2×10^5	–
	1-8 Hz	20 000	$1{,}63 \times 10^5/f^2$	–
	8-25 Hz	20 000	$2 \times 10^4/f$	–
	0,025-0,82 kHz	$500/f$	$20/f$	–
	0,82-65 kHz	610	24,4	–
	0,065-1 MHz	610	$1{,}6/f$	–
	1-10 MHz	$610/f$	$1{,}6/f$	–
	10-400 MHz	61	0,16	10
	400-2 000 MHz	$3f^{1/2}$	$0{,}008f^{1/2}$	$f/40$
	2-300 GHz	137	0,36	50
Público en general	Hasta 1 Hz	–	2×10^4	–
	1-8 Hz	10 000	$3{,}2 \times 10^4/f^2$	–
	8-25 Hz	10 000	$4000/f$	–
	0,025-0,8 kHz	$250/f$	$4/f$	–
	0,8-3 kHz	$250/f$	5	–
	3-150 kHz	87	5	–
	0,15-1 MHz	87	$0{,}73/f$	–
	1-10 MHz	$87/f^{1/2}$	$0{,}73/f$	–
	10-400 MHz	28	0,073	2
	400-2 000 MHz	$1{,}375f^{1/2}$	$0{,}0037f^{1/2}$	$f/200$
	2-300 GHz	61	0,16	10

NOTA 1 – f es la indicada en la columna gama de frecuencias.

NOTA 2 – Para frecuencias entre 100 kHz y 10 GHz, el tiempo de promediación es 6 min.

NOTA 3 – Para frecuencias de hasta 100 kHz, los valores de cresta pueden obtenerse multiplicando el valor eficaz (r.m.s.) por $\sqrt{2}(\approx 1{,}414)$. Para impulsos de duración t_p, la frecuencia equivalente aplicable es $f = 1/(2t_p)$.

NOTE 4 – Entre 100 kHz y 10 MHz, los valores de cresta de las intensidades de campo se obtienen mediante interpolación de valores desde 1,5 veces el valor de cresta a 100 MHz hasta 32 veces el valor de cresta a 10 MHz. Para frecuencias por encima de 10 MHz, es recomendable que la densidad de potencia de onda plana equivalente, promediada sobre la anchura del impulso, no supere 1 000 veces el límite S_{eq} o que la intensidad de campo no supere los niveles de exposición de la intensidad de campo del cuadro.

NOTA 5 – Para frecuencias superiores a 10 GHz, el tiempo de premediación es $68/f^{1.05}$ min (f en GHz).

– Coeficiente de exposición total referido a los efectos de la estimulación eléctrica:

$$\sum_{i=1\ \mathrm{Hz}}^{1\ \mathrm{MHz}} \frac{E_i}{E_{l,i}} + \sum_{i>1\ \mathrm{MHz}}^{10\ \mathrm{MHz}} \frac{E_i}{a} \le 1$$

donde:

E_i: campo E medido a la frecuencia i

$E_{l,i}$: límite dependiente de la frecuencia

a = 87V/m para exposición del público en general o 610V/m para exposición ocupacional.

$$\sum_{j=1\ \mathrm{Hz}}^{65\ \mathrm{kHz}} \frac{H_j}{H_{l,j}} + \sum_{j>65\ \mathrm{kHz}}^{10\ \mathrm{MHz}} \frac{H_j}{b} \le 1$$

donde:

H_j: campo H medido a la frecuencia i

$H_{l,j}$: límite dependiente de la frecuencia

b = 5A/m para exposición del público en general ó 24,4A/m para exposición ocupacional.

– Coeficiente de exposición total referido a los efectos térmicos:

$$\sum_{i=100\ \mathrm{kHz}}^{1\ \mathrm{MHz}} \left(\frac{E_i}{c}\right)^2 + \sum_{i>1\ \mathrm{MHz}}^{300\ \mathrm{GHz}} \left(\frac{E_i}{E_{l,i}}\right)^2 \le 1$$

donde:

E_i: campo E medido a la frecuencia i

$E_{l,i}$: límite dependiente de la frecuencia

c = $87/f^{1/2}$V/m para exposición del público en general ó $610/f$ V/m para exposición ocupacional.

$$\sum_{j=100\ \mathrm{kHz}}^{1\ \mathrm{MHz}} \left(\frac{H_j}{d}\right)^2 + \sum_{j>1\ \mathrm{MHz}}^{300\ \mathrm{GHz}} \left(\frac{H_j}{H_{l,j}}\right)^2 \le 1$$

donde:

H_j: campo H medido a la frecuencia j

$H_{l,j}$: límite de referencia a la frecuencia j

d = $0.73/f$ A/m para exposición del público en general ó 1,6A/m para exposición ocupacional.

5.6.3 Campos eléctrico y magnético

Los campos electromagnéticos pueden subdividirse en dos componentes, a saber, el campo eléctrico *E* (medido en V/m) y el campo magnético *H* (medido en A/m). Los campos E y H están matemáticamente relacionados en el campo lejano, por tanto, sólo es necesario medir uno de los componentes. Por ejemplo, la medición del campo H en la región de espacio libre puede usarse para calcular la magnitud del campo *E* y la densidad de potencia *S* (W/m^2) de la forma siguiente:

$$E = H \times Z_0,\ S = H^2 \times Z_0 \qquad \text{siendo } Z_0 = 377\ \Omega$$

Por el contrario, los campos H y E deben medirse de forma separada en la zona reactiva de campo cercano y deben contrastarse con los límites correspondientes.

En general, se considera que el límite interior del campo lejano se encuentra a una distancia de unos 3λ del emplazamiento del emisor (o $2D^2/\lambda$ si el tamaño de la antena es grande en comparación con la longitud de onda λ). En la Recomendación UIT-R K.62 se incluye una clara explicación de los campos cercano y lejano.

Si no puede utilizarse un sensor isotrópico deben realizarse, por ejemplo, 3 mediciones con un dipolo o una antena de cuadro en 3 direcciones ortogonales para obtener las distintas componentes del campo. La intensidad de campo total se obtiene mediante la expresión siguiente:

$$|E| = \sqrt{|Ex|^2 + |Ey|^2 + |Ez|^2}\ ,\ |H| = \sqrt{|Hx|^2 + |Hy|^2 + |Hz|^2}$$

5.6.4 Instrumentos para la medición de radiaciones no ionizantes

5.6.4.1 Sondas y medidores isotrópicos de banda ancha

Las sondas isotrópicas de banda ancha son dispositivos especialmente diseñados para cuantificar campos eléctricos o magnéticos peligrosos. Por lo general, constan de una antena y elementos de detección (campos *E* y *H*) integrados. Las sondas de banda ancha proporcionan normalmente un voltaje en corriente continua proporcional a la intensidad de campo medida.

Las antenas de medición del campo eléctrico utilizan por lo general redes de dipolos resistivos, mientras que las sondas magnéticas utilizan redes de antenas de cuadro. Dichas antenas se disponen de forma que sean mutuamente ortogonales y proporcionen lecturas para todas las polarizaciones y direcciones, dando lugar a características prácticamente isotrópicas de dichos sensores para proporcionar una única cifra que representa el nivel de radiación total en un emplazamiento dado.

Las sondas isotrópicas tienen detectores separados para cada una de las tres dimensiones espaciales. Normalmente se utilizan diodos Schottky o termopares. Los diodos Schottky consiguen un rango dinámico superior y proporcionan un nivel de corriente continua proporcional al valor r.m.s. de la señal de RF cuando se utilizan en la parte cuadrática de sus características.

Aunque su sensibilidad y rango dinámico son inferiores a los de los diodos Schottky, los termopares siempre proporcionan valores eficaces con independencia de la forma de onda de la señal de RF. Por tanto, están mejor adaptados para la medición de las señales de RF cuando la relación entre valor de cresta y valor eficaz (RMS) es elevada.

Los niveles de corriente continua detectados correspondientes a los distintos componentes espaciales se combinan normalmente en el instrumento al que está conectada la sonda, aunque en ocasiones dicha combinación se realiza en la propia sonda.

Puesto que las sondas de banda ancha no pueden distinguir los distintos componentes espectrales, sólo se dispone de un único conjunto de resultados de las mediciones. Los detectores con respuesta en frecuencia plana proporcionan el valor de la intensidad de campo total en la banda, pero no son adecuados para la medición del coeficiente de exposición total. Existen sondas equipadas con circuitos de ponderación dependientes de la frecuencia y que implementan las características de ponderación según una determinada norma. Estas sondas ponderadas sólo pueden proporcionar el valor del coeficiente de exposición total y no son adecuadas para la medición de la intensidad de campo total. La figura siguiente proporciona algunos

diagramas y la foto de un sensor de campo eléctrico isotrópico de capa fina como el descrito por Botelho, *et al.*[2008].

En relación con el uso de sondas y medidores isotrópicos de banda ancha, se identifican las siguientes ventajas:

– Lectura rápida, del orden de 1/3 de un segundo o menos, lo que permite reducir la exposición del personal que maneja los equipos y utilizar técnicas de supervisión rápida o de comprobación técnica por medios móviles.

– Generalmente, están protegidos frente a entornos de campos electromagnéticos intensos, pudiéndose operar cerca de fuentes de radiofrecuencias, lugares de interés para las mediciones de RNI. El límite superior de la escala de medida suele ser elevado, de más de 70V/m y en algunos casos de cientos de V/m, permitiendo la evaluación de entornos de RF extremadamente peligrosos, una actividad que puede ser necesaria para solucionar controversias en relación con los peligros ocupacionales.

– Funcionamiento sencillo.

Por otro lado, deben tenerse presentes las limitaciones siguientes:

– Mayor incertidumbre en entornos de señales moduladas y en lugares con múltiples fuentes de varias frecuencias cuando la sonda utiliza detectores de diodos Schottky. Tal como recogen estudios teóricos [Randa y Kanda, 1985] el error puede ser de –15 dB a +3 dB en las mediciones de densidad de energía, siendo típicamente del orden de unos pocos dB (normalmente menos de 4 dB). La experiencia con sondas confirma, tal como se refleja en las hojas de datos comerciales, que este error tiende a sobreestimar el valor real, es decir, el valor que se muestra en pantalla es superior al nivel del campo electromagnético "real".

– Presenta un único valor, que no depende de la frecuencia, es decir, salvo que el equipo se utilice para evaluar una fuente específica, debe utilizarse el límite inferior sin que sea aplicable ninguna corrección del error.

– Baja sensibilidad, debido a sus características de banda ancha el nivel de ruido de sondas y medidores isotrópicos está, por lo general, entre 0,1 V/m y 0,8 V/m, que no supone un problema cuando el límite aplicable en un entorno público general es del orden de 28 V/m, como propone el ICNIRP y la OMS, pero puede ser una limitación significativa si la reglamentación aplicable es más estricta. En general, es recomendable que el nivel de sensibilidad sea al menos tres veces menor que el límite de la evaluación que se pretende realizar.

FIGURA 5.6-1

(a) diagrama de la configuración de dipolos resistivos para un sensor de campo E;
(b) imagen de sensor de campo E isotrópico;
(c) imagen de sensor de campo H isotrópico



a) b) c)

Spectrum-5.6-01

Es recomendable que las sondas y medidores isotrópicos cumplan las características siguientes:

– Anisotropía mejor que 1dB (desviación respecto a características isotrópicas ideales).

– Capacidad de evaluación del valor cuadrático medio (r.m.s.) de la intensidad de campo.

– Nivel operacional máximo superior al límite reglamentario más alto aplicable en la banda de los instrumentos.

– Nivel de ruido inferior al límite reglamentario mínimo aplicable en la banda de los instrumentos. Un requisito mínimo razonable es que el valor sea 10 dB inferior. Si es posible, la diferencia debe ser mayor.

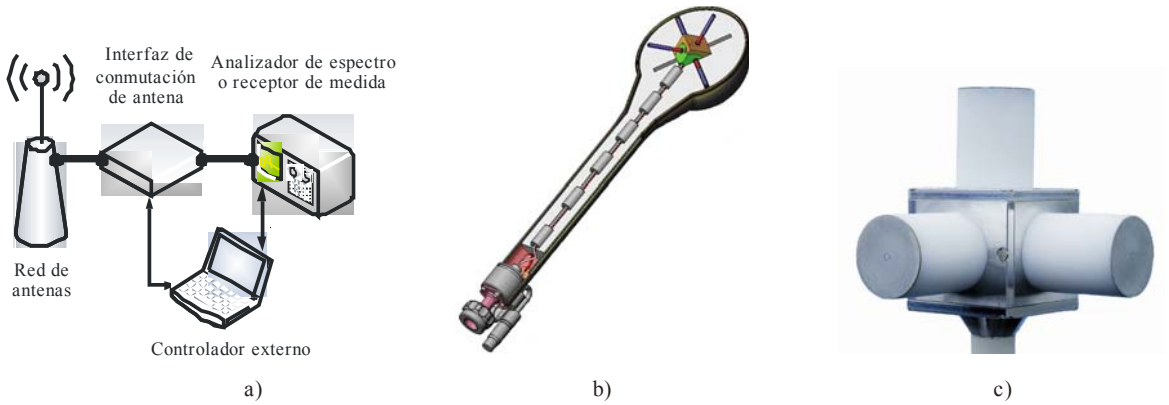
5.6.4.2 Antenas triaxiales y medidores de intensidad de campo

Las antenas triaxiales son antenas específicas diseñadas para realizar mediciones sobre el terreno de radiaciones no ionizantes. Generalmente se diseñan como una red de tres antenas cortas ortogonales (dipolos, monopolos o antenas de cuadro). En lugar de combinar las señales de radiofrecuencia de las tres antenas elementales, éstas se conectan secuencialmente al puerto de salida de la antena a través de un conmutador. El medidor de intensidad de campo (analizador de espectro o receptor de medida) realiza la medición del campo eléctrico a la salida de la antena para cada componente espacial. Puede ser necesario disponer de un equipo independiente, como por ejemplo, una computadora o PC industrial con el fin de controlar la conmutación entre antenas y recopilar datos de mediciones para su ulterior procesamiento, y proporcionar los resultados e informes de conformidad con parámetros y reglamentaciones previamente definidos,. Existen soluciones comercialmente disponibles que integran el conmutador de antena en la propia antena y el controlador en el instrumento de medición, ya que de esta forma la solución es más fácilmente portable y resulta adecuada para su utilización en mediciones de campo.

En la Fig. 5.6-2 se muestra un ejemplo de instrumentación tal como se describe en [Gallee *et al.*, 2007].

FIGURA 5.6-2

(a) Diagrama del sistema incluyendo un controlador externo, del que puede prescindirse si el analizador de espectro o el receptor incluyen funciones de controlador de antena;
(b) diagrama de un conjunto de dipolos cortos para proporcionar características de medición casi isotrópicas;
(c) imagen de un ejemplo de antena triaxial de monopolos cortos



El procesamiento de las mediciones de la intensidad de campo en bruto para obtener un coeficiente de exposición acumulativo, como el descrito en 5.6.2, es fundamental para la correcta evaluación de las mediciones de conformidad con los límites de exposición establecidos. Ello hace aún más importantes las tareas del componente descrito como "controlador externo" y la validación adecuada de los algoritmos utilizados para los cálculos.

En relación con la utilización de antenas triaxiales y del medidor de intensidad de campo, cabe señalar las siguientes ventajas:

– Proporcionan mediciones selectivas en frecuencia, permitiendo su utilización en entornos multiusuario (varias señales) y la evaluación de la contribución de cada usuario del espectro. Las incertidumbres de medición son, por lo general, mejores que las observadas para las sondas isotrópicas de banda ancha, siendo por lo general, comparables a la incertidumbre propia de otros métodos de medición sobre el terreno de la intensidad de campo.

– Proporcionan una mayor sensibilidad que las sondas isotrópicas, del orden de mV/m, permitiendo la evaluación de emplazamientos sujetos a una reglamentación mucho más estricta que la establecida por el ICNIRP y la OMS.

Por otro lado, deben tenerse en cuenta las limitaciones siguientes:

– Tiempo de adquisición lento. Pueden hacerse exámenes rápidos que requieren unos pocos segundos, pudiendo utilizarse, con las debidas precauciones, otros métodos como el basado en el "movimiento" de la sonda, aunque la realización de mediciones fiables puede requerir varios minutos. Las exploraciones completas y detalladas en todo el espectro pueden requerir casi una hora.

– Como consecuencia de la conmutación de los componentes espaciales, existen breves periodos de tiempo durante los que las antenas triaxiales no proporcionan salida alguna (periodos ciegos). Por tanto, no es un método adecuado para la medición de señales de RF compuestas de crestas de corta duración (por ejemplo, señales de radares de impulsos).

– Aunque la antena y el conmutador están por lo general protegidos contra campos electromagnéticos intensos, no ocurre así con los analizadores de espectro y los receptores de medida que sólo pueden soportar con la garantía de los fabricantes valores no superiores a 10 o 20V/m, debiendo estar la mayor parte del tiempo expuestos a niveles inferiores a los mínimos definidos por el ICNIRP y la OMS. Si se utilizan computadoras o PC comerciales, éstos pueden verse afectadas por niveles incluso más bajos de campos electromagnéticos.

– Debido a su mayor complejidad, el sistema puede ser más propenso al fallo, particularmente de sus componentes software.

5.6.4.3 Estaciones transportables

Los instrumentos de medición de campos electromagnéticos están disponibles para un funcionamiento manual (versiones portátiles o portables) y en versiones adaptadas a un funcionamiento autónomo de larga duración. Estas últimas son las denominadas estaciones transportables.

En algunos países (Brasil, Alemania, Hungría, Israel, Italia, España), y especialmente debido a quejas públicas, la comprobación técnica de las RNI se ha equipado con estaciones transportables, de forma que puedan realizarse campañas de comprobación técnica de larga duración y/o en "tiempo real" en emplazamientos concretos o, como en el caso de Brasil, realizar un examen rápido de grandes zonas del territorio mediante estaciones transportables a bordo de vehículos.

Una estación transportable dispone de instrumentos de medición de las RNI, como sondas isotrópicas de banda ancha o antenas triaxiales y medidores de intensidad de campo, junto con subsistemas soporte, como sistemas especiales de suministro de energía, almacenamiento de datos y unidad de control, interfaz de comunicación y contenedor. Dichos elementos se describen a continuación con más detalle:

– **Suministro de energía:** las sondas y los medidores isotrópicos son muy susceptibles al ruido transmitido por las líneas de energía debido a sus características de construcción y de banda ancha. Para reducir dicho ruido, las sondas isotrópicas no se conectan en general directamente a las líneas de alimentación de energía, sino que obtienen ésta de una fuente de corriente continua, como las baterías. Para un funcionamiento de larga duración, la potencia puede obtenerse de paneles solares o de adaptadores especiales de energía que suministran la energía a la sonda con conmutación automática de las baterías u otros medios, como láseres. Las estaciones con antenas triaxiales no sufren normalmente dichos problemas ya que utilizan filtros antes del detector de RF, lo cual reduce la interferencia de dichas fuentes.

– **Almacenamiento de datos y unidad de control**: la mayoría de las estaciones disponen de algún tipo de almacenamiento de datos y de unidad de control. En los sistemas con antenas triaxiales se utiliza normalmente un PC industrial, pues las tareas de control y de procesado son más complejas y el volumen de datos es mucho mayor. En sistemas con sondas isotrópicas, este subsistema puede ser mucho más sencillo y, de hecho, la mayoría de los medidores portátiles modernos tienen capacidades de memoria y de procesado suficientes para realizar las tareas que realizan las estaciones transportables. En ambos casos, es previsible que dicho sistema pueda almacenar datos suficientes para funcionar hasta una semana sin comunicaciones ni apoyo.

– **Interfaz de comunicación**: las estaciones transportables están diseñadas para recopilar datos de mediciones durante largos periodos de tiempo, aunque en ocasiones también se utilizan para suministrar mediciones en "tiempo real" para la población en general. Para realizar esta tarea es necesario disponer de algún tipo de interfaz de comunicación la mayor parte del tiempo; debido al pequeño volumen de información a transmitir, puede utilizarse una red pública inalámbrica. Para evitar que las mediciones sufran interferencias, la unidad de control realiza por lo general las mediciones y la transmisión de datos secuencialmente y en periodos regulares, por ejemplo, 6 min de medición + 1 min de transmisión de datos.

– **Contenedor**: puesto que las estaciones transportables se instalan en entornos abiertos, deben estar debidamente protegidas contra la humedad, calor, frío y vandalismo.

En el caso de Brasil, las estaciones se equiparon con un receptor GPS, quedando instaladas y funcionando a bordo de un vehículo. Dicho tipo de estación puede utilizarse para proporcionar un examen rápido de una amplia zona, conduciendo lentamente a través de la misma y proporcionando rápidamente información acerca de emplazamientos concretos, simplemente aparcando el vehículo en los mismos.

En cualquier caso, las estaciones transportables no evitan, por su gran tamaño, tener que disponer de dispositivos portátiles para caracterizar adecuadamente un emplazamiento. En ocasiones, también se necesitan equipos portátiles para una inspección inicial que determine el emplazamiento adecuado para la instalación de dichas estaciones.

5.6.4.4 Utilización de equipos convencionales de medición de la intensidad de campo

Las mediciones de RNI pueden realizarse con equipos convencionales de medición de intensidad de campo, incluyendo estaciones de comprobación técnica del espectro como las descritas en otros capítulos de este Manual. Dicha utilización debe hacerse tomando todas las precauciones posibles ya que los intensos campos electromagnéticos que previsiblemente se producen pueden dañar los sistemas más sensibles, como son dichos equipos convencionales. En todo caso, debe tenerse en cuenta lo siguiente:

– Debido al mayor tamaño de la antena, no es posible realizar con dichos equipos mediciones de campo cercano.

– Cuando sea previsible que existan campos intensos, deben utilizarse atenuadores para mantener el nivel de señal de antena dentro del rango de funcionamiento de los instrumentos de medición.

– Las mediciones y los cálculos deben realizarse teniendo en cuenta todas las polarizaciones y direcciones, según las distintas fuentes consideradas.

El tiempo necesario para realizar mediciones de RNI en un entorno complejo con equipos convencionales puede ser de 4 a 8 veces superior al necesario para la misma tarea con antenas triaxiales, teniendo en cuenta solamente el tiempo necesario para repetir las mediciones en las distintas direcciones y polarizaciones. La tarea puede simplificarse midiendo solo en las direcciones y polarizaciones realmente utilizadas, aunque ello exige una preparación más cuidadosa de las mediciones y de la configuración utilizada.

5.6.5 Procedimientos de medición

En los puntos siguientes se presentan orientaciones básicas para la medición de los niveles de RNI.

5.6.5.1 Selección del emplazamiento de medición

El emplazamiento de la medición debe elegirse de forma que represente los niveles más elevados de exposición a los que pueda estar sujeta una persona, teniendo en cuenta la posición de las antenas próximas.

Dicho emplazamiento puede determinarse mediante una "verificación rápida" que utilice equipos de medida o mediante cálculos basados en la propagación teórica desde antenas próximas.

En las Recomendaciones UIT-R K.52 y K.70 se incluyen procedimientos de cálculo detallados que incorporan un software de estimación de campos electromagnéticos presentes, una de las aplicaciones que puede utilizarse para estimar la exposición acumulada en la proximidad de estaciones transmisoras.

El enfoque teórico ahorra, por lo general, mucho tiempo, pues permite seleccionar las zonas relevantes antes de cualquier desplazamiento. Es importante señalar que dicha delimitación es crítica para la calidad de los resultados, ya que la combinación de diversos transmisores con diagramas de radiación de antena variables puede dificultar la evaluación basada en la experiencia técnica de la persona que realiza las pruebas.

Asimismo, es importante destacar que cuando los cálculos teóricos son suficientemente bajos respecto al límite establecido puede descartarse la necesidad de mediciones en la mayoría de los emplazamientos públicos, lo cual acrecienta la importancia de disponer y utilizar herramientas de simulación para reducir las de tareas de medición a realizar.

La alternativa empírica, antes mencionada como "verificación rápida", y también conocida como "método de evaluación por movimiento", consiste en utilizar un sonda que realiza exploraciones rápidas para localizar el punto donde probablemente exista la exposición máxima, preferiblemente dentro de una zona delimitada.

En este método, la sonda debe moverse lentamente en la zona de interés, evitando la proximidad a cualquier superficie metálica y al cuerpo del operador, y con un movimiento que oscile entre 1,1 m y de 1,7 m de altura sobre el suelo. La velocidad de este movimiento debe estar en concordancia con el tiempo de adquisición del sensor utilizado. Los lugares en los que el valor instantáneo observado sea mayor, deben seleccionarse para una evaluación detallada conforme a los procedimientos descritos en los puntos siguientes.

Este método es importante pues los métodos de cálculo sólo limitarán la zona de investigación a unos pocos metros cuadrados, como por ejemplo un tejado o un apartamento. Sin embargo, el responsable de las pruebas debe reducir aún más dicha zona hasta determinar un punto concreto donde deben ajustarse los instrumentos para realizar la medición, tal como se describe en los puntos siguientes.

5.6.5.2 Posición de los instrumentos y promediación

Una vez elegido un emplazamiento para las mediciones, los sensores de la radiación de RF o antenas deben montarse sobre un trípode no conductor para reducir la perturbación del campo electromagnético. Por el mismo motivo, el personal debe mantenerse alejado de la antena durante las mediciones.

Si el emplazamiento elegido se encuentra dentro de la zona previsible de campo cercano, deben medirse los campos eléctrico y magnético, como se indica en 5.6.3. Para ello se utilizan distintas sondas o antenas. La componente eléctrica (E) del campo electromagnético puede medirse fácilmente utilizando antenas adecuadas, por ejemplo, antenas de dipolo, bicónicas, log-periódicas, etc., y la componente magnética (H) del campo electromagnético se mide normalmente con antenas de cuadro:

– Para reducir los efectos de distribuciones de campo no uniformes debidas a la propagación por trayectos múltiples se recomienda realizar la promediación espacial de las mediciones, por ejemplo, en tres puntos a alturas de 1,1 m 1,5 m y 1,7 m, tal como propone como referencia básica la Recomendación UIT-R K.61.

– El tiempo de medición también debe elegirse de conformidad con las directrices de exposición pertinentes, por ejemplo, 6 min según el ICNIRP. Debe tenerse presente que aunque las directrices actuales establezcan un único periodo de premediación, éste debe ajustarse a las características de la señal y al equipo de medición utilizado, por ejemplo, ajustando la modulación y el ciclo de trabajo de la portadora considerada al tiempo de barrido y al detector utilizado.

5.6.5.3 Precauciones en caso de campos eléctricos o magnéticos intensos

Cuando deben medirse campos electromagnéticos intensos, deben tomarse medidas de seguridad del personal contra la exposición a la radiación. Las predicciones de intensidad de campo, la utilización de indicadores de protección frente a la radiación e instrucciones de trabajo explícitas pueden ser herramientas adecuadas para garantizar condiciones de trabajo seguras.

Debe verificarse la inmunidad de los equipos, especialmente de los receptores y analizadores de espectro, y si es necesario, deben utilizarse sondas con una mejor inmunidad frente a señales intensas.

También debe garantizarse la inmunidad de los equipos de apoyo esenciales, como computadores para la automatización de las mediciones, ya que un nivel intenso de energía electromagnética puede producir un malfuncionamiento intermitente de dichos equipos que puede interferir con las mediciones.

5.6.5.4 Utilización de sondas y medidores de banda ancha

Este método debe aplicarse:

– cuando sólo sea necesario conocer el nivel total de radiación no ionizante, es decir, cuando no sea necesario conocer las contribuciones independientes de cada fuente a distintas frecuencias, o bien se considera que sólo existe una fuente activa en las proximidades;

– cuando la intensidad total de campo previsible y registrada por este método no exceda el nivel de referencia mínimo que las directrices identifican para la gama de frecuencias investigada;

– cuando el ruido de fondo de los instrumentos sea al menos 10dB inferior al nivel de referencia mínimo que establecen las directrices aplicables a la gama de frecuencias investigada.

La sonda debe abarcar toda la gama de frecuencias de interés, debiendo disponerse de dos o más sondas en caso de ser necesario. En ese caso, el resultado se calcula utilizando los valores suministrados por cada sonda de conformidad con las fórmulas siguientes:

$$E = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} E_i^2} \quad \text{o} \quad H = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} H_i^2}$$

donde n es el número de sondas, y E_i o H_i son los valores obtenidos por cada sonda. Cuando se utilicen varias sondas de banda ancha el resultado puede sobreestimarse si los rangos de frecuencia se solapan.

Cuando sólo exista una fuente relevante, por ejemplo, un transmisor de onda corta en un emplazamiento distante, para mejorar la calidad de los resultados pueden aplicarse correcciones a frecuencias específicas en base a factores de calibración de la sonda.

Si los resultados obtenidos están cercanos al nivel mínimo de las directrices aplicables (dentro del rango de incertidumbre de las mediciones), deben realizarse evaluaciones selectivas con la frecuencia. Ello es especialmente crítico en el caso de señales con modulaciones complejas, para las que, como se ha señalado anteriormente, las sondas de banda ancha equipadas con detectores de diodos Schottky pueden proporcionar cifras incorrectas.

5.6.5.5 Consideraciones generales sobre la evaluación selectiva de frecuencias

La evaluación selectiva de frecuencias se aplica cuando es necesario conocer el nivel de radiación no ionizante para cada frecuencia dentro de la banda explorada.

La mejor forma de realizar una evaluación selectiva con la frecuencia es mediante un receptor o un analizador de espectro alimentado con una batería ligera.

Puesto que en ocasiones los receptores o analizadores deben funcionar en presencia de campos electromagnéticos intensos, para que los resultados sean fiables y repetibles es fundamental disponer de un buen margen dinámico y de buenas prestaciones en términos de intermodulación.

Deben utilizarse antenas ligeras y robustas, con cables de alimentación de alta calidad. Los tipos preferibles de antenas son los siguientes:

– Sonda selectiva de 3 ejes.

– Antena de cuadro magnético en ondas decamétricas.

– Antena de dipolo de banda ancha o antena log-periódica (encapsulada).

– Antena bicónica.

– Antenas directivas (cuando exista una contribución principal y los niveles de las restantes emisiones sean despreciables).

Para frecuencias más bajas deben utilizarse antenas eléctricamente pequeñas teniendo en cuenta la longitud de onda significativa.

La distancia mínima entre la antena y cualquier obstáculo (por ejemplo, una pared o una elevación del terreno) en la dirección del transmisor debe ser de al menos 1 λ. Las mediciones en frecuencias inferiores a 600 MHz realizadas a una altura de 50 cm por encima del nivel del suelo deben realizarse con antenas eléctricas o magnéticas eléctricamente pequeñas y de banda ancha, en lugar de utilizar dipolos. El personal debe mantenerse alejado de la antena durante las mediciones, y las antenas deben montarse sobre trípodes no conductivos para no perturbar el campo electromagnético.

El software de control del receptor/analizador es fundamental debido a la gran cantidad de datos que deben recopilarse. El software debe permitir corregir factores de antena y pérdidas del cable en el rango de frecuencias de interés. Es recomendable utilizar software de automatización que permita diversos ajustes de conformidad con los servicios sujetos a comprobación técnica.

5.6.5.6 Evaluación general entre 9 kHz y 6 GHz

Puesto que en el espectro de frecuencias existe una combinación de fuentes de banda ancha/estrecha, analógicas/digitales y continuas/discontínuas con características de señal muy diferentes, la anchura de banda de medición debe responder a un compromiso. En este apartado se presenta una configuración genérica que puede utilizarse entre 9 kHz y 6 GHz, cuando no sean aplicables, relevantes o se desconozcan, configuraciones de servicio específicas y sólo se requiera una evaluación general.

Las configuraciones descritas a continuación son adecuadas para una evaluación general o para un examen rápido del espectro en función del detector utilizado. Para identificar todas las fuentes de transmisión es útil disponer de un detector de cresta con capacidad de retención de máximos (*maxhold*), aunque en ese caso por lo general se sobreestima el coeficiente de exposición total calculado. Para una evaluación general del coeficiente total de exposición humana debe utilizarse un detector RMS que permita realizar mediciones precisas.

Siempre que sea posible, es preferible que los parámetros de la configuración se ajusten a las emisiones previsibles, es decir, con una anchura de banda y tiempos de barrido adecuados a los servicios que se explotan en cada sub-banda de frecuencias.

En los puntos siguientes se muestran algunos ejemplos de configuraciones para los servicios más comunes.

Es importante destacar que el uso adecuado de configuraciones de servicio específicas puede proporcionar no sólo un resultado más preciso, sino también una explotación más eficiente en términos de tiempo, ya que, por ejemplo, se reduce el número de canales si se consideran solamente los canales de control para servicios móviles o si se utiliza una medición de potencia del canal para sistemas de banda ancha.

Teniendo todo ello presente, el enfoque más recomendable para una evaluación inicial de un emplazamiento desconocido sería combinar barridos con una configuración específica para el servicio y barridos de evaluación más generales, tal como se define más adelante

Este enfoque permite obtener resultados más fiables en bandas en las que existe una mayor preocupación por los niveles de RNI, como las asignadas a servicios de difusión y de comunicaciones personales.

En otras bandas, en las que la complejidad de dichas configuraciones detalladas no esté justificada por las razones mencionadas, pueden obtenerse resultados representativos.

Debe intentarse un compromiso aceptable entre la calidad de la medición y un barrido de todo el espectro.

El barrido de todo el espectro puede ser de interés para detectar emisiones tales como las de estaciones no autorizadas y/o de equipos industriales, científicos y médicos (ICM).

Ajustes de receptores y analizadores de espectro

– Para receptores se consideran adecuadas las anchuras de banda / tamaño de pasos siguientes:

9 kHz-30 MHz	BW = 9 ó 10 kHz	tamaño del paso de 10 kHz

30 MHz-3 GHz	BW = 100 kHz	tamaño del paso de 100 kHz
3 GHz-6 GHz	BW = 1 MHz	tamaño del paso de 1 MHz

Tiempo de activación del receptor: ≥ 0,1 s

– Para analizadores de espectro se pueden utilizar las anchuras de banda/ajustes de barrido siguientes:

9 kHz-30 MHz	BW = 10 kHz	tiempo de barrido de 50-100 ms
30 MHz-300 MHz	BW = 100 kHz	tiempo de barrido de 100 ms
300 MHz-3 GHz	BW = 100 kHz	tiempo de barrido de 700 ms-1 s
3 GHz-6 GHz	BW = 1 MHz	tiempo de barrido de 700 ms-1 s

Con retención de máximos y detector de cresta para una supervisión rápida o un detector RMS para una evaluación general, tal como se ha indicado anteriormente.

– El nivel de umbral elegido está 40 dB por debajo del nivel de referencia. Si en una banda de frecuencias ninguna emisión supera el nivel umbral pueden informarse como referencia las dos emisiones de mayor nivel.

– Polarización de la antena: las mediciones se realizarán con la antena de medida dispuesta de forma que se detecten los componentes de intensidad de campo en todas las direcciones espaciales.

5.6.5.7 Señales por encima de 6 GHz

Normalmente se utilizan antenas directivas, por ejemplo, antenas de bocina, parabólicas y log-periódicas. Las mediciones se realizan siguiendo los pasos siguientes:

– Se fija la frecuencia central de cada canal de la emisión con una resolución igual (y si es posible mayor) a la anchura de banda del canal.

– Se selecciona el detector de nivel eficaz (RMS).

– La antena se apunta al transmisor (señal máxima) con la polarización adecuada. Por razones prácticas, se desprecian las posibles reflexiones.

5.6.5.8 Radares y emisiones de impulsos

En este tipo de señales la energía se transporta en ráfagas cortas. Por lo general, el impulso es corto en comparación con los intervalos entre impulsos.

Existen numerosos tipos de radares, en particular, para aplicaciones aeronáuticas. Dichas aplicaciones tienen características muy distintas, con frecuencias que típicamente varían entre 100 MHz y 95 GHz y potencia de cresta comprendida entre 1 W y 50 W.

Pueden existir límites adicionales de la potencia de cresta que sean relevantes para los sistemas de radar. Por ejemplo, la potencia de cresta no debe superar el nivel de referencia en un factor de más de 30 dB de conformidad con la Recomendación 1999/519/EC y no está directamente relacionada con las características del impulso del radar.

Por tanto, los valores que deben evaluarse de la intensidad del campo eléctrico y magnético son los valores de cresta y los valores eficaces (r.m.s.) del campo pulsátil.

Para evaluar el valor de cresta deben seguirse los pasos siguientes:

– Seleccionar un filtro con una anchura de banda suficiente para la realización de mediciones durante un tiempo inferior a la duración del impulso. En el caso de un impulso no modulado, es suficiente un filtro con una anchura de banda de $4/\tau$, siendo τ la duración del impulso, para capturar el 99% de la potencia de la señal.

– Seleccionar el modo de detección de cresta positiva.

– Seleccionar el modo de retención de máximos (maxhold) para una o varias rotaciones del radar hasta que la señal sea estable.

– Seleccionar el margen cero centrado en la frecuencia de la emisión.

Para evaluar la intensidad de campo eficaz (r.m.s.) es necesario conocer las características en el tiempo de la señal y obtener el valor promediado a partir del valor de cresta o bien, medir el promedio RMS de la señal.

Debido al movimiento del haz en acimut y elevación, deben tomarse medidas especiales para asegurar una medición correcta de la señal.

5.6.5.9 Señales discontinuas

Si los parámetros técnicos de la señal son desconocidos, las mediciones deben realizarse siguiendo los pasos siguientes:

– Fijar la frecuencia central de cada canal de emisión con una resolución igual (y si es posible, superior) a la anchura de banda del canal.

– Verificar los valores r.m.s y de cresta, y tener en cuenta el más crítico de conformidad con la Nota 4 del Cuadro 5.6-1.

5.6.5.10 GSM

Aunque el objetivo de las mediciones de campos electromagnéticos sea por lo general encontrar los valores reales de la exposición a los mismos, en ocasiones los posibles máximos deben extrapolarse en la proximidad de las estaciones base.

Las transmisiones de dichos sistemas constan de un canal permanente, por ejemplo, el canal BCCH de los sistemas GSM 900/1800, y (*n-1*) canales de tráfico, siendo *n* es el número total de canales de la estación base. Por tanto, la potencia total depende de la carga de tráfico.

Para evaluar el tráfico máximo posible y, por tanto, la potencia máxima, se utiliza el procedimiento siguiente:

– Identificar el canal de control permanente.

– Fijar la frecuencia central de cada canal de la emisión con una resolución igual (y si es posible, superior) a la anchura de banda del canal.

– Seleccionar el detector de cresta.

– Seleccionar el modo de retención de máximos (*maxhold*).

– Medir $E_{\text{canal de control}}$.

– Determinar el número de canales de la estación base. Ello puede resultar difícil cuando se utiliza salto de frecuencia.

– Extrapolar el tráfico máximo mediante la fórmula siguiente:

$$E_{máx} = E_{canaldecontrol} \times \sqrt{n_{transmisores}}$$

– Si los canales transmitidos por una estación base tienen niveles de potencia diferentes, debe utilizarse la expresión siguiente:

$$E_{máx} = E_{canaldecontrol} \times \sqrt{\frac{P_{total}}{P_{canaldecontrol}}}$$

donde:

P_{total}: potencia máxima posible de la estación base.

5.6.5.11 Emisiones de banda ancha (televisión analógica/digital; redes digitales...)

El equipo de medición es el mismo que el utilizado en los procedimientos de medición generales. Algunos tipos de emisiones, particularmente señales de impulsos y emisiones de banda ultraamplia (UWB) requieren un analizador en el dominio del tiempo para un análisis previo de las señales y adaptar, en consecuencia, los ajustes para la medición.

Para estos tipos de emisiones puede ser difícil obtener una resolución igual a la anchura de banda de las emisiones, por lo que el procedimiento ser el siguiente: seleccionar un filtro de menor resolución y realizar un cálculo acumulativo que tenga en cuenta la forma del filtro de resolución.

Este tipo de proceso se conoce como el modo de "potencia del canal", y en muchos analizadores de espectro es una herramienta de medición estándar u opcional.

5.6.5.12 Sistemas AMDC (UMTS...)

En las redes UMTS o en otros sistemas con tecnología AMDC también puede realizarse la extrapolación para determinar la situación en condiciones de tráfico máximo. No obstante, la metodología es distinta a la utilizada para GSM ya que es necesario medir la potencia en el dominio del código.

Tomando UMTS como ejemplo, el primer paso es identificar un canal común específico, el "P-CPICH" (canal piloto común) y medir la potencia de dicho canal, PP-CPICH. La máxima potencia UMTS asociada a dicho canal se deducirá de PP-CPICH utilizando el coeficiente indicado más abajo. El principio de medición y cálculo es el siguiente:

– se determinan las frecuencias centrales $freq_0$ de todas las emisiones UMTS mediante un analizador de espectro y registran. Se mide la potencia P-CIPCHi de los canales detectados "CPICHi" mediante un escáner de UMTS. Finalmente, se suma la potencia de todos los canales CPICHi.

$$P_{P-CPICH}(freq_0) = \sum_{i=1}^{n} P_{P-CPICH_i}(freq_0)$$

El $E_{P\text{-}CPICH(freq0)}$ equivalente se calcula a partir del valor de P-CPICH ($freq_0$) integrando el factor de antena y las pérdidas del cable. Mediante la fórmula siguiente se calcula el campo E para el tráfico máximo a la frecuencia $freq_0$ utilizando el coeficiente $R_{P\text{-}CPICH}$.

$$E_{max}(freq_0) = E_{P-CPICH}(freq_0) \times \sqrt{R_{P-CPICH}}$$

siendo

$$R_{P-CPICH} = \frac{P_{max}}{P_{P-CPICH}}$$

En relación con el escáner UMTS, debe señalarse que no existe un método de calibración internacionalmente reconocido por la falta de referencias de un código software (como el CPICH).

Para realizar mediciones fiables puede ser necesario cualificar el equipo para asegurar que no existirán problemas en relación con los resultados del escáner UMTS.

Una forma de realizar dicha cualificación puede ser utilizar al menos dos generadores de señal UMTS y verificar las características siguientes del escáner:

– *Respuesta en frecuencia:*

  Utilizando una señal de referencia en 2 frecuencias distintas de la banda UMTS con la misma potencia P-CPICH y la misma potencia emitida en el bloque de 5 MHz.

  Debe minimizarse la diferencia entre las dos potencias medidas P-CPICH y las potencias medidas en ambos canales.

– *Linealidad:*

  Utilizando una señal de referencia a una frecuencia fija, con una relación fija entre la potencia P-CPICH y la potencia total del canal, y con una potencia total emitida diferente en el bloque de 5 MHz.

  La diferencia entre la potencia medida y la potencia emitida debe ser inferior a 2 dB.

– *Tráfico:*

  Utilizando una señal de referencia a una frecuencia fija, con una potencia total emitida fija en el bloque de 5 MHz y una relación diferente entre la potencia P-CPICH y la potencia total del canal.

Debe minimizarse la diferencia entre la relación medida y la relación de la señal emitida.

Estos tres parámetros deben verificarse mediante los dos generadores de señal, debiendo minimizarse la diferencia de los resultados obtenidos (con ambos generadores de señal).

Obviamente, en cuenta en el cálculo deben conocerse y tenerse todas las incertidumbres y factores de calibración de la cadena de medición.

5.6.6 Incertidumbre

La incertidumbre de la medición de las RNI puede dividirse en dos partes: la debida al entorno y la debida a los instrumentos.

Incertidumbre debida al entorno: debido a varios parámetros (desvanecimiento, trayectos múltiples) existen incertidumbres inherentes a las mediciones realizadas en un emplazamiento.

Su valor puede reducirse mediante el método de promediado espacial, descrito en 5.6.5.2.

Puede considerarse que la incertidumbre debida al entorno se reduce a 3 dB cuando se realizan mediciones en 3 puntos y a 2 dB cuando se realizan en 6 puntos.

En la Recomendación UIT-R K.61 se incluye información adicional sobre la aplicación del promediado temporal y espacial.

La incertidumbre debida al equipo es intrínseca de cada instrumento y debe ser proporcionada por el fabricante.

Cuando se compra un equipo debe tenerse especial precaución de que se facilite toda la información necesaria para el cálculo de la incertidumbre, incluidos certificados de calibración y funciones de propagación de la incertidumbre que permitan un uso correcto de la información suministrada en dicho certificado a fin de determinar la incertidumbre del resultado final de la medición.

Es recomendable mantener la incertidumbre global por debajo de un nivel aceptable.

Por ejemplo, la norma europea EN 50 492 recomienda un valor máximo de incertidumbre de 4 dB.

5.6.7 Informes

Los resultados de la medición en cada emplazamiento deben documentarse en un informe, preferentemente mediante tablas. Los valores correspondientes de H (o E) y S pueden calcularse según 5.6.3 en caso de no haber sido medidos sobre el terreno.

Las cantidades medidas y calculadas deben compararse con el nivel de referencia más bajo de las disposiciones legales aplicables.

Si las cantidades medidas o calculadas son superiores, debe destacarse en el informe y deben tomarse medidas oportunas de conformidad con la reglamentación en vigor.

Un informe de medición completo debería incluir la información siguiente:

– propósito y objetivos de las mediciones;
– fecha, hora de inicio y de fin;
– coordenadas geográficas, altura sobre el suelo y características específicas de los emplazamientos de medición;
– lista de transmisores identificados;
– temperatura;
– equipo utilizado y su número de serie;
– incertidumbre de las mediciones.

Además, para mejorar la claridad del informe es conveniente utilizar representaciones gráficas de los resultados en forma de mapas, diagramas y fotos.

Ello permite presentar los resultados de las mediciones en sus localizaciones y la posición relativa de los principales emisores y zonas de especial preocupación, tales como escuelas, hospitales y zonas residenciales.

Finalmente, el informe debe comparar los valores medidos con los coeficientes de exposición total aplicables y exponer una conclusión sobre la conformidad de la exposición a la radiofrecuencia respecto a los límites de la reglamentación pertinente.

Referencias

BOTELHO, T. R.; FRASSON, A. M. F.; NAZIMA, F. T.; ALMEIDA, A. M. [septiembre, 2008] Análise e construção de Sensor de Campo Elétrico de Faixa Larga Construído com Filme Espesso; MOMAG – 13º SBMO-Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e 8ª CBMAG – Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo.

ECC Recommendation (02)04 (revised Bratislava 2003, Helsinki 2007); "Measuring Non-Ionising Electromagnetic Radiation (9 kHz – 300 GHz)", disponible en :www.ero.dk.

Recomendación Europea, 1999/519/EC, 12 de julio 1999.

Norma Europea EN 50 492, CENELEC, noviembre 2008.

GALLEE, F.; CHAINON, S.; LATTARD, H.; GORON, E.; TOUTAIN Y. [October, 2007] Development of an isotropic sensor 2GHz-6GHz. Proceedings of the 37th European Microwave Conference Munich, Alemania.

ICNIRP, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection[1998] Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (hasta 300 GHz).

KANDAE, M.; DRIVER,L. D. [February, 1971] AnisotropicElectric-FieldProbewithTapered Resistive Dipoles for Broad-Band Use, 100 kHzto18 GHz; IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol MTT-35, p. 124-130.

RANDA, J.; KANDA,M. [January, 1985] Multiple-Source,Multiple-FrequencyError of an Electric Field Meter; IEEE Transactions On Antennas And Propagation, Vol. Ap-33, No. 1.

Recomendaciones del UIT-R

NOTA – Siempre debe utilizarse la versión más actualizada de cada Recomendación.

Recomendación UIT-R BS.1698 – Evaluación de los campos procedentes de los sistemas de transmisión de radiodifusión terrenal que funcionan en cualquier banda de frecuencias para determinar la exposición a radiaciones no ionizantes.

Recomendaciones del UIT-T

NOTA – Siempre debe utilizarse la versión más actualizada de cada Recomendación.

Recomendación UIT-T K.52 – Orientación sobre el cumplimiento de los límites de exposición de las personas a los campos electromagnéticos.

Recomendación UIT-T K.61 – Directrices sobre la medición y la predicción numérica de los campos electromagnéticos para comprobar que las instalaciones de telecomunicaciones cumplen los límites de exposición de las personas.

Recomendación UIT-T K.70 – Técnicas para limitar la exposición humana a los campos electromagnéticos en cercanías a estaciones de radiocomunicaciones.

5.7 Mediciones del ruido radioeléctrico

5.7.1 Introducción y antecedentes

La relación *C/I* es un parámetro fundamental de la planificación y evaluación de la calidad de funcionamiento de las redes de radiocomunicaciones. En ausencia de parámetros adicionales, como emisiones cocanal, la interferencia es básicamente ruido de fondo. En ese caso, la *C/I* es igual a la relación *S/N*. En muchas aplicaciones de radiocomunicaciones y rangos de frecuencias, el ruido externo debido a emisiones no deseadas de dispositivos eléctricos y electrónicos es superior al ruido de fondo del equipo receptor.

El conocimiento del nivel de dicho ruido externo determina, por tanto, la zona de cobertura de un transmisor o red para una potencia radiada dada, o bien, la potencia radiada necesaria cuando debe cubrirse una zona específica.

La planificación de redes se basa por lo general en cifras de ruido radioeléctrico publicadas en la Recomendación UIT-R P.372, aunque dichos valores fueron obtenidos de mediciones realizadas en la década de 1970 y pueden no ser aplicables en la actualidad.

Por tanto, puede ser necesario realizar mediciones del ruido radioeléctrico por los motivos siguientes:

– para proporcionar valores actualizados del nivel de ruido para una planificación de red realista;

– para evaluar la calidad de funcionamiento de las redes existentes en diferentes entornos o en emplazamientos concretos;

– para actualizar los viejos valores de la Recomendación UIT-R P.372 utilizados para la planificación de redes.

No obstante, la medición del ruido radioeléctrico puede ser una tarea muy complicada y su nivel puede no ser el único parámetro necesario para caracterizarlo completamente. En esta sección se proporciona la información de respaldo necesaria sobre el complejo asunto de la medición del ruido radioeléctrico, mientras que en la Recomendación UIT-R SM.1753 se describe con todo detalle la configuración para mediciones reales, el equipo requerido, el procedimiento de medición y la presentación y evaluación de los resultados.

5.7.2 Fuentes de ruido radioeléctrico

Según la Recomendación UIT-R P.372, las tres principales fuentes de ruido radioeléctrico son los ruidos atmosférico, galáctico y artificial. Si bien las dos primeras son bien conocidas y no cambian significativamente durante largos periodos de tiempo, el ruido artificial es con frecuencia dominante y puede cambiar debido al aumento de la densidad de dispositivos eléctricos y electrónicos, por lo que es la componente de mayor interés cuando se realizan mediciones de ruido radioeléctrico.

CUADRO 5.7-1

Importancia de las fuentes de ruido radioeléctrico según la gama de frecuencias

Fuente de ruido	Gama de frecuencias de importancia
Ruido atmosférico	Por debajo de 100 kHz
Ruido galáctico	3 MHz a 100 MHz
Ruido artificial	9 kHz a 1 GHz

La medición del ruido galáctico requiere, por lo general, una antena apuntando al cielo. Sin embargo, la mayoría de los receptores de comunicaciones reciben su energía principal de las proximidades de la superficie de la Tierra. Cuando se evalúa el impacto del ruido radioeléctrico en los servicios de comunicación, deben utilizarse antenas que apunten a la dirección más frecuentemente utilizada por dichos servicios, pues la mayor fuente de ruido medido será ruido artificial.

5.7.3 Componentes del ruido radioeléctrico

La definición de la Recomendación UIT-R P.372, establece que el ruido radioeléctrico es la combinación de emisiones procedentes de múltiples fuentes no originadas en transmisores de radiocomunicación. Si en un emplazamiento de medición determinado no predomina una fuente de ruido única, la característica del ruido radioeléctrico normalmente presenta una distribución de amplitud normal y puede considerarse ruido gaussiano blanco (WGN).

Sin embargo, teniendo en cuenta la elevada densidad de dispositivos emisores de ruido, especialmente en ciudades y zonas residenciales, es virtualmente imposible encontrar un emplazamiento que no esté, al menos temporalmente, dominado por el ruido o emisiones procedentes de fuentes independientes.

Estas fuentes a menudo emiten impulsos o portadoras únicas. Como los equipos de radiocomunicaciones tienen que funcionar en dichos entornos, no es realista excluir estas componentes de las mediciones del ruido radioeléctrico.

El ruido de una única portadora (SCN) sólo se detecta como tal cuando procede de una única fuente situada en las proximidades del emplazamiento de medición. Múltiples fuentes que emiten portadoras únicas se combinan rápidamente para constituir un espectro similar al del ruido a medida que aumenta su número. La Recomendación UIT-R P.372 define el ruido radioeléctrico como la *suma* de radiación no intencionada procedente de varias fuentes y excluye específicamente las emisiones procedentes de fuentes únicas identificables.

Por consiguiente, es necesario seleccionar emplazamientos de medición y las frecuencias/rangos de frecuencias que no estén dominadas por emisiones procedentes de fuentes únicas, lo que hace innecesarias consideraciones adicionales sobre el SCN en el contexto de las mediciones del ruido artificial.

CUADRO 5.7-2

Componentes del ruido radioeléctrico

Componente de ruido	Propiedades	Fuentes (ejemplos)
Ruido gaussiano blanco (WGN)	Vectores electromagnéticos no correlados. Anchura de banda igual o mayor que la anchura de banda del receptor. El nivel de potencia espectral aumenta de forma lineal con la anchura de banda.	Computadores, redes de comunicaciones por líneas de transporte y distribución de energía eléctrica, dispositivos de banda ultraamplia, redes informáticas cableadas, ruido galáctico.
Ruido impulsivo (IN)	Vectores electromagnéticos correlados. Anchura de banda mayor que la anchura de banda del receptor. El nivel de potencia espectral aumenta con el cuadrado de la anchura de banda.	Chispas de encendido, rayos (ruido atmosférico), cebadores de lámparas de gas, computadoras.
Ruido de una única portadora (SCN)	Una o más líneas espectrales diferenciadas. Anchura de banda menor que la anchura de banda del receptor. Nivel espectral de potencia independiente de la anchura de banda.	Redes informáticas cableadas, computadoras, fuentes de alimentación conmutadas.

5.7.4 Parámetros fundamentales

Si bien la componente de ruido gaussiano blanco está suficientemente caracterizada mediante el valor eficaz (RMS), la cuestión es mucho más difícil para el ruido impulsivo. Los modernos servicios de comunicaciones digitales casi siempre aplican corrección de errores, haciéndolos más inmunes especialmente al ruido impulsivo. No obstante, cuando se alcanzan determinadas duraciones de impulsos y relaciones de repetición, el ruido impulsivo puede interferir significativamente con el funcionamiento de dicho servicio. Por tanto, es deseable que la medición del ruido radioeléctrico no solamente ofrezca el nivel de ruido impulsivo sino también información acerca de la distribución estadística de parámetros de ruido, tales como la duración de los impulsos y la frecuencia de repetición.

5.7.5 Tipos de mediciones

Determinar el nivel y las características verdaderas del ruido artificial, incluido el ruido impulsivo, para todas las gamas de frecuencia puede llevar mucho tiempo pues es una tarea de medición muy compleja. Sin embargo, cuando sólo interesa la componente del WGN, o únicamente deben investigarse ciertas gamas de frecuencias, las mediciones pueden simplificarse notablemente sin perder información importante o disminuir la precisión. Por esta razón, al realizar las mediciones de ruido radioeléctrico se recomienda utilizar las tres metodologías distintas siguientes:

Tipo A: sólo ruido gaussiano blanco (WGN). Este tipo de medición proporciona únicamente los niveles de WGN, ignorando el ruido impulsivo (IN). Requiere únicamente realizar mediciones del nivel eficaz en una frecuencia «libre». Se simplifica la evaluación de los datos. En la mayoría de los casos puede utilizarse equipo de comprobación técnica estándar.

Tipo B: ruido gaussiano blanco (WGN) y ruido impulsivo (IN). Con este tipo de medición se obtienen los niveles de WGN y las características de los parámetros de IN importantes del ruido radioeléctrico. Requiere equipos de medición que puedan muestrear el nivel de la señal instantánea a una velocidad muy alta. La evaluación de los datos es más compleja y requiere una gran cantidad de procesamiento posterior, la mayor parte del cual sólo puede ser realizado mediante computadoras.

Tipo C: ruido gaussiano blanco (WGN), ruido impulsivo (IN) y separación del ruido artificial. Además del nivel de WGN y las características del IN, este tipo de medición separa en gran medida el ruido impulsivo atmosférico del ruido artificial, lo cual reviste importancia en la gama de frecuencias de ondas decamétricas. El proceso de medición es igual a la medición de Tipo B, pero debe llevarse a cabo en dos emplazamientos distintos y los equipos en estos emplazamientos deben estar sincronizados en el tiempo

5.7.6 Emplazamientos y frecuencias de medición

Incluso en una sola frecuencia, el nivel de ruido radioeléctrico, especialmente cuando viene determinado por el ruido artificial, varía dependiendo de la hora, el emplazamiento y las condiciones de propagación. Las cifras estadísticamente relevantes del nivel de ruido sólo pueden obtenerse promediando resultados de múltiples mediciones en emplazamientos diferentes pero similares. La Recomendación UIT-R P.372 define cuatro categorías de emplazamientos o entornos diferentes: urbano, residencial, rural y rural tranquilo. Sólo deberán combinarse resultados de mediciones realizadas en entornos de la misma categoría.

La forma más práctica de seleccionar una frecuencia o una banda de frecuencias adecuada es encontrar en primer lugar una banda candidata explorando la gama de frecuencias deseadas e identificando la frecuencia o la banda de frecuencias con el nivel más bajo. La posibilidad de utilizar esta banda de frecuencias o esta frecuencia puede verificarse aplicando el proceso de descomposición del valor singular (SVD) o con la ayuda de un diagrama de distribución de probabilidad de la amplitud (APD).

En la Recomendación UIT-R SM.1752 se describen ambos métodos. Si dicho proceso pone en evidencia que la exploración detecta principalmente ruido gaussiano blanco, puede realizarse la medición. De no ser así, debe seleccionarse una frecuencia o una banda de frecuencias alternativa.

Debido a las diferentes condiciones de propagación, anchuras de banda de los receptores de comunicación y antenas de medida utilizadas, las mediciones del ruido radioeléctrico pueden realizarse por separado en los principales rangos de frecuencias de interés, a saber:

– de ondas hectométricas a ondas decamétricas (9 kHz a 30 MHz);

– en ondas métricas (30 MHz a 300 MHz);

– en ondas decimétricas y superiores (más de 300 MHz).

La Recomendación UIT-R SM.1753 incluye información más detallada sobre la selección de emplazamientos y frecuencias o bandas de frecuencias de medición.

