

UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

Informe UIT-R SM.2356-0
(06/2015)

Procedimientos de planificación y optimización de las redes de comprobación técnica del espectro en la gama de frecuencias de ondas métricas y decimétricas

Serie SM
Gestión del espectro

Prólogo

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.

Política sobre Derechos de Propiedad Intelectual (IPR)

La política del UIT-R sobre Derechos de Propiedad Intelectual se describe en la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI a la que se hace referencia en el Anexo 1 a la Resolución UIT-R 1. Los formularios que deben utilizarse en la declaración sobre patentes y utilización de patentes por los titulares de las mismas figuran en la dirección web <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/es>, donde también aparecen las Directrices para la implementación de la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI y la base de datos sobre información de patentes del UIT-R sobre este asunto.

Series de los Informes UIT-R

(También disponible en línea en <http://www.itu.int/publ/R-REP/es>)

Series	Título
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

Nota: Este Informe UIT-R fue aprobado en inglés por la Comisión de Estudio conforme al procedimiento detallado en la Resolución UIT-R 1.

Publicación electrónica
Ginebra, 2015

© UIT 2015

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

INFORME UIT-R SM.2356-0*

Procedimientos de planificación y optimización de las redes de comprobación técnica del espectro en la gama de frecuencias de ondas métricas y decimétricas

(2015)

Cometido

En el presente Informe se analizan tres métodos diferentes. El primer método combina mediciones del ángulo de llegada (AOA) procedentes de múltiples emplazamientos que utilizan sistemas de antenas de radiogoniometría para determinar la localización del emisor. El segundo combina mediciones de la diferencia de tiempo en la llegada (TDOA) procedentes de un mínimo de tres emplazamientos (se necesitan dos pares de mediciones TDOA entre los tres emplazamientos para efectuar la localización geográfica). El tercero combina mediciones AOA y TDOA para realizar el procesamiento de la localización geográfica (se necesita un mínimo de dos emplazamientos, uno con capacidad de medición AOA y TDOA, y otro con capacidad de medición TDOA). Este Informe comprende los tres Anexos siguientes:

Anexo 1: Ejemplo práctico de planificación de una red de comprobación técnica del espectro AOA local en un terreno relativamente llano.

Anexo 2: Planificación de una red de comprobación técnica del espectro AOA en regiones montañosas y de relieve ondulado.

Anexo 3: Calidad de funcionamiento de un receptor y sus efectos sobre la cobertura de la red.

ÍNDICE

		<i>Página</i>
1	Introducción.....	3
2	Decisiones fundamentales que ha de tomar una administración durante la fase de preparación del proceso de planificación	4
3	Planificación y optimización de las redes de comprobación técnica del espectro AOA	6
	3.1 Principios fundamentales de la metodología general en vigor	6
	3.2 Elaboración de modelos informáticos de una red de comprobación técnica del espectro	9
	3.3 Perfeccionamiento de los emplazamientos de las estaciones durante la inspección de los mismos y la adquisición de los terrenos.....	23
	3.4 Planificación de redes de comprobación técnica del espectro pequeñas y locales especiales	25
4	Planificación y optimización de redes de comprobación técnica del espectro TDOA...	25
5	Planificación de redes híbridas de comprobación técnica	26

* El presente Informe se debe señalar a la atención de la Comisión de Estudio 1 del UIT-D.

	<i>Página</i>
5.1	Comparación de métodos de geolocalización..... 26
5.2	Simulación de la cobertura y precisión de la geolocalización 26
5.3	Resumen de la calidad de funcionamiento de un sistema híbrido 27
6	Método generalizado de planificación de redes de comprobación técnica del espectro pequeñas y locales especiales 27
6.1	Elaboración de modelos informáticos para redes de comprobación técnica del espectro pequeñas y locales especiales 28
7	Conclusión 35
Anexo 1 – Ejemplo práctico de planificación de una red de comprobación técnica del espectro AOA local en un terreno relativamente llano..... 36	
A1-1	Introducción 36
A1-2	Datos iniciales para la planificación de la topología de la red de comprobación técnica del espectro 36
A1-3	Optimización de la topología más sencilla de una red de comprobación técnica del espectro 37
A1-4	Topología regular de red de comprobación técnica del espectro de grandes dimensiones 39
A1-5	Estructura irregular de topología de red de comprobación técnica del espectro 40
Anexo 2 – Planificación de una red de comprobación técnica del espectro AOA en regiones montañosas y de relieve ondulado 43	
A2-1	Preámbulo 43
A2-2	Zonas de cobertura de radiogoniometría y localización para antenas de estaciones situadas en altitudes más elevadas 43
A2-3	Reducción de la probabilidad de efectos debidos a reflexiones 45
A2-4	Observaciones finales 47
Anexo 3 – Calidad de funcionamiento de un receptor y sus efectos sobre la cobertura de la red 48	
A3-1	Efectos de la calidad de funcionamiento sobre las distancias de separación entre estaciones de una red de geolocalización 48
A3-2	Margen dinámico instantáneo 48
A3-3	Ruido de fase 48
A3-4	Efectos sobre la zona de cobertura 49
A3-5	Conclusiones 49
Referencias 50	

1 Introducción

La planificación y optimización de las redes de comprobación técnica del espectro (SMN) tiene por objeto permitir el desempeño de las funciones de comprobación técnica necesarias en los territorios con la mayor densidad de transmisores y el menor número de estaciones de comprobación técnica. A tal efecto, se utilizan torres de antena situadas a la menor altura posible, al tiempo que se realizan mediciones de radiofrecuencias (RF) de alta calidad. Las zonas altamente pobladas y las zonas industriales pueden constituir territorios de interés.

Durante los últimos años, se ha elaborado una metodología informatizada de planificación y optimización en las gamas de frecuencias de ondas métricas y decimétricas (basada en los principios relativos al ángulo de llegada (AOA)), que figura en la sección 6.8 del Manual sobre Comprobación Técnica del Espectro (edición de 2011). Dicha metodología constituye un gran paso adelante con respecto a los procedimientos anteriores, los cuales se basaban exclusivamente en evaluaciones periciales realizadas por diseñadores de redes. En la Recomendación UIT-R SM.1392-2, se alude a la sección 6.8 y se hace hincapié en los posibles beneficios técnicos y económicos de la planificación y optimización efectivas de las SNM en los países en desarrollo. Estos beneficios, que sólo pueden obtenerse mediante el uso de métodos informatizados, también se aplican plenamente a los países desarrollados.

La experiencia práctica ha demostrado que, con los modelos y los cálculos informáticos adecuados, se puede reducir el número de estaciones de comprobación técnica fijas que se necesita para proporcionar cobertura a una región determinada, en comparación con las SNM planificadas con arreglo a evaluaciones periciales. A fin de lograr este objetivo, cabe seleccionar los mejores emplazamientos para las estaciones y las alturas de antena óptimas, habida cuenta de las características particulares del terreno circundante.

Por otra parte, de la experiencia práctica adquirida en la aplicación de esta metodología utilizando el software adecuado¹, tal y como se emplea en las SNM de diferente composición y en distintas condiciones geográficas, con los diversos grados de capacidad financiera de las administraciones, se colige que el proceso de planificación y optimización es más bien complejo. Dicho proceso se compone de varias fases y viene determinado por los requisitos principales de la SMN planificada, los cuales han de definirse con antelación. Además, durante la fase de planificación, es necesario adoptar una serie de decisiones administrativas con miras a optimizar el proceso. Las directrices en vigor no abordan adecuadamente estos aspectos.

Por consiguiente, convendría complementar la metodología vigente con una guía más detallada y un método de aplicación gradual, a fin de optimizar el proceso y minimizar el trabajo que comporta. Esta cuestión constituye el objeto del presente Informe.

Al diseñar una SMN, cabe la posibilidad de combinar dos o más tecnologías de localización geográfica. Existen distintos métodos disponibles para efectuar la localización geográfica. En el presente Informe se analizan tres métodos diferentes. El primero combina mediciones AOA procedentes de múltiples emplazamientos que utilizan sistemas de antenas de radiogoniometría para determinar la ubicación del emisor. El segundo combina mediciones de la diferencia de tiempo en la llegada (TDOA) procedentes de un mínimo de tres emplazamientos (se necesitan dos pares de mediciones TDOA entre los tres emplazamientos para efectuar la localización geográfica).

¹ Véase el software descrito en el Anexo 5 al del Manual de Técnicas Informatizadas para la Gestión del Espectro (edición de 2015).

El tercero combina mediciones AOA y TDOA para realizar el procesamiento de la localización geográfica (se necesita un mínimo de dos emplazamientos, uno con capacidad de medición AOA y TDOA, y otro con capacidad de medición TDOA). En aras de simplificar el presente Informe, estos tres métodos se denominarán:

- AOA;
- TDOA, e
- híbrido AOA/TDOA.

Por último, conviene tomar en consideración factores vinculados a la calidad del funcionamiento del receptor, tales como el factor de ruido, la sensibilidad al ruido, el ruido de fase, etc. Los receptores de mayor calidad de funcionamiento pueden permitir una mayor separación y, en consecuencia, una reducción del número de estaciones de comprobación técnica necesario para cubrir un territorio determinado. Este Informe comprende los tres Anexos siguientes:

Anexo 1: Ejemplo práctico de planificación de una red de comprobación técnica del espectro AOA local en un terreno relativamente llano

Anexo 2: Planificación de una red de comprobación técnica del espectro AOA en regiones montañosas y de relieve ondulado

Anexo 3: Calidad de funcionamiento de un receptor y sus efectos sobre la cobertura de la red

2 Decisiones fundamentales que ha de tomar una administración durante la fase de preparación del proceso de planificación

La primera etapa del proceso de planificación de una SMN requiere adoptar una serie de decisiones básicas respecto de los objetivos, la configuración y la calidad del funcionamiento del sistema, con arreglo a los recursos financieros disponibles y proyectados. Además de los puntos mencionados en la Recomendación UIT-R SM.1392-2, es preciso decidir:

– **La extensión del territorio sujeto a comprobación técnica**

Es decir, la superficie total que abarcará el servicio de comprobación técnica.

– **Si las estaciones fijas proporcionarán una cobertura generalizada o local al territorio**

Cabe decidir si la cobertura de un territorio determinado debe ser generalizada o local, y si este objeto ha de lograrse mediante el uso de redes auxiliares locales individuales que proporcionen una cobertura generalizada únicamente dentro de los confines de su segmento de la superficie total sujeta a comprobación.

– **Si se aplicará la tecnología AOA, TDOA o híbrida AOA/TDOA**

Habida cuenta del Informe UIT R SM.2211-1, es preciso realizar un estudio de los requisitos de localización geográfica, a fin de determinar qué tecnologías son las más adecuadas para el desarrollo de una SMN concreta.

– **Si construir una SMN nueva o elevar el nivel de prestaciones de una SMN existente**

La administración debe decidir la medida en que las estaciones fijas existentes pueden reutilizarse en la nueva SMN, y si es necesario reemplazar o actualizar su equipo para mejorar la cobertura.

– **Las categorías de los transmisores de prueba y las funciones principales de comprobación técnica: escucha, medición de las características de la emisión, radiogoniometría y estimación de la localización del emisor**

En las zonas de cobertura generalizada (o casi generalizada), es importante determinar las zonas de cobertura requerida de las cuatro funciones de comprobación técnica, en relación con las categorías de los distintos transmisores de prueba (véase la § 3.1 *infra*) y las

frecuencias que se proyecta comprobar. Cabe la posibilidad de combinar diferentes enfoques. Por ejemplo, es posible especificar un requisito relativo a la cobertura de emplazamiento generalizada para los transmisores de prueba de categoría superior (por ejemplo, transmisores de categoría II), y a la cobertura generalizada únicamente para radiogoniometría para los transmisores de categoría inferior (por ejemplo, transmisores de categoría I).

– **Las proporciones relativas del número de estaciones fijas y móviles**

Dado que la recalada por radiogoniometría de una fuente de emisiones requiere una estación móvil, resulta fundamental determinar la proporción adecuada de estaciones fijas y móviles. Ello dependerá de factores tales como la función de comprobación técnica utilizada para la cobertura generalizada (o casi generalizada). Con una cobertura de emplazamiento generalizada, las coordenadas probables de una fuente de emisiones se calcularán a partir de la intersección de las líneas de marcación desde diferentes estaciones fijas. En este caso, se necesitarán menos estaciones móviles y la recalada por radiogoniometría se completará rápidamente. En el caso de la cobertura generalizada únicamente para radiogoniometría, la recalada requiere más tiempo y esfuerzo. En consecuencia, se necesitarán más estaciones móviles. También se requieren más estaciones móviles en los casos en que existen amplias zonas carentes de cobertura de radiogoniometría de estaciones fijas.

Las decisiones adoptadas al inicio del proceso de planificación pueden modificarse a la luz de los datos recabados durante el mismo, así como del estado de los recursos financieros.

Al inicio de la fase de planificación, también es importante reunir la mayor cantidad de información posible sobre la región de interés (administrativa, socioeconómica, etc.), incluidos:

- mapas detallados en los que se indiquen centros de población, carreteras existentes, líneas de ferrocarril, etc.;
- la distribución de la densidad de la población y las zonas económicas de la región;
- la distribución de la densidad de sistemas transmisores de la región;
- datos del registro nacional de frecuencias sobre la disposición y las características técnicas de los transmisores de gran potencia y la altura de sus antenas;
- mapas en los que se indiquen rutas de líneas de transmisión eléctrica de alta tensión y estaciones de interconexión de redes asociadas; y
- datos sobre el emplazamiento de mástiles de antenas de microondas y otras estructuras metálicas altas, si estuvieran disponibles.

También es importante adoptar decisiones con respecto a:

– **La determinación de los requisitos de los equipos de comprobación técnica radioeléctrica**

Con objeto de determinar los valores límites de la intensidad de campo, es necesario establecer requisitos de calidad de funcionamiento aplicables al equipo de la estación de comprobación técnica, tales como la ganancia de la antena receptora, la atenuación del cable, la sensibilidad del receptor, etc.

– **La elección del modelo de propagación de las ondas radioeléctricas**

Los modelos de propagación de las ondas radioeléctricas desempeñan un papel notable en la planificación de la SMN. Por consiguiente, es importante elegir un modelo adecuado para la zona de servicio de la estación de comprobación técnica. En la sección 6.4 del Manual sobre Comprobación Técnica del Espectro (edición de 2011) se proporciona más información sobre modelos de propagación. Por ejemplo, pueden utilizarse modelos de propagación basados en la metodología establecida en la Recomendación UIT-R P.1546-5 o P.1812-3. La práctica demuestra que los cálculos realizados de conformidad con la Recomendación

UIT-R P.1546-5 suelen facilitar una predicción más precisa en relieves casi planos, mientras que los cálculos acordes a la Recomendación UIT-R P.1812-3 son más adecuados para terrenos accidentados y montañosos. Sin embargo, estos modelos no siempre son exactos, puesto que las predicciones dependen en gran medida de las características específicas de la situación.

En las zonas urbanas deben utilizarse modelos de propagación elaborados específicamente para las mismas, tales como el modelo Okumura-Hata o el modelo Walfisch-Ikegami (COST 231). Se han formulado nuevos modelos de propagación determinísticos que utilizan mapas tridimensionales digitales de ciudades y edificios. Muchos de estos modelos están basados en métodos de óptica geométrica (por ejemplo, los modelos de trazado de rayos) y pueden resultar más precisos que los métodos clásicos.

– **La determinación de las zonas que cabe evitar para el emplazamiento de estaciones de comprobación técnica**

Es importante determinar qué zonas cabe evitar a la hora de ubicar las estaciones de comprobación técnica. Dichas zonas pueden ser emplazamientos cerrados o seguros, o áreas con una alta intensidad de campo. En el segundo caso, el valor límite de la intensidad de campo (valor cuadrático resultante) para señales múltiples comprendidas en la banda de paso del receptor de comprobación técnica es de 30 mV/m, (es decir, 90 dB ($\mu\text{V}/\text{m}$)), de conformidad con la sección 2.6 del Manual de la UIT. La Recomendación UIT-R SM.575-2 puede utilizarse con el fin de calcular el valor límite de la intensidad de campo que se necesita para proteger las estaciones de comprobación técnica fijas contra la interferencia ocasionada por transmisores cercanos o potentes.

– **La incertidumbre de localización (para las SMN AOA/TDOA)**

Al planificar estaciones AOA/TDOA, es preciso determinar el máximo valor de error admisible con respecto a la posición del emisor. Este valor de error definirá los requisitos básicos de calidad de funcionamiento de la red de comprobación técnica. En este punto, cabe señalar que el método AOA requiere al menos dos estaciones de comprobación técnica, mientras que el método TDOA precisa de al menos tres.

También resulta fundamental la obtención de estadísticas (durante varios años), relativas a la región de interés, sobre solicitudes de servicios de comprobación técnica que sólo puedan proporcionarse por conducto de estaciones móviles (por ejemplo, búsquedas de transmisores ilegales, resolución de casos de interferencia, etc.). Estas estadísticas pueden servir para determinar la combinación óptima de estaciones fijas y móviles.

3 Planificación y optimización de las redes de comprobación técnica del espectro AOA

3.1 Principios fundamentales de la metodología general en vigor

La metodología presentada en la sección 6.8 del Manual sobre Comprobación Técnica del Espectro (edición de 2011) se basa en el cálculo y posterior análisis de cuatro zonas de cobertura de comprobación técnica diferentes, cada una de las cuales requiere distintos niveles de sensibilidad en los receptores de comprobación técnica. Las tres primeras funciones de comprobación técnica son:

- la escucha (sensibilidad del receptor en la gama máxima o más alejada);
- la medición de las características de la emisión (sensibilidad del receptor en una gama o un nivel inferior)

- la radiogoniometría (sensibilidad del receptor en la gama o el nivel más bajo). En el Cuadro 6.8-1 del Manual sobre Comprobación Técnica del Espectro (edición de 2011) se asumen, a efecto comparativo, los siguientes valores umbral de intensidad de campo en los límites de la zona de cobertura respectiva:
 - 0 dB ($\mu\text{V/m}$) para la escucha;
 - 12 dB ($\mu\text{V/m}$) para la medición de las características de la emisión; y
 - 20 dB ($\mu\text{V/m}$) para la radiogoniometría.

A efectos de planificación, es posible adoptar otros valores umbral de intensidad de campo, dependiendo de las características del equipo y de la metodología para la medición de las características de la emisión que se utilizarán en la SMN. Estas zonas de cobertura son independientes para cada estación de la SMN y, al fusionarlas, se obtienen las zonas de cobertura global para cada función de comprobación técnica.

La superficie de las zonas se determina básicamente con arreglo a la topografía del territorio en que se establece la SMN, la altura de las antenas de las estaciones y la potencia y la altura de las antenas de los transmisores sujetos a comprobación técnica. En el Anexo 5 a la Recomendación UIT-R P.1812-3 figura un modelo adecuado de propagación de las ondas radioeléctricas. En la § 1.1 se describe un método de cálculo especial, que se recomienda para fines de comprobación técnica. También podría utilizarse la Recomendación UIT-R P.1812-3 u otros modelos de propagación (véase la § 2 *supra*).

En el Cuadro 6.8-1 del Manual sobre Comprobación Técnica del Espectro (edición de 2011) se proponen tres categorías de «transmisores de prueba» de baja potencia con antenas relativamente bajas, que pueden utilizarse a fin de proyectar, simular y planificar las SNM.

Las categorías de p.i.r.e. son las siguientes:

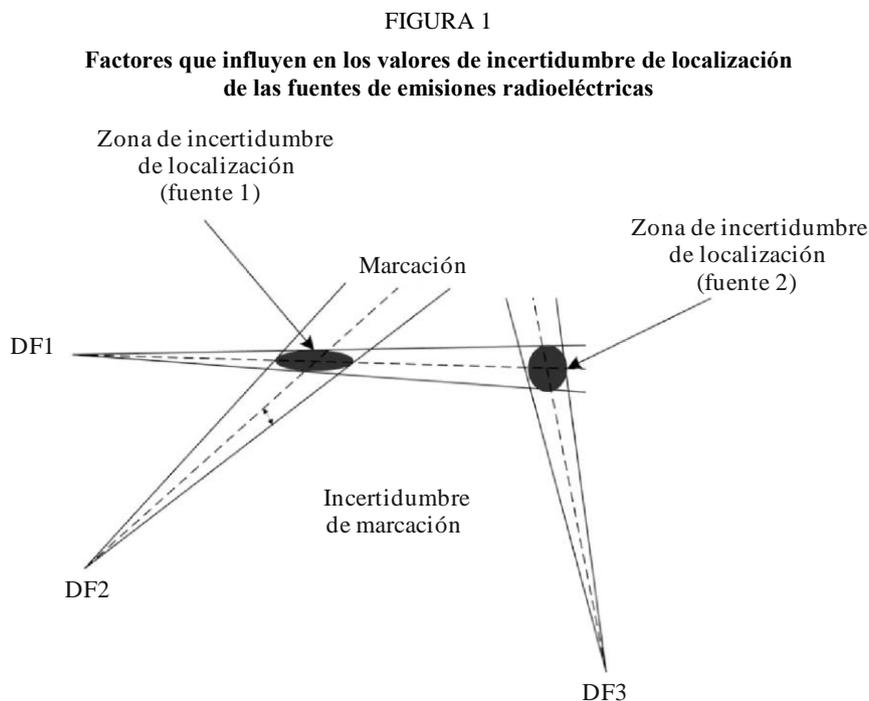
- Categoría I
Potencia de 10 W, altura de antena de 1,5 m (transmisor de radiocomunicación móvil privada (RMP) sobre vehículos ligeros).
- Categoría II
Potencia de 10 W, altura de antena de 20 m (estaciones de base RMP, transmisores de radiodifusión de baja potencia, transpondedores de televisión).
- 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).

Resulta obvio que una SMN será más eficaz en la comprobación técnica de transmisores potentes con antenas situadas a mayor altura.

