

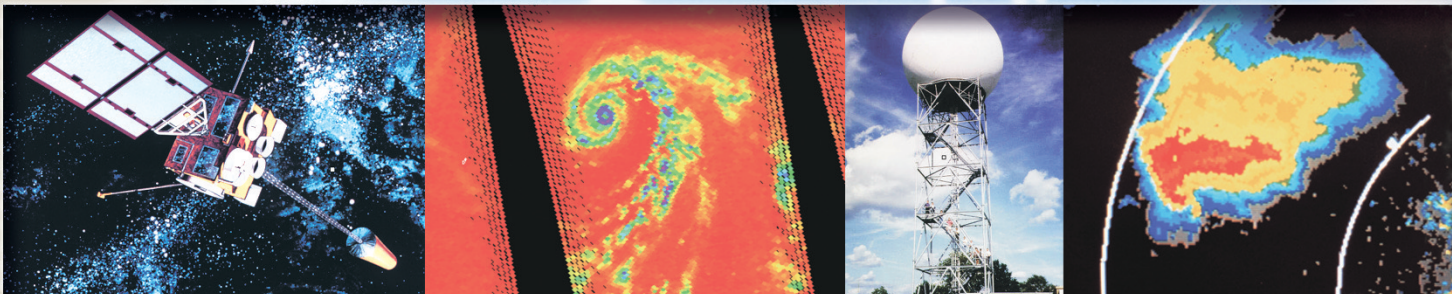


Organización
Meteorológica
Mundial



Unión
Internacional de
Telecomunicaciones

MANUAL



Utilización del espectro radioeléctrico en meteorología

Edición 2002



Organización
Meteorológica
Mundial



Unión
Internacional de
Telecomunicaciones

MANUAL

Utilización del espectro radioeléctrico en meteorología

Edición 2002

© OMM - UIT 2002

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

PREFACIO

El Manual sobre la Utilización del espectro radioeléctrico en meteorología ha sido elaborado por expertos del Grupo de Trabajo 7C de la Comisión de Estudio 7 de Radiocomunicaciones (Servicios científicos) presidido por el Sr. E. Marelli (ESA), Presidente del Grupo de Trabajo 7C.

Los seis Capítulos de este Manual ofrecen amplia información técnica sobre la utilización de las frecuencias radioeléctricas en sistemas meteorológicos tales como los satélites meteorológicos, las radiosondas, los radares meteorológicos, los radares de perfil del viento, los sistemas de teledetección desde vehículos espaciales, etc.

Este Manual está dirigido a todos los usuarios, profesionales, técnicos, diseñadores y demás grupos e individuos del mundo de la meteorología y del de las radiocomunicaciones implicados, entre ellos las instituciones gubernamentales y la industria.

Robert W. Jones

Director de la Oficina de Radiocomunicaciones

ÍNDICE

	Página
PRÓLOGO	vii
ESTUDIOS SOBRE LA COMPARTICIÓN DEL ESPECTRO	ix
CAPÍTULO 1 – ESTRUCTURA GENÉRICA DE LOS SISTEMAS METEOROLÓGICOS	1
CAPÍTULO 2 – SERVICIO DE METEOROLOGÍA POR SATÉLITE	7
CAPÍTULO 3 – SERVICIOS DE AYUDAS A LA METEOROLOGÍA.....	15
CAPÍTULO 4 – RADARES METEOROLÓGICOS.....	33
CAPÍTULO 5 – SISTEMAS SETS PARA ACTIVIDADES METEOROLÓGICAS ..	49
CAPÍTULO 6 – OTROS SISTEMAS DE RADIOCOMUNICACIONES PARA ACTIVIDADES METEOROLÓGICAS.....	87
ANEXO 1 – ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS DE USO COMÚN EN METEOROLOGÍA.....	97

PRÓLOGO

La Comisión de Estudio 7 de Radiocomunicaciones (CE 7) para los Servicios Científicos se constituyó con ocasión de una reestructuración que tuvo lugar en la Asamblea Plenaria del CCIR de 1990 en Dusseldorf. Muchas de las actividades de la CE 7 están vinculadas a la aplicación de las tecnologías más avanzadas de utilización del espectro radioeléctrico para la consecución de objetivos científicos.

En la actualidad, la CE 7 está formada por varios Grupos de Trabajo (GT) de Radiocomunicaciones que se ocupan de cuestiones técnicas relativas a disciplinas específicas del ámbito de los servicios científicos. La meteorología es competencia del GT 7C y comprende los estudios de implementación y explotación de sensores meteorológicos pasivos y activos, desde estaciones situadas en tierra o en plataformas espaciales. La Meteorología tiene necesidad de las radiocomunicaciones para recopilar los datos sobre los que basar sus predicciones y para procesar y divulgar la información y las alertas meteorológicas entre la población. Entre los temas objeto de constante atención de los medios de comunicación, se encuentran:

- los satélites meteorológicos que controlan la evolución de huracanes y tifones;
- los radares meteorológicos que controlan la evolución de tornados, tormentas y las emanaciones de volcanes e incendios forestales importantes;
- los sistemas radioeléctricos de ayuda a la meteorología que recogen y procesan datos meteorológicos, sin los cuales la exactitud actual y futura de las predicciones meteorológicas se vería gravemente expuesta; y
- los sistemas de radiodifusión sonora y de televisión que permiten advertir a la población de la inminencia de situaciones meteorológicas de riesgo y, a los pilotos de aviones, de la presencia de tormentas y turbulencias.

Aunque el objetivo principal de las actividades de la Comisión de Estudio era, y sigue siendo, la elaboración de Recomendaciones, se ha puesto de manifiesto que los expertos de la Comisión de Estudio en estos asuntos tienen mucha información básica que ofrecer a sus colegas científicos y profanos que necesitan datos meteorológicos para efectuar predicciones más exactas del tiempo y del clima, y métodos adecuados de adquisición de los mismos.

Éste es el motivo de la elaboración y publicación de este Manual, en colaboración con el Grupo de Dirección sobre coordinación de las frecuencias de radiocomunicaciones de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), destinado a que los usuarios de estas normas puedan profundizar en el conocimiento de los sistemas meteorológicos para mejorar el diseño y la aplicación de estas potentes herramientas. Este Manual tiene por objeto informar a los lectores acerca de la utilización de los sistemas de radiocomunicaciones y de las bandas de radiofrecuencia (RF) por parte de los meteorólogos de todo el mundo, y de su importancia para la seguridad pública y la economía mundial.

Una gestión eficaz y prudente de la atribución de bandas de frecuencias es decisiva para el mantenimiento y la mejora de la calidad y precisión meteorológicas y de las predicciones vinculadas a la meteorología. Por ejemplo, si las bandas de frecuencias atribuidas actualmente para fines meteorológicos tuvieran que ser atribuidas a otros servicios de radiocomunicaciones que fueran incompatibles con los sistemas de radiocomunicaciones meteorológicas, esas bandas podrían resultar ineficaces para los sistemas de predicción meteorológica y, por consiguiente, hacer imposibles las predicciones meteorológicas.

Como Presidente de la CE 7, me complace enormemente presentar este Manual a los usuarios de las normas meteorológicas y a los gestores de frecuencias en general para los que, no me cabe duda, constituirá una importante herramienta de consulta en el ámbito de su propio trabajo.

Este Manual no podría haberse completado sin la contribución del gran número de administraciones que toman parte en la CE 7. Cabe señalar la gran importancia de la labor de los Relatores de los diversos Capítulos del Manual y hay que agradecer especialmente al Sr. David Franc (Estados Unidos de América), al Sr. Jean-Michel Rainer (OMM) y al Presidente del GT 7C, Sr. Edoardo Marelli (ESA) por la dirección de este proyecto. También merece nuestra más sincera gratitud el Sr. A. Nalbandian de la Oficina de Radiocomunicaciones que ha desempeñado una función importante en la publicación del Manual.

R. M. Taylor
Presidente de la Comisión de Estudio 7
de Radiocomunicaciones

ESTUDIOS SOBRE LA COMPARTICIÓN DEL ESPECTRO

Dado lo inevitable del conflicto, se ha realizado un gran número de estudios en la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) y especialmente en el Sector de Radiocomunicaciones (UIT-R) a fin de determinar cómo aprovechar el espectro para nuevos usos, ajenos muchos de ellos a la meteorología. Estos estudios se han centrado principalmente en los requisitos del espectro y en cuestiones de compatibilidad técnica, por ejemplo en determinar la posibilidad y limitaciones de la compartición del espectro entre las nuevas tecnologías y los sistemas anteriores. Estos estudios han puesto de manifiesto la existencia de casos en los que no es posible la compartición en el mismo canal y en los que la dedicación de más espectro a las nuevas tecnologías supondría el desplazamiento de usuarios anteriores, lo que indefectiblemente plantea los siguientes interrogantes:

- ¿Son realistas los requisitos de espectro previstos para las nuevas tecnologías?
- ¿Debe obligarse a los usuarios actuales a abandonar toda una banda o una parte importante de ella?
- ¿Pueden permitirse los actuales usuarios meteorológicos la migración a una nueva banda? Vale la pena observar a este respecto que no todos los sistemas actuales son explotados por países ricos o entidades lucrativas.
- ¿Podría, caso de ser necesario, obtenerse ayuda financiera de las nuevas tecnologías potencialmente rentables?
- Caso de ser necesario su desalojo, ¿cuál es el plazo razonable que debe otorgarse a los actuales ocupantes de una banda para su migración a otra?

Con el ánimo de ofrecer un compendio de estos estudios, el GT 7C «Sistemas de exploración de la Tierra por satélite y sistemas meteorológicos» de la Comisión de Estudio 7 de Radiocomunicaciones y el Grupo de Dirección sobre coordinación de las frecuencias de radiocomunicaciones de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) han preparado este Manual.

El propósito de este Manual es servir de guía a los profesionales que utilizan datos de los sistemas radioeléctricos de aplicación en meteorología, a las personas y a los gobiernos que utilizan dichos sistemas meteorológicos y a la industria de las telecomunicaciones inalámbricas. Se definen los sistemas meteorológicos y se presenta una introducción y una exposición de las características técnicas de cada uno de los sistemas. La descripción de los sistemas meteorológicos comprende: las bandas de RF utilizadas, los criterios de predicción de las interferencias perjudiciales provocadas por usuarios competidores y la repercusión de la degradación de los datos meteorológicos en detrimento de la seguridad de la población. Para facilitar la comprensión de estos temas tan complejos, se ha dividido la exposición por tipos de sistemas del siguiente modo:

1. Estructura general de los sistemas meteorológicos
2. El servicio de meteorología por satélite
3. Sistemas del servicio de ayudas a la meteorología
4. Radares meteorológicos, entre ellos:
 - 4.1 Los radares meteorológicos giratorios
 - 4.2 Los radares de perfil del viento
5. Sistemas del servicio de exploración de la Tierra por satélite (SETS) para actividades meteorológicas, entre ellos:
 - 5.1 Los sistemas pasivos de teledetección radiométrica por microondas
 - 5.2 Los sistemas activos de teledetección

6. Otros sistemas de radiocomunicaciones para actividades meteorológicas, entre ellos:
 - 6.1 Los sistemas de radiodifusión y divulgación
 - 6.2 Los sistemas remotos de radiocomunicaciones hidrológicas
 - 6.3 Los sistemas remotos fijos
 - 6.4 Sistemas de radionavegación
 - 6.5 Los sistemas de localización y detección de rayos
 - 6.6 Sistemas remotos de la detección pasiva desde tierra.

Como ayuda al lector, se adjunta un breve compendio de acrónimos y abreviaturas junto con una referencia a un conjunto más amplio de definiciones de terminología meteorológica.

Este Manual trata de los sistemas de captura y transmisión de datos de las observaciones meteorológicas y de la utilización del espectro de RF por parte de esos sistemas.

CAPÍTULO 1

ESTRUCTURA GENÉRICA DE LOS SISTEMAS METEOROLÓGICOS

	Página
1.1 Sistemas meteorológicos del Programa de Vigilancia Mundial.....	2
1.1.1 Sistema Mundial de Observación.....	2
1.1.1.1 Observación de la superficie	3
1.1.1.2 Observación de la atmósfera superior	3
1.1.1.3 Observaciones mediante radar	4
1.1.1.4 Estaciones de observación en el mar	4
1.1.1.5 Observación desde aviones	4
1.1.1.6 Observación desde satélites.....	4
1.1.1.7 Planes futuros del SMO.....	4
1.2 Otros sistemas meteorológicos de los programas de la OMM.....	6
1.2.1 Vigilancia de la Atmósfera Global de la OMM	6
1.2.2 Sistema Mundial de Observación del Clima	6
1.2.3 Programa hidrológico y de recursos hídricos	6

1.1 Sistemas meteorológicos del Programa de Vigilancia Mundial

El sistema de Vigilancia Meteorológica Mundial (VMM) es el programa básico de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) que aplican y ejecutan los 185 países miembros de la OMM. El programa VMM consta de tres elementos integrados que componen el núcleo del sistema (véase la Fig. 1-1).

- El **sistema mundial de observación (SMO)** que proporciona observaciones normalizadas de gran calidad de la atmósfera y de la superficie del océano en cualquier lugar del mundo y del espacio exterior.
- El **sistema mundial de procesamiento de datos** que proporciona productos meteorológicos procesados (análisis, alertas y predicciones) generados por una red de centros meteorológicos mundiales y regionales especializados.
- El **sistema mundial de telecomunicación (SMT)** que proporciona el intercambio en tiempo real de datos procedentes de las observaciones meteorológicas, productos procesados e información afín, entre los servicios meteorológicos e hidrológicos nacionales.

FIGURA 1-1



1.1.1 Sistema Mundial de Observación

El Sistema Mundial de Observación (SMO) está integrado por observatorios situados en tierra, en el mar, en aviones y en satélites meteorológicos, como se muestra en la Fig. 1-2. El SMO constituye la principal fuente de información técnica sobre la atmósfera mundial. El SMO es un sistema compuesto integrado por métodos, técnicas e instalaciones complejas para la medición de parámetros meteorológicos y medioambientales. El SMO garantiza la disponibilidad de información crítica para todos los países a fin de que puedan generar todos los días análisis, previsiones y alertas meteorológicas. Las ventajas más evidentes del SMO son la protección de la vida y de los bienes gracias a

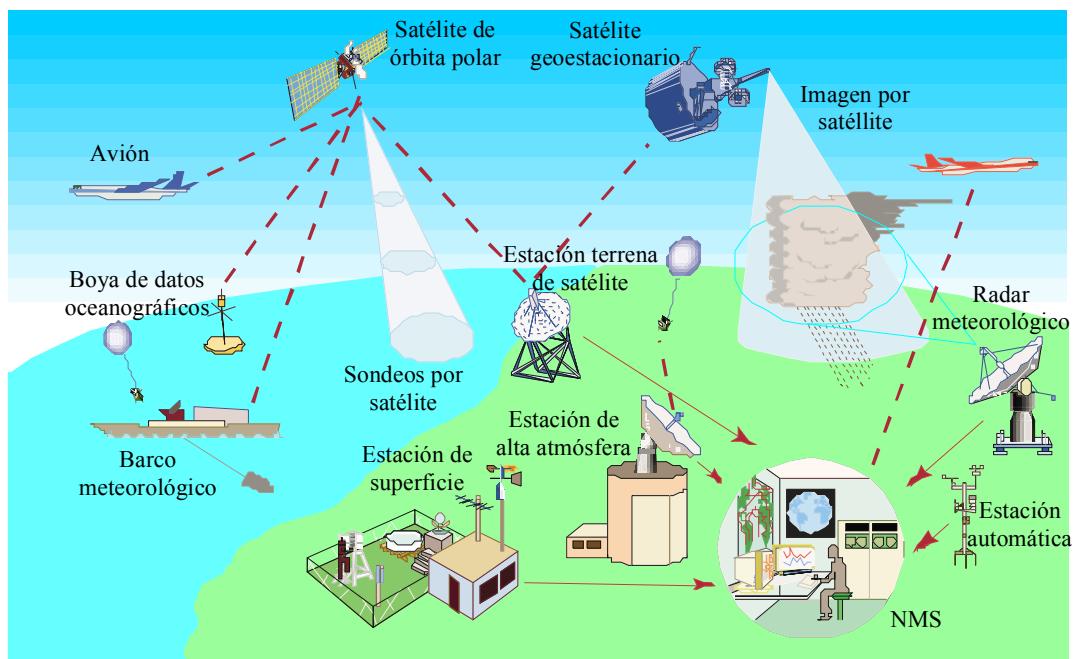
la detección, predicción y alerta de fenómenos atmosféricos graves tales como tormentas locales, tornados, huracanes y ciclones extratropicales y tropicales. El SMO suministra a la agrometeorología, a la meteorología aeronáutica y a la climatología, incluido el estudio del clima y el cambio mundial, datos procedentes de las observaciones. Hay una gran diversidad de actividades económicas, tales como la agricultura, el transporte, la construcción, los servicios meteorológicos públicos y el turismo, que se benefician sobremanera de las predicciones atmosféricas realizadas con una anticipación de días, semanas e incluso estaciones. Los datos del SMO se utilizan asimismo en apoyo de los programas de protección del medio ambiente en todo el mundo.

1.1.1.1 Observación de la superficie

La piedra angular del sistema de superficie continúan siendo las aproximadamente 10 000 estaciones existentes en tierra, dedicadas a realizar observaciones en la superficie terrestre o cerca de ella. Se efectúan observaciones de parámetros meteorológicos tales como la presión atmosférica, la velocidad y dirección del viento, la temperatura del aire y la humedad relativa con una periodicidad de una a tres horas. Los datos procedentes de estas estaciones se intercambian en tiempo real a nivel mundial. Un subconjunto de los datos observados en estas estaciones de superficie se utiliza asimismo en el Sistema Mundial de Observación del Clima (SMOC).

FIGURA 1-2

El Sistema Mundial de Observación



1.1.1.2 Observación de la atmósfera superior

Hay una red de 900 observatorios de atmósfera superior, aproximadamente, repartidos por todo el mundo, con radiosondas acopladas a globos de ascenso libre que miden la presión, la velocidad del viento, la temperatura y la humedad desde el suelo hasta alturas que alcanzan los 30 km. En las zonas oceánicas, las observaciones de las radiosondas se recogen en 15 barcos, que recorren principalmente el Atlántico Norte, equipados con instalaciones automáticas de sondeo de la atmósfera superior.

1.1.1.3 Observaciones mediante radar

Los radares Doppler y los de perfil del viento están demostrando ser de gran valor para la obtención de datos de alta resolución espacial y temporal, especialmente en las capas inferiores de la atmósfera. Los radares Doppler se utilizan por doquier como parte de las redes nacionales y, cada vez con más frecuencia, como parte de las regionales, principalmente para realizar predicciones a corto plazo de fenómenos atmosféricos de importancia. Hay que destacar la utilidad del radar Doppler por su capacidad de efectuar mediciones del viento y estimaciones pluviométricas. Los radares de perfil del viento resultan especialmente útiles para realizar observaciones entre sondas transportadas por globos y tienen un gran futuro como componentes de las redes de observación integradas.