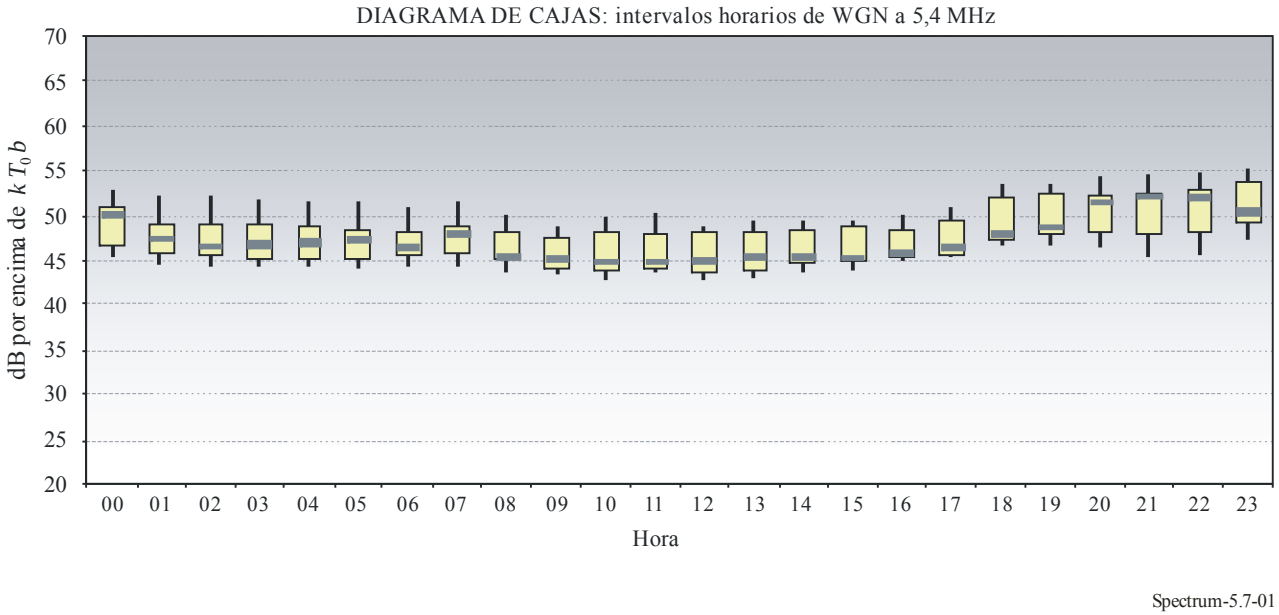
5.7.7 Ejemplos de presentación de resultados

Tal como se ha mencionado anteriormente, el nivel de ruido artificial está caracterizado como un valor estadístico que puede cambiar con el tiempo.

Una representación típica del ruido gaussiano blanco es el denominado "diagrama de cajas" que refleja los valores máximos, mínimos y medios, junto con los percentiles 75 y 25, tal como se representa en la Fig. 5.7-1.

FIGURA 5.7-1

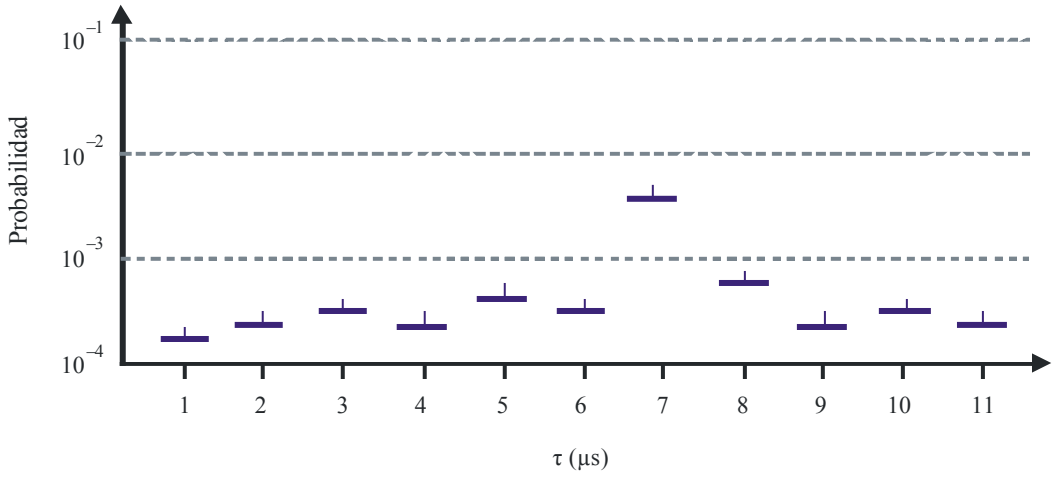
Ejemplo de gráfico de cajas



Los parámetros del ruido impulsivo se representan como una distribución de probabilidad tal como se muestra en la Fig. 5.7-2 que ilustra la duración del impulso.

FIGURA 5.7-2

Ejemplo de distribución de la duración del impulso /ráfaga



5.7.8 Banco de datos de ruido radioeléctrico de la UIT

Los niveles y estadísticas de ruido radioeléctrico son más valiosos cuanto mayor sea el número de registros compilados. A tal fin, la UIT ha creado un banco de datos en el que todas las administraciones pueden acceder a datos de mediciones. Los datos del ruido radioeléctrico se incluyen en el Cuadro C9-1 del banco de datos. Se facilitan funciones de búsqueda y filtrado para la recuperación de los datos de interés.

El banco de datos está disponible en: http://www.itu.int/ITU-R/go/sg3-dtbank-dbsg3/en.

En dicho sitio existe un manual descargable que proporciona información sobre el uso y acceso al banco de datos.

En su primera etapa, el banco de datos sólo contiene niveles de ruido gaussiano blanco. Se alienta a las Administraciones que realizan mediciones de ruido radioeléctrico a que proporcionen sus datos de forma que sean accesibles a todas las partes interesadas.

Referencias

Recomendaciones e informes del UIT-R

NOTA – Siempre debe utilizarse la versión más actualizada de cada Recomendación.

Recomendación UIT-R P.372 – Ruido radioeléctrico.

Recomendación UIT-R SM.1753 – Métodos para medir el ruido radioeléctrico.

Informe UIT-R P.2089 – Análisis de datos de ruido radioeléctrico (disponible sólo en inglés).

CAPÍTULO 6

Fundamentos y herramientas de soporte

		Página
6.1	Posicionamiento mundial por satélite	616
6.1.1	Consideraciones generales	616
6.1.1.2	Sistemas disponibles	616
6.1.1.3	Equipos disponibles	617
6.1.1.4	Mejora de la precisión	617
6.1.2	NAVSTAR GPS	617
6.1.2.1	Descripción de sistema	617
6.1.2.2	Calidad de funcionamiento del sistema	617
6.1.3	GLONASS	618
6.1.3.1	Panorama general	618
6.1.3.2	Características de la utilización combinada de GLONASS y GPS	618
6.1.3.3	Características de GPS y GLONASS	619
6.2	Mapas	621
6.2.1	Utilización de mapas para las estaciones de comprobación técnica	621
6.2.2	Fuentes de datos digitales	622
6.2.2.1	Mapas en papel (impresos)	622
6.2.2.2	Obtención de imágenes por satélite, fotografía aérea y exploración por láser	623
6.2.3	Tipos de datos para mapas digitales	625
6.2.3.1	Mapas políticos, mapas de carreteras y fotografías con referencia geográfica	626
6.2.3.2	Modelo topográfico digital	626
6.2.3.3	Datos de edificación y modelo de elevación digital	627
6.2.3.4	Datos parásitos	627
6.2.3.5	Mapa mundial digitalizado de la UIT	628
6.2.3.6	Servicios de mapas en la Web	628
6.2.4	Resolución de los mapas para cálculos de propagación de ondas	628
6.2.5	Sistemas de coordenadas	629
6.3	Cálculo de la potencia isótropa radiada equivalente (p.i.r.e.)	631
6.3.1	Introducción y definición de la p.i.r.e.	631
6.3.2	Estimación de la p.i.r.e. usando mediciones de comprobación técnica	631
6.3.2.1	Cálculo de la p.i.r.e. a partir de la potencia recibida y la intensidad de campo	632

Página

6.3.3 Influencia de la propagación 634
6.4 Modelos de propagación 634
6.4.1 Efectos de la atmósfera 634
6.4.1.1 Efectos por debajo de unos 30 MHz 634
6.4.1.2 Efectos por encima de unos 30 MHz 635
6.4.2 Efectos del terreno irregular 635
6.4.2.1 Trayecto con visibilidad directa 635
6.4.2.2 Difracción sobre obstáculos y terreno irregular 635
6.4.3 Efectos de las reflexiones en la superficie terrestre 635
6.4.4 Propagación en los trayectos Tierra-satélite 635
6.4.5 Modelos de propagación disponibles 636
6.4.6 Modelos de propagación y utilización de las diversas bandas de frecuencias 636
6.5 Intermodulación 638
6.5.1 Antecedentes 638
6.5.2 Ecuaciones de análisis de la intermodulación 639
6.5.3 Detección e identificación de productos de intermodulación 640
6.6 Modulación y métodos de acceso al espectro 642
6.6.1 Introducción 642
6.6.2 Modulación analógica 642
6.6.2.1 Modulación de amplitud 642
6.6.2.2 Modulación de frecuencia 645
6.6.2.3 Modulación de fase 648
6.6.2.4 Modulaciones analógicas especiales 649
6.6.2.4.1 Modulación de la radiodifusión de televisión 649
6.6.2.4.2 Modulación de banda lateral única con portadora suprimida 650
6.6.2.4.3 Modulación de banda lateral independiente 651
6.6.2.4.4 Modulación dinámica de amplitud 651
6.6.3 Modulación digital 652
6.6.3.1 Principios de la modulación digital 652
6.6.3.2 Modulación por desplazamiento de amplitud 652
6.6.3.3 Modulación por desplazamiento de frecuencia 653
6.6.3.4 Modulación por desplazamiento de fase 653
6.6.3.5 Modulación por desplazamiento mínimo 655
6.6.3.6 Modulación de amplitud en cuadratura 656
6.6.3.7 Filtrado de la banda base para modulaciones de portadora única 657
6.6.3.8 Multiplexación por división de frecuencias ortogonales 658

Página

6.6.4 Métodos de acceso al espectro 659
6.6.4.1 Acceso múltiple por división de frecuencia 660
6.6.4.2 Acceso múltiple por división del tiempo 661
6.6.4.3 Espectro ensanchado 662
6.6.4.3.1 Espectro ensanchado por salto de frecuencia 662
6.6.4.3.2 Espectro ensanchado por secuencia directa 663
6.6.4.4 Acceso múltiple por división de código 663
6.6.4.5 Acceso múltiple por división especial (AMDE) y canales espaciales 666
6.7 Transformada rápida de Fourier 668
6.7.1 Principios básicos 668
6.7.2 Conversión de analógico a digital y muestreo 670
6.7.3 Aplicación de ventana 671
6.7.4 Implementaciones de la FFT 674
6.7.5 Gama de aplicaciones 675
6.8 Planificación y optimización de redes de comprobación técnica del espectro 676
6.8.1 Introducción 676
6.8.2 Principios de la planificación y optimización de redes de comprobación técnica del espectro 677
6.8.3 Planificación y optimización de redes de comprobación técnica en bandas de ondas métricas y decimétricas 679
6.9 Incertidumbre de la medición 686
6.9.1 Introducción 686
6.9.2 Visión general y definición de la incertidumbre de la medición 686
6.9.3 Funciones de distribución comunes para expresar la incertidumbre 687
6.9.4 Aplicación 689
6.9.5 Ejemplo de cálculo de la incertidumbre 690
6.10 Procesamiento y diversidad espacial de antenas 694
6.10.1 Introducción 694
6.10.2 Procesamiento de antena y comprobación técnica del espectro 695
6.10.3 Principios del procesamiento de antena 696
6.10.3.1 Redes de antena y receptor 696
6.10.3.2 Conformación de haz 696
6.10.3.2.1 Filtrado de antena o conformación de haz convencional 696
6.10.3.2.2 Antena adaptable o conformación de haz adaptable 697
6.10.3.3 Demodulación y análisis 698
6.11 Documentación requerida 698
6.11.1 Documentos internacionales básicos y generales 698

Página

6.11.2 Documentación mínima que debe existir en las estaciones de comprobación técnica de emisiones 699
6.11.3 Recomendaciones UIT-R 699
6.11.4 Recomendaciones e Informes de la CE 1 del Sector de Radiocomunicaciones 700
6.11.5 Manuales UIT-R 700
6.11.6 Soportes lógicos pertinentes del UIT-R 701
6.11.7 Sitios Internet en la Web 702

6.1 Posicionamiento mundial por satélite

6.1.1 Consideraciones generales

Los sistemas del servicio de radionavegación por satélite (RNSS) son esenciales para el logro de los siguientes fines de la comprobación técnica:

Posicionamiento:

– **Licencias**: verificar la posición de las estaciones según establece la licencia, determinar la posición de las estaciones ilegales.

– **Sistemas de radiogoniometría móviles**: predecir la posición exacta de los sistemas de radiogoniometría móviles.

– **Mediciones móviles de intensidad de campo:** cobertura de las estaciones de radiodifusión en modulación de frecuencia; verificación de la intensidad de campo máxima por motivos de seguridad.

– **Medición de diagramas de radiación:** medición de diagramas de radiación desde helicópteros.

Patrones de tiempo y frecuencia:

– **Tiempo:** sincronizar las redes radiogoniométricas en el caso de señales de duración muy breve.

– **Frecuencia:** sincronizar los receptores.

Los sistemas RNSS tienen asimismo capacidad para predecir velocidad y dirección, pero no todos ellos tienen la precisión que requiere la comprobación técnica.

Estos servicios permiten determinar la posición en todo el mundo, de forma continua y con todo tipo de condiciones atmosféricas, de usuarios situados en la superficie de la Tierra o cerca de la misma. Los receptores operan de forma pasiva, lo que hace posible atender a un número ilimitado de usuarios al mismo tiempo. Los sistemas RNSS poseen características que les permiten denegar un servicio de precisión a usuarios no autorizados.

Los códigos de determinación de la distancia emitidos por los satélites hacen que el receptor pueda medir el tiempo de tránsito de las señales, y determinar así la distancia entre un satélite y el usuario. Normalmente, a los efectos del posicionamiento tridimensional (3-D) es necesario que cuatro satélites estén simultáneamente «a la vista» del receptor.

En la Recomendación UIT-R TF.767 se recomienda usar el GPS y el GLONASS en las aplicaciones que requieren una cobertura mundial y unos niveles de precisión de aproximadamente 10 a 100 ns. Normalmente se considera que el GSP y el GLONASS determinan las coordenadas de metro en metro para las antenas del receptor. Puesto que el receptor ya posee un patrón de frecuencia de rubidio integrado de gran precisión, podrá éste utilizarse también como patrón de frecuencia para todos los equipos de comprobación técnica.

En aplicaciones móviles de comprobación técnica, la utilización de los sistemas RNSS se ha convertido en la norma supletoria cuando es suficiente una precisión de 20 m. Una vez comenzado a funcionar, el sistema puede proporcionar información de posicionamiento actualizada cada 2 s aproximadamente (este periodo de tiempo puede ajustarse a la preferencia del usuario). En un vehículo móvil esta precisión es suficiente para determinar en qué lado de la calle se encuentra uno, y normalmente basta para efectuar mediciones de cobertura de grandes células o sistemas de radiodifusión. Aunque hay otros sistemas comerciales de navegación por satélite en curso de desarrollo como parte de los nuevos servicios móviles por satélite, el más utilizado actualmente sigue siendo el GPS.

6.1.1.2 Sistemas disponibles

Los siguientes sistemas RNSS están disponibles actualmente:

NAVSTAR — Sistema americano concebido originalmente para uso militar pero también disponible para aplicaciones civiles, que ofrece al usuario mayor precisión con las aplicaciones del GPS diferencial.

GLONASS Sistema ruso que puede utilizarse por sí mismo o con el NAVSTAR+GPS para conseguir una mayor precisión.

6.1.1.3 Equipos disponibles

Los receptores comerciales comunes RNSS deben proporcionar localizaciones de posición con precisión de unas pocas decenas de metros en el caso más desfavorable; en general, la precisión en el tiempo está dentro del margen de ± 250 ns. La medición con un satélite adicional y una segunda posición en tierra conseguirá mejorar la precisión, mediante diferentes lecturas, hasta un nivel de centímetros. Los receptores pueden integrarse fácilmente en un sistema móvil. Se pueden adquirir como módulos independientes, receptores portátiles alimentados por pilas, o tarjetas enchufables para buses informáticos de gran difusión comercial. Las antenas portátiles son extremadamente compactas y acanaladas, y pueden montarse con poco trabajo en el techo de los vehículos.

Muchos receptores comerciales proporcionan informaciones adicionales derivadas de los datos obtenidos por satélite, incluidas la elevación, la velocidad y la aceleración. Varios fabricantes también ofrecen opciones para la navegación por referencia geográfica. Para su utilización en sistemas móviles que incluyan una estación de trabajo informatizada, los receptores autónomos están equipados con una interfaz de datos adecuada para el computador. La información GPS se puede integrar a conjuntos de mapas informatizados (véase el § 6.2) para poder visualizar en tiempo real la posición de un vehículo mientras éste se halla en movimiento.

La precisión y la captura de las señales pueden representar un problema cuando el GPS se utiliza en aplicaciones móviles. Cuando se miden microcélulas en zonas edificadas y zonas de tráfico peatonal se necesita una precisión de posicionamiento muy superior. La captura de las señales de satélites plantea problemas en zonas urbanas, dentro de edificios y en otras zonas con obstrucciones considerables que oscurezcan la recepción. En tales casos, es preciso utilizar otra técnica para determinar la posición.

6.1.1.4 Mejora de la precisión

Es posible mejorar la precisión de los sistemas RNSS mediante la combinación de sistemas como los altímetros y los sistemas de navegación inercial, así como con técnicas que facilita el propio sistema (GPS diferencial para el NAVSTAR, GPS+GLONASS para el GLONASS, etc.).

6.1.2 NAVSTAR GPS

6.1.2.1 Descripción de sistema

Los 24 satélites GPS que describen órbitas a muy elevada altitud proporcionan a la vez información de posición y de tiempo a usuarios de todo el mundo por medio de señales sincronizadas. La medición de esas señales desde al menos tres satélites distintos hace posible calcular la posición de la estación terrena receptora. La constelación GPS ofrece al usuario hasta ocho satélites visibles desde cualquier punto de la superficie terrestre.

La navegación en tres dimensiones constituye la función primordial del GPS. Es posible conseguir un posicionamiento preciso utilizando receptores GPS emplazados en puntos de referencia que proporcionan correcciones (GPS diferencial) y datos de posicionamiento relativos para receptores distantes. La difusión de señales horarias y de frecuencia, basada en los exactos relojes que llevan a bordo los satélites y controlada por las estaciones de vigilancia, es otra función del GPS. Las instalaciones de telecomunicación y los patrones de referencia en laboratorios pueden ajustarse a señales horarias precisas o ser controladas en las frecuencias exactas por medio de receptores especiales para GPS.

6.1.2.2 Calidad de funcionamiento del sistema

El GPS ofrece dos niveles de navegación: el servicio de posicionamiento preciso (*Precise Positioning Service* – PPS) y el servicio de posicionamiento normalizado (*Standard Positioning Service* – SPS). Los usuarios civiles de todo el mundo utilizan el GPS gratuitamente y sin restricción alguna (véase el Cuadro 6-1).

La mayoría de los receptores son capaces de recibir y utilizar la señal SPS. La precisión del SPS fue degradada deliberadamente por el Departamento de Defensa (DoD) de EE. UU. mediante el uso de la disponibilidad selectiva (*Selective Availability* - SA). Pero la aplicación de la SA finalizó el 1 de mayo de 2000, y los EE. UU. no tienen intenciones de volverla a utilizar

CUADRO 6.1-1

Precisiones del GPS

Precisiones predecibles (sin SA)	Servicio de posicionamiento normalizado (SPS)
Precisión horizontal (95%)	22 m
Precisión vertical (95%)	33 m
Precisión en el tiempo (95% respecto de la UTC)	200 ns

Los fabricantes de receptores pueden utilizar otras medidas de precisión (RMS, CEP -*Circular Error Probable*-, SEP- *Spherical Error Probable*-, con o sin SA) distintas de las mencionadas. De ahí que, atendiendo a los datos técnicos que proclaman, algunos receptores parezcan tener mayor precisión que los especificados por suministradores más responsables, cuyas medidas de error son más conservadoras

6.1.3 GLONASS

6.1.3.1 Panorama general

Una constelación GLONASS en su plena extensión se compone de 24 satélites dispuestos en tres planos orbitales. Estos satélites proporcionan dos tipos de señales de navegación: señal de alta precisión y señal de precisión normalizada. Las señales de alta precisión se destinan fundamentalmente al uso exclusivo de los usuarios autorizados, y se transmiten a la vez en las subbandas L1 y L2 para garantizar que se corrigen los errores ionosféricos de medición. El acceso a las señales de precisión normalizada en la subbanda de frecuencias L1 está abierto a todos los usuarios con carácter gratuito. Los valores dados en el Cuadro 6-2 para señales GLONASS de precisión normalizada pueden mejorarse notablemente utilizando el modo de navegación diferencial y/o técnicas de medición especiales complementarias.

CUADRO 6.1-2

Precisión prevista del sistema GLONASS

Precisión prevista	GLONASS
Precisión horizontal (95%)	28 m
Precisión vertical (95%)	60 m
Precisión en tiempo (95%)	700 ns
Vector de velocidad	15 cm/s

6.1.3.2 Características de la utilización combinada de GLONASS y GPS

El segmento de usuario de los sistemas GPS y GLONASS comprende antenas y receptores provistos de facilidades de procesamiento en las que se realiza la recepción de la señal y se elabora la solución de navegación para dar información a los usuarios sobre la posición, velocidad y hora exacta. Los satélites transmiten una señal de sincronización seudoaleatoria y un mensaje de navegación, que contiene parámetros de las órbitas de cada satélite (efemérides). El receptor utiliza los datos de las efemérides para determinar la posición del satélite. La adquisición de las posiciones exactas de cuatro satélites permite al receptor determinar su propia posición en tres dimensiones más el tiempo.

Los métodos modernos de procesamiento digital de señales permiten procesar las señales GPS y GLONASS utilizando la misma arquitectura del receptor, pese a las diferencias señaladas en el Cuadro 6.1-3. Las gamas de frecuencias de los sistemas GPS y GLONASS están próximas, por lo que puede utilizarse una combinación de antena y preamplificador de entrada común en el equipo de usuario. Con un diseño óptimo y soporte lógico adecuado para el procesamiento de las señales se podría construir un receptor combinado a un precio apenas superior al de un receptor GPS o GLONASS. Las diferencias en la información de efemérides y la representación de almanaque de los sistemas GPS y GLONASS no suponen un obstáculo para el funcionamiento del equipo de usuario. La programación del procesador de navegación proporciona las correcciones pertinentes y permite el procesamiento de ambos flujos de datos.

El equipo de usuario, la parte más flexible de todo el sistema, se sigue mejorando continuamente. En el momento actual, la mayoría de los receptores son multicanal, capaces del seguimiento simultáneo de las seudodistancias y seudovelocidades de cierto número de satélites visibles. Por consiguiente, estos equipos proporcionan la máxima precisión e integridad a las observaciones de navegación.

Los avances tecnológicos en la esfera del procesamiento digital de señales han conducido a un grado de integración muy elevado, que ya permite la conversión discreta y el tratamiento digital de las señales de satélite en una etapa próxima a la entrada del paso preamplificador.

La utilización conjunta de los sistemas GLONASS y GPS ofrece notables ventajas con respecto a la utilización separada de cada uno de ellos:

*Aumento de la disponibilidad***:** Cuando se ha de funcionar con obstrucciones tales como terrenos montañosos o «desfiladeros» urbanos, la duplicación del número de satélites disponibles suele constituir una solución válida frente a la carencia de soluciones propia de los receptores exclusivos de GPS o de GLONASS.

*Mejora de la precisión***:** El mayor número de satélites normalmente da lugar a una mejor disposición geométrica de usuario a satélite.

*Más rápida activación***:** Cuando el receptor carece en absoluto de información sobre posición y tiempo, la probabilidad de adquisición de un satélite aumenta al crecer el número de satélites visibles, reduciendo por tanto el tiempo de adquisición.

*Sólida integridad del sistema***:** La capacidad de detectar y aislar un satélite de funcionamiento anómalo se refuerza considerablemente al haber un mayor número de satélites visibles. Además, la confianza en dos sistemas independientes proporciona un nivel suplementario de integridad frente a una anomalía funcional del sistema entero.

Hay en el mercado equipos que utilizan simultáneamente las señales de los satélites de navegación de los sistemas GPS y GLONASS para exámenes topográficos y geodésicos en tierra, mar y aire.

Cuando funcionan en un modo diferencial, estos equipos garantizan el posicionamiento geodésico de las estaciones terrenas con una precisión de $1\text{-}3\ \text{cm} + 10^{-6}\ L$ ($L = 1000$ km), siendo L la distancia entre estaciones geodésicas, coches, aviones o barcos.

6.1.3.3 Características de GPS y GLONASS

Las características de los sistemas GPS y GLONASS se reseñan en el Cuadro 6.1-3.

CUADRO 6.1-3

Comparación entre GPS, GLONASS y GPS +GLONASS

Parámetros	GLONASS	GPS
Método de presentación de la información de las efemérides	Coordenadas ECEF y sus derivadas de primer y segundo orden	Los elementos de órbitas de Kepler modificados
Sistema de coordenadas geodésicas	PZ-90	WGS-84
Correcciones horarias en relación con la hora universal (UTC)	UTC (SU)	UTC (USNO)
Número de satélites en el sistema (totalmente operativos)	24	21 + 3 de reserva
Número de planos orbitales	3	6
Inclinación orbital	64,8º	55º
Altitud de la órbita	19 100 km	20 180 km
Periodo orbital	11 h 15 min	12 h
Método de división de las señales de satélite	AMDF	AMDC
Banda de frecuencias L1 (MHz)	1601,489 – 1609,8235 (1597,5515 – 1605,886)*	1575,42 ± 1,023 MHz
Banda de frecuencias L2 (MHz)	1245,489 – 1252,1985 (1242,4265 – 1249,136)*	1227,6 ± 1,023 MHz
Duración de la transmisión de almanaque	2,5 minutos	12,5 minutos
Capacidad de la supertrama	7500 bits (5 tramas)	37500 bits (25 tramas)
Longitud de la trama	30 segundos	30 segundos
Periodo de repetición del código de sincronización	2 segundos	6 segundos
Nivel de diafonía entre dos canales contiguos	–48 dB	–21 dB
Frecuencia de segmentos en código C/A	0,511 MHz	1,023 MHz
Longitud de código C/A (símbolos)	511	1023
Tipo de código C/A	Secuencia de ruido seudoaleatorio de duración máxima	Código de Gold
Modulación	MDPB	MDPB
Velocidad de datos de navegación	50 bit/s	50 bit/s

* *Hasta 2005 y más allá (entre paréntesis).*

CUADRO 6.1-3 (*fin*)

Parámetros de precisión (normalizados al 95%)	GLONASS	GPS**	GPS+GLONASS
Horizontal	28 m	22 m	20 m
Vertical	40 m	33 m	30 m
Velocidad	15 cm/s	0,5 m/s	5 cm/s
Tiempo	0,7 μs	0,20 μs	0,25 μs

** *Los valores del GPS se basan en SPS sin SA.*

Bibliografía

GLONASS ICD[1998] Global Navigation Satellite System GLONASS. Interface Control Document (4th edition), Moscú.

ICD-GPS-200C [12 abril, 2000] Global Positioning System. Interface Control Document.

Signal specification [2 junio, 1995] Global Positioning System, Standard Positioning Service, 2nd Edition.

Recomendaciones del UIT-R

NOTA – Siempre debe utilizarse la versión más actualizada de cada Recomendación.

Recomendación UIT-R TF.767 – Utilización de los sistemas globales de navegación por satélite para la transferencia de señales horarias de gran precisión.

6.2 Mapas

6.2.1 Utilización de mapas para las estaciones de comprobación técnica

Hoy día, los sistemas de información geográfica (SIG) son un componente esencial de los sistemas informatizados de gestión automatizada del espectro y comprobación técnica de las emisiones en el espectro. Su empleo es muy útil para los sistemas de comprobación técnica, que funcionan de modo autónomo o como parte de sistemas completos de gestión del espectro.

El SIG digital es muy útil por varias razones. La más evidente es que proporciona con rapidez y gran detalle una visión general de la situación geográfica de los objetos cuya comprobación técnica es importante, como pueden ser los emplazamientos de transmisores, autorizados o no, que figuran en la base de datos de gestión del espectro, los emplazamientos de estaciones de comprobación técnica fijas, las localizaciones de mediciones móviles, las localizaciones de estaciones transmisoras desconocidas estimadas por mediciones radiogoniométricas, además de otros varios. Es posible representar estos objetos en diferentes mapas, según las necesidades. Un mapa político puede ser útil para verificar si el objeto está situado en un cierto distrito o país, y un mapa de carreteras para comprobar que las mediciones se han tomado a lo largo de una ruta determinada o en la ciudad que se desea.

Al presentarse en mapas digitales estos objetos, el sistema de comprobación técnica puede acceder con gran rapidez y comodidad a sus características, incluidos los datos técnicos y administrativos más importantes merced a la conexión con la base de datos central del sistema de gestión del espectro.

Otro componente crucial de los sistemas informatizados de gestión del espectro y comprobación técnica del espectro es la predicción de la intensidad del campo de las estaciones transmisoras, calculada a partir de modelos de propagación de ondas adecuados. Los modelos más realistas requieren el acceso a datos geográficos de diferentes tipos, incluidos los topográficos, de aprovechamiento de tierras y a veces de otro género, con miras a garantizar un cálculo correcto. Estos datos geográficos suelen organizarse en diferentes capas dentro del SIG digital. Por consiguiente, la cartografía digital es la base esencial de la mayoría de los

cálculos de la propagación de ondas. (Véase además el § 6.4.) Pero la obtención de datos sobre el terreno es a menudo una tarea costosa.

Aunque estos cálculos sólo proporcionen una aproximación al conjunto de situaciones reales de emisión durante un largo periodo, es posible utilizarlos para simulaciones de cobertura, la identificación y el análisis de mediciones reales. Las mediciones de intensidad de campo y la localización de emisores son de la máxima importancia para comprobar si las emisiones de las estaciones transmisoras cumplen en todos los aspectos con los términos de su licencia.

Los cálculos de la propagación de ondas dependen marcadamente de la calidad de sus datos de entrada. La correcta elección de la resolución de la capa cartográfica utilizada es, en todos los cálculos, una tarea sustancial. La principal relación a tener en cuenta es la que mantiene la resolución de la capa utilizada con la frecuencia y la potencia de transmisión consideradas. En el caso típico, la resolución debe ser mayor cuando la frecuencia aumenta y la potencia disminuye. La resolución necesaria guarda relación con la distancia a que se emite; cuanto menor sea ésta mejor habrá de ser la resolución; también depende de otros parámetros como los del servicio radioeléctrico o la zona geográfica que se investiga. Por ejemplo, en una zona montañosa los cálculos habrían de basarse en datos de alta resolución, mientras que en terreno llano basta con una resolución más baja. La resolución a utilizar también estará afectada por el costo y la disponibilidad de datos digitales y de los programas informáticos que utilicen tales datos.

6.2.2 Fuentes de datos digitales

Pueden obtenerse datos topográficos digitales en formatos muy variados de numerosas fuentes, la mayoría de las veces organismos gubernamentales o diferentes administraciones. Existe una sola base de datos topográficos unificada para la mayor parte del mundo [GLOBE, 2001]. El programa GLOBE es un fichero de datos topográficos con cobertura prácticamente mundial.

Las fuentes más corrientes de generación de datos geográficos digitales son los tradicionales mapas en papel, las imágenes tomadas por satélite y la fotografía aérea. Hoy día se han introducido en el mercado nuevas tecnologías como la «exploración por láser», que permiten una generación más automática del modelo topográfico digital (*Digital Terrain Model* – DTM). En casi todo el mundo pueden encontrarse DTM de 100 m o 200 m y datos de señales parásitas derivados de mapas en papel convencionales. Debido a las microcélulas resultantes de la planificación celular en RF y a las nuevas tecnologías de radiocomunicaciones como UMTS y CDMA2000 hoy se necesitan datos mucho más exactos. Los DTM creados a partir de mapas de papel van siendo poco a poco reemplazados por los DTM de 10 m, 5 m e incluso de 1 m obtenidos de imágenes por satélite, fotografía aérea o exploración por láser.

Las fuentes de datos útiles deben satisfacer las siguientes condiciones:

Disponibilidad: Se ha de comprobar que la fuente de datos no esté protegida por derechos de autor ni clasificada por autoridades civiles o militares.

Calidad y densidad de información: Los tipos de información solicitados que contiene la fuente de datos no siempre responden a las necesidades del usuario. Por añadidura, en ciertos países la precisión y fiabilidad de los mapas no alcanza los niveles corrientemente exigidos.

Puesta al día de la información: En numerosos países y para muchos tipos de fuentes de datos, puede transcurrir un periodo muy largo entre actualizaciones, lo que repercute especialmente en la fiabilidad de las capas de aprovechamiento de tierras y en las características lineales. Por el contrario, los valores de la elevación, tales como los necesarios para compilar un DTM, permanecen fiables durante un largo periodo (si no hay movimientos sísmicos).

6.2.2.1 Mapas en papel (impresos)

La información representada en un mapa de papel tradicional puede digitalizarse para conseguir una base de datos geográficos. Es posible interpolar los DTM a partir de los contornos digitalizados. Los mapas de aprovechamiento de tierras y las características lineales (vectores) pueden extraerse mediante la exploración de los mapas y la posterior conversión de los datos de la cuadrícula en información vectorial.

El Cuadro 6.2-1 proporciona información sobre la precisión que puede lograrse en datos topográficos digitalizados a partir de mapas clásicos en papel, para diferentes escalas.

En la actualidad, la exploración de mapas es a la vez el modo más económico y más rápido de elaborar bases de datos geográficos de mediana precisión sobre grandes superficies. Se pueden encontrar mapas a 1:200000 o aún mayores para casi todas las partes del mundo. Normalmente es posible conseguirlos y explorarlos sin demasiados problemas. Por lo general, la información disponible a estas escalas tiene fiabilidad suficiente para las necesidades del servicio.

La resolución depende de la escala del mapa y puede estimarse mediante la sencilla regla siguiente: 1 mm en el mapa es una resolución que el ojo humano normal puede apreciar. Así pues, para un mapa en papel de escala 1:50 000 se puede lograr una resolución del DTM de 50 m, y si la escala es 1:250 000 la resolución será de 250 m

La precisión en el plano XY está determinada principalmente por el grosor de las líneas que representan curvas de nivel en el mapa, mientras que en elevación (dirección Z) está marcada por el número de curvas presentes en unidad de superficie y por el tipo de superficie.

CUADRO 6.2-1

Precisión típica alcanzable en mapas de diferentes escalas

Escala del mapa	XY (m)	Z – Zona llana (m)	Z – zona montañosa (m)
1:25 000	10	2.5	10
1:50 000	20	7	10
1:100 000	40	10	20
1:200 000	80	20	40
1:250 000	100	25	50
1:500 000	250	60	150

6.2.2.2 Obtención de imágenes por satélite, fotografía aérea y exploración por láser

Los satélites de observación óptica de la Tierra transportan instrumentos pasivos destinados a medir el brillo, o radiometría, de la superficie terrestre a diferentes longitudes de onda «ópticas». El satélite se caracteriza por sus instrumentos de control orbital y toma de imágenes, lo que define la resolución del sistema. La mayoría de los satélites de observación terrestre están situados en una órbita heliosíncrona, a una altitud aproximada de 800 km. Ello les permite obtener imágenes de prácticamente cualquier punto de la superficie terrestre (si no se interponen capas de nubes), abarcando miles de kilómetros cuadrados, y pasar sobre cualquier localización determinada a intervalos de tiempo regulares.

El principal inconveniente de los datos tomados por el satélite óptico es su limitada resolución. Los instrumentos de formación de imágenes y los sensores que transportan los satélites civiles actuales no pueden adquirir imágenes de resolución muy elevada en las órbitas heliosíncronas. Además, por ser instrumentos ópticos, son incapaces de «ver» a través de nubes, nieblas o brumas.

En el Cuadro 6.2-2 se enumeran varios satélites ópticos comercialmente disponibles.

CUADRO 6.2-2

Algunos satélites ópticos en órbita

Satélite	Propietario	Sensor	Resolución (m)	Tamaño de imagen (km)
Landsat	Space Imaging Corporation	TM	30 (MS)	185
Landsat-7	Space Imaging Corporation	ETM	30 (MS) 15 (PAN)	185
		HRMSI	10 (MS) 5 (PAN)	60
SPOT	CNES (Centre National d'Etudes Spatiales)	HRV	20 (MS) 10 (PAN)	60
JERS-1	NASDA (National Space Developing Agency)	ADEOS	16 (MS) 8 (PAN)	75
IRS-1C		LISS-III	23	70
		PAN	5.8	70

Ejemplos de satélites en órbita (MS – Sensor multiespectral; PAN – sensor pancromático).

La fotografía aérea se convierte en una fuente de datos cada vez más importante para la generación de modelos de elevación digital (DEM) de alta resolución; se utiliza generalmente en la preparación de mapas tradicionales.

La fotografía aérea es particularmente útil con niveles de resolución y precisión que sobrepasan las capacidades de los sensores a bordo de satélites, actualmente al alcance de usuarios del sector civil. El punto de partida son las fotografías aéreas a escalas que van de 1:10 000 a 1:30 000. Una superposición generosa entre los fotogramas adyacentes da lugar a pares estereoscópicos de imágenes. Estas fotografías se digitalizan utilizando escáneres de precisión para obtener imágenes digitales con resoluciones comprendidas entre pocos decímetros y 1 o 2 metros. Estas imágenes son aptas para ser procesadas en una línea de producción digital que entregue toda una gama de productos, desde fotografías ortogonales, DTM, DEM y datos de edificaciones hasta mapas de aprovechamiento de tierras e información vectorial. El principal inconveniente de estas fotografías es su escasez. De muchas regiones de interés no existen fotografías aéreas actualizadas, y, en caso de haberlas, a menudo tienen carácter confidencial. Además, por ser relativamente pequeña la zona cubierta por cada fotograma, el usuario tiene que comprar y procesar un gran número de fotografías, lo que encarece notablemente el proyecto.

El proceso de exploración por láser permite crear un DEM con un alto grado de automatización. El sistema correspondiente radica en aeronaves, e incorpora un sistema GPS diferencial así como un sistema inercial para medir la aceleración y el cambio de orientación de la plataforma del sensor. Este equipo permite determinar la trayectoria del avión con una precisión próxima a los 2 cm. El sistema real de exploración por láser garantiza una medición muy precisa de las distancias (error de 1 cm) de la plataforma al objeto y a la superficie terrestre, para lo cual utiliza la reflectometría por impulsos de láser. En consecuencia, la integración de los tres sensores permite una medición muy precisa de la superficie del terreno.

En resumen, el Cuadro 6.2-3 ofrece una panorámica de las diversas fuentes de datos y la resolución horizontal que puede alcanzarse con cada una de ellas.

CUADRO 6.2-3

Panorámica general de varias Fuentes de datos

Fuente de datos	Tipo de datos	Resolución alcanzable (m)
Mapas en papel. Escala: 1:20000 – 1:500000	Mapa de carreteras	2-100
	Modelo topográfico digital, ecos parásitos	10-200
Imágenes tomadas por satélite	Imagen	1-50
	Modelo de elevación digital, ecos parásitos	5-50
Fotografía aérea	Fotografía	0.5-5
	Modelo de elevación digital, edificios, ecos parásitos	1-5
Exploración por láser	Fotografía	0.5-5
	Modelo de elevación digital, edificios, ecos parásitos	1-5

6.2.3 Tipos de datos para mapas digitales

Existen diversos modelos de propagación de ondas para gamas de frecuencia y servicios particulares que difieren sustancialmente por su complejidad; en el § 6.4 se da más información sobre la propagación. La superficie terrestre y la atmósfera influyen poderosamente en la propagación de las ondas electromagnéticas. Dependiendo del modelo elegido, los cálculos utilizan diferentes tipos de datos para elaborar modelos de las propiedades de la superficie terrestre:

– mapas geográficos, mapas de carreteras y fotografías con referencia geográfica;
– modelo topográfico digital (DTM);
– datos de edificios y modelo de elevación digital (DEM);
– datos de señales parásitas;
– mapa mundial digitalizado de la UIT (IDWM).

A estos datos se les ha de asignar referencia geográfica como a los mapas digitales habituales por medio de un sistema adecuado de coordenadas cartográficas. Forman parte del SIG como capas específicas para visualizar las correspondientes características de la superficie terrestre y proporcionar acceso a los datos utilizados en los cálculos de la propagación de ondas.

Por medio de un taller de datos cartográficos la administración misma puede elaborar los mapas digitalizados que utiliza el sistema de gestión y comprobación técnica del espectro, e integrar esos mapas en el sistema. El taller puede servir también para producir o actualizar los datos cartográficos.

Por lo general, la mayor parte de estos datos topográficos digitales se presentan en dos formatos:

– *Datos vectoriales (datos en línea):* La información geográfica se almacena en polígonos que siguen un trazado lineal (carreteras, vías férreas, curvas de nivel, etc.) o rodean zonas de una misma característica (fronteras políticas, lagos, términos municipales, contornos de bosques). A la información geográfica pueden añadirse otras, como el número de habitantes, su clasificación por edades y niveles de renta, y los nombres de calles o de ciudades. Generalmente se necesita menos memoria en el disco duro para almacenar la información en formato vectorial que en formato cuadriculado. Pero, en cambio, se tarda más tiempo en obtener información sobre determinado lugar, por ejemplo, la altura exacta del terreno en un punto situado entre varias curvas de nivel. Para ello primeramente habría que interpolar esa altura entre las curvas de nivel adyacentes. Es posible añadir capas de información para obtener los datos requeridos.

– *Datos cuadriculados (en retícula):* La zona se divide en rectángulos uniformemente separados, del mismo tamaño. Ese tamaño se denomina resolución horizontal. En cada uno de los rectángulos se almacena un tipo de información. Ésta puede ser la altura del terreno, la clase de señal parásita, el número de residentes dentro del área del rectángulo, o simplemente la información gráfica de una fotografía o de un mapa en papel digitalizado. Si para esa zona rectangular hubiera que almacenar informaciones de varios tipos, sería preciso generar una capa de cuadrícula para cada clase de información. La información en datos cuadriculados necesita generalmente más memoria en el disco duro que si estuviera en formato vectorial, pero en cambio tiene la ventaja de que el acceso a cada punto de la cuadrícula es muy rápido. La imagen tiene la apariencia de un mapa, pero se puede ajustar el enfoque para amplificar detalles como los nombres de pueblos o ríos.

En el Cuadro 6.2-4 se enumeran formatos comunes para el intercambio de ficheros de datos vectoriales y cuadriculados.

CUADRO 6.2-4

Formatos comunes de intercambio de datos para ficheros de datos vectoriales y raster

Tipo de datos	Formatos comunes de ficheros
Datos vectoriales	AutoCAD DXF / DWG, Esri ArcInfo E00, Esri ArcView Shape, MapInfo TAB, MapInfo MIF / MID (ASCII Export Format), Microstation DGN, SDTS, TIGER, VPF
Datos cuadriculados – Formatos de imagen	BMP, GIF, JPG, TIFF, GeoTIFF
Datos cuadriculados – Formatos de datos topográficos	ASCII Grid, ASCII XY Value, BIL, BIP, BSQ, DTED, ESRI Generic Binary, Planet

6.2.3.1 Mapas políticos, mapas de carreteras y fotografías con referencia geográfica

Pueden utilizarse mapas políticos y mapas de carreteras para presentar posiciones de emplazamiento, zonas de cobertura y haces directivos de estaciones transmisoras o de comprobación técnica. Los mapas políticos generalmente muestran las estaciones transmisoras y de comprobación en zonas más extensas. Los mapas de carreteras de diferentes resoluciones pueden ayudar a identificar las localizaciones de estaciones de transmisión conocidas y desconocidas. Las fotografías aéreas o las imágenes de satélite proporcionan una visión actualizada de la zona de interés y ayudan a identificar las superficies u obstáculos que producen reflexiones.

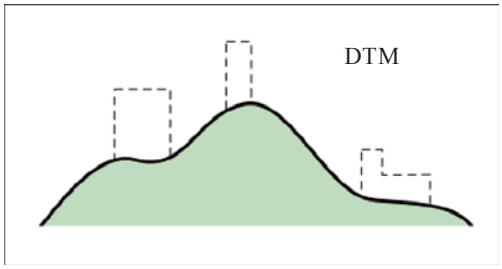
6.2.3.2 Modelo topográfico digital

El modelo topográfico digital (DTM) representa la superficie de la Tierra en formato cuadriculado o vectorial, suministrando la altitud sobre el nivel medio del mar de cada punto del área representada. En este modelo no se incluye la elevación sobre el suelo de edificios, árboles u otros objetos. La resolución del DTM viene dada por la resolución en el plano XY y la resolución en altitud. La resolución requerida depende de la gama de funcionamiento, es decir, de la banda de frecuencias examinada, la potencia, la zona de interés, los servicios que se analizan y los modelos de propagación utilizados.

Las resoluciones típicas en un mapa van desde 1 km en dirección horizontal combinada con 100 m en altitud hasta 1 m en el plano XY junto con 0,1 m en vertical. Los modelos de propagación muy refinados y la planificación de microcélulas en radiofrecuencia requieren una precisión aún más elevada, que hoy no puede alcanzarse. Una buena resolución para el análisis técnico común es un mapa con píxeles de 100 m^2 y resolución vertical de 10 m. La Fig. 6.2-1 representa el mapa digital de un terreno sin edificios, árboles, etc.

FIGURA 6.2-1

DTM: Superficie terrestre sin casas, árboles ni otros objetos



Spectrum-6.2-01

6.2.3.3 Datos de edificación y modelo de elevación digital

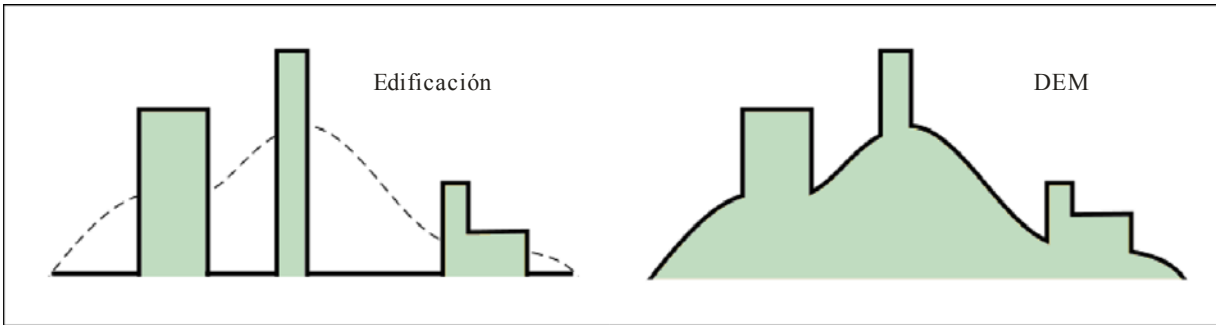
Los datos de edificación típicamente incorporan la altura de los edificios a la superficie terrestre. Estos datos se utilizan a menudo para verificaciones de visibilidad directa en la planificación de enlaces de microondas y de punto a multipunto (PMP). Las resoluciones típicas caen dentro del margen de 1 a 10 m, pero no sobrepasan el tamaño de los objetos.

Los datos de edificación se almacenan en formato vectorial o cuadriculado. Se prefiere el formato vectorial para simulaciones tridimensionales de zonas urbanas. Comparados con los datos en cuadrícula, los de formato vectorial pueden contener más detalles, tales como los tejados de las casas. Esta información necesita actualizarse más a menudo que la de un DTM, puesto que los edificios y su altura sufren más cambios que el nivel del terreno sobre el mar.

El modelo de elevación digital (DEM) puede combinar el modelo topográfico digital con los datos de edificación. Muestra la superficie del terreno con la altura de los edificios, y además representa la superficie terrestre en altura. Los DEM se utilizan a efectos de planificación de microcélulas, enlaces de microondas y enlaces de punto a multipunto, mientras que los SIG dan instrumentos para verificaciones de visibilidad directa y cálculos de intensidad de campo. Las resoluciones típicas de los DEM se sitúan entre 1 m y 25 m. La Fig. 6.2-2 representa los datos de edificación: superficie de la Tierra más altura de edificios.

FIGURA 6.2-2

DEM: Superficie terrestre más altura de edificación



Spectrum-6.2-02

6.2.3.4 Datos parásitos

Los datos parásitos, también llamados de aprovechamiento de tierras, morfológicos, de cobertura de tierras o de ocupación del terreno, contienen información clasificatoria de los elementos perturbadores (clasificación del UIT-R), como por ejemplo suelo mineral desnudo, campos o tierra cultivada, bosques, agua, zonas

urbanas densas, dispersas o mixtas. La información puede darse en forma vectorial (suministrando superficies poligonales de puntos de la misma clase, por ejemplo, lago, bosque, contorno de ciudad), pero el formato en cuadrícula resulta más conveniente para los modelos de propagación. En este último caso, el mapa de datos parásitos representa, o bien datos cualitativos sobre qué elemento (ciudad, suburbio, bosque, agua) existe en cada píxel, o bien valores cuantitativos tales como la densidad de vegetación o la densidad de edificación (con o sin altura). Los modelos de propagación pueden hacer uso de estos mapas de datos parásitos. Ciertos modelos de predicción de intensidad de campo, como los de Okumura-Hata y Walfish Ikegami requieren añadir los datos parásitos a los del DTM para mejorar la precisión de sus predicciones. Las resoluciones corrientes de los mapas de datos parásitos se sitúan entre 10 m y 100 m.

6.2.3.5 Mapa mundial digitalizado de la UIT

Este mapa (IDWM) se ha desarrollado con miras a integrar los necesarios datos geográficos, políticos, meteorológicos y técnicos, que dependen de las coordenadas geográficas de lugares y zonas. La información que contiene es muy útil para una extensa gama de tareas de cálculo. El IDWM consta de dos partes: base de datos y biblioteca de subrutinas. La base de datos IDWM contiene: datos geográficos (tales como costas, mares, islas y lagos), datos políticos (fronteras de países y regiones, por ejemplo), datos climáticos para las zonas hidrometeorológicas y datos técnicos como las zonas de conductividad del suelo y las zonas de ruido. Además, el IDWM proporciona una biblioteca de subrutinas que ofrece una larga serie de funciones para aprovechar plenamente la mencionada base de datos, tales como la determinación de la región, país, zona hidrometeorológica, etc., que corresponden a un punto dado, el cálculo de la distancia desde un determinado punto a la costa o la frontera del país para un acimut dado, el cálculo de la distancia y el acimut desde un cierto punto a la costa o a la frontera más próxima, amén de varias otras funciones. El IDWM está incluido en la mayoría de los paquetes de soporte lógico que ofrece la UIT; por ejemplo, la Circular Internacional de Información sobre Frecuencias de la oficina de radiocomunicaciones, publicada quincenalmente, muestra en un mapa las estaciones registradas.

6.2.3.6 Servicios de mapas en la Web

Una alternativa interesante es utilizar servicios de mapas en la web. Dichos servicios permiten crear mapas mundiales por superimposición de imágenes obtenidas por satélites, fotografías aéreas e información de los sistemas de información geográfica (SIG). La mayoría de las zonas terrestres están cubiertas por imágenes captadas por satélites con una resolución de unos 15 m por píxel o incluso mejor.

Los mapas digitales proporcionan facilidades tales como:

– Aproximación o alejamiento rápido del mapa.
– Medición de distancias y direcciones.
– Utilización de distintos tipos de coordenadas.

Nótese que la utilización de servicios de mapas web pueden requerir que los usuarios, gubernamentales o comerciales, dispongan del correspondiente contrato y licencia, aunque su utilización pueda ser gratuita para usuarios privados.

6.2.4 Resolución de los mapas para cálculos de propagación de ondas

Para los cálculos de propagación de las ondas se necesita, en todos los tipos de capas de datos de un mapa, una resolución que depende de los parámetros siguientes:

– el terreno;
– la frecuencia y la potencia de emisión que definen el margen de funcionamiento;
– el tipo de servicio.

La resolución de los datos del mapa debe ser suficiente para tener en cuenta variaciones apreciables del terreno. De lo contrario se corre el riesgo de perder datos importantes, lo que podría producir resultados totalmente erróneos en los cálculos. Los cálculos particulares exigen conocer las variaciones de los datos del mapa con un nivel de detalle que depende de la longitud de onda de la emisión. Una regla sencilla es que los detalles de menor dimensión que la longitud de onda no afectan mucho a la emisión. El Cuadro 6.2-5 presenta una panorámica aproximada de las resoluciones del mapa requeridas para los cálculos en las

diversas gamas de frecuencias. El perfil del terreno es más importante para las frecuencias superiores a la banda de ondas decimétricas (30 MHz), es decir, longitudes de onda inferiores a 10 m.

Por encima de 5 a 10 GHz, no se establece correctamente la comunicación cuando no existe visibilidad directa entre emisor y receptor; la precisión del modelo DTM es por tanto más importante para calcular la señal recibida que los modelos de propagación utilizados.

CUADRO 6.2-5

Resolución de los mapas para las diversas gamas de frecuencias

Banda	Gama de frecuencias	Longitud de onda	Alcance de emisión aproximado	Resolución sugerida del mapa de datos
Miriamétricas (VLF)	3-30 kHz	100000-10000 m	varios miles de km	1 km
Kilométricas (LF)	30-300 kHz	10000-1000 m	varios miles de km	1 km
Hectométricas (MF)	0,3-3 MHz	1000-100 m	pocos miles de km	1 km
Decamétricas (HF)	3-30 MHz	100-10 m	pocos miles de km	1 km
Métricas (VHF)	30-300 MHz	10-1 m	hasta 1000 km	~ 1 km
Decimétricas (UHF)	0,3-3 GHz	1-0,1 m	hasta 100 km	~ 100 m
Centimétricas (SHF)	3-30 GHz	0,1-0,01 m	hasta 30 km	~ 10 m
Milimétricas (EHF)	30-300 GHz	0,01-0,001 m	hasta 20 km	~ 1 m

6.2.5 Sistemas de coordenadas

Se utilizan dos sistemas de coordenadas para definir mapas de interés en cuanto a la gestión y comprobación técnica del espectro. Las coordenadas esféricas se emplean para definir mapas que intentan reproducir la superficie esférica de la Tierra en láminas planas. En los sistemas de coordenadas más corrientes se utilizan líneas de latitud y longitud que se «proyectan» desde la superficie esférica a una superficie plana, aplicando diversas proyecciones para conseguir resultados diferentes. En los sistemas de coordenadas esféricas, las principales cuestiones a resolver mediante las aplicaciones de los SIG se refieren a objetos y fenómenos en la superficie terrestre, con la atmósfera encima y las masas de tierra debajo. Se necesita conocer la posición exacta sobre el mapa, así como la referencia a la superficie terrestre para examinar la relación entre estos objetos. Por consiguiente, hay que encontrar un procedimiento para representar una parte de la superficie tridimensional de la Tierra en un mapa bidimensional.

El método básico es el siguiente:

– Primero, la forma de la Tierra se aproxima mediante una esfera o un elipsoide. Su forma y orientación en el espacio vienen descrita por el llamado punto de referencia geodésico: conjunto de valores de referencia en el que debe basarse un sistema de coordenadas (véase la Nota 1).

– En segundo lugar, una parte de ese objeto tridimensional se traslada a un plano bidimensional que se denomina mapa.

NOTA 1 – Para la coordinación internacional se recomienda el dato WGS 84, basado en el geoide de referencia GRS 80.

Esta transformación se realiza por medio de la proyección del mapa. La combinación de la proyección del mapa con el punto de referencia forma un sistema de coordenadas que describe plenamente el procedimiento completo. Con diversos modelos elipsoidales de la Tierra se emplean diversos sistemas de coordenadas cartográficos para la definición de localizaciones geográficas en los mapas. Normalmente estas proyecciones son especialmente adecuadas sólo para una zona limitada de la superficie terrestre.

En muchos casos, el operador de comprobación técnica puede elegir en su propio sistema entre diferentes tipos de mapas con distintas clases de coordenadas de latitud-longitud (grados. minutos. segundos) tales como UTM (sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator), Lambert, Mercator, etc.

El SIG debe hacer el intercambio entre todos los tipos de coordenadas diferentes. Normalmente, para ello utiliza un solo sistema de coordenadas como referencia interna y transforma a él todos los demás sistemas de coordenadas. Este mecanismo automatizado permite al operador utilizar toda clase de mapas sin tener en cuenta sus diferentes sistemas de coordenadas.

El sistema de coordenadas rectangulares se utiliza frecuentemente para zonas relativamente pequeñas, debido a la facilidad de trazado y de cálculo (separación en distancia, por ejemplo). En este caso, los errores cometidos por suponer plana la Tierra son aceptablemente pequeños. En el Cuadro 1 de la Recomendación UIT-R P.1058 se resumen las diferencias entre los sistemas de coordenadas.

CUADRO 6.2-6

Sistemas de coordenadas

Parámetro	Latitud-longitud	UTM	Otros sistemas
Aplicabilidad	Toda la Tierra	Mayor parte de la Tierra	Generalmente local
Forma de cuadrícula	Trapezoide curvilíneo	Buena aproximación a la proyección cuadrada	Generalmente buena aproximación a la proyección cuadrada
Variación del factor de escala	Varía con la latitud	Buena aproximación a un valor constante	Generalmente buena aproximación a un valor constante
Limitaciones	Ninguna	Según la longitud	Variables

Se ha de tener cuidado cuando se transfieren localizaciones entre mapas que utilizan sistemas de coordenadas diferentes. Existen varias referencias que presentan una clara descripción de estas y otras importantes proyecciones de mapa. Las siguientes referencias proporcionan buenas descripciones gráficas y la base matemática necesaria para su interpretación y conversión.

Referencias

GLOBE [2001] Un DTM de ámbito mundial con cuadrícula de 30 arcosegundos (1 km) y calidad controlada puede obtenerse de los NOAA National Data Centres a través de la página Web: http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/topo/globe.html.

Bibliografía

SNYDER, J. P. [1987] Map Projections, A Working Manual. U.S. Geological Survey Professional Paper 1395, United States Government Printing Office, Washington, Estados Unidos de América.

Institut Géographique National, 135 bis rue de Grenelle, Paris, Francia, http://www.ign.fr.

Recomendaciones y Resoluciones del UIT-R

NOTA – Siempre debe utilizarse la versión más actualizada de cada Recomendación.

Recomendación UIT-R P.1058 – Bases de datos topográficos digitales para estudios de propagación.

Resolución UIT-R 40 – Bases de datos mundiales sobre características de la superficie y altura del terreno.