La cuarta función de comprobación técnica es la localización. La zona de cobertura de localización, la cual reviste una importancia crítica para la topología de las estaciones fijas de las SMN, está basada en la triangulación y equivale a las zonas de cobertura de radiogoniometría solapadas de al menos dos estaciones de una SMN. A medida que aumenta la distancia entre las estaciones, el tamaño de las zonas de radiogoniometría solapadas (es decir, de la zona de cobertura de localización) disminuye rápidamente hasta desaparecer. Una de las características de la zona de cobertura de localización es que, en ella, la incertidumbre de localización (o precisión) puede variar ampliamente, lo que no suele suceder con las otras tres funciones de comprobación. La incertidumbre varía, en ocasiones notablemente, dentro de la zona en cuestión, dando lugar a la denominada «plantilla de cobertura de localización» (LCT), la cual viene descrita en detalle en el § 4.7.3.1.4 del Manual sobre Comprobación Técnica del Espectro (edición de 2011).

En cualquier punto de la LCT, el valor de incertidumbre de localización depende de una serie de factores, entre los que cabe destacar (véase la Fig. 1):

- los valores de incertidumbre de marcación inherentes de los radiogoniómetros utilizados en el proceso de triangulación, que se traducen en la creación de sectores en los que las líneas de marcación individuales se distribuyen por ángulo;
- las distancias entre la zona en la que intersectan los segmentos de distribución de las líneas de marcación y los respectivos radiogoniómetros; y
- los ángulos de intersección de los segmentos de distribución de las líneas de marcación.



Informe SM.2356-0

Por consiguiente, la LCT constituye el factor más importante de todos, lo cual debe tenerse en cuenta durante el proceso de planificación de la SMN. La LCT también representa el mejor indicador de la calidad tanto de la SMN en su conjunto, como de sus diferentes partes.

La zona de cobertura global de radiogoniometría de las estaciones fijas reviste una importancia particular para la planificación, dado que, en esa zona, dichas estaciones proporcionan marcaciones que simplifican la recalada por radiogoniometría de las fuentes de emisión realizada por las estaciones móviles que interactúan con estaciones fijas.

De acuerdo con la sección 6.8 del Manual sobre Comprobación Técnica del Espectro (edición de 2011), cuando se proyecta la cobertura global de comprobación técnica de amplias zonas que requieren un elevado número de estaciones, la planificación de una SMN adecuada 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 SMN 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.

3.2 Elaboración de modelos informáticos de una red de comprobación técnica del espectro

Las fases básicas de este proceso son las siguientes:

- 1) definición del objetivo;
- 2) Evaluación de la cobertura de comprobación técnica de las estaciones existentes;
- 3) Superposición de una red regular primaria;
- 4) Evaluación de la cobertura de comprobación técnica de las estaciones de la red regular primaria y optimización del número de estaciones y de sus características;
- 5) Subdivisión de células individuales de la red primaria y ulterior optimización del número de estaciones y de sus parámetros;
- 6) Perfeccionamiento de los emplazamientos y de los parámetros de las estaciones mediante un modelo informático.

A continuación, figura un análisis detallado de estas fases.

3.2.1 Definición del objetivo

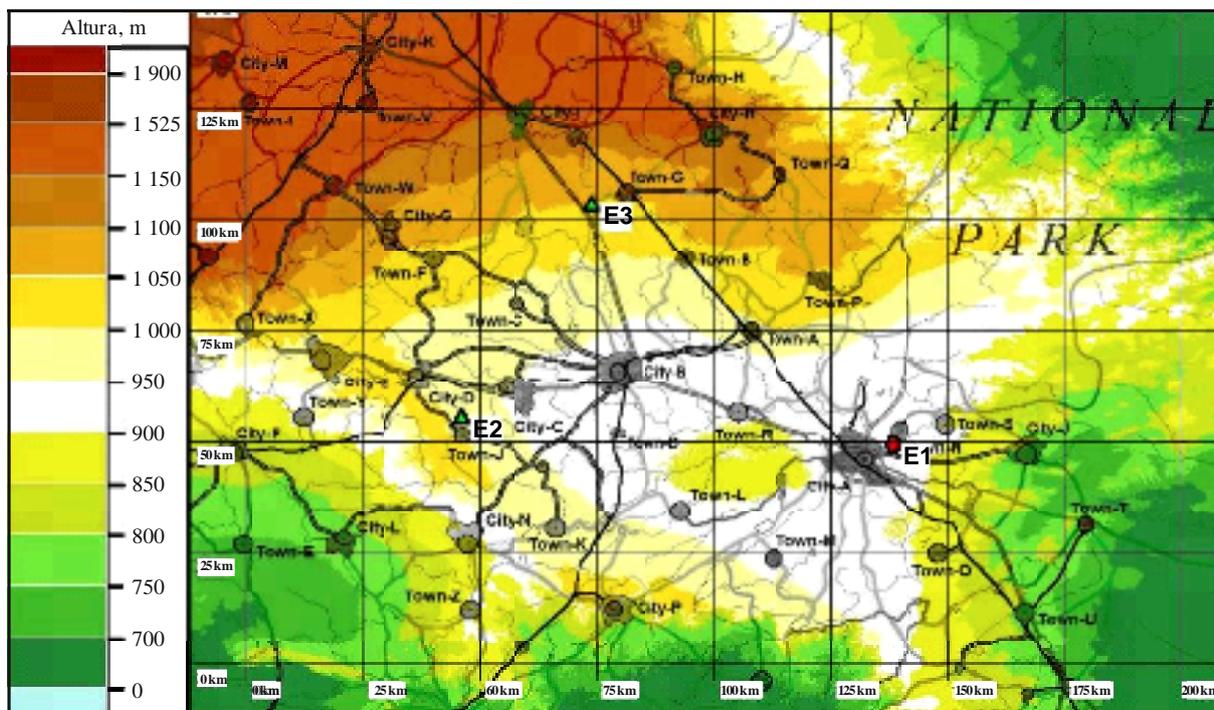
Una vez que se han adoptado estas decisiones fundamentales, al menos a título preliminar, y que se han recabado los datos necesarios, puede dar comienzo la labor de elaboración del modelo informático de la futura SMN. Con objeto de ilustrar las fases del proceso de planificación, se utilizará un ejemplo concreto de una SMN idónea.

Supóngase que una administración pretende, a la luz de los recursos financieros disponibles, implantar una nueva SMN en la zona poblada del territorio que aparece junto con su topografía en la Fig. 2. Supóngase asimismo que, en la zona de interés, existen tres estaciones fijas (E1-E3) con equipos bastante modernos (incertidumbre de radiogoniometría de 1° r.m.s.), y que dichas estaciones han de incorporarse a la SMN planificada sin ninguna actualización. Cabe señalar que las antenas de las estaciones E1 y E2 se hallan a 30 m de altura y las de la estación E3 a 20 m, y que no se ha previsto introducir ningún cambio al respecto.

Supóngase también que se ha adoptado una decisión con el fin de garantizar una cobertura global para todas las funciones de comprobación técnica, incluida la localización, en la parte poblada del territorio de interés para los transmisores de prueba de la categoría II (es decir, potencia de 10 W y altura de antena de 20 m). Además, la parte del territorio que está más desarrollada desde un punto de vista económico, a saber, la comprendida entre la ciudad A y la ciudad E, ha de disponer de cobertura global al menos para una función de radiogoniometría para los transmisores de categoría I (potencia de 10 W y altura de antena de 1,5 m). Se calcula que el equipo futuro garantizará una precisión de radiogoniometría de 1° r.m.s.

FIGURA 2

La zona de interés con las tres estaciones existentes



Informe SM.2356-02

Por tanto, a efectos de la elaboración del modelo informático (véanse las Figs. 2 y 3), se consideran las siguientes condiciones iniciales:

- 1) SMN existente – tres estaciones fijas (E1-E3):
 - estación E1 – altura de antena de 30 m;
 - estación E2 – altura de antena de 30 m;
 - estación E3 – altura de antena de 20 m;
 - incertidumbre de radiogoniometría de 1° r.m.s.
- 2) Requisitos de la nueva SMN:
 - cobertura global de la parte poblada del territorio con todas las funciones de comprobación técnica, incluida la localización, para los transmisores de categoría II (potencia de 10 W, altura de antena de 20 m);
 - cobertura global del territorio comprendido entre la ciudad de A y la ciudad E al menos para la radiogoniometría para los transmisores de categoría I (potencia de 10 W, altura de antena de 1,5 m);
 - incertidumbre de radiogoniometría de 1° r.m.s.

3.2.2 Elaboración del modelo inicial de la red de comprobación técnica del espectro

3.2.2.1 Evaluación de la cobertura de comprobación técnica de las estaciones existentes

Las zonas de cobertura de las estaciones existentes se calculan para las distintas funciones de comprobación técnica por conducto de programas informáticos que poseen, como mínimo, las características descritas en el Capítulo 5 del Manual de Técnicas Informatizadas para la Gestión del Espectro (edición de 2015).

Para el ejemplo analizado en el presente Informe, las zonas de cobertura de todas las estaciones existentes para la escucha, la medición de las características de la emisión y la radiogoniometría se indican en la Fig. 3, y para la localización (es decir, la LCT) en la Fig. 4. Los cálculos realizados corresponden a transmisores de prueba de 450 MHz y categoría II. Dicha frecuencia se utilizará en todos los cálculos subsiguientes, a menos que se especifique lo contrario. Las zonas verdes de la Fig. 3 representan la cobertura con respecto a la función más sensible (la escucha), las zonas de color rosa simbolizan la cobertura con respecto a la función relativamente menos sensible (la medición del parámetro de la emisión) y las zonas amarillas indican la cobertura para la función menos sensible (la radiogoniometría). La LCT (la distribución de las incertidumbres de localización se indica por medio de gradaciones de color en la Fig. 4) se calcula para un 50 por ciento de probabilidad de localizar el transmisor buscado en la elipse de incertidumbre correspondiente (véase el § 4.7.3.1.4 del Manual sobre Comprobación Técnica del Espectro (edición de 2011)).

En la Fig. 4, la línea roja representa los límites de la zona de cobertura conjunta de radiogoniometría (mostradas en amarillo en la Fig. 4) mientras que, en la Fig. 3, la línea roja simboliza los límites de la LCT resultante del ensamblaje de las zonas de color de la Figura. 4.

La Fig. 4 muestra que la cobertura de localización brindada por las estaciones existentes, incluso con respecto a los transmisores de prueba de categoría II, dista mucho de satisfacer los requisitos indicados.

En este caso particular, incluso sin disponer de cálculos detallados, la conclusión resulta obvia. No obstante, en los casos en que el objetivo es optimizar una SMN existente y razonablemente densa, dichos cálculos son cruciales y pueden utilizarse como base para las fases posteriores de elaboración del modelo informático.

FIGURA 3
Zonas de cobertura global del servicio de comprobación técnica de las tres estaciones existentes

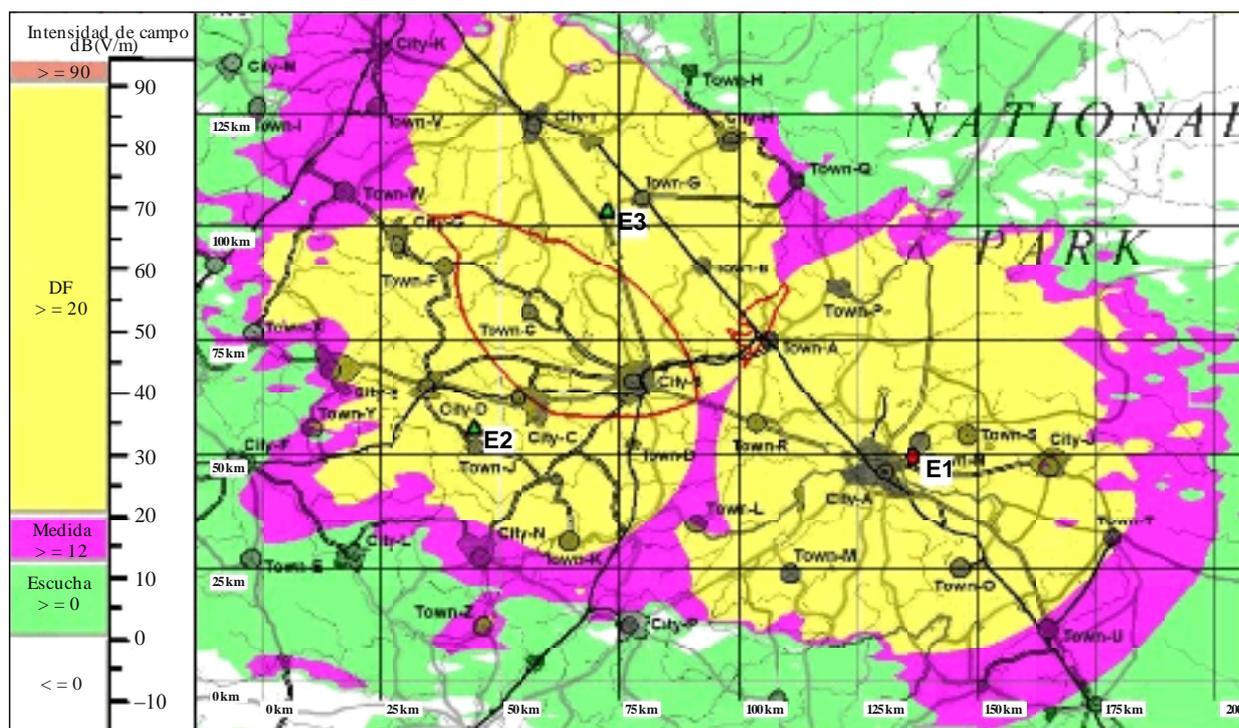
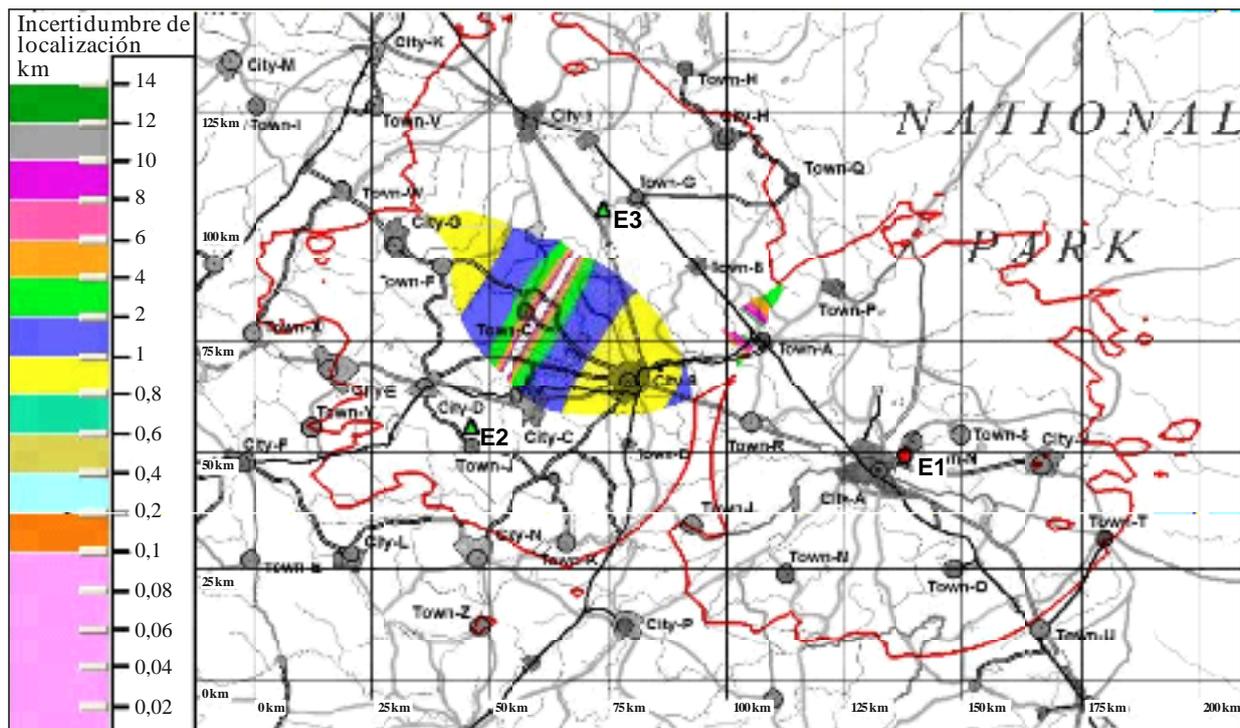


FIGURA 4

Plantilla de cobertura de localización para las tres estaciones existentes



Informe SM.2356-04

3.2.2.2 Superposición de una red regular primaria

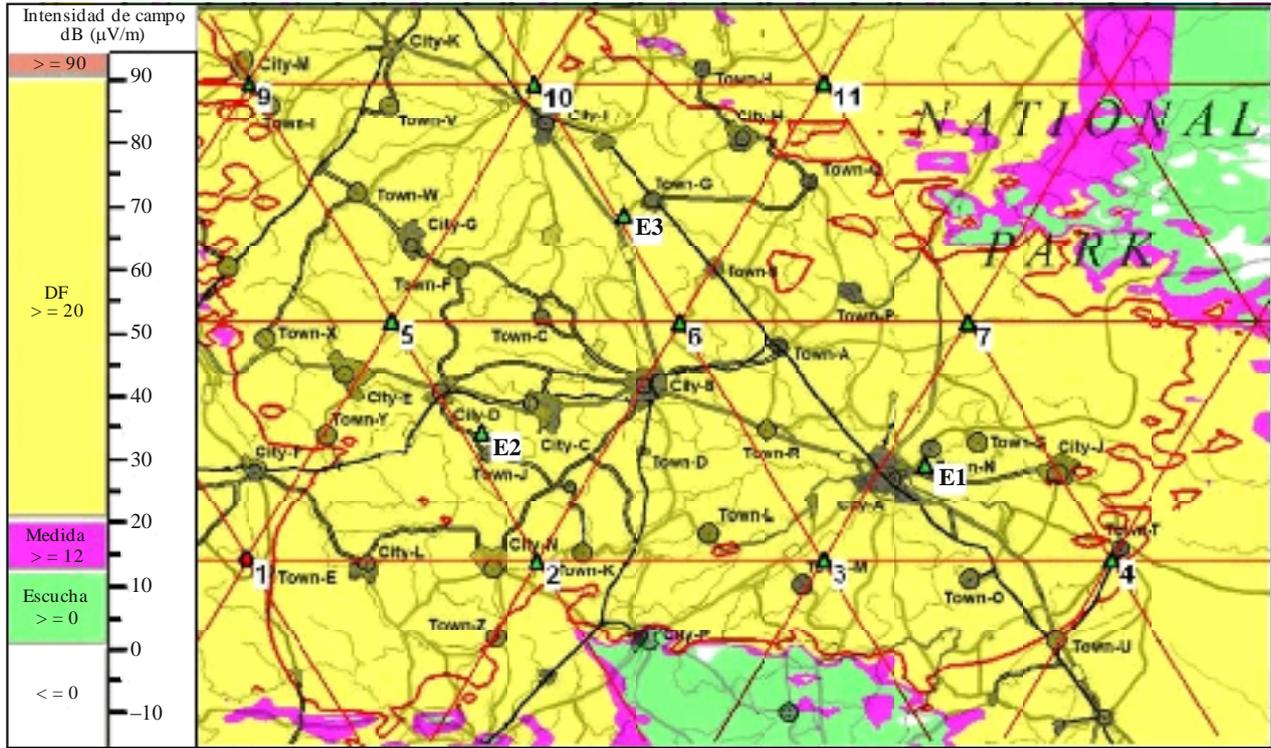
Una red regular primaria se superpone, en el territorio de interés, con 60 km de distancia entre los nodos. Las estaciones de comprobación técnica están situadas virtualmente en los nodos de la red. Se dispone de innumerables opciones para organizar los nodos de una red regular de este tipo en relación con los centros de población y otros objetos geográficos. Por ejemplo, estos nodos pueden organizarse de modo que coincidan con las estaciones existentes o estén cerca de ellas, o localizarse a lo largo del territorio de mayor interés en términos de comprobación técnica.

Supóngase que se decide organizar los nodos de la red de acuerdo con la segunda opción mencionada en el párrafo anterior, ubicándolos a lo largo del territorio que comprende las ciudades de A a E, como se muestra en la Fig. 5, con una ubicación virtual de 12 estaciones adicionales en los nodos de la red. Las estaciones existentes se hallan cerca de los nodos de los elementos de la red regular secundaria, con distancias de separación entre los nodos de 30 km (véase el § 3.2.2.4).

Con respecto a la Fig. 5, cabe observar que las estaciones 8 y 12 podrían no ser objeto de consideraciones adicionales por motivos económicos, puesto que se hallan en el territorio del Parque Nacional, el cual carece de centros de población y, por tanto, no requiere servicios de comprobación técnica de estaciones fijas.