1.1.1.4 Estaciones de observación en el mar

En los océanos, el SMO se apoya en barcos, boyas ancladas y a la deriva y plataformas estacionarias. Las observaciones las realizan unos 6 700 barcos, aproximadamente, fletados al amparo del programa de barcos observadores voluntarios de la OMM, que recogen las mismas variables que las estaciones terrestres y además la temperatura del agua en la superficie y la altura y periodo de las olas, que son de gran importancia. El programa de boyas a la deriva afecta a 700 unidades que entregan diariamente 3 500 informes de la temperatura del mar y de la presión del aire en la superficie.

1.1.1.5 Observación desde aviones

Hay más de 3 000 aviones que facilitan informes de presión, viento y temperatura durante el vuelo. El sistema de enlace de datos meteorológicos por avión (AMDAR, *aircraft meteorological data relay*) efectúa observaciones de gran calidad de los vientos y las temperaturas a altura de crucero, así como a alturas seleccionadas durante el ascenso y el descenso. La cantidad de datos proporcionados por los aviones se ha multiplicado por diez en los últimos años llegando a alcanzar 50 000 informes diarios según las estimaciones. Estos sistemas ofrecen grandes posibilidades de efectuar mediciones en lugares donde los datos de las radiosondas son escasos o inexistentes y suponen una contribución de primer orden para el componente de atmósfera superior del SMO.

1.1.1.6 Observación desde satélites

La red de satélites de observación medioambiental y meteorológica está integrada por satélites de órbita cuasipolar y por satélites geoestacionarios de observación medioambiental (véase la Fig. 1-3). Los satélites de órbita polar y los geoestacionarios suelen estar dotados de captadores de imágenes visibles e infrarrojas y de sondas de microondas, que les permiten calcular muchos parámetros meteorológicos. Algunos de los satélites de órbita polar están dotados de instrumentos de sondeo capaces de proporcionar perfiles verticales de la temperatura y la humedad en zonas sin nubes. Los satélites geoestacionarios pueden utilizarse para medir la velocidad del viento en los trópicos a partir del seguimiento de las nubes y del vapor de agua. Los sensores de los satélites, las comunicaciones y las técnicas de asimilación de datos evolucionan sin cesar y la gran cantidad de datos adicionales proporcionados por los satélites ha contribuido enormemente a mejorar las predicciones meteorológicas. Los avances de la modelización numérica en particular, han permitido desarrollar métodos cada vez más complejos para calcular la información de la temperatura y de la humedad directamente de las radiancias de los satélites.

1.1.1.7 Planes futuros del SMO

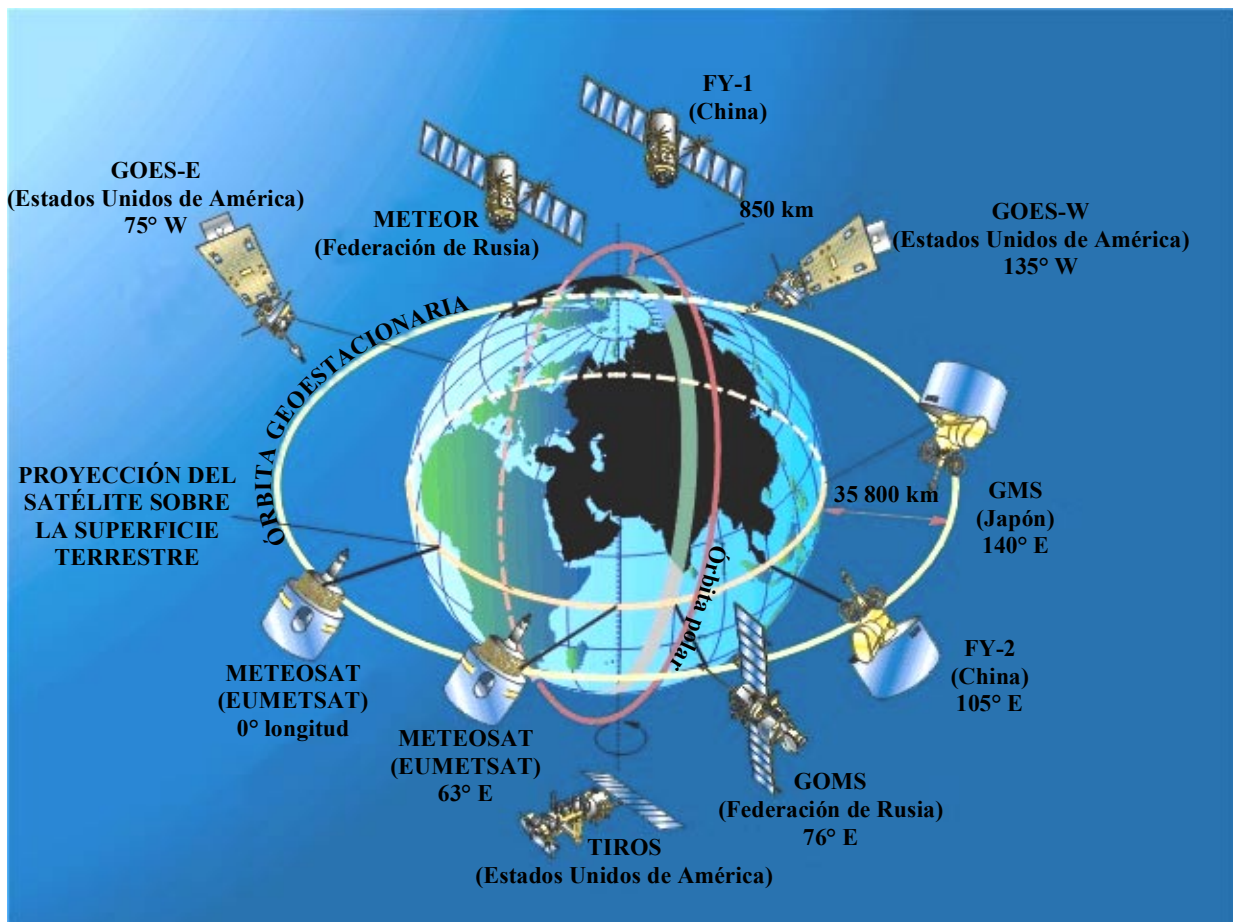
El SMO del VMM continuará siendo rentable para las plataformas de observación de superficie y para las espaciales (en satélites) de funcionamiento fiable. Los adelantos del futuro permitirán aumentar la resolución espacial y temporal de las observaciones. Cabe esperar que, en los sistemas

de superficie, se despliegan a mayor escala tecnologías tales como las de los radares de perfil del viento, Doppler y HF y las redes de detección de rayos. Cada vez se utilizarán más las flotas de aviones dotados de sistemas automáticos de observación e información para proporcionar datos a alturas de crucero y durante su ascenso y descenso. Las estaciones marítimas móviles continuarán constituyendo la principal fuente de observaciones sinópticas de superficie en los océanos.

Aumentará el número de barcos dotados de instalaciones automáticas de sondeo de la atmósfera superior y se estimulará el desarrollo de sistemas más rentables. Las boyas a la deriva, desplegadas fuera de las principales rutas marítimas continuarán suministrando parámetros atmosféricos de superficie y oceanográficos de las zonas oceánicas carentes de datos. Gracias al creciente empleo de la observación automática mediante satélite y de los equipos de transmisión, aumentará la calidad y cantidad de datos de origen espacial. Cabe esperar asimismo que los sistemas operativos con base en el espacio cuenten con una nueva generación de satélites de órbita polar y de satélites geoestacionarios con sistemas de detección mejorados. Los satélites cobrarán mayor protagonismo gracias a la utilización cada vez más frecuente de los sondeos y pseudosondeos realizados desde satélites geoestacionarios y gracias al mayor número de canales y al aumento de la precisión de las sondas de los satélites de órbita polar.

FIGURA 1-3

Constelación de satélites meteorológicos



1.2 Otros sistemas meteorológicos de los programas de la OMM

1.2.1 Vigilancia de la Atmósfera Global de la OMM

El programa de Vigilancia de la Atmósfera Global (VAG) integra varias actividades de supervisión e investigación de la OMM en el campo del medio ambiente atmosférico, entre ellas la red de control de la contaminación general atmosférica de la OMM y el sistema mundial de observación del ozono de la OMM. Comprende 22 observatorios y más de 300 estaciones regionales. El principal objetivo del VAG es suministrar información sobre la composición química de la atmósfera y características físicas afines necesarias para mejorar la comprensión del comportamiento de la atmósfera y su interacción con los océanos y la biosfera. Otros sistemas meteorológicos VAG proporcionan observaciones de la radiación solar, detectan rayos y miden la escala de las mareas.

1.2.2 Sistema Mundial de Observación del Clima

El Sistema Mundial de Observación del Clima (SMOC) tiene por objeto proporcionar observaciones con el nivel de detalle necesario para la supervisión del sistema climático, a fin de detectar y explicar el cambio climático, y de evaluar la repercusión de la variabilidad y del cambio del clima, y como apoyo a la investigación orientada a mejorar la comprensión, modelización y predicción del sistema climático. El SMOC contempla todo el sistema climático, incluidas las propiedades físicas, químicas y biológicas y los procesos atmosféricos, oceánicos, hidrológicos, criosféricos y terrestres.

1.2.3 Programa hidrológico y de recursos hídricos

Este programa se ocupa de la medición de los elementos hidrológicos básicos en las redes de estaciones hidrológicas y meteorológicas. Estas estaciones recogen, procesan, almacenan y utilizan datos hidrológicos, entre ellos los relativos a la cantidad y calidad de las aguas superficiales y de las subterráneas. El programa incluye el Sistema Mundial de Observación del Ciclo Hidrológico (WHCOS, *World Hydrological Cycle Observing System*), que se apoya en una red mundial de estaciones de referencia y que transmite datos hidrológicos y meteorológicos prácticamente en tiempo real.

CAPÍTULO 2

SERVICIO DE METEOROLOGÍA POR SATÉLITE

		Página
2.1	Definición del servicio de meteorología por satélite y atribuciones de frecuencia	8
2.2	Sistemas del servicio MetSat con satélites OSG	9
2.2.1	Transmisión de datos brutos de los sensores de imágenes	9
2.2.2	Difusión de los datos	9
2.2.2.1	Difusión de las imágenes de alta resolución	9
2.2.2.2	El S-VISSR	9
2.2.2.3	Variables GOES (GVAR)	10
2.2.2.4	El facsímil meteorológico	10
2.2.2.5	Distribución de los datos meteorológicos	11
2.2.2.6	Transmisión de información a baja velocidad	11
2.2.2.7	Transmisión de información a alta velocidad	11
2.2.2.8	El satélite meteorológico operacional geoestacionario (GOMS)	12
2.2.3	Plataformas de recogida de datos	12
2.3	Sistemas del servicio MetSat con satélites no OSG	13
2.3.1	Transmisión de datos brutos de los sensores de imágenes	13
2.3.2	Difusión de los datos	13
2.3.2.1	Transmisión automática de imágenes	13
2.3.2.2	Transmisión de imágenes de baja resolución	13
2.3.2.3	Transmisión de imágenes de alta resolución	13
2.3.3	Plataformas de recogida de datos	14

2.1 Definición del servicio de meteorología por satélite y atribuciones de frecuencia

El servicio de meteorología por satélite (MetSat) se define en el número 1.52 del Reglamento de Radiocomunicaciones (RR) como un «Servicio de exploración de la Tierra por satélite con fines meteorológicos». El SETS contempla el empleo de enlaces de radiocomunicaciones entre las estaciones terrestres y una o más estaciones espaciales a fin de suministrar:

- información sobre las características de la Tierra y sus fenómenos naturales procedente de sensores activos y pasivos situados en satélites terrestres;
- información recogida de plataformas aéreas o terrestres;
- información distribuida a las estaciones terrestres.

Este Capítulo trata de las aplicaciones del servicio MetSat y comprende las siguientes transmisiones de radiocomunicaciones (algunos de esos sistemas se denominan asimismo Servicios de lectura directa):

- transmisión de los datos de observación a las principales estaciones receptoras;
- retransmisión de datos preprocesados a las estaciones meteorológicas de usuario;
- transmisión por radiodifusión directa a las estaciones meteorológicas de usuario.

El UIT-R mantiene varias Recomendaciones UIT-R relativas al servicio MetSat. Otras comisiones de estudio se ocupan también de cuestiones de compatibilidad entre el servicio MetSat y los servicios implicados. Dada la intensidad de la actividad en curso destinada a compartir el espectro meteorológico con otros servicios y con otros usuarios, las Recomendaciones UIT-R están siendo revisadas y actualizadas constantemente y, al mismo tiempo, se están elaborando otras nuevas que se publican con cierta frecuencia. Para localizar la información más actualizada remítase el lector a la lista de Publicaciones de la UIT.

Las bandas de RF actualmente atribuidas al servicio MetSat son las siguientes:

Banda (MHz)	Atribución
Sentido espacio-Tierra	
137-138	Atribución primaria
400.15-401	Atribución primaria
460-470	Atribución secundaria
1 670-1 710	Atribución primaria
7 450-7 550	Atribución primaria, sólo para satélites geoestacionarios
7 750-7 850	Atribución primaria, sólo para satélites no geoestacionarios
Sentido Tierra-espacio	
401-403	Atribución primaria
8 175-8 215	Atribución primaria

RPV: vehículo pilotado a distancia.

VAV: vehículo aéreo no tripulado.

El servicio MetSat es una subclase del servicio SETS por lo que en el futuro las aplicaciones MetSat podrían utilizar también atribuciones del SETS (por ejemplo 25,5–27 GHz). Por otra parte, los MetSat suelen recoger datos por detección pasiva en frecuencias atribuidas a tal fin. Los MetSat recogen una diversidad de datos mediante sensores internos que suministran imágenes fotográficas tomadas a varias longitudes de onda (véase el Capítulo 5 en relación con la detección activa y

pasiva). Los satélites de exploración meteorológica y terrestre transportan sistemas tales como el ARGOS que retransmiten los datos enviados a estos sistemas por las plataformas de recogida de datos (PRD) que pueden encontrarse en el suelo o a bordo de aviones y barcos. Las PRD suelen transmitir en la banda 401–403 MHz datos relativos a parámetros tales como la temperatura superficial, velocidad del viento, índice de pluviosidad, altura de la corriente, gases residuales en la atmósfera y, cuando se trata de boyas flotantes, contaminantes oceánicos. También pueden transmitir su posición en un cierto instante, permitiendo de este modo calcular su movimiento.

Los datos brutos suele recibirlos en tierra firme la empresa de explotación, que los procesa y los distribuye a diversos servicios meteorológicos, archivos oficiales y usuarios comerciales. Entre los datos brutos se encuentran las fotografías de la Tierra tomadas a varias longitudes de onda a fin de suministrar una diversidad de informaciones útiles. Los datos procesados se suelen devolver al satélite para su retransmisión por radiodifusión directa a las estaciones de usuario mediante el facsímil meteorológico (WEFAX) y señales digitales de alta velocidad en la parte superior de la banda.

2.2 Sistemas del servicio MetSat con satélites OSG

2.2.1 Transmisión de datos brutos de los sensores de imágenes

Los datos que obtienen los sensores a bordo de satélites meteorológicos se transmiten a las principales estaciones de operaciones (a menudo denominadas estaciones de telemando y adquisición de datos o estaciones TAD) en la banda 1 670-1 690 MHz. Hay muy pocas estaciones de este tipo en el mundo, normalmente una o dos por sistema de satélite. Están dotadas de antenas de 10-18 m de diámetro, aproximadamente, y suelen funcionar con un ángulo de elevación mínimo de 3°. El factor de calidad de dichas estaciones es del orden de 23 dB/K. Las anchuras de banda de transmisión típicas se encuentran entre 2 MHz y 20 MHz dependiendo de las características de los sensores y los métodos de modulación empleados.

2.2.2 Difusión de los datos

2.2.2.1 Difusión de las imágenes de alta resolución

El servicio de difusión de imágenes de alta resolución (HRI, *high resolution image*) funciona en el satélite METEOSAT. La señal digital se transmite a una velocidad de datos de 166,7 kbit/s con modulación PCM/PM/SPL. El formato HRI es exclusivo del METEOSAT y la zona de cobertura coincide exactamente con la zona de telecomunicaciones METEOSAT (o sea, OSG ubicado a 0°). Hay aproximadamente 500 estaciones HRI de usuario de datos primarios registradas en EUMETSAT. Las transmisiones de datos contienen imágenes de alta resolución y entre ellas información sobre calibración y navegación. Los principales usuarios son los centros meteorológicos, las universidades, los meteorólogos privados y las emisoras de televisión.

Las radiodifusiones de HRI se realizan en la subbanda de frecuencias 1 690–1 698 MHz con frecuencias centrales situadas en 1 694,5 MHz y 1 691 MHz. La anchura de banda es de 660 kHz. El factor de calidad de las estaciones de recepción es de 10,5 dB/K; el diámetro típico de la antena es de 3 m; y el ángulo de elevación mínimo de la antena es de 3°. El servicio HRI se sustituirá en su momento por un servicio de transmisión de información digital de alta velocidad (HRIT, *high rate information transmission*) en los sistemas MetSat de segunda generación.

2.2.2.2 El S-VISSR

El servicio de radiometría ampliada de barrido rotatorio en el espectro visible y en el infrarrojo (S-VISSR) funciona en los siguientes sistemas de satélites:

- GMS (Japón);
- FY-2 (China).

Los datos observados mediante sensores VISSR se transmiten a las estaciones principales de operaciones en tierra del sistema de satélite en cuestión. En tierra, los datos se preprocesan prácticamente en tiempo real y se vuelven a transmitir por medio del mismo satélite a una velocidad de datos inferior (ampliada). Estos datos se reciben en las estaciones terrenas S-VISSR también denominadas estaciones de utilización de datos de media escala (MDUS, *medium-scale data utilization stations*). Se conoce más de un centenar de estaciones receptoras de este tipo en funcionamiento. Los principales usuarios son los servicios meteorológicos y las universidades.

Las transmisiones S-VISSR se efectúan en la subbanda 1 683-1 690 MHz. La anchura de banda típica de las transmisiones S-VISSR está en torno a 6 MHz. El factor de calidad de las estaciones receptoras es de 10,5 dB/K, y el ángulo de elevación mínimo de las antenas es de 5°.

El servicio GMS S-VISSR se sustituirá inicialmente por una versión actualizada denominada HiRID cuando el MTSAT sea operativo. El HiRID se sustituirá finalmente por el HRIT.