6.3 Cálculo de la potencia isótropa radiada equivalente (p.i.r.e.)

6.3.1 Introducción y definición de la p.i.r.e.

La potencia isótropa radiada equivalente (p.i.r.e.) es un importante parámetro del emisor y es necesaria para determinar el alcance operacional, la zona de interferencia en RF con respecto a otros receptores, los riesgos en RF para el personal, equipos médicos, pertrechos y combustible. Así pues, es esencial que la estación de comprobación técnica pueda estimar la p.i.r.e. de un emisor. También es necesaria para calcular el nivel de potencia del transmisor y comparar la energía transmitida real con los datos de la licencia: máxima potencia y ganancia de antena permitidas. El cálculo de la p.i.r.e. es esencial para la comprobación técnica de las emisiones de vehículos espaciales (véase el § 5.1.2.4).

Según el número 1.161 del Reglamento de Radiocomunicaciones:

«la p.i.r.e. es el producto de la potencia suministrada a la antena por su ganancia con relación a una antena isótropa en una dirección dada (*ganancia isótropa o absoluta*).»

La p.i.r.e. se puede calcular por la siguiente fórmula:

$$p.i.r.e. = P_t + G_t - L \qquad \text{dBm} \tag{6.3-1}$$

donde:

P_t: potencia de salida del transmisor (dBm)

G_t: ganancia de la antena transmisora, en la dirección del receptor (dB) con respecto a una antena isótropa (dBi)

L: pérdidas en la línea de transmisión y de adaptación (dB).

En el caso de una antena transmisora omnidireccional, la p.i.r.e. es uniforme en todas las direcciones. Cuando se trata de una antena directiva, este valor depende en general del acimut y la elevación. Cuando la p.i.r.e. se expresa independientemente de la dirección, se refiere al valor máximo.

NOTA 1 - Un término similar, llamado potencia radiada aparente (p.r.a.) se utiliza a menudo en el mismo contexto de aplicación. Según el número 1.162 del Reglamento de Radiocomunicaciones, su definición es la siguiente:

«*potencia radiada aparente (p.r.a.)* (en una dirección dada): *el producto de la potencia suministrada a la antena por su ganancia con relación a un dipolo de media onda en una dirección dada*.»

Se emplea con frecuencia en las mediciones de EMC, en las que un equipo en prueba cuya emisión se ha medido utilizando una antena y un receptor, se sustituye por un dipolo en media longitud de onda y un generador de señal cuya potencia de salida se ajusta para dar la misma lectura en el monitor del receptor de medición que la que daba el equipo en prueba aludido. La potencia de entrada a un dipolo en media longitud de onda sin pérdidas es la p.r.a. que ha de medirse.

Generalmente la p.r.a. y la p.i.r.e. guardan la siguiente relación:

$$p.i.r.e. = p.r.a. + 2{,}1 \qquad \text{dBm} \tag{6.3-2}$$

6.3.2 Estimación de la p.i.r.e. usando mediciones de comprobación técnica

En una estación de comprobación técnica, el nivel de potencia recibida (P_r, en dBm) puede medirse a la entrada del receptor. Es frecuente que la impedancia de entrada del receptor sea de 50 ohmios, y que la potencia recibida se registre como una tensión (V_r, en dB(μV)) a través de 50 ohmios.

Para una resistencia de entrada de 50 ohmios, P_r y V_r están relacionadas por:

$$P_r \text{ (dBm)} = V_r \text{ (dB(μV))} - 107 \tag{6.3-3}$$

Para una resistencia de entrada de 75 ohmios, P_r y V_r están relacionadas por:

$$P_r \text{ (dBm)} = V_r(\text{dB}(\mu\text{V})) - 108{,}8 \qquad (6.3\text{-}4)$$

Cuando se conoce la pérdida de propagación, la p.i.r.e. del emisor puede calcularse a partir de P_r o de V_r, según se hayan determinado en la estación de comprobación técnica.

6.3.2.1 Cálculo de la p.i.r.e. a partir de la potencia recibida y la intensidad de campo

La p.i.r.e. del emisor puede calcularse a partir de la potencia recibida cuando se conocen la ganancia de antena, la pérdida de línea de transmisión en recepción, la pérdida de desadaptación de polarización y la pérdida de propagación, y además la medición se realiza en la dirección de máxima ganancia de la antena emisora:

$$p.i.r.e. = P_r - G_r + R_{loss} + X_{pol} + L_{prop} \qquad \text{dBm} \qquad (6.3\text{-}5)$$

siendo:

P_r: potencia medida de la señal en la entrada del receptor (dBm)

G_r: ganancia de la antena receptora en la dirección del transmisor que se comprueba (dBi)

R_{loss}: pérdidas de la línea de transmisión en recepción: pérdidas de cable, alimentación y desadaptación (dB)

X_{pol}: desadaptación de polarización (discriminación de las antenas de transmisión y recepción) (dB)

L_{prop}: pérdida de propagación (dB).

Se supone que la anchura de banda del receptor es mayor que la anchura de banda de emisión.

En el caso de la propagación en el espacio libre, la p.i.r.e. se puede calcular fácilmente. La pérdida de propagación en el espacio libre, L_{prop}, puede determinarse con la siguiente ecuación:

$$L_{prop} = 20 \log f + 20 \log d + 32.45 \qquad \text{dB}$$

siendo:

d: distancia entre el transmisor y el receptor (km)

f: frecuencia (MHz)

y

$$p.i.r.e. = P_r - G_r + R_{loss} + X_{pol} + 20 \log f + 20 \log d + 32{,}45 \qquad \text{dBm} \qquad (6.3\text{-}6)$$

En estas fórmulas se supone que se trata de propagación en el espacio libre y no se contemplan efectos tales como los debidos al terreno, los obstáculos, los efectos de conductos atmosféricos, etc. En otros casos, la pérdida de propagación se calcula utilizando modelos de propagación; véanse más detalles en § 6.4.

Antes de utilizar la fórmula correspondiente al espacio libre, es necesario verificar el perfil del trayecto para asegurarse de que existe un trayecto en espacio libre. Se puede considerar que un trayecto está en el espacio libre cuando ningún terreno se interpone dentro de la primera zona de Fresnel (o, de forma más conservadora, la tercera zona de Fresnel). La expresión que da el radio (r) de la tercera zona de Fresnel es

$$r = 30 * \sqrt{\frac{d_1\, d_2}{fd}} \qquad (6.3\text{-}7)$$

siendo:

d_1: distancia del obstáculo al transmisor (km)

d_2: distancia del obstáculo al receptor (km)

d: longitud total del trayecto (km)

f: frecuencia (GHz).

Como aplicación, para $d_1 = d_2 = d/2$, d = 10 km, f = 2,5 GHz, el radio de la tercera zona de Fresnel es igual a 30 metros; esto significa que para conseguir una señal propagada en el espacio libre, no puede haber edificios ni otros obstáculos que disten menos de 30 metros de la línea de visibilidad directa en la mitad del perfil. Si se requiere como protección el radio de la primera zona de Fresnel, la distancia mínima será de 17,32 metros.

El radio de la primera zona de Fresnel es igual al radio de la tercera zona de Fresnel dividido por 1,732 ($= \sqrt{3}$).

Para calcular la distancia máxima en visibilidad directa (LOS), es necesario considerar los efectos de la refracción atmosférica. Normalmente esto se realiza trazando el perfil del trayecto y utilizando un radio de la Tierra igual al radio real (6.370 km) multiplicado por un factor (k). En climas templados, el valor mediano de k es aproximadamente 4/3. En este caso se puede utilizar una fórmula relativamente sencilla para calcular la distancia al horizonte (d_{los}) sobre el mar, o sobre tierra lisa:

$$d_{los} = 4{,}1 \left(\sqrt{H_t} + \sqrt{H_r} \right) \text{ km}$$

siendo

H_t y H_r las alturas en metros sobre el suelo de las antenas del transmisor y del receptor, respectivamente.

Es posible relacionar la intensidad de campo con la tensión del receptor por medio de un factor de antena. Cuando esas cantidades se convierten a dB:

$$E = V_r + k_e \qquad \text{dB}(\mu\text{V/m}) \tag{6.3-8}$$

siendo:

V_r: la tensión medida en la entrada del receptor (dB(μV))

k_e: el factor de antena (dB/1/m m) = $-29{,}77 - G_r + 20 \log f$ (MHz).

Por tanto,

$$P_r = E \text{ (dB}(\mu\text{V/m))} - k_e - 107 \qquad \text{dBm}$$

y puede aplicarse la fórmula dada anteriormente:

$$p.i.r.e. = E - 20 \log f \text{ (MHz)} - 77{,}23 + R_{loss} + X_{pol} + L_{prop} \qquad \text{dBm} \tag{6.3-9}$$

Para la propagación en el espacio libre:

$$p.i.r.e. = E + R_{loss} + X_{pol} + 20 \log d \text{ (km)} - 44{,}78 \qquad \text{dBm} \tag{6.3-10}$$

Esta ecuación puede obtenerse directamente de la bien conocida expresión (véase la Recomendación UIT-R P.525):

$$E = 30 * \sqrt{\frac{p.i.r.e}{d}} \tag{6.3-11}$$

donde:

E (V/m), p.i.r.e. (W), distancia (m)

6.3.3 Influencia de la propagación

Los cambios de las condiciones de propagación influyen en los resultados obtenidos. La precisión de los mismos aumenta si se alarga el periodo de promediado de los datos medidos. La influencia de los efectos de la propagación aumenta con la distancia entre transmisor y receptor, y si no existe visibilidad directa (LOS) entre ellos. Asimismo, es importante el comportamiento de los transmisores en los canales adyacentes.

6.4 Modelos de propagación

Cuando las ondas radioeléctricas se propagan en un medio dieléctrico homogéneo ideal de extensión infinita, están sometidas a la propagación en el espacio libre. En tal situación, la propagación no está influida por la atmósfera ni por cualquier obstáculo del terreno. La potencia transmitida disminuye con el cuadrado de la distancia, y la pérdida de transmisión básica en el espacio libre viene dada por la fórmula siguiente (véase la Recomendación UIT-R P.525):

$$L\ (\text{dB}) = 20 \log f\ (\text{MHz}) + 20 \log d\ (\text{km}) + 32.45 \qquad (6.4\text{-}1)$$

En situaciones más comunes en la práctica, la propagación de las ondas entre transmisor y receptor suele estar influenciada por numerosos efectos diferentes que, a su vez, pueden degradar la calidad de la señal recibida. Tales efectos tienen su origen en:

– la atmósfera neutra o la ionosfera;

– el terreno, incluida la superficie terrestre, las irregularidades del suelo, los edificios y la vegetación.

Un buen método de predicción de la propagación es un valioso instrumento para evaluar la probabilidad de recibir una transmisión particular con una cierta potencia o intensidad de señal, en una localización determinada. La comparación entre los valores predichos y medidos proporcionará, a su vez, información útil a los efectos de comprobación técnica, como por ejemplo la identificación de niveles excesivamente elevados de la señal recibida. Estas comparaciones pueden efectuarse automáticamente en tiempo real, almacenando los valores predichos y medidos en bases de datos.

6.4.1 Efectos de la atmósfera

La atmósfera de la Tierra influye en la propagación de las ondas radioeléctricas. Es necesario distinguir entre los efectos debidos a la atmósfera neutra –la troposfera– y los debidos a la parte ionizada de la atmósfera, esto es, la ionosfera. La altura máxima de la troposfera varía desde unos 9 km sobre los polos a unos 17 km sobre el ecuador. La altura de la ionosfera va desde unos 50 km hasta aproximadamente 2000 km. Las propiedades de la troposfera son particularmente importantes para la propagación en frecuencias superiores a unos 30 MHz, y las de la ionosfera lo son para frecuencias por debajo de aproximadamente 30 MHz en trayectos terrenales. Debe, sin embargo, advertirse que pueden producirse efectos transionosféricos apreciables (en trayectos Tierra-espacio) a frecuencias que llegan hasta varios gigahertzios.

6.4.1.1 Efectos por debajo de unos 30 MHz

En general, a frecuencias comprendidas entre aproximadamente 9 kHz y 30 MHz se han de considerar dos tipos de propagación: la propagación por onda de superficie a lo largo de la superficie de la Tierra y la propagación ionosférica. La propagación por onda de superficie comprende tanto la propagación en línea de visibilidad directa como la que resulta de la difracción más allá del horizonte. La propagación de una onda de superficie depende principalmente de las características eléctricas del terreno y de la radiofrecuencia. La atenuación es menor sobre superficies de alta conductividad. La propagación ionosférica se debe a la refracción o reflexión de las ondas en la ionosfera. En las bandas de ondas milimétricas (ELF) y miriamétricas (VLF), las ondas electromagnéticas pueden propagarse en un modo guiado por las capas inferiores de la ionosfera. En la Recomendación UIT-R P.368 se incluyen curvas teóricas para la propagación por onda de superficie. El método de predicción recomendado para la propagación ionosférica de las ondas decamétricas es objeto de la Recomendación UIT-R P.533.

6.4.1.2 Efectos por encima de unos 30 MHz

Las variaciones del índice de refracción de la atmósfera neutra tienen una gran influencia sobre la propagación de ondas radioeléctricas en frecuencias superiores a unos 30 MHz. A frecuencias mayores de unos 6 GHz, los efectos debidos a precipitaciones se hacen apreciables y, a medida que aumenta la frecuencia, se han de considerar también otros efectos como los debidos a los gases atmosféricos, el vapor de agua y las nubes. El índice de refracción de la troposfera disminuye ligeramente con la altitud. Las variaciones de este índice y su gradiente vertical como resultado de cambios de temperatura, presión y humedad, pueden influir en el alcance de la propagación de una señal. Tiene particular relevancia el caso en que el gradiente vertical llega a ser más negativo que el de la atmósfera tipo. En tales condiciones (denominadas superrefracción o propagación guiada), el alcance de la propagación puede ser bastante mayor que el normalmente esperado, lo que podría dar lugar a interferencia cuando se comparten frecuencias. El comportamiento de la refractividad atmosférica se aborda en las Recomendaciones UIT-R P.453 y P.834. Otras recomendaciones que tratan de los efectos radiometeorológicos son las Recomendaciones UIT-R P.676 (Absorción de los gases atmosféricos), P.837 (Modelo de precipitación) y P.835 (Vapor de agua).

6.4.2 Efectos del terreno irregular

Las peculiaridades del terreno también afectan a la propagación de las ondas radioeléctricas, particularmente cuando la frecuencia se eleva por encima de unos 30 MHz. Entre los mecanismos de la propagación se incluyen la difracción, la dispersión y la reflexión desde obstáculos. Es importante, pues, examinar el trayecto de propagación para determinar el grado de obstrucción debida a obstáculos del terreno.

6.4.2.1 Trayecto con visibilidad directa

Aun existiendo visibilidad directa entre las dos antenas, el terreno influye sobre la propagación si no queda suficiente espacio libre entre la trayectoria del rayo y el obstáculo que interpone el terreno. Un criterio corrientemente aplicado es que el trayecto de la propagación debe estar apartado de cualquier obstáculo en al menos 0,6 veces la distancia de la primera zona de Fresnel, so pena de sufrir cierta pérdida por difracción. Al hacer tal evaluación, es necesario tener en cuenta la curvatura del rayo por refracción, por lo cual se utiliza a menudo el concepto de «radio terrestre equivalente» (véase la Recomendación UIT-R P.530).

6.4.2.2 Difracción sobre obstáculos y terreno irregular

En numerosos trayectos de propagación se interponen entre las antenas uno o varios obstáculos separados, y la pérdida por difracción resultante puede calcularse utilizando métodos consolidados como los descritos en la Recomendación UIT-R P.526. La influencia de las irregularidades del terreno, y por tanto la pérdida por difracción, aumenta con la frecuencia.

6.4.3 Efectos de las reflexiones en la superficie terrestre

Las ondas electromagnéticas se reflejan en la superficie de la Tierra de tal modo que, en un trayecto con visibilidad directa, puede llegar a la antena receptora una combinación del rayo directo y el rayo reflejado. En el caso de una superficie perfectamente conductora, la intensidad máxima recibida por combinación de ambos rayos puede (en teoría) llegar al doble del valor de la intensidad de campo del rayo directo cuando ambas señales están en fase, pero también anularse cuando entre ellas haya una diferencia de fase de 180 grados. La altura de la antena influye en la fase de las señales entrantes, y por tanto en la magnitud de la señal resultante. Existen técnicas para reducir la señal reflejada en un trayecto de visibilidad directa y así evitar los efectos de interferencia entre ambos rayos (véase la Recomendación UIT-R P.530).

6.4.4 Propagación en los trayectos Tierra-satélite

Los métodos de predicción de los efectos de la propagación sobre trayectos oblicuos, en la gama de frecuencias 1 – 55 GHz, se abordan en la Recomendación UIT-R P.618. Cuando es oportuno, la Recomendación hace referencia a otras Recomendaciones de la Serie P del UIT-R, en particular a las que contienen información y datos radiometeorológicos.

6.4.5 Modelos de propagación disponibles

Existen numerosos métodos de predicción de la propagación aplicables a comunicaciones de punto a zona y de punto a punto, para trayectos tanto terrenales como oblicuos, que dependen de la gama de frecuencias, servicios implicados y otros factores. Es por tanto imposible hacer una exposición general completa, pero se señala a la atención del lector la Recomendación UIT-R P.1144, que es una guía para la aplicación de los métodos de propagación contenidos en la Serie P de Recomendaciones del UIT-R. A continuación se mencionan algunas de estas Recomendaciones.

La Recomendación UIT-R P.368 contiene las curvas de propagación por onda de superficie para frecuencias comprendidas entre 10 kHz y 30 MHz. Se aplican a antenas situadas en la superficie de la Tierra y suponen una atmósfera exponencial. No tienen en cuenta las irregularidades del terreno. La propagación por onda de superficie está gobernada principalmente por las características eléctricas del suelo. Tales características pueden expresarse mediante tres parámetros: la permeabilidad, la permitividad y la conductividad (véase la Recomendación UIT-R P.527). La conductividad es la característica eléctrica más importante para las frecuencias inferiores a 3 MHz. La Recomendación UIT-R P.832 contiene el Atlas mundial de la conductividad del suelo (si bien necesita actualizarse). El programa informático GRWAVE (disponible en el sitio Web de la Comisión de Estudio 3 de la UIT) puede utilizarse para el cálculo de estas curvas.

La Recomendación UIT-R P-1546 contiene los métodos de predicción de punto a zona aplicables a servicios terrenales en la gama de frecuencias de 30 a 3 000 MHz, y sustituye a las Recomendaciones UIT-R P.370-7 y P.529-3. Como puede apreciarse por su título, esta nueva Recomendación abarca una gama de frecuencias ampliada. Pero además, el margen de distancias sobre las que pueden hacerse cálculos de predicción se amplía desde 1 hasta 1000 km.

La Recomendación UIT-R P.526 es un método general aplicable a uno o varios obstáculos.

El método del ITS (*Institute for Telecommunication Sciences*) de la NTIA (*National Telecommunications and Information Administration*), denominado Método de Terrenos Irregulares, y también denominado método de Longley y Rice, contiene un conjunto de algoritmos desarrollados para aplicaciones informáticas. El código C++ http://flattop.its.bldrdoc.gov/itm.html proporciona un código depurado.

Se han elaborado diversos modelos de propagación en zonas urbanas (por ejemplo, Hata-Okamura y Walkfish-Ikegami) y se han convertido a versiones informatizadas. Estos modelos se emplean en la planificación de sistemas de radiocomunicaciones celulares. La Recomendación UIT-R P.1411 proporciona métodos de predicción para la propagación en exteriores de corto alcance en la gama de frecuencias de 300 MHz a 100 GHz, y contempla situaciones en las que están obstruidas las antenas de ambos extremos del trayecto.

6.4.6 Modelos de propagación y utilización de las diversas bandas de frecuencias

El Cuadro 6.4-1 describe la utilización de las diversas bandas de frecuencias, desde 3 kHz a 300 GHz, basada principalmente en las características de la propagación. Los modelos de propagación para medios no ionizados y los métodos de predicción asociados de la Comisión de Estudio 3 del sector de radiocomunicaciones están contenidos en la Recomendación UIT-R P.1144.

CUADRO 6.4-1

Modelos de propagación y uso de las diversas bandas de frecuencias

Banda	Frecuencia	Modo	Alcance	Ejemplos de utilización	Rec. UIT-R
Ondas miriamétricas	3 – 30 kHz	guiaondas	varios miles de kilómetros	Mundial, radionavegación de largo alcance y radiocomunicaciones	P.684
Ondas kilométricas	30 – 300 kHz	onda de superficie, ionosférica	varios miles de kilómetros	Radionavegación de largo alcance y radiocomunicaciones	P.368, P.1147
Ondas hectométricas	0,3 – 3 MHz	onda de superficie, ionosférica	unos pocos miles de kilómetros	Punto a punto de alcance medio, radiodifusión y móvil marítimo	P.368, P.1147
Ondas decamétricas	3 – 30 MHz	onda ionosférica	hasta varios miles de kilómetros	Punto a punto de largo y corto alcance, radiodifusión, móvil	P.533
Ondas métricas	30 – 300 MHz	espacial, dispersión troposférica, difracción	hasta unos pocos cientos de kilómetros	Punto a punto de corto y medio alcance, móvil, LAN, radiodifusión (sonido y TV), comunicaciones personales	P.1546, P.617
Ondas decimétricas	0,3 – 3 GHz	espacial, dispersión troposférica, difracción, visibilidad directa	menos de 100 km	Punto a punto de corto y medio alcance, móvil, LAN, radiodifusión (sonido y TV), comunicaciones personales, comunicaciones por satélite	P.1546, P.530, P.617, P.618, P.452, P.1238, P.1411
Ondas centimétricas	3 – 30 GHz	visibilidad directa	menos de 30 km	Punto a punto de corto alcance, radiodifusión por satélite (sonido y TV), LAN, comunicaciones móviles/personales, comunicaciones por satélite, radionavegación	P.530, P.618, P.452, P.1410, P.1411
Ondas milimétricas	30 – 300 GHz	visibilidad directa	menos de 20 km	Punto a punto de corto alcance, microcelular, LAN y comunicaciones personales, comunicaciones por satélite	P.618, P.1238, P.1410, P.1411

Referencias

Recomendaciones e Informes del UIT-R

NOTA – Siempre debe utilizarse la versión más actualizada de cada Recomendación.

Recomendación UIT-R P.310 – Definición de términos relativos a la propagación en medios no ionizados.

Recomendación UIT-R P.453 – Índice de refracción radioeléctrica: su fórmula y datos sobre la refractividad.

Recomendación UIT-R P.525 – Cálculo de la atenuación en el espacio libre.

Recomendación UIT-R P.526 – Propagación por difracción.

Recomendación UIT-R P.527 – Características eléctricas de la superficie de la Tierra.

Recomendación UIT-R P.530 – Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales con visibilidad directa.

Recomendación UIT-R P.533 – Método para la predicción de la propagación de las ondas decamétricas.

Recomendación UIT-R P.618 – Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas de telecomunicación Tierra-espacio.

Recomendación UIT-R P.676 – Atenuación debida a los gases atmosféricos.

Recomendación UIT-R P.832 – Atlas mundial de la conductividad del suelo.

Recomendación UIT-R P.834 – Efectos de la refracción troposférica sobre la propagación de las ondas radioeléctricas.

Recomendación UIT-R P.835 – Atmósferas normalizadas de referencia para la atenuación debida a los gases.

Recomendación UIT-R P.837 – Características de la precipitación para establecer modelos de propagación.

Recomendación UIT-R P.1144 – Guía para la aplicación de los métodos de propagación de la Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones.

Recomendación UIT-R P.1411 – Datos de propagación y métodos de predicción para la planificación de los sistemas de radiocomunicaciones en exteriores de corto alcance y las redes de área local radioeléctricas en la gama de frecuencias 300 MHz a 100 GHz.

Recomendación UIT-R P.1546 – Métodos de predicción de punto a zona para servicios terrenales en la gama de frecuencias de 30 a 3 000 MHz.

Recomendación UIT-R P.1791 – Métodos de predicción de la propagación para la evaluación del efecto de los dispositivos de banda ultraancha.

Recomendación UIT-R P.1812 – Método de predicción de la propagación específico del trayecto para servicios terrenales punto a zona en las bandas de ondas métricas y decimétricas.

Informe UIT-R P.2011 – Propagación en frecuencias por encima de la MUF básica.

Informe UIT-R P.2089 – Análisis de datos de ruido radioeléctrico (solo disponible en inglés).

Informe UIT-R P.2090 – Medición de los parámetros de entrada del modelo de transferencia de energía radiante de la atenuación por vegetación (solo disponible en inglés).

Informe UIT-R P.2097 – Propagación radioeléctrica transionosférica – Modelo de centelleo ionosférico global (GISM) (solo disponible en inglés).

Manuales del UIT-R

Manual [2002] Curvas de propagación de las ondas radioeléctricas sobre la superficie de la Tierra: http://www.itu.int/pub/R-HDB-13/es

Manual [1998] Ionosfera y sus efectos en la propagación de las ondas radioeléctricas terrenales y en sentido Tierra-espacio desde la banda de ondas miriamétricas a la banda de ondas centimétricas http://www.itu.int/publ/R-HDB-32/es

Manual [1996] Radiometeorología: http://www.itu.int/publ/R-HDB-26/es

Manual [1996] Información de propagación de las ondas radioeléctricas para la predicción de las comunicaciones en Tierra-espacio: http://www.itu.int/publ/R-HDB-27/es

Manual [2002] Propagación de las ondas radioeléctricas en sistemas terrenales móviles terrestres en las bandas de ondas métricas/decimétricas: http://www.itu.int/pub/R-HDB-44/es

Manual [2008] Información sobre la propagación de las ondas radioeléctricas para el diseño de enlaces terrenales entre puntos fijos: http://www.itu.int/publ/R-HDB-54/es

6.5 Intermodulación

6.5.1 Antecedentes

Las emisiones no deseadas, que constan de emisiones no esenciales y emisiones fuera de banda, pueden interferir a sistemas de radiocomunicaciones con licencia. Los tipos más comunes de emisiones no esenciales son emisiones de armónicos o productos de Intermodulación, que se producen en un dispositivo no lineal como el amplificador de salida de un transmisor. Dichas transmisiones son salidas no esenciales y no deseadas, posible causa de interferencias.

Los productos de intermodulación (*Intermodulation Products* – IMP) se producen en un dispositivo no lineal cuando dos (o más) señales interactúan y generan una señal no deseada. Un IMP no deseado puede causar interferencia cuando se encuentra:

– en la frecuencia sintonizada de un receptor o cerca de ésta;

– en cualquier otra frecuencia a la cual sea sensible el receptor, como la frecuencia intermedia (FI) de un receptor superheterodino.

Los IMP pueden ser producidos en los transmisores o en los amplificadores de salida multicanal (y radiados). También pueden ser producidos en los amplificadores distribuidores, o en la entrada de los receptores y etapas de FI. Es importante que, al resolver los casos de interferencia, el operador de una estación de comprobación técnica sea capaz de determinar si se está midiendo una señal legítima o un producto de intermodulación.

6.5.2 Ecuaciones de análisis de la intermodulación

En muchos casos, los productos de intermodulación son las señales más difíciles de detectar en una estación de comprobación técnica, por lo que los puntos siguientes están particularmente dedicados al análisis, detección e identificación de la intermodulación.

Salvo por el ejemplo, el contenido de este punto ha sido extraído del documento de NTIA «Modelo de análisis del espectro por computador» (*Microcomputer Spectrum Analysis Model* – MSAM), Versión 5.24, febrero de 1997. Los programas MSAM han sido examinados por la Comisión de estudios 1 del Sector de Radiocomunicaciones y están disponibles en http://ntiacsd.ntia.doc.gov/msam/.

En el análisis se consideran únicamente los productos de modulación dentro de banda. La interferencia de intermodulación está definida por cualquiera de las siguientes ecuaciones.

Caso de dos señales

tercer orden:	$2T_{f1} - T_{f2} = R_f \pm \text{BW}$
quinto orden:	$3T_{f1} - 2T_{f2} = R_f \pm \text{BW}$
séptimo orden:	$4T_{f1} - 3T_{f2} = R_f \pm \text{BW}$

Caso de tres señales

tercer orden:	$T_{f1} - T_{f2} + T_{f3} = R_f \pm \text{BW}$
quinto orden:	$2T_{f1} - 2T_{f2} + T_{f3} = R_f \pm \text{BW}$
	$3T_{f1} - T_{f2} - T_{f3} = R_f \pm \text{BW}$
séptimo orden:	$2T_{f1} - 3T_{f2} + 2\,T_{f3} = R_f \pm \text{BW}$
	$3T_{f1} - 3T_{f2} + T_{f3} = R_f \pm \text{BW}$
	$4T_{f1} - 2T_{f2} + T_{f3} = R_f \pm \text{BW}$

siendo:

T_f: frecuencia del transmisor;

R_f: frecuencia del receptor, y

BW: anchura de banda del receptor.

Ejemplo práctico de un producto de intermodulación (IMP):

Las frecuencias transmitidas son f_1 = 232 MHz (canal móvil), f_2 = 229,75 MHz (portadora de sonido del canal 12 de TV para la Norma Europea B), y la frecuencia interferida es 234,25 MHz (otro canal móvil). Por lo tanto: IMP = $2T_{f1} - T_{f2}$ = 2 x 232 – 229,75 = 234,25.

Normalmente los fabricantes indican los puntos de interceptación y los factores de ruido para caracterizar a los amplificadores y receptores. A partir de esos datos se puede calcular lo siguiente:

a) Nivel de ruido del receptor u_N para valores dados de anchura de banda de medición B_{3dB} en Hz, factor de ruido *NF* en dB y factor de ponderación del detector *W* en dB:

$$u_N = -67 \text{ dB}(\mu\text{V}) + NF + 10 \log (B_{3\text{dB}}) + W \qquad \text{dB}(\mu\text{V})$$

El factor de ponderación W para este tipo de detector es 0 dB en valor medio, 1,1 dB para el detector de valor eficaz y, en general, 7 dB para el detector de cuasi cresta y 11 dB para el detector de cresta.

Por ejemplo, para NF = 10 dB, B_{3dB} = 9 kHz, la indicación media será:

$$u_N = -67 + 10 + 39.5 = -17{,}5 \qquad \text{dB}(\mu\text{V})$$

b) Nivel del producto de intermodulación u_{IMP} para valores dados del punto de interceptación de tercer orden IP_3 y del nivel individual u_{IMS} de dos señales generadoras de IMP u_{IMS}

$$u_{IMP} = IP_3 - 3(IP_3 - u_{IMS}) \qquad \text{dB}(\mu\text{V})$$

Por ejemplo, para IP_3 = 20 dBm = 127 dBμV, u_{IMS} = 80 dBμV, resistencia de entrada = 50 ohmios (véanse detalles en el § 6.3):

$$u_{IMP} = 127 - 3\,(127 - 80) = -14 \qquad \text{dB}(\mu\text{V})$$

c) Nivel del producto de intermodulación u_{IMP} para valores dados del punto de interceptación de segundo orden IP_2 y del nivel individual u_{IMS} de dos señales generadoras de IMP:

$$u_{IMP} = IP_2 - 2\,(IP_2 - u_{IMS})$$

Por ejemplo, para IP_2 = 50 dBm = 157 dB(μV), u_{IMS} = 80 dB(μV):

$$u_{IMP} = 157 - 2\,(157 - 80) = 3 \qquad \text{dB}(\mu\text{V})$$

Margen dinámico libre de intermodulación:

1. calcular el nivel de ruido u_N
2. calcular el nivel individual de las dos señales generadoras de IMP por medio de: $u_{IMS} = 1/3\,(u_N + 2\,IP_3)$, expresando todas las unidades en dB(μV)
3. calcular: $D_{IMF} = u_{IMS} - u_N$ para el margen dinámico sin intermodulación.

Por ejemplo, para NF = 10 dB: $B_{3\text{dB}}$ = 9 kHz, IP_3 = 20 dBm, detector de valor medio:

$u_{IMS} = 1/3\,(-17{,}5 + 2(127)) = 78{,}8$ dB(μV)

$D_{IMF} = 78{,}8 - (-17{,}5) = 96{,}3$ dB.

En la Recomendación UIT-R SM.1446 y en el Informe UIT-R SM.2021 se incluye un análisis detallado de los IMP creados en los transmisores. La Recomendación UIT-R SM.1134 presenta un método de cálculo para la determinación de los IMP producidos en receptores que permiten determinar los niveles de IMP hasta el quinto orden. También se incluye un ejemplo de cálculo.

6.5.3 Detección e identificación de productos de intermodulación

El problema práctico que tiene ante sí el operador de un receptor de comprobación técnica es determinar si la señal que observa es una señal «legítima» entregada al receptor por la antena, o bien un producto de intermodulación (IMP) generado en el receptor por dos o más señales intensas. A menudo la primera indicación de que hay intermodulación en la salida del receptor es la observación de lo que resulta ser una misma modulación de señal en más de una frecuencia.

Una prueba sencilla para determinar la presencia de IMP consiste en insertar una atenuación conocida a la entrada del receptor. Si la amplitud de la señal observada disminuye en una proporción igual a la atenuación incorporada, la señal observada es «legítima». Si la amplitud disminuye en un múltiplo entero del valor de atenuación introducido, entonces la señal observada es un IMP del orden de ese múltiplo entero, producido

en el receptor. Cuando el IMP se produce a la vez por generación interna y externa, el descenso de nivel de la señal observada superará la atenuación añadida pero no será un múltiplo entero del valor del atenuador.

Por ejemplo, si se introducen 10 dB y la amplitud de la señal observada cae 30 dB, esa señal observada es un producto de intermodulación de tercer orden. Si la señal observada sufre desvanecimiento, la magnitud de la atenuación debe ser suficientemente grande como para que la disminución causada por el desvanecimiento no se pueda interpretar erróneamente como un cambio debido a la intermodulación. Hay que cuidarse de no utilizar un atenuador tan potente que, después de la atenuación, la señal caiga por debajo de un nivel que esté al menos 5 dB por encima del umbral de ruido del receptor.

Como alternativa, se puede utilizar la atenuación de entrada incorporada a un analizador de espectro o receptor de medición. La mayoría de estos instrumentos mantienen su nivel de referencia constante cuando se cambia la atenuación de entrada, lo cual proporciona un criterio diferente al de utilización de una atenuación no acoplada. Si la amplitud de la señal observada permanece constante, entonces la señal observada es legítima. Por el contrario, si varía la amplitud, el IMP se ha generado internamente o es la suma de productos de generación externa e interna.

Si se dispone de un analizador de espectro, se pueden utilizar diversas resoluciones en anchura de banda con miras a facilitar la detección e identificación de IMP. Este método es especialmente eficaz cuando hay muchos productos de intermodulación presentes simultáneamente, de tal manera que el umbral mínimo aparente de ruido del receptor se haya elevado en una amplia banda de frecuencias.

Por último, los productos de intermodulación pueden tener su origen en señales dentro de banda (por ejemplo, señales en ondas decamétricas que generan IMP en esa misma banda) o en señales fuera de banda (como las señales en ondas métricas que generan IMP en la banda de ondas decamétricas). Es conveniente utilizar filtros de paso bajo, paso alto y paso de banda con los analizadores de espectro para identificar los IMP y determinar si se trata de productos dentro de banda o fuera de banda. Los analizadores de espectro con almacenamiento digital, provistos de trazas múltiples y capaces de almacenar y visualizar cada traza, facilitan la comparación de espectros con filtros o sin ellos buscando la presencia o ausencia de productos de intermodulación.

Los analizadores de espectro con representación en tres ejes (amplitud en función de la frecuencia y del tiempo utilizando barridos múltiples) están particularmente bien adaptados para la detección e identificación de los IMP cuando se observa el espectro con o sin filtros.

Cuando se trata de resolver problemas de interferencia, es conveniente determinar si la interferencia es el resultado de IMP generados en el transmisor o en el receptor. Conviene hacer un estudio exhaustivo de la señal para descubrir posibles orígenes de IMP. Pueden utilizarse las ecuaciones de análisis de la intermodulación para buscar una correspondencia entre el valor calculado de IMP y la señal interferente.

Bibliografía

Recomendaciones e Informes del UIT-R

NOTA – Siempre debe utilizarse la versión más actualizada de cada Recomendación.

Recomendación UIT-R SM.329– Emisiones no deseadas en el dominio no esencial.

Recomendación UIT-R SM.1134 – Cálculos de la interferencia de intermodulación en el servicio móvil terrestre.

Recomendación UIT-R SM.1446 – Definición y medición de los productos de intermodulación en transmisores que utilizan técnicas de modulación de frecuencia, de fase o compleja.

Informe SM.2021 – Generación y reducción de los productos de intermodulación en el transmisor.

6.6 Modulación y métodos de acceso al espectro

6.6.1 Introducción

La modulación de radiofrecuencia es la modificación (de tensión, corriente o campo) de una portadora electromagnética sinusoidal por una señal. El objetivo de la modulación es trasladar las señales de banda de base, que en general no tienen la forma ni la frecuencia adecuada para ser directamente transmitidas, a una frecuencia superior, que puede ser emitida por una antena.

La señal moduladora puede cambiar la amplitud o la frecuencia/fase de la portadora, o ambas. Puede ser una señal analógica o digital, por ejemplo, un tren de bits.

En el Apéndice 1 del RR se enumeran los tipos de modulaciones.

Los métodos de acceso definen cómo y cuándo una señal modulada accede a los recursos del espectro. Si existen señales de varias fuentes (por ejemplo, diferentes usuarios o transmisores) que desean acceder al espectro en la misma zona, deben aplicarse métodos de acceso para permitir el uso compartido del recurso sin interferencias.

6.6.2 Modulación analógica

6.6.2.1 Modulación de amplitud

Si una señal portadora con una amplitud E_C (Fig. 6.6-1a) es modulada en amplitud por una oscilación sinusoidal (un tono) se obtiene una onda como la que se muestra en la Fig. 6.6-1b). En estas Figuras, la abscisa representa el tiempo y la ordenada la tensión (o corriente) de la señal («representación en el dominio del tiempo»).

Por tanto, la amplitud de la señal modulada cambia con la señal sinusoidal moduladora, a la que responde la envolvente de la señal portadora.

Si se aumenta la amplitud de la señal moduladora, la variación de amplitud de la señal modulada aumentará igualmente hasta un punto en el que se produzca la supresión instantánea de la envolvente, tal como se muestra en la Fig. 6.6-1c).

Si E_{max} es la amplitud máxima de la onda modulada y E_{min} es la amplitud mínima de la envolvente (véase la Fig. 6.6-1b), la *profundidad de la modulación m* viene dada por:

$$m = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}} \quad \text{o expresado como porcentaje:} \quad m\ (\%) = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}} \tag{6.6-1}$$

Si la amplitud de la onda moduladora aumenta aún más, también aumenta la amplitud máxima de la onda modulada, aunque se produce un recorte de la forma de onda durante un breve periodo de tiempo, tal como se muestra en la Fig. 6.1.-1d). Este fenómeno se denomina sobremodulación.

Para detectar la sobremodulación utilizando la ecuación (6.6-1), el sistema debe poder determinar un valor de $E_{min} < 0$.

Alternativamente, pueden utilizarse otras definiciones para *m* que están relacionadas con la tensión media E_c.

Estas definiciones dan los mismos valores que la ecuación 6.6-1 para formas de ondas moduladoras sinusoidales, pero con la ventaja de que se definen la simetría y la sobremodulación.

Utilizando E_{max} y E_c se obtiene:

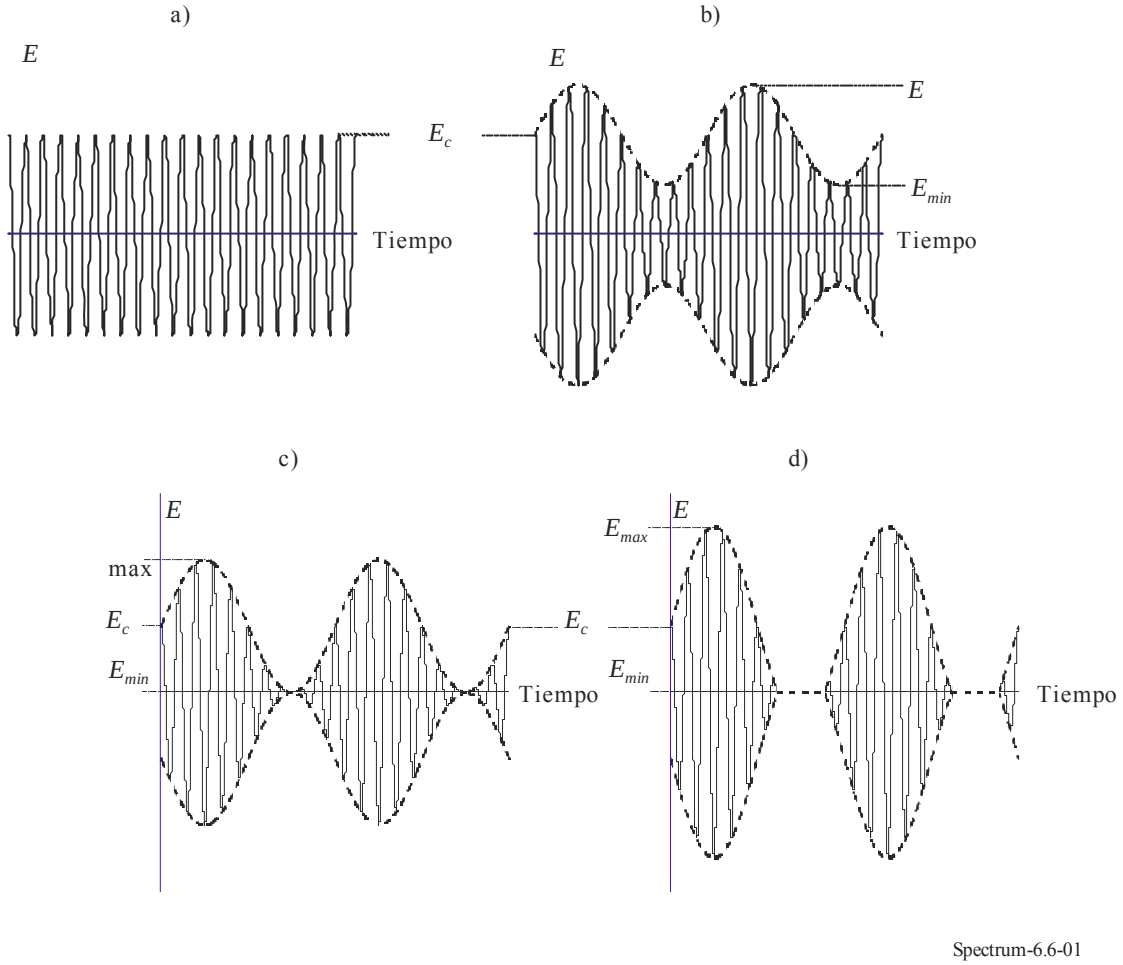
$$m_+(\%) = \frac{E_{max} - E_c}{E_c} \times 100 \tag{6.6-2}$$

Utilizando E_{min} y E_c se obtiene:

$$m_{-}(\%) = \frac{E_c - E_{min}}{E_c} \times 100 \tag{6.6-3}$$

FIGURA 6.6-1

Representación en el dominio del tiempo de una señal modulada en amplitud



Teniendo en cuenta E_{max}, E_{min} y E_c se obtiene:

$$m_{+/-}(\%) = \frac{E_{max} - E_{min}}{2E_c} \times 100 \tag{6.6-4}$$

Con $m_{+}=m_{-}=m_{+/-}$, la modulación puede considerarse simétrica, es decir, la modulación no modifica el valor de la amplitud de la portadora ($= E_c$) y, en todo caso, el porcentaje de modulación es < 100%, por lo que nunca existe sobremodulación.

La modulación se denomina no simétrica si:

$$m_{+} \neq m_{-} \neq m_{+/-}$$

Cuando se recibe una señal sobremodulada, la señal de salida de audiofrecuencia del receptor es una señal sinusoidal con crestas recortadas en lugar de la señal sinusoidal utilizada para sobremodular el transmisor.

Ello produce una distorsión apreciable. Por tanto, deben evitarse la sobremodulación y la degradación resultante de la transmisión; además, la sobremodulación aumenta la anchura de banda ocupada por cualquier emisión.

En la Fig. 6.6-2 se muestran las señales moduladas en amplitud en el dominio de la frecuencia («representación espectral»). En el eje de abscisas se representa la frecuencia y en ordenadas la tensión o la corriente de la onda.

Tal como puede verse, una portadora modulada por una señal sinusoidal está acompañada de dos bandas laterales cuyas frecuencias son $f_c + f_m$ y $f_c - f_m$, cada una con una amplitud de:

$$E_m = \frac{m}{2} \cdot E_c \tag{6.6-5}$$

La *anchura de banda ocupada* es:

$$(f_c + f_m) - (f_c - f_m) = 2f_m \tag{6.6-6}$$

Es decir, dos veces la frecuencia de la señal moduladora.

En la Fig. 6.6-2d) se muestra el espectro de una onda sobremodulada. Suponiendo que la sobremodulación causa productos de distorsión hasta el tercer armónico de la señal moduladora, la anchura de banda ocupada es tres veces la anchura de banda de la señal modulada sin distorsión. Por tanto, debe evitarse la sobremodulación.

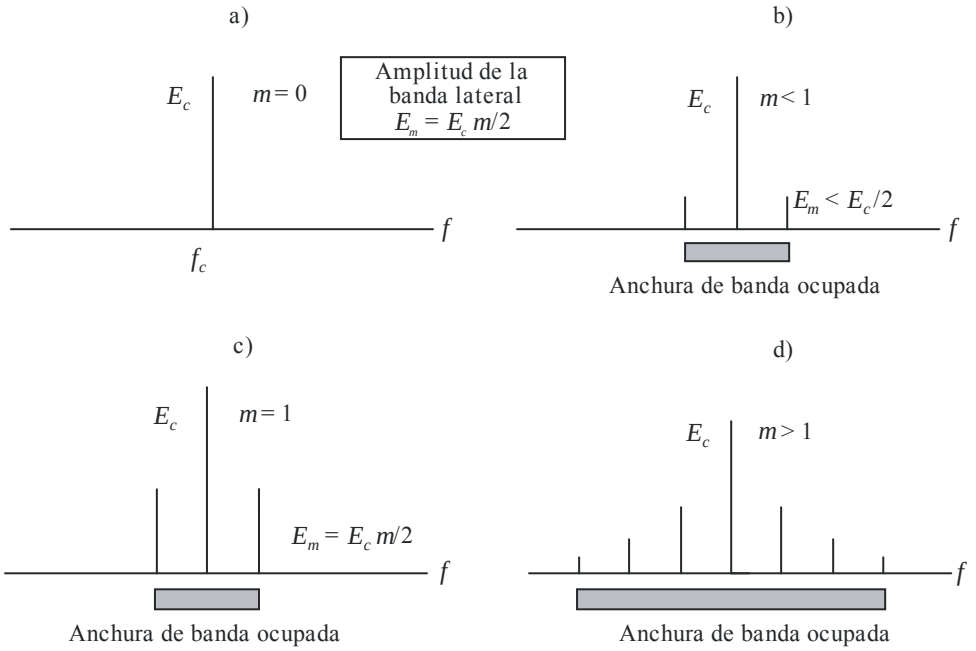
Tal como se observa en las Figs. 6.6-1a) y 6.6-1c), si no se produce sobremodulación no se modifica la amplitud de la portadora ni la anchura de banda ocupada. Las bandas laterales contienen potencia adicional, siendo la potencia total de una onda modulada la suma de la potencia de la portadora y de las bandas laterales. Ello se refleja en la expresión siguiente:

$$P_m = P_C\left(1 + \frac{m^2}{2}\right) \tag{6.6-7}$$

La sobremodulación reduce la amplitud de la portadora.

FIGURA 6.6-2

Representación en el dominio de la frecuencia de la señal modulada en amplitud



Spectrum-6.6-02

6.6.2.2 Modulación de frecuencia

Una señal con modulación de frecuencia (MF) es una señal cuya frecuencia instantánea se modifica de acuerdo con la señal moduladora.

La forma de onda de una señal sinusoidal moduladora se describe mediante la siguiente ecuación general:

$$s(t) = a * \cos\left[2\pi . f_c . t + m . sen(2\pi . f_m . t)\right] \tag{6.6-8}$$

a es la amplitud de la señal modulada en frecuencia, f_c es la frecuencia de la portadora, f_m es la frecuencia de la señal moduladora y m es el índice de modulación.

El índice de modulación es proporcional a la desviación de frecuencia y se define como:

$$m = \frac{\Delta f}{f_m} \tag{6.6-9}$$

Δf es la desviación de frecuencia.

El dominio de la frecuencia es de mayor interés que el dominio del tiempo pues permite calcular la energía total de una señal con modulación de frecuencia (MF).

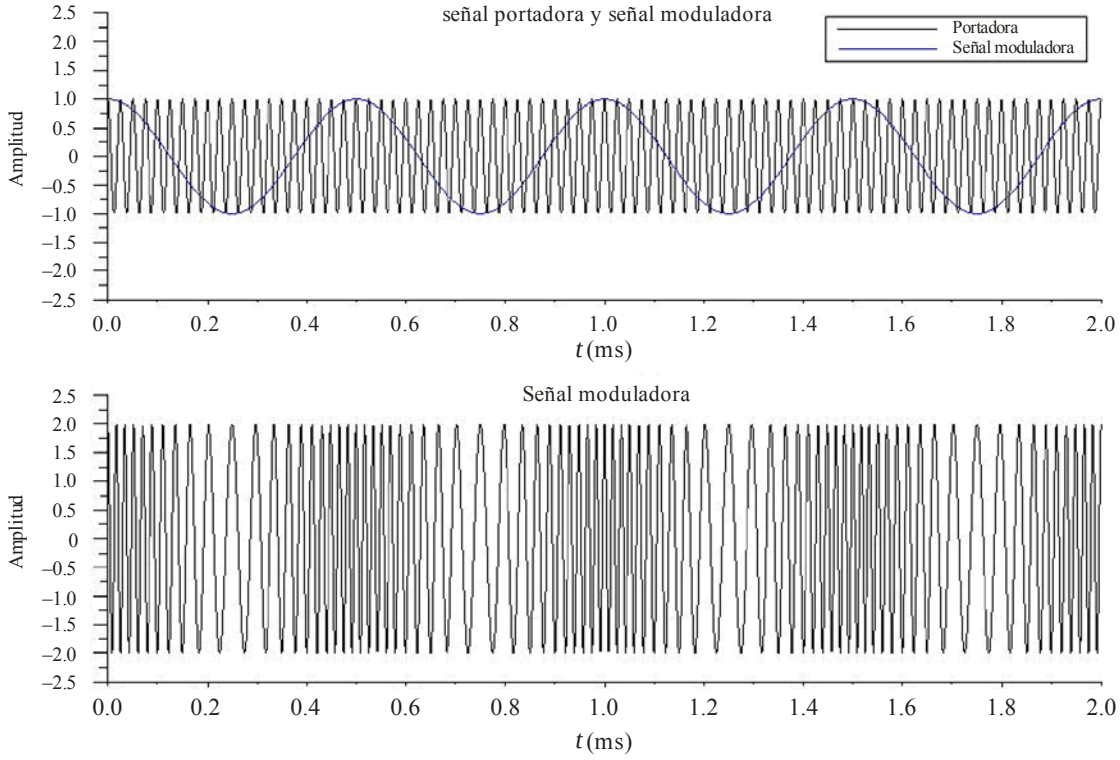
Aplicando la Transformada Rápida de Fourier (FFT) calculada a partir de la ecuación en el dominio del tiempo, el espectro se describe mediante la siguiente relación general:

$$S(\omega) = a . \sum_{k=-\infty}^{+\infty} m\left(\omega_p - k.\omega_m\right) . J_k(m) \tag{6.6-10}$$

Los términos $J_k(m)$ son las funciones de Bessel de primera especie que se representan a continuación.

FIGURA 6.6-3

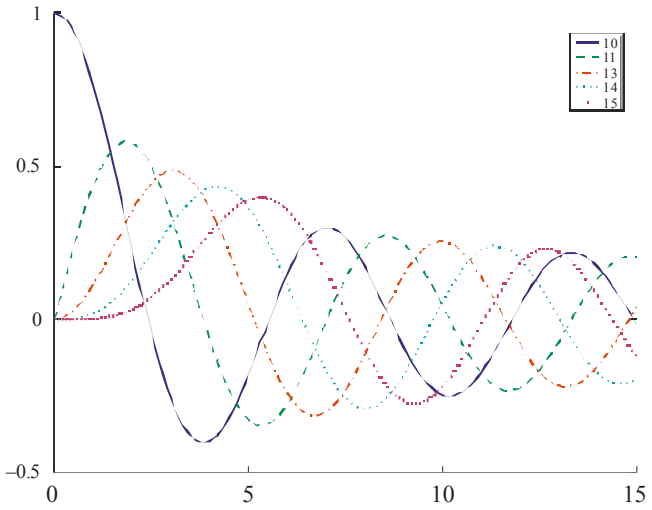
Representación en el dominio del tiempo de la señal con modulación de frecuencia



Spectrum-6.6-03

FIGURA 6.6-4

Funciones de Bessel de primera especie



Spectrum-6.6-04

En teoría, una señal con MF está constituida por un número infinito de parejas de bandas laterales; no obstante, en la práctica, el 99% de la energía está incluida en una anchura de banda finita que puede definirse aproximadamente de la forma siguiente:

– para modulación de banda estrecha (m ≤1), la anchura de banda es igual a 2 x f_m;

– si la señal moduladora es un espectro continuo o amplio de frecuencias, la regla de la anchura de banda de Carlson se expresa como $2(\Delta f + f_m)$ o $2 \cdot f_m \cdot (m + 1)$.

Ejemplo:

f_c = 100 MHz, f_m = 2 kHz, Δf =10 kHz, m = 5

Calculando la anchura de banda: B = 2*2k*(5 + 1) = 24 kHz.

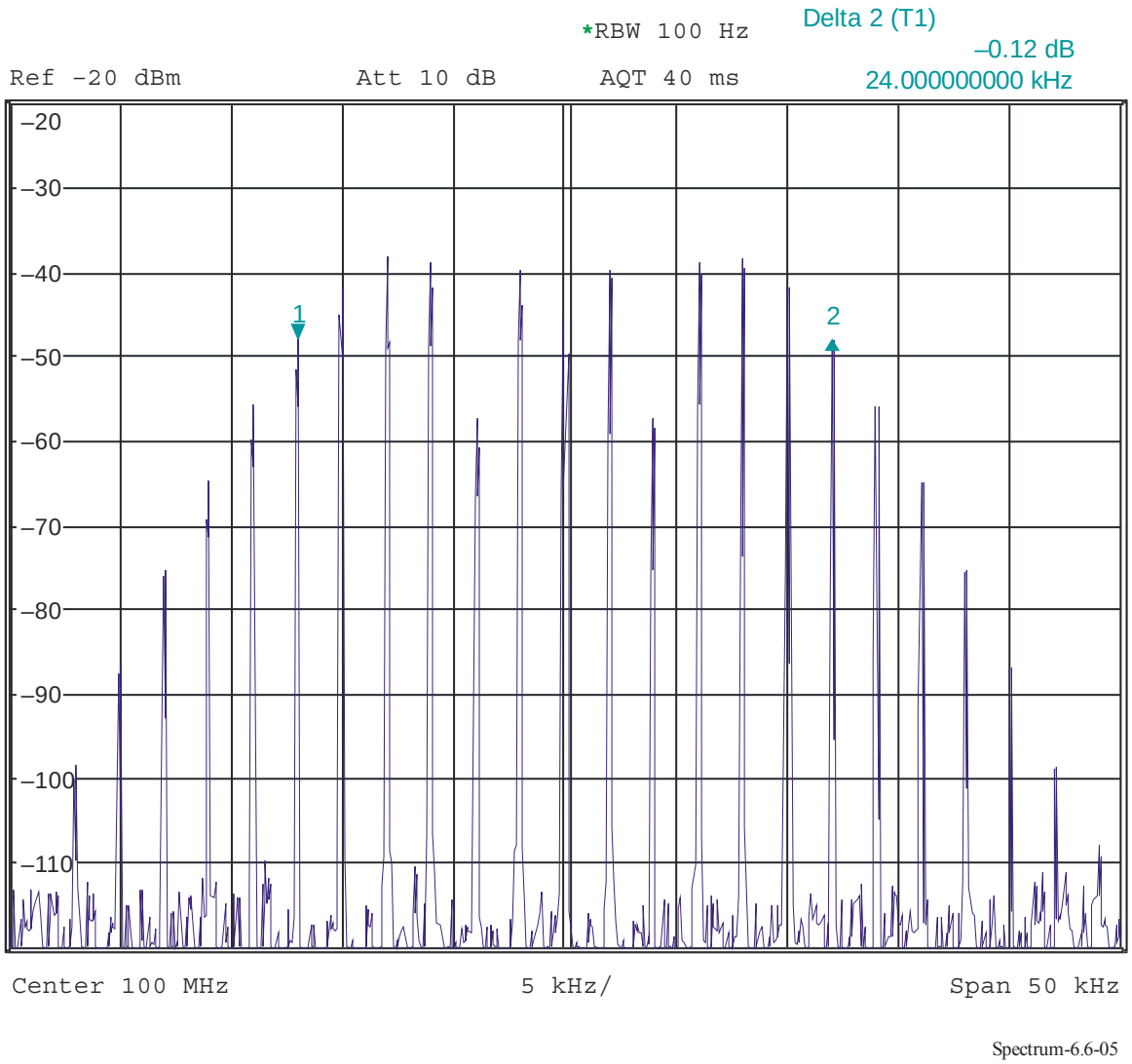
Los resultados del cálculo de la amplitud de cada pareja de banda lateral son los siguientes (función de Bessel para m=5):

Frecuencia	**Amplitud**	
f_c	$J_0(5)$	–0,18
$f_c \pm f_m$	$J_1(5)$	–0,33
$f_c \pm 2\ f_m$	$J_2(5)$	0,05
$f_c \pm 3\ f_m$	$J_3(5)$	0,36
$f_c \pm 4\ f_m$	$J_4(5)$	0,39
$f_c \pm 5\ f_m$	$J_5(5)$	0,26
$f_c \pm 6\ f_m$	$J_6(5)$	0,13
$f_c \pm 7\ f_m$	$J_7(5)$	0,05
$f_c \pm 8\ f_m$	$J_8(5)$	0,02
$f_c \pm 9\ f_m$	$J_9(5)$	0,005

La Fig. 6.6-5 muestra el espectro de la señal con MF resultante del ejemplo anterior:

FIGURA 6.6-5

Ejemplo de espectro MF



6.6.2.3 Modulación de fase

La modulación de fase (MP) y la modulación de frecuencia (MF) son básicamente lo mismo: la modificación de la frecuencia también modifica la fase instantánea de la señal de RF en relación con la fase inicial de la señal no modulada y viceversa.