FIGURA 6

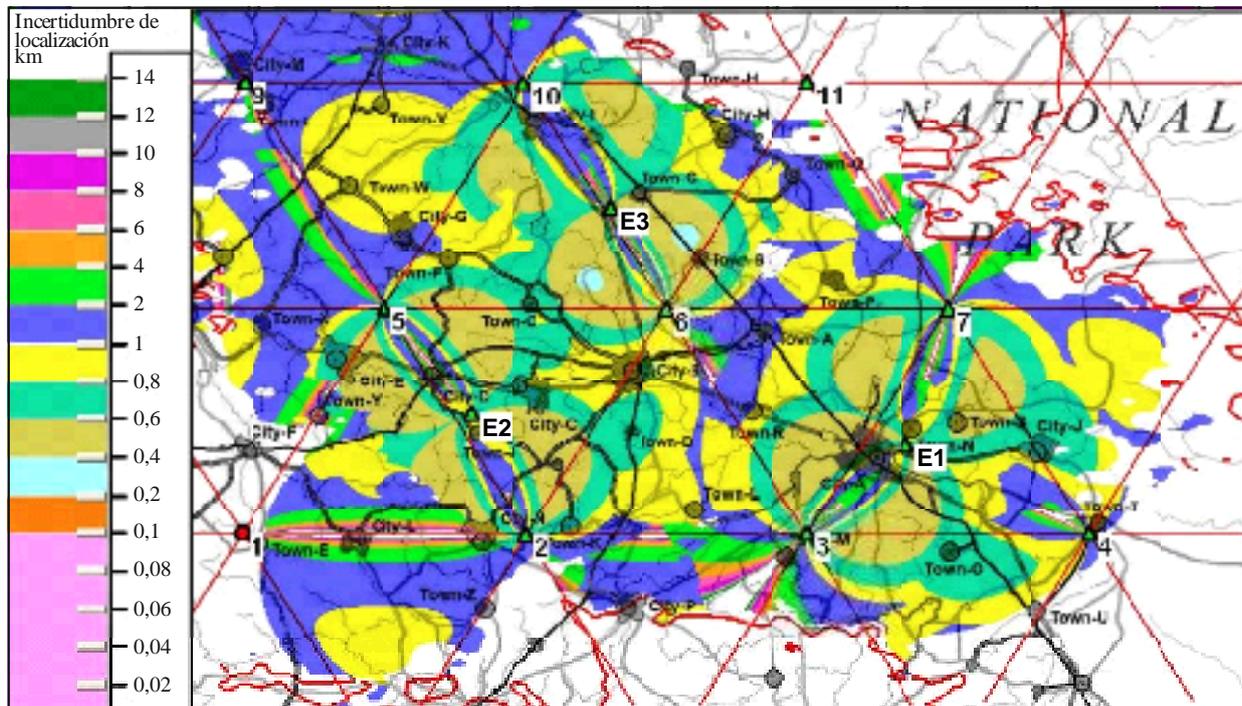
Cobertura de comprobación técnica de la red primaria para transmisores de prueba de categoría II



Informe SM.2356-06

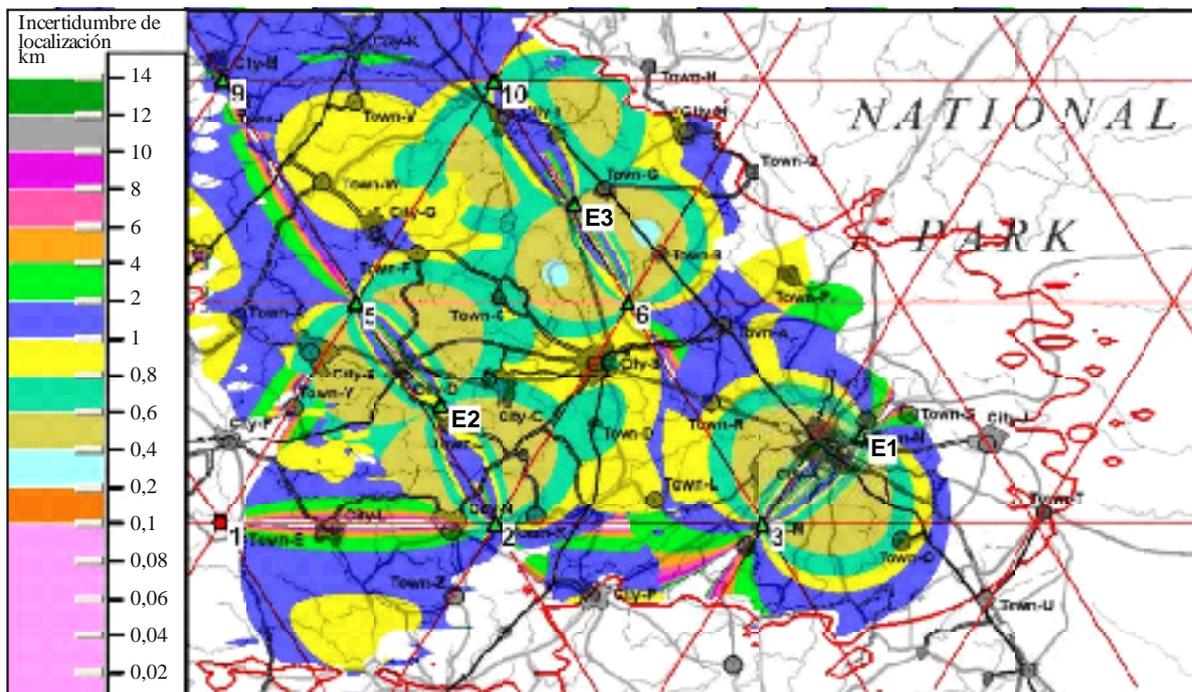
FIGURA 7

Plantilla de cobertura de localización de la red primaria para transmisores de prueba de categoría II



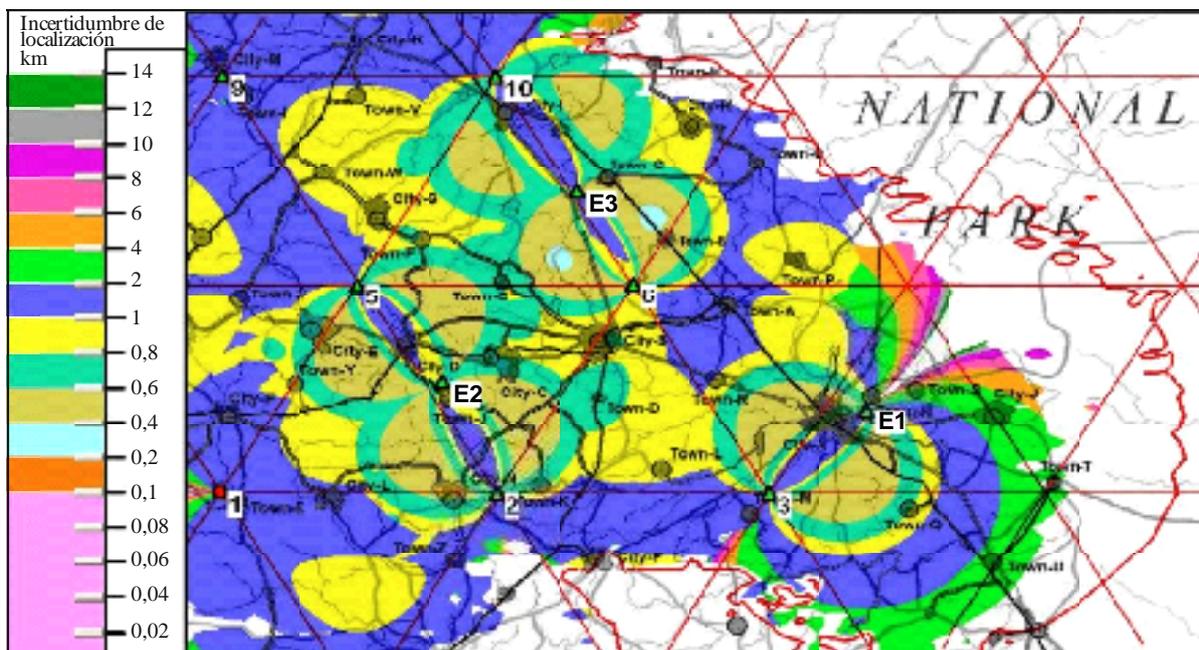
Informe SM.2356-07

FIGURA 8
Plantilla de cobertura de localización de la red primaria
(sin las estaciones 4, 7 y 11) para transmisores
de prueba de categoría II



Informe SM.2356-08

FIGURA 9
Plantilla de cobertura de localización de la red primaria
(sin las estaciones 4, 7 y 11) para transmisores
de prueba de categoría III



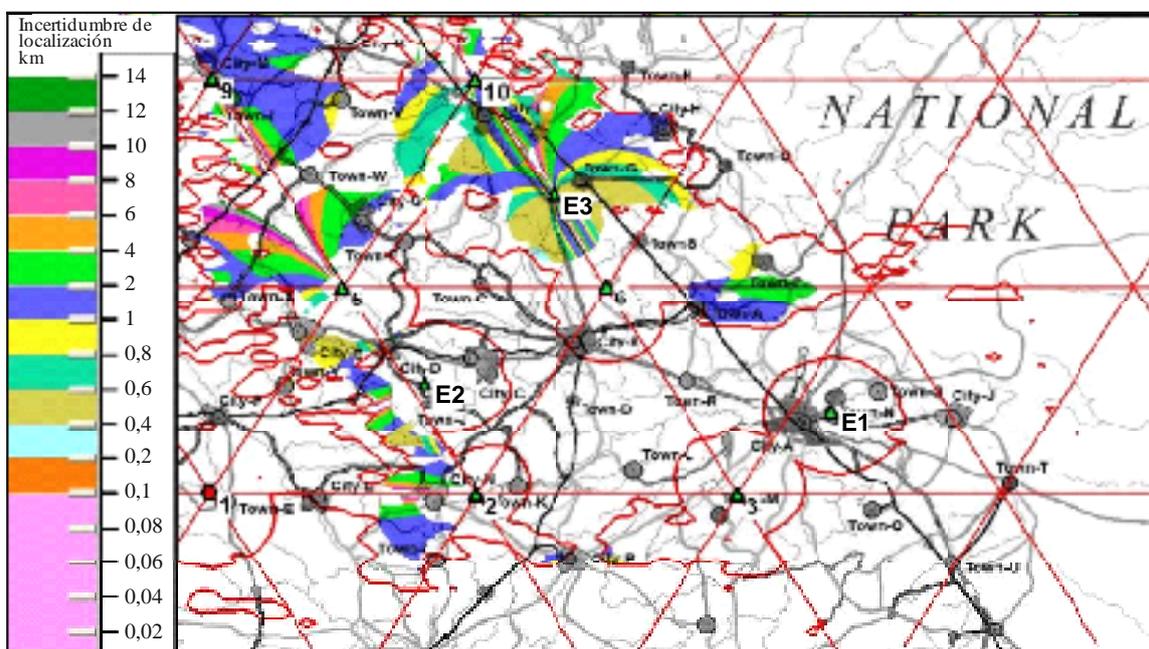
Informe SM.2356-09

Con estos datos, la administración puede decidir no mantener la estación 4 en la SMN planificada. La decisión puede posponerse hasta que se haya hecho la planificación de toda la SMN (véanse las fases siguientes), se haya determinado el número total de estaciones y se hayan confirmado los recursos para la financiación del proyecto. Puede ser preferible no incluir esta estación durante la primera fase de diseño de la SMN y dejar la decisión para fases posteriores.

Si se comparan la Figs. 8 y 9 es interesante observar que el considerable aumento en la potencia y altura de la antena entre los transmisores de prueba de categorías II y III, tiene un efecto muy reducido en términos de mejora de la cobertura en las zonas del noreste y del sur de la región (entorno al pueblo H y la ciudad P respectivamente). En el primer caso, es el resultado de una brusca reducción de la elevación media del territorio. En el segundo caso, es el resultado de un aumento en la altura media del territorio como puede verse en la Fig. 2. Estos efectos relevantes no pueden determinarse con más detalle sin realizar los cálculos pertinentes.

La cobertura de radiogoniometría y de localización de la SMN (sin las estaciones 11, 7 y 4) para los transmisores de prueba I no consigue el objetivo de una comprobación técnica más minuciosa de la zona entre la ciudad A y la ciudad E. Por tanto, es necesario aumentar la densidad de la red primaria en la zona en cuestión.

FIGURA 10
Plantilla de cobertura de localización de la red primaria
de transmisores de categoría I



Informe SM.2356-10

3.2.2.4 Subdivisión de células individuales de la red primaria y ulterior optimización del número de estaciones y de sus parámetros

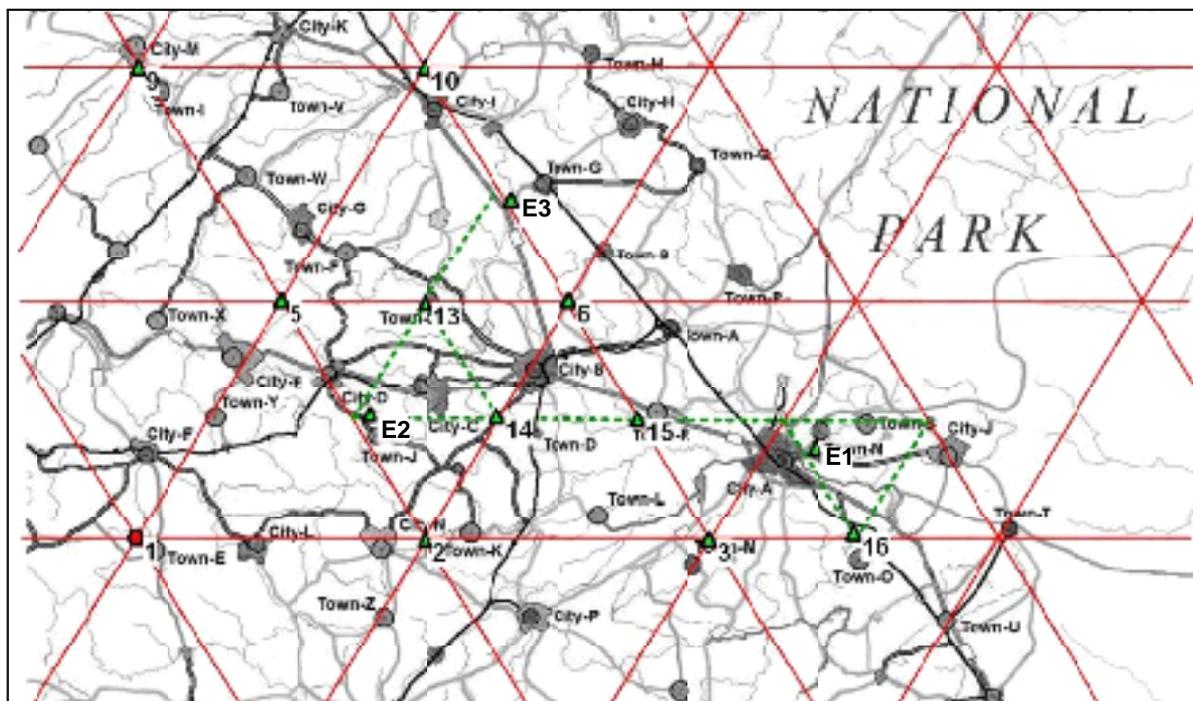
Con el fin de aumentar la densidad de esta parte de la red de comprobación técnica del espectro, las células triangulares individuales de la red primaria pueden dividirse en cuatro células triangulares de red secundaria con distancias de 30 km entre estaciones y situando estaciones adicionales en todos o algunos de los nodos de las nuevas células.

En el ejemplo considerado, una opción posible que parece óptima en términos económicos es la que se muestra en la Fig. 11 mediante líneas verdes discontinuas.

Un triángulo primario cuyos vértices se encuentran en las estaciones 2, 5 y 6 se divide en cuatro triángulos secundarios, para los que sólo son necesarias dos nuevas estaciones (13 y 14), ya que la estación existente E2 se utiliza como tercera estación. En cada uno de los cuatro triángulos primarios solo se define un triángulo secundario y en tres de ellos se utilizan las estaciones existentes E1 y E3.

FIGURA 11

Red primaria con elementos de red secundaria



Informe SM.2356-11

En la Fig. 12 se muestra la cobertura conjunta de radiogoniometría en esta SMN más densa compuesta por transmisores de categoría I y en la Fig. 13 se muestra la cobertura de localización. Estas Figuras reflejan claramente que la red de comprobación técnica del espectro así obtenida satisface en esencia los requisitos establecidos, aunque existan pequeñas zonas al sureste de la ciudad B que sólo tienen cobertura con respecto a la medición de las características de las emisiones (zonas en color rosa de la Fig. 12). Por otro lado, estas zonas sin cobertura de radiogoniometría para transmisores de prueba de categoría I desaparecen cuando se utilizan transmisores de prueba de 10 W y alturas de antena de 5 m (edificios de una planta con antenas de 2 m de altura sobre el tejado), tal como se refleja en la Fig. 14.

Si quisiera reducirse el tamaño de las zonas sin cobertura para transmisores de prueba de categoría I, podría aumentarse la altura de las antenas de las futuras estaciones 3 y 15 y de la estación existente E1 a 50 m, si fuera necesario. En la Fig. 15 se muestra la cobertura de comprobación técnica mejorada cuando las alturas de las antenas de dichas estaciones se aumentan a 50 m.

La Fig. 13 ilustra claramente el efecto de la topografía sobre la cobertura de comprobación técnica. Los territorios situados al norte de la línea recta que une las estaciones 5, 13 y 6 tienen una cobertura sensiblemente mejor de radiogoniometría y de localización que los situados al sur de dicha línea, pese a la considerablemente menor densidad de estaciones de comprobación técnica en dicha zona, incluidas las nuevas. Ello se debe a que la parte norte de la región está ocupada por terrenos elevados mientras que la parte central es un valle (véase a Fig. 2). Esas características propias de la cobertura de comprobación técnica de este territorio sólo pueden determinarse mediante cálculos específicos.

En estas condiciones geográficas particulares, la parte norte de la región está bien atendida incluso para la función de localización en lo que se refiere a los transmisores de prueba de categoría I. Teniendo ello en cuenta, la administración puede querer garantizar la misma cobertura en la zona central entre las ciudades A y E. Ello puede lograrse de una de las dos forma siguientes. En primer lugar se puede intentar dividir algunos triángulos primarios adicionales en cuatro triángulos secundarios, por ejemplo, el triángulo que conforman las estaciones 2, 6 y 3 así como el compuesto por las estaciones 6, 3 y la anteriormente excluida estación 7, y situar estaciones adicionales en un conjunto de nodos de dichos triángulos secundarios. Sin embargo, los cálculos muestran que esta solución no es eficaz.

La segunda opción es considerablemente más eficaz y es la que se aplica en general. Implica dividir algunos triángulos secundarios (con distancias entre estaciones de 30 km) situados entre las ciudades A y E en triángulos terciarios con una distancia entre estaciones de 15 km. Ello permite eliminar algunas de las estaciones primarias, como las estaciones 2 y 3, así como la estación secundaria 16. La cobertura de la zona situada más al sur de la región es algo peor que antes, pero puede ser una pérdida aceptable teniendo en cuenta la relativamente baja densidad de población.

FIGURA 12
Cobertura de comprobación técnica de la SMN más densa para transmisores de prueba de categoría I

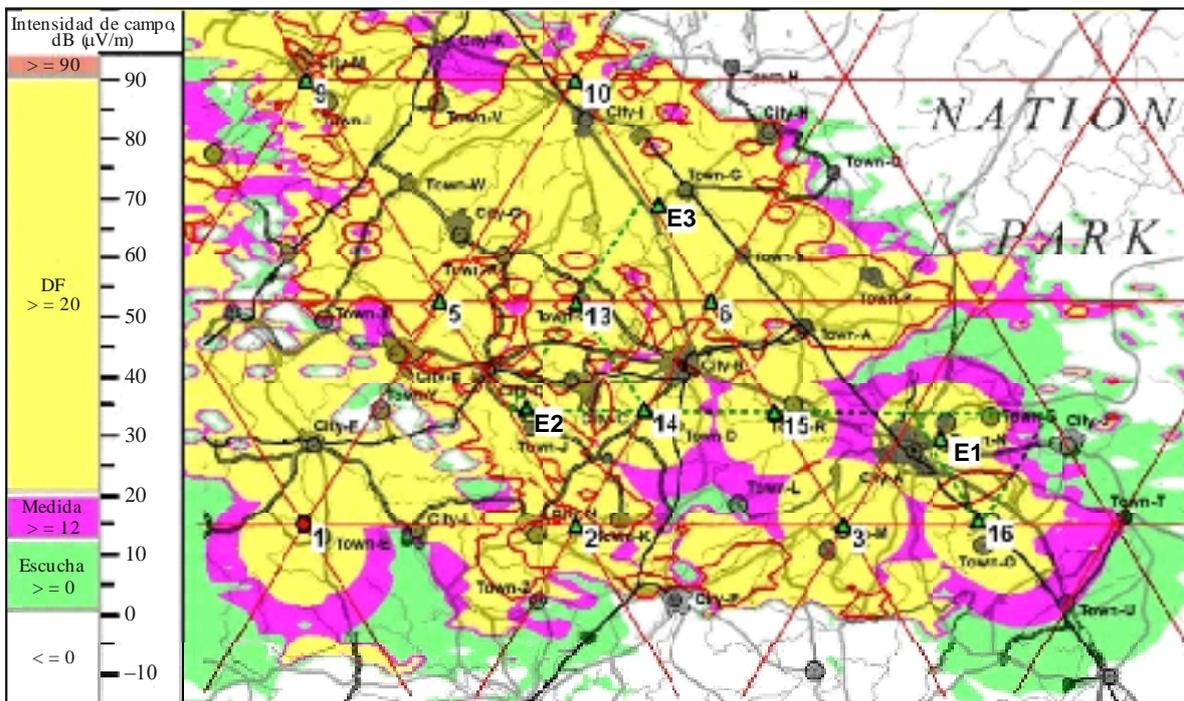
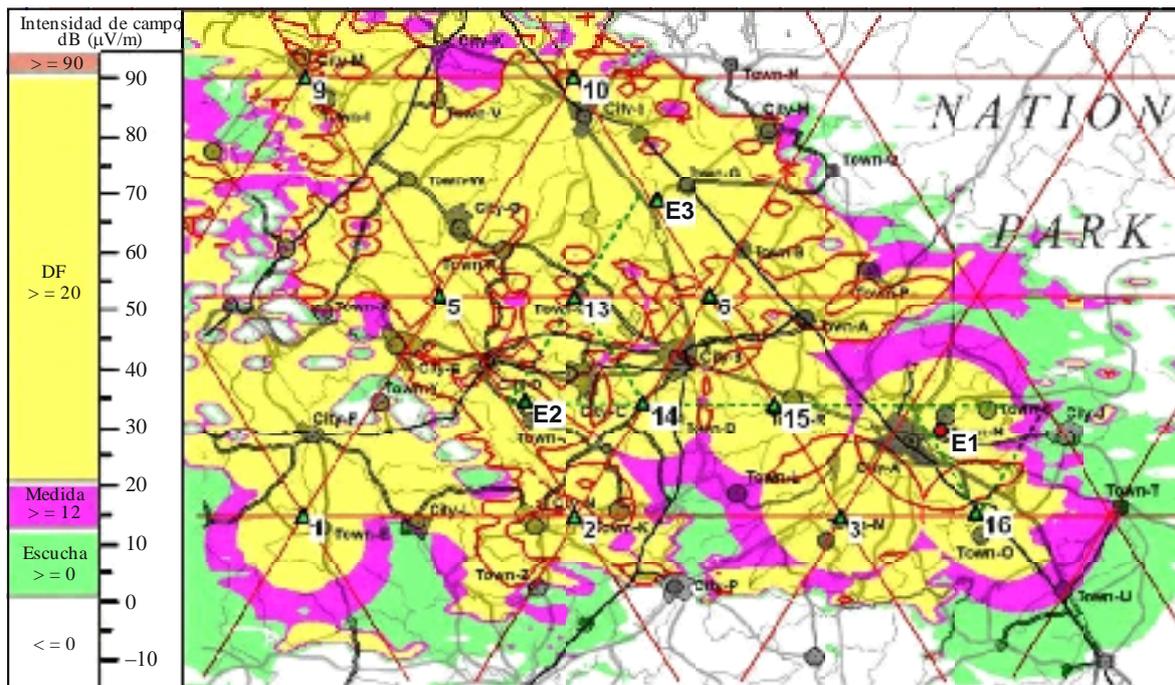


FIGURA 15

Cobertura de comprobación técnica de la SMN más densa para transmisores de prueba de categoría I cuando las alturas de antena de las estaciones 3, 15 y E1 se aumentan a 50 m



Informe SM.2356-1

De lo anterior se desprende que, en principio, existen muchas soluciones posibles, y que cada una puede ser analizada fácilmente mediante cálculos de cobertura para identificar la que la administración considere más adecuada y pueda ser aceptada.