2.2.2.3 Variables GOES (GVAR)

Los satélites geoestacionarios operacionales del medio ambiente (GOES, *geostationary operational environmental satellites*), propiedad de Estados Unidos de América, transmiten datos procesados denominados GVAR a un mínimo de varios centenares de estaciones receptoras que se encuentran en el interior de la traza del satélite GOES situado en 75° W y 135° W. Entre éstas, además de las estaciones situadas en América del Norte y América del Sur, hay otras situadas en Nueva Zelanda, Francia y Gran Bretaña. La mayor parte de los destinatarios son universidades y agencias estatales dedicadas a la investigación y predicción meteorológicas. Hay además proveedores de valor añadido que suministran predicciones meteorológicas a empresas comerciales. El flujo de datos, transmitido a 1 685,7 MHz con una anchura de banda de 5 MHz, aproximadamente, consiste principalmente en imágenes y datos de la sonda con información suplementaria de calibración y navegación, así como telemetría, mensajes de texto y diversos productos auxiliares.

Estas transmisiones S-VISSR y GVAR se envían a las estaciones de usuario desde cada uno de los satélites. Las transmisiones S-VISSR son comunes para GMS-5 y FY-2, mientras que las transmisiones GVAR sólo están disponibles en América (procedentes de los satélites GOES de Estados Unidos de América, de donde les viene el nombre). Mientras que las señales GVAR estaban destinadas inicialmente a la recepción por parte de las estaciones TAD principalmente, su utilidad ha hecho que las reciban una gran diversidad de usuarios. Además de los usuarios principales, las agencias meteorológicas nacionales, entre estos otros usuarios se encuentran las agencias privadas de predicción meteorológica y las empresas cuya actividad depende del conocimiento de las condiciones meteorológicas en las zonas de las que no suele haber predicción, por ejemplo en las masas continentales aisladas y en los océanos. Se sabe que hay fabricantes que comercializan receptores GVAR y S-VISSR para el público. Por otra parte, los particulares con habilidades tecnológicas pueden montar receptores con facilidad a partir de componentes existentes en el mercado. Como las estaciones puramente receptoras no suelen necesitar licencia ni registro, no es posible determinar el número ni la ubicación de estas estaciones.

2.2.2.4 El facsímil meteorológico

El servicio de facsímil meteorológico (WEFAX) consiste en transmisiones analógicas de bajo costo a estaciones meteorológicas de usuario dentro de la zona de recepción de los satélites meteorológicos. Los parámetros del servicio WEFAX se definieron y fueron pactados en el Grupo de Coordinación sobre Satélites Meteorológicos (CGMS, *coordination group meteorological satellites*). Los servicios WEFAX funcionan en los siguientes sistemas de satélites:

- GOES-E (Estados Unidos de América)
- GOES-W (Estados Unidos de América)

- GMS (Japón)
- GOMS (Rusia)
- METEOSAT (EUMETSAT)
- FY-2 (China).

La OMM ha registrado varios miles de estaciones receptoras WEFAX de todo el mundo, no obstante al igual que en el caso de los receptores GVAR y S-VISSR, no se conoce exactamente el número real de receptores en funcionamiento. Las estaciones receptoras WEFAX son equipos indispensables para el funcionamiento de los servicios meteorológicos más pequeños y de tamaño medio y se utilizan asimismo en las universidades, agencias medioambientales, agencias de prensa, colegios, etc. Las estaciones receptoras WEFAX se denominan asimismo estaciones de usuario de datos secundarios (SDUS, *secondary data user stations*) (METEOSAT y GMS) y estaciones LR-FAX (FY-2).

La transmisión de los servicios WEFAX se realiza en la subbanda 1 690-1 698 MHz. La mayor parte de los servicios WEFAX tienen como frecuencia central 1 691 MHz y una anchura de banda entre 0,03 MHz y 0,26 MHz. Las estaciones receptoras WEFAX típicas funcionan con ángulos de elevación superiores a 3°, utilizan antenas de 1,2 m de diámetro y su factor de calidad (G/T) es de 2,5 dB/K. El contenido de las transmisiones WEFAX consiste en sectores de imágenes de satélites, representación gráfica de productos meteorológicos, imágenes de prueba y mensajes administrativos con información alfanumérica en forma de representación gráfica. El servicio WEFAX analógico se sustituirá por el servicio de transmisión digital de información de baja velocidad (LRIT, *low rate information transmission*) en los sistemas de satélites meteorológicos de segunda generación.

2.2.2.5 Distribución de los datos meteorológicos

El servicio de distribución de datos meteorológicos (MDD, *meteorological data distribution*) es exclusivo de las operaciones del METEOSAT. Consiste en la radiodifusión de cuatro canales, de datos con una velocidad de datos de 2 400 kbit/s en cada uno. Las transmisiones se efectúan en la banda de 1 695,68 a 1 695,86 MHz. Hay cientos de estaciones de usuario, principalmente en Europa y en África. Las estaciones de usuario MDD utilizan antenas de 2,4 m de diámetro y requieren un factor de calidad de 6 dB/K. Su funcionamiento requiere un ángulo de elevación mínimo de 3°.

2.2.2.6 Transmisión de información a baja velocidad

La LRIT será un nuevo servicio ofrecido por los satélites meteorológicos geoestacionarios para la transmisión con destino a estaciones de usuario de bajo costo. Se pretende que este servicio sustituya al servicio WEFAX y que atienda a una comunidad de usuarios semejante. Se prevé que haya miles de estaciones de usuario denominadas estaciones de usuario de baja velocidad (LRUS, *low rate user stations*).

Las transmisiones de LRIT se efectuarán en la subbanda de 1 690-1 698 MHz con frecuencias centrales en torno a 1 691 MHz. La anchura de banda será de 200 kHz como máximo. Las antenas de las estaciones de usuario tendrán 1,8 m de diámetro aproximadamente y funcionarán con un ángulo de elevación mínimo de 3°. El factor de calidad de las LRUS será de 5-6 dB/K (GMS: 3 dB/K) dependiendo de la ubicación de la estación del usuario.

2.2.2.7 Transmisión de información a alta velocidad

El servicio HRIT se introducirá en los satélites METEOSAT de segunda generación y en el MTSAT, y sustituirá el actual servicio HRI y al S-VISSR. Cabe esperar que en el futuro otros operadores de satélite adopten HRIT para sus servicios de radiodifusión por satélite. Se prevé

asimismo que haya varios centenares de estaciones de usuario de alta velocidad (HRUS, *high rate user stations*) y MDUS en funcionamiento por todo el mundo. La comunidad de usuarios estará formada por los principales centros meteorológicos y climatológicos así como por las universidades y otras comunidades de usuarios que quieren productos numéricos.

El servicio HRIT operará en la subbanda de 1 690-1 698 MHz. El tamaño de la antena para las HRUS y las MDUS será de 4 metros y el ángulo de elevación mínimo será de 3°. El factor de calidad para las mismas estaciones de usuario será de 12-14 dB/K dependiendo de la ubicación de la estación del usuario.

2.2.2.8 El satélite meteorológico operacional geoestacionario (GOMS, *geostationary operational meteorological satellite*)

El sistema GOMS de Rusia transmite datos brutos de imágenes en la banda 7 450-7 550 MHz con formato de alta resolución directa (HRD, *high resolution direct*) susceptible de ser recibido por cualquier usuario. La anchura de banda de la señal es de 5 MHz. Hay dos tipos de estaciones receptoras para estos datos con antenas de 3 m y 12 m de tamaño.

2.2.3 Plataformas de recogida de datos

Las plataformas de recogida de datos (PRD) funcionan en satélites meteorológicos y tienen como misión la recogida de datos meteorológicos y otros datos medioambientales procedentes de PRD remotas. Las transmisiones de las PRD a los satélites se efectúan en la banda de frecuencias 401-403 MHz. Las PRD funcionan en modo temporal secuencial. Los intervalos temporales de transmisión suelen ser de 1 min. Las velocidades de transmisión son de 100 bit/s. Las PRD de velocidades binarias superiores (300 bit/s y 1 200 bit/s) están actualmente funcionando en pruebas. Las anchuras de bandas de las PRD son 1,5 kHz o 3 kHz. Hay dos tipos de transmisores PRD en funcionamiento, uno con una potencia de salida de 5 W y antena direccional y otro con una potencia de salida de 40 W y antena omnidireccional. La potencia isotrópica radiada equivalente (p.i.r.e.) del enlace ascendente resultante es de 40-52 dBm. Los sistemas de recogida de datos funcionan en los siguientes sistemas de satélites meteorológicos geoestacionarios:

- GOES-E (Estados Unidos de América)
- GOES-W (Estados Unidos de América)
- METEOSAT (EUMETSAT)
- GOMS (Rusia)
- MTSAT (Japón)
- FY-2 (China)

Las PRD que informan a los MetSat geoestacionarios utilizan frecuencias en el intervalo de 401,7-402,4 MHz, destinándose la banda de 402,0-402,1 MHz a la actividad internacional (33 canales de 3 kHz de anchura). Los satélites GOES (Estados Unidos de América) tienen atribuidas frecuencias a nivel nacional en el intervalo de 401,7 a 402,0 MHz, mientras que METEOSAT (Europa) y GMS (Japón) utilizan las bandas 402,1-402,4 MHz y el GOMS (Rusia) utiliza la banda de 401,7-402,4 MHz (su entrada en funcionamiento está prevista para 2003). Gracias a la utilización de bandas estrechas (de tan sólo 1,5 kHz) y a la intercalación de los periodos de comunicación de informes, se pueden recibir datos de un gran número de plataformas. Actualmente hay algo más de 11 000 PRD GOES, y se prevé que el número crezca más del doble alcanzando las 23 000. Este grado de utilización tan elevado necesitará probablemente ampliar la utilización del espectro a frecuencias superiores, desplazándose estas plataformas informantes hacia 403 MHz.

2.3 Sistemas del servicio MetSat con satélites no OSG

2.3.1 Transmisión de datos brutos de los sensores de imágenes

Los datos brutos de los satélites meteorológicos europeos de órbita polar se transmitirán en la banda de frecuencias 7750-7850 MHz a estaciones principales ubicadas en latitudes elevadas. Estos sistemas de satélites suelen estar atendidos por un máximo de cuatro estaciones receptoras. Las transmisiones se efectuarán en ráfagas en el momento en que cada satélite sobrevuele la estación receptora adecuada, desconectándose los transmisores el tiempo restante. Los sistemas serán explotados por la Agencia Espacial Europea (ESA)/EUMETSAT a partir de 2003. La anchura de banda de transmisión típica será de 100 MHz y el G/T de la estación receptora 32 dB/K. Los diagramas de las antenas se ajustarán a lo prescrito en el Apéndice 7 del RR.

2.3.2 Difusión de los datos

2.3.2.1 Transmisión automática de imágenes

El servicio de transmisión automática de imágenes (APT, *automatic picture transmission*) se introdujo en los vehículos espaciales de Estados Unidos de América en los años sesenta llegando a ser el servicio de radiodifusión directa de más éxito en la comunidad meteorológica. Hay miles de estaciones receptoras APT en funcionamiento en todo el mundo. Las estaciones APT son muy económicas y las explotan no sólo los servicios meteorológicos de las universidades sino también una gran comunidad de usuarios ajenos a la meteorología. El servicio APT está soportado por la NOAA (Estados Unidos de América) y por los satélites METEOR, Okean y Resurs-01#4 (Rusia).

Las transmisiones APT se efectúan con arreglo a un plan de modulación analógica. Las transmisiones se efectúan en la banda 137-138 MHz con anchuras de banda típicas de 40-50 kHz aunque alcanzando los 175 kHz. La radiodifusión APT en el futuro se restringirá a dos subbandas de la banda 137-138 MHz: la subbanda 137-137,175 MHz y la 137,825-138 MHz.

Las estaciones APT suelen estar dotadas de antenas omnidireccionales y de receptores de ondas métricas adquiribles en el mercado (COTS, *commercial-off-the-shelf*). A este frontal se incorporan sistemas de procesamiento de imagen de bajo costo con programas informáticos económicos ejecutables en computadores de sobremesa de fácil adquisición.

2.3.2.2 Transmisión de imágenes de baja resolución

El servicio de transmisión de imágenes de baja resolución (LRPT, *low resolution picture transmission*) está destinado a sustituir al servicio APT en las futuras generaciones de MetSat no OSG. Estará basado en planes de transmisión digital y utilizará las mismas bandas de frecuencias que las utilizadas actualmente para APT. La anchura de banda será asimismo de 175 kHz como máximo. Cabe esperar que la mayor parte de los usuarios APT migren a LRPT, y que llegue a haber miles de estaciones de usuario en todo el mundo. La LRPT será utilizada en primer lugar por EUMETSAT en los satélites METOP/EPS. Cabe esperar la aparición de servicios LRPT soportados por Estados Unidos de América, Rusia y China.

2.3.2.3 Transmisión de imágenes de alta resolución

El servicio de transmisión de imágenes de alta resolución (HRPT, *high resolution picture transmission*) lo ofrecen actualmente los satélites de la NOAA (Estados Unidos de América) y está destinado al suministro de imágenes de alta resolución para la comunidad meteorológica. Rusia proyecta asimismo ofrecer transmisiones HRPT. Además, hay un servicio de radiodifusión semejante al HRPT ofrecido por satélites chinos (véase CHRPT más adelante). Las transmisiones HRPT tienen carácter permanente pudiendo recibirlas cualquier estación de usuario en la zona de

recepción del satélite. Hay cientos de estaciones receptoras HRPT de todo el mundo registradas en la OMM. Debe advertirse una vez más que este número no es totalmente fiable puesto que la inscripción de estas estaciones no tiene carácter obligatorio. Los datos HRPT son indispensables para la explotación de los servicios meteorológicos y son asimismo de gran utilidad en otros cometidos.

Las transmisiones HRPT se efectúan en la banda de frecuencias 1 696-1 710 MHz con anchuras de banda de señal entre 2,7 MHz y 4,5 MHz. Las estaciones de usuario están dotadas de antenas parabólicas de seguimiento que suelen tener entre 2,4 y 3 m de diámetro. El ángulo de elevación mínimo para la recepción es de 5°, aunque algunas estaciones funcionan por debajo de este nivel. El factor de calidad de las estaciones es de 5 dB/K.

2.3.2.3.1 La HRPT china

Las principales características de la HRPT china (CHRPT) son similares a la HRPT. La diferencia más importante radica en la velocidad binaria de transmisión, que es el doble de la correspondiente a la HRPT. La anchura de banda de las transmisiones se encuentra dentro del intervalo dado para la HRPT. Las radiodifusiones CHRPT son exclusivas de los satélites FY-1.

2.3.2.3.2 La HRPT avanzada

El servicio de HRPT avanzado está destinado a sustituir a la HRPT en los satélites meteorológicos del futuro. Se prevé la introducción de este servicio en el METOP/EPS de EUMETSAT y en los satélites PRC FY3 (denominados también CHHRPT). Los operadores de satélite pueden migrar a este nuevo servicio u optar por continuar con las transmisiones HRPT durante algún tiempo.

Las transmisiones AHRPT se efectuarán en la banda 1 698-1 710 MHz. La anchura de banda será de 4,5 MHz. Las estaciones receptoras AHRPT funcionarán con ángulos de elevación mínimos de 5°. Las antenas serán parabólicas con diámetros típicos de 2,4-3 m. El factor de calidad de las estaciones será de 6,5 dB/K. La CHHRPT funcionará a 1 704,5 MHz.

2.3.3 Plataformas de recogida de datos

Las PRD proporcionan una diversidad de informaciones que utilizan principalmente las agencias estatales aunque también las empresas privadas. Entre estos datos cabe citar una serie de parámetros medioambientales sobre los océanos, ríos, lagos, tierra firme y atmósfera relativos a procesos físicos, químicos y biológicos incluido el seguimiento de los movimientos de animales. La utilización por empresas privadas es limitada, aunque comprende la supervisión de las condiciones de los oleoductos a fin de proteger el medio ambiente. Las PRD de alerta se utilizan asimismo para comunicar emergencias y suministrar datos para el reconocimiento de peligros o catástrofes. El sistema de recogida de datos utilizado con satélites meteorológicos no geoestacionarios se denomina ARGOS. Actualmente sólo se utiliza a bordo de los satélites de órbita polar de la NOAA. La ampliación de ARGOS está proyectada con vuelos sobre ADEOS-2 (Japón) y con la nueva serie de satélites europeos de órbita polar, conocidos como METOP y con una nueva generación de satélites rusos de órbita polar (METEOR-3M).

La atribución a 401-403 MHz para esta PRD fue actualizada a primaria en la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones de 1997 (CMR-97). El sistema ARGOS utiliza 401,65 MHz como frecuencia central, utilizando anchuras de banda de hasta 100 kHz, aunque muchas plataformas (denominadas terminales transmisores de plataforma) sólo requieren unos pocos kHz. Aprovechando el carácter polar de las órbitas de estos satélites se pueden acomodar muchas plataformas ARGOS. Las estimaciones para el futuro prevén que las 3 800 plataformas actuales lleguen a convertirse en 8 700, lo que exigirá la utilización de espectro adicional, tal vez con una frecuencia más baja, es decir en torno a los 401 MHz.

CAPÍTULO 3

SERVICIO DE AYUDAS A LA METEOROLOGÍA

	Página
3	Introducción 16
3.1	Bandas de RF atribuidas..... 16
3.2	Funciones meteorológicas del servicio MetAids 17
3.3	Ejemplos de sistemas de detección MetAids 19
3.3.1	Las radiosondas 19
3.3.2	Las radiosondas en paracaídas 20
3.3.3	Los cohetes sonda..... 21
3.4	Factores que repercuten en las características de los sistemas MetAids..... 23
3.4.1	Sistema de antena receptora en tierra..... 23
3.4.2	Sistema de procesamiento en tierra..... 24
3.4.3	Módulos sensores no recuperables..... 24
3.5	Características de las observaciones meteorológicas requeridas por el servicio MetAids..... 26
3.6	Justificación de las versiones nacionales de las operaciones del servicio MetAids..... 29
3.6.1	Tecnología disponible 29
3.6.2	Diferencias en la climatología de los vientos de altura..... 29
3.6.3	Diferencias en la densidad de las redes..... 30
3.6.4	Utilización de la banda 401-406 MHz 30
3.6.5	Utilización de la banda 1 668,4-1 700 MHz 31
3.6.6	Requisitos para la retención de ambas bandas 31
3.7	Tendencias para el futuro 32
3.7.1	Determinación del viento mediante los GPS..... 32
3.7.2	Circuitos integrados para transmisores existentes en el mercado 32
3.7.3	Incremento de la densidad de la red MetAids..... 32

3 Introducción

El servicio de ayuda a la meteorología (MetAids) se define en el número 1.50 del RR como un servicio de radiocomunicación destinado a las observaciones y sondeos utilizados en meteorología, con inclusión de hidrología.

En la práctica, el servicio MetAids suele proporcionar el enlace entre un sistema local de detección de variables meteorológicas y una estación base remota. El sistema local de detección puede ser transportado, por ejemplo, por un globo meteorológico. Otra alternativa es la de ser lanzado en paracaídas a través de la atmósfera desde un avión o un cohete meteorológico. La estación base puede encontrarse en una ubicación fija o montarse en una plataforma móvil como las que se utilizan en operaciones de defensa. Las estaciones base se transportan en barcos y en aviones destinados a la vigilancia de huracanes o a la investigación.