Por tanto, a la MP se aplican las mismas fórmulas que a la MF y el resultado espectral es el mismo. La única diferencia es la forma en que el receptor demodula la señal para recuperar la información moduladora.

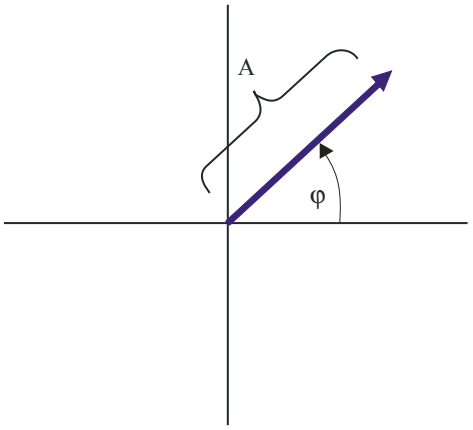
Sin embargo, el dominio de la frecuencia no es adecuado para representar la modulación de fase porque en éste sólo pueden observarse la frecuencia y la amplitud. Una forma más común de representar la modulación de fase es mediante un diagrama polar que representa la señal de RF mediante un vector que comienza en el centro. La longitud del vector es la amplitud de la RF y el ángulo con relación a la horizontal es la fase momentánea. En la Fig. 6.6-6 se muestra un ejemplo.

Una señal no modulada se representaría mediante un vector que permanece constante. Si la señal se modula en frecuencia, el vector rota hacia la izquierda o hacia la derecha en función de si frecuencia instantánea es inferior o superior a la frecuencia de la portadora no modulada.

Al mismo tiempo, el ángulo φ también cambia constantemente. Por tanto, modular la frecuencia es, de hecho, lo mismo que modular la fase.

FIGURA 6.6-6

Diagrama polar instantáneo de una señal con modulación de fase



Spectrum-6.6-06

6.6.2.4 Modulaciones analógicas especiales

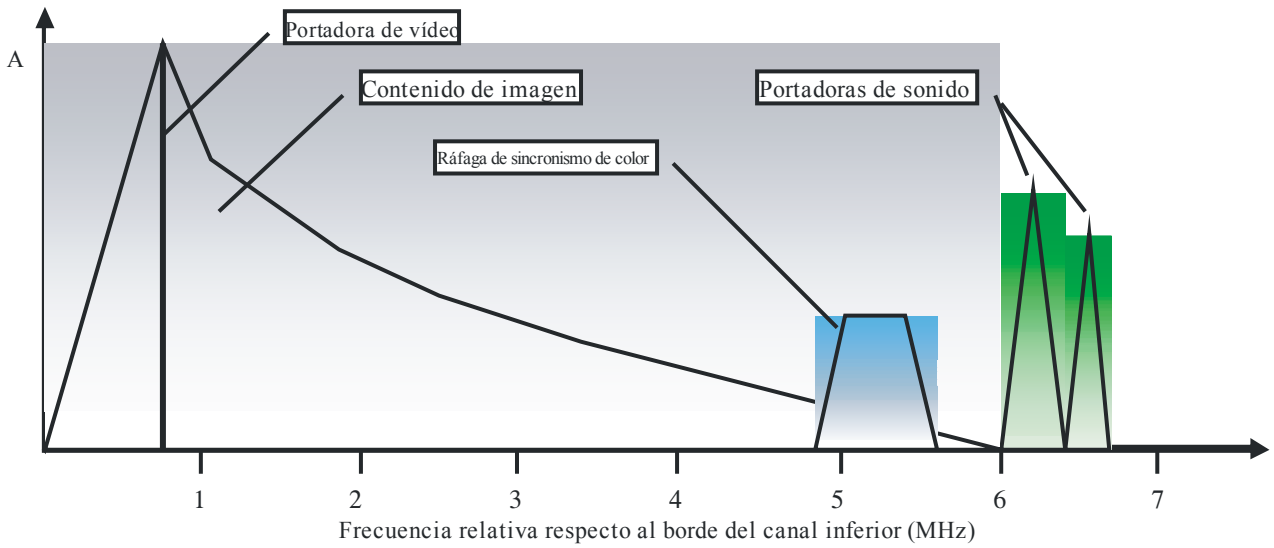
6.6.2.4.1 Modulación de la radiodifusión de televisión

Las transmisiones de radiodifusión de televisión analógica en bandas de ondas métricas y decimétricas utilizan modulación de banda lateral residual (BLR) (negativa o positiva) para la señal de video y una o más señales de audio diferenciadas que son moduladas en frecuencia o amplitud.

El espectro resultante es complejo y las componentes individuales así como su amplitud y separación de frecuencia en relación con la portadora dependen de la norma utilizada. En la Fig. 6.6-7 se muestra un ejemplo simplificado de señal de video en color analógica con sonido estereofónico.

FIGURA 6.6-7

Ejemplo simplificado de una señal de TV norma PAL con sonido estereofónico



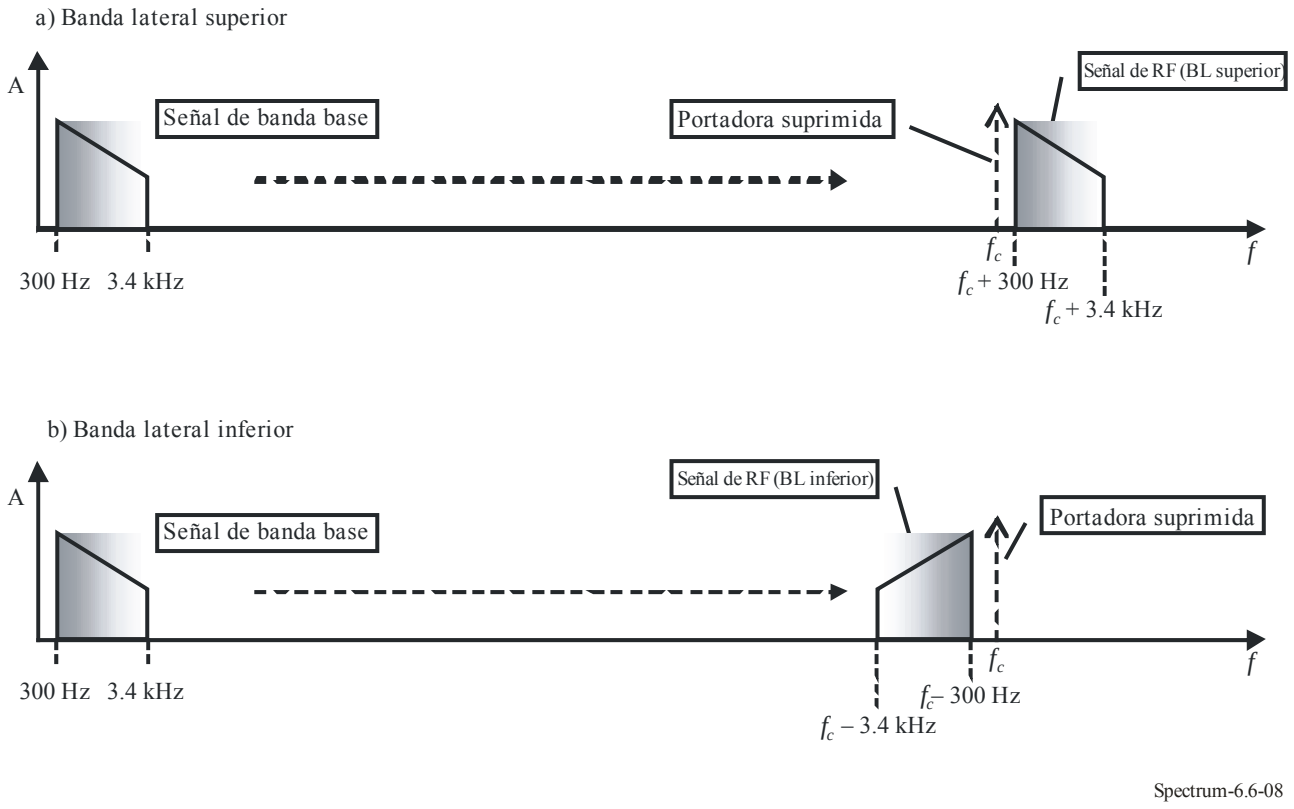
Spectrum-6.6-07

6.6.2.4.2 Modulación de banda lateral única con portadora suprimida

La modulación de banda lateral única con portadora suprimida (BLU o J3E) se utiliza ampliamente en transmisiones de voz de banda estrecha. Para este tipo de modulación, la banda base de telefonía sólo se traslada (o bien, traslada e invierte) a la frecuencia asignada, y se amplifica y emite por la antena. En consecuencia, si no hay señal vocal, sólo se mantendría la portadora, pero al suprimir ésta no se transmite nada. En la Fig. 6.6-8 se ilustra el principio de la BLU.

FIGURA 6.6-8

Principio de la modulación de BLU



Normalmente, se utiliza la modulación de banda lateral superior (BL Superior, Fig. 6.6-8) y sólo el servicio de radioaficionados utiliza la banda lateral inferior (BL Inferior, Fig. 6.6-8b)

La ventaja de la modulación de banda lateral única en comparación con la modulación de amplitud (MA) es que sólo utiliza la mitad de la anchura de banda espectral y la portadora transmitida no malgasta potencia del transmisor.

6.6.2.4.3 Modulación de banda lateral independiente

La modulación de banda lateral independiente con portadora suprimida (B8E) funciona bajo los mismos principios que la BLU, con la diferencia de que se transmiten dos bandas base vocales independientes: la banda base 1 se desplaza a la banda superior y la banda base 2 se invierte y desplaza a la banda inferior de la RF.

6.6.2.4.4 Modulación dinámica de amplitud

El transmisor convencional de modulación de amplitud y de doble banda lateral es, desde el punto de vista del consumo de potencia, un dispositivo ineficiente. Incluso para una profundidad de modulación m = 100%, únicamente el 17% de la potencia radiada se utiliza para transmitir la información (una banda lateral) y el 66% corresponde a la potencia de la portadora sin ningún contenido de información (véase la ecuación (6.6-7).

Para valores inferiores de m, estas relaciones son aún peores. Como solución a este problema se han hecho varios intentos para reducir la potencia de la portadora cuando la profundidad de modulación m es baja (que es lo habitual durante la mayor parte del tiempo).

Una solución es la llamada modulación dinámica de amplitud que reduce la potencia de la portadora cuando m es notablemente inferior al 100%. Evidentemente, este procedimiento ahorra energía.

6.6.3 Modulación digital

6.6.3.1 Principios de la modulación digital

En las comunicaciones digitales la información se transmite de forma cuantificada, es decir, la amplitud de la señal sólo puede tomar valores discretos. La información que se transmite es un tren de datos de «unos» y «ceros». El transmisor analiza los bits de entrada con una velocidad denominada «velocidad de reloj». El receptor analiza el estado de la señal de RF con la misma velocidad de reloj y decodifica los bits originales.

Al igual que las señales analógicas, las señales en banda base digitales no tienen la forma adecuada ni la frecuencia apropiada para su transmisión a través de una antena. Para poder transmitirlas en un radiocanal, deben primeramente desplazarse a una frecuencia más elevada modulando una portadora sinusoidal de radiofrecuencia.

La señal de datos que contiene la información influye sobre la amplitud, la frecuencia y/o la fase de la portadora de RF a la velocidad de reloj de la señal de datos. La velocidad de reloj también se denomina velocidad de símbolos. En algunos casos se utiliza simultáneamente la modulación de amplitud y la modulación angular.

En las técnicas digitales, la palabra «modulación» se sustituye frecuentemente por el término «manipulación» (Nota: esta sustitución ocurre esencialmente en inglés, en el que se emplea el término «*keying*» en lugar de «*modulation*»). Las abreviaturas MDA, MDF y MDP significan, respectivamente, modulación (o manipulación) por desplazamiento de amplitud, modulación (o manipulación) por desplazamiento de frecuencia y modulación (o manipulación) por desplazamiento de fase.

La ventaja de las señales digitales es que pueden restablecerse sin sufrir ninguna degradación a causa del ruido, en ciertas circunstancias.

6.6.3.2 Modulación por desplazamiento de amplitud

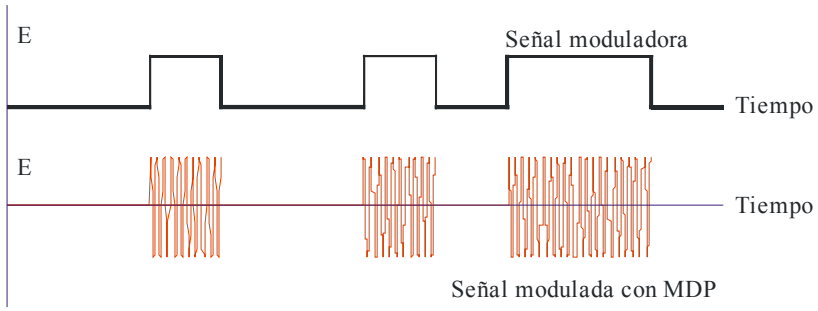
La manera más sencilla de modular la onda portadora con señales digitales en banda base es la modulación por desplazamiento de amplitud (MDA). Esto puede conseguirse mediante una señal que activa y desactiva la emisión de una portadora. Si se transmite un «1», la portadora se activa, si se transmite un «0» la portadora se desactiva.

El ejemplo clásico de esta situación es el código Morse. Si la portadora es simplemente activada y suprimida a la velocidad de los impulsos de la señal de datos, se habla de una modulación «todo o nada» (OOK, *on-off keying*). En la Fig. 6.6-9 se muestran las señales moduladora y modulada de este tipo de modulación.

En algunos casos, por ejemplo, con señales patrones horarias, el desplazamiento de amplitud es inferior al 100%. Ello tiene la ventaja de que incluso en el caso de un tren de datos compuesto por todos cero, se sigue transmitiendo algo de energía y el receptor se mantiene sincronizado pues no pierde la señal.

FIGURA 6.6-9

Modulación por desplazamiento de amplitud



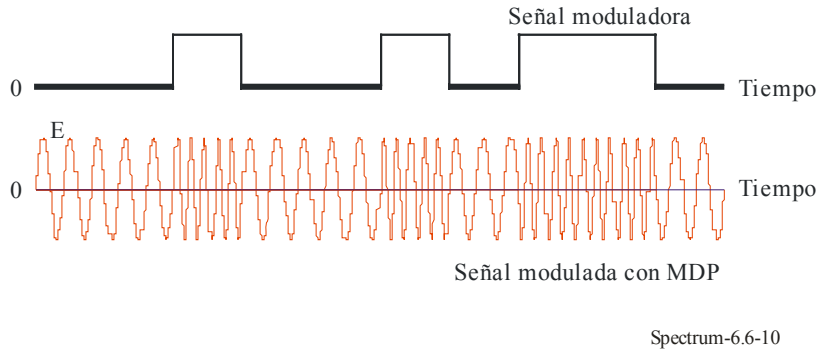
Spectrum-6.6-09

6.6.3.3 Modulación por desplazamiento de frecuencia

En la modulación por desplazamiento de frecuencia (MDF) la frecuencia de la portadora se modifica según la señal moduladora: si se transmite un «1», la frecuencia portadora f_c se sustituye por la frecuencia superior f_1, y cuando se transmite un «0» la frecuencia pasa a ser la frecuencia inferior f_2. En la Fig. 6.6-10 se representan las señales moduladora y modulada de este tipo de modulación.

FIGURA 6.6-10

Modulación por desplazamiento de frecuencia



Spectrum-6.6-10

La amplitud de la onda portadora permanece constante mientras que la frecuencia puede tomar dos valores:

$$f_1 = f_C + \Delta f \quad \text{y} \quad f_2 = f_C - \Delta f \tag{6.7-11}$$

Para lograr una decodificación exitosa, se hace que la separación Δf, dependa de la velocidad de reloj: cuanto mayor sea la velocidad de reloj, mayor deberá ser la separación

6.6.3.4 Modulación por desplazamiento de fase

Un tercer método para modular una onda portadora con señales digitales es la modulación por desplazamiento de fase (MDP). En la Fig. 6.6-11 se representa la señal de datos moduladora y la señal de RF modulada para este tipo de modulación.

Como puede verse, el nivel de la señal modulada permanece constante, pero la fase cambia 180º (en este ejemplo) si la señal moduladora pasa de «0» a «1» (MDP-2).

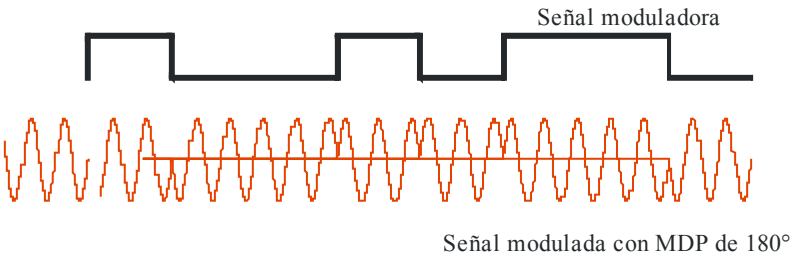
Tal como ocurre con la modulación de fase analógica, la mejor forma de representar la MDP es mediante un diagrama polar como el de la Fig. 6.6-6.

No obstante, es más habitual representar el vector de RF sólo en aquellos puntos en los que los receptores tratan de decodificar la señal. En el mismo diagrama se representan todos los estados posibles.

Para mejorar la lectura, solamente se representan los extremos de los vectores como puntos.

FIGURA 6.6-11

Modulación por desplazamiento de fase

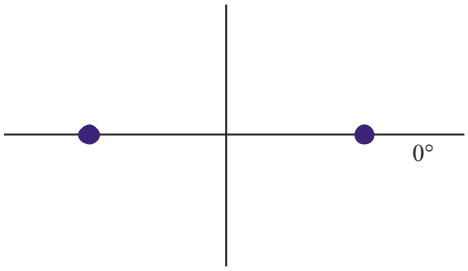


Spectrum-6.6-11

La Fig. resultante se denomina «diagrama de constelación». En la Fig. 6.6-12 se muestra el diagrama de la constelación de una señal MDP-2.

FIGURA 6.6-12

Diagrama de la constelación de MDP-2



Spectrum-6.6-12

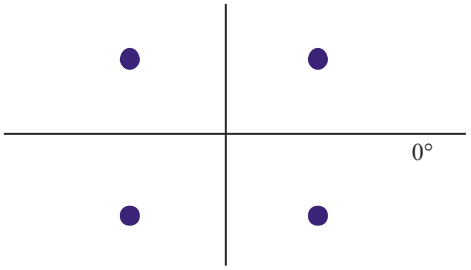
En todos los ejemplos de MDA, MDF y MDP utilizados hasta ahora, la portadora de RF sólo tiene dos estados en el momento de la decodificación (MDA, con portadora «activada» o «desactivada»; MDF con frecuencia f_1 o f_2; MDP con fase «0°» o «180°»). Por tanto, dichos sistemas sólo pueden transmitir un bit de datos de la fuente en cada paso. En dichos casos, la velocidad del reloj y la velocidad binaria de datos es la misma.

Si se definen más de dos estados diferentes en la portadora de RF, en un solo paso puede transmitirse la información contenida en dos o más bits. Un ejemplo de ello, es la MDP-4 o modulación por desplazamiento de fase en cuadratura. La fase de la portadora de RF en el instante de decodificación puede ser 45°, 135°, 225° o 315°. El diagrama de la constelación se representa en la Fig. 6.6-13.

Cada uno de los cuatro puntos de la constelación representa dos bits originales. Los bits que se transmiten en cada paso se denominan «símbolo». La conexión entre símbolo y estado de RF (punto de la constelación) se establece mediante el esquema de codificación:

FIGURA 6.6-13

Diagrama de la constelación de una señal MDP-4



Spectrum-6.6-13

CUADRO 6.6-1

Ejemplo de esquema de codificación MDP-4

Símbolo (bits originales)	Fase de la portadora RF
00	45°
01	135°
10	225°
11	315°

El número de símbolos que se transmiten en 1 s se denomina velocidad de símbolos. La portadora RF cambia de estado con la velocidad de los símbolos, siendo la velocidad binaria para MDP-4 el doble que la velocidad de símbolos. Este principio permite aumentar las velocidades binarias sin aumentar la anchura de banda, pues ésta sólo depende de la velocidad de símbolos. Sin embargo, dado que los puntos de la constelación MDP-4 están más cerca entre sí que los de la constelación MDP-2, la señal MDP-4 necesita una relación S/N superior, lo cual no la hace tan robusta como la MDP-2.

Los sistemas digitales modernos utilizan la modulación MDP-8 para combinar 3 bits por símbolo.

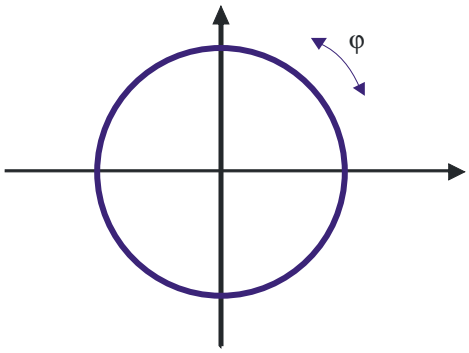
6.6.3.5 Modulación por desplazamiento mínimo

Aunque todos los puntos de la constelación de una señal MDP tienen la misma amplitud, dicho parámetro no permanece constante durante todo el tiempo cuando la anchura de banda de la señal está limitada por el filtrado: en su camino desde un punto de la constelación al siguiente, la longitud instantánea del vector de RF cambia y, por tanto, también lo hace la amplitud de RF. Por ejemplo, en un caso de señal MDP-2 como se representa en la Fig. 6.6-2, el camino directo desde el punto de la constelación a 0º y a 180º es a través del centro del diagrama. En ese momento, la amplitud de RF seria cero.

Una forma alternativa de modular la fase de la RF (o frecuencia) es mediante el desplazamiento a lo largo de un círculo manteniendo constante la amplitud. La información a transmitir se codifica según el sentido de giro del vector de RF. El receptor sólo tiene que detectar el sentido de rotación para decodificar la señal (por ejemplo, a la izquierda = 0; a la derecha = 1). Tal como se menciona en § 6.6.2.3, el giro el vector de RF es igual a un aumento o una disminución de la frecuencia de RF. Para detectar correctamente la rotación del vector, el menor cambio posible del ángulo del vector entre dos pasos (bits) es de 90º. Esta modulación se denomina «modulación de desplazamiento mínimo» (MDM). En la Fig. 6.6-14 se muestra un diagrama de la «constelación» de una señal MDM, que es un círculo, pues el ángulo real del vector en cada instante de la decodificación no está definido.

FIGURA 6.6-14

Diagrama de la constelación de MDM



Spectrum-6.6-14

Las principales ventajas de la MDM frente a la MDP son que el equipo a utilizar resulta más barato (por ejemplo, amplificadores lineales en el trasmisor y receptores más sencillos) y que la señal de RF siempre está presente, permitiendo una sincronización continua del receptor y relaciones de *S/N* muy bajas.

6.6.3.6 Modulación de amplitud en cuadratura

Cuando se deben combinar más de 3 bits en un símbolo, la modulación MDP no es la idónea porque los puntos de la constelación quedan demasiado próximos entre sí, lo cual requiere una mayor *S/N*.

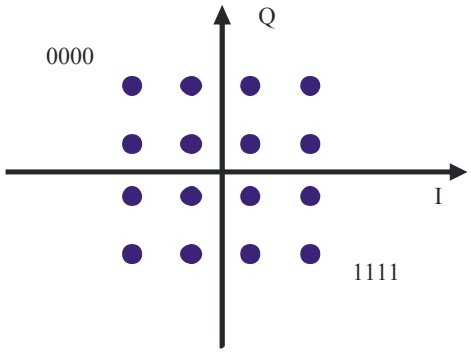
En lugar de ello, se modifican la amplitud y la fase de los puntos de la constelación para que formen un cuadrado, con una constelación cuyos puntos se distribuyen de manera uniforme. La modulación MAQ-16 que se representa en la Fig. 6.6-15 es un ejemplo de este tipo de constelación.

En MAQ-16 se combinan 4 bits por cada símbolo. Si puede asumirse una *S/N* suficientemente grande (por ejemplo, en transmisiones en redes por cable), se llega a utilizar MAQ-256 con 8 bits por símbolo, e incluso MAQ-1024 con 10 bits por símbolo.

Los transmisores modernos que utilizan procesado digital de la señal (DSP) no modifican realmente la amplitud ni la fase de la portadora de RF. En lugar de ello, la señal de RF transmitida consta de dos componentes de señal de frecuencias de audio que modulan en amplitud dos portadoras de RF de la misma frecuencia con un desplazamiento de fase constante de 90º entre ellas. Las componentes se denominan de fase (I, *inphase*) y de cuadratura (Q, *quadrature*). En la Fig. 6.6-15 los ejes se etiquetan como I y Q. Cada punto de la constelación puede alcanzarse modificando (modulando) la amplitud de cada componente hasta un cierto valor.

FIGURA 6.6-15

Diagrama de la constelación de una señal MAQ-16



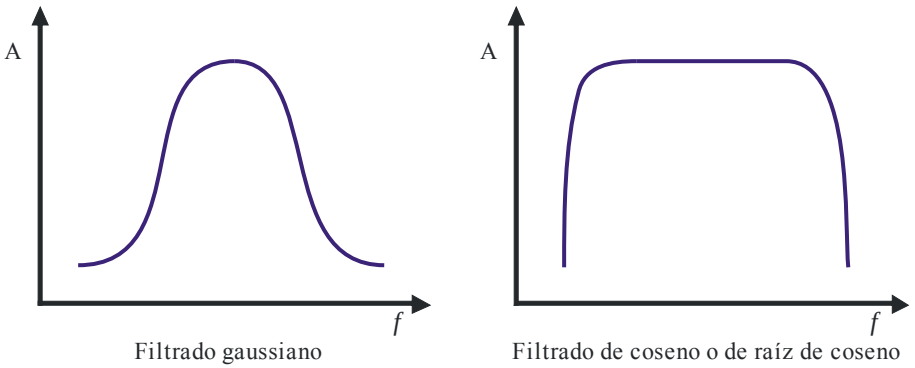
Spectrum-6.6-15

6.6.3.7 Filtrado de la banda base para modulaciones de portadora única

La señal moduladora digital sólo consta de «unos» y «ceros» y tiene una representación rectangular en el dominio del tiempo. Si la señal de RF siguiera con precisión a la señal digital, el vector resultante cambiaría sus estados (amplitud, frecuencia y fase) inmediatamente cada vez que la señal de datos presentara una pendiente. Ello produciría un espectro de banda muy ancha como las señales radar. Dado que el receptor sólo espera que en el instante de la decodificación el vector de RF se encuentre en uno de los puntos de la constelación, es posible que en el periodo entre dos pasos se produzca un cambio lento de estado. A tal fin puede insertarse un filtro paso bajo antes del proceso de modulación (es decir, en la banda base). Se evita así que la señal tenga bordes abruptos en el dominio del tiempo, reduciéndose considerablemente la anchura de banda de RF resultante. Debido a ciertas restricciones (no existencia de interferencia entre un símbolo y el siguiente), sólo pueden utilizarse filtros gaussianos y de coseno alzado. Algunos sistemas dividen el filtro de coseno de forma que la mitad del mismo se aplique en el transmisor y la otra mitad en el receptor. Estos filtros «mitad de coseno» se denominan filtros «raíz de coseno alzado» o filtro RRC (*root raised cosine*). En la Fig. 6.6-16 se representa la forma espectral de las señales digitales de portadora única después del filtrado de banda base.

FIGURA 6.6-16

Espectro de señales de portadoras únicas digitales filtradas



Spectrum-6.6-16

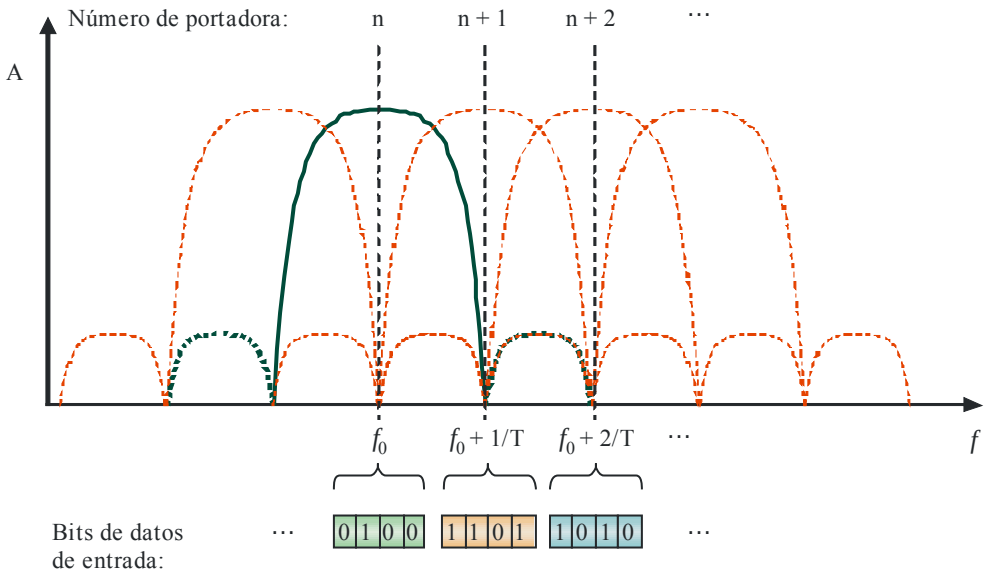
6.6.3.8 Multiplexación por división de frecuencias ortogonales

La multiplexación por división de frecuencias ortogonales (MDFO) es un método que combina un gran número de portadoras moduladas digitalmente para formar un conjunto [Carlson, 1986], [Lymer, 1994]. En función de su modulación, cada portadora se modula con la información de un grupo de bits (normalmente 4 ó 6). Los datos del tren de entrada se dividen en tantos grupos como portadoras MDFO (hasta varios miles). Dado que todas las portadoras se transmiten a la vez (en un solo paso), el tamaño del símbolo de un sistema MDFO es extremadamente elevado (varios kbits), permitiendo una elevada velocidad de datos con una velocidad de símbolos muy baja.

Si la fase de referencia de las portadoras adyacentes está desplazada 90º, la separación entre dichas portadoras puede ser tan reducida como la velocidad de símbolos. En ese caso, el espectro de las portadoras moduladas se solapa sin afectar a la decodificación de las portadoras vecinas. En la Fig. 6.6-17 se ilustra cómo se conforman los conjuntos de señales MDFO. En dicho ejemplo se aplica la modulación de las portadoras con MAQ-16, es decir, cada portadora se modula con un grupo de cuatro bits.

FIGURA 6.6-17

Portadoras MDFO con modulación MAQ-16



Spectrum-6.6-17

Las señales MDFO completas se generan utilizando una transformada rápida de Fourier (FFT) inversa y se demodulan mediante la FFT.

El solapamiento espectral de las portadoras moduladas hace que el espectro de la señal MDFO tenga, en su conjunto, una forma rectangular, tal como se representa en la Fig. 6.6-18, con una línea superior semejante a ruido. No se distinguen las portadoras individuales.

A modo de ejemplo, uno de los sistemas de radiodifusión de video digital terrenal (DVB-T) utilizado en Europa tiene 6 817 portadoras, moduladas con MAQ-64, es decir, cada una con 6 bits de información por paso. Por tanto, el tamaño total del símbolo es:

$$6 * 6\,817 = 40\,902 \text{ bits}$$

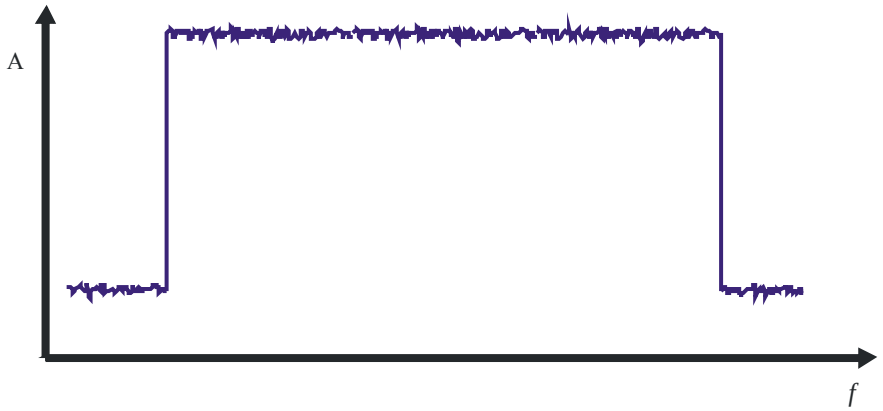
La separación entre portadoras es de 1,11 kHz, ajustando la tasa de símbolos a 0,9 ms. Por tanto, la velocidad bruta de datos de este sistema es:

$$40\,902 \text{ bits} / 0{,}9 \text{ ms} = 45{,}447 \text{ Mbit/s}$$

El sistema es muy robusto contra la interferencia y el desvanecimiento selectivo en frecuencia ya que los datos de entrada están distribuidos en numerosas portadoras. Aunque varias portadoras queden inutilizables, los datos de las restantes portadoras siguen siendo utilizables.

Si se aplica corrección de errores inteligente en recepción (FEC), el receptor puede reconstruir íntegramente el símbolo.

FIGURA 6.6-18
Espectro MDFO (principio)



Spectrum-6.6-18

La baja velocidad de símbolos permite introducir un «intervalo de guarda» relativamente largo. Se trata de un periodo de tiempo adicional delante de cada símbolo en el que se repite la información. El receptor puede esperar que pase el intervalo de guarda antes de iniciar la decodificación. Si antes de que termine el intervalo de guarda se reciben ecos debidos a trayectos múltiples, dichos ecos pueden contribuir a mejorar la recepción añadiéndose a la señal directa.

Si los datos de entrada presentan un patrón regular, puede ocurrir que todas (o al menos muchas) de las portadoras tengan la misma fase y amplitud. Debido al elevado número de portadoras del conjunto, se produce un elevado número de crestas del nivel total a transmitir. Las etapas de salida de un transmisor MDFO se deben dimensionar para dicho nivel de cresta, mientras que el nivel medio, que afecta a la cobertura, sería mucho menor.

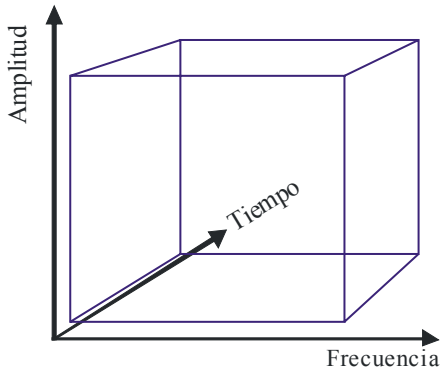
Para evitar que esto ocurra, el tren de datos se codifica antes de la transmisión, de forma que la señal resultante tenga apariencia de ruido. Dicho sistema se conoce como MDFOC, es decir, multiplexación por división de frecuencias ortogonales codificadas.

6.6.4 Métodos de acceso al espectro

La capacidad total del canal de transmisión puede simbolizarse mediante un cubo en un diagrama cartesiano tridimensional como el de la Fig. 6.6-19.

FIGURA 6.6-19

Capacidad de un canal de transmisión



Spectrum-6.6-19

La cantidad de información que puede transmitirse está limitada por tres parámetros:

– *Tiempo:*

  Es bastante obvio que cuanto más tiempo se tenga, más información puede transmitirse

– *Frecuencia o anchura de banda:*

  Todas las modulaciones digitales tienen una dependencia entre velocidad de símbolos y anchura de banda de RF resultante. Por tanto, si hay más anchura de banda, puede modularse con una velocidad de símbolos mayor y transmitir más datos útiles (bit/s).

– *Nivel o relación señal a ruido y señal a interferencia:*

  Si se aumenta la potencia del transmisor, mejorando la relación señal a ruido o señal a interferencia en el receptor, puede utilizarse un esquema de modulación de mayor nivel, es decir, con más bits por símbolo (por ejemplo, MAQ-64 en lugar de MAQ-16). Ello permite transmitir más bits útiles en el mismo tiempo.

En muchos sistemas reales, hay más de un usuario que necesita acceder al canal de transmisión y sus recursos. Por ejemplo, un sistema celular en el que muchas personas desean telefonear el mismo tiempo en el ámbito de una estación base.

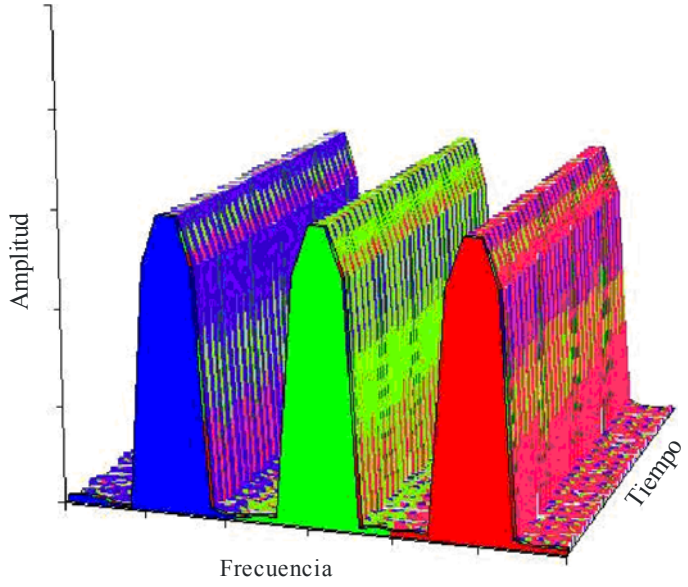
La utilización óptima de la capacidad del canal se alcanzaría cuando el cubo de la Fig. 6.6-19 queda completamente relleno, sin huecos. No obstante, el sistema debe estar organizado para que varios usuarios puedan acceder a los recursos. Los métodos de acceso al espectro para organizar esta situación son los denominados modos de acceso múltiple.

6.6.4.1 Acceso múltiple por división de frecuencia

El acceso múltiple por división de frecuencia (AMDF) es el método más sencillo de acceso múltiple y también funciona en sistemas analógicos. Cada usuario puede utilizar una parte del espectro continuo disponible. Dicho principio se ilustra en la Fig. 6.6-20.

Es necesario mantener una cierta separación de frecuencias entre las emisiones de cada usuario debido a que, en la práctica, los filtros de selección de los receptores no son rectangulares. Este requisito no permite utilizar dichos «huecos» en el dominio de la frecuencia para transmisión de datos. El cubo de capacidad del canal de transmisión no se utiliza plenamente.

FIGURA 6.6-20
Acceso múltiple por división de frecuencia



Spectrum-6.6-20

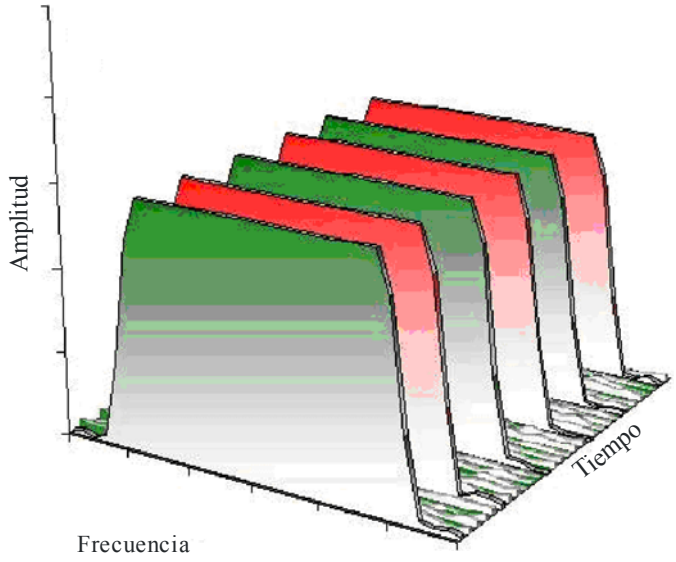
6.6.4.2 Acceso múltiple por división del tiempo

La transmisión digital tiene la ventaja de que, a menudo, los datos pueden transmitirse más rápido que el suministro de una fuente de datos. En el caso de un sistema telefónico celular, la señal de voz se digitaliza y se divide en bloques de una determinada longitud. Si la velocidad de transmisión lo permite, los datos de dichos bloques pueden transmitirse en ráfagas, dejando libres los tiempos no utilizados para la transmisión de datos de otros usuarios. El sistema divide, por tanto, el tiempo disponible entre usuarios y de ahí su nombre «acceso múltiple por división del tiempo» (AMDT). Cada usuario transmite sus datos en «intervalos de tiempo», utilizando toda la anchura de banda del canal de transmisión. En la Fig. 6.6-21 se ilustra este principio.

Si uno de los usuarios se encuentra lejos del receptor común (la estación base), su señal llegará con retardo debido a la velocidad limitada de la luz, pudiendo llegar al receptor común coincidiendo con el intervalo de tiempo siguiente perteneciente a otro usuario que puede encontrarse cerca de dicho receptor común. Para evitar la interferencia, deben insertarse tiempos de guarda durante los cuales no se permite que ningún usuario transmita. Por tanto, existirán «intervalos» en el dominio del tiempo en los que no pueden transmitirse datos y, en consecuencia, tampoco en AMDT se utiliza completamente el cubo de la capacidad del canal de transmisión.

FIGURA 6.6-21

Acceso múltiple por división del tiempo



Spectrum-6.6-21

6.6.4.3 Espectro ensanchado

Las señales AMDF y AMDT son, por lo general, susceptibles a la interferencia y, por tanto, necesitan la coordinación entre usuarios ya sea en frecuencia o en el tiempo. Las señales de espectro ensanchado son mucho menos susceptibles a la interferencia y a menudo se describen como señales de compartición de potencia. Muchas señales de espectro ensanchado pueden ocupar simultáneamente el mismo espectro.

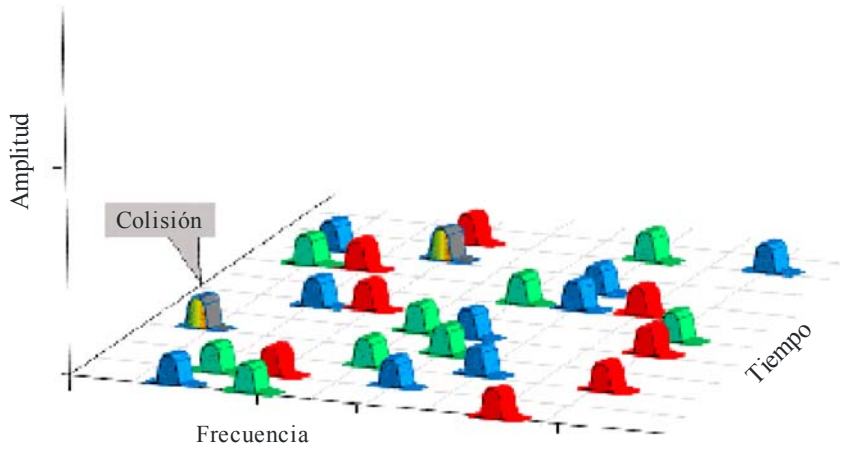
Las señales de espectro ensanchado se crean al modular una señal de banda estrecha para que ocupe una mayor anchura de banda (ensanchamiento). Dado que el proceso de ensanchamiento no aumenta la potencia, se reduce la densidad espectral de potencia, haciendo más difícil la detección de señales no coherentes. Así, la señal es más difícil de observar en una medición de la potencia espectral. Durante el proceso de desensanchado, se minimizan los efectos de la interferencia de otras señales. Las dos técnicas más comunes para generar una señal de espectro ensanchado son por salto de frecuencia (FHSS) y por secuencia directa (DSSS).

6.6.4.3.1 Espectro ensanchado por salto de frecuencia

Como el propio nombre indica, las señales de espectro ensanchado por salto de frecuencia (FHSS) se crean modificando periódicamente la frecuencia de transmisión. Para demodular la señal, los receptores deben conocer, o recuperar, la temporización y patrón del salto de frecuencia. Para minimizar la interferencia, los distintos transmisores tendrán diferentes secuencias de salto o una fase diferente en una secuencia larga. Los transmisores no pueden coordinar o sincronizar en el tiempo sus secuencias de salto, produciéndose ocasionalmente colisiones, tal como se ilustra en la Fig. 6.6-22 mediante espectros de alta potencia representados con colores del arco iris. Generalmente, se utilizan códigos de corrección de errores para recuperar los datos perdidos durante los breves periodos de interferencia. Puesto que las señales son más difíciles de detectar y también más robustas frente a interferencias, las señales FHSS se utilizan a menudo en aplicaciones militares. Las señales FHSS también se utilizan en gamas de frecuencias sin licencia, en las que la coordinación entre usuarios resulta difícil. El Sistema Mundial para Comunicaciones Móviles (GSM) utiliza salto de frecuencia coordinado.

FIGURA 6.6-22

Espectro ensanchado por salto de frecuencia



Spectrum-6.6-22

6.6.4.3.2 Espectro ensanchado por secuencia directa

Las señales de espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS) son señales de banda ancha creadas a partir de señales de banda estrecha que modulan una secuencia de datos de baja velocidad con una secuencia de velocidad más elevada. Una secuencia de datos de baja velocidad se combina con una secuencia de datos de alta velocidad aplicando una función OR exclusiva (XOR). Alternativamente, una señal MDP-4 puede modular una señal MDP-2 mediante una operación de multiplicación o mezcla. La secuencia binaria de la secuencia de alta velocidad, a menudo se denomina código de ensanchamiento, código de aleatorización o clave. Los códigos de ensanchamiento pueden ser largos o breves y puede ser una secuencia específica, como un código Baker, o una secuencia más general obtenida a partir de un generador de números seudoaleatorios (PRN).

El proceso de desensanchado del receptor recupera la señal original de banda estrecha. El proceso de desensanchado produce la dispersión de señales no deseadas, que no son eliminadas completamente y que aparecen en el receptor como ruido de banda ancha. Gran parte, aunque no toda, de la energía de la señal interferente se elimina mediante filtros de banda estrecha (generalmente en forma de integradores). En la Fig. 6.6-23 se ilustra el concepto de compartición de potencia de la modulación DSSS. En dicha Figura, TX1 es la potencia más elevada. Ello hace que los niveles de interferencia más altos sean de TX1 sobre RX2. Los sistemas AMDC ajustan constantemente la potencia transmitida para equilibrar la calidad de funcionamiento de todos los usuarios.

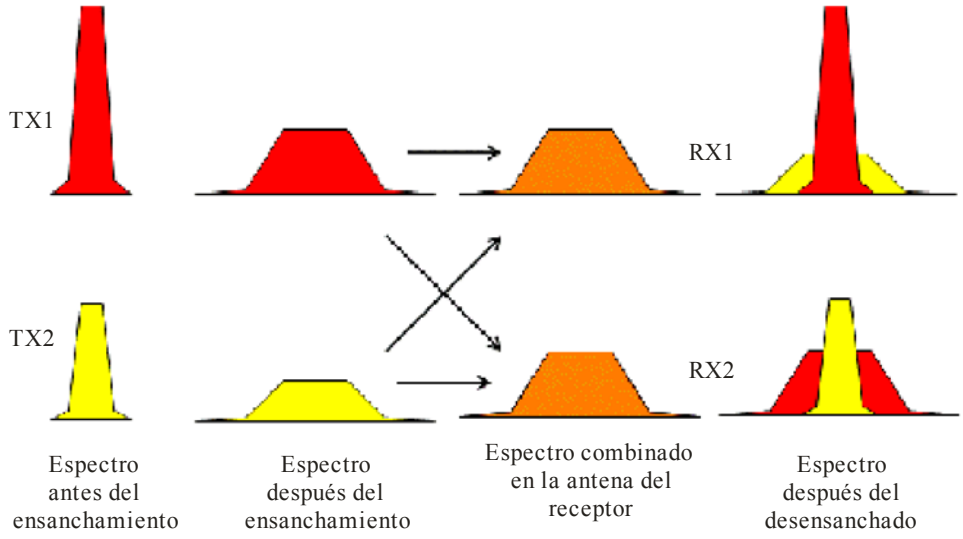
6.6.4.4 Acceso múltiple por división de código

Para evitar la existencia de «intervalos» no utilizados en el cubo de capacidad (véase la Fig. 6.6-19), los datos de usuario pueden modularse digitalmente mediante una «clave» constituida por una secuencia fija. Dicha modulación se realiza mediante la operación lógica OR-exclusiva (XOR) de dicha clave con cada bit de datos de usuario. Como consecuencia de ello, en lugar de un «1» se transmite la inversa de la clave y en lugar de un «0» se transmite la clave. En la Fig. 6.6-24 se ilustra este principio con un ejemplo de clave de 4 bits.

El receptor funciona siempre de la misma forma: se comparan grupos de 4 bits (por ejemplo) con la clave. El resultado es siempre «1111» o «0000». Los 4 bits del resultado se promedian para generar el bit de salida real. Este proceso se ilustra en la Fig. 6.6-25.

FIGURA 6.6-23

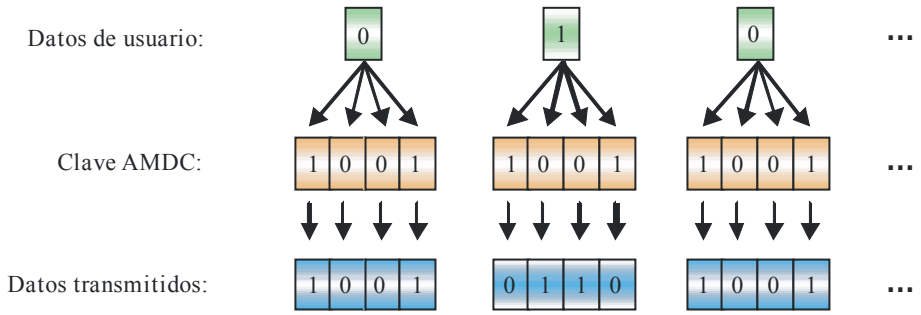
Espectro ensanchado por secuencia directa



Spectrum-6.6-23

FIGURA 6.6-24

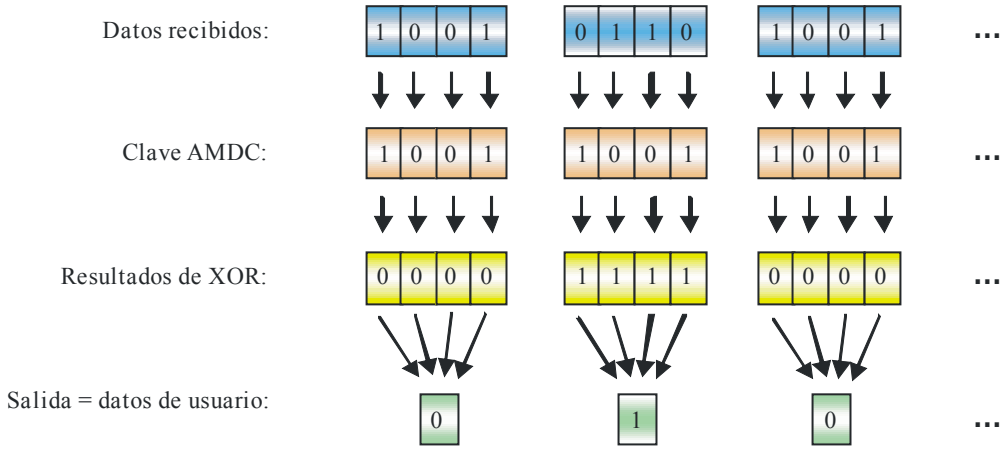
Modulación digital con una clave AMDC



Spectrum-6.6-24

FIGURA 6.6-25

Recepción en AMDC con una clave correcta

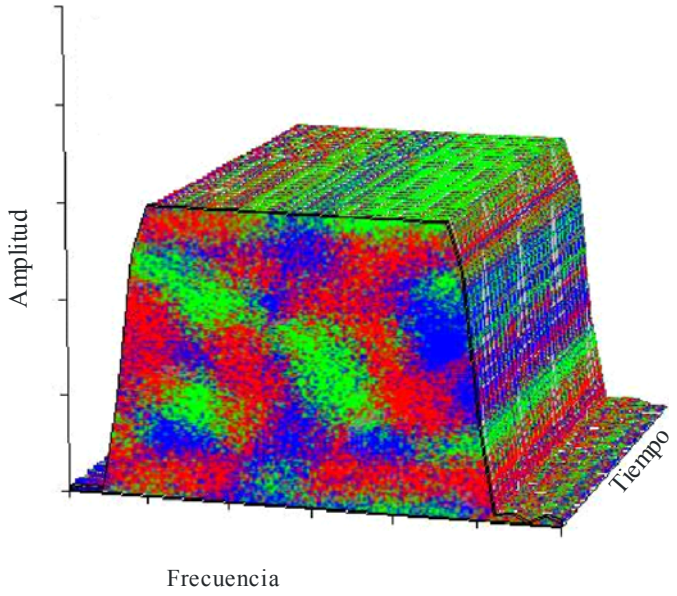


Spectrum-6.6-25

Dado que la cantidad de datos a transmitir es mucho mayor que los datos de usuario (en un factor que depende de la longitud de la clave), la velocidad de transmisión también debe ser más elevada, requiriendo por tanto una anchura de banda mucho mayor. En el ejemplo anterior, con una clave de 4 bits se genera un tren de datos cuatro veces más rápido que el tren de datos de usuario. Para transmitir esta cantidad de datos con los mismos parámetros de modulación, la velocidad de símbolos debe ser 4 veces superior y la anchura de banda 4 veces mayor. Si las claves cumplen determinados requisitos, la «redundancia» de los datos de usuario puede utilizarse en el receptor para admitir tasas de errores muy elevadas antes de que la señal se considere degradada. En este tipo de sistemas, hasta cuatro estaciones pueden transmitir simultáneamente a la misma frecuencia, cada una de ellas con una clave de 4 dígitos diferente, y el receptor puede filtrar y diferenciar «su» señal de las restantes. El «truco» está en diseñar las claves utilizadas de forma que la operación XOR con un bloque codificado con una clave «errónea» tenga el mismo número de «1» y «0», de forma que la integración de todo el bloque se encuentre justamente en el punto medio entre «0» y «1». Una secuencia de 4 bits soporta hasta cuatro canales de datos. Cuatro claves de 4 bits que satisfacen los requisitos anteriores son: 1111, 1100, 1010 y 1001. En transmisión se suman cuatro trenes de datos ensanchados con dichas claves. En recepción la señal se separa de nuevo en cuatro trenes de datos independientes utilizando las mismas claves para desensanchar la señal compuesta. La eficiencia espectral bruta de la señal AMCD es superior a la de AMDF y AMDT pues el cubo de capacidad no presenta espacios vacíos. Ello se ilustra en la Fig. 6.6-26.

FIGURA 6.6-26

Acceso múltiple por división de código



Spectrum-6.6-26

Las interferencias mutuas entre usuarios pueden eliminarse utilizando códigos, o claves, de ensanchamiento espectral ortogonales siempre que sea posible controlar que las señales de los distintos usuarios lleguen al receptor con la alineación temporal debida. Dicha alineación temporal es necesaria para que los códigos de ensanchamiento espectral sean ortogonales (no interferentes). Mediante códigos de ensanchamiento espectral ortogonales, los usuarios no comparten la potencia, sino un espacio de códigos, y de ahí el término «acceso múltiple por división de código» (AMDC). Los sistemas celulares AMDC utilizan códigos de ensanchamiento espectral ortogonales para separar los trenes de datos (canales de tráfico y de control) en un sector, y códigos no ortogonales para separar estaciones base y móviles.

Puesto que los sistemas celulares utilizan códigos de ensanchamiento espectral no ortogonales para distintos transmisores (estaciones base y móviles), las señales de todos los usuarios deben llegar al receptor prácticamente con la misma intensidad de campo a fin de conseguir una calidad de funcionamiento óptima. En un entorno real, como el de una red telefónica celular, ello no es posible salvo que todos los transmisores ajusten constantemente su potencia transmitida conforme a información recibida del receptor común (la estación base). Ello requiere un canal de organización rápido que ocupe una parte considerable de la velocidad de datos disponible, reduciendo la velocidad neta disponible para datos de usuario. Una vez que se ha aislado la señal de un transmisor mediante la primera acción de desensanchado espectral con código no ortogonal, los canales de datos independientes pueden separarse y ser recuperados mediante códigos (claves) ortogonales.

6.6.4.5 Acceso múltiple por división especial (AMDE) y canales espaciales

El espacio es la cuarta dimensión que puede ampliar el modelo de capacidad del canal de la Fig. 6.6-19. Los sistemas celulares tradicionales ofrecen dos ejemplos obvios y sencillos de reutilización de recursos espectrales en múltiples emplazamientos mediante la frecuencia o un patrón de reutilización de código, o bien, mediante antenas direccionales que permiten la reutilización en diferentes ángulos (sectores).

En entornos donde se producen reflexiones con un número significativo de trayectos múltiples, éstos pueden aprovecharse para crear nuevos canales espaciales que aumenten la capacidad de datos, la robustez o permitan soportar más usuarios.

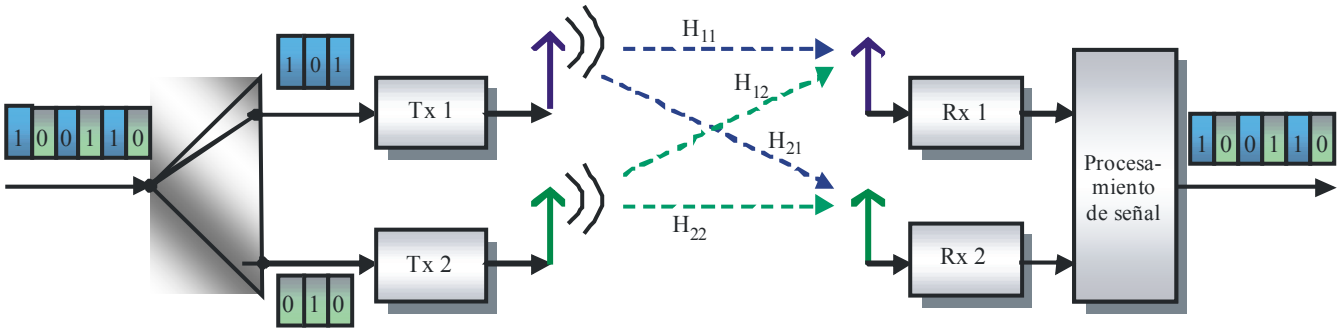
La utilización de redes de antenas próximas junto con una ganancia y modulación propia de cada antena, permiten entregar la máxima potencia posible en un emplazamiento y minimizarla en otro. A este método se denomina acceso múltiple por división espacial (AMDE). Son ejemplos de AMDE las técnicas de control de haces y de control de nulos, que son efectivas en entornos sin reflexiones. El haz correspondiente a un usuario se apunta en la dirección de dicho usuario, al tiempo que se fuerzan nulos en los puntos adecuados para que la señal del primer usuario no interfiera a los restantes. El AMDE también funciona en entornos con reflexiones, aunque el diagrama de radiación sea mucho más complicado y sea necesario conocer el canal para crear el vector de control. El vector de control es el conjunto de ajustes de amplitud y fase de la señal que alimenta cada antena.