Las Figuras anteriores y los análisis conexos reflejan que la plantilla de cobertura de localización es el mejor indicador de la calidad de la SMN en su conjunto y de sus elementos individuales.

3.2.3 Perfeccionamiento de los emplazamientos y de los parámetros de las estaciones mediante un modelo informático

Una vez que se ha tomado una decisión preliminar sobre la configuración de la SMN, pueden definirse en un modelo informático los parámetros y emplazamientos deseados de las estaciones.

En primer lugar deben identificarse las estaciones desde las que se pretende realizar las funciones de comprobación técnica. En general, las estaciones pueden ser de una de las tres categorías siguientes: atendidas, controladas a distancia o estaciones exclusivamente de radiogoniometría (ésta sólo son controladas a distancia). Obsérvese que en la red primaria con distancias entre estaciones de 60 km casi todas las estaciones deben realizar todas las tareas de comprobación técnica, ya que de lo contrario existirían zonas sin cobertura para la medición de características de las emisiones o incluso para su captación. En la red secundaria, con distancias entre estaciones de 30 km, algunas estaciones pueden ser exclusivamente para radiogoniometría controladas a distancia.

Por ejemplo, los cálculos muestran que en el ejemplo de SMN considerada, las estaciones 6, 13 y 16 pueden ser radiogoniómetros controlados a distancia. En la red terciaria, con distancias entre estaciones de 15 km, muchas estaciones pueden ser radiogoniómetros controlados a distancia. Cuanto mayor sea la densidad de la SMN mayor podrá ser el número de estaciones radiogoniométricas controladas a distancia.

Para determinar qué estaciones pueden ser radiogoniómetros controlados a distancia es necesario calcular la zona de cobertura para la medición de parámetros de emisión de alguna estación en particular situada en la zona interior a un grupo de otras estaciones. En este ejemplo, se muestra como la zona rosa con áreas de cobertura de radiogoniometría señaladas en amarillo en su zona central. Se debe entonces comprobar cuáles de dichas estaciones quedan dentro de los límites de esta zona a una distancia razonable de sus límites exteriores.

Estas estaciones pueden considerarse como potenciales radiogoniómetros controlados a distancia, algo que puede confirmarse mediante cálculos de sus respectivas zonas de cobertura.

En esta fase también resulta de utilidad determinar cuáles de las estaciones que realizan todas las funciones de comprobación técnica deben ser atendidas para realizar de manera efectiva los subsiguientes análisis de emplazamientos (véase la § 3.3). Es deseable que las estaciones atendidas se encuentren en grandes ciudades o en sus cercanías a fin de garantizar que puedan dotarse de personal cualificado y de los recursos necesarios.

También debe tenerse en cuenta que las modernas tecnologías de la información permiten situar un centro de operación de estaciones en un entorno urbano atípico utilizando equipos instalados en contenedores y su correspondiente antena situada en las afueras de la ciudad. Esta solución simplifica la tarea de encontrar parcelas de terreno adecuadas y permite una considerable reducción de los costes de adquisición del emplazamiento, su construcción e instalación. No obstante, si el centro de operación se sitúa en un edificio alto situado en una zona urbana, la antena puede instalarse en la cubierta del mismo, obviando la necesidad de adquirir un emplazamiento. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que las estaciones atendidas deben disponer de zonas de almacén para las estaciones de comprobación técnica móviles y transportables, tales como garajes o plazas de aparcamiento permanentes.

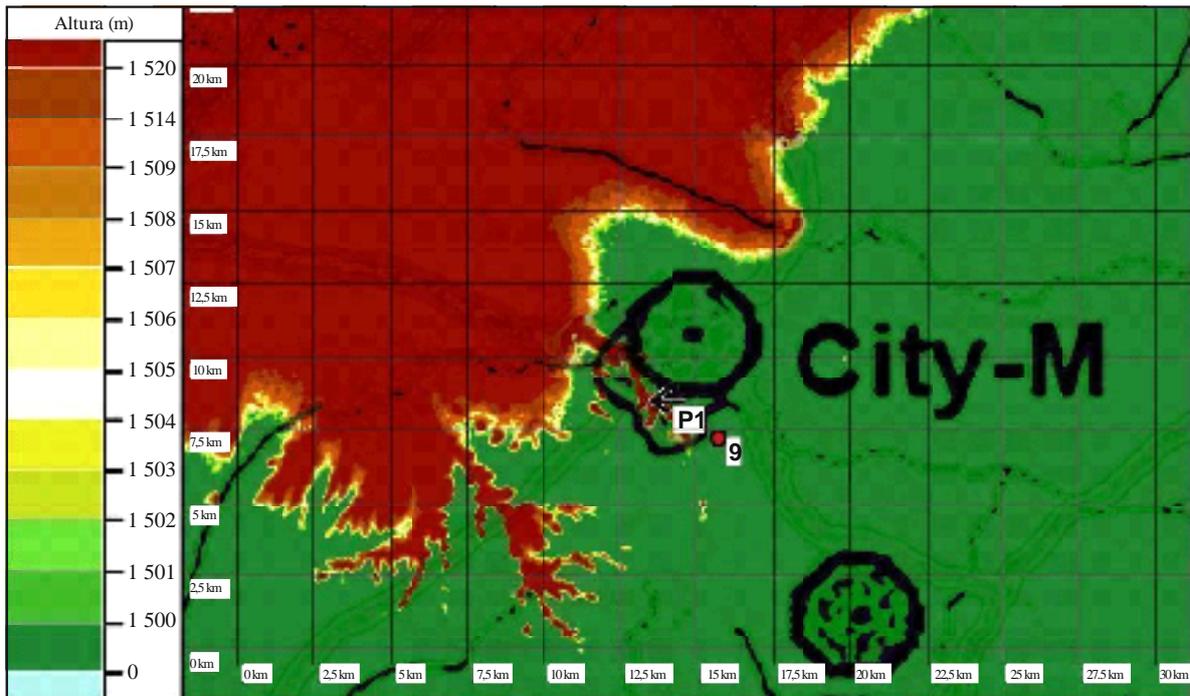
La distancia entre estaciones atendidas no debe ser superior a 600 km, en base a que las estaciones móviles pueden prestar su servicio en puntos situados a un máximo de 300 km desde sus bases, para acceder a los mismos durante un día laboral (sólo si las carreteras están en buen estado).

De esta forma es posible, incluso en la fase de elaboración de un modelo informático, optimizar los parámetros de la estación y la ubicación de los emplazamientos. Por ejemplo, pueden realizarse cálculos sucesivos para determinar las zonas de cobertura de comprobación técnica de estaciones a título individual y en su conjunto y, optimizar así las alturas de las antenas. Si la red de comprobación técnica del espectro es de mayor densidad, puede reducirse la altura de antena de algunas estaciones desde 30 m (en base a la cual se han realizado los cálculos iniciales) a 20 m y en algunos casos a 10 m, permitiendo ahorros en los mástiles de antenas. Si en algunas estaciones es necesario aumentar la cobertura pueden incrementarse las alturas de las antenas hasta los 50 m, algo que en muchos casos puede lograrse de forma más económica trasladando la antena a un terreno más elevado que aumentando la altura física del mástil de antena. Ello requiere un estudio detallado de la topografía entorno al emplazamiento antes determinado a fin de identificar zonas adecuadas con mayor elevación del terreno.

A título de ejemplo, en la Fig. 16 se muestra una vista ampliada de la topografía entorno a la estación 9. Se observa claramente que donde se halla el puntero P1, a unos tres kilómetros del emplazamiento calculado para la estación, existe una zona de terreno elevado hacia el noroeste. El emplazamiento señalado por el puntero P1 es aproximadamente 20 m más elevado que el emplazamiento calculado para la estación 9, por lo que trasladar la estación 9 al terreno más elevado aumenta significativamente la zona de cobertura de comprobación técnica, incluso con un mástil menor. En la Fig. 16 se muestra que existen otros puntos al oeste de la estación 9 y que hay muchas formas posibles de ampliar la cobertura de comprobación técnica de la estación reubicándola.

FIGURA 16

Topografía en los alrededores de la estación 9



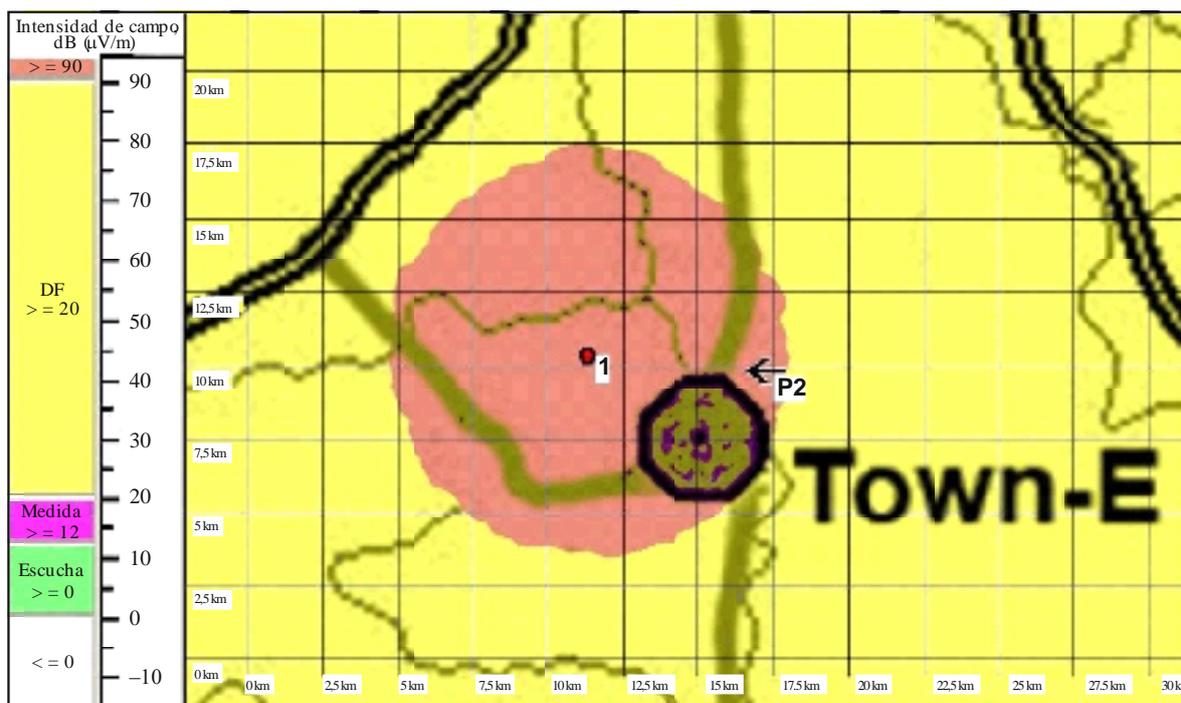
Informe SM.2356-16

Además, teniendo en cuenta los datos recopilados sobre la región (véase la § 2), la ubicación virtual de cada estación que se desprende del modelo puede ser analizada y optimizada en relación con la protección contra la interferencia y las emisiones no deseadas de edificios cercanos y de otras estructuras de conformidad con la Recomendación UIT-R SM.575-2 y la sección 2.6 del Manual de Comprobación Técnica del Espectro (edición de 2011).

Por ejemplo, considérese el caso de un transmisor de radiodifusión de 500 W funcionando en 110 MHz con una antena de 50 m de altura y situado de conformidad con el registro de la asignación nacional de frecuencia en el emplazamiento indicado por el puntero P2 de la Fig. 17. Si se calcula la zona de cobertura de la estación 1 para un transmisor de prueba con los parámetros indicados, con una intensidad de campo en el límite de la zona de 30 mV/m, es decir, 90 dB ($\mu\text{V}/\text{m}$), se concluye que el transmisor está dentro de esta zona (se muestra en color marrón en la Fig. 17). Genera una intensidad de campo en el emplazamiento de la estación 1 que sobrepasa el nivel admisible (véase la sección 2.6 del Manual de Comprobación Técnica del Espectro, edición de 2011). Para solucionar este problema, la estación 1 deberá moverse al menos 1,2 km hacia el oeste.

FIGURA 17

Zona de protección de la interferencia de la estación 1



Informe SM.2356-17

Igualmente, deben verificarse los emplazamientos de otras estaciones del modelo para garantizar que se encuentran más allá de las distancias mínimas especificadas respecto a líneas de alta tensión, líneas ferroviarias electrificadas, mástiles metálicos elevados, etc., en base a datos fiables sobre las características de dichos elementos. Si es necesario, las estaciones del modelo pueden desplazarse a otros emplazamientos que también deben ser optimizados en base a los cálculos de las correspondientes zonas de cobertura de comprobación técnica tal como se ha descrito.

El resultado de todas estas operaciones proporciona un modelo informático completo de la configuración de la SMN planificada que debe perfeccionarse mediante el análisis de los emplazamientos sobre el terreno.

3.3 Perfeccionamiento de los emplazamientos de las estaciones durante la inspección de los mismos y la adquisición de los terrenos

Todos los emplazamientos de estaciones de comprobación técnica identificadas por el modelo informático deben analizarse meticulosamente para garantizar que cumplen los criterios de protección de la Recomendación UIT-R SM.575-2 y la sección 2.6 del Manual de Comprobación Técnica del Espectro de la UIT (edición de 2011), y que es posible realizar los trabajos de construcción necesarios para crear la infraestructura. En relación con la infraestructura, el primer requisito es determinar la viabilidad del suministro de energía y de la construcción de accesos por carretera.

Si es absolutamente necesario pueden utilizarse carreteras no asfaltadas para acceder a estaciones distantes no atendidas instaladas en contenedores. En el caso de las estaciones atendidas, se necesitan terrenos amplios y carreteras asfaltadas, así como suministro eléctrico, agua y saneamientos. También debe valorarse la seguridad del emplazamiento durante las 24 horas, incluso para emplazamientos con contenedores, en cuyo caso debe existir una infraestructura vital mínima.

En el Anexo 1 del Manual de Comprobación Técnica del Espectro (edición 2011) de la UIT se describe una metodología de análisis de emplazamientos y de presentación de los resultados de la misma.

El examen de los emplazamientos puede revelar que, por diversos motivos, los emplazamientos seleccionados por el modelo informático no pueden ser utilizados en la práctica. Por ejemplo, puede ocurrir que no cumplan los criterios de protección frente a interferencias o influencias exógenas. Pueden no ser utilizables debido a dificultades para disponer de las infraestructuras necesarias, etc. No obstante, en la mayoría de los casos el problema más frecuente es simplemente la falta de terrenos adecuados en venta. La Recomendación UIT-R SM.1392-2 recoge diversas dificultades para encontrar emplazamientos adecuados. Naturalmente, el grado de dificultad varía de un país a otro en función de las condiciones sociales y económicas, la legislación y la reglamentación administrativa, etc.

Por este motivo, el proceso de examen de emplazamientos puede identificar potenciales emplazamientos que están disponibles y que son más adecuados en términos prácticos. Es entonces cuando deben realizarse los cálculos de las zonas de cobertura de comprobación técnica. Puede ocurrir que para mantener la cobertura de comprobación técnica con un nuevo emplazamiento deba, por ejemplo, aumentarse la altura de la antena, aceptar una cobertura reducida o tener que buscar otro emplazamiento.

Por tanto, la búsqueda de un emplazamiento no es, en la mayoría de los casos, un proceso que se ejecute en una sola etapa sino que, por el contrario, se ve sometido a varias reiteraciones. Ello también significa realizar iteraciones de cálculos de la cobertura de comprobación técnica, cuyos resultados son cruciales para la selección del mejor emplazamiento.

Puede resultar imposible encontrar un emplazamiento adecuado para una nueva estación de comprobación técnica cerca del emplazamiento deseado donde los niveles de interferencia estén por debajo de los requisitos establecidos en la sección 2.6 del Manual de Comprobación Técnica del Espectro de la UIT (edición 2011). En ese caso, deben considerarse emplazamientos en los que se minimice el nivel de la intensidad de campo de las señales interferentes (aunque exceden de 90 $\mu\text{V}/\text{m}$) y evitar la utilización de antenas con elementos activos (véase sección 2.6.1.4 del Manual).

Sólo cuando se han completado las fases de búsqueda, cálculo de cobertura y adquisición del emplazamiento puede considerarse finalizado el proceso de planificación de la SMN. Entonces pueden realizarse las licitaciones para la obra civil y la compra de equipos de comprobación técnica, de conformidad con las directrices del Anexo 1 del Manual de Comprobación Técnica del Espectro de la UIT (edición 2011).

Una vez que se ha planificado la SMN, pueden realizarse cálculos detallados de la cobertura de comprobación técnica para las distintas frecuencias (ya que la cobertura tiende a degradarse conforme aumenta la frecuencia) y para transmisores de prueba funcionando con distintos niveles de potencia y diferentes alturas de antena. Estos cálculos pueden utilizarse para elaborar un «atlas de cobertura de comprobación técnica» de la SMN que será su «huella de cobertura» técnica específica. El atlas indicará claramente las zonas sin cobertura con condiciones y parámetros específicos (frecuencia, potencia del transmisor de prueba, altura de la antena, etc.) que requieren un proceso de planificación más cuidadoso en relación con la utilización de estaciones de comprobación técnica móviles y transportables. Esto es especialmente importante en terrenos accidentados o montañosos.

Los resultados de estos cálculos finales también ayudan a optimizar la combinación estaciones fijas, transportables y móviles de la SMN. En general, cuantos menos emplazamientos existan con estaciones fijas, más estaciones móviles y transportables serán necesarias para mantener la eficacia requerida de la SMN en su conjunto. En zonas donde la SMN no disponga de cobertura con estaciones fijas (por ejemplo, cuando se utilizan las frecuencias más altas de la banda de frecuencias en ondas

decimétricas y existen depresiones del terreno), puede ser necesario utilizar estaciones transportables en las campañas de mediciones. Los emplazamientos óptimos para las estaciones transportables pueden determinarse mediante cálculos adecuados en una fase temprana. Además, en dichas zonas sin cobertura debe preverse la utilización de estaciones móviles durante periodos más largos.

3.4 Planificación de redes de comprobación técnica del espectro pequeñas y locales especiales

3.4.1 Planificación de redes de comprobación técnica del espectro pequeñas y para grandes ciudades

Hasta ahora se ha considerado el proceso de planificación y optimización de una SMN regional bastante grande. Si por el contrario, es necesario planificar u optimizar una SMN pequeña y aislada que conste de dos o más estaciones (no más de aproximadamente cinco), el procedimiento puede simplificarse bastante. En este caso, puede utilizarse inicialmente el modelo informático para situar estaciones virtuales en emplazamientos adecuados sin crear una red regular superpuesta y optimizar la red de comprobación técnica del espectro resultante empezando por la fase descrita en el § 3.2.2.3. En el Anexo 1 se muestran ejemplos prácticos de procedimientos de planificación de redes de comprobación técnica locales en un terreno relativamente llano.

En grandes ciudades, la radiogoniometría se complica notablemente debido a las reflexiones múltiples. Para mejorar la fiabilidad de la radiogoniometría y por tanto de la localización, y permitir la comprobación técnica de un gran número de transmisores y de otras fuentes de emisiones, las estaciones fijas en grandes ciudades están normalmente más próximas entre sí que en zonas rurales. Por este motivo, para la planificación de nuevas y mayores SMN o la optimización de SMN existentes en grandes ciudades, la fase descrita en § 3.2.2.2 puede iniciarse con la superposición de una red terciaria regular con distancias entre estaciones de 15 km en zonas de la ciudad o incluso mediante una red de cuarto orden con distancias entre estaciones de 7,5 km (véase la sección 6.8 del Manual de Comprobación Técnica del Espectro de la UIT, edición 2011).

El método alternativo para la planificación de SMN pequeñas y locales especiales se describe en la § 6 de este documento. En contraste con el método que utiliza una red regular, puede ser necesario realizar muchos más cálculos, por lo que es un método recomendable para la planificación de SMN relativamente pequeñas.