3.1 Bandas de RF atribuidas

Las atribuciones actuales al servicio MetAids (además de las reguladas por disposiciones específicas) son las siguientes:

Banda de frecuencias	Estado	Otros servicios primarios en esta banda
2 025-2 045 kHz	Secundario (Región 1)	FIJO, MÓVIL
27,5-28 MHz	PRIMARIO	FIJO, MÓVIL
153-154 MHz	Secundario (Región 1)	FIJO, MÓVIL
400,15-401 MHz	PRIMARIO	METEOROLOGÍA POR SATÉLITE (espacio-Tierra) MÓVIL POR SATÉLITE (espacio-Tierra) INVESTIGACIÓN ESPACIAL (espacio-Tierra)
401-402 MHz	PRIMARIO	OPERACIONES ESPACIALES (espacio-Tierra) METEOROLOGÍA POR SATÉLITE (Tierra-espacio) EXPLORACIÓN DE LA TIERRA POR SATÉLITE (Tierra-espacio)
402-403 MHz	PRIMARIO	METEOROLOGÍA POR SATÉLITE (Tierra-espacio) EXPLORACIÓN DE LA TIERRA POR SATÉLITE (Tierra-espacio)
403-406 MHz	PRIMARIO	
1 668,4-1 670 MHz	PRIMARIO	FIJO, MÓVIL RADIOASTRONOMÍA
1 670-1 675 MHz	PRIMARIO	FIJO, MÓVIL METEOROLOGÍA POR SATÉLITE (espacio-Tierra)
1 675-1 690 MHz	PRIMARIO	FIJO, MÓVIL METEOROLOGÍA POR SATÉLITE (espacio-Tierra) MÓVIL POR SATÉLITE (Tierra-espacio) (sólo Región 2)
1 690-1 700 MHz	PRIMARIO	METEOROLOGÍA POR SATÉLITE (espacio-Tierra) MÓVIL POR SATÉLITE (Tierra-espacio) (sólo Región 2)
35,2-36 GHz	PRIMARIO	RADIOLOCALIZACIÓN

Esta lista muestra los servicios que son también primarios en las bandas utilizadas por el servicio MetAids. Las atribuciones a otros servicios suponen una limitación importante para el servicio MetAids. La compartición de un mismo canal entre el MetAids y otros servicios no suele ser viable debido a la escasa potencia de transmisión de la mayor parte de los sistemas MetAids para enlaces de alcance relativamente largo. Por este motivo, la compartición de bandas se realiza principalmente por segmentación de las mismas. Esto puede organizarse a nivel internacional con otros sistemas meteorológicos bajo los auspicios de la OMM o a nivel nacional con los sistemas no meteorológicos.

La OMM publica periódicamente un catálogo actualizado de sistemas de radiosonda activos dentro de la red OMM, de modo que los meteorólogos que utilicen las mediciones puedan determinar el tipo de radiosonda utilizada en cada una de las estaciones. Este catálogo contiene asimismo un registro de la banda de frecuencias utilizada.

Entre los usuarios del servicio MetAids se encuentran asimismo:

- las agencias del medio ambiente
- las universidades y los grupos de investigación meteorológica
- los servicios de defensa.

Estos sistemas adicionales suelen funcionar con independencia de las operaciones habituales de los servicios meteorológicos nacionales y no se consignan en el catálogo de la OMM. Muchos de los sistemas MetAids ajenos a la OMM están montados en plataformas móviles y pueden desplegarse en un gran número de ubicaciones durante su funcionamiento. El número de radiosondas vendidas a estos grupos independientes es bastante próximo al de las utilizadas en la red OMM convencional. La explotación de sistemas adicionales no suele ser objeto de reglamentación por parte de las autoridades nacionales de radiocomunicación.

En ciertos países se evita la compartición de un mismo canal entre los distintos grupos de operadores de radiosonda gracias a la utilización de un plan detallado de canales. No obstante, en muchos países se sigue un planteamiento pragmático de utilización del espectro. Antes del lanzamiento de la radiosonda el operador del sistema de radiosonda explora el espectro MetAids disponible con el receptor de la estación base. Esto permite determinar si ya hay radiosondas funcionando cerca del lugar de lanzamiento. A continuación se escoge la frecuencia de la radiosonda a lanzar (sintonizándose antes del lanzamiento, de ser necesario) de modo que su funcionamiento no perjudique a los sistemas que ya se encuentren en vuelo. El espectro MetAids disponible para un servicio MetAids nacional suele estar limitado a una subbanda del permitido por el RR debido a los acuerdos de compartición nacional con otros servicios de radiocomunicaciones, como se ha indicado anteriormente.

El análisis de la utilización del servicio MetAids entre 1978 y 1988 puso de manifiesto la existencia en el mercado de sistemas de radiosonda funcionando en la red OMM a radiofrecuencias comprendidas entre 27,5 y 28 MHz, 400,15 y 406 MHz y entre 1 668,4 y 1 700 MHz. Por este motivo, dejó de utilizarse la radiosonda convencional en la banda 27,5-28 MHz que interfería con otros servicios. La justificación para seguir utilizando dos bandas del servicio MetAids se consigna en un capítulo posterior, tras la exposición detallada de los sistemas utilizados.

3.2 Funciones meteorológicas del servicio MetAids

La exactitud en las mediciones de la variación de la temperatura atmosférica, la humedad relativa y la velocidad y dirección del viento con la altura son indispensables para la meteorología operativa. Estas mediciones definen las características básicas de los sistemas meteorológicos permitiendo al meteorólogo definir la situación probable a corto plazo. También constituyen la entrada a los modelos numéricos de predicción meteorológica que se utilizan para elaborar las predicciones a largo plazo. Las predicciones a corto plazo requieren una gran resolución vertical en las mediciones de temperatura y humedad relativa. Por ejemplo, la posición de las nubes próximas a la superficie necesita medirse con una precisión superior a 100 m en la dimensión vertical.

El servicio MetAids ha sido durante muchas décadas la principal fuente de mediciones atmosféricas de alta resolución vertical. El MetAids transmite las mediciones locales de variables meteorológicas de la atmósfera desde posiciones situadas en la superficie a una estación base dotada de un receptor y de un sistema de proceso de datos. En la mayor parte de los casos se mide la presión (o altura), la temperatura, la humedad relativa y la velocidad y dirección del viento. Pueden medirse asimismo componentes atmosféricos tales como el ozono, los aerosoles y la radioactividad. La salida de la estación base se transmite a las redes de comunicaciones meteorológicas integrándose con los datos procedentes de otras estaciones receptoras. Los MetAids no se suelen recuperar tras su uso, de modo que el costo del transmisor y del módulo de detección debe reducirse al mínimo.

En los sistemas MetAids más comunes, una radiosonda operacional puede transportarse en un globo meteorológico hasta alturas de 36 km por encima de la superficie. La altura requerida para las observaciones periódicas varía hasta cierto punto con la aplicación y la situación geográfica. En muchos países, las operaciones meteorológicas habituales intentan alcanzar la altura de 25 km por encima de la superficie, aunque ciertas estaciones necesitan efectuar sus mediciones a alturas superiores a los 30 km. Las predicciones a escala mundial necesitan tener en cuenta los movimientos de la atmósfera en los niveles superiores, aunque con menos detalle que el necesario para las condiciones próximas a la superficie. No obstante, la supervisión del clima a largo plazo y la investigación científica asociada necesitan efectuar mediciones a la máxima altura atmosférica posible.

Las mediciones de las radiosondas se transmiten durante un máximo de dos horas a una estación base situada en el lugar de lanzamiento del globo. El globo se desplaza con los vientos de las capas atmosféricas superiores durante este tiempo y en ciertas ocasiones puede alejarse más de 250 km del punto de lanzamiento durante su ascenso. Durante su descenso, puede viajar otros 150 km. La potencia de transmisión se mantiene siempre baja, por las limitaciones que imponen las baterías disponibles. Las baterías deben funcionar a temperaturas muy bajas como las existentes durante el vuelo y no deben perjudicar al medio ambiente ni constituir un peligro para la población al caer a tierra tras la explosión del globo.

Cada día se lanzan más de 1 400 radiosondas de la red SMO de la OMM. La información proporcionada por las radiosondas operacionales la utilizan los servicios meteorológicos nacionales sin pérdida de tiempo para elaborar las predicciones locales. Esta información también es necesaria para elaborar las predicciones meteorológicas numéricas de todo el mundo con el objetivo de transmitir los boletines (en código meteorológico normalizado) a todos los servicios meteorológicos del mundo antes de tres horas. Además, los boletines se archivan permanentemente para utilizarlos en un gran número de investigaciones científicas. Otros sistemas MetAids desplegados actualmente, aunque en número más reducido, son los siguientes:

Tipo	Descripción
Radiosondas en paracaídas	Se lanzan en paracaídas desde aviones a gran altitud. Las radiosondas en paracaídas suelen transmitir durante media hora aproximadamente a la estación receptora situada en un avión
Sondas cautivas	Transmiten continuamente desde un globo cautivo que se encuentra normalmente dentro de los límites de la atmósfera
Cohetes sonda	Transmiten las mediciones atmosféricas a alturas de hasta 95 km para la investigación científica especializada o se lanzan desde barcos para mediciones a baja altura
Pequeñas aeronaves no tripuladas (vehículo pilotado a distancia (RPV, <i>remotely piloted vehicle</i>) y vehículo aéreo no tripulado (UAV, <i>unmanned aerial vehicle</i>))	Transportan un módulo detector semejante a la radiosonda hasta zonas oceánicas remotas y transmiten asimismo información en forma de boletines meteorológicos normalizados

El coste actual de las mediciones con radiosonda limita la separación óptima de la red operacional de radiosondas a 250 km en dirección horizontal. Esta separación se utiliza como norma para los estudios de redes sobre el espectro necesario para el servicio operacional MetAids. No obstante, la resolución adecuada para la persistencia de las características de los sistemas meteorológicos organizados necesita que las mediciones se efectúen con una separación máxima de 50 km en dirección horizontal. La investigación meteorológica requiere esta separación en las mediciones con radiosondas y sondas en paracaídas. En el futuro, las atribuciones de frecuencia deberán atender tanto la utilización de las radiosondas operacionales como las de las comunidades de investigación.

La pequeña disminución del número de estaciones operacionales de radiosonda de la red SMO se compensa con la utilización cada vez mayor de las radiosondas por parte de los servicios medio-ambientales y de defensa. Además, los servicios meteorológicos nacionales están exigiendo la realización de más mediciones sobre el terreno en zonas oceánicas específicas. Se prevé un aumento importante de la utilización de los sistemas MetAids más modernos en la próxima década para dar respuesta a los requisitos de ampliación.

3.3 Ejemplos de sistemas de detección MetAids

3.3.1 Las radiosondas

Cada año se lanzan 800 000 radiosondas en globo en todo el mundo; véanse las Figs. 3-1 y 3-2. Los emplazamientos de las estaciones de base para el lanzamiento de radiosondas suelen estar dotados de equipos especiales para que el lanzamiento de los globos pueda realizarse con independencia de las condiciones meteorológicas. Los emplazamientos más críticos están dotados de equipos de alimentación de reserva y del correspondiente alojamiento de modo que las mediciones puedan realizarse incluso en el caso de que las infraestructuras locales queden dañadas por condiciones meteorológicas extremas, por accidentes laborales o por otras circunstancias.

FIGURA 3-1

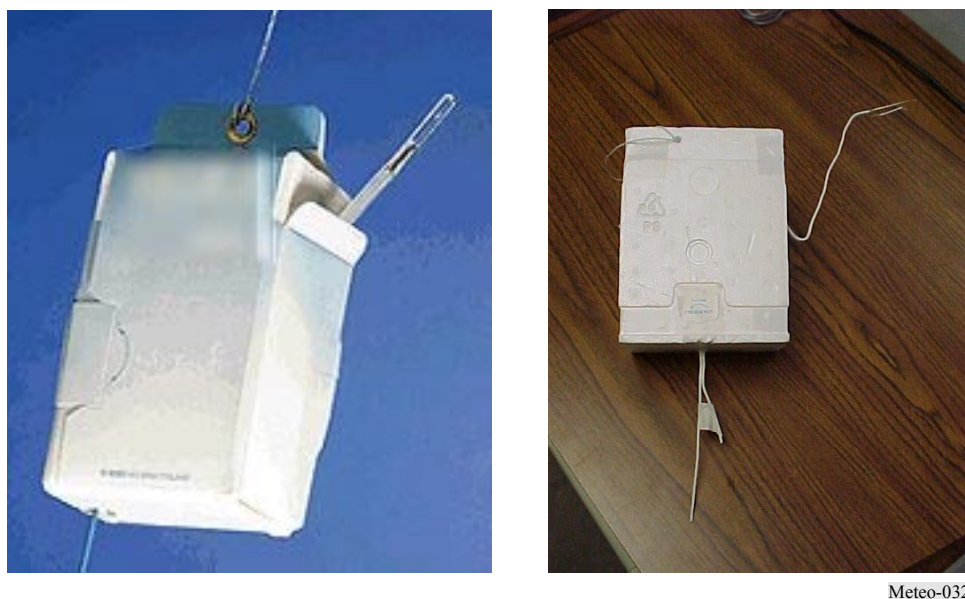
Tren de vuelo de una radiosonda



Meteo-031

FIGURA 3-2

Radioondas



Una radiosonda típica está integrada por varios elementos importantes: el transmisor, el módulo sensor, la batería y un receptor de ayuda a la navegación (NAVAID). Véase la Fig. 3-3. El transmisor envía los datos a la estación receptora. El módulo sensor contiene los detectores que miden condiciones atmosféricas tales como la temperatura, la presión, la humedad, el ozono y la radiación ionizante. El módulo sensor efectúa asimismo la codificación de los valores de los detectores necesaria para su transmisión a la estación en tierra. Si la radiosonda utilizase señales NAVAID para la medición del viento, contendría un receptor NAVAID para el tipo de señales utilizadas. Las radiosondas NAVAID utilizan señales del sistema mundial de determinación de la posición (GPS), LORAN y VLF. Las radiosondas se alimentan mediante baterías. Las baterías suelen ser hidroactivadas y fabricadas específicamente para su utilización en radiosondas, ya que las baterías alcalinas existentes en el mercado no pueden funcionar a temperaturas ambiente inferiores a -90°C .

La descomposición de costos de una radiosonda típica supone que el 20%-30% corresponde al transmisor, el 45%-60% al módulo sensor, el 20%-50% al receptor NAVAID (en su caso) y el 15%-25% a la batería. Algunos transmisores de radiosonda presentan características relativamente inferiores a las de la mayoría de los servicios de radiocomunicación. La utilización con carácter general de transmisores de escasa estabilidad y emisiones con un gran ancho de banda se debe a su costo relativamente bajo. Por la misma razón que la potencia de procesamiento en la radiosonda se ha reducido al mínimo, se ha evitado normalmente la utilización de transmisores de gran estabilidad hasta que la tecnología se pueda adquirir a un precio razonable. No obstante, en algunas redes nacionales las condiciones de funcionamiento exigen ya la utilización de transmisores de banda estrecha de gran estabilidad.

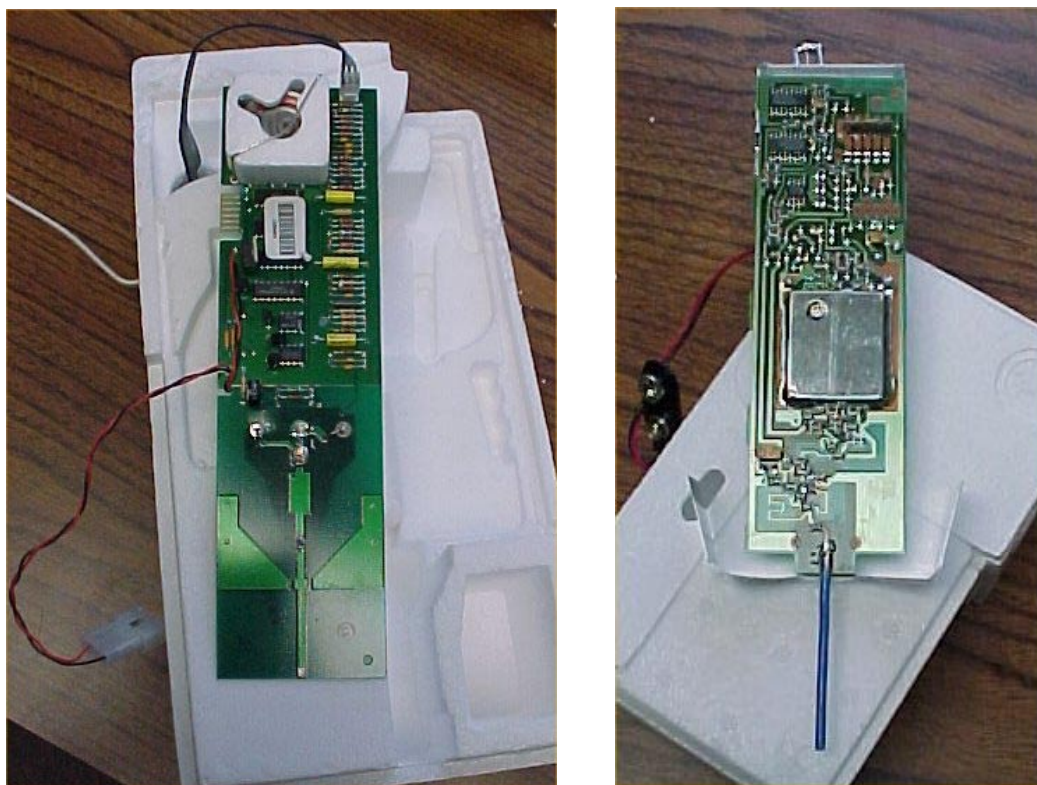
3.3.2 Las radiosondas en paracaídas

Las radiosondas en paracaídas están integradas por componentes semejantes a los de las radiosondas convencionales aunque el montaje del sistema se modifica de modo que puedan lanzarse en paracaídas desde un avión para determinar el perfil de la atmósfera durante su descenso; véase la

Fig. 3-4. Al no ser viable la utilización de grandes antenas de seguimiento en los aviones, todas las sondas de paracaídas funcionan en la banda 401-406 MHz y utilizan NAVAJD (actualmente GPS) para la medición del viento. En lo que se refiere a su operatividad, las radiosondas con paracaídas se despliegan con una densidad espacial y temporal muy superior a la de las radiosondas. Se utilizan principalmente para el seguimiento y definición de las tormentas tropicales sobre el mar. Pueden lanzarse y controlarse hasta 12 radiosondas en paracaídas simultáneamente. La gran densidad de su despliegue exige la utilización de transmisores de banda estrecha de gran estabilidad, similares a los utilizados en las partes más densas de la red de radiosondas.