La técnica denominada de entrada múltiple –salida múltiple (MIMO, *multiple input, multiple output*) está muy relacionada con el AMDE, y hace referencia al empleo de varias antenas transmisoras y varias antenas receptoras. Los sistemas MIMO utilizan redes de antenas con suficiente separación entre ellas para minimizar la correlación entre antenas. Dicha separación impide, por lo general, que se genere un único haz. Además, existen otros factores como la polarización que pueden aumentar el número o calidad de los canales espaciales.

El aumento teórico de la capacidad de un sistema MIMO viene determinado por el número de antenas transmisoras y receptoras. Un sistema MIMO 2x2, como el representado en la Fig. 6.6-27 puede tener, en teoría, el doble de la capacidad de un sistema que sólo utilice una antena transmisora y una antena receptora; un sistema MIMO 3x3 podría tener una capacidad triple.

FIGURA 6.6-27

Sistema de entrada múltiple y salida múltiple



Spectrum-6.6-27

Las técnicas MIMO están incluidas en las normas LTE, WiMax y WiFi (802.11n).

El concepto es similar a disponer de un segundo par de hilos que duplique la capacidad de un cable. Los hilos presentan un buen aislamiento entre ellos, mientras que en los sistemas radioeléctricos MIMO la señal recibida en cada antena es una combinación lineal de las señales transmitidas. Ello es similar a un cable que tuviera una elevada diafonía entre pares. En un sistema MIMO, los términos de diafonía, H_{12} y H_{21} ilustrados en la Fig. 6.7-27, pueden ser distintos de cero sin que ello suponga pérdida de capacidad. Lo importante es la situación de la matriz de canales [H]. Si debido a los trayectos múltiples las señales recibidas Rx1 y Rx2 contienen combinaciones lineales significativamente diferentes de las señales Tx1 y Tx2, entonces pueden recuperarse los trenes de datos originales. Por ejemplo, si las dos señales recibidas son Rx1 = (Tx1+Tx2) y Rx2= 2*(Tx1-Tx2), entonces Tx1 puede recuperarse sumando las dos señales recibidas como 0.5*Rx1 + 0,25*Rx2. De forma similar puede recuperarse Tx2. Por el contrario, si el sistema MIMO se encuentra en un entorno sin reflexiones, ambos receptores verán la misma combinación lineal de señales (por ejemplo, Rx1=Tx1+Tx2 y Rx2=0.9*(Tx1+Tx2)). En esta situación, aunque los niveles de las dos señales recibidas pueden ser diferentes, sólo existe un canal espacial. Tx1 y Tx2 no pueden recuperarse de forma independiente mediante una combinación lineal de las señales recibidas.

Bibliografía

ANDERSON, J., AULIN, T. and SUNDBERG, C.-E.[1986] *Digital Phase Modulation*. Plenum Press New York, Estados Unidos de América.

CARLSON, A. B. [1986] *Communications Systems*. McGraw Hill.

LEE, E. A. and MESSERSCHMIDT, D. G. [1988] *Digital Communication*. Kluwer, Academic Publishers.

Recomendaciones e Informes del UIT-R

NOTA – Siempre debe utilizarse la versión más actualizada de cada Recomendación.

Recomendación UIT-R SM.328 – Espectros y anchuras de banda de las emisiones.

Recomendación UIT-R SM.1541 – Emisiones no deseadas en el dominio fuera de banda.

Informe UIT-R SM.2048 – Utilización del criterio de anchura de banda a x dB para determinar las propiedades espectrales de un transmisor en el dominio fuera de banda.

6.7 Transformada rápida de Fourier

6.7.1 Principios básicos

Cuando una señal debe pasarse del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, se utiliza el método denominado Transformada de Fourier (FT).

Este método se basa en el hecho de que cualquier señal real, con independencia de su forma de onda, puede construirse mediante la suma de un número de señales de onda sinusoidales de distintas amplitudes, frecuencias y fases. En consecuencia, cualquier señal en el tiempo puede descomponerse en una serie de señales sinusoidales en el dominio de la frecuencia.

Aunque, a primera vista parezca que el método de la transformada de Fourier es la mejor manera de solucionar todos los problemas del análisis de señales, existen algunas restricciones así como incertidumbres de las mediciones consecuencia del necesario proceso de conversión analógico a digital y de la transformada de Fourier en sí misma. Para entender cabalmente dichas restricciones es necesario un breve análisis de los principios.

Jean Baptiste Joseph, Barón de Fourier, demostró en 1822 que un fenómeno variable con el tiempo puede considerarse como la suma de un número de componentes de frecuencia sinusoidales, cada uno con su propia amplitud y fase.

Para ello, definió las denominadas series de Fourier para señales periódicas y de banda limitada, presentadas en una forma común en la ecuación (6.7-1).

$$x(t) = \sum_{k=_N}^{N} C_k e^{j(\omega_k t)} \tag{6.7-1}$$

Las series de Fourier sólo son válidas para señales periódicas que tengan una relación armónica entre ellas, pero en la práctica es mucho más común encontrar señales no periódicas. El número de componentes de la forma de onda es, en ese caso, infinito. La ecuación pasa a tener la forma de una integral:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) \cdot e^{j(\omega t)} \mathrm{d}\omega \tag{6.7-2}$$

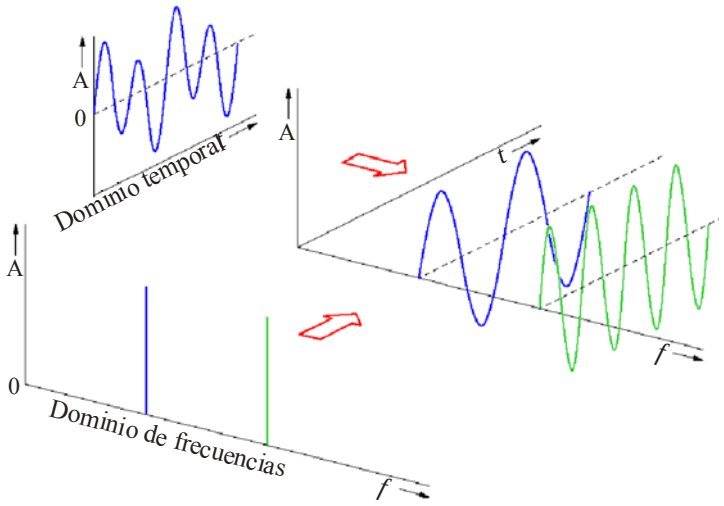
La función inversa de esta ecuación puede escribirse como:

$$x(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t) \cdot e^{j(\omega t)} \mathrm{d}t \tag{6.7-3}$$

Esta última ecuación permite teóricamente calcular el espectro complejo de una señal continua en el dominio de la frecuencia utilizando su forma de onda en el dominio del tiempo.

FIGURA 6.7-1

Dominio del tiempo y dominio de la frecuencia



Spectrum-6.7-01

Desafortunadamente, el método no es adecuado para calcular el espectro de señales arbitrarias. Si bien las señales son continuas y la integración debería realizarse desde menos (-) infinito a mas (+) infinito, ello requeriría una capacidad de cálculo infinita. El problema puede resolverse haciendo que la señal en el tiempo sea discreta mediante muestreo y aplicando la transformada discreta de Fourier (DFT). Si una señal tiene una anchura de banda limitada, puede caracterizarse mediante sus muestras tomadas en los instantes $n \cdot T_s$.

donde:

n: número entero desde 0 a $N - 1$,

T_s: periodo de muestreo

N: número total de muestras (véase § 6.7.2).

Aplicando el algoritmo de la DFT a esta matriz de N elementos de muestras en el dominio del tiempo, se obtiene una matriz de N elementos o componentes en el dominio de la frecuencia.

La fórmula de la DFT es la siguiente:

$$X[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j\frac{2\pi kn}{N}} \tag{6.7-4}$$

Su inversa es:

$$x[n] = \sum_{k=0}^{N-1} X[k] \cdot e^{j\frac{2\pi kn}{N}} \tag{6.7-5}$$

$X[k]$ denota el valor de la componente espectral a la frecuencia de $k \cdot f_0 = k\frac{1}{N \cdot T_s}$, mientras que x[n] denota el valor de la señal en el dominio del tiempo en el instante de tiempo $n \cdot T_s$.

La combinación de ambas ecuaciones se denomina pareja DFT.

Una DFT puede procesar bloques de muestras de longitud arbitraria. No obstante, si el bloque tiene una longitud potencia de 2, el cálculo puede ser mucho más rápido. Esto es lo que se denomina Transformada rápida de Fourier (FFT).

Antes de aplicar la expresión matemática de la transformada de Fourier, deben almacenarse en memoria una cierta cantidad de datos que representan la forma de onda y que se denominan «registro temporal» o «trama». La duración mínima de este registro temporal se denomina tiempo de recopilación o de adquisición. La forma de onda se analiza íntegramente en un solo paso y se convierte matemáticamente en una serie de ondas sinusoidales de diferente amplitud, frecuencia y fase. El resultado es el análisis del espectro completo en un momento dado.

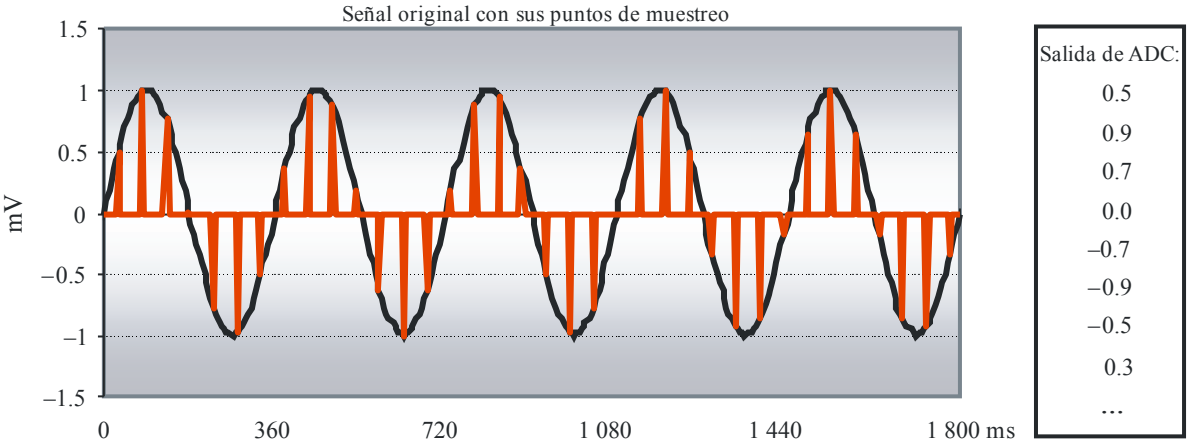
La salida de la transformada de Fourier toma un valor complejo, con independencia de que la forma de onda de entrada sea real o compleja (por ejemplo, real e imaginaria, o I y Q). Si la forma de onda de entrada es exclusivamente real, el resultado espectral será conjugado simétrico. El cálculo del espectro de potencia a partir del resultado de la transformada de Fourier requiere calcular el valor del cuadrado de cada punto de frecuencia. El espectro de potencia es la cantidad que normalmente será promediada cuando se utilice la promediación.

6.7.2 Conversión de analógico a digital y muestreo

Tratándose de un proceso matemático, la forma más conveniente de realizar la transformada de Fourier es mediante un procesador digital de señal (DSP) que, esencialmente, es una computadora especial. A tal fin, debe disponerse de la señal temporal en forma digital, para lo cual se realiza la conversión de analógico a digital (ADC).

FIGURA 6.7-2

Conversión de analógico a digital



Spectrum-6.7-02

Una señal analógica se convierte en digital tomando muestras de su amplitud durante un cierto periodo de tiempo. El teorema de Nyquist establece que la frecuencia de muestreo debe ser superior al doble de la anchura de banda de la forma de onda a muestrear:

$$fs > 2b$$

Nyquist señaló que la frecuencia de muestreo debe superior al doble de la frecuencia más alta de la forma de onda muestreada.

$$fs > 2f_{max}$$

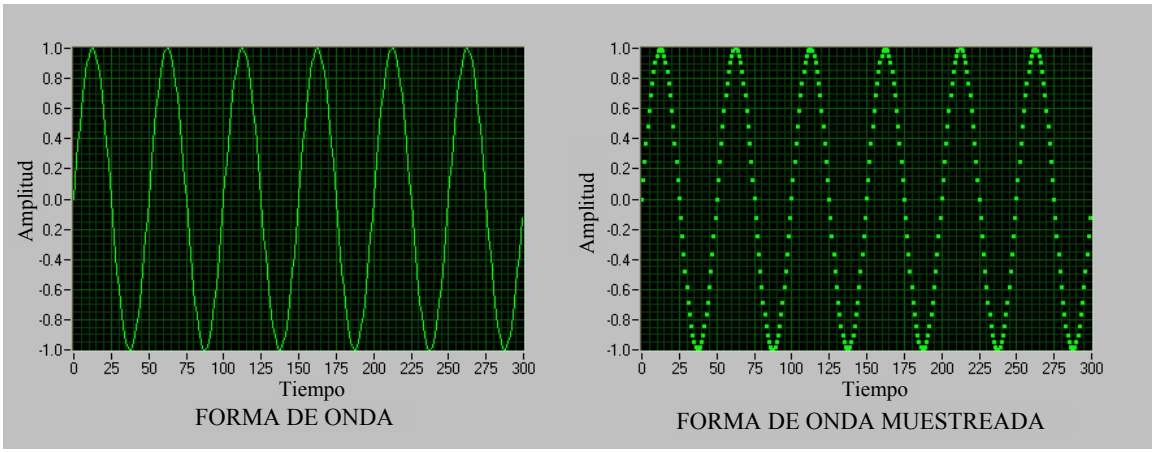
Ésta es la frecuencia de Nyquist, que se aplica a señales reales. En el caso de señales complejas, como la que se obtiene con dos ADC que muestrean la salida de un demodulador IQ, la velocidad de muestreo debe ser mayor que la anchura de banda de la señal ($f_s > b$). No se pierde información de la señal porque en el caso de señales complejas existen dos valores por cada muestra, de forma que la densidad de muestras es la misma que con señales reales para las que se tiene un valor por muestra, pero a doble velocidad.

La salida del ADC es un tren de bits en el que un número representa la amplitud de la señal original en el instante de muestreo.

Si la frecuencia de muestreo es suficientemente elevada, la salida del ADC puede reconstruirse y reconstruir de forma unívoca la forma de onda original. En la Fig. 6.7-3 se ilustra un ejemplo de muestreo.

FIGURA 6.7-3

Muestreo



Spectrum-6.7-03

La precisión de esta representación digital depende de número de bits utilizados para cada valor de amplitud. Las resoluciones típicas de los convertidores analógico a digital son de 14 a 18 bits, lo que representa un total de 262.144 niveles de amplitud. Aunque los valores discretos de amplitud no pueden representar con precisión la señal original, el error debido a este efecto puede minimizarse mediante una adecuada selección de la separación entre cada dos niveles (eligiendo una separación pequeña para valores bajos de la señal y una separación mayor para valores altos de la amplitud de la señal). De esta forma, el rango dinámico de la señal digitalizada puede ser mayor de 100 dB.

Las frecuencias superiores al doble de la velocidad de muestreo quedarían «inframuestreadas», dando lugar a componentes de frecuencia adicionales en las señales digitales que no son parte de la señal original. Para evitar este error, es fundamental que la señal analógica pase por un filtro paso bajo antes del ADC.

Por tanto, la precisión del proceso de digitalización sólo está, en principio, limitada por la velocidad del dispositivo de conversión analógico a digital. Actualmente, los chips de ADC permiten frecuencias de aproximadamente 100 MHz y una profundidad de digitalización de 18 bits. Para analizar frecuencias más altas, la señal de RF debe sufrir previamente un proceso de conversión-reducción hasta una gama de frecuencias que pueda ser digitalizada

6.7.3 Aplicación de ventana

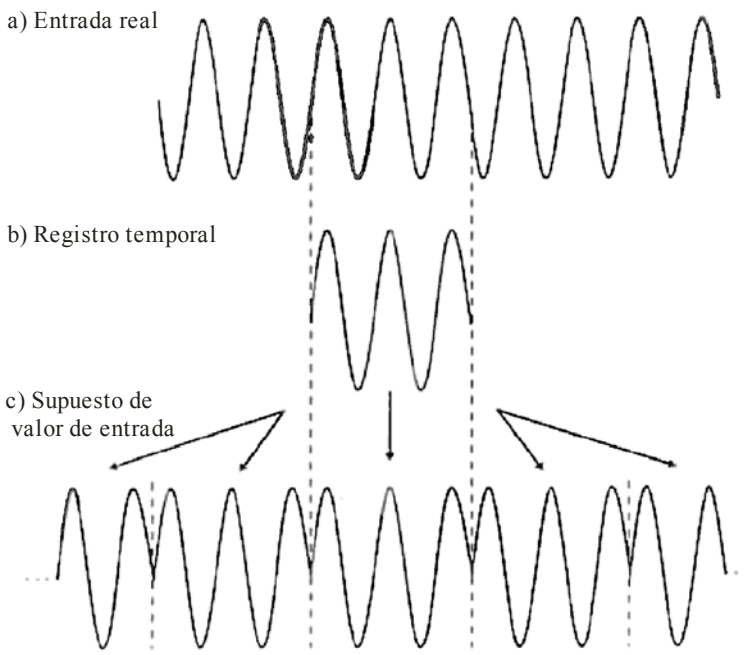
La FFT se calcula sobre un intervalo de tiempo finito. Si la señal a tratar es periódica dentro del intervalo, se considera que el resultado es una representación precisa del espectro de la señal. Si la señal no es periódica en el intervalo, los supuestos fundamentales de la definición de la FFT dejan de ser válidos y la estimación del espectro resultante es menos precisa. En ese caso se utilizan funciones ventana para mejorar la precisión

de la estimación del espectro mediante el conformado de la señal, minimizando los efectos de recorte (cambios bruscos) en los bordes de la ventana.

El procedimiento de la FFT implica que la señal a tratar está presente de forma continua durante un tiempo infinito y que es periódica dentro del registro temporal. Si la señal no es periódica, se producirá una discontinuidad, tal como se muestra en la Fig. 6.7-4. Si la señal es continua, el registro temporal utilizado para calcular la FFT contiene 2,5 ciclos de forma de onda sinusoidal, en lugar del número entero de ciclos supuestos.

FIGURA 6.7-4

FFT de una señal de onda sinusoidal continua



Spectrum-6.7-04

El resultado de la FFT sólo puede representar con precisión un conjunto finito de frecuencias enteras, tales como 2 ciclos, 3 ciclos, etc. Dado que no existe un coeficiente de 2,5 ciclos, en ese caso el resultado indicará erróneamente la existencia de energía en un número entero de frecuencias.

Las señales que están íntegramente comprendidas en un registro temporal tienen la apariencia de señales periódicas desde la perspectiva de la FFT. Dichas señales se denominan de autoventana. Para analizarlas con precisión con la FFT, no debe aplicarse ninguna función ventana adicional (en ocasiones, a esto se denomina aplicación de ventana rectangular): ejemplos de este tipo de señales son las puntas que sólo aparecen una vez y las señales de ráfagas digitales, en tanto en cuanto la ráfaga permanezca en todo momento dentro del registro temporal.

No obstante, para señales continuas es bastante obvio que la aplicación de una ventana modifica la forma de onda original e introduce un cierto error. Dicho error reside en el principio de aplicación de la ventana FFT y no puede evitarse por completo. Sin embargo, en función del parámetro a medir (amplitud, frecuencia, fase) el error puede minimizarse eligiendo una función ventana adecuada.

En la Fig. 6-7-5 se presenta un ejemplo del efecto sobre la señal de la aplicación de ventana.

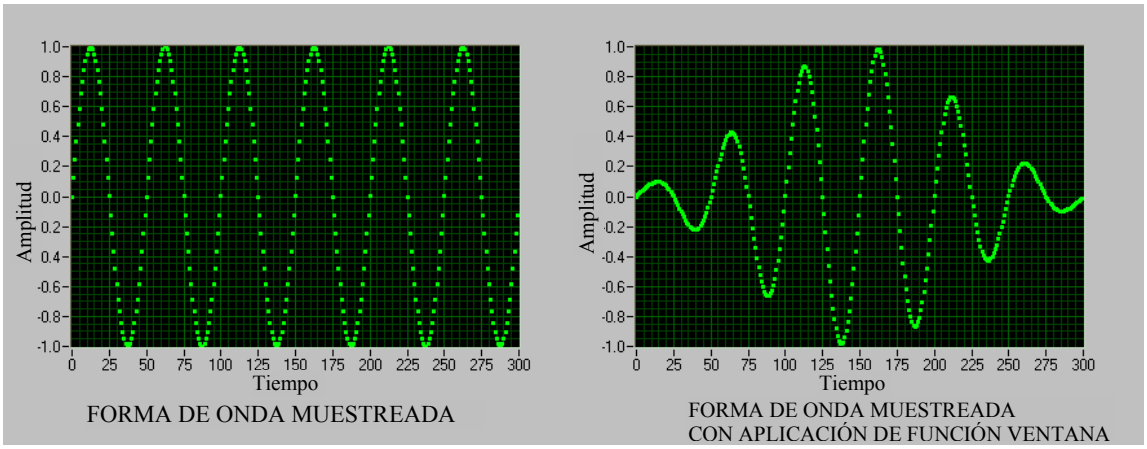
La aplicación de ventana influye en el espectro de frecuencias, tanto en la resolución de frecuencia como en la precisión de la amplitud. La DFT/FFT puede representarse como un banco de filtros en paralelo, cada uno de los cuales filtra una componente de frecuencia. La función ventana es comparable a la respuesta impulsiva de un filtro con la anchura de banda de resolución de un analizador espectral, pues define las características

de funcionamiento en el dominio de la frecuencia, a saber, anchura de banda, factor de forma y lóbulos laterales (banda bloqueada).

Se han desarrollado numerosos tipos de ventana, cada una con sus características específicas.

FIGURA 6.7-5

Función de ventana



Spectrum-6.7-05

Con esta información es obvio que no existe un único tipo de ventana que sea la elección adecuada para todos los casos. Siempre debe considerarse el tipo de señal a analizar (transitoria o permanente) y el objetivo de la medición (énfasis en la resolución de frecuencia o en la precisión de la amplitud) a fin de determinar la ventana con el mejor compromiso.

Los equipos FFT utilizados en la comprobación técnica del espectro a menudo permiten que el usuario seleccione la ventana FFT entre varias posibles. Es necesario conocer las características de las funciones ventana implementadas para seleccionar la más adecuada para cada medición. En el Cuadro 6.7-1 se muestran ejemplos de ventanas comúnmente implementadas en equipos de medida de RF.

CUADRO 6.7-1

Ejemplos de funciones ventana FFT comunes

Función ventana	Aplicación
Rectangular	Utilizada para señales transitorias situadas enteramente dentro del registro temporal.
Hann	Precisión a altas frecuencias
Blackman-Harris o Flattop	Precisión para amplitudes elevadas, alto rango dinámico y supresión del ruido.
Gaussiana	Compromiso entre precisión de frecuencia y de amplitud (en función del factor de forma)

6.7.4 Implementaciones de la FFT

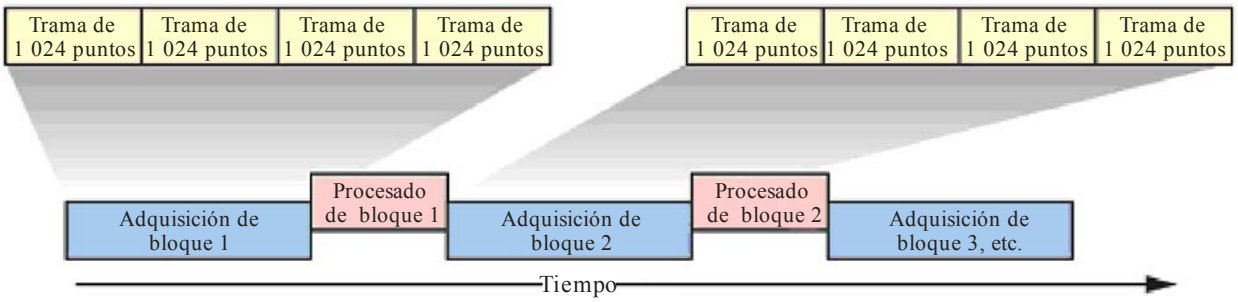
La FFT puede verse como un banco de filtros en paralelo de la anchura de banda de resolución. Puesto el espectro se estima simultáneamente para todas las frecuencias, la FFT produce una estimación del espectro autoconsistente cuando se aplica a formas de onda muy dinámicas.

La construcción en paralelo también proporciona mediciones espectrales más rápidas para anchuras de banda de resolución estrechas en comparación con un analizador de barrido espectral que tenga que realizar la medición de las frecuencias de una en una.

Si la implementación de la FFT es tal que el analizador FFT no puede recopilar datos mientras realiza los cálculos de la FFT, el receptor queda «ciego» durante dichos periodos de cálculo de la FFT y, por tanto, la recepción no es continua y pueden perderse señales de corta duración. Para evitarlo, se han desarrollado diversas técnicas que se han implementados en analizadores de FFT modernos. Una de ellas consiste en recopilar en primer lugar múltiples registros temporales y calcular posteriormente todas las FFT en un solo bloque (véase la Fig. 6.7-6).

FIGURA 6.7-6

Adquisición de bloque

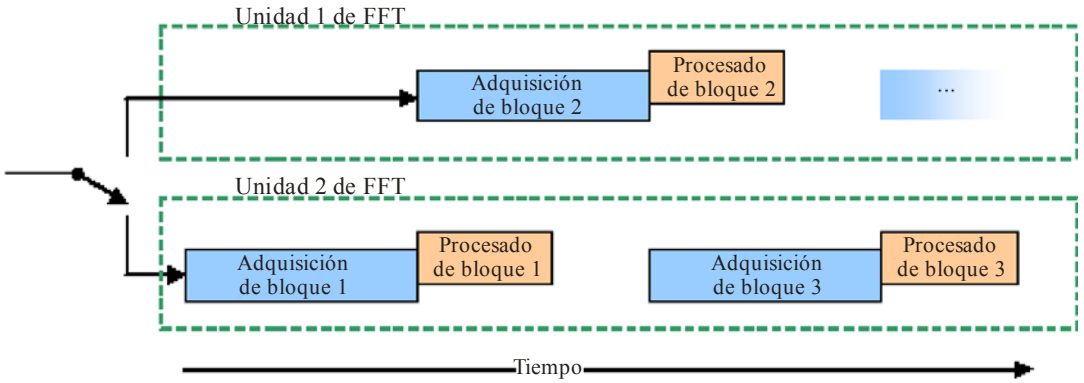


Durante el tiempo de cálculo más largo cesa la recepción, pero la adquisición puede activarse según la señal de interés y si existe memoria suficiente para permitir tiempos de adquisición prolongados, es posible mantener una recepción continua al menos durante el periodo de interés.

Un método para que la recepción sea continua es implementar dos unidades de adquisición y cálculo de la FFT que procesen alternativamente la señal (véase la Fig. 6.7-7).

FIGURA 6.7-7

Recepción continua con dos unidades de FFT



Spectrum-6.7-07

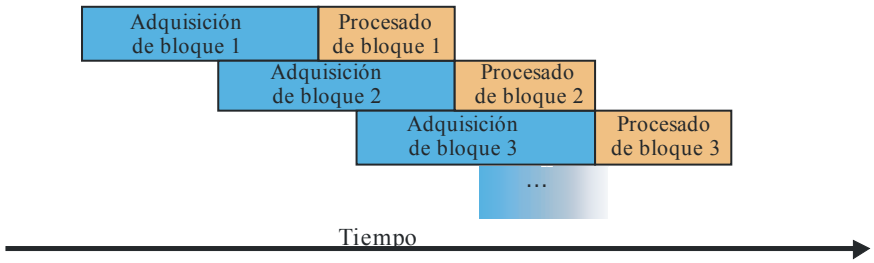
Aunque no es obvio, el proceso de la Fig. 6.7-7 presenta algunas carencias. Así ocurre cuando la función ventana pondera con cero la forma de onda al comienzo y final de cada bloque de adquisición. Este problema puede resolverse aplicando el denominado procesamiento solapado que se describe a continuación.

La FFT puede estar sujeta a compromisos de resolución en tiempo y frecuencia. El número de líneas de frecuencia en el espectro FFT es igual al número de muestras tomadas en el registro temporal. La duración mínima del registro temporal es la inversa de la resolución de frecuencia. Para aumentar la resolución de frecuencia debe aumentarse la duración del registro temporal (y por tanto, perder resolución temporal), y viceversa.

Algunos analizadores FFT minimizan esta limitación solapando registros temporales (véase la Fig. 6.7-8), lo cual mejora la representación visual de los impulsos cortos. Este método también se conoce como FFT de corta duración, FFT de ventana deslizante o procesamiento solapado. En los analizadores de espectro de barrido se aplica un compromiso similar para la resolución tiempo-frecuencia, aumentando el tiempo de barrido conforme disminuye la anchura de banda de resolución.

FIGURA 6.7-8

Solapamiento de registros temporales



Spectrum-6.7-08

6.7.5 Gama de aplicaciones

Las técnicas FFT se utilizan generalmente en el análisis espectral y en la comprobación técnica del espectro. La siguiente lista de parámetros que pueden medirse utilizando técnicas FFT no es exhaustiva:

– Nivel.

– Frecuencia.

– Anchura de banda ocupada (método *x*-dB y método β/2).

– Ocupación del espectro (espectrogramas y ocupación del canal de frecuencia).

– Detección de emisiones de corta duración.

– Detección de señales por debajo del umbral de ruido.

Para más información véanse los Capítulos 4 y 5.

Puesto que la FFT compleja ofrece información de fase y de amplitud, los radiogoniómetros de banda ancha pueden utilizar los algoritmos FFT para realizar marcaciones de varias señales al mismo tiempo. Otro ejemplo es el algoritmo de Goertzel, que implementa una FFT para un punto de frecuencia. Si la FFT se considera un banco de filtros, el algoritmo de Goertzel es solamente uno de ellos. Las aplicaciones del mismo son los decodificadores de señales multifrecuencia bitonos (DTMF), decodificadores de sistemas silenciadores controlados por un tono continuo (CTCSS) u otros decodificadores de tonos, filtros de receptores, filtros para demoduladores de MDF, etc. Dichas aplicaciones gozan de todas las propiedades de la FFT (resolución, margen dinámico). La razón de utilizar algoritmos basados en la FFT no siempre tiene por objetivo conseguir mejores prestaciones. Por una parte, la FFT permite el procesamiento de un espectro determinado sin fisuras en el tiempo, lo cual no es posible mediante un barrido analógico. Por otro lado, la disponibilidad de dispositivos de procesado digital de la señal (DSP) permite que la fabricación de productos basados en la FFT sea más barata que la de sus equivalentes analógicos. En todo caso, aunque en el mercado existen excelentes productos, siempre es recomendable un análisis cuidadoso del equipo.

Bibliografía

ECC REPORT 63 [Utrecht, 2005], Measurements using Fast Fourier Transform (FFT).

MARVEN, G. and EWERS, G.[1993] A simple approach to digital signal processing. Texas Instruments, ISBN-0-904047-00-8.

POULARIKAS, A. D.[1998] The Handbook of formula's and tables for signal processing. CRC Press-IEEE Press ISBN 0-8493-8579-2.

RAMIREZ, R. W. [1996] The FFT – fundamentals and concepts. Prentice Hall. ISBN 0-471-51692-9.

RAUSCHER, C. [2001] Fundamentals of Spectrum Analysis. Rohde & Schwarz – ISBN 978-3-939837-01-5.

THOMÄ, R.[1993] Fensterfunktionen in der DFT Spektralanalyse – MEDAV/Technische Universität Ilmenau (en alemán) – ISBN 3-9804152-0-1.

SMITH, S. [1999] The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing, California Technical Publishing, ISBN 0-9660176-6-8.

6.8 Planificación y optimización de redes de comprobación técnica del espectro

6.8.1 Introducción

La planificación de redes de comprobación técnica del espectro, ya sean globales, con un gran número de estaciones de comprobación técnica, o locales, con un grupo reducido de ellas, debe realizarse utilizando emplazamientos óptimos para las estaciones fijas y teniendo en cuenta sus interacciones mutuas y con estaciones móviles. El término «estación de comprobación técnica» hace aquí referencia tanto a estaciones plenamente equipadas que realizan todas las funciones de comprobación técnica, a las que se refiere el capítulo 4, y a estaciones distantes no atendidas que sólo realizan labores de radiogoniometría.

El proceso de planificación de una red de comprobación técnica del espectro implica, por lo general, la cobertura de la zona de terreno más amplia posible utilizando el menor número posible de estaciones. La planificación de una nueva estación y la optimización de las redes de comprobación técnica del espectro existentes es de gran trascendencia económica ya que el costo de un sistema de comprobación técnica es el grueso del costo de cualquier sistema nacional de gestión del espectro. La optimización de una red de comprobación técnica del espectro puede producir ahorros financieros considerables en relación con cada las estación fija o móvil implicada.

Una vez que se ha optimizado el emplazamiento de una estación en la red mediante cálculos cuya metodología se describe a continuación, dicha estación debe adaptarse específicamente a su emplazamiento y a las características de su entorno de conformidad con lo dispuesto en la sección 2.6. Si dicha adaptación a medida requiriera que la estación tuviera que ser ubicada en un emplazamiento distinto al calculado, ello puede requerir volver a calcular la red en su conjunto a la vista de la nueva configuración de las estaciones.

6.8.2 Principios de la planificación y optimización de redes de comprobación técnica del espectro

La planificación de una nueva red de comprobación técnica del espectro o la optimización de una red existente se realiza calculando las correspondientes zonas de cobertura para las dos tareas a las que típicamente se dedican las redes de comprobación técnica del espectro [Kogan y Pavliouk, 2004].

La primera de dichas tareas está relacionada con las funciones descritas en las secciones 4.2 a 4.6 y 4.10. Se trata de la medición a distancia de los parámetros de las emisiones, tales como frecuencia, intensidad de campo, ocupación del espectro, anchura de banda, tipo de modulación y otros. Esta tarea puede incluir la escucha (control auditivo) de las emisiones y la radiogoniometría de sus fuentes, identificación de la emisión y análisis de la señal, tal como se describe en las secciones 4.7 y 4.8. Todas las funciones mencionadas las realiza de forma independiente cada estación de comprobación técnica debidamente equipada.

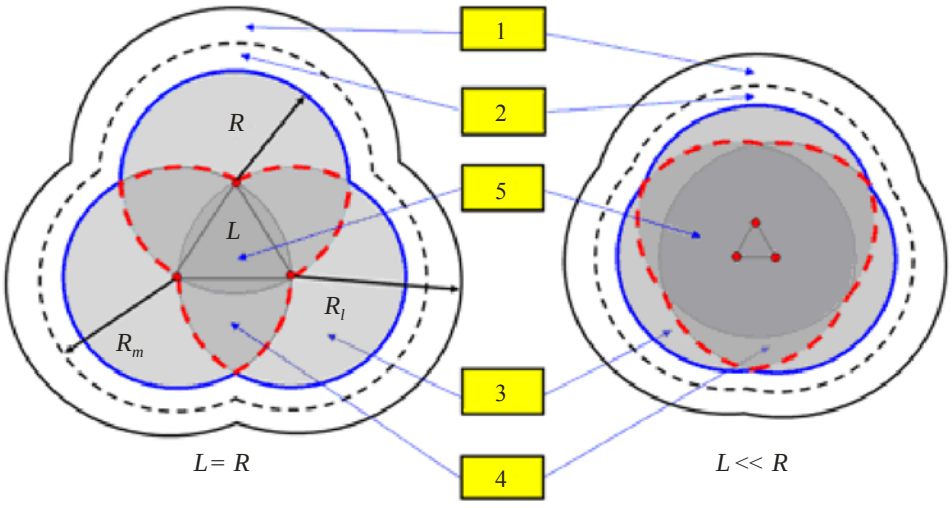
La segunda tarea conlleva una única función, si bien compleja e intensiva en mano de obra y al mismo tiempo muy importante, a saber, la localización de las fuentes de emisión aplicando el modo de una sola estación (modo SSL) en la banda de ondas decamétricas (véase § 4.7.3.4) o bien, el modo de triangulación en todos los rangos de frecuencias mediante el procesado de los datos de marcación de dos o más radiogoniómetros, ya sean independientes o incluidos en sendas estaciones de comprobación técnica. En 4.7.3.1 se describen las características específicas de la localización basada en la triangulación.

Puesto que la sensibilidad del receptor de medición será, por lo general, diferente para las distintas funciones de comprobación técnica, pueden identificarse varias zonas de cobertura, tal como se refleja de forma convencional en la Fig. 6.8-1, que representa tres estaciones de comprobación técnica con diferentes distancias ***L*** entre ellas. Teniendo en cuenta que la sensibilidad del receptor es por lo general máxima para la escucha, algo menor para la medición de las características de las señales y mínima para la radiogoniometría, es posible (como puede verse en la Fig. 6-8.1), identificar tres zonas de cobertura (1 – 3) con radios $\boldsymbol{R}_{\mathrm{I}}$, $\boldsymbol{R}_{m}$ y ***R*** (por simplificación, en esta fase se consideran zonas circulares).

En relación con la radiogoniometría, se considera que la zona 3 es la zona terrestre donde se obtienen marcaciones suficientemente fiables.

FIGURA 6.8-1

Zonas de cobertura de la comprobación técnica



Spectrum-6.8-01

Las tres zonas de cobertura corresponden a cada una de las estaciones y no dependen una de otra. Por tanto, la zona global de escucha, de medición de parámetros de emisión y de cobertura radiogoniométrica aumenta al hacerlo la distancia entre estaciones, hasta el límite de $L = \sqrt{3}\ R$. Cuando $L > \sqrt{3}\ R$, aparecen zonas sin cobertura entre las zonas con cobertura radiogoniométrica de las estaciones.

El comportamiento es diferente cuando se trata de la cobertura del servicio de localización, que corresponde al solapamiento de las zonas de cobertura radiogoniométrica de dos o tres estaciones (zonas 4 y 5 respectivamente de la Fig. 6.8-1). El tamaño de estas zonas, y especialmente de la zona 5, se reduce conforme aumenta la distancia L entre las estaciones, siendo la reducción particularmente acusada en el rango $R<L<\sqrt{3}\ R$, en el que las zonas 4 y 5 son notablemente más pequeñas que la zona global de cobertura de radiogoniometría. Cuando $L \geq \sqrt{3}\ R$, desaparece la zona de cobertura radiogoniométrica 5 (tres estaciones), y con $L > 2\ R$, desaparece la zona de cobertura radiogoniométrica 4 (dos estaciones), por lo que no existe ningún punto en el que pueda realizarse la localización.

Al mismo tiempo, cuando disminuye L y aumenta la zona de cobertura de localización, aumentan considerablemente las incertidumbres del servicio de localización en la periferia de la zona de cobertura puesto que la intersección de las marcaciones de las tres estaciones en dichas zonas presenta ángulos cada vez más agudos conforme nos acercamos a los límites la zona. Ello acrecienta las dificultades de detectar transmisores mediante radiorrecalada desde estaciones móviles en la periferia de la zona de cobertura global cuando $L << R$

No obstante, en la Fig. 6.8-1 se muestra gráficamente que el servicio de localización es la función más crítica de la comprobación técnica y una de las que deben considerarse básicas en la planificación de la red si el objetivo es conseguir la cobertura generalizada de una zona terrestre dada, aunque dentro de los límites de redes locales. El término «cobertura de comprobación técnica» se utilizará en lo sucesivo en este documento para hacer referencia a la cobertura de las funciones de comprobación técnica del espectro, es decir, escucha, medición de características de la señal, radiogoniometría y, salvo que se indique lo contrario, localización.

En cualquier caso, para lograr una cobertura generalizada del servicio de localización en un territorio suficientemente grande mediante estaciones de comprobación técnica en bandas de ondas métricas y decimétricas se requiere un gran número de estaciones a distancias relativamente cortas entre sí, con el consiguiente aumento de los costos de red. Para reducir el número de estaciones fijas, en algunos casos puede ser aceptable aumentar la distancia entre estaciones fijas, dejando sin cobertura de localización determinadas zonas. Dichas zonas pueden cubrirse mediante estaciones móviles que funcionen de forma interactiva con las estaciones fijas. En esos casos, es recomendable garantizar que la red proporciona una cobertura generalizada de radiogoniometría mediante estaciones de comprobación técnica fijas que interaccionen con las estaciones móviles para proporcionar la localización mediante triangulación en todo el territorio. Ello aumenta significativamente la eficiencia operacional de las estaciones móviles, incluyendo sus funciones de radiorrecalada para la localización de transmisores.

De todo lo anterior puede concluirse que el aumento de la distancia entre estaciones fijas de comprobación técnica en las bandas de ondas métricas y decimétricas, es decir, la reducción del número de estaciones, conlleva un aumento de las actividades de las estaciones móviles de comprobación técnica que, además de las operaciones de radiorrecalada, deben interactuar con las estaciones fijas en tareas de localización cuando ello sea viable. Por tanto, una parte integral de la planificación de la red de estaciones de comprobación técnica es establecer una relación óptima entre el número de estaciones fijas y móviles en función de la configuración de estaciones fijas de la red.

La metodología de planificación de redes de comprobación técnica difiere considerablemente según se trate de las bandas de ondas métricas y decimétricas o de ondas decamétricas. El tamaño y forma de las zonas de cobertura de comprobación técnica en bandas de ondas métricas y decimétricas se ven influidas en gran medida por el relieve, tal como se muestra en § 6.8.3, siendo necesario que los cálculos apliquen los correspondientes modelos de propagación. Las dimensiones reducidas de las zonas de cobertura de comprobación técnica hacen que, para lograr una cobertura generalizada, sea necesario desplegar estaciones separadas no más de 30-60 km. En las bandas en ondas decamétricas, el relieve no tiene una influencia apreciable en la forma de las zonas de cobertura de comprobación técnica. Por tanto, si se utilizan antenas omnidireccionales, las zonas de cobertura de las ondas ionosféricas (reflejadas en la ionosfera) serán círculos

con radios del orden de 2 000 – 2 500 km. Una de las características de la propagación de las ondas ionosféricas es la existencia de «puntos ciegos» («zonas de silencio»), que deben tenerse en cuenta en la planificación y optimización de las redes de comprobación técnica del espectro, tal como se describe en [Krutova *et al*., 2008].

6.8.3 Planificación y optimización de redes de comprobación técnica en bandas de ondas métricas y decimétricas

En muchos países la solución más habitual en las bandas de ondas métricas y decimétricas es el despliegue de redes de comprobación técnica locales con un número de estaciones fijas que atienden grandes áreas urbanas y zonas industriales. La planificación de dichas redes locales puede realizarse mediante ensayos de cálculos de zonas de cobertura de comprobación técnica y la adopción de la mejor opción en base a criterios preestablecidos. Los principios para utilizar el conjunto de piezas de software más adecuado se recogen en [Krutova *et al*., 2005] y [Manual del UIT-R, 2005]. En base a los resultados de cálculos que tengan en cuenta la disponibilidad de infraestructura para estaciones de comprobación técnica atendidas, pueden identificarse estaciones atendidas que realicen todas las funciones de comprobación técnica y estaciones distantes no atendidas que sólo realicen funciones de radiogoniometría.

La optimización de una red de comprobación técnica del espectro existente, y particularmente su proceso de modernización, puede realizarse mediante pruebas de emplazamientos virtuales para nuevas estaciones fijas de comprobación técnica allí donde la cobertura de las estaciones existentes sea inadecuada, realizando la selección e implementación de la mejor opción posible. Igualmente, el cálculo de las zonas de cobertura de las estaciones existentes permite identificar estaciones que, por una razón u otra, no contribuyan de manera esencial a la cobertura requerida y que puedan ser transferidas a otros emplazamientos donde sean más útiles. Si el requisito es la cobertura completa del servicio de comprobación técnica en una región dada, la planificación y optimización debe realizarse en función del servicio de localización, que es el más crítico en términos de emplazamiento de estaciones de comprobación técnica o, como último recurso, en base a la radiogoniometría, para diseñar una arquitectura con un mayor uso de estaciones móviles de comprobación técnica con fines de localización y no sólo como transmisores de radiogoniometría mediante radiorrecalada.

Cuando se realicen los cálculos es necesario elegir el modelo de propagación de ondas radioeléctricas más adecuado que tenga en cuenta el relieve de la región y seleccionar los valores de intensidad de campo mínimos en los límites de las zonas de cobertura de comprobación técnica, así como las potencias y altura de las antenas de los transmisores de prueba para las que deben realizarse los cálculos.

En relación con el modelo de propagación de las ondas radioeléctricas, es conveniente seleccionar la metodología de la Recomendación UIT-R P.1546, cuyas nuevas disposiciones (véase el 1.1 del Anexo 5 a la Recomendación) permiten tener en cuenta características específicas de la comprobación técnica con estaciones fijas. Dichas características específicas se deben a que las estaciones fijas de comprobación técnica tienen, por lo general, antenas receptoras a una altura elevada, mientras que los transmisores sujetos a comprobación técnica pueden tener antenas situadas a baja altura, por ejemplo, los transmisores de sistemas de radiocomunicaciones móviles privados (RMP) sobre vehículos ligeros. Se trata de un enfoque utilizado en el software descrito en [Krutova *et al.*, 2005] y [Manual del UIT-R, 2005]. A este respecto, debe señalarse la reciente aprobación de la Recomendación UIT-R P.1812 que tiene en cuenta en mayor medida el factor debido al relieve. La utilización de este modelo puede servir para mejorar la precisión de los cálculos

En relación con los parámetros de planificación de una red de comprobación técnica del espectro que determinan los límites de las zonas de cobertura según [Kogan and Pavliouk, 2004] y [Bondarenko *et al.*, 2008], y al menos con fines de comparación, se proponen los siguientes valores límite de intensidad de campo en una zona con cobertura:

– Intensidad de campo mínima del transmisor de prueba en el emplazamiento de la antena de la estación de comprobación técnica en el caso de escucha: $\boldsymbol{E_{min(l)} = S}$, donde $\boldsymbol{S}$ es la sensibilidad del receptor utilizado para la escucha, teniendo en cuenta la ganancia de antena y la pérdida de las líneas de alimentación. Un valor típico de sensibilidad para $S/N \geq 10$ dB es 1 (μV/m), dado que en la mayoría de los casos (o con fines de comparación) puede considerarse que $\boldsymbol{E_{min(l)}}$ = 0 dB(μV/m).

– La intensidad de campo mínima para medir las características de la señal del transmisor según se indica en el Capítulo 4 es: $\boldsymbol{E_{min(m)}}$= $\boldsymbol{E_{min(l)}}$+ 12 dB, es decir, en la mayoría de los casos (o con fines de comparación) puede considerarse que $\boldsymbol{E_{min(m)}}$= 12 dB(μV/m).

– La intensidad de campo mínima en el caso de radiogoniometría, tal como se describe en § 4.7, para conseguir marcaciones fiables, es: $\boldsymbol{E_{min(df)}}$= $\boldsymbol{E_{min(l)}}$+ 20 dB, es decir, en la mayoría de los casos (o con fines de comparación) puede considerarse que $\boldsymbol{E_{min(df)}}$= 20 dB(μV/m).

Los transmisores en bandas de ondas métricas y decimétricas sujetos a comprobación técnica se caracterizan por una gran variedad de niveles de potencia y de altura de antenas, desde 10 W y 1,5 m (transmisores de sistemas de RMP transportados en vehículos ligeros) hasta 40 kW y 500 m y superiores (transmisores de televisión). Asimismo, las dimensiones de las zonas de cobertura de la comprobación técnica pueden variar ampliamente.

Con fines de planificación de red y realización de cálculos comparativos, es conveniente establecer tres categorías de transmisores de baja potencia [Krutova *et al.*, 2009] con antenas relativamente bajas, siendo conscientes de que los transmisores de más potencia y con antenas más elevadas tienden a estar bien cubiertos por dichas redes

– *Categoría I:*

  Potencia de 10 W, altura de antena de 1,5 m (transmisores de RMP sobre vehículos ligeros).

– *Categoría II:*

  Potencia de 10 W, altura de antena de 20 m (estaciones base de radiocomunicaciones móviles terrenales, transmisores de radiodifusión de baja potencia, transpondedores de televisión).

– *Categoría III:*

  Potencia de 20 W, altura de antena de 40 m (los mismos tipos de transmisores que en la categoría II, pero con niveles de potencia más altos y altura de antenas más elevadas).

En el Cuadro 6.8-1 se enumeran estos y otros parámetros que pueden utilizarse como criterios para la planificación y optimización de redes de comprobación técnica en bandas de ondas métricas y decimétricas (que se utilizan en los cálculos que se describen a continuación).

En las Figs. 6.8-2 a 6.8-5 se representa gráficamente un ejemplo de procedimiento de planificación de una red de comprobación técnica del espectro para los parámetros del Cuadro 6.8-1.

Tómese el caso de una ciudad situada en una zona con colinas, tal como se muestra en la Fig. 6.8-2, para la que se considera que tanto en la misma como en sus zonas de suburbios residenciales densamente poblados debe realizarse la comprobación técnica del espectro para transmisores de prueba de categoría I.

Dada la configuración más o menos circular de dicha ciudad, se considera que el servicio requerido puede realizarse mediante un mínimo de tres estaciones fijas de comprobación técnica.

Se elabora un plan piloto inicial con las estaciones (***S1*** – ***S3***) situadas en la cima de colinas, tal como se muestra en la Fig. 6.8-2, ya que de esta forma las antenas de las estaciones puede situarse relativamente próximas y con alturas de unos 10 m.

En la Fig. 6.8-3 se muestran las zonas de cobertura de la comprobación técnica de la estación ***S1***.

Las zonas se identifican mediante la paleta de colores situada a la derecha de la Figura. Los valores límite de las zonas coloreadas correspondientes a zonas de cobertura son de 0, 12 y 20 dB para escucha, medición de características de la señal y radiogoniometría respectivamente, tal como se muestra en el Cuadro 6.8-1.

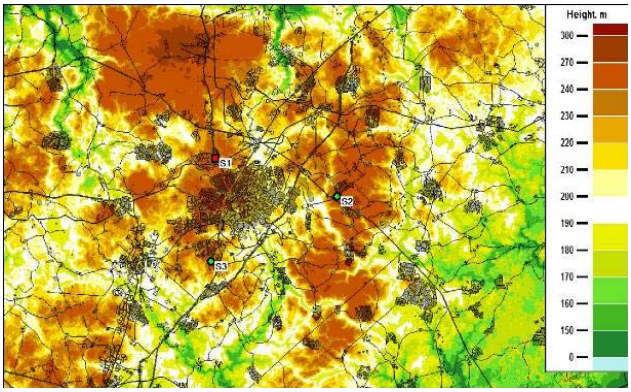
CUADRO 6.8-1

Criterios para la planificación y optimización de redes de comprobación técnica en la bandas de ondas métricas y decimétricas

Parámetro	Valor
Altura de la antena del transmisor de prueba	Categoría I: 1,5 m Categoría II: 20 m Categoría III: 40 m
Potencia del transmisor de prueba	Categorías I y II: 10 W Categoría III: 20 W
Probabilidad de encontrar el transmisor de prueba en la elipse de incertidumbre de la localización (véase § 4.7.3.4)	0,5
Altura de la antena de la estación fija de comprobación técnica	10-50 m (según el emplazamiento de instalación)
Altura de la antena de la estación móvil de comprobación técnica	2,5 m (antena sobre el techo de un vehículo ligero) 10 m (antena extensible semifija)
Incertidumbre del sistema de radiogoniometría (véase § 4.7.3.1.3)	1º r.m.s. (estación fija) 2º r.m.s. (estación móvil)
Intensidad de campo mínima en los límites de la zona de cobertura para escucha	0 dB(μV/m)
Intensidad de campo mínima en los límites de la zona de cobertura para medición de características de la señal	12 dB(μV/m)
Intensidad de campo mínima en los límites de la zona de cobertura para radiogoniometría	20 dB(μV/m)

FIGURA 6.8-2

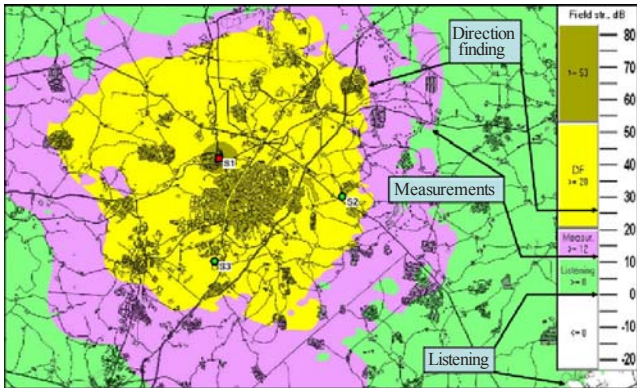
Topografía de la zona de interés y emplazamiento de las tres estaciones fijas, S1 – S3, en terrenos elevados (primera opción)



Spectrum-6.8-02

FIGURA 6.8-3

Zonas de cobertura de comprobación técnica de la estación S1, que muestra los límites exteriores de las zonas de cobertura para escucha, medición y radiogoniometría



Spectrum-6.8-03

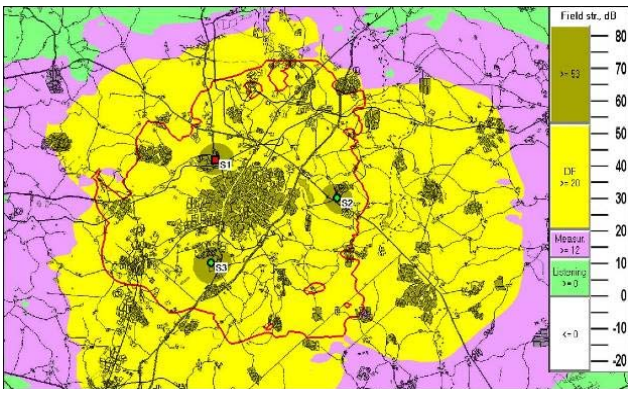
La Fig. 6.8-4 muestra las zonas de cobertura global de la comprobación técnica con las tres estaciones. El contorno rojo continuo dentro de la zona global de cobertura de radiogoniometría muestra los límites de la zona de cobertura de localización por triangulación, tal como se describe en § 4.7.3, que corresponde con el solapamiento de las zonas de cobertura de radiogoniometría de al menos dos estaciones. Como puede verse en la Fig. 6.8-4, la zona de cobertura del servicio de localización es, en este caso, notablemente menor que la zona de cobertura global de radiogoniometría, lo cual coincide con la teoría general antes descrita.

En la Fig. 6.8-5 se muestra la plantilla de la cobertura del servicio de localización descrita en § 4.7.3.1.4 para una probabilidad del 50% de identificación del transmisor buscado dentro de los límites de la elipse de incertidumbre de localización. En este caso, el contorno rojo constituye el límite de la cobertura de radiogoniometría para las tres estaciones. La paleta de colores a la derecha de la Figura permite identificar los valores límites de las distintas subzonas de incertidumbre de la localización.

En la Fig. 6.8-5 se observa que las estaciones están situadas de forma que es posible realizar la localización de transmisores de categoría I en toda la cuidad y en sus zonas residenciales inmediatamente vecinas. El servicio de localización presenta en gran parte de la ciudad y en los suburbios más próximos una incertidumbre de ente 0,2 y 0,4 km (subzona de color castaño); no obstante, existen dos «pequeñas zonas» en las que la localización tiene una incertidumbre entre 0,1 y 0,2 km (subzonas de color turquesa). Tal como señala la teoría (véase § 4.7.3.1.4) dichas «pequeñas zonas» se deben a que las líneas de marcación de las estaciones ***S1*** y ***S3*** se cruzan con un ángulo próximo a 90º. Cerca del límite de la zona global de cobertura de localización, la incertidumbre de ésta sube a 0,6-0,8 km (subzona de color amarillo oscuro). Dentro de los límites de la plantilla hay una serie de «pequeñas zonas» de color blanco en las que, dado el relieve de las mismas y los parámetros seleccionados, no se dispone de cobertura de localización ni de radiogoniometría, tal como también se observa en la Fig. 6.8-4.

FIGURA 6.8-4

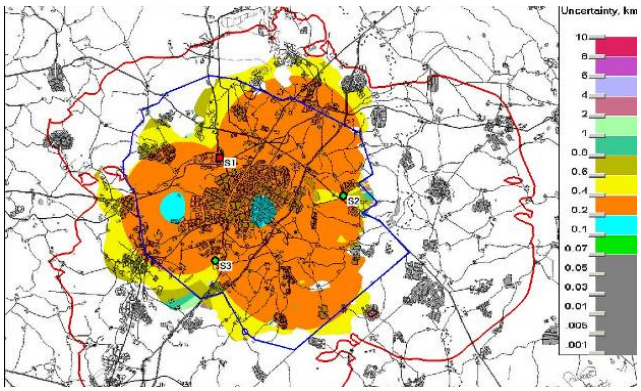
Zonas de cobertura global del servicio de comprobación técnica de las tres estaciones S1 – S3



Spectrum-6.8-04

FIGURA 6.8-5

Plantilla de cobertura del servicio de localización de las tres estaciones S1 – S3



Spectrum-6.8-05

Supóngase que el contorno azul de la Fig. 6.8-5 representa los límites de un distrito administrativo situado en el ámbito de responsabilidad de la ciudad del ejemplo. Mediante el software adecuado, pueden calcularse valores numéricos de cobertura del servicio de localización en dicho distrito dividido en subzonas con diferentes niveles de incertidumbre. El Cuadro 6.8-2 recoge los datos, de los que se desprende que un transmisor de categoría I puede ser localizado en el 87% de la zona señalada del distrito. A su vez, dicha zona puede dividirse en 4 categorías, según la incertidumbre calculada del servicio de localización, obteniéndose una incertidumbre de entre 0,2 y 0,4 km en el 74% de la zona considerada.

La comparación entre las Figs. 6.8-3 y 6.8-5 permite apreciar que la estación ***S1*** ofrece, por sí sola, los servicios de escucha y de medición de características de la señal dentro de los límites de la zona de cobertura global de las tres estaciones ***S1*** – ***S3***. Por tanto, ***S1*** puede ser una estación plenamente equipada y atendida, manteniendo las otras dos estaciones como radiogoniómetros automáticos no atendidos. No obstante, en aras de una mayor fiabilidad, una de las dos estaciones puede estar también plenamente equipada aunque no esté atendida.