3.4.2 Planificación de una red de comprobación técnica del espectro en regiones montañosas y accidentadas

En regiones montañosas y accidentadas es posible aumentar significativamente la cobertura de comprobación técnica ubicando las estaciones fijas en elevaciones del terreno. Al mismo tiempo, en dichas zonas la cobertura de comprobación técnica puede ser mucho más sensible a la selección de los emplazamientos. También debe tenerse en cuenta la mayor posibilidad de que efectos debidos a reflexiones de las señales.

Todos estos aspectos se consideran detalladamente en el Anexo 2.

4 Planificación y optimización de redes de comprobación técnica del espectro TDOA

Los métodos de planificación para la cobertura generalizada de una gran zona mediante estaciones que implementan TDOA (de forma similar al método aplicado en una red regular para la planificación de estaciones que implementan AOA, presentado en § 3) están en constante evolución. En el sección 4.7.3.2 del Manual de Comprobación Técnica del Espectro (edición de 2011) y en el Informe UIT-R SM.2211-1 se hacen algunas propuestas a este respecto.

5 Planificación de redes híbridas de comprobación técnica

La planificación de redes híbridas de comprobación técnica de las emisiones que implementan AOA/TDOA se basa en los principios y consideraciones descritas en § 3 y 4 anteriores para redes AOA y TDOA. La utilización de redes de comprobación técnica de las emisiones, sistemas de radiogoniometría y TDOA con capacidad para implementar técnicas híbridas en equipos que cumplen o mejoran los requisitos de las Recomendaciones UIT-R sobre sensibilidad, estabilidad y precisión permite obtener beneficios significativos. En comparación con las redes basadas exclusivamente en AOA o en TDOA, las redes híbridas AOA/TDOA permiten, en teoría, cubrir grandes zonas con un número menor de estaciones y, al mismo tiempo, proporcionar una localización geográfica de mayor precisión, dentro y fuera de la zona que rodea a las estaciones de comprobación técnica del espectro.

5.1 Comparación de métodos de geolocalización

Para una toma de decisiones fundamentada sobre el método más adecuado a la vista de los requisitos de una determinada zona de cobertura, es importante entender cabalmente las fortalezas y debilidades de los distintos métodos de geolocalización. En el Informe UIT-R SM.2211-1 se comparan detalladamente los métodos de geolocalización AOA, TDOA e híbrido AOA/TDOA. En dicho Informe se incluye un cuadro resumen de las principales características de los tres métodos de geolocalización.

5.2 Simulación de la cobertura y precisión de la geolocalización

Con el fin de comparar sus prestaciones en términos de cobertura y precisión de la geolocalización,² se han hecho simulaciones de los distintos sistemas de comprobación técnica del espectro, incluidos AOA, TDOA y el sistema híbrido AOA/TDOA. El análisis se ha realizado con una herramienta software que combina los cálculos de geolocalización con la capacidad de escucha de la señal objetivo en distintas estaciones consideradas, en base a la potencia del transmisor y los efectos de la propagación de la señal utilizando una representación en 3D del terreno. La precisión de la geolocalización se ha evaluado utilizando la técnica «*miss distance*» (precisión máxima de localización). El análisis se realizó para diversas condiciones, tales como el número de estaciones de la red de comprobación técnica del espectro, una potencia variable de los transmisores entre 1 W y 100 W con diferentes condiciones de propagación y distintas técnicas de localización geográfica. En relación con la zona de cobertura deseada se incluye tanto la zona interior delimitada por las estaciones como la zona exterior a la misma.

En base a los requisitos de cobertura y las condiciones operacionales simuladas (véase el Informe UIT-R SM.2211-1), la utilización de técnicas híbridas AOA/TDOA muestra una mayor precisión en una zona de cobertura más extensa para los casos de tres y de cuatro estaciones. Un sistema con estaciones TDOA ofrece una buena precisión en la zona interior delimitada por los emplazamientos TDOA, aunque la precisión de la geolocalización se degrada rápidamente fuera de dicha zona. En el ejemplo simulado, una red híbrida AOA/TDOA aúna las ventajas de la zona de cobertura más amplia que ofrecen de las estaciones AOA (para un número dado de estaciones) con la menor complejidad de equipo y antena de una estación TDOA.

² El modelo de propagación utilizado en la simulación es el modelo TIREM (*Terrain Integrated Rough Earth Model*) (véase el Manual de la UIT sobre Gestión Nacional del Espectro).

5.3 Resumen de la calidad de funcionamiento de un sistema híbrido

Es previsible que una solución de geolocalización híbrida AOA/TDOA requiera menos estaciones que una solución basada exclusivamente en TDOA para conseguir la misma o mejor cobertura y precisión y satisfacer los requisitos habituales para la cobertura de zonas amplias. La solución híbrida combina los beneficios de los sistemas AOA (mejores prestaciones con señales de banda estrecha, cobertura de zonas amplias, etc.) con las ventajas de los sistemas TDOA (instalación y requisitos de antena más sencillos, rechazo de ruido no correlado, etc.).³ Por tanto, en algunos casos una red híbrida AOA/TDOA puede tener costes de instalación menores y costes recurrentes también menores para una zona de cobertura dada durante la vida útil de la red.

6 Método generalizado de planificación de redes de comprobación técnica del espectro pequeñas y locales especiales

A la hora de planificar una red de estaciones de comprobación técnica de las emisiones debe decidirse en primer lugar sus objetivos operacionales. Las tareas de escucha y/o de medición de características de las señales radioeléctricas pueden requerir, en algunos casos, una única estación de comprobación técnica, a diferencia las redes AOA (que como mínimo requieren dos estaciones) o las redes TDOA (como mínimo tres estaciones). La zona de cobertura de las estaciones de comprobación técnica en cada uno de esos casos se define mediante el valor de la intensidad de campo mínima requerida.

Por tanto, si se asume que la futura SMN tiene que realizar determinadas tareas, la planificación de la red debe tener en cuenta en primer lugar aquella cuya resolución requiera una intensidad de campo mínima más elevada y posteriormente el resto de ellas en orden descendente:

- 1) radiogoniometría y estimación de la posición del emisor (20 dB(μ V/m)) de conformidad con el Manual de Comprobación Técnica del Espectro de la UIT;
- 2) medición de parámetros de señales radioeléctricas (12 dB(μ V/m)) de conformidad con el Manual de Comprobación Técnica del Espectro de la UIT;
- 3) escucha de señales (0 dB(μ V/m)) de conformidad con el Manual de Comprobación Técnica del Espectro de la UIT.

Esta secuencia de actuaciones permitirá la cobertura de la zona de búsqueda con el menor número posible de estaciones de comprobación técnica y evitar dedicar recursos financieros innecesariamente.

En la fase preparatoria deberán resolverse todas las cuestiones planteadas en la § 2 anterior, incluida la definición del territorio objetivo de la comprobación técnica, la elección del método de cálculo de la propagación de las señales radioeléctricas, la determinación del máximo valor posible de la incertidumbre de localización del emisor (para la planificación AOA/TDOA), el cálculo del valor de la intensidad de campo mínima en los límites de la zona, la identificación de las zonas en las que no es recomendable situar estaciones de comprobación técnica, etc.

Los términos y definiciones siguientes se utilizan en el método que se describe más adelante:

«**enlace AOA**» – dos estaciones de comprobación técnica que pueden utilizarse para determinar la posición del emisor con una incertidumbre de posición predeterminada de las SMN AOA.

«**enlace TDOA**» – tres estaciones de comprobación técnica que pueden utilizarse para determinar la posición del emisor con una incertidumbre de posición predeterminada de las SMN TDOA.

³ En la § 3 del Informe UIT-R SM.2211-1 puede encontrarse una descripción más completa.

Transmisor en prueba «cubierto» – transmisor de prueba cuya intensidad de campo en el emplazamiento de la estación de comprobación técnica es mayor que el valor umbral (mínima intensidad de campo requerida) y cuyo error de posicionamiento (posición del emisor determinada por las estaciones de comprobación técnica AOA/TDOA) no supera el valor predefinido de la incertidumbre máxima de localización.

Valoración de un emplazamiento de estación de comprobación técnica – número de transmisores de prueba en la zona de estudio que observa la estación de comprobación técnica instalada en el emplazamiento;

Valoración de un «enlace AOA» – número de transmisores de prueba en la zona de estudio que puede detectar el «enlace AOA»;

Valoración de un «enlace TDOA» – número de transmisores de prueba en la zona de estudio que puede detectar el «enlace TDOA».

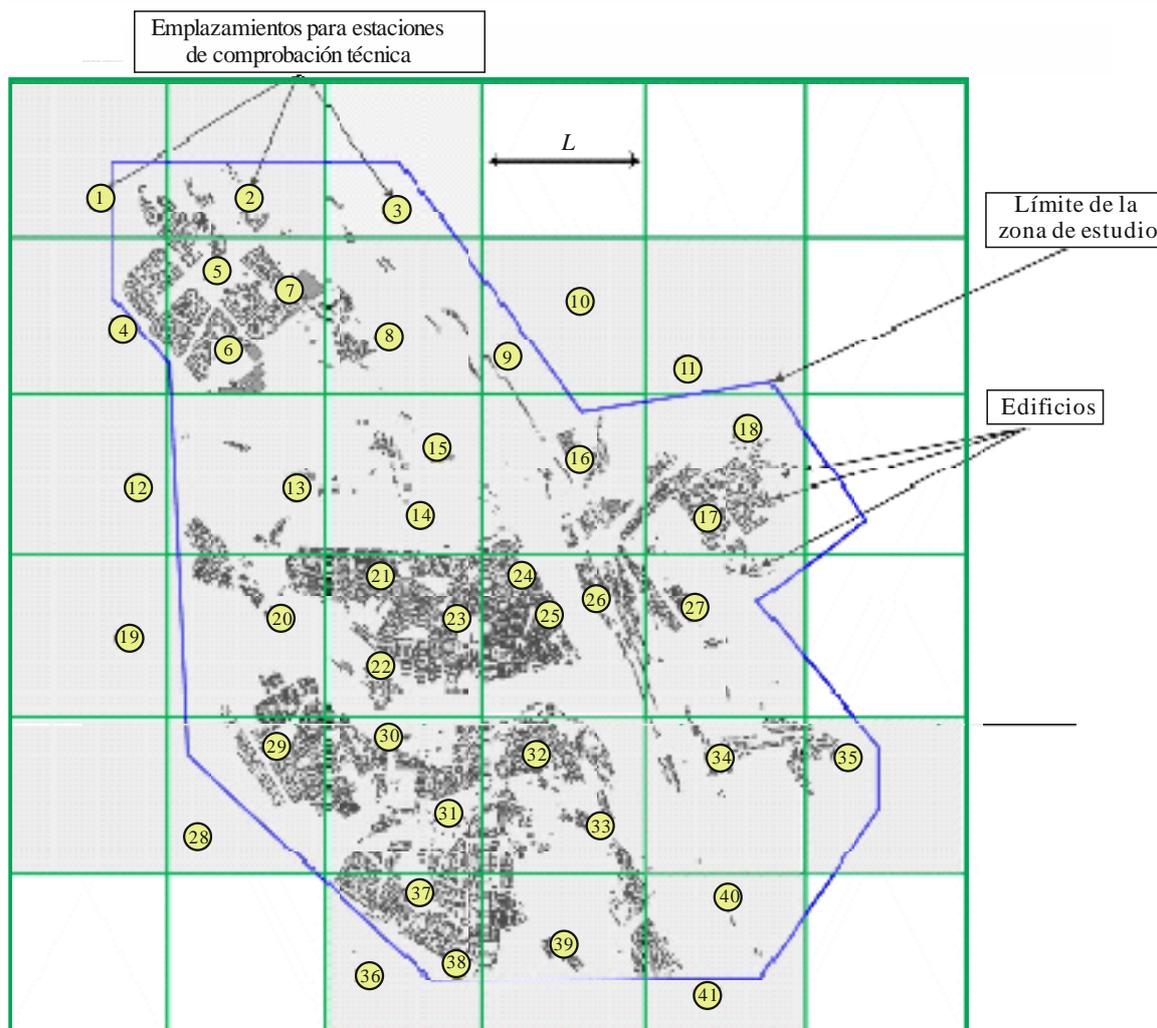
6.1 Elaboración de modelos informáticos para redes de comprobación técnica del espectro pequeñas y locales especiales

Paso 1: Selección de posibles emplazamientos para las estaciones de comprobación técnica

Una vez que se ha identificado el territorio objetivo, se seleccionan emplazamientos para las futuras estaciones de comprobación técnica. A tal fin se superpone sobre la zona objetivo y zonas adyacentes una rejilla con pasos de $L = 0.5 \dots 5$ km. Cuanto menor sea el paso de la rejilla mejores resultados podrán obtenerse, pero ello depende de los recursos de cálculo disponibles.

En cada celda de la rejilla se selecciona al menos un emplazamiento potencialmente utilizable para una estación de comprobación técnica (en algunas celdas pueden seleccionarse varios emplazamientos). Por ejemplo, en zonas urbanas puede tratarse del tejado de un edificio alto, pero en zonas rurales puede tratarse de un lugar próximo a una carretera o con las infraestructuras necesarias (Fig. 18).

FIGURA 18
 Selección de posibles emplazamientos para las estaciones de comprobación técnica



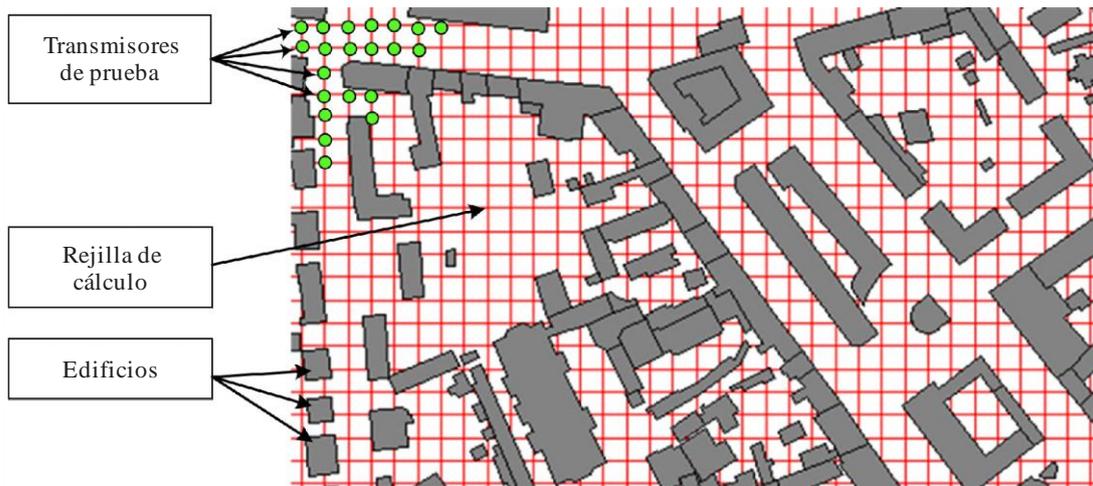
Informe SM.2356-18

Paso 2: Aplicación de una «rejilla de cálculo»

Se superpone una «rejilla de cálculo» dentro de los límites de la zona de cobertura de la comprobación técnica. El paso de la «rejilla de cálculo» no debe ser grande en comparación con otros objetos presentes. Por ejemplo, para planificar las redes de comprobación técnica del espectro en zonas urbanas el paso de «rejilla de cálculo» puede ser de 5 ... 50 m. Los transmisores de prueba se sitúan en los nodos de esta rejilla, y la p.i.r.e., altura media y otras características de los mismos corresponderán con las características de las estaciones radioeléctricas reales que se suponen bajo control (Fig. 19).

FIGURA 19

Aplicación de una «rejilla de cálculo»
(en el caso de emisores en exteriores)



Informe SM.2356-1'

Paso 3: Realización de los cálculos

Se calcula el área de servicio para todos los emplazamientos seleccionados. Si la zona en estudio está parcialmente cubierta por una red de comprobación técnica existente que deberá ser actualizada, todos los cálculos adicionales se hacen teniendo en cuenta la cobertura de las estaciones con sus características actualizadas. La zona de cobertura de cada estación de comprobación técnica se define en función de las siguientes condiciones:

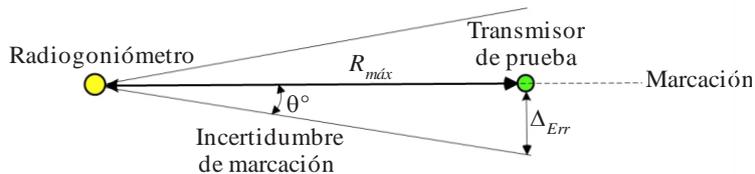
- la distancia máxima ($R_{m\acute{a}x_loc}$) desde cada estación de comprobación técnica a un transmisor de prueba se define mediante la fórmula siguiente (solo para la planificación de una red de comprobación técnica del espectro AOA, véase la Fig. 20):

$$R_{m\acute{a}x} = \text{incertidumbre máxima de localización } (\Delta_{Err}) / \text{tangente (incertidumbre de marcación } (\theta^\circ));$$

- la intensidad de campo calculada en los emplazamientos seleccionados de las estaciones de comprobación técnica debe ser mayor que la intensidad de campo mínima requerida (Fig. 21).

FIGURA 20

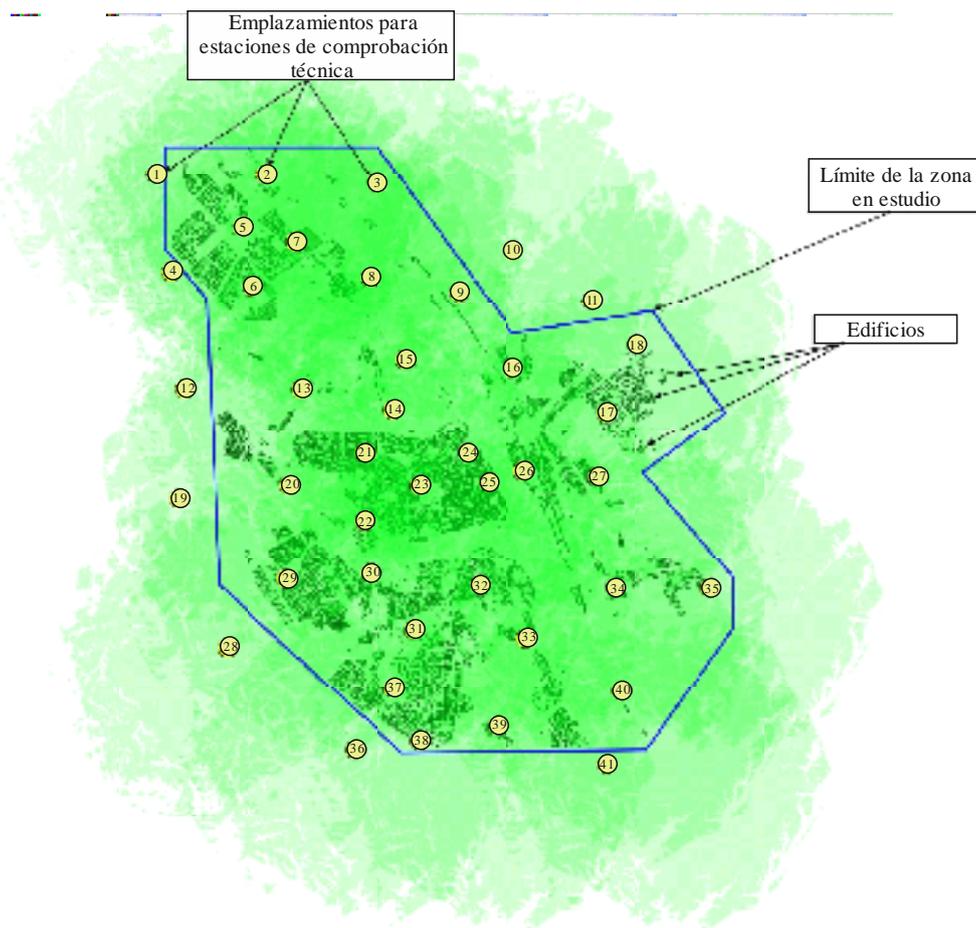
Ejemplo de la definición de distancia máxima desde una estación de comprobación técnica a un transmisor de prueba
(solo para la planificación de redes de comprobación técnica AOA)



Informe SM.2356-20

FIGURA 21

**Zonas de cobertura de emplazamientos seleccionados
para estaciones de comprobación técnica**



Report SM.2356-21

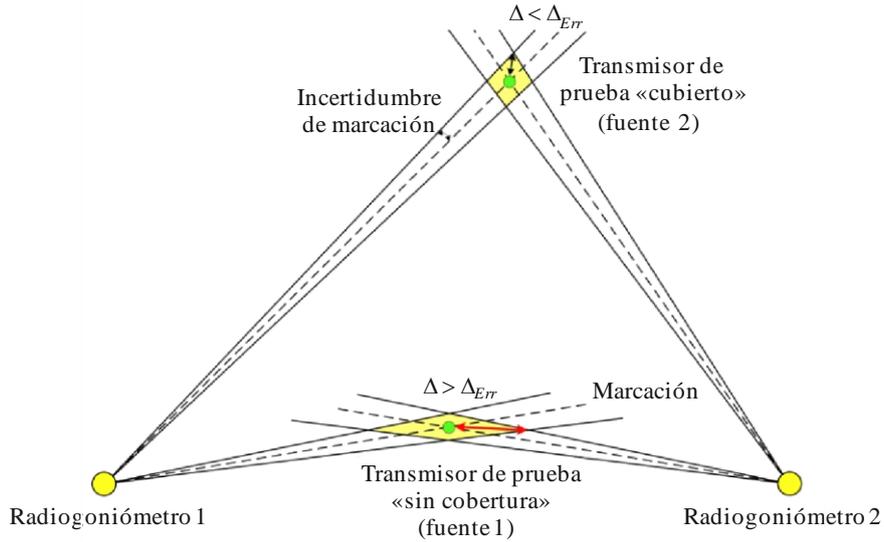
Paso 4: Elaboración del diagrama de «enlaces AOA/TDOA» y selección de referencias para las estaciones de comprobación técnica

Planificación de SMN AOA

Para la planificación de redes de comprobación técnica del espectro AOA es necesario que cada transmisor de prueba esté cubierto por al menos dos estaciones de comprobación técnica. Por tanto, la zona de cobertura común de cada pareja de estaciones de comprobación técnica viene determinada por el área en la que la incertidumbre de localización no supera el valor predefinido de incertidumbre máxima de localización ((Δ_{Err}) , véase la Fig. 22).