FIGURA 3-3

Sistemas electrónicos de la radiosonda



Meteo-033

3.3.3 Los cohetes sonda

Los cohetes sonda son sistemas MetAids más especializados. Al igual que las radiosondas en paracaídas, determinan el perfil de la atmósfera durante su descenso controlado en paracaídas. Los cohetes sonda pueden estar integrados por los mismos componentes básicos que las radiosondas, pero los módulos sensores para las mediciones a gran altura pueden ser diferentes de los que integran los sistemas utilizados en las capas inferiores de la atmósfera. Al contrario que las radiosondas en paracaídas, pueden utilizar radiogoniometría o NAVAJD para la medición del viento. La mayor parte de los cohetes sonda se lanzan a una gran altitud y se utilizan típicamente como apoyo de las operaciones de lanzamiento espacial (véase la Fig. 3-5). Debido al costo del despliegue de los cohetes sonda, resulta necesario utilizar transmisores de gran calidad.

FIGURA 3-4

Radiosonda con paracaídas



Meteo-034

FIGURA 3-5

Cohete sonda



Meteo-035

3.4 Factores que repercuten en las características de los sistemas MetAids

Los sistemas MetAids están integrados por varios componentes de radiocomunicaciones básicos. La sección de tierra del sistema contiene típicamente un sistema de antena/receptor y un sistema de procesamiento de la señal. La Recomendación UIT-R SA.1165 – Características técnicas y criterios de calidad de los sistemas de radiosondas del servicio de ayudas a la meteorología, contiene descripciones y parámetros técnicos de los diversos tipos de sistemas que se utilizan en las operaciones MetAids.

3.4.1 Sistema de antena receptora en tierra

MetAids utiliza un enlace de radiofrecuencia para transmitir los datos al sistema de antena y receptor ubicado en el emplazamiento de proceso de datos. Las bandas más comúnmente utilizadas a este fin son la de 400,15-406 MHz y la de 1 668,4-1 700 MHz. Lo normal es que el sistema de antena/receptor se encuentre en tierra (para las radiosondas y los cohetes sonda), pero en el caso de las sondas con paracaídas el sistema de antena/receptor se ubica en un avión. La configuración específica del sistema de antena y receptor varía en función de la banda de funcionamiento y la máxima distancia oblicua prevista durante el vuelo. En los sistemas que funcionan en la banda de 401-406 MHz (véase la Fig. 3-6) se suelen utilizar antenas omnidireccionales y estructuras de radiales de antenas yagi o de reflectores diédricos. Estos tipos de antenas no necesitan tener una gran ganancia para mantener el enlace de RF. Para la medición de los vientos en esta banda no se utiliza la radiogoniometría (RDF). La ganancia de los sistemas de antena que funcionan en la banda 401-406 MHz oscila entre 0 y 10 dBi.

FIGURA 3-6

Sistemas de antenas omnidireccionales y direccionales (401-406 MHz)



Meteo-036

La medición del viento suele realizarse mediante RDF en la banda 1 668,4-1 700 MHz. Por este motivo se utilizan plataformas de seguimiento equipadas con grandes antenas parabólicas o paneles de antenas controladas por fase para evitar las pérdidas de trayecto (véase la Fig. 3-7). La plataforma de la antena hace girar la antena en acimut y elevación para seguir el movimiento de la MetAid. Los sistemas de antena que operan en la banda 1 668,4-1 700 MHz suelen tener ganancias características de 25-28 dBi.

FIGURA 3-7

Sistemas de antenas de seguimiento (1 668,4-1 700 MHz)



Meteo-037

3.4.2 Sistemas de procesamiento en tierra

El receptor transfiere la señal de la radiosonda en banda base a un sistema de procesamiento de la señal que decodifica los datos analógicos o digitales de la radiosonda y genera los datos de las mediciones atmosféricas requeridas, entre ellas las de los vientos. La mayor parte de las MetAids no transmiten a la estación receptora valores meteorológicos reales (presión, temperatura, humedad, ozono, etc.). Para minimizar el costo del procesamiento en la MetAids, se transmite la característica electrónica del sensor capacitivo o resistivo. El sistema de procesamiento de señal aplica los valores resistivos o capacitivos del sensor y sus valores de calibrado a un polinomio a fin de calcular los parámetros meteorológicos. Los sistemas que utilizan NAVAID para la medición del viento encargan el procesamiento de la señal NAVAID al sistema de procesamiento de señal, en la medida de lo posible. Algunas MetAids se limitan a recibir la señal NAVAID y a retransmitirla a la estación receptora para procesarla en el sistema de procesamiento de señal. La transmisión de datos brutos a la estación de tierra supone un incremento de la velocidad binaria del enlace de RF respecto a lo que se necesitaría si el procesamiento se efectuara en la MetAid. Este planteamiento es inevitable ya que no es rentable dotar de capacidad de procesamiento a los dispositivos no recuperables.

3.4.3 Módulos sensores no recuperables

El carácter de las operaciones del servicio MetAids impone restricciones a su proceso de fabricación. La mayor parte de las limitaciones de diseño repercuten en las características de radiofrecuencia de las MetAids no recuperables y por lo tanto en los requisitos espectrales de las operaciones MetAids. La restricción más importante es el costo de producción de los dispositivos. No obstante, hay otras limitaciones tales como la densidad, masa, entorno operativo y rendimiento de potencia, que afectan considerablemente a los fabricantes y a los operadores.

El costo de producción suele ser la primera cuestión que suscita la construcción de transmisores de mayor rendimiento espectral. Las radiosondas son dispositivos no recuperables. Es normal que se lancen una sola vez y no se recuperen; sólo algunas pocas se recuperan y se reacondicionan para volver a ser utilizadas de nuevo. Es necesario reducir al mínimo la complejidad de los circuitos electrónicos a fin de abaratar el costo en la medida de lo posible. Los progresos tecnológicos permiten utilizar circuitos integrados rentables que mejoran el rendimiento de las radiosondas. Tradicionalmente, muchas de las mejoras incorporadas a las radiosondas han permitido incrementar la precisión de las mediciones de los sensores. Sin embargo, en los últimos años, los operadores se han visto obligados a mejorar algunas de las características de RF a fin de aumentar la densidad de las redes. Muchos de los dispositivos de radiosonda básicos tienen transmisores de una sola etapa. Estos dispositivos son sensibles a los cambios de temperatura, de la tensión de las baterías y de la carga capacitiva de la antena durante su manejo. Hasta la fecha no se ha generalizado el empleo de circuitos integrados específicos de aplicación (ASIC) disponibles en el mercado, ya que muchos de los productos disponibles que se utilizan en las comunicaciones inalámbricas no satisfacen las condiciones ambientales de funcionamiento o no funcionan en las bandas MetAids.

Hay que limitar la densidad de MetAids no recuperables por motivos de seguridad. Asimismo, la masa de las MetAids no recuperables se limita por motivos de seguridad y de funcionamiento. Las MetAids deben diseñarse para garantizar que una colisión con un avión, por muy improbable que resulte, no dañe al avión ni ponga en peligro vidas humanas. Hay que observar que nunca ha habido una colisión, que se sepa, entre una radiosonda y un avión. La densidad sería el factor más importante si el dispositivo fuera a ser absorbido por el motor. La masa de estos dispositivos es un factor importante ya que las MetAids no recuperables terminan cayendo a la superficie terrestre tras el vuelo. Para controlar la velocidad de descenso se utiliza un paracaídas. No obstante, los objetos cuya masa es importante pueden eventualmente causar daños. Actualmente, la mayor parte de los MetAids no recuperables tienen una masa muy inferior a 1 kg. Las radiosondas se suelen alojar en una caja de espuma de poliuretano o de cartón muy ligera y fácilmente destructible. Los circuitos impresos son pequeños y tienen pocos componentes y el diseño de los circuitos persigue maximizar el rendimiento de potencia. Las limitaciones de densidad y de masa impiden la utilización de grandes baterías para alimentar estos dispositivos.

Las sondas MetAids pueden quedar expuestas a condiciones extremas durante el vuelo. La temperatura puede oscilar entre 50° C y -90° C, la humedad puede variar entre condiciones de extrema sequedad y las de condensación o precipitación. A altitudes superiores, la escasez de aire para la ventilación de los sistemas electrónicos y la radiación solar pueden provocar un sobrecalentamiento de éstos incluso a bajas temperaturas. Estos cambios tan radicales de las condiciones ambientales pueden tener graves repercusiones en la calidad de funcionamiento y las características de los dispositivos componentes, incluido el transmisor. Los transmisores de las radiosondas de diseño antiguo solían tener desviaciones 5 MHz o más debido a los grandes cambios de temperatura y a otros efectos, como la congelación de la antena que genera una carga capacitiva. Debido a la limitación del consumo de energía y a los efectos del calor generado sobre la calidad de funcionamiento de los sensores, no resulta práctico establecer un control estricto de la temperatura de los sistemas electrónicos. Por otra parte, se ha puesto de manifiesto que muchos de los circuitos integrados para transmisores existentes en el mercado y utilizados por la industria de las telecomunicaciones inalámbricas no pueden funcionar a temperaturas extremadamente bajas.

En la fase de diseño debe prestarse gran atención al consumo de energía de los sistemas electrónicos MetAids. Las baterías grandes aumentan el peso y suponen un peligro potencial para la seguridad, además el peso adicional incrementa los costos de explotación por necesitar globos más grandes y mayor volumen de gas para inflarlos. El rendimiento energético es el principal motivo por el que se diseñan las MetAids de modo que la potencia de salida del transmisor sea lo más pequeña posible sin

perjuicio del mantenimiento de un enlace telemétrico fiable. Los transmisores de las radiosondas suelen generar entre 100-400 mW y el presupuesto del enlace a la distancia máxima sólo tiene un margen del orden de 0,5-2 dB. El transmisor de una sola etapa utilizado normalmente ha resultado tener un gran rendimiento energético, mientras que los transmisores de diseño más moderno consumen entre 150-250% más de energía que los de una sola etapa. Hay que indicar, no obstante, que los transmisores de una sola etapa son vulnerables a los cambios bruscos de temperatura y que la carga capacitiva de la antena durante el funcionamiento provoca un gran desplazamiento de frecuencia. Por este motivo, el aumento de rendimiento espectral de los transmisores repercute tanto en sus costos de fabricación como en los de los sistemas electrónicos asociados.

3.5 Características de las observaciones meteorológicas requeridas por el servicio MetAids

En este punto se exponen las características de las observaciones requeridas por las operaciones del servicio MetAids junto con ejemplos de mediciones de radiosondas.

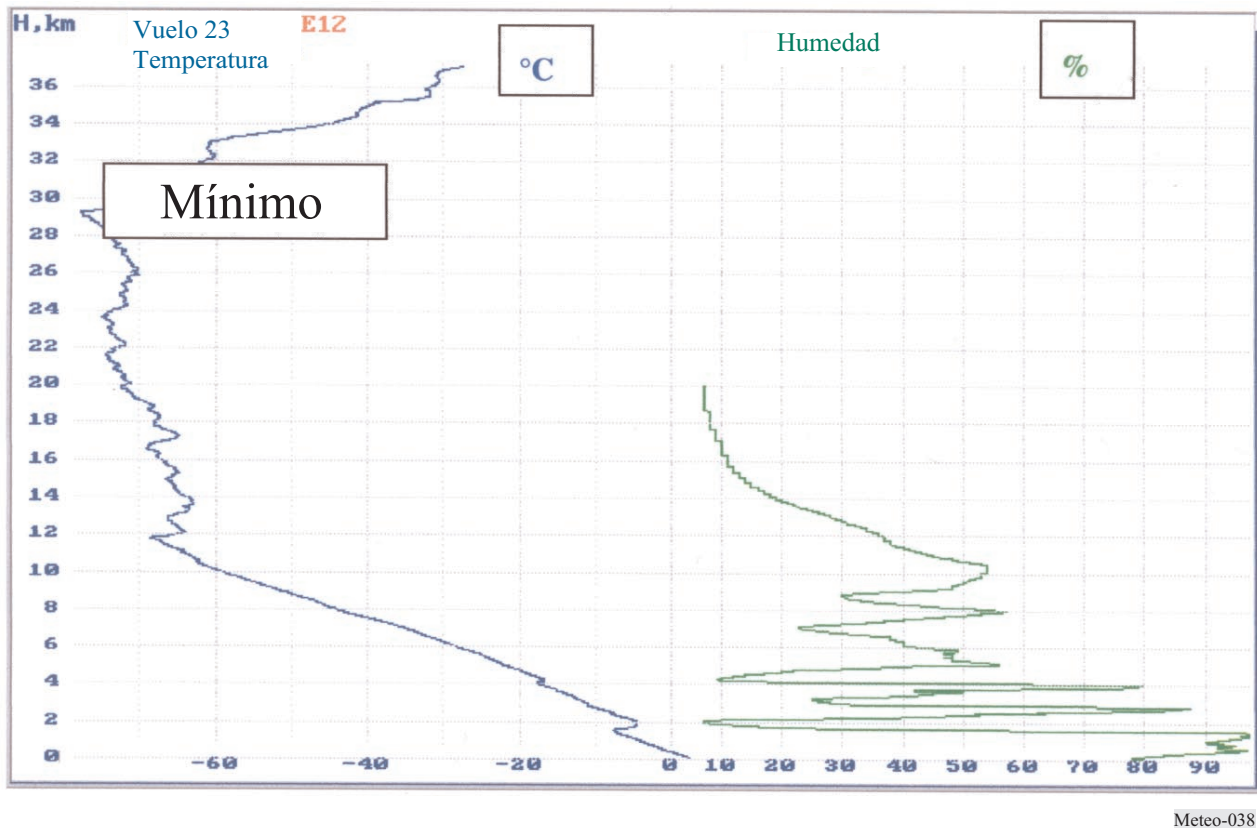
La Fig. 3-8 muestra las mediciones de temperatura y humedad relativa en función de la altura, realizadas en un emplazamiento de observación meteorológica a 60° N en el Reino Unido (en Lerwick, Islas Shetland, el 23 de enero de 2000). El error de las mediciones de la temperatura de la radiosonda es pequeño, inferior a 0,5° C a alturas de 28 km como máximo, lo que resulta conveniente para la supervisión del clima. En esta observación, la temperatura disminuyó a una velocidad relativamente uniforme desde la superficie hasta una altura de 12 km aproximadamente. Los meteorólogos denominan a este nivel tropopausa y representa el límite entre el aire que interacciona con la superficie terrestre y el aire de la estratosfera donde la interacción con las capas superficiales es mínima. Entre la superficie y la parte superior de la tropopausa, aparecen capas relativamente delgadas en las que la temperatura o bien aumentaba ligeramente con la altura o disminuía muy lentamente. La humedad relativa disminuyó asimismo muy rápidamente durante el ascenso de la MetAids a través de dichas capas. Las bajadas más importantes tuvieron lugar a alturas de 1,8 km y 4 km en capas que los meteorólogos denominan de inversión térmica. Además, se observaron cambios menos pronunciados en el gradiente térmico vertical cerca de 8 km y 10,3 km, asociados asimismo con una reducción importante de la humedad relativa con la altura. Las variaciones de la velocidad vertical de cambio de la temperatura y la humedad repercuten en la propagación de las ondas radioeléctricas en la atmósfera. Por este motivo, las observaciones MetAids son asimismo útiles para la determinación de las condiciones de propagación radioeléctrica con fines civiles y estratégicos.

Los globos que transportan las radiosondas se diseñan para optimizar la altura a la que revientan para ascensos a aproximadamente 300 m/min. Las pérdidas de recepción significativas en las primeras fases del ascenso (aunque sean tan sólo de 10 s) son indeseables puesto que ello impide que la radiosonda resuelva los cambios de temperatura y humedad relativa necesarios para elaborar las predicciones locales. La pérdida de datos durante cuatro o cinco minutos (aunque se trate tan sólo de recepción defectuosa de la señal de medición del viento debido a problemas en la navegación) exige a menudo el lanzamiento de una segunda radiosonda para satisfacer los requisitos operacionales.

La observación de la Fig. 3-8 es bastante representativa puesto que los errores en las mediciones de la humedad relativa oscilaban entre el 5% y el 90% entre la superficie y la altura a la que la temperatura desciende por debajo de -40° C. Al caer la temperatura por debajo de -60° C a 10 km, la respuesta del sensor de humedad relativa empezó a ser demasiado lenta para resolver satisfactoriamente los rápidos cambios de la humedad relativa. Esto constituye una mejora notable en la calidad de funcionamiento del sensor de humedad relativa de la radiosonda desde 1980. Los sensores de humedad relativa más antiguos dejaban de ser fiables a temperaturas comprendidas entre -30° C y -40° C. El sensor de humedad relativa es el más difícil de fabricar y constituye uno de los obstáculos más importantes para el diseño y fabricación de radiosondas sin grandes inversiones a largo plazo en instalaciones de diseño y producción.

FIGURA 3-8

Medición de la temperatura y de la humedad con radiosonda



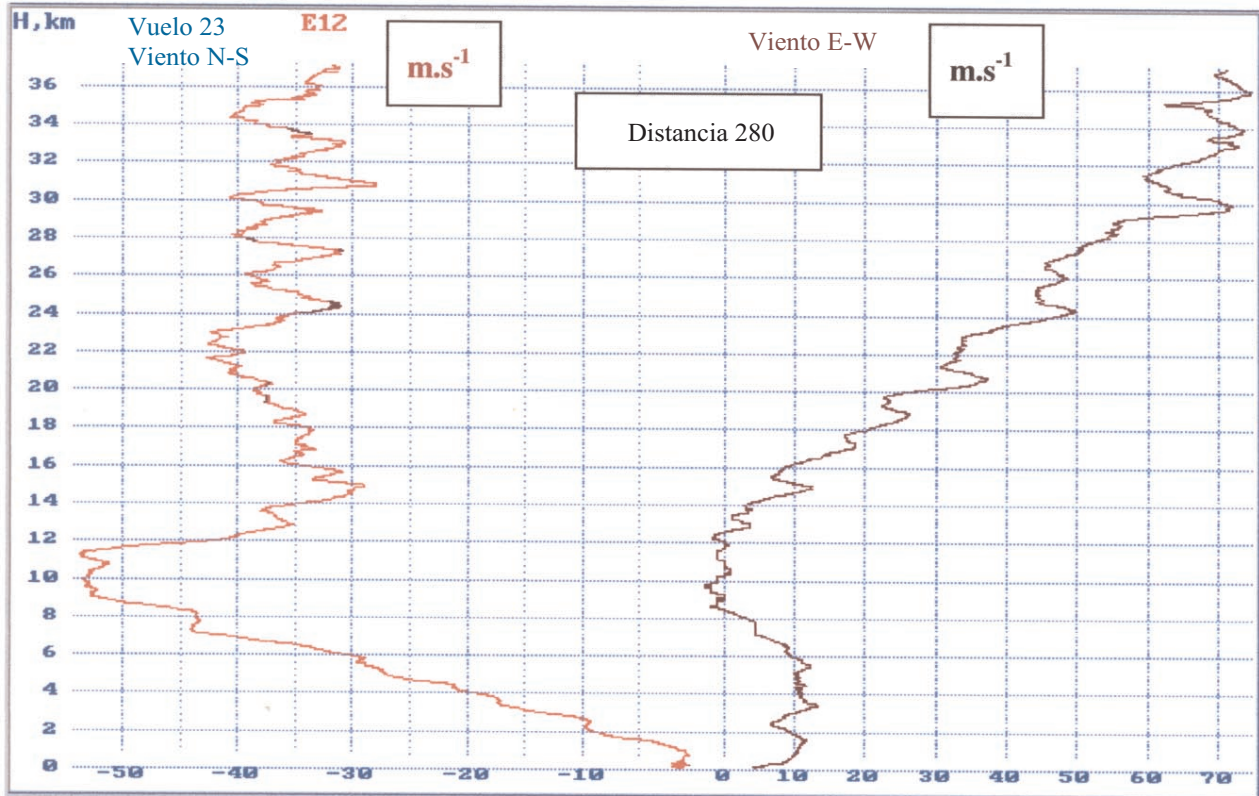
Meteo-038

En la Fig. 3-8 la temperatura mínima corresponde a 29 km y se asocia con aire más frío al Norte de la estación. La temperatura descendió hasta aproximarse a las condiciones necesarias para desencadenar los procesos químicos que destruyen el ozono en el invierno septentrional. El brusco aumento de la temperatura por encima de 29 km es consecuencia del importante calentamiento generado por los movimientos de las capas atmosféricas superiores en el invierno septentrional.