CUADRO 6.8-2

Estadísticas de las subzonas de incertidumbre de la localización

Rangos de incertidumbre de la localización (km)	**Porcentaje de la superficie del distrito**	**Distribución acumulativa de los valores porcentuales**
0,07-0,1	–	–
0,1-0,2	2	2
0,2-0,4	74	76
0,4-0,6	9	85
0,6-0,8	2	87
0,8-10	–	87
	Total	87

En la práctica, puede ocurrir que en las colinas donde sería recomendable ubicar las antenas de las estaciones fijas de comprobación técnica existan antenas de transmisores potentes, por ejemplo, de radiodifusión, siendo necesario identificar emplazamientos alternativos que satisfagan los requisitos establecidos en § 2.6.1.4 para la protección de las estaciones de comprobación técnica de otras emisiones de alta potencia. Ello puede hacerse fácilmente repitiendo los cálculos de planes de emplazamientos para otras potenciales ubicaciones. Si se elaboran los cálculos para varios planes de emplazamientos, es posible elegir la mejor configuración que además satisfaga los requisitos preestablecidos.

Cuando se planifica la cobertura global de amplias zonas que requieren un elevado número de estaciones, la planificación de la red puede realizarse en base a la teoría de redes regulares, descrita en el Informe UIT-R BS.944. Este método permite el establecimiento de una red con grandes distancias entre estaciones en zonas rurales y con menores distancias en ciudades o amplias zonas industriales con elevada densidad de transmisores sujetos a comprobación técnica, donde la incertidumbre de la marcación es considerablemente mayor debido a reflexiones en edificios y estructuras metálicas. Si en la zona en cuestión existe una red de estaciones fijas de comprobación técnica que se asemeje a una red regular, es recomendable «inscribir» las estaciones en la nueva estructura de red planificada.

Dicha red, con un número variable de estaciones de comprobación técnica, se establece en base a células con forma de hexágonos equiláteros que, a su vez, están constituidos por seis triángulos equiláteros elementales, tal como se describe en el Informe UIT-R BS.944, con las estaciones situadas en cada uno de los nodos de la red, como se muestra en la Fig. 6.8-6. Esta Figura muestra claramente que los triángulos elementales de la red primaria pueden subdividirse sucesivamente en cuatro triángulos equiláteros más pequeños con distancias entre estaciones de ***L***/2**,** ***L***/4, ***L***/8. Evidentemente, en grandes ciudades y zonas industriales, las distancias entre estaciones fijas de comprobación técnica puede ser tan pequeña como ***L***/8 = 7,5 km, o incluso ***L***/16 = 3,75 km.

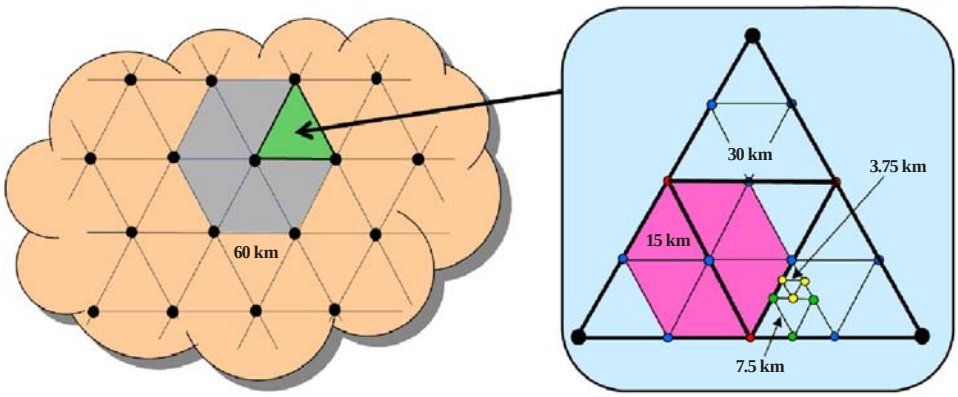
En dicha red de estaciones de comprobación técnica de densidad variable, cualquier estación fija puede considerarse perteneciente a una red existente o futura de comprobación técnica con cobertura global y de densidad variable, cuya incertidumbre no supera 2,17 km. Ello facilita la «inserción» de las estaciones existentes en una nueva red de gran tamaño.

Los cálculos en las bandas de ondas métricas y decimétricas realizados según el enfoque descrito en [Krutova *et al*., 2009], muestran que en condiciones normales del terreno, la distancia máxima ***L*** entre estaciones fijas de la red primaria puede ser L_m = 60 km para la comprobación técnica de transmisores de categoría III. Tomando como punto de partida dicha red primaria, es posible calcular sus parámetros para transmisores de categoría I-III, así como los parámetros de las zonas anidadas de una red con distancias entre estaciones de 30 km, 15 km y 7,5 km para las tres categorías de transmisores. Las condiciones para la realización de los cálculos se incluyen en [Krutova *et al*., 2009]. En el Cuadro 6.8-3 se resumen los resultados de los cálculos.

A partir de los datos del Cuadro 6.8-3 puede apreciarse que en una red primaria en la que la L_m = 60 km, la cobertura de la localización sólo se consigue para transmisores de categoría III.

FIGURA 6.8-6

Red regular teórica



Spectrum-6.8-06

CUADRO 6.8-3

Datos calculados para redes homogéneas de comprobación técnica a 450 MHz

L (km)	Categoría	Estadísticas de zonas de cobertura (%)				Estadísticas de la incertidumbre de localización
		Escucha	Medición	Radiogoniometría	Localización	
60	I	94 – 100	50 – 69	26 – 36	0	-
	II	100	100	98 – 100	64 – 88	0,6-0,8 km: 0-2% 0,8-1,0 km: 20-34% 1,0-2,0 km: 22-33% > 2,0 km: 15-21%
	III	100	100	100	98 – 100	0,6-0,8 km: 1-3% 0,8-1,0 km: 33-50% 1,0-2,0 km: 47-62% > 2,0 km: 0-2%
30	I	100	97 – 100	77 – 88	8 – 15	0,2-0,4 km: 0-3% 0,4-0,6 km: 2-6% 0,6-0,8 km: 2-4% > 0,8 km: 4-7%
	II	100	100	100	100	0,2-0,4 km: 3-6% 0,4-0,6 km: 82-88% 0,6-0,8 km: 8-13% > 0,8 km: 0-1%
15	I	100	100	100	95 – 96	0,1-0,2 km: 0-1% 0,2-0,4 km: 80-85% 0,4-0,6 km: 4-7% > 0,6 km: 6-7%
	II	100	100	100	100	0,1-0,2 km: 0-1% 0,2-0,4 km: 99-100% > 0,4 km: 0-1%
7,5	I	100	100	100	100	0,07 – 0,1 km: 1-2% 0,1-0,2 km: 97-98% 0,2-0,4 km: 0-1% 0,4 km: 0 %

Los valores predominantes de incertidumbre del servicio de localización oscilan de 0,8 a 1,0 km (33-50% de la zona terrestre) y de 1 a 2 km (47-62% de la zona terrestre). En caso de transmisores de categoría II, se consigue una cobertura del 98-100% para radiogoniometría, por lo que la búsqueda de dichos transmisores resulta más fácil mediante estaciones de comprobación técnica móviles. Sin embargo, la localización con estaciones fijas sólo es posible entre el 64 y el 88% de la zona terrestre. En caso de transmisores de categoría I, la radiogoniometría tiene una cobertura del 26-36%, y no existe cobertura alguna del servicio de localización. Por tanto, una red primaria de estaciones fijas con $\boldsymbol{L_m}$ = 60 km no proporciona prácticamente capacidades de comprobación técnica de transmisores de baja potencia de categoría I con antenas de baja ganancia, y presenta notables limitaciones para la localización de transmisores de categoría II.

Las características técnicas de la red o de segmentos relevantes de la misma pueden mejorar notablemente reduciendo de 60 a 30 km la distancia entre estaciones, aunque ello implica al menos duplicar el costo de construcción de la red o del segmento relevante. Para transmisores de categoría II se garantiza prácticamente cobertura completa en toda la zona terrestre, con un valor de incertidumbre predominante del orden de 0,4 a 0,6 km (82-88% de la zona terrestre). Sin embargo, para transmisores de categoría I no se garantiza una cobertura de la radiogoniometría del 100%, siendo la tasa de cobertura de la localización mediante estaciones fija no superior al 8-15%.

De todo ello puede concluirse que incluso en redes con $\boldsymbol{L = L_m/2}$ = 30 km no se garantizan de forma efectiva los servicios de radiogoniometría o de localización de transmisores de categoría I.

En redes o segmentos de red con $\boldsymbol{L = L_m/4}$ = 15 km, se garantiza el cien por cien de cobertura del servicio de radiogoniometría para transmisores de categoría I , existiendo una cobertura del 95-96% de la zona terrestre para el servicio de localización con un valor de incertidumbre predominante en el rango de 0,2-0,4 km (80 - 85% de la zona terrestre).

En redes o segmentos de red con $\boldsymbol{L = L_m/8}$ = 7.5 km, se consiguen incluso mejores características técnicas, con una cobertura del 100% para la localización de transmisores de categoría I y un valor de incertidumbre predominante en el rango de 0,1-0,2 km (97-98% de la zona terrestre).

No obstante, ello se logra a costa de un aumento considerable del número de estaciones fijas de comprobación técnica y, por tanto, de los costos de construcción de la red, aunque al mismo tiempo se reduce el número necesario de estaciones móviles de comprobación técnica.

Los datos del Cuadro 6.8-3 pueden utilizarse para optimizar el despliegue de red, teniendo en cuenta las tareas a realizar y los recursos existentes y planificados.

Referencias

BONDARENKO K.V., KRUTOVA O.E., PAVLYUK A.P. [2008] Experience in planning of local spectrum monitoring networks of the Republic of Tajikistan based on advanced planning tools. – Proceedings of the Nineteenth International Wroclaw Symposium on EMC, Wroclaw, Polonia (puede obtenerse una copia en el sitio web: www.pavlyuk.com).

MANUAL UIT-R [2005] Técnicas Informatizadas para la Gestión del Espectro (CAT), Ginebra.

KOGAN V.V., PAVLIOUK A.P. [2004] Methodology of spectrum monitoring networks planning – Proceedings of the Seventeenth International Wroclaw Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility, EMC-2004. Wroclaw, Polonia (puede obtenerse una copia en el sitio web:www.pavlyuk.com).

KRUTOVA O.E., KOGAN V.V., PAVLIOUK A.P.[2005] Advanced software for planning and optimization of spectrum monitoring networks. – Proceedings of the Sixth International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology, San Petersburgo, Rusia (en ruso, pero puede obtenerse una traducción al ingles en el sitio web:: www.pavlyuk.com).

KRUTOVA O.E., LUTHERW., PAVLYUK A.P. [2006] Location characteristics of the USA HF international spectrum monitoring network using new software. – Proceedings of the Eighteenth

International Wroclaw Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility, EMC-2006. Wroclaw, Polonia (puede obtenerse una copia en el sitio web:www.pavlyuk.com).

KRUTOVA O.E., PAVLYUK A.P., PLOSSKY A.Y. [2008] Improvement of performance of the Russian spectrum monitoring network in the HF frequency band. Elektrosvyaz, No. 9, Moscú, Rusia (en ruso, pero puede obtenerse una traducción al inglés en el sitio web: www.pavlyuk.com).

KRUTOVA O.E., PAVLYUK A.P., PLOSSKY A.Y. [2009] Planning and optimization of VHF/UHF spectrum monitoring networks. Elektrosvyaz, No 5, Moscú, Rusia (en ruso, pero puede obtenerse una traducción al inglés en el sitio web: www.pavlyuk.com).

6.9 Incertidumbre de la medición

6.9.1 Introducción

Los términos «incertidumbre», «error» y «precisión» se utilizan frecuentemente aunque no siempre de una forma correcta. Para cada medición realizada, se obtiene un valor que puede diferir del valor verdadero. Si se pudiera conocer el valor verdadero, el error podría expresarse como la diferencia entre el valor medido y el valor verdadero. En función del proceso y los equipos utilizados en la medición, los resultados en bruto sólo son una estimación del valor real a medir.

Puesto que el valor verdadero es desconocido, sólo puede hablarse de incertidumbre asociada a un valor medido. La incertidumbre absoluta es una cantidad expresada en la misma unidad que el valor medido y describe un intervalo en el cual se sitúa el valor verdadero con una probabilidad dada.

La incertidumbre relativa es el cociente entre la incertidumbre absoluta y la mejor estimación del valor verdadero.

Cuando menor es la incertidumbre, mayor es la precisión; no obstante, ello es difícil de cuantificar.

6.9.2 Visión general y definición de la incertidumbre de la medición

Un procedimiento de medición con el equipo ajustado en un entorno controlado no garantiza, sin embargo, que en todas las mediciones se obtenga el mismo resultado.

Ello caracteriza la variabilidad de la medición, que puede deberse a la incertidumbre asociada al equipo de prueba, al operador, al entorno de medida o a otros aspectos. La correcta evaluación del resultado exige especificar dicha variabilidad.

Básicamente, el resultado puede caracterizarse por un valor medio y un intervalo de desviación típica, que caracterizan la incertidumbre. La incertidumbre puede determinarse mediante dos métodos, denominados Tipo A y Tipo B. No hacen referencia a la naturaleza de lo que contribuye a la incertidumbre, sino que son métodos de estimación para evaluar la incertidumbre.

La estimación de incertidumbre de **Tipo A** se deriva del análisis estadístico de datos experimentales. Esta estimación no debe identificarse como el uso de componentes «aleatorios» de incertidumbre. Normalmente se tiene en cuenta la media de *n* muestras y la variabilidad del resultado se caracteriza mediante la desviación típica. Las distribuciones de probabilidad más comunes se describen en § 6.9.3. El Tipo A se utiliza para evaluar la incertidumbre estándar.

La estimación de incertidumbre **Tipo B** se utiliza cuando la incertidumbre no puede evaluarse estadísticamente. La estimación se basa en la experiencia pasada, en datos disponible en manuales o en extractos de informes de calibración. El Tipo B se utiliza para evaluar la **incertidumbre estándar, la incertidumbre estándar combinada y la incertidumbre ampliada**.

En la práctica, el Tipo A realiza un cómputo sobre resultados brutos y el Tipo B se basa en el análisis de resultados y de factores que influyen en la medición.

La incertidumbre estándar combinada es la incertidumbre estándar del resultado de una medición cuando dicho resultado se obtiene a partir de valores de otras cantidades, y es igual a la raíz cuadrada de la suma de una serie de términos, que son las varianzas o covarianzas de los valores de dichas cantidades ponderadas en función de cómo varían los resultados de las mediciones cuando varían dichas cantidades.

La incertidumbre ampliada es una cantidad que define un intervalo de los resultados de una medición que es previsible que abarque una gran parte de la distribución de valores que podrían atribuirse razonablemente a lo que se mide.

En el § 6.9.4 se describen aspectos prácticos de estas definiciones.

En resumen, la incertidumbre de una medición se expresa mediante los dos parámetros siguientes:

– un valor medio,

– una desviación típica.

Además, puede determinarse un nivel de confianza (por ejemplo, el valor y el intervalo son verdaderos con una probabilidad del 95%)

Teniendo en cuenta todos los parámetros de cada elemento del proceso de medición y el cálculo de las incertidumbres, puede obtenerse un valor y un intervalo que incluya el valor real con un cierto nivel de confianza. El propósito es realizar mediciones comparables y reproducibles. La reproducibilidad de una medición es esencial para mejorar la confianza en la misma.

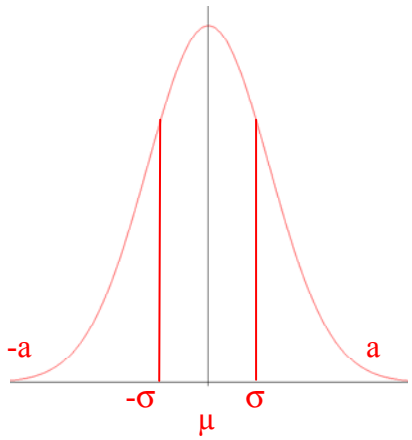
La consideración de todas las fuentes de incertidumbre identificables contribuye a obtener resultados válidos en comparación con un estudio teórico. La incertidumbre explica y justifica diferencias en los resultados. No obstante, durante la medición debe tenerse especial precaución ante la posibilidad de que se produzcan sesgos sistemáticos. Una forma de evitarlo es que otro equipo de medición y/o otra cadena de medición realicen mediciones alternativas que permitan comparar, mejorar, ajustar y/o corregir el procedimiento y los ajustes aplicados en la medición.

6.9.3 Funciones de distribución comunes para expresar la incertidumbre

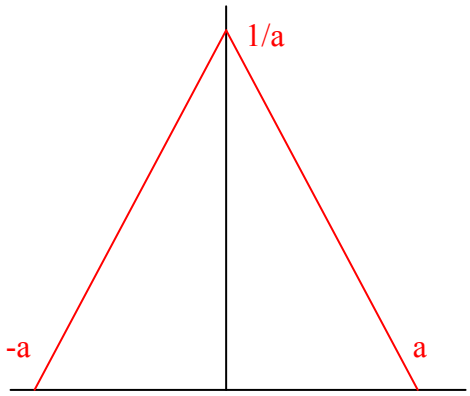
Las distribuciones de probabilidad pueden describir la variabilidad de un conjunto de valores. En el Cuadro 6.9-1 se resumen las funciones matemáticas más comúnmente utilizadas para expresar incertidumbre de mediciones.

CUADRO 6.9-1

Resumen de distribuciones de probabilidad

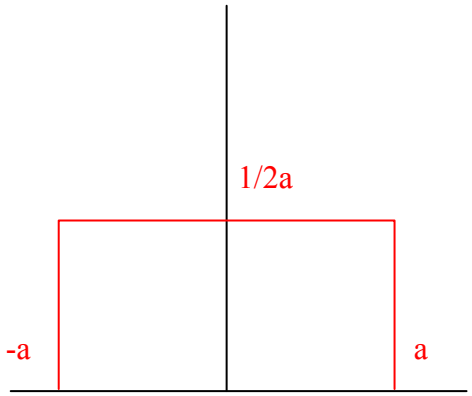
Distribución normal		
	Función matemática $f(x;\mu,\sigma)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}e^{-\left[\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]}$ μ es el valor medio σ es la desviación típica	Desviación típica Para un intervalo de confianza del 68% $\sigma = a$ Para un intervalo de confianza del 95% $\sigma=\frac{a}{2}$ Para un intervalo de confianza del 99.7% $\sigma=\frac{a}{3}$

En un conjunto de lecturas, la distribución Normal o Gaussiana es la más utilizada para observaciones repetitivas que varían alrededor de un valor medio.

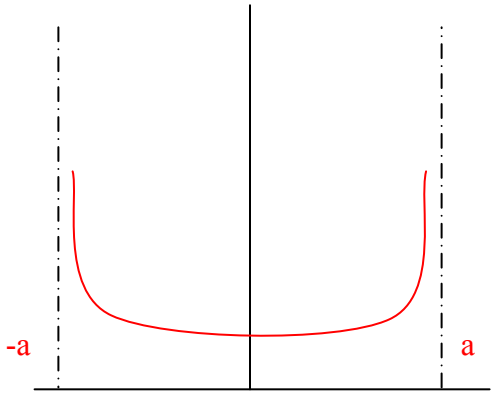
Distribución triangular		
	Función matemática $f(x)=\begin{cases}\frac{(x+a)}{a^2} & para\ -a\le x\le 0\\ \frac{(a-x)}{a^2} & para\ 0\le x\le a\end{cases}$	Desviación típica $\sigma=\frac{a}{\sqrt{6}}$

Se conocen los valores máximo y mínimo de esta distribución.

CUADRO 6.9-1 (*fin*)

Distribución rectangular o uniforme		
	Función matemática $f(x) = \frac{1}{2a}$	Desviación típica $\sigma = \frac{a}{\sqrt{3}}$

La particularidad de esta función es que la probabilidad de obtener cualquier valor entre [–a; a] es 1. Todos los valores tienen la misma probabilidad.

Distribución en forma de U		
	Función matemática $f(x) = \frac{1}{\pi\sqrt{a^2 - x^2}}$ para $-a < x < a$	Desviación típica $\sigma = \frac{a}{\sqrt{2}}$

6.9.4 Aplicación

La incertidumbre de las mediciones de una estación de comprobación técnica se debe evaluar para las medidas a las que se hace referencia en las subcláusulas siguientes, teniendo en cuenta cada una de las cantidades que se enumeran a continuación. La incertidumbre estándar $u(x_i)$ expresada en decibelios y el coeficiente de sensibilidad c_i se deben evaluar para el valor estimado x_i de cada cantidad.

La incertidumbre estándar combinada $u_c(y)$ de la estimación y de la medición se calcula como la raíz de la suma cuadrática ponderada (r.s.s. *root sum square*):

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_i c_i^2 \; u^2(x_i)} \qquad (6.9\text{-}1)$$

La incertidumbre de la medición ampliada de una estación de comprobación técnica $U_{medición}$ se calcula como:

$$U_{medición} = 2u_c(y) \qquad (6.9\text{-}2)$$

y debe señalarse explícitamente en el informe de medida.

NOTA – El factor de cobertura $k = 2$ conduce a un valor aproximado de confianza del 95% para la distribución cuasi-normal típica de la mayoría de los resultados de mediciones.

Este factor de cobertura se utiliza para expresar el nivel de confianza, tal como se asume en § 6.9.3 cuando se describe la distribución normal.

El cumplimiento o no cumplimiento de los límites reglamentarios puede determinarse, por ejemplo, utilizando uno de los dos enfoques siguientes:

– *1^{er} enfoque:*

la incertidumbre de la medición $U_{medición}$ debe ser tan pequeña como sea posible (V_{medido} es el valor medido):

Para el operador de un servicio de radiocomunicaciones: el cumplimiento de un límite se produce si $V_{medido} + U_{medición}$ satisface el límite.

Para la autoridad de reglamentación: el no cumplimiento de un límite puede demostrarse si $V_{medido} - U_{medición}$ no satisface el límite

– *2^{o} enfoque:*

la incertidumbre de la medición $U_{medición}$ no debe superar una incertidumbre máxima recomendada U_{Rec}:

Si $U_{medición}$ es menor o igual que U_{Rec}, entonces:

– existe cumplimiento si ningún valor medido supera el límite.

– no existe cumplimiento si algún valor medido supera el límite.

Para el operador: si $U_{medición}$ es mayor que U_{Rec}, entonces:

– existe cumplimiento si ningún valor medido, disminuido en ($U_{medición} - U_{Rec}$), supera el límite;

– no existe cumplimiento si algún valor medido, disminuido en ($U_{medición} - U_{Rec}$), supera el límite.

Para la autoridad de reglamentación: si $U_{medición}$ es mayor que U_{Rec}, entonces:

– existe cumplimiento si ningún valor medido, disminuido en ($U_{medición} - U_{Rec}$), supera el límite;

– no existe cumplimiento si algún valor medido, disminuido en ($U_{medición} - U_{Rec}$), supera el límite.

6.9.5 Ejemplo de cálculo de la incertidumbre

Una de las tareas de una estación de control técnico de las emisiones fija o móvil en la gama de frecuencias de 30 a 3 000 MHz es la medición de la intensidad de campo (E).

El valor medido E se calcula como:

$$E = V_r + L_c + AF + \\ + \delta V_{sw} + \delta V_{sel} + \delta V_{nf} + \delta M + \delta AF_f + \delta AF_h + \delta A_{dir} + \delta A_{cp} + \delta A_{bal} + \delta SR \quad (6.9\text{-}3)$$

La incertidumbre de E se calcula a partir de las incertidumbres de los términos a la derecha de la igualdad, sumando dichos valores elevados al cuadrado y calculando la raíz cuadrada de la suma (véase el Cuadro 6.9-2).

CUADRO 6.9-2

Valores de las cantidades de entrada para frecuencias desde 30 MHz a 3 000 MHz
(deben calcularse para cada antena, polarización y subrango)

Cantidad de entrada	**Véase Nota**	X_i	**Incertidumbre de x_i**		$u(x_i)$ **(dB)**	c_i	$(c_i\, u(x_i))^2$ **(dB)**
			(dB)	**Pr Dist; k**			
Lectura de receptor	(1)	V_r	±0,1	k= 1	0,10	1	0,01
Atenuación: antena-receptor	(2)	L_c	±0,1	k= 2	0,05	1	0,0025
Factor de antena	(3)	AF	±2,0	k= 2	1,00	1	1,00
Correcciones del receptor:							
Tensión señal sinusoidal	(4)	δV_{sw}	±1,0	k= 2	0,5	1	0,25
Selectividad del receptor	(5)	δV_{sel}	–0,5	Rectangular	0,28	1	0,0784
Proximidad al umbral de ruido	(6)	δV_{nf}	±0,5	k= 2	0,25	1	0,0625
Desadaptación: antena-receptor	(7)	δM	+0,9/–1,0	Forma de U	0,67	1	0,4489
Correcciones del factor de antena:							
– Interpolación de frecuencia del AF	(8)	δAF_f	±0,3	Rectangular	0,17	1	0,0289
– Desviaciones de la altura del AF	(9)	δAF_h	±0,5	Rectangular	0,29	1	0,0841
– Diferencia de directividad	(10)	δA_{dir}	±0,5	Rectangular	0,29	1	0,0841
– Polarización cruzada	(11)	δA_{cp}	±0,9	Rectangular	0,52	1	0,2704
– Equilibrio	(12)	δA_{bal}	±0,3	Rectangular	0,17	1	0,0289
suma parcial							2,3487
Sombra y reflexiones:							
Sombra	(13)	δSR_1	±1,0	Rectangular	0,56	1	0,3136
Reflexiones	(14)	δSR_2	±4,0	Triangular	1,63	1	2,6569
suma total							5,3192
Incertidumbre combinada $u_c(y) = \sqrt{\sum_i c_i^2\ u^2(x_i)}$							2,3063
Incertidumbre combinada ampliada (k = 2)							4,6126

Comentarios a los valores estimados de las cantidades de entrada (primera columna del Cuadro 6.9-2)

La incertidumbre asociada con una estimación x_i de una cantidad de entrada del Cuadro 6.9-2 es la incertidumbre mayor que se considera probable dentro de la gama de frecuencias que abarca dicho Cuadro, siempre que sea consistente con la precisión de la medición que se especifica en la Recomendación UIT-R SM.378. Las indicaciones relativas a las cantidades de entrada hacen referencia a los comentarios numerados incluidos en este mismo apartado. Los valores de incertidumbre ampliada deben compararse con los valores de U_{Rec}.

Los supuestos que conducen a los valores del Cuadro 6.9-2, pueden no ser los adecuados para una estación de comprobación técnica concreta. Cuando una estación de comprobación técnica evalúa la incertidumbre ampliada de su medición U_{medido}, debe tener en cuenta la información disponible de su sistema de medición

concreto, incluyendo características del equipamiento, la calidad y vigencia de los datos de calibración, las distribuciones de probabilidad conocidas o probables y los procedimientos de medida.

Puede ser ventajoso que una estación de comprobación técnica evalúe sus incertidumbres sobre la base de subdivisiones de la gama de frecuencias, particularmente si una cantidad de entrada dominante varía significativamente en dicha gama.

Notas de la segunda columna del Cuadro 6.9-2:

Las notas siguientes tienen por objetivo proporcionar directrices aplicables a estaciones de comprobación técnica que se enfrentan a datos o situaciones distintas de las aquí consideradas.

(1) Las lecturas del receptor pueden variar por diversos motivos, incluyendo la inestabilidad del sistema de medida, el ruido en el receptor y los errores de interpolación del escalímetro. La estimación de V_r es la media de muchas lecturas, con una incertidumbre estándar que viene dada por la desviación típica experimental del valor medio.

(2) Se supone que existe un informe de calibración que proporciona una estimación de la incertidumbre de la atenuación L_c de la conexión entre el receptor y la antena, junto con una incertidumbre ampliada y un factor de cobertura.

(3) Se supone que existe un informe de calibración que proporciona una estimación del factor de antena en espacio libre (*AF, antenna factor*), junto con una incertidumbre ampliada y un factor de cobertura.

(4) Se supone que existe un informe de calibración que proporciona una estimación de la corrección δV_{sw} de la precisión de la tensión sinusoidal en el receptor, junto con una incertidumbre ampliada y un factor de cobertura.

Comentario: Si un informe de calibrado sólo establece que la precisión de la tensión de la señal sinusoidal está comprendida dentro de una tolerancia dada (±2 dB), debe considerarse que la estimación de la corrección δVsw es cero con una distribución de probabilidad rectangular y anchura mitad de 2 dB.

(5) δV_{sel} tiene en cuenta la incertidumbre debida a la limitada resolución en anchura de banda del receptor de medida o del analizador de espectro, incluyendo la incertidumbre de cualquier factor de corrección destinado a compensar el efecto de la limitada resolución en anchura de banda. Por ejemplo, se utiliza un detector de valor eficaz (RMS) para la medición de una señal AMDC con una anchura de banda de la medición del 10% de la anchura de banda ocupada. En este caso, el factor de corrección será de 10 dB siendo la incertidumbre de este factor de corrección del orden de 0,5 dB para una tolerancia de la anchura de banda del ±10%.

(6) Dependiendo de la distancia a la antena transmisora, el umbral del ruido de un receptor de medida puede estar o no estar suficientemente por debajo de la tensión de entrada de forma que su efecto sobre los resultados de las medidas sea despreciable.

(7) En general, la antena estará conectada al puerto 1 de una red de dos puertos, cuyo puerto 2 está terminado por un receptor con coeficiente de reflexión Γ_r. La red de dos puertos, que puede ser un cable, un atenuador, un atenuador y un cable en serie, o bien alguna otra combinación de componentes, puede representarse por sus parámetros S. La corrección por desadaptación viene dada por

$$\delta M = 20 \log_{10} \left| (1 - \Gamma_e S_{11})1 - \Gamma_r S_{22}) - S_{21}^2 \Gamma_e \Gamma_r \right| \quad (6.9\text{-}4)$$

donde Γ_e es el coeficiente de reflexión visto mirando hacia el puerto de salida de la antena cuando ésta está configurada para la medida de la intensidad de campo. Todos los parámetros están referidos a 50 Ω.

Cuando sólo se conocen las magnitudes, o valores extremos de las magnitudes, de los parámetros, no es posible calcular δM, pero sus valores extremos $\delta M^{\pm}$ no son mayores que

$$\delta M^{\pm} = 20 \log_{10} \left[(1 \pm \left(|\Gamma_e||S_{11}| + |\Gamma_r||S_{22}| + |\Gamma_e||\Gamma_r||S_{11}||S_{22}| + |\Gamma_e||\Gamma_r||S_{21}|^2 \right) \right] \quad (6.9\text{-}5)$$

La distribución de probabilidad de δM tiene aproximadamente forma de U, con una anchura no superior a ($\delta M^+ - \delta M^-$) y una desviación típica no superior que la mitad de la anchura dividida por $\sqrt{2}$.

Para las mediciones de la intensidad de campo, se supone que la especificación de la antena cumple que VSWR ≤ 2,0:1, lo cual significa que $|\Gamma_e| \leq 0{,}33$. También se ha supuesto que la conexión con el receptor se realiza con un cable bien adaptado ($|S_{11}| << 1$, $|S_{22}| << 1$) con una atenuación despreciable ($|S_{21}| \approx 1$), y que la atenuación del receptor en RF es de 0 dB, para lo cual un valor de VSWR ≤ 2,0:1 significa que $|\Gamma_r| \leq 0{,}33$.

La estimación de la corrección δM es cero para una distribución de probabilidad en forma de U y con una anchura igual a la diferencia ($\delta M^+ - \delta M^-$).

Comentario: las expresiones de δM y $\delta M \pm$ muestran que aumentando la atenuación de una red de dos puertos bien adaptada situada antes del receptor, se puede reducir el error de desadaptación. A cambio, se reduce la sensibilidad de la medida.

Para algunas antenas y a determinadas frecuencias, el valor de VSWR puede ser muy superior a 2,0:1.

Es necesario tomar precauciones para asegurar que la impedancia vista por el receptor cumpla el valor especificado de VSWR ≤ 2,0:1 cuando se utiliza una antena compleja.

(8) Cuando se calcula un factor de antena por interpolación de los valores a las frecuencias para las que existen datos de calibrado, la incertidumbre asociada a dicho factor de antena depende del intervalo de frecuencia entre los puntos de calibrado y la dependencia de la frecuencia del factor de antena. La representación gráfica del factor de la antena calibrado en función de la frecuencia permite visualizar la situación.

La estimación de la corrección δAF_f para el error de interpolación del factor de antena es cero con una distribución de probabilidad rectangular cuya anchura mitad es 0,3 dB.

Comentario: A cualquier frecuencia para la que haya disponible un factor de antena calibrado, no es necesario considerar la corrección δAFf.

(9) La dependencia con la altura del factor de antena para una antena compleja es diferente a la de la antena dipolo, que ha sido la considerada para el valor de incertidumbre dado. La estimación de la corrección δAF_h es cero con una distribución de probabilidad rectangular cuya anchura mitad ha sido evaluada a partir del comportamiento con la altura del factor de antena de antenas bicónicas y logarítmico periódicas.

(10) Las respuestas de una antena compleja en cualquier dirección deben considerarse en relación con la dirección del lóbulo principal para el que se ha medido el factor de antena.

La corrección δA_{dir} es cero con una distribución de probabilidad rectangular con la anchura adecuada.

Comentario: Se podría realizar una estimación de $\delta Adir$ distinta de cero con una incertidumbre reducida a partir del diagrama de radiación conocido de la antena de medida, siendo aplicable en función de la frecuencia y del ángulo de incidencia.

(11) La respuesta en polarización cruzada de una antena dipolo puede considerarse normalmente despreciable. La estimación de la corrección δA_{cp} para la respuesta en polarización cruzada de una antena logarítmico periódica es cero con una distribución de probabilidad rectangular cuya anchura mitad sea 0,9 dB, correspondiente a una tolerancia de la respuesta en polarización cruzada CISPR16-1 de –20 dB.

Comentario: Si se utiliza un dipolo como antena de medida, la corrección δAcp es despreciable.

(12) El efecto de una antena no equilibrada es máximo cuando el cable coaxial de entrada se encuentra alineado en paralelo con los elementos de la antena. La estimación de la corrección δA_{bal} para el desequilibrio de antena es cero, con una distribución de probabilidad rectangular con una anchura mitad evaluada a partir de la calidad de funcionamiento de antenas comercialmente disponibles.

(13) Los efectos de la sombra pueden ser tenidos en cuenta en caso de estaciones fijas de comprobación técnica.

La estimación de la corrección δSR_1 es cero con una distribución de probabilidad rectangular cuya anchura mitad sea, por ejemplo, de 1 dB. Es difícil estimar el efecto de sombra debida, por ejemplo, a un edificio.

(14) Los efectos de las reflexiones pueden reducirse promediando la intensidad de campo con las variaciones de la altura de la antena y con la variación de la posición del vehículo en el caso de estaciones móviles de comprobación técnica.

Referencias

European Cooperation for Accreditation of Laboratories [April, 1997] Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration, EAL-R2; and Supplement 1 to EAL-R2, EAL-R2-S1, noviembre, 1997.

ISO [1993] *International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology*. 2ª Edición, ISBN 92-67-01075-1.

ISO [1993] *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. ISBN 92-67-10188-9.

ISO/IEC Guide 98-1:1995 – Guide for the expression of uncertainty in measurement (GUM).

TAYLOR, B. N. and KUYATT, C. E. [September, 1994] Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results. United States Department of Commerce Technology Administration, National Institute of Standards and Technology, NIST Technical Note 1297.

6.10 Procesamiento y diversidad espacial de antenas

6.10.1 Introducción

Aunque durante los últimos 30 a 40 años se han utilizado tanto el procesamiento mediante antenas como la diversidad espacial de las antenas, los avances de la tecnología se han basado principalmente en el desarrollo de dispositivos de comunicaciones. Las mejoras en el ámbito de la radiofrecuencia y de las capacidades de procesamiento han contribuido al desarrollo tecnológico en los últimos años, permitiendo aumentar la cantidad de datos transmitidos y minimizar los problemas por desvanecimiento e interferencias.

La comprobación técnica del espectro también se ha beneficiado de dichas técnicas, adaptando los sistemas de comprobación técnica a las nuevas tecnologías y métodos de transmisión. El desarrollo de sistemas inalámbricos celulares de banda amplia y las aplicaciones de espectro flexible hacen que el entorno radioeléctrico sea cada vez más complejo.

El procesamiento mediante las antenas puede mejorar las prestaciones de funciones de comprobación técnica, como el diagnóstico de la interferencia y la identificación de señales. Asimismo, puede optimizarse la caracterización e identificación de transmisores, la detección e identificación de fuentes interferentes, la determinación de trayectos múltiples, la radiogoniometría y la localización (determinación del ángulo de llegada (AOA) y/o determinación del tiempo de llegada (TOA) y de la diferencia de tiempo de llegada (TDOA)), así como otros factores.

La comprobación técnica del espectro puede beneficiarse de dichas técnicas en entornos difíciles y complejos en casos de:

1. zonas urbanas y montañosas: donde son muy frecuentes las sombras debidas a obstáculos, el desvanecimiento plano o selectivo y las reflexiones por trayectos múltiples y otros efectos;
2. reutilización de frecuencias, por ejemplo:
   - para televisión digital mediante redes de frecuencia única;
   - para redes celulares;
3. atribución dinámica del espectro y convergencia, donde la coincidencia de varias redes de radiocomunicación obliga a que varios transmisores utilicen las mismas bandas de frecuencias.

En este contexto, el procesamiento de antena es especialmente útil por su capacidad para diferenciar transmisores y trayectos de propagación.

6.10.2 Procesamiento de antena y comprobación técnica del espectro

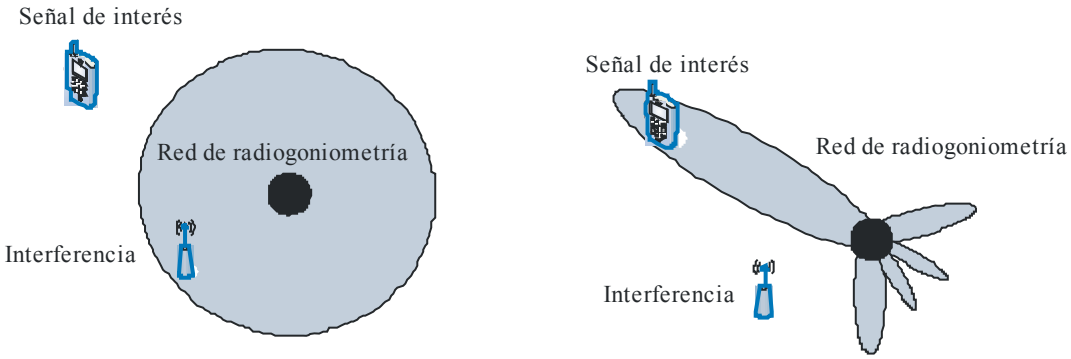
Los principales objetivos del procesamiento de antena son la compensación de interferencias, la separación o diferenciación de transmisores, la optimización de la sensibilidad y la compensación de los efectos debidos a trayectos múltiples (principalmente el desvanecimiento de frecuencias).

Compensación de la interferencia: el filtrado de antena favorece la dirección de un transmisor y rechaza la señal interferente. De esta forma, la señal del transmisor de interés puede demodularse y medirse en condiciones óptimas.

Separación de transmisores: el filtrado de antena permite separar señales con la misma frecuencia. De esta forma, las señales de los transmisores pueden ser demoduladas e identificadas.

FIGURA 6.10-1

Ejemplo del procesamiento de antena: creación de un haz que mejora la sensibilidad y compensación de la interferencia



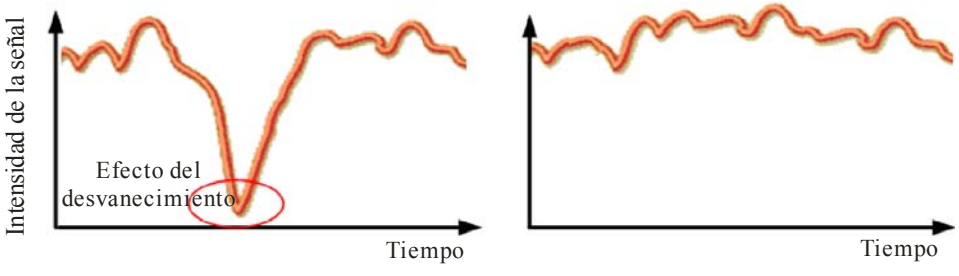
Spectrum-6.10-01

Optimización de la sensibilidad: el filtrado de antena permite conformar un haz digital dirigido hacia la señal deseada, mejorando así la sensibilidad.

Compensación del desvanecimiento: el efecto de los trayectos múltiples es un desvanecimiento aleatorio de la señal debido a la superposición destructiva (o constructiva) de reflexiones que cancela una parte de la energía de la señal durante breves periodos de tiempo. El objetivo del filtrado de antena es reducir dichos efectos gracias a la diversidad espacial que ofrece el procesamiento simultáneo mediante varias antenas.

FIGURA 6.10-2

Ejemplo de señal sin procesamiento de antena: un desvanecimiento profundo impide la demodulación del receptor. A la derecha se observa cómo el procesamiento y la diversidad espacial de las antenas reducen los efectos del desvanecimiento



Spectrum-6.10-02

Todas estas funcionalidades son importantes para mejorar tareas de comprobación técnica, tales como el análisis de interferencias o la identificación de transmisores en un entorno complejo.

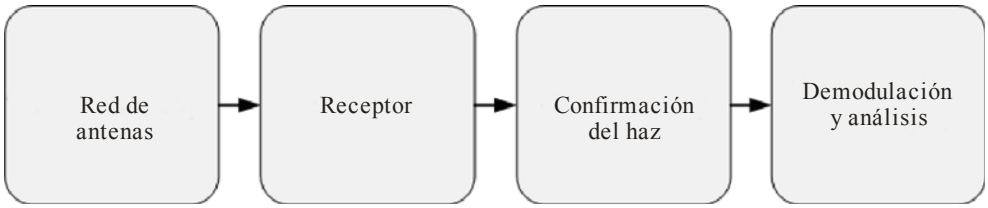
El procesamiento y la diversidad espacial de antenas se basan en la utilización de redes de antenas y receptores coherentes. De esa forma, las funciones necesarias pueden implementarse fácilmente en un interferómetro correlativo multicanal o en radiogoniómetros de resolución avanzada sin necesidad de hardware adicional sino solamente con un software adicional.

6.10.3 Principios del procesamiento de antena

El procesamiento de antena adapta el receptor al entorno local de radiofrecuencia mediante la modificación en tiempo real del diagrama de radiación de la antena, cuyo lóbulo principal se dirige hacia el transmisor de interés.

FIGURA 6.10-3

Esquema de un sistema de procesamiento de antena



Spectrum-6.10-03

Un sistema típico de procesamiento de antena se compone de:

– varios elementos de antena (red de antenas);
– varios receptores con procesamiento coherente;
– algoritmos de procesamiento de señal que modifican la forma de utilización de dichos elementos en función del escenario operativo;
– procesamiento (demodulación, análisis espectral o identificación) de cada una de las señales de entrada seleccionadas.

6.10.3.1 Redes de antena y receptor

La utilización de varias antenas ofrece varias ventajas frente a la utilización de una única antena. La primera es la diversidad espacial, que mejora la fiabilidad del sistema al reducir el desvanecimiento de las señales. La segunda es la conformación de haces que permite concentrar la energía y proporcionar una mejor señal al usuario.

6.10.3.2 Conformación de haz

Existen dos técnicas de procesamiento de antena, a saber, la conformación de haz convencional y la conformación de haz adaptable. La conformación de haz convencional implementa varios diagramas de radiación fijos y se selecciona el haz más apropiado. La conformación de haz adaptable permite dirigir la antena en cualquier dirección de interés y simultáneamente eliminar señales interferentes.

6.10.3.2.1 Filtrado de antena o conformación de haz convencional

Una red de conformación de haz genera una señal de canal único a partir de las señales de varias antenas mediante el filtrado de cada señal individual (filtros adaptables) y su posterior suma, es decir, combinando linealmente las señales con una ponderación de amplitud y fase de las mismas en función de la frecuencia. Para una función de ponderación dada, la respuesta espacial de dicho conformador de haz puede describirse mediante un diagrama de radiación que refleje la ganancia de la red de antenas en función de la dirección.

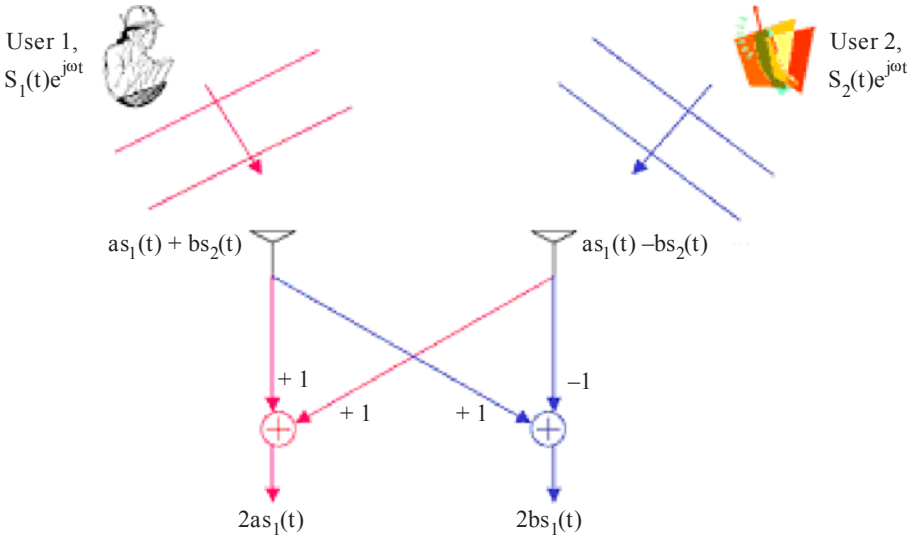
La Fig. 6.10-4 muestra un escenario sencillo de conformación de haz convencional: a partir de una red de antenas que recibe las señales «Usuario 1» y «Usuario 2», el algoritmo permite obtener dos resultados al aplicar distintos pesos a las señales entrantes.

6.10.3.2.2 Antena adaptable o conformación de haz adaptable

La conformación de haz adaptable aprovecha la interferencia (u otras señales presentes en la red de antenas) para modificar la directividad de la red de antenas. La fase y la amplitud de la señal de las distintas antenas se combinan de forma que el diagrama de radiación sea óptimo para la señal deseada.

FIGURA 6.10-4

Ejemplo de un escenario simple con una red de dos antenas



Spectrum-6.10-04

Los métodos basados en redes de antenas adaptables pueden clasificarse según los criterios utilizados para seleccionar las ponderaciones que permiten combatir la interferencia y los algoritmos que permiten modificar oportunamente dichas ponderaciones. Entre los criterios más útiles de selección de ponderaciones está la compensación del ruido, la descomposición del vector propio o eigenvector y la conformación limitada de haces, que está estrechamente relacionada con los criterios de varianza mínima y máxima verosimilitud de la dirección. La compensación del ruido utiliza una señal compuesta exclusivamente por interferencia para eliminar la interferencia correlada de una señal compuesta por la señal deseada más interferencia. La descomposición del vector propio puede utilizarse para estimar las direcciones de llegada de señales y cancelar todas menos una de ellas.

6.10.3.3 Demodulación y análisis

Cuando se aplican algoritmos de antena adaptables a la señal de entrada de la red de antenas, la señal puede remodularse y analizarse para identificar el transmisor.

El uso de antenas adaptables permite mejorar la SNR o la SINR, y ofrece una mayor ganancia global pues la potencia de las antenas receptoras se combina de forma coherente.

Cuando existen canales independientes entre transmisor y receptor se produce una ganancia por diversidad que reduce notablemente la probabilidad de que todos los canales experimenten simultáneamente un desvanecimiento profundo.

6.11 Documentación requerida

Para poder trabajar con eficacia en una estación de comprobación técnica, tiene que haber en la misma una colección de los documentos y soportes lógicos pertinentes.

También se necesita documentación para la mejor comprensión y aplicación de este Manual de comprobación técnica del espectro.

Los documentos pueden almacenarse en formato digital para ahorrar espacio y facilitar su uso. En los puntos siguientes se enumera un conjunto de documentos y programas de este género.

6.11.1 Documentos internacionales básicos y generales

El documento básico que cubre la utilización del espectro de radiofrecuencias es el Reglamento de Radiocomunicaciones.

El Reglamento, como instrumento primordial de la estructura internacional que regula las radiocomunicaciones, se basa en la utilización de dos conceptos principales:

– las atribuciones de bandas de frecuencias a servicios de radiocomunicación mutuamente compatibles que operan en regiones específicas del espectro;

– los procedimientos reglamentarios voluntarios u obligatorios (coordinación, notificación y registro) que están adaptados a la estructura de atribuciones.

El Reglamento de Radiocomunicaciones está preparado, revisado y adoptado por las Conferencias Mundiales de Radiocomunicaciones (CMR), y publicado por la UIT. Según su Artículo 20 (Documentos de servicio), los siguientes documentos son publicados por la UIT y pueden formar parte de la documentación existente en las estaciones de comprobación técnica:

Lista I – *Lista Internacional de Frecuencias.*

Lista IV – *Nomenclátor de las estaciones costeras y de las estaciones que efectúan servicios especiales.*

Lista V – *Nomenclátor de las estaciones de barco.*

Lista VIII – *Nomenclátor de las estaciones de comprobación técnica internacional de las emisiones.*

Lista VIII A – *Nomenclátor de las estaciones de los servicios de radiocomunicación espacial y del servicio de radioastronomía.*

Manual para uso de los servicios móvil marítimo y móvil marítimo por satélite.

Sin embargo, el Reglamento de Radiocomunicaciones está orientado principalmente hacia aquellas cuestiones que tienen un carácter mundial o regional, y en muchos aspectos hay lugar para acordar soluciones especiales a nivel nacional, bilateral o multilateral.

6.11.2 Documentación mínima que debe existir en las estaciones de comprobación técnica de emisiones

El Cuadro 6.11-1 enumera la documentación mínima que debe estar disponible en las estaciones de comprobación técnica.

Esta documentación ha de estar adaptada a las tareas individuales de la estación de comprobación y a la estructura del sistema de comprobación técnica del espectro en su totalidad.

CUADRO 6.11-1

Documentación mínima que debe estar disponible en las estaciones de comprobación técnica

Internacional	Nacional
• Circular Internacional de Información sobre Frecuencias (IFIC) de la UIT BR en CD-ROM[1] • Planes de frecuencia regionales • Reglamento de Radiocomunicaciones[1] • Acuerdos bilaterales y regionales • LISTA VIII de la UIT (Nomenclátor de las estaciones de comprobación técnica internacional de las emisiones)[1] • Lista IV de la UIT (Estaciones costeras y de las estaciones que efectúan servicios especiales)[1] • Lista V de la UIT (Estaciones de barco y de las asignaciones a identidades del servicio móvil marítimo)[1, 3] • Recomendaciones del UIT-R[4] • Manual para la comprobación técnica del espectro[1] • Manual de Gestión Nacional del Espectro	• Cuadro de atribución de frecuencias nacionales • Asignaciones de frecuencia nacionales (base de datos) • Leyes y decretos nacionales • Mapas (o mapas digitales) de diferentes escalas[2] • Mapas de carreteras y planos de ciudades[2] • Manuales de usuario y manuales de servicio para todos los equipos • Directorio telefónico de la propia organización y de otros números importantes • Directorio telefónico público • Instrucciones de trabajo • Documentación sobre casos anteriores[5]

1 Estos documentos se han de tener por lo menos en las estaciones de comprobación en ondas decamétricas.

2 Se necesitan los mapas en cada estación y en cada vehículo.

3 La información contenida en esta lista puede además obtenerse por Internet a través del sistema ITU-MARS (http://www.itu.int/mars)..

4 Las Recomendaciones UIT-R se han de utilizar como referencia. No obstante, lo esencial de ellas puede transformarse en instrucciones nacionales de trabajo y de medición

5 Como ya se ha indicado en el § 2.2.5, la documentación sobre casos anteriores puede servir de referencia.

6.11.3 Recomendaciones UIT-R

Las Recomendaciones UIT-R constituyen un conjunto de normas técnicas y de explotación recomendadas para las radiocomunicaciones. Son el resultado de los estudios emprendidos por las Comisiones de Estudio del UIT-R.

Las Recomendaciones UIT-R son aprobadas por los Estados Miembros. Su aplicación no es obligatoria; sin embargo, como están elaboradas por expertos de administraciones, operadores, la industria y otras organizaciones interesadas en las cuestiones de radiocomunicación en todas las partes del mundo, gozan de una elevada reputación y se aplican mundialmente.

Las Recomendaciones UIT-R se dividen en Series según los temas que abarcan, a saber:

BO Distribución por satélite

BR Registro para producción, archivo y reproducción; películas en televisión

BS Servicio de radiodifusión sonora

BT Servicio de radiodifusión (televisión)

F Servicio fijo

M Servicios móviles, de radiodeterminación, de aficionados y otros servicios por satélite conexos

P Propagación de las ondas radioeléctricas

RA Radio astronomía

RS Sistemas de detección a distancia

S Servicio fijo por satélite

SA Aplicaciones espaciales y meteorología

SF Compartición de frecuencias y coordinación entre los sistemas del servicio fijo por satélite y del servicio fijo

SM Gestión del espectro

SNG Periodismo electrónico por satélite

TF Emisiones de frecuencias patrón y señales horarias

V Vocabulario y cuestiones afines

Las Recomendaciones e Informes UIT-R están publicados y disponibles en las páginas web de la UIT: (http://www.itu.int/rec/R-REC) y (http://www.itu.int/pub/R-REP). También se publican cada dos años en un DVD-ROM.

6.11.4 Recomendaciones e Informes de la CE 1 del Sector de Radiocomunicaciones

Se trata de las recomendaciones e Informes del UIT-R relativas a la Gestión del Espectro, Contienen información fundamental para las estaciones de comprobación técnica.

En relación con las Recomendaciones, véase (http://www.itu.int/rec/R-REC-SM/es) y en relación con los Informes, véase (http://www.itu.int/publ/R-REP-SM/es).

NOTA – Siempre debe utilizarse la versión más actualizada de cada Recomendación.

6.11.5 Manuales UIT-R

A semejanza de las Recomendaciones UIT-R, los Manuales UIT-R son un conjunto de textos técnicos y de explotación, con base en las Recomendaciones e Informes del UIT-R, orientados a las radiocomunicaciones en aspectos más prácticos. Son también el resultado de los estudios emprendidos por las Comisiones de Estudio del UIT-R. Se revisan y publican cada pocos años y cuando se estima necesario. Para las tareas de comprobación técnica del espectro son a considerar los siguientes Manuales UIT-R:

CE 01 Gestión del Espectro

– Técnicas informatizadas para la gestión del espectro (CAT), (http://www.itu.int/pub/R-HDB-01/es).

– Gestión nacional del espectro, (http://www.itu.int/publ/R-HDB-21/es).

– Comprobación técnica del espectro (véase la Nota 1).

– Suplemento al Manual de Comprobación técnica del espectro (véase la Nota 1).

NOTA 1 – Reemplazada por la versión actual del Manual de Gestión del Espectro.

CE 03 Propagación de las ondas radioeléctricas

– Curvas de propagación de las ondas radioeléctricas sobre la superficie de la Tierra, (http://www.itu.int/pub/R-HDB-13/es).

– Ionosfera y sus efectos en la propagación de las ondas radioeléctricas terrenales y en sentido Tierra-espacio desde la banda de ondas miriamétricas a la banda de ondas centimétricas, (http://www.itu.int/publ/R-HDB-32/es).

– Radiometeorología, (http://www.itu.int/publ/R-HDB-26/es).

– Información de propagación de las ondas radioeléctricas para la predicción de las comunicaciones en Tierra-espacio, (http://www.itu.int/publ/R-HDB-27/es).

– Propagación de las ondas radioeléctricas en sistemas terrenales móviles terrestres en las bandas de ondas métricas/decimétricas, (http://www.itu.int/publ/R-HDB-44/es).

– Información sobre la propagación de las ondas radioeléctricas para el diseño de enlaces terrenales entre puntos fijos links, (http://www.itu.int/pub/R-HDB-54/es).

CE 04 Servicios por satélite

– Comunicaciones por satélite (SFS), (http://www.itu.int/publ/R-HDB-42/es).

CE 05 Servicios terrenales

– Compatibilidad entre el servicio de radiodifusión sonora en la banda de aproximadamente 87-108 MHz y los servicios aeronáuticos en la banda 108-137 MHz , (http://www.itu.int/publ/R-HDB-12).

– Sistemas de relevadores radioeléctricos digitales, (http://www.itu.int/publ/R-HDB-24/es).

– Servicio móvil terrestre (incluso acceso inalámbrico) - Volumen 1: Acceso inalámbrico fijo, (http://www.itu.int/pub/R-HDB-25/es).

– Servicio móvil terrestre (incluso acceso inalámbrico) - Volumen 2: Principios y enfoques de la evolución hacia las IMT-2000/FSPTMT, (http://www.itu.int/publ/R-HDB-30/es).

– Servicio móvil terrestre (incluso acceso inalámbrico) - Volumen 3: Sistemas de despacho y de mensajería avanzados, (http://www.itu.int/publ/R-HDB-47/es).

– Servicio móvil terrestre (incluso acceso inalámbrico) - Volumen 4 : Sistemas de transporte inteligentes, (http://www.itu.int/publ/R-HDB-49/es).

– Migración a los sistemas IMT-2000 - Suplemento 1 (Revisión 1): Manual - Implantación de los sistemas IMT-2000, (http://www.itu.int/publ/R-HDB-46/es).

CE 06 Servicio de radiodifusión

– Manual DTTB - Radiodifusión de televisión terrenal digital en las bandas de ondas métricas/decimétricas, (http://www.itu.int/publ/R-HDB-39/es).

– Diseño de sistemas de radiodifusión en ondas decamétricas, (http://www.itu.int/publ/R-HDB-33/es).

– Diseño de sistemas de radiodifusión en ondas kilométricas - hectométricas, (http://www.itu.int/publ/R-HDB-38/es).

CE 07 Servicios científicos

– Selección y utilización de sistemas de frecuencia y de tiempo con precisión, (http://www.itu.int/publ/R-HDB-31/es).

– Transferencia y difusión por satélite de señales horarias y frecuencias, (http://www.itu.int/pub/R-HDB-55/es).

6.11.6 Soportes lógicos pertinentes del UIT-R

Desde hace pocos años, un creciente número de administraciones han solicitado programas informáticos de ingeniería como soporte de sus actividades de gestión de frecuencia nacionales e internacionales. Los programas son presentados por los participantes en los trabajos de las Comisiones de Estudio de Radiocomunicaciones o por la Oficina de Radiocomunicaciones.

La descripción detallada de los programas informáticos disponibles, que podrían ser de interés para la gestión del espectro radioeléctrico, puede obtenerse electrónicamente a través de la Web de la UIT en Internet http://www.itu.int.