FIGURA 22

Ejemplo de determinación de la zona de cobertura mediante dos estaciones AOA



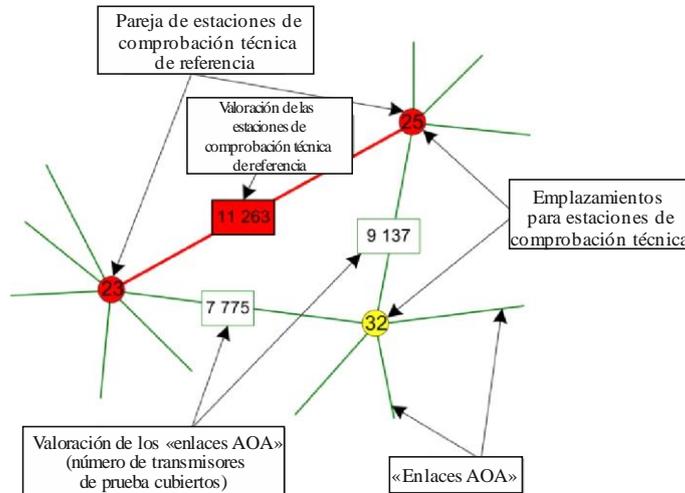
Informe SM.2356-2

La valoración del «enlace AOA» (pareja de estaciones de comprobación técnica) es el número de transmisores de prueba que se encuentran en la zona de cobertura. Una vez calculadas las valoraciones de todos los «enlaces AOA» puede elaborarse un diagrama de «enlaces AOA».

Entre todas las parejas de estaciones AOA se elige la que tiene la valoración más alta (con la cobertura más amplia dentro de la zona de estudio). Si es necesario, se hace un análisis adicional de los emplazamientos de futuras estaciones de comprobación técnica. La pareja de estaciones de comprobación técnica con la mayor valoración es la pareja de referencia (Fig. 23).

FIGURA 23

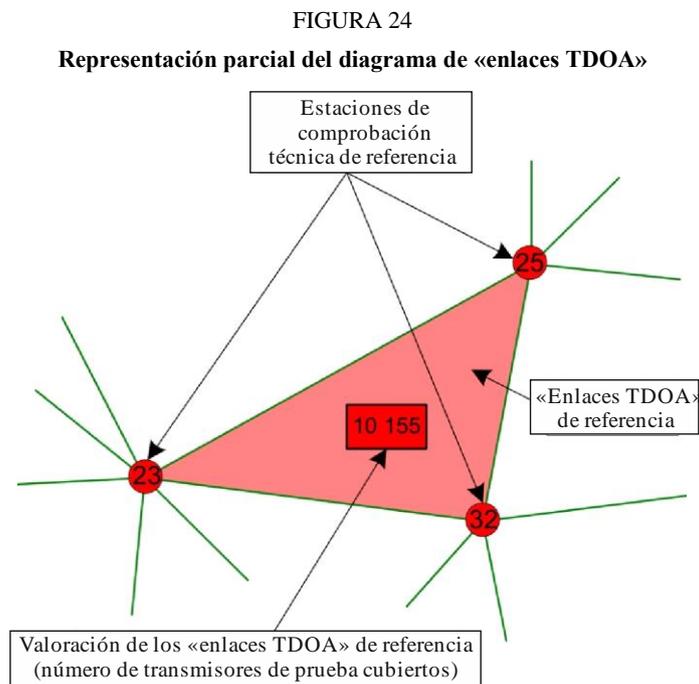
Representación parcial del diagrama de «enlaces AOA»



Informe SM.2356-2

Planificación una SMN TDOA

Para la planificación de estaciones TDOA se aplica un procedimiento similar, salvo que, en ese caso, cada transmisor de prueba debe quedar cubierto por al menos tres estaciones de comprobación técnica (Fig. 24).



Informe SM 2356-24

Planificación de SMN para la escucha y medición de parámetros de señales radioeléctricas

Para la planificación de SMN para la escucha y medición de parámetros de señales radioeléctricas debe seleccionarse la estación con la mayor cobertura dentro de la zona objeto de estudio (que tenga la máxima valoración). Si es necesario, se examina el emplazamiento de la futura estación.

Paso 5: Definición de la zona sin cobertura

Después de determinar la ubicación de las estaciones de comprobación técnica, sus áreas de cobertura se sustraen de la zona objeto de estudio. Debe observarse que tras esta iteración se modifican las valoraciones de los restantes emplazamientos para estaciones de comprobación técnica, es decir las valoraciones de los restantes «enlaces TDOA».

Paso 6: Selección de emplazamientos para nuevas estaciones de comprobación técnica

Se hace un análisis de la región que queda sin cobertura en la zona en estudio. Deben responderse las preguntas siguientes: ¿Puede cubrirse la región con estaciones móviles? ¿Es necesaria la planificación de estaciones de comprobación técnica fijas adicionales? Si ese es el caso, se selecciona el emplazamiento o emplazamientos de estaciones de comprobación técnica con la siguiente mayor valoración para la región sin cobertura de la zona objeto de estudio.

Planificación de SMN AOA

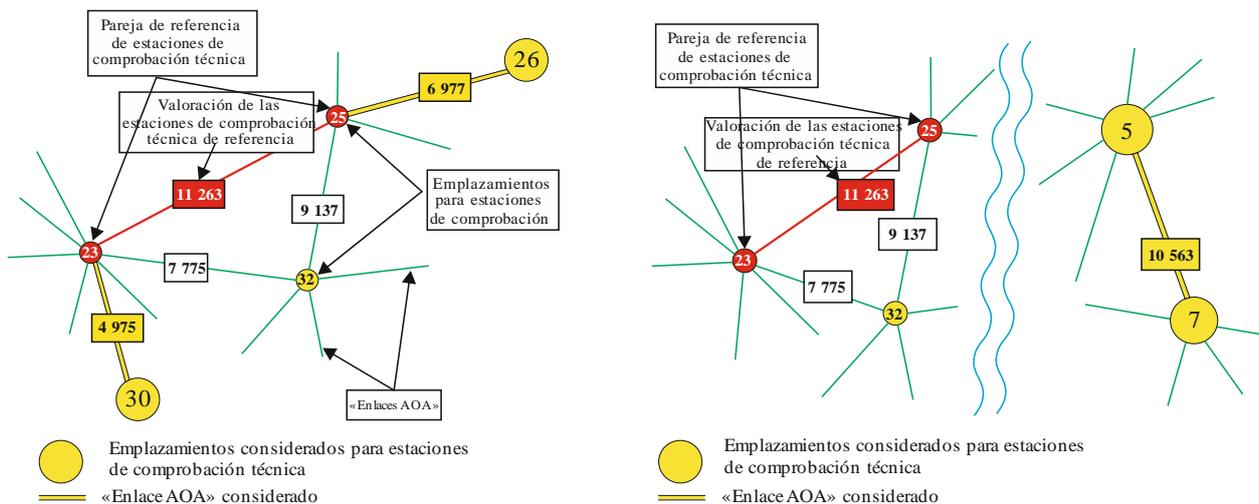
En caso de planificación de redes de comprobación técnica del espectro AOA debe identificarse la pareja de estaciones con la siguiente mayor valoración. Si dicha pareja no es adyacente a la «pareja de referencia», debe determinarse si se incrementa a cuatro el número de estaciones de la cadena de la «pareja de referencia», de forma que la valoración de dicha cadena sea mayor que la valoración total de los dos «enlaces AOA» considerados de forma independiente. Se selecciona la variante con la mayor valoración (Fig. 25). Obsérvese lo siguiente:

$$\text{Valoración } (S_{30-23} - S_{23-25} - S_{25-26}) = \text{Valoración } (S_{30-23} \cup S_{23-25} \cup S_{25-26});$$

$$\text{Valoración } (S_{30-23} - S_{23-25} - S_{25-26}) \neq \text{Valoración } (S_{30-23}) + \text{Valoración } (S_{23-25}) + \text{Valoración } (S_{25-26})$$

FIGURA 25

Ejemplo de selección de emplazamientos para estaciones de comprobación técnica (parte del diagrama de los «enlaces AOA»)

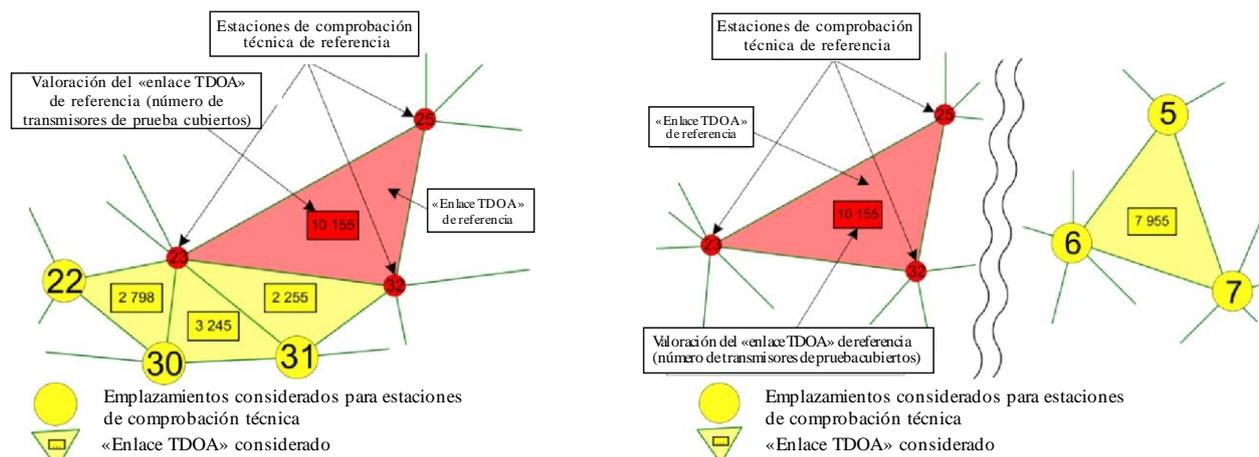


Planificación de SMN TDOA

Para la planificación de estaciones TDOA se sigue un procedimiento similar. Debe elegirse el «enlace TDOA» con la siguiente mayor valoración. Si dichas estaciones no son adyacentes a las «estaciones de referencia», debe determinarse si se aumenta la cadena de «estaciones de referencia», para que la valoración de dicha cadena sea superior a la valoración total de los enlaces TDOA considerados de forma aislada. Se selecciona entonces el caso que presente la mayor valoración (Fig. 26).

FIGURA 26

**Ejemplo de selección de emplazamientos para estaciones de comprobación técnica
(parte del diagrama de «enlaces TDOA»)**



Informe SM.2356-26

Planificación de SMN para la escucha y medición de parámetros de señales radioeléctricas

En caso de planificación de redes de comprobación técnica del espectro para la escucha y medición de parámetros de señales radioeléctricas, se analiza la zona objeto de estudio sin cobertura y se selecciona la estación con la siguiente valoración más alta (con la mayor zona de cobertura en la zona objeto de estudio sin cobertura).

Paso 7: Realización de nuevas iteraciones

Si es necesario, se repiten los pasos 5, 6 y 7.

7 Conclusión

El proceso de planificación de nuevas redes de comprobación técnica del espectro (SMN) y de optimización de las existentes en términos de la cobertura para comprobación técnica es una tarea bastante compleja que exige la toma de algunas decisiones administrativas en varias de sus fases. El proceso puede requerir un plazo de ejecución bastante prolongado, particularmente en lo que se refiere a la adquisición de los terrenos necesarios para la construcción de las estaciones fijas, ya que cada emplazamiento potencial debe ser examinado en términos de conveniencia y cobertura. Puede ser necesario repetir el procedimiento para encontrar emplazamientos disponibles que satisfagan los requisitos en la mayor medida posible.

Es necesario realizar cálculos de cobertura relativos a la comprobación técnica en prácticamente todas las fases de la planificación y optimización de una red de comprobación técnica del espectro. Dichos cálculos juegan un papel crucial en el proceso, tal como se refleja claramente en la Recomendación UIT-R SM.1392-2. Ese es especialmente el caso de los cálculos de la plantilla de cobertura de localización (LCT), ya que ese parámetro es, como se ha comprobado, el mejor indicador de la calidad de la red de comprobación técnica del espectro en su conjunto y de sus partes individuales.

Anexo 1

Ejemplo práctico de planificación de una red de comprobación técnica del espectro AOA local en un terreno relativamente llano

A1-1 Introducción

La eficiencia operativa de un servicio nacional de comprobación técnica del espectro es función de varios factores, de los que cabe señalar los siguientes como más importantes:

- la estructura de la red de comprobación técnica del espectro;
- el número de estaciones de comprobación técnica del espectro y equipos de comprobación técnica utilizados y sus capacidades operativas.

La estructura de la red de comprobación técnica del espectro viene determinada por las tareas del servicio de comprobación técnica del espectro, la banda de frecuencias de trabajo y la distribución de los transmisores radioeléctricos en la zona bajo responsabilidad del servicio.

En la mayoría de los casos, la banda de frecuencias de trabajo de las redes fijas de comprobación técnica del espectro están limitadas como máximo a 3 000 MHz y la de las redes fijas de radiogoniometría como máximo a 1 000 MHz.

La zona de cobertura agregada de una red de comprobación técnica del espectro se forma mediante la agregación de las zonas de cobertura de todas las estaciones fijas de comprobación técnica.

La zona agregada de una red de radiogoniometría o de una agrupación de radiogoniómetros se forma mediante la agregación de las zonas de radiogoniometría de todos los radiogoniómetros de la red.

La zona agregada de localización es la intersección de las zonas de radiogoniometría de un mínimo de dos radiogoniómetros fijos.

La zona de cobertura de una estación de comprobación técnica fija y la zona de radiogoniometría de un único radiogoniómetro pueden calcularse utilizando el método que figura en la última versión de la Recomendación UIT-R P.1546 o en condiciones de espacio libre, o bien, puede medirse en la práctica.

Los datos iniciales necesarios para la comparación entre zonas de cobertura de radiogoniometría son valores típicos de sensibilidad (valor umbral de intensidad de campo) de los receptores de radiogoniometría y de los receptores de estaciones de comprobación técnica para distintos modos de funcionamiento, potencia de salida típica del transmisor, altura típica de la antena de la estación de comprobación técnica y altura de la antena del transmisor, tal como se recoge en el Manual de Comprobación Técnica del Espectro de la UIT.

A1-2 Datos iniciales para la planificación de la topología de la red de comprobación técnica del espectro

En la práctica se utilizan principalmente dos enfoques para la planificación de la red de comprobación técnica del espectro fija:

- cubrir la mayor cantidad de territorio posible mediante el menor número de estaciones fijas de comprobación técnica;
- cubrir mediante la comprobación técnica el mayor número de transmisores radioeléctricos utilizando el menor número de estaciones fijas de comprobación técnica.

El primer enfoque se describe en la sección 6.8 del Manual de Comprobación Técnica del Espectro de la UIT (edición de 2011) y se basa en la utilización de una red con una estructura regular de radiogoniómetros situados en los vértices de triángulos regulares. Sin embargo, este método no ofrece el número mínimo de radiogoniómetros (o estaciones fijas de comprobación técnica). En el cálculo de la zona de radiogoniometría que optimiza la eficiencia de la red de comprobación técnica del espectro debe tenerse en cuenta el terreno.

El segundo enfoque realiza simulaciones previas con distintas topologías de red fija de comprobación técnica. En este caso de planificación de la topología del sistema de comprobación técnica del espectro deben tenerse en cuenta tres factores:

- la distribución de los transmisores en la zona de responsabilidad;
- las condiciones de propagación en las diversas bandas de frecuencia;
- el método de multiplexación utilizado en algunas tecnologías de radiocomunicaciones.

El método de multiplexación determina la capacidad potencial de la red de radiogoniometría para localizar los transmisores de señales radioeléctricas.

A1-3 Optimización de la topología más sencilla de una red de comprobación técnica del espectro

La red de radiogoniometría más sencilla consta de dos radiogoniómetros situados a una distancia entre sí de unos 8-10 km. Desafortunadamente dicha estructura puede tener zonas «ciegas», es decir, zonas donde la red de radiogoniometría no puede localizar transmisores con la precisión necesaria o sencillamente no puede hacer localización alguna.

Por ejemplo, en la Fig. A1-1 se muestran dos casos de emplazamientos de dos radiogoniómetros en Lvov (Ucrania). Los emplazamientos de los transmisores en ondas decimétricas en la banda de 400 MHz se etiquetan con iconos verdes y rosas, y los radiogoniómetros se representan con pequeños triángulos negros. Los bordes de las zonas de radiogoniometría calculadas para condiciones de espacio libre se señalan con línea roja, y la zona de localización agregada mediante línea azul.

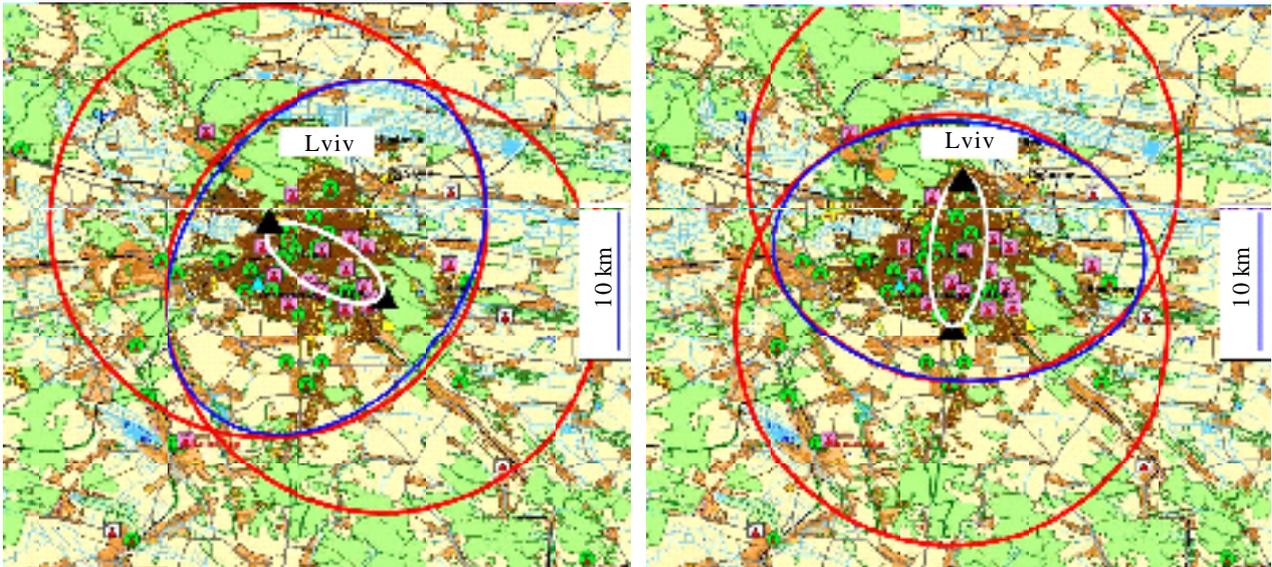
Si los dos radiogoniómetros se sitúan en lados opuestos de la configuración geométrica de la zona, la zona de cobertura agregada abarca algunos de los transmisores, quedando otros en la zona «ciega» (cuyo borde se señala con línea blanca en la Fig. A1-1). En este caso, se trata de aproximadamente el 30% del total de transmisores.

En la práctica, existen dos formas para eliminar la zona «ciega»:

- utilizar un tercer radiogoniómetro;
- optimizar la ubicación de los radiogoniómetros.

FIGURA A1-1

Ejemplos de posibles emplazamientos de dos radiogoniómetros

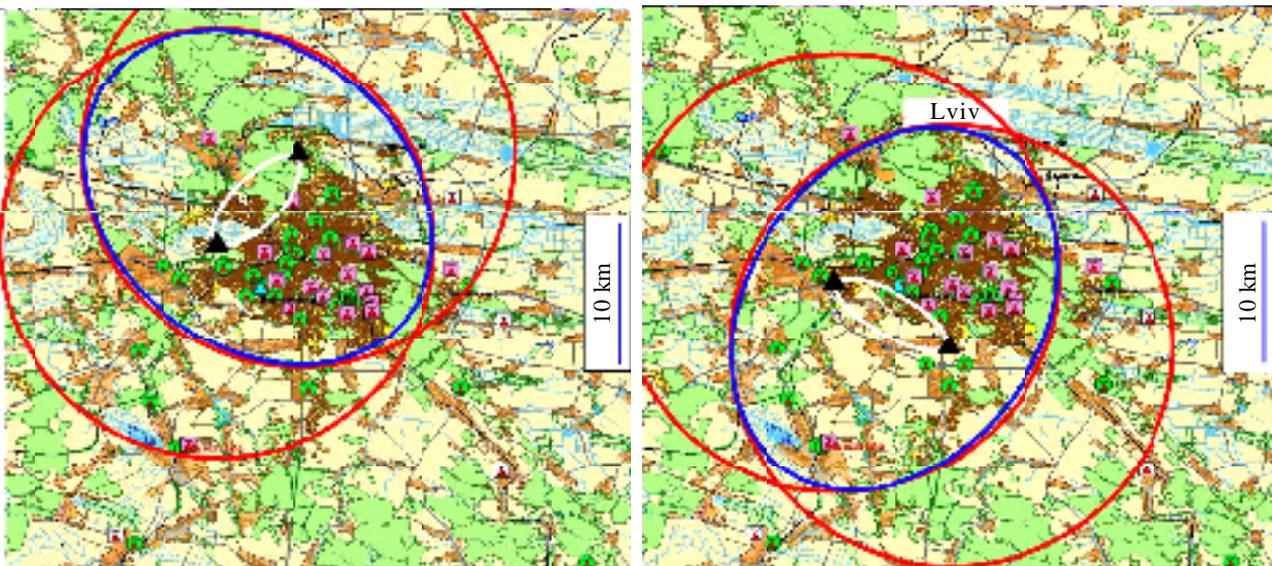


Informe SM.2356-A1-01

La segunda solución se basa en la utilización de sólo dos radiogoniómetros. En la Fig. A1-2 se muestran sendas variantes del emplazamiento de los radiogoniómetros. En estos casos, la zona de localización agregada abarca todos los transmisores, sin que exista una zona «ciega».