La Fig. 3-9 muestra las mediciones del viento resultantes del seguimiento de la posición del mismo vuelo de radiosonda (lanzado desde el Reino Unido, Lerwick, Islas Shetland, el 23 de enero de 2000) de la Fig. 3-8. El movimiento de la radiosonda se calculó utilizando señales de navegación Loran-C recibidas por la radiosonda y retransmitidas a la estación base. La precisión prevista a corta distancia es de $0,5 \text{ ms}^{-1}$ aproximadamente en cada una de las dos componentes ortogonales que se muestran, disminuyendo hasta $1,5 \text{ ms}^{-1}$ para distancias más largas, cuando la retransmisión a la estación base es inferior a la óptima. En la dirección N-S los vientos más fuertes se detectaron a altitudes de 10 km y 12 km, con una corriente en chorro centrada cerca de la discontinuidad de temperatura a 10 km de la Fig. 3-8. Aquel día, la componente E-W era débil cerca del máximo de la corriente en chorro, pero la intensidad de dicha componente aumentó uniformemente a niveles superiores, de 14 km a 30 km. Este aumento del viento fue consecuencia de un gradiente de temperatura consistente de Sur a Norte, a todas las alturas entre 14 km y 30 km, siendo el aire más frío al Norte, cerca del centro del vórtex polar. Las mediciones de los vientos de altura son de un gran valor para los servicios de transporte aéreo y de defensa. Los resultados de las observaciones de una sonda MetAids, como los de la Fig. 3-9, suelen transformarse en un código especial de defensa en la estación base para su transmisión a las unidades operacionales pertinentes.

FIGURA 3-9

Mediciones de viento con radiosonda

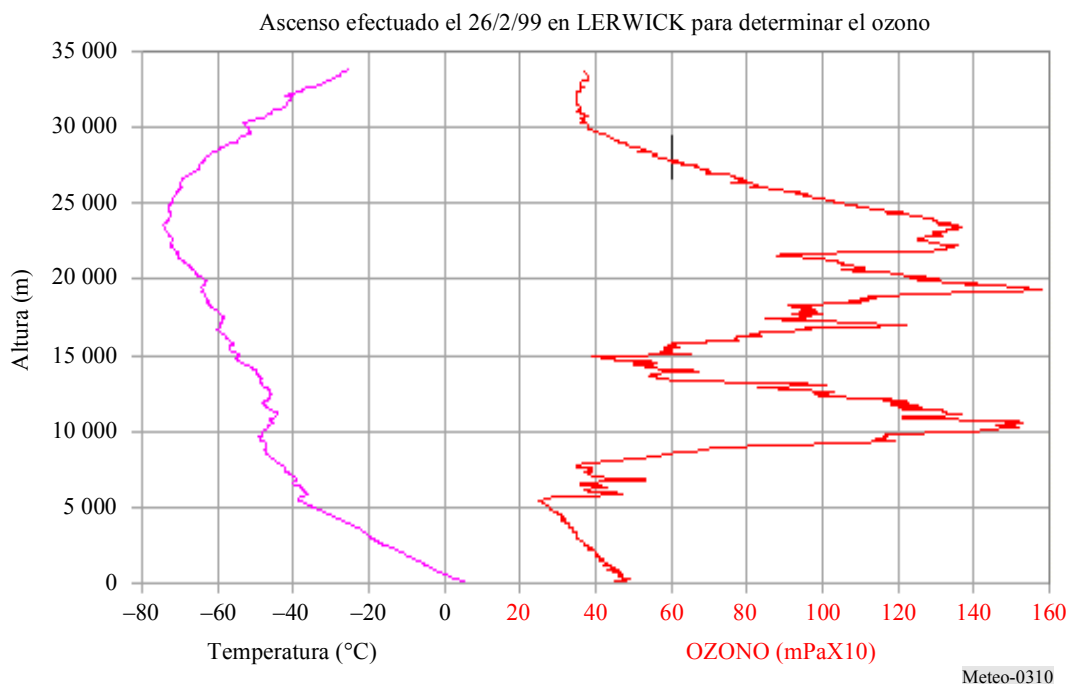


Meteo-039

La Fig. 3-10 muestra una medición de la estructura vertical del ozono desde el mismo emplazamiento del Reino Unido que el de la Fig. 3-8. Aquí, se representa la presión parcial del ozono en función de la altura, junto con una medición simultánea de la temperatura. Las mediciones del ozono se realizan varias veces por semana como ayuda a las investigaciones científicas en curso. Las mediciones se transmiten inmediatamente a un centro de recogida de datos que coordina las observaciones de muchos otros emplazamientos de latitudes similares. Cuando se detecta una zona de vaciamiento de ozono grave se emiten alarmas. En la troposfera, es decir en las capas por debajo de 5 km aquel día, suele haber poco ozono. En la estratosfera, aparecieron concentraciones elevadas de ozono a 10 km y a 20 km, pero no a 15 km. La comunidad científica organiza las mediciones para determinar el motivo de la escasa concentración de ozono en la estratosfera. Esto puede ser provocado por el transporte natural de ozono desde las regiones de baja concentración o bien por la degradación asociada a la contaminación química.

FIGURA 3-10

Medición de la distribución vertical de ozono mediante una ozonosonda



3.6 Justificación de las versiones nacionales de las operaciones del servicio MetAids

3.6.1 Tecnología disponible

Aunque la mayor parte de los sistemas de radiosonda la suministra un número limitado de proveedores comerciales internacionales, las condiciones económicas de ciertos países requieren la creación de instalaciones nacionales para la fabricación de radiosondas en el propio país. En la práctica, el desarrollo de los sistemas nacionales se ha rezagado con respecto al de los sistemas de radiosondas de los proveedores comerciales durante las dos últimas décadas. De hecho, mientras que la tecnología de la mayor parte de los sistemas adquiridos en el mercado en todo el mundo tiene menos de 10 años de antigüedad, algunos sistemas nacionales siguen utilizando tecnología de hace 30-40 años. Las mediciones de estos sistemas nacionales son importantes para todos los meteorólogos por lo que hay que dar un plazo adecuado a estos países para la introducción de sistemas actualizados que utilicen más eficazmente el espectro de frecuencias radioeléctricas disponible.

3.6.2 Diferencias en la climatología de los vientos de altura

En la Fig. 3-9 puede verse que el globo de este vuelo se desvió 280 km del punto de lanzamiento antes de su explosión y que después la radiosonda cayó en paracaídas a una distancia aún mayor. Para obtener datos fiables del viento a tamañas distancias es indispensable la utilización de radiosondas que reciban una señal de navegación, ya sea Loran-C o GPS. No es normal que los globos se desvíen tanto como éste. A latitudes elevadas en el invierno del Hemisferio Norte, los vientos a alturas superiores a 16 km no suelen distribirse simétricamente en torno al Polo. Por este motivo, son mucho más frecuentes los vientos estratosféricos de gran intensidad sobre Europa que en América del Norte. Por otra parte, hay muchos países cuyos vientos de altura son siempre débiles. Las diferencias en las condiciones de los vientos de altura provocan diferencias significativas entre las condiciones operativas de las redes de radiosondas nacionales pertinentes. En algunos países las

radiosondas siempre permanecerán a grandes alturas y a corta distancia mientras que en otros debe efectuarse el seguimiento de las radiosondas hasta elevaciones inferiores a 5° por encima del horizonte y a distancias superiores a 200 km.

Cuando la elevación de los globos es grande (especialmente si no suelen presentarse elevaciones inferiores a 15°), los costos de medición de la radiosonda pueden reducirse utilizando radiosondas económicas que no necesiten recibir y procesar las señales NAVAIID. En este caso, puede efectuarse el seguimiento de la radiosonda utilizando una antena de exploración direccional en la estación base. Si la radiosonda transmite a frecuencias en torno a 1680 MHz, una antena direccional apropiada resulta mucho más pequeña que la antena correspondiente a frecuencias próximas a 403 MHz. Se prefieren las frecuencias próximas a 403 MHz para las operaciones de radiosonda a larga distancia por una diversidad de motivos, siendo además capaces de proporcionar una buena recepción y vientos precisos durante el ascenso.

En muchos países desarrollados, el costo de emplear un operador que supervise las mediciones de la radiosonda es demasiado elevado, resultando cada vez más necesaria la utilización de sistemas de lanzamiento de globos totalmente automáticos supervisados desde un emplazamiento remoto. Ya hay muchos de estos sistemas en funcionamiento. Estos sistemas siempre utilizan radiosondas NAVAIID operando en la banda 401-406 MHz. El sistema automático debe disponer de dos radiosondas como mínimo, sintonizadas a diferentes frecuencias de utilización en la banda. Al igual que en las operaciones manuales, si falla el lanzamiento de la primera radiosonda por una avería prematura del globo, la radiosonda puede continuar transmitiendo. Además, otra radiosonda lanzada desde un emplazamiento cercano puede estar utilizando ya la frecuencia nominal de la estación. El sistema de lanzamiento automático efectúa una exploración entre 401 MHz y 406 MHz antes del lanzamiento para comprobar que no haya ninguna radiosonda próxima transmitiendo a la frecuencia seleccionada. En ambas situaciones, debe haber una segunda frecuencia disponible a fin de realizar mediciones operativas.

3.6.3 Diferencias en la densidad de las redes

Los requisitos espectrales del servicio MetAids varían de un país a otro en función de la densidad de sus redes. Los cálculos de necesidades del espectro deben realizarse con arreglo a toda la comunidad de usuarios del servicio, incluidas las agencias de defensa y del medio ambiente. Al aumentar la densidad de las redes se necesita mejorar el aprovechamiento del espectro. Los países que explotan redes más densas suelen disponer de los recursos presupuestarios necesarios para el funcionamiento del servicio MetAids con transmisores de mayor rendimiento espectral. En estos países suele haber más variación de las condiciones atmosféricas de un día a otro. Los países que explotan redes de baja densidad no suelen tener recursos para utilizar un gran número de estaciones ni para obtener transmisores de banda estrecha de gran estabilidad.

3.6.4 Utilización de la banda 401-406 MHz

Algunos países europeos utilizan redes muy densas, con radiosondas de deriva mínima y emisiones de banda estrecha en dicha banda. Otros países utilizan sistemas de radares secundarios de banda ancha para los que la estación terrestre transmite un impulso a la radiosonda y ésta responde transmitiendo los datos meteorológicos. En ambos casos, se necesita prácticamente toda la banda de 401-406 MHz para las operaciones, habida cuenta de que entre 401 MHz y 403 MHz el servicio MetAids ha de coordinarse con las transmisiones de la plataforma de recogida de datos de los servicios SETS (espacio-Tierra) y MetSat (Tierra-espacio).

Sin embargo, hay ciertas zonas del planeta en las que la densidad de las estaciones no es demasiado elevada y puede haber recursos disponibles para que los transmisores puedan liberar parte de la banda para otros usos. En Australia, por ejemplo, no se requiere toda la banda y la administración

ha optado por utilizar una porción de la banda para otros servicios de radiocomunicaciones. Por consiguiente, en algunos países puede haber espectro disponible para otros usos, pero en ciertas regiones del mundo se necesita toda la banda para las operaciones MetAids. En 1998, la OMM convocó una reunión de especialistas en las características de las frecuencias radioeléctricas del servicio MetAids. Este grupo llegó a la conclusión de que se necesita toda la banda 401-406 MHz para el funcionamiento del servicio MetAids en el futuro previsible, declarando la inviabilidad de la compartición del mismo canal entre las operaciones de radiosonda convencionales y los servicios por satélite entre 400,15 MHz y 401 MHz.

3.6.5 Utilización de la banda 1 668,4-1 700 MHz

La situación de la banda 1 668,4-1 700-MHz es distinta de la correspondiente a la de la banda 401-406 MHz. Concretamente, aunque toda la banda está atribuida al servicio MetAids, también está atribuida al servicio MetSat a título primario en igualdad de condiciones. Las operaciones MetAids y MetSat en el mismo canal no son compatibles y se ha producido una segmentación significativa de la banda. MetAids provoca niveles de interferencia importantes en las estaciones terrestres MetSat. La utilización de la banda de 1 680 MHz varía a lo largo del planeta, aunque en algunas partes (América del Norte y Asia), sólo está disponible la subbanda 1 675-1 683 MHz para las operaciones MetAids. Al estudiar los requisitos del servicio MetAids en la banda 1 668,4-1 700-MHz hay que tener en cuenta que sólo suele estar disponible una porción de esta banda. Muchos de los países que utilizan esta banda pueden operar con 7-8 MHz de espectro, pero hay otros en los que todavía se necesita más de 15 MHz para efectuar las operaciones. En 1998, la OMM convocó una reunión de especialistas en las características radioeléctricas del servicio MetAids. Este grupo llegó a la conclusión de que se necesitarían 12 MHz de espectro para las operaciones del servicio MetAids en esta banda en el futuro previsible. Esta valoración se realizó en base a requisitos máximos, aunque acaso algunos países requieran menos espectro. A la vista de ello, las reuniones posteriores de la OMM han recomendado la protección rigurosa del servicio MetAids dentro de la subbanda 1 675-1 683 MHz.

3.6.6 Requisitos para la retención de ambas bandas

La disponibilidad de ambas bandas de RF para las operaciones del servicio MetAids se considera crítica para la viabilidad de las actividades meteorológicas. En primer lugar hay ciertos países de Europa y de América del Norte en los que se necesitan ambas bandas para cumplir los requisitos espectrales de las operaciones del servicio MetAids, habida cuenta de los arreglos de compartición existentes con otros servicios. Las operaciones del servicio MetAids para la meteorología sinóptica, la investigación y la defensa no pueden llevarse a cabo con una sola de estas bandas. Además, cada banda tiene características peculiares necesarias para los distintos tipos de operaciones del servicio MetAids. En la banda 401-406 MHz las pérdidas de propagación son bajas. Estas pérdidas de propagación son convenientes en aquellas partes del mundo en las que los vientos de gran intensidad provocan grandes distancias oblicuas entre la estación base y la radiosonda. La menor pérdida de propagación permite así mismo utilizar para el seguimiento del vuelo antenas receptoras más sencillas y de menor tamaño. Las operaciones MetAids en esta banda utilizan una forma de radio-navegación (GPS, LORAN o VLF) para la medición de los vientos ya que el tamaño de las antenas RDF resultaría prohibitivo. Por motivos presupuestarios o de seguridad nacional, algunas administraciones prefieren utilizar la banda 1 668,4-1 700 MHz. El servicio MetAids con RDF evita la necesidad de sistemas electrónicos de radionavegación reduciendo el costo de los dispositivos no recuperables. Hay países que también tienen el requisito de que los sistemas MetAids sean independientes de los sistemas NAVAIID internacionales, ya que éstos pueden no estar siempre disponibles.

3.7 Tendencias para el futuro

Aunque los diseños MetAids suelen utilizar componentes muy sencillos y económicos, ha habido una evolución, y continuará habiéndola, para mejorar la calidad de funcionamiento de estos sistemas. Como se ha indicado anteriormente, la mayor parte de la inversión en mejoras se destina a la calidad de los sensores y no siempre a la porción del enlace telemétrico del sistema. No obstante, la creciente necesidad de atribuciones adicionales de frecuencia en una zona determinada para dar soporte a las operaciones sinópticas y a las no sinópticas ha planteado la necesidad de realizar mejoras en las características de RF.

3.7.1 Determinación del viento mediante los GPS

La aplicación de los GPS a las radiosondas para efectuar las mediciones de los vientos debería suponer una importante mejora en el rendimiento espectral de las radiosondas NAVAJD. En la mayor parte de los países esto supondrá una mejora importante en la precisión de las mediciones de los vientos de altura. La determinación del viento mediante GPS requiere la transmisión de una importante cantidad de datos del GPS desde el dispositivo a tierra, lo que supone un aumento de la velocidad de transmisión de datos y, consecuentemente, la ampliación de la anchura de banda del transmisor y el aumento de consumo de la batería en comparación con las radiosondas que no son NAVAJD. A veces no es posible procesar toda la solución GPS en el dispositivo por la corrección diferencial que debe aplicarse para suprimir los errores provocados por las condiciones de propagación y otros factores. Dicha corrección diferencial sólo puede aplicarse en la estación receptora. Aunque este tipo de radiosonda se ha estado utilizando desde 1997, la OMM sigue trabajando con los fabricantes cuatro años después para suprimir los problemas que han obstaculizado las operaciones. En el Capítulo 6 se exponen otras aplicaciones del servicio de radionavegación GPS en Meteorología.

3.7.2 Circuitos integrados para transmisores existentes en el mercado

La utilización de circuitos integrados (IC) para transmisores de comunicaciones inalámbricas existentes en el mercado no se ha generalizado hasta la fecha por varios motivos. En primer lugar hay pocos IC que pueden utilizarse en las bandas de frecuencias del servicio MetAids. Los IC existentes no suelen estar diseñados para funcionar a las temperaturas extremadamente bajas que necesitan las MetAids. El desarrollo y la producción de IC específicos de la aplicación MetAids (ASICS) que satisfagan los requisitos de frecuencia, potencia y medioambientales, no ha sido rentable debido a que el volumen anual necesario es relativamente pequeño. No obstante se prevé en el futuro que los costos de producción de ASIC disminuyan haciendo rentable la producción de series más pequeñas de ASIC para aplicaciones de bajo volumen como el MetAids.

3.7.3 Incremento de la densidad de las redes MetAids

La OMM ha fijado los objetivos de incremento de la densidad de las redes MetAids. Por ello, los operadores MetAids se han visto obligados a mejorar las características de radiofrecuencia del servicio MetAids para suprimir las interferencias con las estaciones adyacentes.