Son ejemplos de estos programas los siguientes:

1. ACP: Programa de cobertura de antena.
2. IDWM: Mapa mundial digitalizado de la UIT (IDWM) y biblioteca de subrutinas.
3. MSAM: Modelos de análisis del espectro por microcomputador. (http://ntiacsd.ntia.doc.gov/msam/).
4. Cálculos de ondas de superficie, (http://www.itu.int/ITU-R/go/rsg3-software-ionospheric/es).
5. *SMS4DC*, un Sistema de gestión del espectro para países en desarrollo.
6. MARS, Sistema de Acceso y Extracción en el Servicio Móvil Marítimo, los datos más actualizados registrados en la base de datos marítimos de la UIT, (http://www.itu.int/ITU-R/go/mars/es)
7. GLAD Banco de datos mundial de las administraciones: sistema de recuperación de datos en línea y el depósito central de la información común de la UIT-R en relación con las administraciones y las zonas geográficas, (http://www.itu.int/ITU-R/go/glad/es).

Además se puede acceder a bancos de datos y programas informáticos sobre la propagación de ondas radioeléctricas en la dirección: http://www.itu.int/ITU-R/go/sg3-dtbank-dbsg3.

6.11.7 Sitios Internet en la Web

Las direcciones Internet de la Malla Mundial (*World Wide Web* – WWW) representan localizaciones permanentes en la Web que poseen información relativa a diversos aspectos de la comprobación técnica del espectro y la gestión del espectro.

La Web debe considerarse como una fuente importante de información para la comprobación técnica y la gestión, con programas informáticos útiles susceptibles de descarga, y además como un medio para interactuar con las organizaciones nacionales de gestión del espectro y con otras organizaciones de comprobación técnica a través del correo electrónico y otras documentaciones.

El Cuadro 6.11-2 enumera los sitios Internet de la Web que pueden consultar los lectores interesados por la comprobación técnica radioeléctrica:

CUADRO 6.11-2

Sitios web con información relevante sobre comprobación técnica de emisiones radioeléctricas

Asunto	Descripción/Dirección WWW
Directorio mundial de la UIT	Información de contacto de Administraciones: www.itu.int/GlobalDirectory/
Oficina de Radiocomunicaciones de la UIT	Portada : www.itu.int/ITU-R/go/rhome
Oficina de Radiocomunicaciones de la UIT	Base de datos sobre comprobación técnica: www.itu.int/ITU-R/go/terrestrial-monitoring
Gestión/comprobación técnica del espectro de la UIT	Documentos de las Comisiones de Estudio: www.itu.int/ITU-R/go/rsg1
Recomendaciones UIT-R	www.itu.int/publ/R-REC/es
Manuales UIT-R	www.itu.int/publ/R-HDB/es
Ingeniería	International Engineering Consortium (IEC): www.iec.org/
	Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE): www.ieee.org/
	IEEE Antennas and Propagation Society: www.ieeeaps.org/
	IEEE Instrumentation & Measurement Society: www.ieee-ims.org
	IEEE Broadcast Technology Society: www.ieee.org/organizations/society/bt/index.html
	Fraunhofer Institute, Germany: www.iis.fraunhofer.de/en/index.jsp
	Dutch Electronics and Radio Society: www.nerg.nl
	International Amateur Radio Union: www.iaru.org
Organizaciones Regionales	Asian-Pacific Telecommunity (APT): www.aptsec.org
	European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT): www.cept.org
	European Communications Office: http://www.cept.org/eco
	Comisión Interamericana de Telecomunicaciones (CITEL): https://citel.oas.org/es/Paginas/default.aspx
	Arab Spectrum Management Group (ASMG): www.asmg.ae
	African Telecommunication Union (ATU): www.atu-uat.org/
	Regional Commonwealth in the Field of Communications (RCC): www.rcc.org.ru

CUADRO 6.11-2 (*fin*)

Asunto	**Descripción/Dirección WWW**
Organizaciones nacionales	Agence Nationale des Fréquences, France: www.anfr.fr
	Federal Communications Commission, USA: www.fcc.gov
	Federal Network Agency, Germany: www.bundesnetzagentur.de
	Industry Canada: www.strategis.gc.ca/spectrum
	Ministry of Communications, Israel: www.moc.gov.il/140-en/MOC.aspx
	Monitoring Earth Station, Leeheim, Germany: http://www.bundesnetzagentur.de/cln_1932/EN/Areas/Telecommunications/TechnicalTelecomsRegulation/SpaceRadioMonitoringStadion/SpaceRadioMonitoringStation_Basepage.html
	National Communications Authority, Hungary:www.nhh.hu
	National Telecommunication Agency, Brazil: www.anatel.gov.br
	U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration radio user's page: www.ngdc.noaa.gov/mgg/topo/globe.html
	Communications Research Centre (CRC), Canada: www.crc.ca
	National Research Council, Canada: www.nrc.ca
	Ukrainian State Centre of Radio Frequencies and Supervision for Telecommunications: www.ucrf.gov.ua
	Solar terrestrial activity report (solar Flux/A index chart): www.solen.info/solar/
	Central Radio Management Office (CRMO), Republic of Korea: www.crmo.go.kr/en
Agencias científicas	U.S. National Science Foundation: www.nsf.gov
	Committee on Radio Astronomy Frequencies: www.craf.eu/
	Institute for Telecommunication Sciences: www.its.bldrdoc.gov

ANEXO 1
AL MANUAL

Planificación y licitación de sistemas de comprobación técnica

		Página
A1	Cuestiones a considerar por la autoridad reguladora antes de publicar una licitación	707
A2	Visión general de un proceso de licitación	708
A3	Etapa de preparación: planificación	708
A3.1	Concepto de un sistema de comprobación técnica de las emisiones radioeléctricas	709
A3.2	Estudio de viabilidad	710
A3.2.1	Objetivo del estudio de viabilidad	710
A3.2.2	Contenido y estructura del estudio de viabilidad	710
A3.3	Plan de negocio	711
A3.4	Planificación y diseño del sistema	712
A3.4.1	Análisis de las leyes (y aspectos jurídicos) existentes	713
A3.4.2	Análisis de los procedimientos (y métodos) existentes	713
A3.4.3	Análisis de las capacidades de medida existentes	713
A3.4.4	Evaluación del mercado	714
A3.4.5	Base de datos de gestión del espectro	714
A3.4.6	Análisis de programas de ingeniería	714
A3.4.7	Evaluación del sistema nacional de gestión y determinación del sistema nacional de comprobación técnica	714
A3.4.8	Evaluación del hardware y software	715
A3.4.9	Gestión nacional del proyecto	715
A3.5	Desarrollo de las especificaciones del sistema	715
A3.5.1	Centros nacionales y regionales, estaciones de comprobación técnica	715
A3.5.1.1	Organización, número de posiciones de operador y equipo de una estación de comprobación técnica	716
A3.5.1.2	Tareas de medición	717
A3.5.2	Especificaciones generales del equipo	719
A3.5.3	Vehículos y dispositivos de comprobación técnica	720
A3.5.4	Software	720
A3.5.5	Requisitos generales de las unidades que forman los sistemas de comprobación técnica	720
A3.5.6	Especificaciones de los servicios	721
A3.5.6.1	Examen del emplazamiento	721
A3.5.6.2	Enlaces y redes de telecomunicaciones	721
A3.6	Capacitación	721
A3.7	Mantenimiento y reparación	722
A3.8	Documentación	722

Página

A4 Etapa de implementación: procesos de licitación 722
A4.1 Llamados a licitación tipo para comprobación técnica 722
A4.1.1 Contenido del documento del llamado a licitación de un sistema de comprobación técnica 722
A4.1.1.1 Capítulo de orientaciones 722
A4.1.1.2 Artículos principales del contrato 725
A4.1.1.3 Requisitos técnicos 725
A4.2 Propuesta tipo del licitador 725
A4.2.1 Introducción 725
A4.2.2 Características técnicas generales 725
A4.2.3 Funciones del sistema 726
A4.2.4 Método de ejecución del sistema 726
A4.2.5 Garantías técnicas 726
A4.2.6 Descripción detallada de: 726
A4.2.7 Presentación de referencias 726
A4.2.8 Diagramas de bloques del sistema 726
A4.2.9 Precio 726
A4.3 Formato de contrato tipo 727
A4.4 Evaluación y comparación de propuestas y adjudicación del contrato 728
A4.4.1 Procedimientos definidos por la UIT 729
A4.4.2 Procedimientos definidos por el Banco Mundial COSTO o PRECIO 729
A4.4.3 Procedimientos en caso de que la administración contratante no esté sujeta a los procedimientos de la UIT o del Banco Mundial 732
A5 Etapa final (terminación): procedimiento de aceptación 732
A5.1 Aceptación en fábrica 732
A5.2 Procedimiento de prueba de aceptación en emplazamiento 732
A5.2.1 Aceptación (o aceptación provisional en caso de un proceso con aceptación provisional y final) 732
A5.2.2 Aceptación final 733
Apéndice 1 al Anexo 1 – Ejemplo de análisis técnico de propuestas de la UIT 734
Apéndice 2 al Anexo 1 – Ejemplo de evaluaciones comercial y jurídica de la UIT 739
Lista de abreviaturas utilizadas en este Manual 742

A1 Cuestiones a considerar por las autoridades reguladoras antes de publicar una licitación

Una autoridad reguladora de las radiocomunicaciones en el ámbito nacional tiene que interpretar y aplicar las disposiciones del Reglamento de Radiocomunicaciones (RR) de la UIT, que obligan con la fuerza de un tratado internacional. Asimismo tiene que aplicar las disposiciones estatuidas en las leyes nacionales y las normas que en ellas se encuadran, en lo que a las radiocomunicaciones se refiere. También se ha de hacer cumplir lo dispuesto en las autorizaciones o licencias concedidas a los diversos usuarios de servicios inalámbricos a través de todo el país. La Autoridad nacional se vale de la Organización de comprobación técnica para obtener datos prácticos que sean pertinentes para la gestión del espectro, incluidos el control y la reglamentación de las redes inalámbricas, con miras a garantizar un funcionamiento libre de interferencias en todas las redes.

A la Organización de comprobación técnica se le han confiado todas las responsabilidades necesarias para llevar a efecto una utilización amplia y coherente de las radiocomunicaciones en el país. La planificación, coordinación y reglamentación del espectro de radiofrecuencia en el contexto nacional comporta los aspectos siguientes:

a) Optimización del uso del espectro radioeléctrico mediante la observancia de las últimas normas y prácticas internacionales sobre gestión del espectro y funciones de comprobación técnica de emisiones;

b) Utilización y protección del recurso órbita/frecuencia para el sistema de satélite y otros sistemas espaciales nacionales mediante la publicación, notificación y registro del sistema nacional con la UIT y la garantía de una continuada protección frente a sistemas nuevos de otros países;

c) Identificación de las necesidades de espectro para las nuevas redes inalámbricas y asignación a las mismas de frecuencia(s), potencia, anchura de banda, emisión, horas de funcionamiento y otros parámetros técnicos de valor adecuado, con las disposiciones de explotación, reglamentación y administrativas que sean oportunas;

d) Autorización de la instalación y explotación de las estaciones inalámbricas, especificando todos los parámetros técnicos y operativos necesarios, como son la frecuencia de funcionamiento, la potencia, emisión, horas de funcionamiento, etc.;

e) Establecimiento de reglamentos, parámetros y normas técnicas que gobiernen la utilización de cada banda de frecuencias o frecuencia en particular por las estaciones de diferentes servicios de radiocomunicación, teniendo en cuenta los actuales reglamentos y acuerdos internacionales;

f) Responsabilidad de los trabajos especiales de coordinación de sistemas o equipos de radiocomunicaciones en situaciones de emergencia como catástrofes naturales o de otro género;

g) Mantenimiento y puesta al día de toda la información sobre sistemas de radiocomunicación autorizados, por ejemplo, frecuencias, localizaciones de estaciones, potencias, distintivos de llamada, etc.;

Comprobación técnica de emisiones, incluida la comprobación móvil, como una parte importante del proceso de gestión del espectro de radiofrecuencias. Es importante su papel en la planificación, ingeniería, compatibilidad electromagnética y en asegurar la observancia de los parámetros concedidos o autorizados. En realidad, se considera como los ojos y los oídos de la gestión del espectro.

En este Manual sobre comprobación técnica del espectro figuran muchas descripciones detalladas sobre estaciones, equipos y procedimientos. El presente Anexo ofrece una visión general de la planificación y los estudios necesarios para el diseño de un sistema de comprobación técnica de las emisiones a escala nacional o de una estación de comprobación técnica de las emisiones fija o móvil.

El espectro de radiofrecuencias ha de utilizarse de manera equitativa, económica, eficaz y racional. Por tanto, se requiere garantizar una adecuada repetibilidad de las frecuencias. Es necesario asegurar que se adoptan equipos y sistemas de comprobación técnica apropiados.

A2 Visión general de un proceso de licitación

Cuando la Administración nacional decide crear un sistema de comprobación técnica de las emisiones a escala nacional, una nueva estación de comprobación técnica local o simplemente un sistema de medición móvil, el proyecto para la implementación de dicho objetivo se divide en tres etapas (véase la Fig. A-1).

Etapa de preparación – Planificación:

– Concepto de sistema de comprobación técnica radioeléctrica.
– Estudio de viabilidad.
– Plan de negocio.
– Planificación del sistema.
– Especificaciones de los sistemas.

Etapa de implementación – Proceso de licitación:

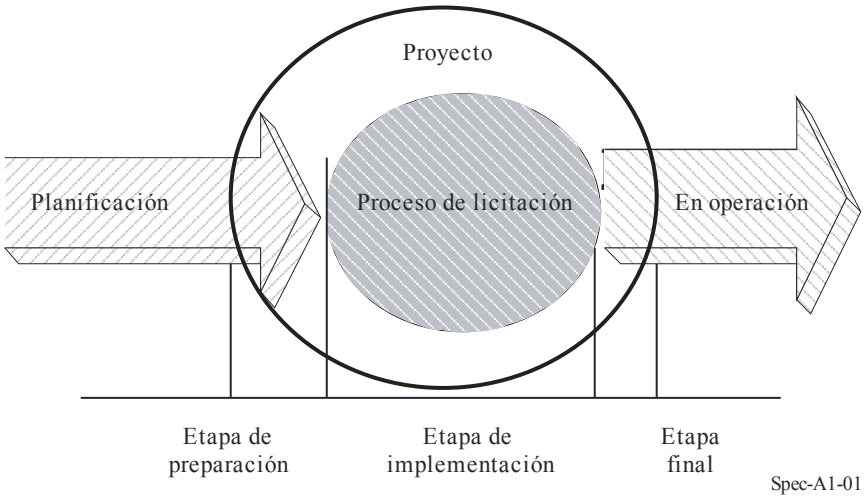
– Invitación para iniciar licitaciones de adquisición pública (teniendo en cuenta la competencia de los licitadores, cláusulas de descalificaciones por no cumplir el contrato).
– Invitación para realizar propuestas (incluyendo aclaraciones a los licitadores sobre las especificaciones).
– Envío de propuestas por los licitadores.
– Evaluación de las propuestas recibidas (incluidas las solicitudes de aclaración).
– Decisión para la adjudicación del contrato.
– Firma y entrada en vigor del contrato.

Etapa final (finalización) – Procedimiento de aceptación y puesta en funcionamiento:

– Fábrica, procedimientos de aceptación provisional y final.
– Suministro de formación, mantenimiento y repuestos.
– Inicio de la operación.

FIGURA A1-1

Tres etapas de un proyecto



A3 Etapa de preparación: planificación

En este punto se describen las distintas etapas que pueden llevar a la licitación de un nuevo sistema de comprobación técnica completo o a parte o partes del mismo, resultando finalmente en la adquisición de equipamiento.

Si sólo es necesario sustituir una parte del sistema de comprobación técnica existente o algún elemento individual de un equipo, no son necesarias algunas de dichas etapas.

En caso de ser necesario un nuevo sistema de comprobación técnica completo, han de elaborarse una serie de requisitos fundamentales para que el sistema de comprobación técnica del que finalmente se disponga responda a las necesidades del organismo regulador, al presupuesto disponible, etc.

A continuación se describen las etapas siguientes:

– Concepto de sistema de comprobación técnica radioeléctrica.
– Estudio de viabilidad.
– Plan de negocio.
– Planificación y diseño del sistema.
– Desarrollo de las especificaciones del sistema.

A3.1 Concepto de un sistema de comprobación técnica de las emisiones radioeléctricas

Tal como se recoge en el Capítulo 1 de este Manual, la gestión del espectro se describe como el proceso en su conjunto que reglamenta y administra la utilización del espectro de frecuencias radioeléctricas. El objetivo de la gestión del espectro es maximizar la eficiencia del espectro y minimizar las interferencias. Las normas y los reglamentos, basados en la legislación relevante, conforman la base reglamentaria y legal del proceso de gestión del espectro. Las bases de datos de información, con información detallada de todos los usuarios autorizados del espectro, proporcionan la base administrativa y técnica del proceso. El análisis de la información de dichas bases de datos facilita el proceso de gestión del espectro a partir del cual se toman las decisiones de atribución del espectro, asignación del espectro y concesión de licencias. La comprobación técnica del espectro proporciona los medios necesarios para mantener la integridad del proceso de gestión del espectro y puede definirse como un proceso de observación del espectro radioeléctrico y de informaron acerca de su utilización.

Al definir el concepto operativo del sistema, deben considerarse los siguientes elementos:

– La automatización del proceso de gestión de datos y comprobación técnica del espectro, con el soporte lógico apropiado. El equipo y los programas informáticos están especializados para las actividades de comprobación técnica del espectro, por lo que es esencial contar con los materiales adecuados para tales actividades.
– El desarrollo de instalaciones de comprobación técnica automatizada, inspecciones de ruido radioeléctrico y radiogoniometría, en modos fijo y móvil (con capacidad de hasta 3 GHz).
– Las instalaciones de comprobación técnica especializadas para microondas y otras bandas de frecuencias superiores, y para servicios especiales de hasta 40 GHz.
– El desarrollo de las instalaciones de comprobación técnica de satélites para sistemas OSG y no OSG.
– La estructura de la organización (el personal) y su interacción con otros organismos, especialmente en lo relativo a la gestión del espectro.
– La infraestructura existente y la necesaria.
– La capacitación de personal para conseguir la adecuada competencia y dotación a nivel institucional.

Estos elementos se tratan en los puntos siguientes.

Una vez definido el concepto operativo, debe realizarse un análisis de costos/beneficios para determinar si pueden satisfacerse las necesidades de la Administración de una manera eficaz desde el punto de vista económico. Esto siempre es necesario, tanto en el caso de un sistema nuevo como si se trata de modernizar o modificar un sistema existente.

A3.2 Estudio de viabilidad

A3.2.1 Objetivo del estudio de viabilidad

El estudio de viabilidad es uno de los aspectos fundamentales cuando se inicia un proceso de licitación. El estudio es necesario para analizar alternativas, estudiar su impacto en las posibilidades de mediciones futuras y encontrar así la solución más adecuada, incluyendo el efecto que tendría sobre las responsabilidades de gestión del espectro una eventual decisión de no adquirir nuevo equipo.

El estudio debería asimismo determinar cuáles serían las ventajas que el desarrollo técnico en cuestión tendría para la Autoridad, la sociedad de la información y los usuarios del espectro.

Durante la planificación técnica de los dispositivos o sistemas de medición para la comprobación técnica, debe tenerse en cuenta la capacidad técnica, la vida útil y el deterioro de los dispositivos o sistemas existentes.

En el curso de la planificación y desarrollo de los dispositivos o sistemas de medida, deberían tenerse en cuenta y especificarse los elementos siguientes:

- Zonas de cobertura de la comprobación técnica en función de:
  - i) responsabilidades del órgano de reglamentación,
  - ii) tamaño del país,
  - iii) densidad de la utilización del espectro en el país,
  - iv) necesidad de otros elementos funcionales del proceso de gestión del espectro, tales como los departamentos de planificación de frecuencias, concesión de licencias y vigilancia del cumplimiento,
  - v) responsabilidad del servicio de comprobación técnica,
  - vi) utilización futura planificada de las radiocomunicaciones en el país.
- Tareas de medición derivadas del entorno reglamentario.
- Especificación técnica de los equipos relacionados con dichas tareas.
- Necesidad de un sistema de medición completo o de un sistema diseñado especialmente para realizar determinados tipos de mediciones.
- Número y ubicación de estaciones fijas (distantes).
- Funciones de las unidades de comprobación técnica móviles.
- Número y tipo de unidades móviles.
- Adquisición de un sistema llave en mano o construcción de un sistema a partir de sus elementos componentes individuales.
- Integración en un sistema existente o adquisición de un sistema autónomo.
- Necesidad de un acceso remoto a las base de datos de mediciones y/o de gestión de frecuencias.
- Grado de dependencia de un único suministrador.
- Precio y costes de funcionamiento.

La profundidad de los estudios de viabilidad y el coste de contribuciones externas debe ser proporcional al valor de la inversión.

A3.2.2 Contenido y estructura del estudio de viabilidad

Para lograr los objetivos del estudio, deben especificar exactamente el objetivo técnico, la estructura, el procedimiento de ejecución, los recursos necesarios (financieros y humanos), las posibles alternativas y la fecha prevista de finalización.

El estudio debería informar en detalle de lo siguiente:

- Definición del objeto del estudio.
- Entorno legal y reglamentario del mercado de telecomunicaciones.

– Definición de las razones y objetivos del estudio:
  i) Antecedentes y justificación del nuevo sistema de comprobación técnica
  ii) Estructura del sistema de comprobación técnica a implementar
  iii) (Nuevas) tareas del servicio de comprobación técnica, incluyendo gamas de frecuencias consideradas, etc.
  iv) Equipo existente obsoleto que no realiza las mediciones necesarias
  v) Usabilidad e integración del equipo de medición existente
  vi) Equipos el sistema de comprobación técnica con sistemas técnicos de última generación
  vii) Mejorar la eficacia y eficiencia del trabajo del personal de comprobación técnica
  viii) Número de personas necesarias para operar un nuevo sistema
  ix) Competencia técnica necesaria del personal
  x) Sistemas informáticos y de gestión de datos
  xi) Cálculos económicos.
– Alternativas para la implementación del proyecto.
– Desarrollos futuros previsibles.
– Calendario del estudio.
– Planificación de recursos:
  i) Recursos humanos (para las etapas de preparación, implementación y operación)
  ii) Recursos financieros (para las etapas de preparación, implementación y operación).
– Gestión de riesgos:
  i) Identificación de factores de riesgo
  ii) Clasificación de riesgos
  iii) Análisis de los efectos de los riesgos
  iv) En base a los análisis, elaboración de la politica de gestión de riesgos más adecuada.

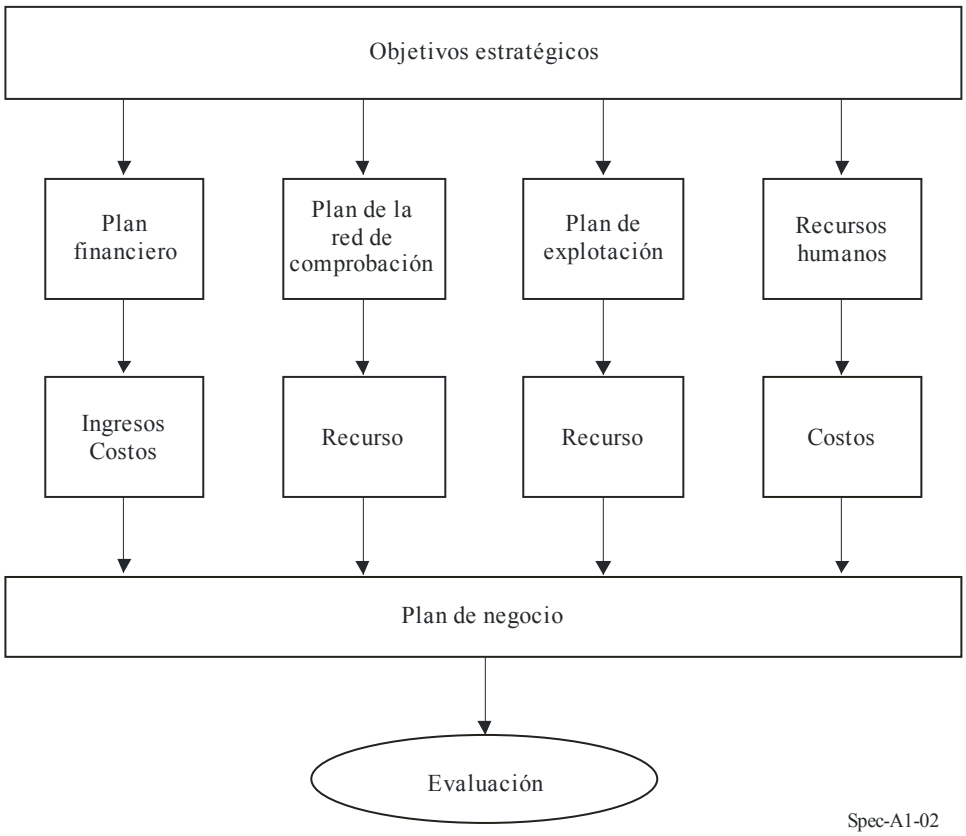
A3.3 Plan de negocio

La administración y/o consultores contratados al efecto han de preparar un estudio sobre los requisitos del sistema.

También puede ser necesaria una licitación en caso de que deba sustituirse equipamiento o se deban modificar partes del proceso (véase la Fig. A1-2).

FIGURA A1-2

Plan de acción de la gestión y comprobación técnica a escala nacional



A3.4 Planificación y diseño del sistema

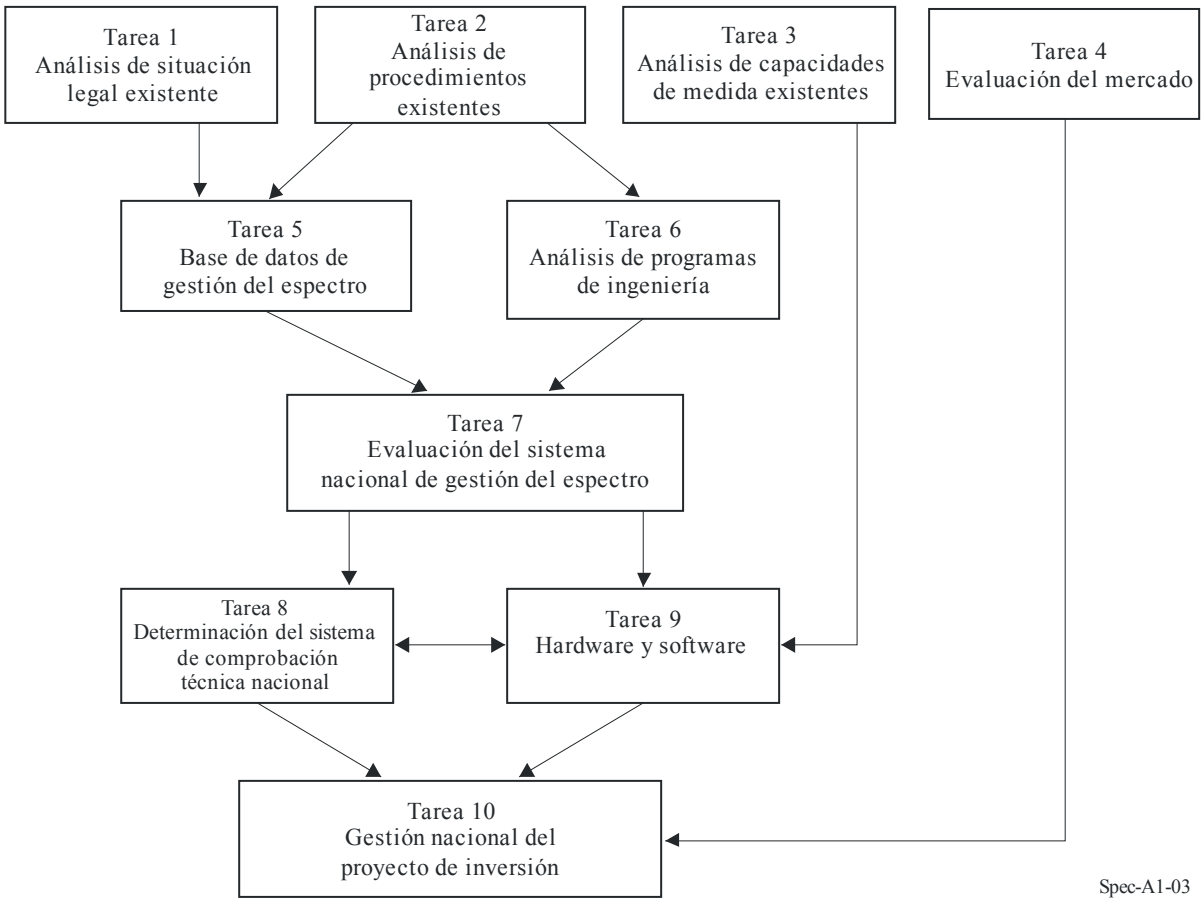
En este punto se propone un enfoque técnico y una metodología orientada a fijar un conjunto de condiciones para el establecimiento de un sistema nacional de gestión y comprobación técnica del espectro que tenga en cuenta los objetivos señalados en los Capítulos anteriores. Análogamente, el principio descrito hace posible establecer una estructura de la gestión del espectro realizada en torno de funciones básicas como las que se describen en el Manual de gestión nacional del espectro del UIT-R.

Algunas de sus funciones son susceptibles de agruparse o, por el contrario, subdividirse según sean las costumbres, los recursos del país considerado y por tanto el tamaño de la organización.

La metodología descrita en la Fig. A1-3 se basa en diez tareas diferentes, que tienen en cuenta todos los aspectos legales y técnicos que entraña la gestión del espectro en un entorno mundial.

FIGURA A1-3

Plan nacional para la gestión y comprobación técnica del espectro



Este modelo de licitación supone que los costos de terrenos, edificaciones y servicios públicos (agua, saneamiento, teléfono, alumbrado, combustible, etc.) son asumidos por la Organización que publica la licitación.

A3.4.1 Análisis de las leyes y aspectos jurídicos

La tarea 1 permite a la administración familiarizarse con las leyes que regulan la utilización del espectro a nivel regional y mundial. A partir de estos estudios, asociados al conocimiento de las leyes nacionales del país, podrá establecerse un marco jurídico nacional adecuado.

A3.4.2 Análisis de los procedimientos y métodos existentes

Esta tarea (Tarea 2) corresponde a las personas encargadas de la gestión y el control del espectro. Se ha de revisar y evaluar la organización proyectada por el regulador, así como las operaciones de la gestión. Se habrá de tener en cuenta la estructura y las operaciones de la gestión. Asimismo se considerará un marco que permita armonizar las solicitudes de licencias, la atribución y la concesión de frecuencias, así como los pagos que estén relacionados. Esta información será utilizada con miras al desarrollo de un sistema general de procesamiento de datos que se acomode a las necesidades de gestión y control del espectro.

A3.4.3 Análisis de las capacidades de medida existentes

Durante la fase de planificación, deben analizarse las capacidades y adecuación de los dispositivos de medida existentes. Debe decidirse qué capacidades de medición son suficientes para mantener el nivel actualmente requerido y cuáles debe mejorar el proyecto para satisfacer demandas de medición futuras.

También debe analizarse la posible integración del nuevo equipo con los sistemas existentes.

Además, deben analizarse las necesidades de mano de obra futura teniendo en cuenta las nuevas tareas de medición.

A3.4.4 Evaluación del mercado

La utilización y usabilidad del espectro radioeléctrico son condiciones esenciales para el buen funcionamiento del mercado de comunicaciones. Teniendo en cuenta que el espectro radioeléctrico es un recurso natural limitado, sólo las nuevas tecnologías de modulación permiten satisfacer la demanda creciente del mercado de comunicaciones (por ejemplo, mediante la televisión digital terrenal) y la apertura de nuevas bandas de frecuencia. Cuando se planifica un sistema de comprobación técnica del espectro, los desarrolladores deben ser plenamente conscientes de las demandas de espectro a largo plazo del mercado de comunicaciones, las características de las nuevas tecnologías de modulación y las nuevas bandas de frecuencia que se pondrán a disposición del mercado. Teniendo en cuenta la rapidez con que se desarrollan los sistemas de medición, han de hacerse los esfuerzos posibles para evitar la obsolescencia de cualquier nuevo sistema en un plazo breve desde su aparición en el mercado.

A3.4.5 Base de datos de gestión del espectro

La base de datos de gestión del espectro permitirá el análisis de los elementos de datos en cantidad y calidad. Ello es necesario para una gestión eficaz del espectro en el país de que se trate. Esto lleva consigo un análisis de los datos (recogidos en papel o en soporte electrónico) y su integración en el nuevo sistema de procesamiento de la información, todo lo cual racionalizará el flujo de información y garantizará su almacenamiento. (Véase la Recomendación UIT-R SM.1413, Diccionario de datos de Radiocomunicaciones para notificación y coordinación).

A3.4.6 Análisis de programas de ingeniería

Deben determinarse las funciones de ingeniería y módulos de aplicación necesarios, que principalmente deben incluir / explicar lo siguiente:

– Asignación de las frecuencias.
– Análisis de los sistemas de ingeniería.
– Interferencias y compatibilidad electromagnética.
– Cálculo de la facturación por derechos.
– Inspección.
– Homologación – aprobación.
– Informes/relaciones.

Estos módulos del Software de aplicación deben interconectarse directamente con la base de datos de gestión administrativa. En el capítulo 7 del Manual de gestión nacional del espectro del UIT-R se incluye una lista de módulos básicos y facultativos.

A3.4.7 Evaluación del sistema nacional de gestión del espectro y determinación del sistema nacional de comprobación técnica

En estas tareas se determinan las capacidades de observación de frecuencias y los requisitos aplicables a un sistema eficiente de comprobación técnica del espectro en el ámbito nacional. En el caso ideal, un sistema regulador requiere que se establezcan oficinas nacionales y regionales y diversos tipos de estaciones de comprobación técnica. En ciertos casos, las oficinas administrativas y las estaciones de comprobación técnica pueden alojarse en los mismos edificios, pero no todas las estaciones de comprobación dispondrán de instalaciones idénticas.

Algunas estaciones tendrán que vigilar solamente el espectro en las bandas de ondas métricas o decimétricas, mientras que otras lo harán fuera de esas bandas, por uno u otro extremo o por ambos a la vez. La localización de transmisores y fuentes de interferencia desconocidas será una actividad principal en la que se necesitarán medios radiogoniométricos adecuados, incluyendo estaciones móviles.

El sistema de comprobación técnica radioeléctrica tiene como objetivos esenciales dar soporte a las actividades básicas de la gestión nacional del espectro, y además verificar la observancia de las atribuciones regionales y mundiales efectuadas por la UIT y las que se hayan establecido por acuerdo bilateral. Para que el sistema de comprobación técnica sea eficaz deberá abarcar todos los centros de población importantes del país de una manera continua. El presente Manual describe las tareas y actividades que debe desarrollar dicho sistema, así como el equipo necesario para ello. Se deberán documentar el establecimiento de especificaciones técnicas para el sistema nacional regulador de la comprobación técnica del espectro y la explotación del mismo. En estas tareas se habrá de considerar la base de datos de gestión de frecuencias que exista o haya de desarrollarse, juntamente con el soporte lógico de planificación que requiera la estrategia adoptada.

A3.4.8 Evaluación del hardware y software

De acuerdo con las necesidades de procesamiento de datos (en soporte físico y soporte lógico) así como de equipos de inspección en vehículos expresadas en las conclusiones de las tareas 5, 7 y 8, los expertos dedicados a esta tarea deben optimizar y/o orientar las soluciones encontradas, siguiendo criterios tanto de costo como de mantenimiento o capacitación

A3.4.9 Gestión nacional del proyecto

Una vez completado el diseño de la red, el responsable del proyecto, el técnico especialista de datos y el analista financiero determinarán los requisitos en cuanto a costos e inversiones de capital de la red de comprobación técnica del espectro. Se supone que una parte de la red nacional puede desplegarse sobre instalaciones existentes o mejorando las infraestructuras existentes. Será preciso evaluar las limitaciones presupuestarias que el país pueda imponer sobre el programa de gestión del espectro, con miras a desarrollar un concepto y unas especificaciones de sistema que encajen dentro de esas restricciones. Si el presupuesto fuera limitado, el comité recomendaría un programa de introducción escalonada tal que cumpliera las exigencias del presupuesto y atendiera las necesidades inmediatas de comprobación técnica del espectro. En línea con este estudio (resumen de inversiones del proyecto), el comité preparará un Informe sobre el Proyecto con los documentos base de licitación que se han de presentar a las autoridades nacionales.

A3.5 Desarrollo de las especificaciones del sistema

A3.5.1 Centros nacionales y regionales, estaciones de comprobación técnica

Las administraciones de los países de menor extensión se inclinan a tener un centro nacional de comprobación técnica del espectro y un número apropiado de estaciones de comprobación, fijas, móviles o de ambos tipos, controladas directamente por el centro nacional. En países más grandes, las administraciones quizás deseen tener centros regionales de comprobación técnica además del centro nacional. En uno y otro caso, el centro nacional de comprobación técnica puede también incorporar un centro nacional de gestión del espectro para ofrecer de un modo integrado la gestión y la comprobación del espectro radioeléctrico.

Las estaciones de comprobación técnica móviles complementan la red de estaciones fijas. En la práctica tienen las mismas capacidades de medición que las estaciones fijas, pero pueden instalarse fácilmente en casi cualquier parte del país para poder así realizar la comprobación técnica en distintas zonas.

De acuerdo a sus funciones, algunas estaciones de comprobación técnica móviles (furgonetas para la investigación de interferencias, mediciones de cobertura, mediciones de redes de microondas) tienen capacidades de medición especializadas.

Cuando se especifiquen sus tipos y el número necesario de ellas, durante la fase de planificación debe hacerse un esfuerzo para conseguir que su crecimiento y capacidad de medición sean óptimos.

En el caso de estaciones móviles, el primer criterio a la hora de especificar su número es la frecuencia de las tareas de medición a realizar.

Durante la planificación de la capacidad de medición del sistema, el número de estaciones fijas es función de las dimensiones y condiciones del terreno en la zona, así como de la gama de frecuencias objeto de comprobación técnica.

Cuando se diseña una estación móvil de comprobación técnica, debe alcanzarse un compromiso entre disponer de un equipo completo, limitaciones presupuestarias y limitaciones de peso y espacio del vehículo. Por tanto, debe decidirse si debe comprarse un vehículo de propósito general o bien un vehículo especializado para las tareas que deben realizarse.

En relación con los vehículos, también son criterios importantes la red de asistencia técnica y el suministro de repuestos en el país.

A3.5.1.1 Organización, número de posiciones de operador y equipo de una estación de comprobación técnica

Deben definirse los siguientes puntos:

Centro de control/ estación de comprobación	Organización/tareas/medios/interacciones
Posición jerárquica	Nacional/Regional/Local/Otras
Responsabilidad atribuida	Gama de frecuencias (por ejemplo, de ondas miriamétricas hasta decamétricas y/u ondas métricas/decimétricas y/u ondas centimétricas) Servicios que deben comprobarse, zonas de servicio Lista de estaciones de comprobación técnica que deben controlarse directamente y de móviles Lista de centros de control dependientes de nivel más bajo
Organización de los trabajos	Arquitectura de computadores o de red existente, soporte lógico de automatización Para el número de posiciones de operador, especifíquese: – Horas de trabajo/Número de turnos – Jerarquía y compartición de responsabilidades entre operadores – Procedimientos para el seguimiento de Tareas/Informes/Documentos (especifíquese) Métodos y medios de archivo (datos, audio, intervalos ...) Medios de informe Actividades y procedimientos relativos a la seguridad
Descripción del puesto de trabajo	Control de todas o de algunas funciones de las estaciones remotas Programación u ordenación en tiempo de tareas automatizadas para ejecutarse fuera de línea en estaciones remotas Computación de localizaciones y presentación de los resultados Acceso a la base de datos para consultar el archivo técnico de la gestión de frecuencias (interactividad) Presentación de la información geográfica Emisión de informes automatizados Tiempo de respuesta esperado (específico para cada tarea) Número máximo de comunicaciones simultáneas con las estaciones remotas y tipo de conexiones (datos, audio con calidad de telefonía o de radiodifusión sonora ...) Número máximo de grabaciones simultáneas (si se realizan en el centro de control) Interfaz hombre-máquina: lenguaje(s), sistema operativo y base de datos
Interacción con el sistema de gestión de frecuencias	¿Se dispone de un sistema de gestión de frecuencias informatizado? En caso informativo, ¿cuál? ¿Es necesaria la interacción con el sistema de gestión de frecuencias? Disponibilidad local de una base de datos de gestión de frecuencias.
Sistema de información geográfica (SIG)	¿De qué sistema de información geográfica se dispone? ¿Cuál es su formato para la integración? En dos dimensiones (mapa de carreteras, mapa administrativo, mapa topográfico), vectorial y/o por cuadrícula.

Centro de control/ estación de comprobación	Organización/tareas/medios/interacciones
	En tres dimensiones (modelo topográfico digital). Coordenadas que deben utilizarse (UTM, geográficas ...), escalas y resoluciones, zonas requeridas.
Comunicaciones	a) Medios con que cuentan los operadores: – fax/télex/teléfono (individual o compartido); – correo electrónico (con consolas de trabajo, centro o centros de control, estación o estaciones, sistemas de gestión de frecuencias, etc.); – medios de radiocomunicaciones (públicos, privados, en ondas decamétricas, en ondas métricas o decimétricas, en ondas centimétricas). b) Medios con que cuentan las estaciones remotas u otros centros de control: – redes privadas; – red privada punto a multipunto (radioeléctrica/por microondas/RTPC/RDSI/ líneas arrendadas analógicas o digitales/X25/VSAT, Internet, ...); – velocidad y anchura de banda.

A3.5.1.2 Tareas de medición

Debe señalarse que es responsabilidad de cada país decidir las mediciones a realizar y las gamas de frecuencia supervisadas.

Para definir las características esenciales de los equipos de medición en cada posición de operador, deben especificarse los puntos siguientes:

Medición de frecuencia

– gama de frecuencias
– precisión requerida (¿se dispone de un patrón de frecuencia central?)
– clases de emisiones (método de medida).

Medición del nivel de intensidad de campo y la densidad del flujo de potencia

– número de mediciones y métodos aplicados en estaciones fijas y estaciones móviles;
– precisión requerida
– gama de frecuencias
– mediciones especiales:
  – mediciones de cobertura (mediciones a lo largo de una ruta), mediciones de los diagramas de antena (por ejemplo, desde helicópteros).

Medición de la ocupación del espectro, incluida la ocupación de canal

– emisiones en la banda de ondas decamétricas, métricas y decimétricas;
– especificaciones técnicas de los canales: anchura de banda, separación, tipo de modulación;
– registro de la duración de la ocupación: continua, de ... a ... hora, días especiales, repetición de exploraciones;
– velocidad de exploración necesaria (software);
– información adicional que debe registrarse (por ejemplo, distintivo de llamada, identificación/decodificación automática).

Medición de la anchura de banda ocupada

– método de $\beta/2$ y/o de x-dB utilizando analizador de espectro o software;
– otros métodos.

Medición de la modulación

– Profundidad de la modulación
– Desviación de frecuencia
– Tasa de bits erróneos (BER)
– Otros parámetros de calidad
– Diagrama de la constelación.

Medición radiogoniométrica y localización

– concepto del sistema;
– tipo de estación: fija, móvil, transportable, portátil y precisión requerida;
– gama de frecuencias;
– localización (por triangulación o SSL), se necesita una representación del terreno en mapa digital;
– tiempo de respuesta;
– espacio disponible para la antena de radiogoniometría;
– visualización de marcaciones en mapas digitales.

Medición de identificación

– clases de emisión;
– identificación (por ejemplo, decodificación) de las diversas transmisiones.
– «impronta de identificación» («finger printing»)/«características de la envolvente del transmisor individual»

Comprobación técnica de las emisiones de vehículos espaciales

– Mediciones de frecuencia, anchura de banda, densidad de flujo de potencia.
– Determinación de las posiciones orbitales.
– Ocupación de las bandas de frecuencias en las posiciones orbitales.

Radiodifusión multimedios

– Tipo terrenal o por satélite.
– Calidad de la señal recibida (necesita equipo especial)/Decodificación.

Red celular objeto de comprobación técnica:

– Parámetros del sistema para identificar el tipo de red
– Intensidad de campo
– Parámetros de calidad (por ejemplo, RxQual/CIR/BER)
– Información adicional (por ejemplo, traspaso en sistemas celulares)
– Número de canales
– Distancia máxima permitida entre puntos de medición
– Distancia máxima entre puntos de medición de la misma frecuencia / canal (válido para todas las velocidades permitidas)
– ¿Es necesaria una herramienta especial de evaluación de datos?, ¿se pretende combinar este sistema con un sistema de comprobación técnica móvil (mapa)?

Enlaces de microondas, incluyendo enlaces de satélite

¿Qué equipos de recepción y de medición van a utilizarse en la gama de 1 a 50 GHz y para qué servicios?

A3.5.2 Especificaciones generales del equipo

Con respecto a las mediciones elegidas, es preciso definir el equipo que permite realizar esas mediciones en cada centro de comprobación técnica, estación fija (distante) y/o móvil.

a) Concepto y centro de arquitectura del sistema, estación, medios de comunicación, software

La calidad de funcionamiento de una estación de comprobación técnica guarda una relación directa con la calidad de las antenas, receptores o medidores de campo y radiogoniómetros.

b) Antenas

Para determinar el tipo y número de antenas en cada estación considerando el equipo elegido, se ha de conocer la información siguiente:

– Información básica:
  a) Polarización (diversidad) y gamas (subgamas) de frecuencia.
  b) Distancias aproximadas desde la región que va a comprobarse.
  c) Puntería geográfica de las antenas (en grados).
  d) Distancia entre antenas y sistemas de distribución de la señal.
– Sistema de distribución de la señal
  a) Gama de frecuencias.
  b) Número de conexiones de receptor por antena.
  c) ¿Se va a utilizar diversidad de antenas? En caso afirmativo, ¿con cuántas antenas?
  d) Funcionamiento del sistema de distribución de la señal: manual, semiautomático o automático.
– Antenas omnidireccionales y antenas de dipolo
  a) Antenas receptoras activas.
  b) Antenas de transmisión/recepción.
  c) Antenas de control de tráfico aéreo.
– Antenas directivas
  a) Antenas log-periódicas con polarización lineal.
  b) Antenas log-periódicas con polarización doble.
  c) Antenas parabólicas y de alimentador.

Para todas las antenas: gama de frecuencias (de 10 kHz a 50 GHz o frecuencias superiores); identificación de los tipos de antena en colaboración con el suministrador del sistema.

c) Receptores, radiogoniómetros

– bandas de frecuencias;
– número del canal de recepción;
– tipo analógico o digital;
– control manual o automático (computadores, soporte lógico).

d) Equipo adicional

Ciertos equipos adicionales permiten que la estación de comprobación técnica funcione con mayor eficacia. Un ejemplo de ello es el equipo de generación de informes: máquinas reproductoras, osciloscopios y grabadores de sonido e imagen, impresoras, etc.

– Frecuencia (10 MHz) y tiempo normalizado (rubidio, GPS o GLONAS)
– Acondicionador de aire.

Para la comprobación técnica móvil:

– Sistema de navegación y localización (sistemas de navegación por estima, GPS, GLONAS (u otros), o un sistema de navegación complejo)

– Brújula para determinación del acimut.

A3.5.3 Vehículos y dispositivos de comprobación técnica

Las estaciones de comprobación técnica móviles en las bandas de ondas métricas y decimétricas se diseñarán y fijarán a un vehículo, y serán completamente equipadas con todos los equipos necesarios para la comprobación técnica, antenas de comprobación técnica, módems, antenas de comunicaciones, GPS y antenas GPS, cables de conexión, alimentación de energía, armarios, bastidores, hardware para el anclaje de los equipos, dispositivos de interfaz y bloques de terminales para constituir un sistema autónomo y un componente fiable del sistema nacional de comprobación técnica del espectro. El vehículo también puede equiparse con instrumentos de medida portátiles para realizar labores de comprobación técnica puntuales o localización exacta de fuentes interferentes.

Cuando se adquiere un vehículo, deben analizarse las alternativas siguientes:

– Tipo de vehículo (furgoneta, todo terreno, berlina)

– Tipo de motor (gasolina, diesel)

– Tracción a las cuatro ruedas o convencional

– Tamaño y peso.

A3.5.4 Software

Los sistemas de gestión y comprobación técnica incluirán una cantidad de software significativa para automatizar las tareas de recopilación, procesado y evaluación de datos así como el análisis de interferencias.

La utilización de software para almacenar los resultados de la comprobación técnica de espectro en bases de datos relacionales y la correlación de los mismos con la base de datos central de usuarios autorizados ahorrará una cantidad considerable de tiempo de investigación y aumentará la precisión.

El software de las aplicaciones y el control del sistema de comprobación técnica se desarrollará de conformidad con las recomendaciones del UIT-R, en particular, de la Recomendación UIT-R SM.1537, el Manual de Gestión Nacional del Espectro (2005) y las recomendaciones relevantes de este Manual de Comprobación Técnica del Espectro,

Algunos de los elementos del software para las aplicaciones de comprobación técnica son los siguientes:

– Software de mapas digitales.

– Software de radiogoniométrica (integrado con el software de los mapas).

– Software de gestión de bases de datos.

– Software de un sistema de archivo inteligente.

– Software de la interfaz entre la base de datos de licencias y los resultados de las mediciones de comprobación técnica.

– Software de evaluación de los resultados de las mediciones (filtros de datos, post procesado y representación gráfica de datos, valores automáticos de referencia e investigación del cumplimiento de lo incluido en la base de datos de licencias).

El programa informático de la aplicación de comprobación técnica tendrá un diseño amigable y se describirá en detalle en los pertinentes manuales y orientaciones.

A3.5.5 Requisitos generales de las unidades que forman los sistemas de comprobación técnica

En el Anexo Técnico relativo a la documentación que acompaña al llamado de licitación se especificarán las tareas de medición, los equipos requeridos y los requisitos técnicos mínimos exigibles.

Durante la planificación de la ejecución del proyecto se decidirá el número óptimo de sistemas de medida fijos, móviles, portátiles y la división de tareas entre ellos.

En el Capítulo 3 de este Manual puede encontrarse información detallada sobre los requisitos técnicos de las unidades que forman los sistemas de comprobación técnica.

A3.5.6 Especificaciones de los servicios

A3.5.6.1 Examen del emplazamiento

La ubicación de un sistema de comprobación técnica de las emisiones radioeléctricas tiene una influencia muy acusada sobre su eficacia y los costos de explotación. El emplazamiento viene determinado por las condiciones geográficas, topográficas y climáticas, incluido el ruido local, y debe elegirse con suma precaución pues es necesario garantizar la calidad de funcionamiento del sistema global.

Normalmente, las investigaciones sobre el emplazamiento deberá realizarlas el propio usuario. Tendrán que facilitarse entonces documentos, resultados de mediciones, mapas topográficos, etc.

Al desarrollar el concepto operativo del sistema se habrá decidido ya el número de estaciones individuales y las tareas que deben llevar a cabo; además, la elección de los emplazamientos podrá hacerse de acuerdo con las Recomendaciones UIT-R.

En la gama de ondas decamétricas, los emplazamientos pueden seleccionarse evaluando las previsiones informatizadas de la propagación radioeléctrica, pero también será necesario realizar mediciones suplementarias «in situ».

A3.5.6.2 Enlaces y redes de telecomunicaciones

– ¿Se han incluido los enlaces de telecomunicaciones entre las distintas estaciones? De ser así, ¿ qué tipo de enlaces (línea física, radioenlace, microondas)? ¿Los proporcionará la Administración? ¿Se dispone de líneas de telecomunicaciones?

– ¿Qué va a transmitirse (voz, música, datos)?

– Detalles de las líneas: tipo (red pública conmutada, red especializada, línea especializada con interfaces según las Recomendaciones UIT-T (por ejemplo, V24)), calidad (velocidad de transmisión en baudios, bit/s), longitud, sistema (a dos hilos, a cuatro hilos).

– Detalles de comunicaciones radioeléctricas o de enlaces de microondas: frecuencia, modo, anchura de banda del canal, sistema de transmisión/recepción. Si están disponibles, el sistema incorporará computadores, es necesario conocer el tipo, capacidad de memoria, condiciones de interfaz y periféricos de los mismos, así como el software a utilizar. El transmisor (o transmisores) deberá controlarse normalmente a distancia para no causar interferencia a la estación de comprobación técnica.

– Detalles de la estructura: punto a punto, multipunto a punto, en anillo, en estrella.

– ¿Se necesita enmascaramiento o cifrado?

A3.6 Capacitación

Con el fin de utilizar eficazmente las instalaciones de comprobación técnica del espectro, es esencial que junto a las mismas se adquiera un programa de capacitación completo. El licitador proporcionará una formación adecuada al personal en forma de aula de capacitación y de capacitación práctica durante el desempeño del trabajo, ya sea en su propio país o en el extranjero. Este programa comprende dos partes, a saber:

La capacitación en fábrica tendrá lugar en la fábrica del suministrador, con equipos idénticos a los que adquiere la Administración. Ya dentro de un aula se impartirá un curso sobre los fundamentos de la comprobación técnica del espectro (y sobre la gestión del espectro) por instructores de cualificación adecuada y experiencia directa en el tema.

La capacitación en el emplazamiento tendrá lugar en las instalaciones de comprobación técnica de la Administración, una vez instalados los equipos. La Administración deberá emplear la mayor parte del tiempo restante en aprender durante el propio trabajo tareas de comprobación cada vez más refinadas. En una clase final se expondrá cómo debe utilizarse la información que proporciona la comprobación técnica para validar un sistema nacional de comprobación del espectro radioeléctrico.

Debe analizarse el número y las cualificaciones de las personas que intervienen en la capacitación, así como la localización y duración de la misma. Esto exige prever cursos de capacitación separados, a diferentes niveles.

A3.7 Mantenimiento y reparación

En cualquier circunstancia deben desarrollarse los conceptos de mantenimiento y reparación; por ejemplo, debe determinarse qué piezas se repararán de forma local, cuáles en un taller central y cuáles en el propio fabricante (o fabricantes).

En cuanto a almacenamiento de repuestos, se han de tener en cuenta:

a) componentes individuales;

b) subconjuntos (por ejemplo, placas de circuito impreso);

c) bastidores enteros o unidades enchufables;

d) equipo de carácter crítico. (No debe olvidarse el MTBF, tiempo medio entre fallos.)

También es necesario comprobar el intervalo de tiempo durante el cual se pretende almacenar (sin olvidar las diferencias entre los MTTR (tiempo medio de reparación)).

A3.8 Documentación

Se ha de suministrar información de los equipos o del sistema en el idioma (o idiomas) que sea necesario.

Debe disponerse de documentación detallada como parte integrante del proyecto

A4 Etapa de implementación: procesos de licitación

A4.1 Llamados a licitación tipo para comprobación técnica

En función del procedimiento de licitación que se desee seguir, así será el llamado a licitación para la implementación de un sistema de comprobación técnica, mediante alguna forma de publicidad.

Normalmente, la legislación nacional prescribe su forma, los contenidos necesarios y las reglas del procedimiento de licitación.

El llamado a licitación ofrece una breve descripción de los antecedentes del proyecto, el alcance de trabajo a realizar y las obligaciones de los licitadores y del cliente.

También puede incluir información sobre inspecciones a los emplazamientos y los plazos para poder solicitar aclaraciones sobre los documentos de la licitación.

Los requisitos técnicos del sistema de comprobación técnica se detallan en el sobre del llamado a licitación.

Los procedimientos de licitación, incluida su publicación, son establecidos por las leyes nacionales.

A4.1.1 Contenido del documento del llamado a licitación de un sistema de comprobación técnica:

A4.1.1.1 Capítulo de orientaciones

Esta parte de los documentos de la licitación proporciona la información necesaria para que los licitadores preparen y remitan propuestas constructivas que satisfagan los requisitos del contratante. El capítulo de orientaciones describe los pasos críticos para el envío de una propuesta, apertura y evaluación de la misma y las estipulaciones del proceso de adjudicación del contrato.

– Disponibilidad de datos sobre la administración contratante que ha realizado el llamado a licitación para el suministro e instalación del Nuevo sistema

- Resumen (del proyecto).
- Disponibilidad (y a veces precio) del sobre técnico del documento de llamado a licitación.
- Instrucciones sobre el formato y contenido del documento de licitación

  (es muy importante rellenar de forma clara y legible el formulario de registro, pues asegura que se recibirá información sobre cualquier posible modificación, corrección o aclaración relativa al contenido del documento de licitación)
- Estipulaciones, sobre la participación y precualificación obligada (de licitadores), que declaran tener la capacidad financiera, técnica y de producción para la ejecución del contrato y satisfacer los criterios de cualificación especificados:
  i) Referencias certificadas (experiencia en la gestión de contratos similares con los nombres de los anteriores clientes)
  ii) Competencia del personal, equipo y facilidades de construcción o fabricación
  iii) Estabilidad financiera y económica
  iv) Sistema de aseguramiento de la calidad.
- Autorizaciones del fabricante (si el suministrador no es fabricante).
- Consultas:

  Los licitadores que deseen cualquier aclaración sobre el llamado a licitación remitirán sus consultas por facsímil o correo electrónico:
  i) Nombre(s), dirección y medios de telecomunicación disponibles
  ii) Plazo para que los licitadores puedan hacer sus consultas por escrito (antes de la reunión previa a la presentación de propuestas)
  iii) Plazo de respuesta de la administración, que se remite a todos los licitadores registrados.
- Reunión previa a la presentación de propuestas (fecha, hora y lugar de la reunión de clarificación, generalmente no menos de tres semanas antes del plazo para la presentación de propuestas).

El licitador soportará todos los costes asociados con la preparación y presentación de su propuesta y el contratante no será en ningún caso responsable de dichos costos.

- Visita técnica a los emplazamientos de las instalaciones:

  Existen dos opciones:

  Opción 1: los licitadores que lo deseen pueden realizar una visita guiada a un emplazamiento con el fin de asegurarse de que el equipamiento que pretenden proponer se adapta a los requisitos del solicitante. El costo de la visita correrá a cargo del licitador.