FIGURA A1-2

Ejemplos alternativos de ubicación de dos radiogoniómetros en Lviv



Informe SM.2356-A1-02

La topología de la red de localización más sencilla, que consta de dos radiogoniómetros, es óptima si éstos se sitúan a una distancia de unos 8-10 km entre sí y cerca de la periferia de la ciudad. Dicha configuración de radiogoniómetros permite minimizar el número de transmisores que pueden quedar en una zona «ciega».

A1-4 Topología regular de red de comprobación técnica del espectro de grandes dimensiones

El número de radiogoniómetros necesarios para realizar la comprobación técnica del espectro y la localización de emisores en un territorio extenso es muy elevado.

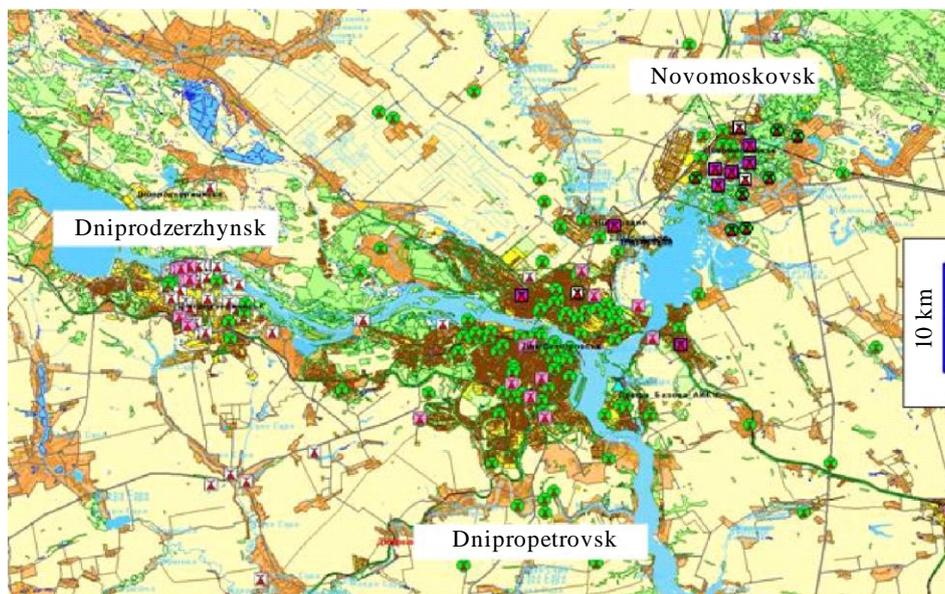
En la Fig. A1-3 se muestra la distribución de los transmisores radioeléctricos (estaciones base de un sistema de concentración de enlaces (*trunking*) y transmisores en ondas decimétricas) en la banda de frecuencias de 400 MHz en Dnipropetrovsk y las ciudades circundantes de Dniprodzerzhinsk y Novomoskovsk (Ucrania). Los emplazamientos de los transmisores se señalan con iconos de colores verde y rosa.

Las Figs. A1-4 y A1-5 muestran dos ejemplos de topologías diferentes calculadas para una red hipotética de radiogoniómetros y de localización que cubre los transmisores existentes en el territorio indicado con una estructura de red regular.

En la red de la Fig. A1-4 se incluyen ocho radiogoniómetros que cubren el 100% de la zona de interés y que permiten la detección y medición de parámetros de las frecuencias utilizadas por aproximadamente el 99% de los transmisores, pero que sólo permite la localización de menos del 87% de los mismos.

FIGURA A1-3

Distribución de las estaciones base del sistema de concentración y de los transmisores en ondas decimétricas en la banda de 400 MHz



Informe SM.2356-A1-03

La red que se muestra en la Fig. A1-5 cubre el 100% de la zona de interés y permite la detección, medición de parámetros de las frecuencias y localización de aproximadamente el 99% de los transmisores. Para ello se requiere un mínimo de siete radiogoniómetros.

FIGURA A1-4

Red hipotética regular de radiogoniómetros y localización (variante 1)



Informe SM.2356-A1-04

FIGURA A1-5

Red hipotética regular de radiogoniómetros y localización (variante 2)



Informe SM.2356-A1-05

A1-5 Estructura irregular de topología de red de comprobación técnica del espectro

La topología de una red de radiogoniómetros de gran tamaño se basa en una estructura irregular y se determina «paso a paso» en base a dos criterios:

- cubrir mediante radiogoniometría el mayor número posible de transmisores radioeléctricos utilizando el menor número posible de estaciones fijas de comprobación técnica;
- minimizar el número de transmisores radioeléctricos en la zona «ciega» entre los dos radiogoniómetros más próximos entre sí.

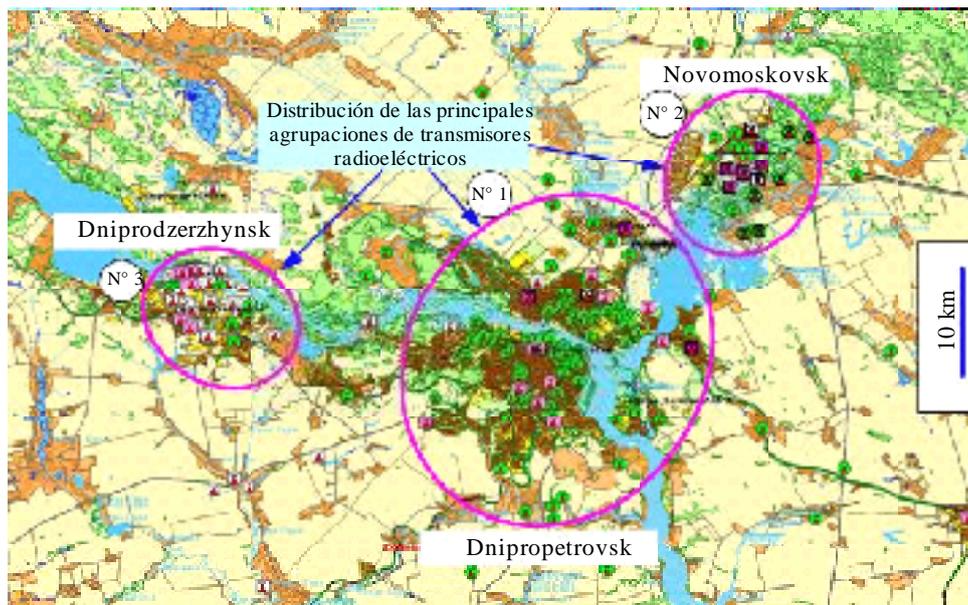
Paso 1: Se determina la distribución de los transmisores radioeléctricos en la zona de interés. En la Fig. A1-3 se muestra la distribución de los transmisores radioeléctricos en ondas métricas y decimétricas en el territorio de Dnipropetrovsk y en las ciudades circundantes de Dniprodzerzhynsk y Novomoskovsk.

Paso 2: Se identifican grandes agrupaciones de transmisores radioeléctricos en la zona de interés.

En la Fig. A1-6 se muestran, rodeados por elipses de trazo rosa, tres grandes agrupaciones de estaciones base de sistemas de concentración de enlaces y de transmisores en ondas métricas en la banda de 400 MHz.

FIGURA A1-6

Principales agrupaciones de transmisores en la banda de frecuencias de 400 MHz



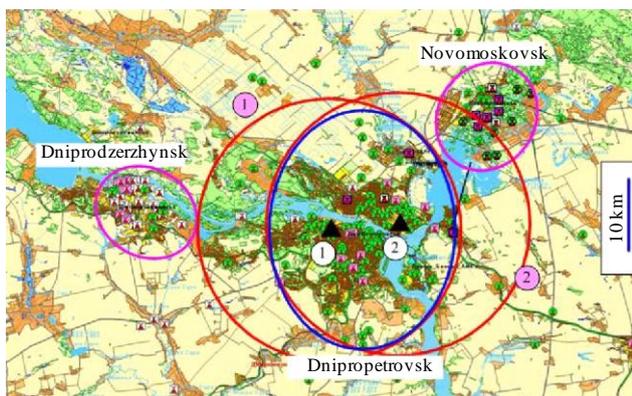
Informe SM.2356-A1-06

Paso 3: Simulación de la topología preliminar del sistema de comprobación técnica del espectro.

La topología de la red de comprobación técnica del espectro se determina utilizando un procedimiento iterativo. La primera propuesta, y obvia, es generar una zona de localización para la agrupación N° 1 mediante el despliegue de dos radiogoniómetros (Fig. A1-7).

FIGURA A1-7

Primera variante de la topología de la red de comprobación técnica del espectro



Informe SM.2356-A1-07

FIGURA A1-8

Zona de localización agregada de la red de comprobación técnica del espectro



Informe SM.2356-A1-08

Sin embargo, para establecer en este caso el emplazamiento de los transmisores en las agrupaciones N° 2 y N° 3, es necesario desplegar dos parejas de radiogoniómetros adicionales (Fig. A1-8). La zona de localización agregada de esta red de comprobación técnica del espectro se marca con una línea de trazo azul.

Paso 4: Optimización de la topología de la red de comprobación técnica del espectro.

Utilizando la estructura irregular es posible minimizar el número de radiogoniómetros y, al mismo tiempo, optimizar la topología de la red de comprobación técnica del espectro.

En esta primera fase de modelización de la red de localización, se utilizan tres radiogoniómetros (1, 2 y 3) para crear la zona de localización de la agrupación N° 2 de transmisores y la mayor parte de la agrupación N° 3 de transmisores (Fig. A1-9).

En la segunda fase, la zona de localización se amplía al incorporar los radiogoniómetros 4 y 5 (Fig. A1-10). La zona de localización agregada se muestra con una línea azul.

FIGURA A1-9

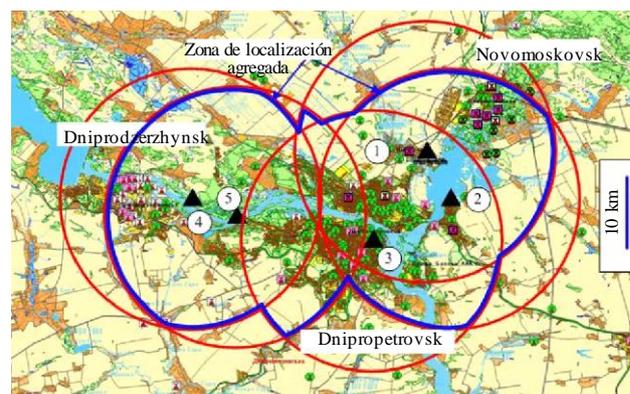
Primer paso de la modelización de una topología irregular de red de comprobación técnica del espectro



Informe SM.2356-A1-09

FIGURA A1-10

Segundo paso de la modelización de una topología irregular de red de comprobación técnica del espectro



Informe SM.2356-A1-10

Para obtener la zona de cobertura predeterminada pueden añadirse varios radiogoniómetros aplicando el criterio descrito.

La topología de esta subred local de radiogoniómetros y de localización en Dnipropetrovsk, Dniprodzerzhinsk y Novomoskovsk se determinó sobre la base de los resultados de la simulación. La subred incluye cinco radiogoniómetros y cubre aproximadamente el 100% de los transmisores en ondas métricas y el 99% de la zona objetivo. Tampoco existe ninguna zona «ciega» en la subred local, incluidas posibles zonas «ciegas» entre los radiogoniómetros fijos 4 y 5.

Durante la planificación es posible optimizar la estructura irregular de la red de radiogoniómetros y de localización a fin de cubrir más transmisores utilizando el menor número posible de radiogoniómetros fijos.

Anexo 2

Planificación de una red de comprobación técnica del espectro AOA en regiones montañosas y de relieve ondulado

A2-1 Preámbulo

Es bien sabido que la zona de cobertura de las estaciones de comprobación técnica es mayor con alturas de antena superiores. No obstante, cualquier aumento significativo de la altura física del mástil de una antena debe hacer frente a dificultades técnicas y a un coste económico adicional considerable. Por tanto, en la práctica la altura efectiva de la antena de una estación puede aumentarse normalmente colocando ésta en un terreno más elevado. En países con zonas montañosas, las alturas efectivas de las antenas pueden aumentarse en ocasiones hasta 3 000 m, una cifra que se menciona en la Recomendación UIT-R P.1546-4.

La metodología general desarrollada recientemente [1, 2] y el software correspondiente para la planificación de redes de comprobación técnica del espectro (descrito en el Anexo 5 del Manual de la UIT sobre Técnicas Informatizadas para la Gestión del Espectro, edición 2015) permiten realizar evaluaciones cuantitativas de los posibles beneficios derivados de determinar de esta forma los emplazamientos de las antenas de las estaciones, analizar aspectos conexos y formular las Recomendaciones adecuadas [3].

Los cálculos de la zona de cobertura se han basado en la metodología descrita en el § 4.7.3.1.4 y en la sección 6.8 del Manual de Comprobación Técnica del Espectro (edición 2011) de la UIT. Para estas estimaciones se utilizó un transmisor de prueba de un servicio móvil privado de 10 W en la banda de 900 MHz, con una altura de antena de 6 m sobre el suelo. Ese caso corresponde al de un mástil de antena de 3 m situado en el tejado de un edificio de una sola planta y ofrece un modelo útil de una estación base móvil pequeña con un conjunto mínimo de parámetros. El modelo de propagación utilizado se basa en la metodología de la Recomendación UIT-R P.1546-4, en cuyo Anexo 5, § 1.1, se describe un método recomendado de cálculo aplicable a la comprobación técnica. Se considera que la incertidumbre de radiogoniometría para todas las estaciones fijas es de 1° r.m.s., y de 2° r.m.s. para las estaciones móviles.

A2-2 Zonas de cobertura de radiogoniometría y localización para antenas de estaciones situadas en altitudes más elevadas

Cuando se pretende aumentar la altura efectiva de la antena de una estación, no debe olvidarse que la estación necesita una infraestructura adecuada para su normal funcionamiento, principalmente suministro eléctrico y acceso por carreta, algo también necesario para estaciones automáticas no atendidas con el fin de realizar tareas de mantenimiento y de otro tipo.

Por tanto, en la práctica en zonas montañosas el emplazamiento de las estaciones y de sus antenas está limitado a las zonas habitables de mayor altitud donde dicha infraestructura está disponible.

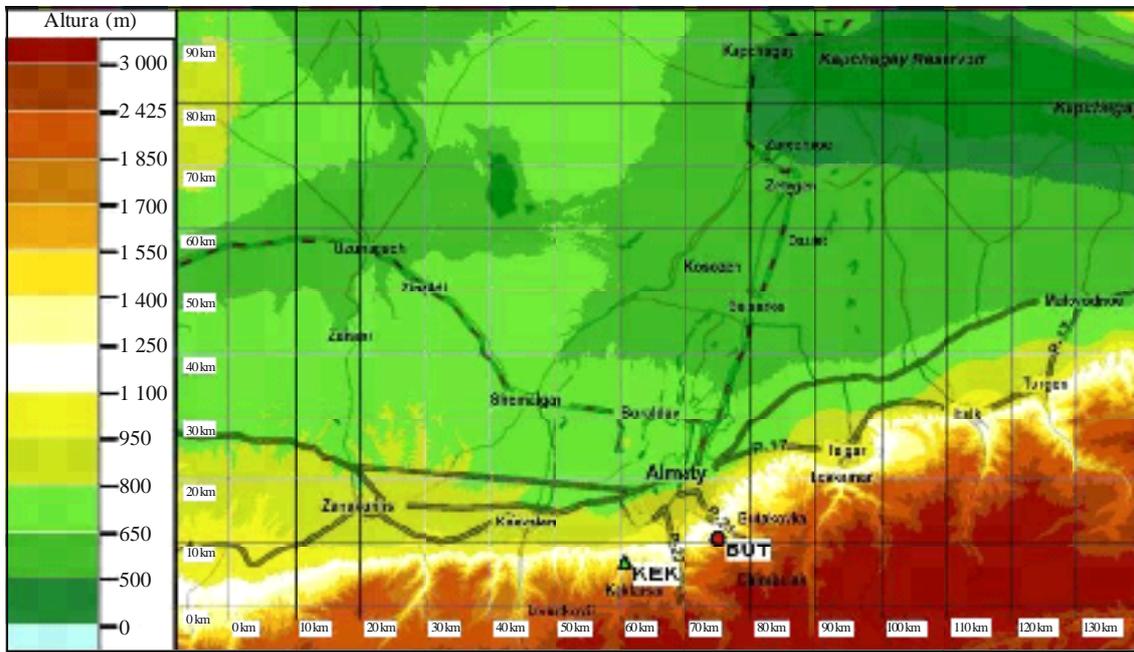
En la Fig. A2-1 se refleja el caso de dos estaciones fijas virtuales con antenas situadas en las estribaciones montañosas al sur de Almaty (República de Kazajstán) [3], y en la que se representa la topografía de la zona. La antena de una de las estaciones (KEK) está situada a una altura de 1 506 m, la otra (BUT) a 1 568 m. Se supone que la altura física de los mástiles de las antenas es de 10 m, ya que en esas circunstancias la altura física de la antena no tiene prácticamente ningún efecto sobre su altura efectiva, determinada de conformidad con el procedimiento de la Recomendación UIT-T R R.1564-4. Por motivos de seguridad, no se recomienda un mástil de antena de menor altura.

Los emplazamientos específicos de las antenas se han seleccionado cuidadosamente para maximizar la cobertura de la zona objeto de comprobación técnica.

En la Fig. A2-2 se muestra la plantilla de cobertura de localización (LCT) de ambas estaciones.

FIGURA A2-1

Emplazamiento de las estaciones virtuales y topografía de la región considerada



Informe SM.2356-A2-01

De la Fig. A2-2 se desprende claramente que estos emplazamientos de antenas permiten realizar la comprobación técnica de las emisiones a distancias muy grandes en la planicie adyacente a la cadena montañosa, especialmente hacia el norte y oeste de Almaty (hasta 70 km e incluso más). La Fig. A2-2 también refleja con claridad que con las antenas en dichos emplazamientos, la parte sur de Almaty está cubierta con una incertidumbre de localización (LU) comprendida entre 200 y 400 m, y que en la parte norte existe una LU de entre 400 y 600 m. Ello permite realizar la radiorrecalada de un transmisor (o de cualquier otra fuente de emisiones) de forma considerablemente más rápida, incluso con una estación móvil si fuera necesario. Por otro lado, casi en los límites de la LCT, a distancias de unos 60 a 70 km de Almaty, los valores de LU son muy altos (aproximadamente de 12 a 14 km). Por tanto, en este ejemplo, la LU varía en un factor de 70 dentro de la LCT. Este fenómeno debe tenerse en cuenta durante la radiorrecalada.

La Fig. A2-2 muestra que la elección de emplazamiento de antenas de estaciones en altitudes muy elevadas es muy efectivo y permite cubrir grandes extensiones de territorio con un número reducido de estaciones fijas. No obstante, es necesaria una selección muy cuidadosa de los emplazamientos de las antenas. En una zona llana, desplazar las antenas unos cientos de metros o incluso unos kilómetros tiene un escaso efecto en las zonas de cobertura de comprobación técnica de un grupo de estaciones de una SMN. Sin embargo, cambiar el emplazamiento de las antenas en terrenos montañosos, incluso unas decenas de metros, puede reducir significativamente las zonas de cobertura de comprobación técnica de las estaciones afectadas. Ello puede también afectar negativamente a la zona de cobertura global si la SMN consta de pocas antenas. En la Fig. A2-3 se muestra la LCT resultante cuando la estación BUT se desplaza solo 100 m hacia el sur (emplazamiento B2). Al comparar con la Fig. A2-2 se observan claramente las consecuencias negativas de dicho cambio de emplazamiento.

Por este motivo, una vez que se ha hecho la modelización de la red de comprobación técnica en zonas montañosas, es esencial realizar un cuidadoso examen de potenciales emplazamientos, incluida una inspección in situ (utilizando prismáticos) de la zona en relación con la posible existencia de obstáculos a la propagación de las señales radioeléctricas en la dirección del territorio objeto de las tareas de comprobación técnica.

A2-3 Reducción de la probabilidad de efectos debidos a reflexiones

Otro factor muy típico de las zonas montañosas es el fenómeno de las reflexiones que se pueden producir en montañas cercanas [4]. Ello requiere un proceso muy cuidadoso de selección de emplazamientos para las antenas de las estaciones. Éstas deben situarse en crestas montañosas que permitan una proyección radioeléctrica hacia el territorio objetivo de la comprobación técnica. Ello reducirá la probabilidad de reflexiones en crestas próximas o de mayor altura. Los efectos de las reflexiones debidas a montañas más bajas son algo menos probables.

La Fig. A2-4 muestra la aplicación de dicho enfoque de selección de emplazamientos de las antenas asociadas a las estaciones KEK y BUT. Por otro lado, si se sitúa una antena en crestas próximas de la misma o mayor altura, como es el caso de la estación N de la Fig. A2-4, la probabilidad de interferencia debida a reflexiones es considerablemente mayor. La Fig. A2-4 muestra la elevada probabilidad de reflexiones de una señal recibida en la antena de la estación N procedente del transmisor T.