Bibliografía

OMM [1996] Guía de la OMM para los instrumentos meteorológicos y los métodos de observación), N.º 8.

CAPÍTULO 4

RADARES METEOROLÓGICOS

		Página
4.1	Introducción	34
4.1.1	Generalidades	34
4.1.2	Ecuación del radar	35
4.2	Radares meteorológicos giratorios	35
4.2.1	Requisitos del usuario	35
4.2.2	Aspectos operacionales de la reflectividad	35
4.2.3	Redes de radares meteorológicos	36
4.2.4	Los radares Doppler	36
4.2.5	Radares multiparámetro	37
4.2.6	Supresión del eco fijo	37
4.2.7	Requisitos actuales y futuros del espectro.....	37
4.2.8	Vulnerabilidad de los radares	39
4.2.9	Vulnerabilidad de la compartición de sistemas con radares	40
4.3	Radares de perfil del viento.....	40
4.3.1	Requisitos del usuario	40
4.3.2	Aspectos operativos y de frecuencia	42
4.3.3	Requisitos espectrales actuales y futuros	44
4.3.4	Aspectos de la compartición de los radares de perfil del viento	44
4.3.5	Red de perfiladores del viento en la banda de 1,3 GHz del JMA	45
4.3.6	Redes de perfiladores del viento	47

4.1 Introducción

Los radares meteorológicos se encuentran entre los instrumentos meteorológicos que más vidas han salvado. Gracias a estos radares se puede predecir la formación de huracanes, tornados y otros fenómenos meteorológicos peligrosos y se puede supervisar el curso de las tormentas en su camino de destrucción. Los radares modernos nos permiten determinar el trayecto de las tormentas sean grandes o pequeñas y prever las precipitaciones y el volumen de las mismas. La intensidad de la lluvia puede alertar del peligro de inundaciones repentinas. Estos radares informan asimismo de la posibilidad de vientos intensos y de rayos. Los radares meteorológicos se encuadran en el servicio de radiolocalización.

Este Capítulo trata de los radares de tierra utilizados normalmente en meteorología. El primero y más conocido de ellos es el radar giratorio, que suministra datos de una zona aproximadamente circular centrada sobre su propio emplazamiento. Estos dispositivos, denominados normalmente radares meteorológicos son sobradamente conocidos porque la información que suministran se suele mostrar en los boletines meteorológicos por televisión. Las bandas de radiofrecuencias utilizadas por los radares meteorológicos se encuentran en torno a 2,8 GHz, 5,6 GHz, 9,4 GHz y 35,6 GHz.

Un diseño más reciente lo constituye el radar de perfil del viento (WPR, *wind profiler radar*) que suministra datos de un volumen de forma aproximadamente cónica en posición cenital. El WPR es un dispositivo relativamente reciente, cuya utilización no se ha generalizado hasta la pasada década. Mide la velocidad del viento, su magnitud y dirección, en función de la altura sobre el suelo. Si incorpora los equipos necesarios, el WPR puede medir también la temperatura del aire (en función de la altura). Las bandas de radiofrecuencia que utilizan los WPR se encuentran en torno a los 50 MHz; 400 MHz y 1 000 MHz.

El tercer tipo, menos común, es el radar auxiliar utilizado para el seguimiento de las radiosondas en vuelo. La utilización de estos radares se expone en el Capítulo 3, que trata de las radiosondas.

El funcionamiento de todos los radares consiste en la emisión de señales radioeléctricas que se reflejan en un blanco que puede ser cualquier objeto, desde un vehículo, pasando por gotas de lluvia, hasta turbulencias atmosféricas. La señal de retorno del radar meteorológico es débil por varios motivos. En primer lugar, la señal debe recorrer el trayecto dos veces, una del radar al blanco y otra en sentido contrario. En segundo lugar, el blanco no es un reflector especialmente eficaz. La cantidad de señal devuelta depende de la reflectividad del blanco y puede variar en función del tamaño y la naturaleza de éste. La necesidad de captar estas señales tan débiles puede afrontarse de diversas maneras, por ejemplo utilizando potencias de transmisión superiores, grandes antenas con una gran ganancia, receptores extremadamente sensibles y un gran tiempo de integración de las señales. También constituye un requisito crítico que el espectro sea relativamente silencioso, es decir, que esté libre de ruidos electrónicos y de interferencias provocadas.

4.1.1 Generalidades

Los radares meteorológicos suelen ser radares de exploración de volumen y haz estrecho que detectan y miden la intensidad y la velocidad de los meteoros acuosos, granizo, nieve, nubes y especialmente la lluvia. La reflectividad de la lluvia al radar depende de los siguientes parámetros: distribución del tamaño de las gotas, permitividad relativa del medio en cuestión y longitud de onda del radar. Los radares meteorológicos son asimismo capaces de efectuar mediciones del viento. Los tipos de radares siguientes pueden efectuar las funciones indicadas:

1. Radares meteorológicos Doppler en los que el meteoro acuoso se utiliza como indicador.
2. Radares de seguimiento de globos que suministran la velocidad y dirección del vector de viento.
3. WPR que detecta la variación turbulenta del índice de refracción del aire y la utiliza como indicador.

4.1.2 Ecuación del radar

La ecuación (4-1) es una manera fácil de escribir la fórmula de la ecuación del radar. En esta ecuación se expresan las distintas contribuciones a la potencia recibida, es decir: la constante del radar, la reflectividad del blanco y la atenuación atmosférica debida principalmente a las nubes y a la lluvia. Como en esta relación el blanco es un eco variable, la reflectividad de la lluvia η es un valor medio que proviene del *proceso de integración espacio-tiempo* en la célula del radar durante el intervalo de detección:

$$P_r = \frac{P_t \cdot A_e^2 \cdot \lambda^2 \cdot c \cdot \tau \cdot \theta^2 \cdot l_s}{45} \cdot \frac{\eta}{r^2} \cdot \frac{1}{L^2} \quad (4-1)$$

calidad del radar
reflectividad del blanco
pérdidas del trayecto

siendo:

- P_r : potencia de retorno recibida
- P_t : potencia de salida del transmisor
- A_e : potencia de cresta transmitida
- l_s : pérdidas del sistema de radar
- λ : longitud de onda
- c : velocidad de la luz
- θ : abertura del haz de la antena de 3 dB
- τ : abertura eficaz de la antena
- η : reflectividad
- r : distancia al blanco
- L : pérdidas del trayecto incluida la atenuación atmosférica.

La ecuación (4-1) puede aplicarse a un blanco distribuido si se cumplen las siguientes hipótesis:

- el blanco ocupa todo el volumen del impulso
- está formado por partículas esféricas o por partículas que pueden aproximarse por esferas
- el tamaño de las partículas satisface la condición de Rayleigh
- la constante dieléctrica $|K|^2$ y la distribución del tamaño de los dispersores son homogéneos en el volumen V considerado
- el haz de la antena es aproximadamente gaussiano
- la polarización del haz es lineal
- se desprecian los efectos de dispersión múltiple.

4.2 Radares meteorológicos giratorios

4.2.1 Requisitos del usuario

El principal requisito del usuario para el radar meteorológico es que detecte las precipitaciones sólidas y líquidas y que mida, siempre que sea posible, el índice de precipitación y la componente de la velocidad hacia el radar.

4.2.2 Aspectos operacionales de la reflectividad

La reflectividad η de la lluvia se relaciona con la permitividad relativa del agua ϵ_r , el diámetro de la gota D y la longitud de onda λ . Para las gotas de lluvia contenidas en el volumen V considerado, la reflectividad puede expresarse mediante la ecuación (4-2):

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 \sum_j D_j^6 / V \quad \text{m}^{-1} \quad (4-2)$$

siendo, $|K|^2$ 0,93 para el agua líquida y 0,18 para el hielo.

El factor de reflectividad, Z , independiente de λ , se define como:

$$Z = \sum_j D_j^6 / V \quad (4-3)$$

Z se suele expresar como $\text{dB}_Z = 10 \log Z$ (mm^6/m^3).

Así pues, para las gotas de lluvia:

$$\eta = \frac{285 Z}{\lambda^4} \quad (4-4)$$

NOTA – Esta expresión sólo es válida en el dominio de dispersión de Rayleigh, es decir para:

$$D \leq \frac{\lambda}{20} \quad (4-5)$$

La reflectividad, Z , (expresada en dB_Z) y el índice de pluviosidad, R (expresado en mm/h) están relacionados por la ecuación:

$$Z = a \cdot R^b \quad (4-6)$$

Tanto a como b dependen de la distribución del tamaño de las gotas (DSD, *drop size distribution*) que varía con el tipo de lluvia y su intensidad. Una expresión corriente, definida por Marshall-Palmer en 1948, se basa en una DSD exponencial y se expresa como:

$$Z = 200 \cdot R^{1,6} \quad (4-7)$$

viniendo expresados Z y R en mm^6/m^3 y en mm/h , respectivamente.

4.2.3 Redes de radares meteorológicos

La principal limitación de los radares meteorológicos es su alcance relativamente corto, consecuencia de la curvatura terrestre. Para superar esta limitación, se suelen utilizar redes distribuidas de radares separados regularmente, funcionando 24 h diarias. A menudo estas redes cubren grandes zonas, como países e incluso partes enteras de un continente a fin de detectar y vigilar la evolución de los fenómenos meteorológicos, permitiendo de este modo emitir alertas anticipadas de situaciones meteorológicas de riesgo.

4.2.4 Los radares Doppler

Los radares meteorológicos Doppler se han utilizado durante más de 30 años en la investigación atmosférica para medir la convección dentro de las tormentas y para detectar frentes de ráfagas y, en la actualidad, se utilizan ampliamente en los sistemas de radares meteorológicos operacionales. A diferencia de los radares más antiguos, los equipos Doppler son capaces no sólo de determinar la existencia y posición de blancos reflectores sino también su velocidad. Esto permite la medición de la velocidad del viento, la detección de tornados y la medición de un campo de vientos por medio de la exploración en pantalla de la velocidad acimutal.

La supresión del eco del suelo constituye asimismo una importante funcionalidad. Los avances más importantes en este campo se centran en los transmisores coherentes tales como los klystrones y los tubos de ondas progresivas (TOP). La integridad de la fase del espectro del radar convencional está limitada actualmente por la tecnología de los magnetrones. No obstante, los magnetrones actuales pueden suministrar una gran potencia media a bajo costo para mejorar la relación señal/ruido.

4.2.5 Radares multiparámetro

La tecnología de radares polarimétricos permite la identificación de dispersores por teledetección de sus formas. Los radares meteorológicos polarimétricos se han propuesto como instrumentos de identificación de los meteoros acuosos y para mejorar la fiabilidad y precisión de los índices de pluviosidad para las aplicaciones hidrológicas. De hecho, las gotas de lluvia tienden a aplanarse en su caída, aumentando el aplanamiento con el tamaño de la gota. Combinando las mediciones de reflectividad y fase por medio de dos polarizaciones, horizontal (h) y vertical (v), se pueden evaluar mejor los coeficientes a y b de la relación $Z-R$.

Se han desarrollado recientemente algoritmos basados en el índice de reflectividad diferencial Z_h/Z_v , y en la fase diferencial $\phi_h - \phi_v$, que tienen en cuenta asimismo la atenuación diferencial, que se consideran muy interesantes para la evaluación precisa de la pluviosidad.

Además de por su forma, los meteoros acuosos se caracterizan por las constantes dieléctricas, factor primordial en el cálculo de las secciones transversales de dispersión y atenuación. Las propiedades dieléctricas de los meteoros acuosos varían con la frecuencia del radar, existiendo notables diferencias entre el agua y el hielo. Gracias a estas características, se han propuesto algoritmos para discriminar entre la lluvia y la nieve para cuantificar el agua y el hielo en las nubes a partir de mediciones de la atenuación diferencial efectuadas con radares de doble banda.

4.2.6 Supresión del eco fijo

El denominado eco fijo se compone de varios elementos fijos ocultos; uno que incluye la dispersión de baja frecuencia y otro que incluye la de alta frecuencia (debida a la vegetación agitada por el viento). En los radares meteorológicos actuales se utilizan diversos métodos de supresión del eco del suelo:

- el filtrado Doppler emplea un filtro paso alto para reducir el eco del suelo. Este proceso es eficaz cuando la velocidad radial del viento es lo suficientemente alta para estar por encima de la frecuencia de corte del filtro Doppler;
- el filtrado estadístico basado en la diferencia entre las variaciones de reflectividad de la lluvia y del eco del suelo. El proceso de filtrado estadístico es eficaz cuando la velocidad radial de la lluvia es nula (lluvia tangencial);
- el empleo del radar polarimétrico (propuesto) para la discriminación de la lluvia del eco del suelo.

4.2.7 Requisitos actuales y futuros del espectro

La elección de la longitud de onda λ se efectúa como compromiso entre la reflectividad, que varía como λ^{-4} , y la atenuación, que disminuye al aumentar λ hasta llegar a ser despreciable para las longitudes de ondas decimétricas. Por ejemplo, la banda Ka (8,6 mm) es muy adecuada para la detección de gotas de agua pequeñas, como las que forman las nubes que no precipitan ($\leq 200 \mu\text{m}$). Por otra parte, la banda S (10 cm) es más adecuada para detectar lluvia intensa a gran distancia (hasta 300 km) en los climas tropicales y templados.

A veces se prefiere la banda C (5,4 cm) para la detección de lluvia a gran distancia (hasta 300 km) en climas templados, aunque el índice de pluviosidad pueda medirse con éxito únicamente a distancias inferiores a 100 km, aproximadamente.

La elección de la frecuencia del radar meteorológico define asimismo las características de funcionamiento de la máxima velocidad de viento medible y la distancia máxima. En el radar de impulsos, el tiempo entre impulsos determina la máxima distancia sin ambigüedad del radar. El reflejo de un impulso debe volver al receptor antes de la transmisión del siguiente impulso, de lo contrario el impulso recibido resulta ambiguo. En los sistemas de radares Doppler, la frecuencia de

repetición de impulsos (PRF, *pulse repetition frequency*) determina la velocidad máxima sin ambigüedad que el radar es capaz de medir. El diseño del radar queda limitado por el producto distancia-velocidad sin ambigüedad, definido como:

$$R_m \cdot V_m = c \frac{\lambda}{8} \quad (4-8)$$

siendo:

R_m : distancia del radar sin ambigüedad (distancia máxima a la que el radar puede efectuar una medición)

V_m : velocidad del radar sin ambigüedad (velocidad máxima que el radar puede medir)

c : velocidad de la luz (3×10^8 m/s)

λ : longitud de onda de la señal del radar.

La longitud de onda de la señal, determinada por la frecuencia del radar, es el único parámetro que queda a discreción del diseñador del radar a fin de maximizar la medición de la distancia máxima y de la velocidad máxima del radar. Una reducción de la longitud de onda exige una reducción de la capacidad de medición de la distancia eficaz, de la velocidad eficaz o una combinación de ambas en la misma magnitud que el incremento de frecuencia.

Otras longitudes de onda discretas utilizadas por los radares meteorológicos se seleccionan de bandas de frecuencias que suelen utilizar los radares de defensa y de vigilancia de las rutas aéreas. Las longitudes de onda pueden variar algo entre países. El Cuadro 4-1 muestra los parámetros importantes de los radares meteorológicos típicos.

CUADRO 4-1

Parámetros de los sistemas de radar

Parámetros de los sistemas de radar	Banda S	Banda C	Banda X	Banda Ka
Alcance instrumental relativo a la PRF del radar (km)	600	450	200	150
Máxima distancia de detección = 0 dB _Z en tiempo despejado (km)	300	300	150	80
Máxima distancia para efectuar una medición fiable de Z con atenuación moderada (km)	150	125	100	40
Banda UIT (GHz)	2,7-2,9	5,6-5,65	9,3-9,5	35,2-36
Número de nota principal del RR	5.423	5.452	5.475	
Máxima banda ocupada (MHz) (entre ceros de la función sen x/x)	4	4	4	2
Potencia de cresta del impulso: Magnetron (kW)	1 000	250	100	100
Potencia de cresta del impulso: Klystron (kW)	1 200	250	8	No utilizado
PRF: Magnetron (Hz)	250-1 200	250-1 200	1 000	1 000
PRF: Klystron (Hz)	0-4 000	0-4 000	0-10 000	No utilizado
Anchura del impulso: Magnetron (μs)	0,8-2	0,8-2	1	1
Anchura del impulso: Klystron (μs)	0,5-8	0,5-20	0,5-30	No utilizado

CUADRO 4-1 (Fin)

Parámetros de los sistemas de radar	Banda S	Banda C	Banda X	Banda Ka
Ciclo de trabajo: Magnetron (%)	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}
Ciclo de trabajo: Klystron (%)	2×10^{-3}	6×10^{-3}	3×10^{-3}	No utilizado
Potencia media transmitida: Magnetron (W)	1 000	250	100	100
Potencia media transmitida: Klystron (W)	2 500	1 500	240	No utilizado
Diámetro de la antena (m)	4-8	4	2	1,5
Ganancia del haz principal de la antena (dBi)	39-45	44	43	50
Anchura de banda entre puntos de -3 dB (grados)	2-1	1	1,2	0,4
Lóbulos laterales (dBc)	-25 a -35	-25 a -35	-25 a -30	-25

Nota a propósito del espectro de frecuencia transmitido: Si el impulso transmitido es rectangular y su anchura es τ , el espectro de frecuencia muestra una dependencia de $\text{sen } x/x$ respecto a $x = \pi F \tau$ con las siguientes características conocidas.

Anchura de potencia media:	$0,88/\tau$
Primeros ceros en:	$\pm 1/\tau$
Primeros lóbulos laterales en:	$\pm 1,43/\tau$
Los niveles de cresta de los lóbulos laterales disminuyen como:	$1/x$.

Si la forma del impulso es aproximadamente trapezoidal siendo Δt el tiempo de subida y bajada, el espectro de frecuencia puede ser diferente de $\text{sen } x/x$ y las crestas de los lóbulos laterales pueden disminuir más rápidamente que $1/x$ – llegando incluso a $1/x^2$. No obstante, para $\Delta t < 0,1\tau$, el espectro no se aparta mucho de $\text{sen } x/x$ excepto en los lóbulos laterales lejos de la frecuencia central, que son sensiblemente inferiores.

Se proporcionan los valores para dos tipos de tecnologías distintas: los magnetrones y los klystrones o TOP, estos últimos pueden entregar impulsos de emisión corta caracterizados por un espectro de emisión más ancho. Algunos magnetrones muestran una desviación de frecuencia inferior a 1 MHz a lo largo de un gran intervalo de temperatura ambiente. Los radares de exploración rápida consumen una gran cantidad de espectro, 10 MHz por ejemplo, debido a la utilización de compresión de impulsos.