  Opción 2: en numerosas licitaciones, la administración contratante exige a los licitadores una visita a los emplazamientos. Para cada uno de los emplazamientos, la administración entrega un informe oficial del emplazamiento firmado por ambas partes. Estos documentos deben ser suministrador con la propuesta. El hecho de que un licitador no haya visitado un emplazamiento es motivo de descalificación.
- Instrucciones a los licitadores:

  Los documentos para la licitación incluirán toda la información necesaria para que un potencial licitador prepare una propuesta para el equipamiento y los trabajos a suministrar. Los licitadores deben examinar todas las instrucciones, formularios, términos, especificaciones y cualquier otra información incluida en los documentos de licitación. Cualquier error a la hora de facilitar la información o de presentar una propuesta que no responda sustancialmente a los documentos de la licitación en todos sus aspectos, es responsabilidad del licitador y puede justificar el rechazo de la propuesta.
  i) Presentación de propuestas:
     a) Dirección (a donde remitir la propuesta)
     b) Original y el número de copias a suministrar por el licitador

c) Legalización de la propuesta (firmada por la persona o personas debidamente autorizadas para firmar en nombre del licitador)

d) Sellado y marcado de las propuestas

e) Plazo para la remisión de la propuesta (cualquier propuesta recibida por el contratante después del plazo establecido para la presentación de propuestas será automáticamente rechazada y devuelta sin abrir al licitador)

f) Idioma de la propuesta (idioma de trabajo, documentación técnica de la propuesta, manuales de instrucciones, interfaz del software, etc.).

ii) Formularios de la propuesta

iii) Propuesta de precios y moneda

iv) Conformidad con las normas internacionales y cumplimiento de las Recomendaciones UIT más recientes sobre el tema.

v) Diseño actualizado y utilización de técnicas modernas (exigentes normas de calidad de funcionamiento y fiabilidad)

vi) Entrega

vii) Garantías

viii) Información específica que deba incluirse en la propuesta

Con respecto a las leyes nacionales y los principios aplicados por la Administración: «Las propuestas contendrán la información siguiente, pero no estarán necesariamente limitadas a ella»:

Por ejemplo:

i) Propuesta de organización de los trabajos (organigramas, plan de trabajo,...).

ii) Descripción detallada y entrega final de los productos

iii) Nombre y currículum de las personas asignadas a cada tarea.

iv) Declaración de cumplimiento o no cumplimiento de cada requisito.

v) Desviaciones de las especificaciones, en particular si el licitador puede probar que la alternativa ofrecida será en todos los aspectos tan satisfactoria y plenamente capaz de responder a los requisitos de la Administración como si se ajustara íntegramente a las especificaciones técnicas. La propuesta alternativa debe ser explicada con todo detalle.

vi) Capacitación durante el desempeño del trabajo. La propuesta debe indicar claramente el currículum de los instructores, qué objetivos persigue, a qué grupo se dirige, la cualificación de admisión deseada, y el número de personas a capacitar.

vii) Fianza de la licitación (garantías del licitador o fianza de la propuesta)

Este documento contiene las garantías bancarias del licitador: en caso de que retire las condiciones indicadas en su propuesta en el plazo válido para ello, el banco pagaría a la autoridad contratante la cantidad establecida en la fianza (generalmente del 2% al 5% del precio de la propuesta del licitador).

viii) Fianza de funcionamiento (requerida exclusivamente a la propuesta ganadora)

ix) Validez de las propuestas (deben ser válidas durante un periodo de tiempo establecido después de la fecha límite de presentación de propuestas prescrita por el contratante)

x) Los originales de las propuestas técnicas y comerciales deberán ser firmados por un representante legalmente autorizado para intervenir en el contrato en representación del licitador; generalmente se ha de revisar y firmar cada página de los originales.

– Evaluación de las propuestas:

i) Fecha, hora y lugar de apertura de las propuestas selladas

ii) Especificación detallada de los criterios y métodos de evaluación de las propuestas.

– Condiciones para la descalificación:

  i) Una propuesta se rechaza si está incompleta (fianzas, periodo de validez de la propuesta).

  Las propuestas pueden ser rechazadas:

  i) Si una evaluación técnica demuestra que uno o más de los parámetros técnicos recomendados es inferior al mínimo exigido en el llamado a licitación.

Se comunicará a los licitadores la decisión tomada dentro del plazo indicado en la licitación o plazo legal establecido (facsímil y carta postal).

A4.1.1.2 Artículos principales del contrato

– Objeto del contrato
– Obligaciones del contratante
– Obligaciones del licitador
– Condiciones de pago (plazo y método de pago)
– Condiciones de garantía
– Procedimiento en caso de incumplimiento del contrato
– Procedimiento en caso de *fuerza mayor*
– Procedimiento en caso de desavenencias
– Gestión de la confidencialidad de la información
– Modificación del contrato
– Otras instrucciones.

A4.1.1.3 Requisitos técnicos

– Objeto de la licitación
– Descripción del sistema
– Inclusiones (lo que incluirá el proyecto, como software, infraestructura, servicios)
– Otras inclusiones (como garantía, repuestos, soporte y actualización del software)
– Requisitos técnicos mínimos de cada parámetro del sistema y de cada uno de los instrumentos de medida.

A4.2 Propuesta tipo del licitador

A4.2.1 Introducción

– Presentación del licitador y su experiencia
– Ventajas del sistema propuesto
– Cómo se ajusta el sistema propuesto a las necesidades futuras
– Capacidad de integración en el sistema actual del contratante
– Disposición a participar en desarrollos futuros
– Lista de subcontratistas propuestos
– Periodo de validez de las propuestas.

A4.2.2 Características técnicas generales

– Medida de la calidad del desempeño (por ejemplo, de acuerdo con los niveles de prestación relevantes)
– Gama de frecuencias de funcionamiento
– Precisión de los datos medidos.

A4.2.3 Funciones del sistema

– Características del sistema

Información sobre cómo cumple las exigencias técnicas de la licitación.

A4.2.4 Método de ejecución del sistema

– Designación de subcontratistas locales e instalación y puesta en funcionamiento con medios locales.

A4.2.5 Garantías técnicas

– Periodo de garantías (sistema, software)

– Periodo de suministro de repuestos una vez vencida la garantía.

A4.2.6 Descripción detallada de:

– Tareas asumidas

– Presentación de los productos entregados

– Características generales del sistema

– Especificaciones técnicas de cada instrumento de medida del sistema

– Instalación y puesta en marcha de conformidad con los requisitos

– Control a distancia y local

– Almacenamiento y transferencia de datos

– Posibilidad de desarrollos futuros

– Características del software e integración con la gestión del espectro

– Soluciones de suministro de energía

– Tipos y características de antenas

– Tipo(s) y datos técnicos de los vehículos

– Medidas relativas a salud y seguridad

– Calibración y autoprueba

– Calendario de implementación y plazos de entrega

– Tareas previstas del contratante

– Formación

– Resolución de asuntos controvertidos

– Etc. (por ejemplo, propuesta de contratos de mantenimiento del sistema y del software).

A4.2.7 Presentación de referencias

– Estabilidad financiera y económica

– Referencias certificadas

– Sistema de control de calidad

– Copia de los documentos de inscripción y registro de la empresa

– Autorizaciones de los fabricantes

– Lista de subcontratistas aprobados.

A4.2.8 Diagramas de bloques del sistema

A4.2.9 Precio

– Precios individuales y previo total

– Términos y condiciones de pago.

A4.3 Formato de contrato tipo

El contrato es un acuerdo jurídicamente vinculante entre las partes que la legislación obliga a cumplir. La ley reconoce cuando se incumple un contrato, en cuyo caso pone a disposición los recursos pertinentes.

Los documentos que formen el contrato deben definir claramente el alcance del trabajo a realizar, los materiales que han de suministrarse y los derechos y obligaciones del contratante y del suministrador.

Disposiciones preliminares

- Nombre y dirección de las partes contratantes
- Elementos preliminares al contrato
- Alcance, carácter y objetivo del contrato
- Términos utilizados en el contrato
- Idioma de trabajo.

Situación jurídica de las partes, sus derechos y obligaciones

- Derechos y obligaciones del suministrador relativas a:
  i) Subcontratación
  ii) Expedición e instalación del sistema y de los elementos del sistema
  iii) Garantías
  iv) Reparación y mantenimiento del sistema
  v) Reparación, mantenimiento y desarrollo del software
  vi) Servicios conexos
  vii) Instrucciones sobre capacitación.
- Derechos y obligaciones del cliente:
  i) Instrucciones generales
  ii) Derecho del cliente a la supervisión
  iii) Cooperación obligatoria
  iv) Obligaciones de pago
  v) Obligaciones sobre capacitación.
- Legislación aplicable y foro para la resolución de desavenencias.

Objeto del contrato

- Objeto del contrato
- Software y derechos conexos
- Disposiciones relativas a la ejecución del contrato
- Conformidad con ordenanzas, legislación, reglamentación, etc.
  i) Lugar de instalación y fecha de finalización
  ii) Método de cumplimiento
  iii) Fecha de ejecución del contrato
- Procedimiento de aceptación:
  i) Aceptación en fábrica previa al procedimiento de aceptación de la misma
  ii) Reglas generales del procedimiento de aceptación
  iii) Lugar del procedimiento de aceptación
  iv) Informe a elaborar durante el procedimiento de aceptación
  v) Procedimiento de aceptación de estaciones fijas y móviles

vi) Aceptación del software y del sistema finalizado

– Embalaje, flete y seguro
– Mejoras ulteriores del producto
– Servicios adicionales:
  i) Formación
  ii) Servicios suministrados durante el periodo de garantía.

Responsabilidad contractual en relación con la calidad de funcionamiento; disposiciones en caso de imposibilidad de satisfacer la calidad de funcionamiento

– Responsabilidad del suministrador en caso de calidad de funcionamiento defectuosa:
  i) Obligaciones del suministrador.
  ii) Obligación de penalización al suministrador.
  iii) Obligación del suministrador para solucionar las averías.
  iv) Obligaciones de garantía del suministrador.
– Responsabilidad del cliente por una calidad de funcionamiento inadecuada.
– Imposibilidad de cumplimiento.

Precios y términos de pago

Todos los precios incluirán lo demandado por el documento de licitación

Pagos por la fabricación e instalación del sistema y por servicios adicionales

– Precio contractual total.
– Pago del precio contractual.
– Obligaciones de pagos adicionales.

Los precios se indicarán sin impuestos, según la reglamentación nacional.

Varios y disposiciones finales

– Obligación de las partes a colaborar y dar el tratamiento adecuado a la información confidencial
– Resolución de desavenencias, ejecución de normas jurídicas, derecho aplicable
– *Fuerza mayor*
– Enmiendas al contrato
– Validez y finalización de contrato
– Otros contratos firmados entre las partes
– Persona o personas responsables del contrato debidamente autorizadas por las Partes
– Liquidación de perjuicios
– Compensación.

Anexos al contrato

Los Anexos al contrato se basarán en los procedimientos de la UIT, del Banco Mundial o de la administración contratante

En todos los casos, se anexará la propuesta al contrato.

A4.4 Evaluación y comparación de propuestas y adjudicación del contrato

Para la evaluación y comparación de las propuestas, la administración contratante ha de seguir un proceso predefinido de evaluación como el siguiente:

– Procedimientos definidos por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT)

– Procedimientos definidos por el Banco Mundial

– Procedimientos en caso de que la administración contratante no esté sujeta a los procedimientos de la UIT o del Banco Mundial.

Un comité de evaluación nombrado por la autoridad contratante evaluará las propuestas desde los puntos de vista financiero, jurídico y técnico. La autoridad contratante definirá la metodología de evaluación, que se describirá con todo detalle en el informe de evaluación del comité.

Las propuestas de los licitadores serán abiertas en presencia de los representantes de éstos en la hora y lugar estipulado, que se especificará en el llamado a licitación. Las propuestas podrán rechazarse si no van acompañadas de una fianza.

Durante la evaluación, la administración contratante puede requerir aclaraciones a los licitadores en relación con sus propuestas.

A4.4.1 Procedimientos definidos por la UIT

Evaluación de propuestas*:*

– Grupo de evaluación establecido por la UIT o por la UIT y la administración contratante

– Las evaluaciones técnica y comercial se realizan separadamente (en primer lugar se realiza la evaluación técnica):

  i) la evaluación técnica debería abarcar los puntos principales siguientes:

    a) Receptor de medida, sistema de antena, estación de trabajo, software, sistema de radiogoniometría opcional, pruebas de aceptación en fábrica, entrega, capacitación (véase Apéndice 1: ejemplo de la UIT de análisis técnico de las propuestas)

  ii) La evaluación comercial debería abarcar los puntos principales siguientes:

    a) Precio, formas y condiciones de pago, condiciones comerciales, evaluación jurídica (véase Apéndice 2: ejemplo de la UIT de evaluación técnica y jurídica)

  iii) Valoración de problemas técnicos

  iv) Capacidad

  v) Experiencia de los expertos

  vi) Precio total

  vii) Rechazo de propuestas incompletas

  viii) Confidencialidad (no se comunicará a los licitadores ni a persona alguna concernida información sobre el análisis realizado, la evaluación o aclaración de ningún tipo)

  ix) Las decisiones se comunicarán a los licitadores tan pronto como sea posible (facsímil y carta).

Rechazo de propuestas*:*

– La UIT se reserva el derecho a rechazar cualquier propuesta o realizar un segundo llamado a licitación

– No existe la obligación de seleccionar la propuesta de menor precio.

A4.4.2 Procedimientos definidos por el Banco Mundial

NOTA1 – Se utiliza la terminología del Banco Mundial.

Cuando el Banco Mundial (BIRF o AIF) llega a un acuerdo de préstamo con uno de sus Miembros, facilita al prestatario un conjunto de NORMAS denominadas «Informe de evaluación de propuestas» [«Proposals Evaluation Report»]. Estas normas facilitan la evaluación de las propuestas recibidas de conformidad con el documento «*Normas: Firma de contratos financiados con préstamos del BIRF y créditos de la AIF – Enero 1995 (revisiones de enero 1996, agosto 1996 y septiembre 1997*); en particular, véase el párrafo 2.53 y los párrafos 2 y 4 al Anexo 1, (véase dbusiness@worldbank.org)

NOTA 2 – De conformidad con lo indicado en el párrafo 1.6 y la nota a pie de la página 9, algunos países no están autorizados a beneficiarse de contratos financiados por el Banco Mundial.

NOTA 3 – El país del prestatario puede excluir de la licitación países o territorios si el prestatario puede aplicar el criterio del párrafo 1.8.

NOTA 4 – El Consejo de Seguridad de las Naciones Unidas, en virtud del Capítulo VII de la Carta de las Naciones Unidas, puede prohibir préstamos del Banco Mundial a determinados países.

El informe de evaluación de propuestas describe el procedimiento que debe seguir el prestatario para evaluar las propuestas recibidas. No obstante, en todos los casos es importante aplicar los procedimientos de evaluación y solicitud descritos en la parte relativa a Instrucciones del propio documento de licitación. El informe de evaluación de propuestas incluye una carta de aviso que junto con sus anexos se remite al Banco Mundial.

El prestatario debe examinar los cuadros de evaluación incluidos en las Normas durante la preparación del proyecto a fin de determinar las necesidades de personal que necesitará para evaluar la propuesta. El Banco Mundial puede explicar con detalle el procedimiento a seguir. El Banco Mundial insta al prestatario a que contrate consultores con la necesaria experiencia para evaluar las propuestas de proyectos complejos. La participación de consultores puede ser eventualmente financiada por el préstamo si el acuerdo lo permite (Normas, párrafo 2-C del Anexo 1)

El informe de evaluación de propuestas incluye:

– *Preámbulo*

– *Utilización de Formularios*

– *Formularios típicos para la evaluación de propuestas*

Carta de instrucciones:

a) Si el proyecto está sujeto al análisis previo del Banco Mundial (requiere el acuerdo del Banco Mundial antes de la decisión de adjudicación), el prestatario (ministerio, organismo o servicio) debe remitir al Banco Mundial el informe de evaluación de propuestas junto con una carta de aviso, que debe recoger las conclusiones de la evaluación y suministrar toda la información complementaria de que debe suministrarse para permitir la evaluación del Banco Mundial

b) En el caso de proyectos sujetos a un procedimiento de análisis *a posteriori* por el Banco Mundial (requiere el acuerdo de éste antes de la decisión de adjudicación), debe presentarse al Banco Mundial el informe de evaluación y una copia firmada del contrato con anterioridad (o simultáneamente) a cualquier solicitud de pago. (Normas – Anexo 1 y acuerdo de préstamo).

Cuadro 1: Identificación

Descripción del acuerdo de préstamo, en particular el costo de la evaluación del procedimiento de evaluación del Banco Mundial (datos administrativos)

Cuadro 2: Procedimientos de evaluación

Publicación de la licitación (datos administrativos)

Cuadro 3: Entrega de propuestas y apertura de las mismas

De conformidad con las Normas, párrafo 2.44, este Cuadro indica la fecha, número de propuestas y validez de las mismas. S el procedimiento de licitación es de dos fases (técnica y económica), en cada fase debe suministrarse este cuadro. El acta de la reunión de apertura de propuestas desde remitirse al Banco Mundial y a todos los licitadores.

Cuadro 4: Precios de las propuestas (lectura pública)

Todas las modificaciones de precios leídos en público, incluidos descuentos, opciones, variantes, etc., debe describirse en el Cuadro 4.

Cuadro 5: Análisis preliminar

Conformidad con las obligaciones de la licitación, incluidas las especificaciones técnicas. El proceso de evaluación debe comenzar en la propia apertura de propuestas. El análisis preliminar de propuestas incluye la identificación y rechazo de propuestas que están incompletas, que no son admisibles o que no se corresponden con las disposiciones esenciales de la licitación y que, en consecuencia, no deben ser evaluadas.

Este análisis debe tener en cuenta los aspectos siguientes:

– Verificación: identificación de las deficiencias de la propuesta
– Criterio de origen
– Garantía de la propuesta
– Conformidad con las disposiciones de la licitación y las especificaciones técnicas.

Los principios de evaluación son los siguientes:

– El prestatario debe evaluar las propuestas exclusivamente en relación con las obligaciones e información exigida en la licitación.
– Durante el proceso de evaluación, el prestatario puede solicitar a los suministradores que faciliten información adicional sobre puntos que resulten equívocos o por incoherencias de las propuestas. Estas solicitudes se presentarán por escrito, pero no permiten a los suministradores modificar los precios ni el tipo de suministro, trabajo o servicios ofrecidos excepto si se han producido errores de cálculo (Normas, Anexo 4, párrafo 10). No puede modificarse ningún precio ni requisitos de la propuesta.

Cuadro 6: Correcciones y descuentos incondicionales

En este cuadro se recogen los precios ofrecidos por cada suministrador, las correcciones (errores de cálculo), los descuentos y el precio total de las propuestas.

Cuadro 7: Tipo de cambio

Se indican los tipos de cambio utilizados en la evaluación.

Cuadros 8A y 8B: Cambio de moneda

De conformidad con la moneda elegida por el prestatario e indicada en la licitación, en este cuadro se incluye el valor total de la propuesta en la moneda del prestatario.

Cuadro 9: Adiciones por omisiones, ajustes y variaciones de la moneda

En el Cuadro 9 se incluyen los precios totales de las propuestas.

– Las omisiones y errores detectados en las propuestas deben compensarse con precios adicionales (los elementos omitidos en una propuesta pueden estar incluidos en otras, promediación de precios). También es posible hacer referencia a fuentes externas tales como listas de precios, escalas de costes de transporte, etc.
– Ajustes: las instrucciones de la licitación incluyen los criterios de ejecución y operación.

Las propuestas pueden considerarse aceptables si tras un análisis detallado, incluso con pequeñas variaciones respecto a las instrucciones de la licitación, es posible otorgar un valor monetario a las mismas que se sume a los precios de la propuesta como penalización a fin de facilitar las comparaciones.

La metodología de evaluación en relación con estos factores debe describirse con todo detalle en el informe de evaluación y ser completamente conforme con las instrucciones de la licitación.

En algunas ocasiones el Banco Mundial autoriza la utilización de un sistema de puntos para la compra de suministros. En este caso, los ajustes se expresan mediante puntos (véase la Norma, párrafo 2.6.5).

El prestatario puede ser asesorado por el Banco Mundial en relación con la evaluación de propuestas mediante un sistema de puntos.

Cuadros 10A y 10B: Prioridad de suministros y trabajos nacionales

Si la licitación permite un criterio de preferencia nacional, es posible tener en cuenta los aspectos nacionales y el margen de preferencia indicado en las disposiciones de la licitación.

Cuadro 11: Evaluación final de propuestas y propuesta de adjudicación del contrato

En el Cuadro 11 se incluyen todos los datos incluidos en los cuadros anteriores (precios recogidos en la reunión de apertura, corrección de errores, descuentos, ajustes) y se nomina el ganador de la licitación.

Anexo I: Instrucciones para la evaluación de propuestas

Anexo II: Reunión de apertura de propuestas. Información sobre las propuestas

Anexo III: Países no elegibles

Anexo IV: Ejemplo de análisis preliminar

Anexo V: Informe de evaluación de propuestas. Contenido.

A4.4.3 Procedimientos en caso de que la administración contratante no esté sujeta a los procedimientos de la UIT o del Banco Mundial

Antes de que comience la evaluación, el comité de evaluación decide la metodología a utilizar para decidir el licitador al que puede adjudicarse el contrato. Pueden utilizarse las metodologías siguientes:

– Puntuación mediante fórmulas
– Método de ponderación
– Conformidad si/no
– Conformidad combinada con los precios ofrecidos

A5 Etapa final (terminación): procedimiento de aceptación

A5.1 Aceptación en fábrica

El proveedor realizará (a su cargo) en el lugar de fabricación todas las pruebas y/o inspecciones de equipo y de cualquier parte del equipo especificadas en el contrato, de conformidad con los documentos de aceptación en fábrica remitidos por el proveedor, modificados o no por la administración (de común acuerdo).

A5.2 Procedimiento de prueba de aceptación en emplazamiento

El proveedor ha de suministrar a la administración el documento o documentos de aceptación en emplazamiento, y avisará con una anticipación razonable de dichas pruebas y/o inspecciones, especificando lugar y hora. Las pruebas se realizarán para demostrar que están incluidos todos los elementos que componen el equipamiento, su correcto ensamblaje y conexión; que funcionan correctamente de conformidad con las especificaciones técnicas (inspección visual y pruebas técnicas). Se realizará una prueba final de todo el equipo incluyendo los sistemas de comunicaciones, teniendo en cuenta las responsabilidades de la administración y del contratante en relación con el equipamiento.

La aceptación del equipo viene seguida de un periodo de garantía de un año, durante el que puede exigirse al proveedor una fianza de garantía. Alternativamente, algunas administraciones realizan una aceptación provisional tras finalizar satisfactoriamente una prueba de aceptación, realizándose la aceptación final una vez transcurrido un periodo fijo de tiempo (normalmente el periodo de garantía).

A5.2.1 Aceptación (o aceptación provisional en caso de un proceso con aceptación provisional y final)

La aceptación puede afectar a todo el equipamiento o a una parte del mismo, cuando:

– se ha superado satisfactoriamente la prueba de aceptación y se cumplen las garantías funcionales;
– no se ha completado satisfactoriamente la prueba de aceptación o no ha podido realizarse por motives ajenos al proveedor.

La aceptación no se denegará si existen discrepancias o problemas de carácter menor. En lugar de ello, se realizará la aceptación, se tomará nota de los problemas y éstos se corregirán durante el periodo de garantía.

La lista siguiente es un ejemplo de informe de procedimiento de pruebas de aceptación de una estación fija en ondas decamétricas, métricas y decimétricas:

a) Asunto

El documento describe los procedimientos de aceptación de una estación de comprobación técnica del espectro en los términos del contrato.

b) Inspección visual

Actuaciones a realizar para verificar la presencia de todos los elementos enumerados en la declaración contractual de configuración:

– Sistemas de antenas, conmutadores, cables y protección contra las descargas eléctricas
– Mástiles y torres (riostras, pintura, iluminación)
– Inspección del edificio, cableado, dispositivos de seguridad, bastidores, bandejas, computadoras receptores, energía
– Implantación del Software
– Manuales de los equipos, software y sistema
– Identificación (homologación de los equipos)
– La documentación estará controlada y se anexará al informe de aceptación la lista de los documentos entregados.

c) Pruebas técnicas

– Verificación de la alimentación de energía (suministro principal y UPS).
– Funciones de radiogoniometría en ondas decamétricas, métricas y decimétricas: frecuencia fija, exploración, localización.
– Mediciones de la UIT en ondas decamétricas, métricas y decimétricas: frecuencia fija, exploración de frecuencia, exploración de memoria.
– Análisis de la señal.
– Misiones manuales y automáticas: control sistemático de transmisores, tasa de ocupación de frecuencias, búsqueda de transmisores desconocidos.
– Equipo de pruebas integrado (BITE, *build integrated test equipment*).

El resultado de las pruebas realizadas durante la aceptación se consignará en el informe de pruebas de aceptación firmado por la administración y el suministrador.

A5.2.2 Aceptación final

Esta sección no aplica en el caso de aceptación seguida de un periodo de garantía con fianza de garantía. En el caso de aceptación provisional seguida de aceptación final, el certificado de aceptación provisional estará firmado por ambas partes, de conformidad con los términos administrativos que especifican el periodo de garantía (generalmente un año), después del cual se facilita el certificado de aceptación final.

APÉNDICE 1
AL ANEXO 1

Ejemplo de análisis técnico de propuestas de la UIT

CUADRO A1-1

Parámetros funcionales	**Especificaciones**	**Requisitos**	**EMPRESA Y Básico**	**EMPRESA X**
Control	Comprobación técnica y supervisión de señales radioeléctricas	Funciones operativas con fines de capacitación	CUMPLE	Opción 1: solamente software– NO CUMPLE Opción 2: Hardware + software Sólo se considera la Opción 2
1 Gama de frecuencias del receptor de comprobación técnica:	Gama de frecuencias: 100 kHz – 2.5/3 GHz	La gama de frecuencias debe incluir todos los servicios radioeléctricos explotados en las bandas de frecuencia indicadas	CUMPLE	CUMPLE con algunas reserve (véase la observación en la última fila)
2 Antena de recepción:	Gama de frecuencias: 100 kHz – 2.5/3 GHz	De conformidad con las características del sistema	CUMPLE	CUMPLE
3 Modos de funcionamiento:	Manual y automático	El sistema debe permitir diferenciar entre comprobación técnica manual y automática	CUMPLE	CUMPLE
4 Medición de parámetros técnicos de la señal	1) Frecuencia 2) Intensidad de campo y densidad de flujo de potencia 3) Anchura de banda 4) Profundidad de modulación (AM) 5) Desplazamiento de frecuencia (FM) 6) Análisis del espectro 7) Medición de la ocupación del espectro	– Mediciones según el RR y las Recomendaciones del UIT-R. – Mediciones en tiempo real y diferenciadas – Interceptación, demodulación, registro y análisis de las señales – Determinación de umbrales de recepción de señales	CUMPLE	CUMPLE

CUADRO A1-1 (*fin*)

Parámetros funcionales	**Especificaciones**	**Requisitos**	**EMPRESA Y Básico**	**EMPRESA X**
5 Demodulación:	CW, MA, MF, BLU, MF-BE, MF-BA		CUMPLE	CUMPLE
6 Funciones de seguimiento:	1) Seguimiento de frecuencia discreta 2) Seguimiento de frecuencia por banda 3) Selección discrecional de pasos de frecuencia	Selección de frecuencia manual y automática	CUMPLE	CUMPLE
7 Recopilación de datos:	Almacenamiento de resultados de mediciones y generación de informes	Interfaz para la conexión de periféricos tales como impresoras y computadoras	CUMPLE	CUMPLE
8 Software de aplicación :	1) Interfaz hombre-máquina: – Amigable – Identificación clara de funciones – Espectro de frecuencia – Fácil lectura de resultados – Conversión de unidades – Visualización de cuadros de ocupación estadística 2) Simulación del proceso de radiogoniometría 3) Crecimiento potencial del sistema : – Facilidad de instalación del equipo de radiogoniometría – Facilidad de mantenimiento – Pruebas automáticas – Facilidad de uso – Versatilidad		CUMPLE	CUMPLE

CUADRO A1-2

Parámetros funcionales	**Especificaciones**	**Requisitos**	**EMPRESA Y Básico**	**EMPRESA X**
Capacitación	1 Curso de montaje e instalación 2 Curso de operación y mantenimiento 3 Material de guía para la capacitación (impreso y en formato electrónico)	Dos ingenieros durante cinco días El curso No.1 se celebrará en la fábrica El curso No. 2 incluye mantenimiento preventivo y correctivo	CUMPLE	NO CUMPLE
Vocabulario de términos, acrónimos y abreviaturas	En inglés y francés	Opcional: español	CUMPLE	CUMPLE
Suministro de alimentación e energía	220V ± 5%, 50 Hz		CUMPLE	No indicado
Documentación	1 Planes de instalación 2 Manuales de operación y mantenimiento del sistema y de sus componentes	Diagrama conceptual del sistema. Descripción de sistemas y equipo. Planos de montaje e instalación. Pruebas de aceptación operacional de la estación. Procedimientos para la detección y corrección de errores del sistema. Procedimientos operacionales para el mantenimiento periódico preventivo y correctivo Procedimientos para localizar averías y su reparación	CUMPLE	CUMPLE
Suministro de bienes y servicios	El contratante asumirá la responsabilidad de suministrar los bienes y servicios que determinan los respectivos contratos		*	
Soporte y repuestos	Suministro de piezas y repuestos (fungibles y no fungibles) necesarios para el servicio de mantenimiento del sistema durante dos años tras la aceptación final del contrato		*	10 años después de la aceptación final

* *Nota*: Cumplimiento de conformidad con la «lista de cumplimientos» declarada por la EMPRESA Y

CUADRO A1-2 (*final*)

Parámetros funcionales	**Especificaciones**	**Requisitos**	**EMPRESA Y Básico**	**EMPRESA X**
Pruebas de aceptación en fábrica	Verificación de las especificaciones del equipo		Un especialista de la UIT, tres días laborables	No existe indicación respecto a las pruebas de aceptación en fábrica
Transporte y entrega	Máximo de [180] días en el emplazamiento, incluido embalaje, flete e instalación		*	Cuatro meses después del pedido. Entregado en Ginebra
Instalación	Es responsabilidad del contratante instalar el equipo y realizar todas las pruebas necesarias para garantizar el perfecto funcionamiento y acondicionamiento del sistema	Instalación, prueba, integración y operación	*	
Ejecución de pruebas provisionales antes de la aceptación	Probar la fiabilidad de la instalación y el funcionamiento del sistema y equipos		*	
Ejecución de pruebas finales antes de la aceptación	Protocolo de aceptación		*	CUMPLE
Garantía	Garantía de calidad que cubre un funcionamiento correcto del material y del software durante 12 meses desde la fecha de aceptación final		*	CUMPLE

* *Nota*: Cumplimiento de conformidad con la «lista de cumplimientos» declarada por la EMPRESA Y

CUADRO A1-3

Parámetros funcionales	**Especificaciones**	**Requisitos**	**EMPRESA Y** **Básico**	**EMPRESA X**
Seguro de responsabilidad	Firma por el contratante de un seguro que cubre cualquier riesgo hasta la emisión de la certificación de la aceptación provisional (cubriendo el periodo desde que el equipo sale de fábrica hasta su instalación provisional en el lugar de entrega)			
1) Presentación global de la parte técnica 2) Estación de trabajo – computadora (elemento 2 de los términos de referencia)			1) Muy buena 2) OK **Lista de opciones:** ….	1 Presentación pobre de la propuesta y dificultad para encontrar la información apropiada/relevante 2 Estación de trabajo: configuración mínima 3 Sin pruebas de aceptación en fábrica 4 Capacitación: la propuesta no cumple los términos de referencia

APÉNDICE 2
AL ANEXO 1

Ejemplo de evaluaciones comercial y jurídica de la UIT

1 Evaluación comercial – apertura de las propuestas comerciales

1.1 Precio total de apertura de cada una de las propuestas identificadas por el grupo de evaluación:

Licitadores (en orden alfabético)	**Precio de apertura total en USD**
Empresa X	[999 999.00] – 1ª propuesta [999 999.00] – 2ª propuesta
Empresa Y	[999 999.00] – propuesta básica [999 999.00] – propuesta opcional

1.2 La EMPRESA X remitió la propuesta comercial más completa. La EMPRESA Y proporcionó en su propuesta la mayor parte de la información requerida. Sin embargo, el nivel de detalle (por ejemplo, el desglose de precios) no era satisfactorio y en consecuencia requirió aclaraciones adicionales.

1.3 El precio total evaluado (TEP, *total evaluated price*) de cada una de las dos propuestas, según el Comité de evaluación comercial son los siguientes:

Licitador	**Propuesta básica**	**Propuesta opcional 1**	**Propuesta opcional 2**
EMPRESA X	USD [999 999.00]	USD [999 999.00]	USD [999 999.00]
EMPRESA Y	USD [999 999.00]	USD [999 999.00]	–

1.4 La EMPRESA Y no presentó un desglose detallado de precios. En consecuencia, fue necesario solicitar una explicación detallada del precio global para completar la evaluación comercial de la propuesta. La EMPRESA X no facilitó toda la información requerida (desglose detallado de precios de la lista de elementos para las opciones 1 y 2)

1.5 La EMPRESA X y la EMPRESA Y presentaron precios de apertura muy distintos. En el caso de la EMPRESA X, la diferencia más significativa se deriva del hecho de que la propuesta básica solo incluye capacitación. En consecuencia, se acuerdo con la recomendación del TEC…., para más información véase el Informe de evaluación técnica del TEC.

1.6 Los precios cotizados por … incluyen un descuento del 10% del precio total.

1.7 El precio es CIP (Transporte y Seguro Pagados hasta lugar de destino convenido) entregado en Ginebra en dólares de los EEUU de América (USD) (la UIT no identifica el punto de destino). La UIT necesita que los precios se coticen en DDU – de conformidad con los Incoterms 2000 incluyendo el embalaje (punto de destino a determinar). Este punto debe aclarase durante la negociación del contrato.

1.8 ***Condiciones y términos de pago***. Ambas empresas han propuesto términos de pago. Por tanto, las condiciones y términos de pago del futuro contrato ***deben ser negociados*** con la empresa elegida.

1.9 Ambas propuestas incluyen ***condiciones económicas***. En el caso de que se establezcan negociaciones contractuales con ambas empresas, la UIT puede decidir analizar todas las modificaciones y condiciones de pago adicionales propuestas al contrato de conformidad con las normas y reglamentaciones de la UIT (véanse las páginas de la ii a la jj del capítulo N de la propuesta comercial de la propuesta de la EMPRESA X, y las páginas kk a la ll del capítulo M de la de la EMPRESA Y).

2 Evaluación jurídica – Conformidad con el formato de contrato tipo (Parte II del llamado a licitación)

Información general	**EMPRESA X**			**EMPRESA Y**	
	1º propuesta	**2ª propuesta**	**3ª propuesta**	**1ª propuesta (básica)**	**2ª propuesta**
Validez de la propuesta					
Conformidad con el contrato	Sí (α)	Sí	Sí	Sí	Sí
Conformidad con los requisitos técnicos	Sí	Sí	Además	No	Sí
Hombres/día totales	5	5	–	–	15
Tiempo de trabajo total	7.5 h/día 3-5 días	7.5 h/día 3-5 días	–	9 h/día 2 días	9 h/día 6 días/4 semanas
Precio por hombre/día	9 999,00	9 999,00	–	–	9 999,00
Hombres /día totales	6	6		10	10
Tiempo de trabajo total	7.5 h/ día 5 días (37.5 h)	7.5 h/ día 5 días (37.5 h)		6 h/ día 1 día (6 h)	6 h/ día 5 días /3 semanas (90 h)
Precio por hombre/día	9 999,00	9 999,00		9 999,00	9 999,00
Elementos que pueden incrementar el precio fijo firme total	Ninguno, si los elementos se limitan a los incluidos en los Anexo I a III remitidos con la propuesta	Ninguno, si los elementos se limitan a los incluidos en los Anexo I a III remitidos con la propuesta		No están incluidas las aulas ni el equipamiento para la capacitación	No están incluidas las aulas ni el equipamiento para la capacitación
Contrapartida de servicios que el licitador espera que facilite la UIT	Debe facilitarse un emplazamiento adecuado para la instalación	Debe facilitarse un emplazamiento adecuado para la instalación		Disponer las aulas y el equipamiento necesario para la capacitación	Disponer las aulas y el equipamiento necesario para la capacitación
Compromiso para el inicio y ejecución de los trabajos	Fecha efectiva del contrato	Fecha efectiva del contrato		Fecha efectiva del contrato	Fecha efectiva del contrato
Tiempo / condiciones para la entrega	*N* meses	*N* meses		*M* semanas	*L* semanas
Precio fijo total en forma en USD					

2.1 α – En relación con el cumplimiento de los requisitos:

La EMPRESA X hace hincapié en lo siguiente:

i) La traducción del software del sistema al francés se ofrece por separado, ya que todos nuestros clientes a nivel mundial aceptan el Software en idioma inglés;

ii) La traducción del Software al francés exige un pago único;

iii) Los manuales del equipo y para la capacitación se entregan en francés;

iv) Se proveerá capacitación para mantenimiento preventivo y correctivo si los empleados designados tienen un grado de ingeniería y experiencia.

La segunda propuesta de la EMPRESA Y (opcional) cumple completamente los requisitos.

2.2 En relación con el ***Formato de contrato tipo*** propuesto. En el caso de que se establezcan negociaciones contractuales con ambas empresas, la UIT puede decidir analizar todas las modificaciones y condiciones de pago adicionales propuestas respecto al Formato de Contrato Tipo. Los aspectos más importantes son los relativos a:

a) **Derecho sustantivo** (conformidad con disposiciones, leyes, reglamentos):

La EMPRESA X propone que toda las desavenencias sean resueltas de acuerdo con los términos del contrato y de acuerdos complementarios, o en cualquier otro caso de conformidad con el derecho sustantivo en vigor del país XYZ son referencia a otros derechos sustantivos».

Este requisito no es conforme con las normas y reglamentación de la UIT.

NOTA – Declara «su conformidad» con el Formato de Contrato Tipo.

b) Arbitraje:

La EMPRESA X propone que «el intento de acuerdo se considerará infructuoso si una de las partes informa de ello por escrito a la otra». Si el intento de acuerdo fracasa, las desavenencias se arreglarán se acuerdo con el Reglamento de Conciliación y Arbitraje de la Cámara de Comercio Internacional en [CIUDAD] con la participación de tres árbitros (véase página k/k del Capítulo N de la parte comercial) – ***Este artículo es negociable.***

c) Inspección en fábrica, aceptación y entrega:

Véanse comentarios/propuesta de la EMPRESA X, párrafo *n,* página *m* del Capítulo *N* de la propuesta opcional.

d) Garantías:

Ambas empresas presentan condiciones detalladas sobre garantías y solicitan modificaciones. Algunas de las modificaciones propuestas no son conformes al contrato tipo de la UIT, pero son negociables.

e) *Fuerza mayor:*

La EMPRESA X propone modificar este artículo. Véase Capítulo *N*, página *i/k* «…el evento de *fuerza mayor* será confirmado por la Cámara de Comercio…». Algunas de las modificaciones propuestas no son conformes al contrato tipo de la UIT, pero son negociables.

Lista de abreviaturas utilizadas en este Manual

2G	2ª generación (GSM)
3G	3ª generación (UMTS)
3GPP	Proyecto común de tecnologías inalámbricas de la tercera generación (*3rd generation partnership project*)
3GPP2	Proyecto común 2 de tecnologías inalámbricas de la tercera generación
A/D	Analógico/digital
A	
ACU	Unidad de control de antena
ADC	Conversor analógico/digital
ADSL	Línea de abonado digital asimétrica (*assymmetric digital subscriber line*)
AF	Frecuencia de audio (*audio frequency*)
AGC	Control automático de ganancia (*automatic gain control*)
AIF	Asociación Internacional de Fomento
AMDC	Acceso múltiple por división de código
AMDE	Acceso múltiple por división espacial
AMDF	Acceso múltiple por división de frecuencia
AMDFO	Acceso múltiple por división de frecuencias ortogonales
AMDS	Sistema de datos con modulación analógica (*analogue modulation data system*)
AMDT	Acceso múltiple por división en el tiempo
AMSL	Sobre el nivel medio del mar (*above mean sea level*)
AOA	Ángulo de llegada (*angle of arrival*)
APD	Distribución de probabilidad de amplitud (*amplitude probability distribution*)
API	Interfaz de programación de aplicaciones (*application programming interface*)
APT	Asian-Pacific Telecommunity
ASIC	Circuito integrado específicos de la aplicación (*application-specific integrated circuit*)
ATM	Modo de transferencia asíncrono (*asynchronous transfer mode*)
ATSC	Comité de sistemas de televisión avanzada (*advanced television systems comité*)
AWGN	Ruido gaussiano blanco aditivo (*additive white gaussian noise*)
B	
BCCH	Canal de control de difusión (*broadcast control channel*)
BER	Tasa de bits erróneos (*bit error rate/ratio*)
BIT	Prueba integrada (*built in test*)
BIRF	Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento
BITE	Equipo de prueba integrado (*built-in test equipment*)
BLER	Tasa de bloques erróneos (*block error rate/ratio*)
BLU	Banda lateral única

BR	Oficina de Radiocomunicaciones (*Radiocommunication Bureau*)
BRIFIC	Circular Internacional de Información sobre Frecuencias de la BR (BR *International Frequency Information Circular*
BW	Anchura de banda (*bandwidth*)
BWA	Acceso inalámbrico de banda ancha (*broadband wireless access*)
C	
C/I	Relación portadora/interferencia (*carrier-to-interference ratio*)
CAF	Función de ambigüedad cruzada (*cross ambiguity function*)
CB	Banda ciudadana (*citizens band*)
CCDF	Función de distribución acumulativa complementaria (*complementary cumulative distribution function)*
CEI	Comisión Electrotécnica Internacional
CEPT	Conferencia Europea de Administraciones de Correos y Telecomunicaciones (*European Conference of Postal and Telecommunication Administrations*)
CIF	Formato intermedio común (*common intermediate format*)
CIR	Respuesta del canal a impulsos (*channel impulse response*)
CISPR	Comité Internacional Especial de Perturbaciones Radioeléctricas (*International Special Committee on Radio Interference*)
CITEL	Comisión Interamericana de Telecomunicaciones
CMR	Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones
COSPAS/ SARSAT	Sistema Internacional de Satélites para Búsqueda y Salvamento
CPICH	Canal piloto común (*common pilot channel*)
CPLPA	Antena log-periódica con polarización circular (*circularly-polarized log-periodic antenna*)
CRMO	Oficina Central de Gestión del Espectro (*Central Radio Management Office*)
CRT	Tubo de rayos catódicos (*cathode-ray tube*)
CSV	Valores separados por comas (*comma-separated value*)
CTCSS	Sistema silenciador codificado por tono continuo (*continuous tone coded squelch system*)
CW	Onda continua (*continuous wave*)
D	
DAB	Radiodifusión de audio digital (*digital audio broadcast*)
DAM	Modulación dinámica de amplitud (*dynamic amplitude modulation*)
DANL	Nivel de ruido medio en pantalla (*display average noise level*)
DDC	Convertidor reductor digital (*digital down-converter*)
DDF	Dúplex por división de frecuencia
DDT	Dúplex por división en el tiempo
DECT	Telecomunicaciones inalámbricas digitales europeas (*digital european cordless telecommunications*)
DEM	Modelo de elevación digital (*digital elevation model*)

DEP	Densidad espectral de potencia
dfp	Densidad de flujo de potencia
DFT	Transformada discreta de Fourier (*discrete Fourier transform*)
DGPS	GPS diferencial (*differential GPS*)
DMB-T/H	Radiodifusión digital de multimedios – terrenal/portátil (*digital multimedia broadcasting- terrestrial/handheld*)
DME	Equipo de medida de distancia (*distance measuring equipment*)
DRM	Digital Radio Mondiale
DSB	Radiodifusión sonora digital (*digital sound broadcasting*)
DSL	Línea de abonado digital (*digital subscriber line*)
DSP	Procesamiento digital de la señal (*digital signal processing*)
DSSS	Espectro ensanchado por secuencia directa (*direct sequence spread spectrum*)
DTM	Modelo topográfico digital (*digital terrain model*)
DTMB	Radiodifusión digital de multimedios terrenal (*digital terrestrial multimedia broadcast*)
DTMF	Multifrecuencia bitono (*dual tone multiple frequency*)
DVB-T	Radiodifusión de vídeo digital – terrenal (*digital video broadcast – terrestrial*)
E	
EDGE	Velocidades de datos mejoradas para la evolución del GSM (*enhanced data rates for GSM evolution*)
EHF	Banda de frecuencias en ondas milimétricas (30 a 300 GHz)
ELF	Banda de frecuencias en ondas hectomegamétrica (*extremely low frequenc*) (3 a 30 Hz)
EMC	Compatibilidad electromagnética (*electromagnetic compatibility*)
EMF	Campo electromagnético (*electromagnetic field*)
ETSI	Instituto Europeo de Normas de Telecomunicación (*European Telecommunication Standards Institute*)
EUT	Equipo en prueba (*equipment under test*)
EVM	Magnitud de vector de error (*error vector magnitude*)
F	
FAT	Pruebas de aceptación en fábrica (*factory acceptance test*)
FBO	Ocupación de la banda de frecuencias (*frequency band occupancy*)
FCO	Ocupación del canal de frecuencia (*frequency channel occupancy*)
FDDI	Interfaz de datos distribuidos en fibra (*fiber data distributed interface*)
FDOA	Diferencia en la frecuencia de llegada (*frequency difference of arrival*)
FER	Tasa de tramas con error (*frame error rate*)
FET	Transistor de efecto de campo (*field effect transistor*)
FFT	Transformada rápida de Fourier (*fast Fourier transform*)
FHSS	Espectro ensanchado con salto de frecuencia (*frequency-hopping spread spectrum*)

FI	Frecuencia intermedia
FPGA	Disposición de puertos programables de campo (*field-programmable gate array*)
FSPL	Pérdida de trayecto en el espacio libre (*free space path loss*)
G	
GFSK	Modulación por desplazamiento de fase gaussiana (*Gaussian frequency shift keying*)
GLONASS	Sistema Mundial de Navegación por Satélite
GMSK	Modulación por desplazamiento mínimo gaussiano (*Gaussian minimum shift keying*)
GPIB	Bus de interfaz de carácter general (*general purpose interface bus*)
GPRS	Servicio general de radiocomunicaciones por paquetes (*global packet radio service*)
GPS	Sistema mundial de determinación de posición (*global positioning system*)
GSM	Sistema mundial para comunicaciones móviles (*global system for mobile communications*)
GUI	Interfaz de usuario gráfica (*graphical user interface*)
H	
HF	Banda de ondas decamétricas (3 a 30 MHz)
HSDPA	Acceso por paquetes de alta velocidad en enlace descendente (*highspeed downlink packet access*)
HSPA	Acceso por paquetes de alta velocidad (*highspeed packet access*)
HSUPA	Acceso por paquetes de alta velocidad en enlace ascendente (*highspeed uplink packet access*)
I	
ICM	Industriales, científicas y médicas
I/Q	En fase y cuadratura (*in-phase and quadrature*)
IBOC DSB	Radiodifusión sonora digital en la banda y en el mismo canal (*on channel digital sound broadcast*)
ICNIRP	Comisión Internacional sobre la protección frente a radiaciones no ionizantes (*International Commission on non-ionizing radiation protection*)
IDWM	Mapa Mundial Digitalizado de la UIT (*ITU Digitized World Map*)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFIC	Circular Internacional de Información sobre Frecuencias (*International Frequency Information Circular*)
IFM	Medición de la frecuencia instantánea (*instantaneous frequency measurement*)
ILS	Sistema de aterrizaje con instrumentos (*instrument landing system*)
IMP	Productos de intermodulación (*intermodulation product*)
IN	Ruido impulsivo (*impulse noise*)
IP3	Producto de intermodulación de 3er orden

IRPA/INIRC	Asociación Internacional para la Protección contra la Radiación/Comité Internacional para las radiaciones no ionizantes (*International Radiation Protection Association/International non-ionizing Radiation Committee*)
IS95	Interim Standard 95 (first CDMA-based digital cellular standard)
ISB	Banda lateral independiente (*independent sideband*)
ISDB-T	Radiodifusión digital de servicios integrados-terrenal (*integrated services digital broadcasting-terrestrial*)
ISO	Organización Internacional de Normalización
ITS	Instituto para las Ciencias de las Telecomunicaciones (*Institute for Telecommunication Sciences*)
K	
KCC	Comisión de las Comunicaciones de Corea (*Korea Communications Commission*)
KISA	Agencia de Internet y Seguridad de Corea (*Korea Internet & Security Agency*)
L	
LAN	Red de área local
LED	Diodo fotoemisor (*light emitting diode*)
LF	Ondas kilométricas (30 a 300 kHz)
LHCP	Polarización circular levógira (*left-hand circular polarisation*)
LIF	Lista Internacional de Frecuencias
LMDS	sistema de distribución multipunto local (*local multipoint distribution service*)
LNA	Amplificador de bajo nivel de ruido (*low-noise amplifier*)
LO	Oscilador local (*local oscillator*)
LoB	Línea de marcación (*line of bearing*)
LoS	Línea de visibilidad directa (*line-of-sight*)
LPA	Antena log-periódica (*log periodic antenna*)
LPZ	Zonas de protección contra las descargas (*lightning protection zones*)
LSB	Banda lateral inferior (*lower side band*)
LTE	Evolución a largo plazo (*long term evolution*)
M	
MA	Modulación de amplitud
MAQ	Modulación de amplitud en cuadratura
MARS	Sistema de Acceso y Extracción en el Servicio Móvil Marítimo (*Maritime Mobile Access and Retrieval System*)
MDA	Modulación por desplazamiento de amplitud
MDF	Modulación por desplazamiento de frecuencia
MDFO	Multiplexación por división de frecuencias ortogonales
MDFOC	Multiplexación por división de frecuencias ortogonales codificadas
MDP	Modulación por desplazamiento de fase
MDP-2	Modulación por desplazamiento de fase binaria

MDP-4C	Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura
MDP-4D	Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura diferencial
MER	Tasa de errores de modulación (*modulation error rate/ratio*)
MF	Modulación de frecuencia
MF	Banda de ondas hectométricas (300 a 3 000 kHz) (*medium frequency)*
MF-CW	Modulación de frecuencia de onda continua
MIFR	Registro Internacional de Frecuencias (*Master International Frequency Register*)
MIMO	Entrada múltiple, salida múltiple (*multiple input, multiple output*)
MMDS	Sistemas de distribución multipunto multicanal (*multichannel multipoint distribution systems*)
MMI	Interfaz hombre-máquina (*man-machine interface*)
MMN	Ruido artificial (*man-made noise*)
MoM	Método de los momentos (*method of moments*)
MPEG	Grupo de Expertos sobre imágenes en movimiento (*Moving Picture Expert Group*)
MPHPT	Ministerio de la Gestión Pública, Asuntos Nacionales, Correos y Telecomunicaciones (Japón)
MPX potencia	Potencia de la señal múltiplex (*power of the multiplex signal*)
MDM	Modulación por desplazamiento mínimo
MP	Modulación de fase
MPC	Modulación de fase continua
MTBF	Tiempo medio entre fallos (*mean time between failures*)
MTI	Indicación de objetivo en movimiento (*moving target indication*)
MTTR	Tiempo máximo de reparación (*maximum time to repair*)
MUF	Máxima frecuencia utilizable (*maximum usable frequency*)
MUSIC	Clasificación de señales múltiples (*multiple signal classification*)
N	
NASA	National Aeronautics and Space Administration (Estados Unidos de América)
NMR	Relación ruido a máscara (*noise-to-mask ratio*)
NOAA	Administración Nacional de los Océanos y la Atmósfera (Estados Unidos de América) (*National Oceanic and Atmospheric Administration*)
NTIA	Administración Nacional de Información de las Telecomunicaciones) (Estados Unidos de América) *National Telecommunications and Information Administration*
NSMS	Sistema de Gestión Nacional del Espectro (*Nacional Spectrum Management System*)
NTSC	National Television System Committee
O	
OACI	Organización de Aviación Civil Internacional
ODA	Asistencia Oficial al Desarrollo (Japón) (*Official Development Assistance*)

OMS	Organización Mundial de la Salud
OoB	Fuera de banda (*out of band*)
OSG	Órbita de los satélites geoestacionarios
P	
PABX	Centralita automática privada (*private automatic branch exchange*)
PAL	Línea de fase alterna (*phase alternate line*)
PC	Computador personal (*personal Computer*)
PCA	Posición de máxima aproximación (*position of closest approach*)
P-CPICH	Canal piloto común primario (*primary common pilot channel*)
PCS	Servicios de comunicaciones personales (*personal communication services*)
PDA	Agenda digital personal (*personal digital assistant*)
PEP	Potencia en la cresta de la envolvente (*peak envelope power*)
PHS	*Personal handyphone system*
p.i.r.e,	Potencia isótropa radiada equivalente
PMR	Radiocomunicaciones móviles privadas (*private mobile radio*)
Ppm	Partes por millón
p.r.a.	Potencia radiada aparente
PRF	Frecuencia de repetición de impulsos (*pulse repetition frequency*)
PRN	Número pseudoaleatorio (*pseudo-random number*)
PSNR	Relación señal de cresta a ruido (*peak signal-to-noise ratio*)
Q	
QCIF	Cuarta parte de formato intermedio común (*quarter common intermediate format*)
QoS	Calidad de servicio (*quality of service*)
QP	Cuasi cresta (*quasi-peak*)
MDP-C	Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (*quadrature phase shift keying*)
R	
RBDS	Sistema de radiodifusión de datos (*radio broadcast data system*)
RBW	Anchura de banda de resolución (*resolution bandwidth*)
RCR	Centro de desarrollo de sistemas de radiocomunicaciones (*development center for radio systems*)
RDS	Señal de datos radioeléctricos (*radio data signals*)
RDSI	Red digital de servicios integrados
RF	Radiofrecuencia
RG	Radiogoniómetro
RHCP	Polarización circular dextrógira (*right-hand circular polarisation*)
RLAN	Red de área local radioeléctrica (*radio local area network*)
RMTP	Remote monitoring transfer protocol
r.m.s.	Raíz cuadrática media (valor eficaz) (*root mean square*)

RNI	Radiación no ionizante
ROM	Memoria de solo lectura (*read only memory*)
RR	Reglamento de Radiocomunicaciones
RRC	Raíz de coseno alzado (*root raised cosine*)
RSCP	Potencia del código de la señal recibida (*received signal code power*)
RTPC	Red telefónica pública conmutada
RTTY	Radioteleimpresor
S	
S/*N*	Relación señal a ruido (*signal-to-noise ratio*)
SA	Disponibilidad selectiva (*selective availability*)
SAR	Tasa de absorción específica de energía (*specific energy absorption rate*)
SCA	Autoridad de comunicación subsidiaria (*subsidiary communication authority*)
SCN	Ruido de una única portadora (*single carrier noise*)
SCPC	Canal único por portadora (*single channel per carrier*)
SDG	Grado diferencial subjetivo (*subjective difference grade*)
SDH	Jerarquía digital síncrona (*synchronous digital hierarchy*)
SECAM	Secuencia de color con memoria (*séquentiel couleur à mémoire*)
SFN	Red de frecuencia única (*single frequency network*)
SFS	Servicio fijo por satélite
SHF	Ondas centimétricas (3 a 30 GHz) (*super high frequency*)
SIG	Sistema de información geográfica
SIM	Módulo de identidad del abonado (*subscriber identity module*)
SINAD	Relación señal a ruido más distorsión (*signal-to-noise and distortion*)
SINR	Relación señal a interferencia más ruido (*signal-to-interference-plus-noise ratio*)
SIR	Relación señal a interferencia (*signal to interference ratio*)
SM	Gestión del espectro (*spectrum Management*)
SMS	Servicio móvil por satélite
SMS4DC	Sistema de gestión del espectro para países en desarrollo (*spectrum management system for developing countries*)
SNR (*S*/*N*)	Relación señal a ruido (*signal-to-noise ratio*)
dep	Densidad espectral d potencia (*spectral power density*)
SPS	Servicio de posicionamiento estándar (*standard positioning service*)
SRNS	Servicio de radionavegación por satélite
SRS	Servicio de radiodifusión por satélite
SSL	Localización mediante una sola estación (*single station location*)
SVD	Descomposición de un valor único (*singular value decomposition*)
T	
TCA	Hora del máximo acercamiento (*time of closest approach*)

TCP/IP	Protocolo de control de transmisión/protocolo Internet (*transmission control protocol/Internet protocol*)
T-DAB	Radiodifusión de audio digital terrenal (*terrestrial digital audio broadcasting*)
T-DMB	Radiodifusión digital de multimedios terrenal (*terrestrial digital multimedia broadcasting*)
TDOA	Diferencia del tiempo de llegada (*time difference of arrival*)
TETRA	Sistema de radiocomunicaciones terrenales con concentración de enlaces (*terrestrial trunked radio*)
THD	Distorsión armónica total (*total harmonic distortion*)
TI	Tecnologías de la información
TLE	Elemento de dos líneas (*two line elements*)
TOA	Tiempo de llegada (*time of arrival*)
TV	Televisión
U	
UHF	Ondas decimétricas (300 a 3 000 MHz) (*ultra high frequency*)
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
UIT-R	Sector de Radiocomunicaciones de la UIT
UIT-T	Sector de Telecomunicaciones de la UIT
UMTS	Sistema de telecomunicaciones móviles universales (*universal mobile telecommunications system*)
UPS	Suministro ininterrumpido de energía (*uninterruptible power supply*)
USB	Banda lateral superior (*upper side band*)
USNO	Observatorio Naval de los Estados Unidos (*United States Naval Observatory*)
USTTI	United States Telecommunications Training Institute
UTC	Tiempo universal coordinado (*Universal Coordinated Time*)
UTM	Proyección universal transversal de Mercator (*universal transverse mercator*)
UWB	Banda ultra amplia (*ultra wide band*)
V	
VDSL	Línea de abonado digital de muy alta velocidad (*very high speed digital subscriber line*)
VHF	Ondas métricas (30 to 300 MHz) (*very high frequency*)
VLF	Ondas miriamétricas (3 a 30 kHz) (*very low frequency*)
VOR	Alcance omnidireccional en bandas de ondas métricas (sistema de navegación radioeléctrica para aeronaves) (*VHF omnidirectional range (radio navigation system for aircraft*)
VPN	Red privada virtual (*virtual private network*)
VQM	Métricas de a calidad de video (*video quality metrics*)
VSA	Analizador de señal vectorial (*vector signal analyzer*)
VSAT	Terminales de muy pequeña abertura (*very small aperture terminal*)
VSB	Banda lateral vestigial (*vestigial sideband*)

VSWR	Relación de onda estacionaria de tensión (*voltage standing wave ratio*)
W	
WAN	Red de área extensa (*wide area network*)
WGN	Ruido blanco gaussiano (*white gaussian noise*)
WiMAX	Worldwide interoperability for microwave access
WLAN	Red de área local inalámbricas (*wireless local area network*)
X	
XOR	OR-exclusiva
Y	
YIG	Silicato de hierro e itrio (*yttrium iron garnet*)



Impreso en Suiza
Ginebra, 2011
ISBN 92-61-13503-X
Fotos: PhotoDisc