FIGURA A2-2

Cobertura de radiogoniometría y localización con un emplazamiento adecuado de las estaciones KEK y BUT

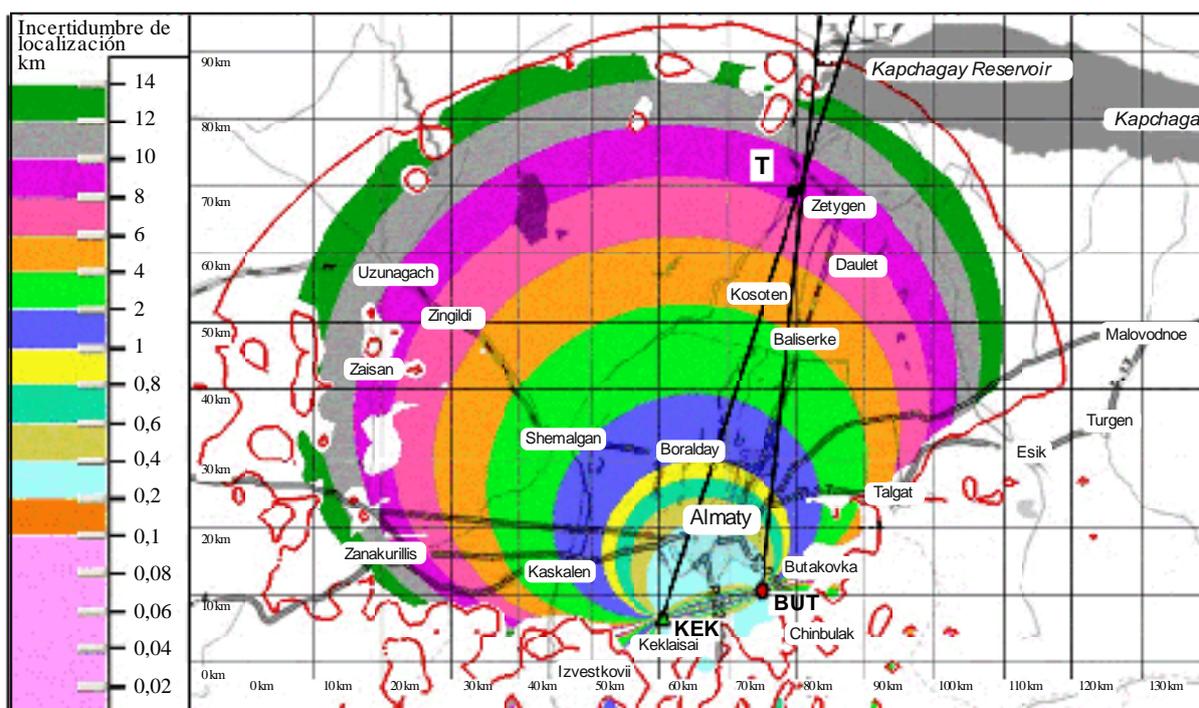
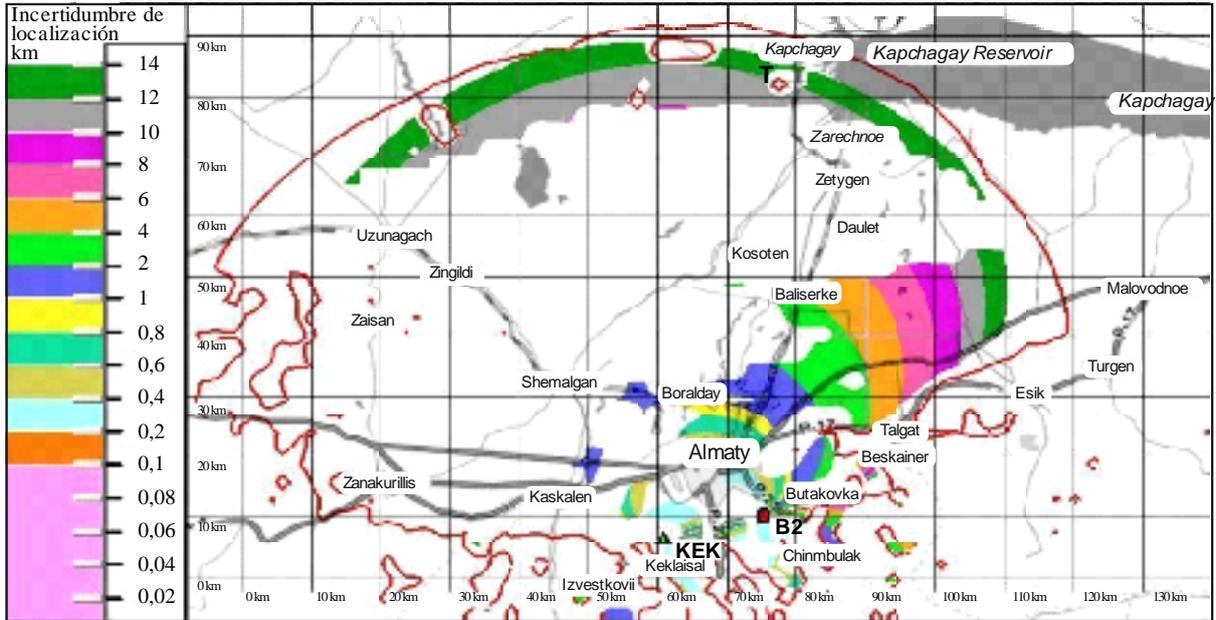


FIGURA A2-3

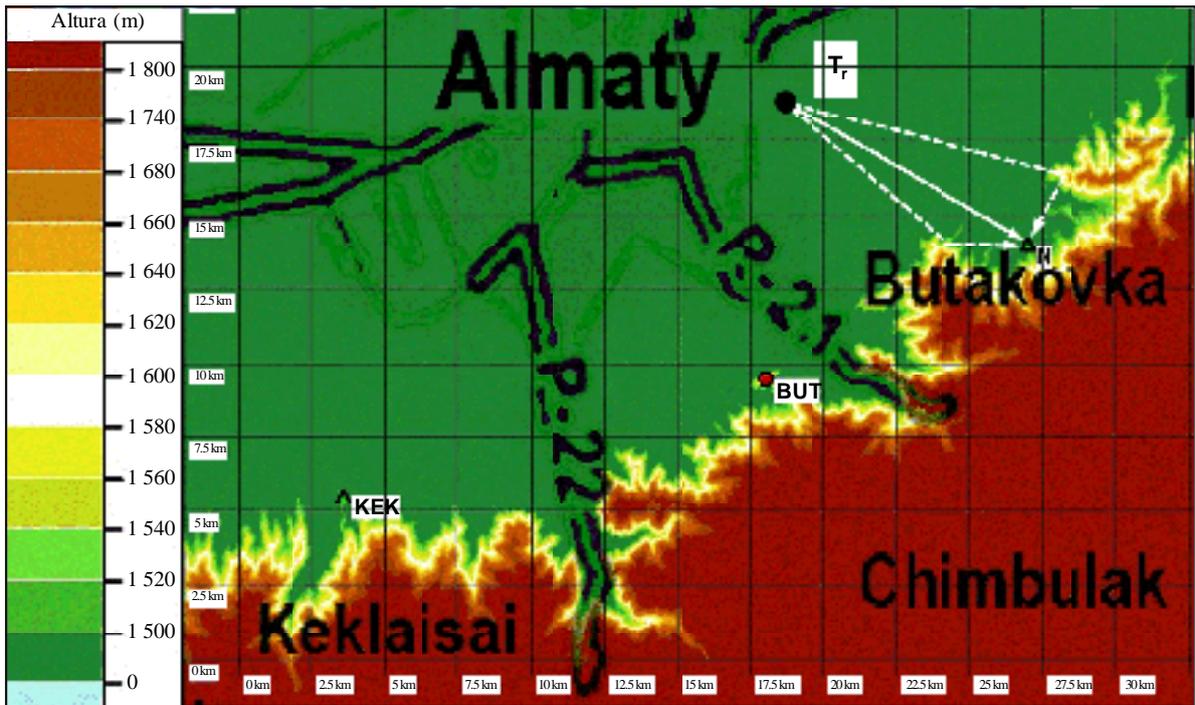
Cobertura de radiogoniometría y localización con un emplazamiento inadecuado de la estación BUT



Informe SM.2356-A2-03

FIGURA A2-4

Emplazamiento de las estaciones para reducir la probabilidad interferencia debida a reflexiones



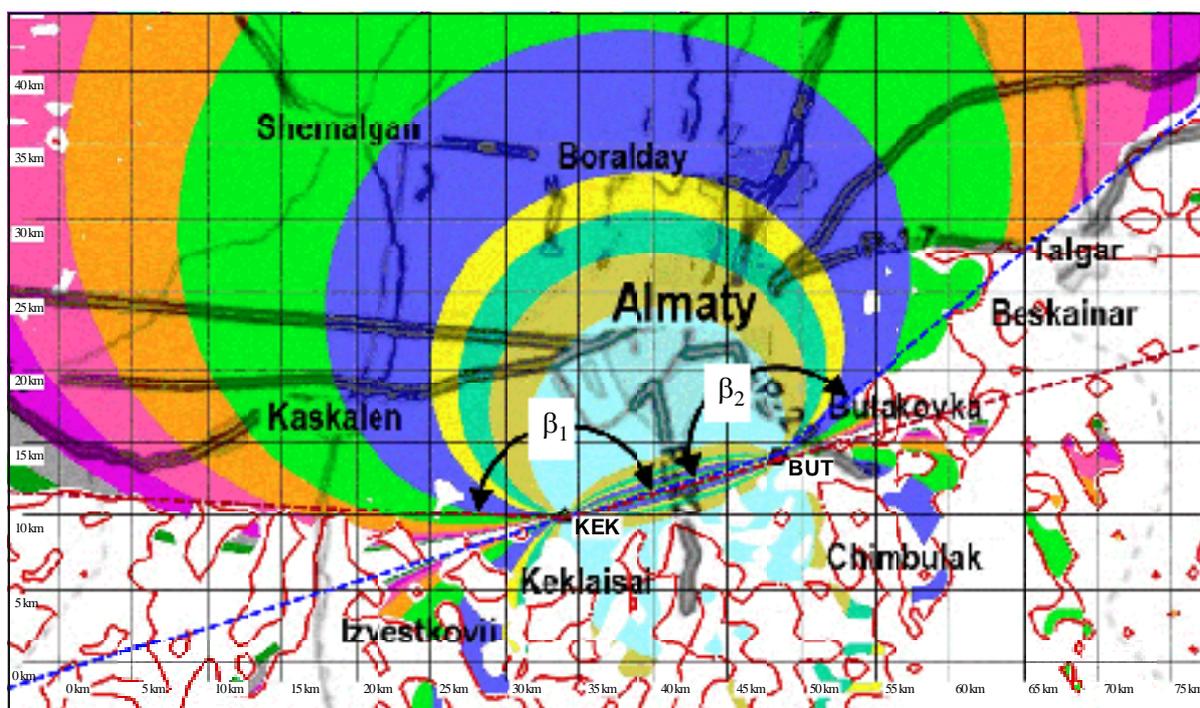
Informe SM.2356-A2-04

Para evitar los efectos de reflexiones debidas a montañas elevadas alejadas de la estación de interés (en relación con el territorio sujeto a comprobación técnica) y recibidas lateralmente, todas las falsas marcaciones por dichas reflexiones pueden bloquearse utilizando el software adecuado [4]. En el caso considerado, y tal como se muestra en la Fig. A2-5, pueden bloquearse las marcaciones de la estaciones KEK y BUT para ángulos que quedan fuera de los sectores β_1 and β_2 respectivamente.

En estos territorios de alta montaña hay muy pocos pueblos o aldeas con transmisores de señales radioeléctricas de potencial interés para la comprobación técnica en las que no se realiza prácticamente ninguna comprobación técnica con estaciones fijas.

FIGURA A2-5

Bloqueo de marcaciones falsas generadas por reflexiones en las montañas



Informe SM.2356-A2-05

La incertidumbre a grandes distancias del grupo de estaciones fijas de comprobación técnica puede ser muy elevada. Ello sin embargo no impide que, si existe una interacción eficaz entre estaciones móviles y fijas de comprobación técnica, pueda localizarse de forma efectiva un transmisor que está siendo buscado por una estación móvil en dicha zona, así como en zonas fuera de la LCT, donde una única estación fija de comprobación técnica realiza la radiogoniometría, tal como se describe en [5].

A2-4 Observaciones finales

Las topografías montañosas pueden aprovecharse favorablemente para ampliar las zonas de cobertura en zonas llanas próximas a zonas montañosas atendidas por un conjunto reducido de estaciones de comprobación técnica. Por otro lado, en esas condiciones, la selección de emplazamientos adecuados para las antenas y el examen cuidadoso de los mismos son incluso más críticos para garantizar la visibilidad directa de la zona objetivo de la comprobación técnica. También es necesario realizar mediciones para reducir el efecto de las reflexiones en montañas cercanas situadas a espaldas de una estación en relación con el territorio objeto de comprobación técnica.

Anexo 3

Calidad de funcionamiento de un receptor y sus efectos sobre la cobertura de la red

A3-1 Efectos de la calidad de funcionamiento sobre las distancias de separación entre estaciones de una red de geolocalización

La sensibilidad del sistema de una estación de comprobación técnica del espectro se define mediante numerosos parámetros de diseño, incluida la ganancia de la antena, anchura de banda instantánea (IBW), factor de ruido, margen dinámico instantáneo y ruido de fase del receptor.

Las especificaciones de la calidad de funcionamiento del receptor de comprobación técnica tienen un efecto directo sobre la distancia de separación planificada entre nodos de una red regular primaria. Los receptores con calidad de funcionamiento más elevada permiten una separación mayor y, por tanto, un menor número de estaciones de comprobación técnica para cubrir un territorio dado. Estos principios son aplicables a las redes AOA, TDOA e híbridas, En los párrafos siguientes se utiliza el término NF_{receptor} para expresar el factor de ruido efectivo del receptor, que combina el factor de ruido real del mismo con los efectos del margen dinámico instantáneo y del ruido de fase del receptor El factor de ruido típico de un receptor moderno es de 12 dB.

A3-2 Margen dinámico instantáneo

Las señales modernas operan con anchuras de banda cada vez más amplias que llegan 20 MHz y valores superiores. Para realizar un análisis efectivo de dichas señales, los modernos sistemas de comprobación técnica del espectro utilizan receptores de banda amplia. El aumento de la anchura de banda del receptor, produce un efecto colateral no deseado, a saber, una mayor probabilidad de que en la anchura de banda del receptor existan señales débiles y señales intensas. La verosimilitud de las mediciones de sistemas de comprobación técnica instalados cercanos a señales intensas supone un problema real dada la creciente densidad de emisores.

Con el fin de poder recibir satisfactoriamente una señal débil en presencia de señales intensas, la anchura de banda del receptor debe tener un margen dinámico elevando dentro de banda pues en caso contrario no podrá detectar señales débiles.⁴ En efecto, un margen dinámico insuficiente hace que no puedan detectarse señales débiles, lo que equivale a aumentar el factor de ruido efectivo del receptor. Obsérvese que el efecto de señales intensas cercanas puede reducirse aún más utilizando receptores con anchuras de banda duales, amplias y estrechas, que utilizan una anchura de banda estrecha (típicamente 1/10 de la anchura de banda amplia) en presencia de señales próximas muy intensas.

A3-3 Ruido de fase

El oscilador local de un receptor se diseña para producir una señal de mezcla tan pura como sea posible, pero la pureza conseguida en la práctica varía ampliamente en función del diseño. La pureza se mide en dB por debajo de la portadora (dBc) para diversos valores de desplazamiento de frecuencia. El problema es que el ruido de fase del oscilador local, a través de la mezcla recíproca del receptor, puede enmascarar las señales débiles en presencia de señales intensas. El efecto de la mezcla recíproca es equivalente a aumentar el factor de ruido efectivo del receptor. Para minimizar los efectos de la

⁴ En este análisis no se consideran medidas para la mitigación, tales como los filtros de ranura o de banda eliminado para la reducción de señales intensas.

mezcla recíproca, el receptor debe tener un ruido de fase bajo. El ruido de fase de un receptor moderno no debe ser inferior a -100 dBc/Hz para un desplazamiento de frecuencia de 10 kHz

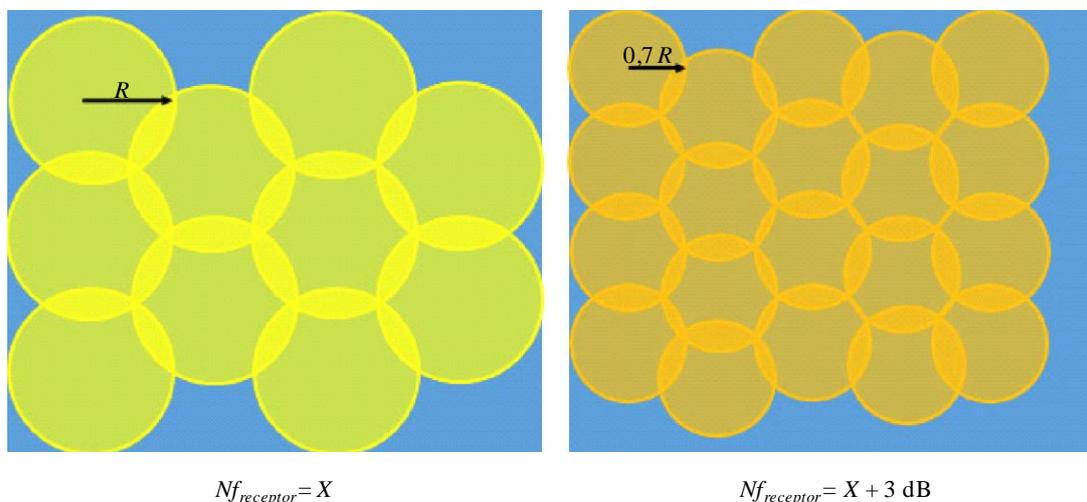
A3-4 Efectos sobre la zona de cobertura

En la Fig. A3-1 se ilustra la relación entre el factor de ruido efectivo y el número de estaciones necesarias para una cobertura generalizada de una zona de interés teórica. La Figura de la izquierda muestra una red de estaciones con $NF_{\text{receptor}} = X$, que resulta en un radio de cobertura R y una zona de cobertura CA . En estas condiciones, la zona de interés puede cubrirse con aproximadamente nueve estaciones.

La Figura de la derecha ilustra la situación de un receptor con un factor de ruido efectivo superior en 3 dB, es decir, $NF_{\text{receptor}} = X + 3$ dB. En este caso el radio de la cobertura se reduce a $0,7 R$ y la zona de cobertura de cada estación se reduce a la mitad ($1/2 CA$).

FIGURA A3-1

Ejemplo de relación entre el factor de ruido efectivo de los receptores y el número total de estaciones necesarias para una cobertura generalizada de una zona de interés teórica



Informe SM 2356-A3-f

En el caso de este sencillo modelo analítico, por cada 3 dB de aumento del factor de ruido del receptor, se duplica el número de estaciones de comprobación técnica necesarias.

Obsérvese que estos argumentos sólo son ciertos en condiciones de espacio libre. En situaciones reales, el efecto puede ser más perjudicial: en entorno suburbanos y urbanos en los que el valor ideal de $20 \log(d)$ se convierte en 40 ó $50 \log(d)$, cada aumento de 3 dB del factor de ruido exige un número superior de receptores para lograr una cobertura generalizada.

En la sección 3.3 del Manual de Comprobación Técnica del Espectro de la UIT (edición de 2011) figura información adicional sobre los receptores de comprobación técnica de las emisiones.

A3-5 Conclusiones

Es importante utilizar receptores que cumplan o mejoren las actuales Recomendaciones de la UIT. Utilizando el método analítico más sencillo se aprecia que por cada aumento de 3 dB en el factor de ruido efectivo del receptor, prácticamente se dobla el número de estaciones de comprobación técnica necesarias.

Referencias

- [1] Kristeva, O.E., Pavlyuk, A.P., *Planning procedures for spectrum monitoring networks in the VHF/UHF frequency range* – Proceedings of the International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC Europe 2012. Roma, Italia, septiembre de 2012.
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6396919>
 - [2] Bykhovsky, M.A., (ed.). *Osnovy upravleniya ispolzovaniem radiochastotnogo spectra, Tom 1: Mezhdunarodnaya i natsionalnaya sistemy upravleniya PChS. Radiokontrol i radionadzor.* (Basic principles of managing radio spectrum use, Vol. 1: International and national systems of spectrum use. Monitoring and inspection. M. URSS. 2012). (en ruso).
 - [3] Nurshabekov, R.R., Aitmagabetov, A.Z., *Ispolzovanie gornogo relefa mestnosti dlya rasshireniya zon okhvata monitoringom v OVCh/UVCh polose chastot*, Vestnik KazATK, Vyp. No. 1, 2013. (Use of a location's mountainous topography to extend monitoring coverage in the VHF/UHF band, in Bulletin KazATK, No. 1, 2013.) (en ruso, existe una traducción al inglés en la dirección: http://csse.faculty.iitu.kz/?page_id=261).
 - [4] Nurmatov, B.N., *Osobennosti radiopelengatsii v usloviyakh Kyrgyzskoy Respubliki.* VI Mezhdunarodny simpozium po elektromagnitnoy sovместimosti i elektromagnitoy ekologii, Sankt Petersburg, Russia, 21-24 de junio de 2005. (Special characteristics of radio direction finding in the conditions prevailing in the Kyrgyz Republic. VI International Symposium on electromagnetic compatibility and electromagnetic ecology, St. Petersburg, Russia, 21-24 de junio de 2005.)
 - [5] Nurshabekov, R.R., Aitmagabetov, A.Z., *Doposk radioperedatchikov s pomoshchyu podvizhnykh stantsy monitoringa*, Vestnik KazATK, Vyp. No. 1, 2013. (Homing of radio transmitters using mobile monitoring stations, in Vestnik KazATK, No. 1, 2013.) (en ruso, existe una traducción al inglés en la dirección: http://csse.faculty.iitu.kz/?page_id=261).
-