4.2.8 Vulnerabilidad de los radares

Un radar meteorológico funciona midiendo el tiempo necesario para que la señal emitida viaje desde el transmisor al blanco y vuelva al emplazamiento del radar. El tiempo del recorrido es función de la longitud del trayecto y la precisión con la que puede medirse depende de manera crítica de los tiempos de subida y bajada del impulso (en el caso del radar de impulsos). El frente anterior o el posterior del impulso constituye la referencia de medición del tiempo de llegada del impulso reflejado, cuanto menos dure mayor será la exactitud posible de la medición.

Para que los tiempos de transición de los impulsos sean cortos se necesita linealidad de fase en los circuitos del transmisor y receptor en una banda de frecuencias relativamente ancha. La anchura de banda necesaria es aproximadamente proporcional al más corto de los dos tiempos de transición del impulso; si se intenta reducir la anchura de banda de la señal emitida (mediante filtrado adicional, etc.) más allá de lo necesario, se degrada la precisión del sistema. La anchura de banda necesaria

suele sorprender a los profanos en sistemas de radar. La interferencia recibida en la anchura de banda necesaria degrada asimismo la calidad de funcionamiento.

No hay que olvidar que aunque en la mayor parte de las transmisiones radioeléctricas hay un único recorrido del trayecto entre antenas de características conocidas, la señal del radar debe recorrer dos veces el trayecto con un reflejo intermedio en objetos (gotas de lluvia, piedras de granizo o polvo arrastrado por el viento) que no han sido diseñados para este fin. Las señales recibidas resultantes son extremadamente débiles. A pesar de las potencias de transmisión frecuentemente grandes y de la gran sensibilidad de los receptores, los radares son extremadamente vulnerables al ruido y a las interferencias.

4.2.9 Vulnerabilidad de la compartición de sistemas con radares

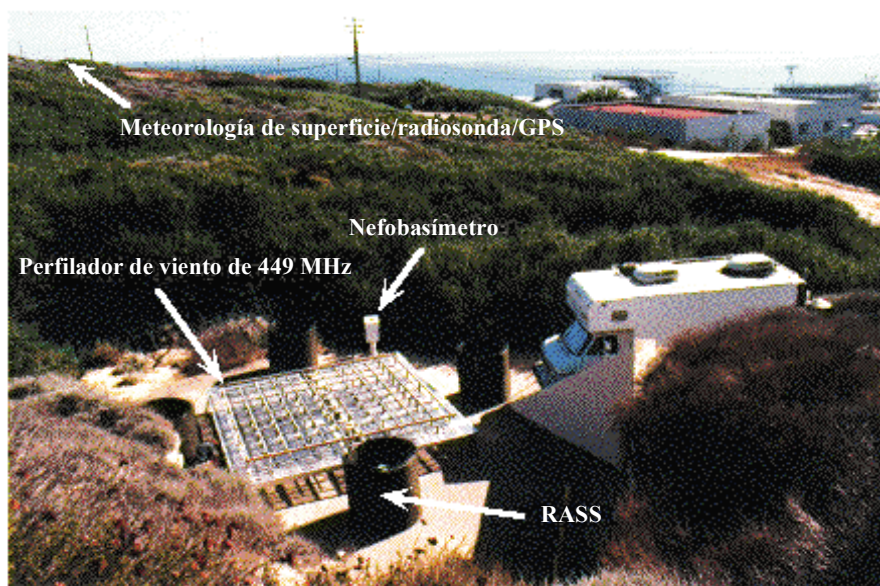
Como se ha indicado anteriormente, la potencia del transmisor y la ganancia de la antena de los radares meteorológicos suelen ser lo suficientemente elevadas para compensar la mayor longitud de los trayectos. Esto tiende a aumentar la distancia en la que el radar puede interferir con otros sistemas en el mismo canal (respetando la anchura del canal del radar). Se han dado asimismo casos en los que los radares y los enlaces fijos de microondas, que ha coexistido durante algún tiempo, han resultado incompatibles cuando el sistema de microondas se actualizó dejando de utilizar equipos analógicos para utilizar equipos digitales con una sensibilidad mayor a las interferencias de impulsos.

4.3 Radares de perfil del viento

4.3.1 Requisitos del usuario

Los radares de perfil del viento WPR se utilizan para obtener perfiles verticales del viento en emplazamientos desatendidos, a veces remotos, mediante la detección de las minúsculas fracciones de la potencia emitida devueltas por la dispersión de las turbulencias en las atmósferas despejadas. Los requisitos del usuario para la resolución temporal y vertical y la cobertura de altura determinan la potencia, anchura de banda y frecuencia central de funcionamiento. La Fig. 4-1 muestra una instalación de radar de perfil del viento.

FIGURA 4-1
Radar de perfil del viento de la NOAA en Point Loma,
California, Estados Unidos de América



Estos radares pueden determinar asimismo la temperatura del aire en función de la altura. Esta técnica denominada a menudo sistema de sondeo acústico por radar (RASS, *radar acoustic sounding system*) utiliza grandes altavoces situados en la antena para emitir ondas sonoras por el trayecto del haz vertical del radar. La frecuencia sonora se selecciona de modo que la longitud de onda acústica provoque intensos reflejos de la señal del radar a su frecuencia de funcionamiento, permitiendo al radar seguir la onda sonora en su propagación ascendente. Como la velocidad del sonido es función de la temperatura del aire, la medición de la velocidad de la onda sonora permite calcular la temperatura del aire en función de la altura sobre el suelo. Una buena forma de examinar la repercusión de los requisitos del usuario en los parámetros de funcionamiento del radar de perfil del viento y en su diseño consiste en utilizar la siguiente ecuación copiada de [Gossard y Strauch, 1983]:

$$SNR = \text{const} \frac{\bar{P}_t A_e \Delta_z \lambda^{1/6} t_{obs}^{1/2}}{T_{sys}} \frac{C_n^2}{z^2} \quad (4-9)$$

siendo:

- \bar{P}_t : potencia media transmitida
- A_e : abertura eficaz
- Δ_z : resolución en altura
- z : altura
- λ : longitud de onda
- t_{obs} : tiempo de observación (medio)
- T_{sys} : temperatura de ruido del sistema
- C_n^2 : parámetro de estructura.

En esta ecuación, el parámetro de estructura es independiente de la frecuencia aunque depende estrechamente de la altura. Casi toda la dependencia de la frecuencia radica en el factor de la longitud de onda, pero la temperatura de ruido de un sistema receptor de radar bien diseñado incluye una contribución importante de ruido cósmico a bajas frecuencias. Asimismo esta ecuación sólo es válida en el subintervalo inercial de la turbulencia atmosférica, limitando eficazmente la elección de longitudes de onda de los radares de perfil del viento al intervalo de 10-0,2 m aproximadamente (30 a 1 500 MHz). Obsérvese que la turbulencia se disipa rápidamente en forma de calor por la viscosidad fuera del subintervalo inercial y para pequeñas longitudes de ondas.

El requisito de usuario de resolución temporal elevada disminuye la relación señal/ruido al reducir el tiempo medio. Este requisito puede satisfacerse si se selecciona una combinación de:

- abertura grande;
- potencia de cresta elevada y PRF elevada para aumentar la potencia media;
- gran longitud de onda; y
- funcionamiento en un intervalo de alturas próximas al radar donde una PRF elevada no ocasione problemas de ambigüedad de distancia y donde la retrodispersión atmosférica y la inversa de la altura al cuadrado no sean relativamente grandes.

El requisito de usuario de alta resolución vertical se satisface a costa de disminuir la relación señal/ruido por requerir impulsos cortos, reduciendo de este modo la potencia media. Una resolución vertical alta exige un gran ancho de banda. Este requisito puede satisfacerse no obstante mediante la combinación de:

- una gran abertura;
- una gran potencia de cresta con una PRF elevada y compresión de impulsos para aumentar la potencia media;
- una gran longitud de onda; y
- un intervalo de alturas de funcionamiento próximas al radar para que la elevada PRF no ocasione problemas de ambigüedad en la determinación de distancias y para que la retrodispersión atmosférica y la inversa del cuadrado de la distancia sean relativamente grandes.

Obsérvese que la utilización de la compresión de impulsos (para aumentar la longitud del impulso) obliga a aumentar el umbral inferior de altura.

El requisito de usuario de obtener datos del viento a gran altitud se satisface a costa de disminuir la relación señal/ruido al disminuir la inversa del cuadrado de la altura y, aunque no es evidente en la ecuación, al disminuir la altura del parámetro de estructura y la compresión de subintervalo inercial desde la longitud de onda más corta (frecuencia más alta) con el incremento de la altura. Este requisito puede satisfacerse seleccionando una combinación de:

- gran abertura;
- potencia de cresta elevada y compresión de impulsos para aumentar la potencia media;
- gran longitud de onda; y
- grandes tiempos medios.

En el § 4.3.2 se tratarán otras cuestiones de carácter más práctico.

El requisito de usuario de funcionamiento fiable en todas las condiciones meteorológicas requiere una relación señal/ruido adecuada asimismo en condiciones de baja dispersión en la atmósfera. Son situaciones típicas los periodos invernales de baja humedad y los casos de baja turbulencia, es decir los casos de corrientes en chorro a altitudes de 10-15 km. El requisito puede satisfacerse mediante la selección adecuada de:

- la banda de frecuencias;
- gran potencia media y abertura de la antena;
- mayor sensibilidad del receptor; y
- bajo nivel de interferencias y de ruido del sistema.

4.3.2 Aspectos operativos y de frecuencia

Las antenas de gran abertura y las potencias medias de emisión elevadas son caras. El costo de la antena y del amplificador de potencia de un radar de perfil del viento supone a menudo más de la mitad del costo total del sistema instalado. Por consiguiente, los avances tecnológicos en estas áreas no suponen alternativas interesantes para la mejora de la calidad de funcionamiento.

No obstante, en el caso de la abertura de la antena hay otro factor a considerar que determina el tamaño mínimo. Los perfiladores multihaz funcionan mediante el recorrido sucesivo del haz por dos o cuatro acimutes ortogonales con ángulos de elevación de 75° aproximadamente, que llegan a menudo a la vertical, para la adquisición de datos. La anchura de banda de la antena debe ser lo

suficientemente estrecha para delinear las dos, cuatro o cinco posiciones del haz. Se pueden utilizar anchuras de haz a 3 dB de 5° a 10° correspondiendo a ganancias de antena de 33 dBi a 27 dBi, respectivamente. La ganancia determina la abertura eficaz de acuerdo con la ecuación (4-10):

$$A_e = 10^{G/10} \lambda^2 / 4\pi \quad (4-10)$$

No es posible escoger libremente las frecuencias de los radares de perfil del viento debido a la interferencia, a la congestión del espectro de frecuencias radioeléctricas y a la consiguiente reglamentación. Algunas aplicaciones que lo necesitaban, tales como el radar MU de Japón y los de los polígonos de experiencias de misiles orientales y occidentales de Estados Unidos de América, han exigido la utilización de radares muy grandes (aproximadamente 10 000 m²), potentes (250 kW de cresta o más, y 12,5 kW de media o más), de impulso corto (1 μs), operando cerca de 50 MHz. Los investigadores han utilizado asimismo otros perfiladores sin interferencias a frecuencias entre 40 y 70 MHz. Hay atribuciones internacionales de radiolocalización en las bandas:

- 138-144 MHz a título permitido en la Región 2;
- 223-230 MHz en la Región 3 a título secundario;
- 420-430 y 440-450 MHz en todas las Regiones a título secundario;
- 430-440 MHz en todas las Regiones a título primario;
- 890-942 MHz en todas las Regiones a título secundario;
- 1 215-1 300 MHz en todas las Regiones a título primario; y
- 1 350-1 400 MHz en todas las Regiones a título primario.

Los radares de perfil del viento funcionan actualmente en todas estas bandas excepto en 138-144 MHz y cerca de 404 MHz y 472 MHz. La Resolución 217 (CMR-97) tomó nota de:

«... la petición cursada a la UIT por el Secretario General de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) en mayo de 1989, solicitando asesoramiento y asistencia para identificar frecuencias próximas a 50 MHz, 400 MHz y 1 000 MHz para acomodar las atribuciones y asignaciones a los radares de perfil del viento» y resolvió:

«... instar a las administraciones a que establezcan los radares de perfil del viento como sistemas del servicio de radiolocalización en las siguientes bandas, prestando la debida atención a la posible incompatibilidad con otros servicios y asignaciones a estaciones de estos servicios y, por tanto, teniendo debidamente en cuenta el principio de separación geográfica, en particular con respecto a los países vecinos y teniendo presente la categoría de cada uno de estos servicios:

- 46-68 MHz de conformidad con el número **5.162A**
- 440-450 MHz
- 470-494 MHz de conformidad con el número **5.291A**
- 904-928 MHz únicamente en la Región 2
- 1 270-1 295 MHz
- 1 300-1 375 MHz;»

«... que, en caso de que la compatibilidad entre los radares del perfil del viento y otras aplicaciones radioeléctricas que funcionan en la banda 440-450 MHz o 470-494 MHz no pueda lograrse, podría considerarse la utilización de la banda 420-435 MHz o 438-440 MHz;» e

«... instar a las administraciones a que no establezcan los radares del perfil del viento en la banda 400,15-406 MHz.»

Los perfiladores que funcionan en el intervalo de 400-500 MHz se han diseñado para:

- medir los perfiles del viento entre 0,5-16 km aproximadamente por encima del radar con resoluciones verticales de 250 m a baja altitud y 1 000 m a alta altitud utilizando antenas de 32 dBi de ganancia aproximadamente;
- potencias medias de 500 W y 2 000 W aproximadamente para el sondeo a baja y gran altitud, respectivamente;
- funcionar con las anchuras de banda necesarias de menos de 2 MHz.

La adición de una tercera modalidad, a muy baja altitud, permitiría reducir el umbral de distancia mínima de 0,5 a 0,25 km y tal vez la resolución vertical de 150 m o 200 m aunque permaneciendo dentro de la anchura de banda necesaria de 2 MHz. Los perfiladores que operan a 915 MHz o más se consideran típicamente como perfiladores de capas limítrofes, capaces de medir el perfil del viento sólo en los primeros kilómetros de la atmósfera. Éstos funcionan con resoluciones verticales de 100 m aproximadamente utilizando antenas de ganancias inferiores a 30 dBi y potencias medias de 50 W aproximadamente aunque funcionando con las anchuras de banda necesarias de 8 MHz o más.

4.3.3 Requisitos espectrales actuales y futuros

Los perfiladores de viento son sistemas situados en tierra con alturas de antena de uno o dos metros y haces verticales. La separación geográfica y el apantallamiento por el terreno constituyen protecciones eficaces contra las interferencias entre perfiladores. Por consiguiente, una red asequible de WPR, separados por 50 km como mínimo en terreno llano – o menos en terreno más abrupto o con árboles – podría funcionar en la misma frecuencia. Por los mismos motivos, los perfiladores suelen ser compatibles con la mayor parte de los servicios situados en tierra. La Resolución 217 (CMR-97) proporciona una selección adecuada del espectro de radiofrecuencia. Se necesitan 2 MHz ó 3 MHz de anchura de banda cerca de 400 MHz, y 8 MHz ó 10 MHz cerca de 1 000 MHz.

4.3.4 Aspectos de la compartición de los radares de perfil del viento

Las bandas atribuidas a los radares de perfil del viento por la CMR-97 se seleccionaron cuidadosamente para reducir al mínimo la probabilidad de interferencia entre los usuarios de estas bandas. Una red construida antes de que estas bandas estuvieran disponibles funcionaba en la banda meteorológica de 400,1-406 MHz y provocaba interferencias al COSPAS-SARSAT que funcionaba en la banda 406-406,1 MHz. La interferencia originó una recomendación por la CMR-97 de que esta banda no se utilizara nunca más por los radares perfiladores de viento. La administración que construyó este sistema experimental está construyendo nuevos perfiladores en una banda aprobada, pero los intentos de hacer compatible el sistema de 400 MHz generaron una gran cantidad de información relativa a las cuestiones de compatibilidad de los WPR. La densidad espectral de p.i.r.e. de estos WPR en la dirección horizontal es aproximadamente:

- -18 dB(W/kHz) a la frecuencia central (449 MHz)
- -36 dB(W/kHz) a 0,5 MHz de distancia
- -55 dB(W/kHz) a 1 MHz de distancia
- -70 dB(W/kHz) a 2 MHz de distancia
- -79 dB(W/kHz) a 4 MHz de distancia.

Cuando estos valores tan bajos se combinan con antenas de pequeña altura y pérdidas de trayecto proporcionales a $1/r^4$ para la propagación por la superficie terrestre, la separación geográfica resulta muy eficaz para la compartición. Por ejemplo, un equipo móvil de radiocomunicaciones de aficionados sintonizado a la frecuencia central del radar ha podido detectar una señal WPR audible a 3 km de distancia sobre una pradera.

Sin embargo, en el haz principal, la densidad espectral de la p.i.r.e. es 57 dB mayor y, en consecuencia, los receptores transportados en aviones y en satélites están sujetos a niveles de interferencias muy superiores. Las pérdidas de trayecto proporcionales a $1/r^2$ agravan el problema. Por citar un ejemplo, los primeros WPR de los Estados Unidos de América se construyeron utilizando 404,37 MHz porque en aquel momento no se habían atribuido bandas adecuadas. Al principio, las señales WPR de 404 MHz se detectaban en los receptores SARSAT que funcionaban en la banda 406-406,1 MHz y que eran transportados en satélites situados en una órbita a 850 km. Los intentos subsiguientes para aminorar este problema pusieron de manifiesto que la modulación utilizada por los WPR de 404 MHz tenía una repercusión significativa sobre sus características de compartición. Actualmente, los impulsos se codifican en fase para distinguir los dos o tres segmentos (chips) de cada impulso y poder realizar la compresión del impulso. Si no hubiera codificación adicional, el espectro de la emisión consistiría en líneas separadas por la PRF. No obstante, se impuso un miembro de secuencia de código de fase pseudoaleatorio de longitud 64 a cada impulso sucesivamente de modo que las líneas espectrales aparecen a intervalos de PRF/64 con las potencias de línea reducidas en un factor de 64. Además, los transmisores de los perfiladores se desconectaban bajo control de una computadora cuando aparecía el satélite COSPAS-SARSAT más de 41° por encima del horizonte del perfilador. (Como el número de estos satélites es pequeño, las pérdidas de datos del perfilador son despreciables.)

La codificación de fase aplicada a las emisiones del perfilador de 404 MHz deben deshacerse en el receptor. Por ello, la interferencia de otros sistemas no WPR aparece incoherente y como ruido para el perfilador. Por consiguiente, la señal mínima detectable (perfilador) es aproximadamente de -170 dBm, mientras que la interferencia sólo es problemática a niveles de -135 dBm o más.

Como se ha indicado anteriormente, las actuales Recomendaciones UIT-R indican el espectro a utilizar para los WPR. Se desaconseja para los WPR la utilización de otras bandas, por ejemplo 400,15-406 MHz. Las mismas técnicas que se utilizan para mejorar la interferencia en los satélites en esta banda son, sin embargo, aplicables asimismo a otras bandas.

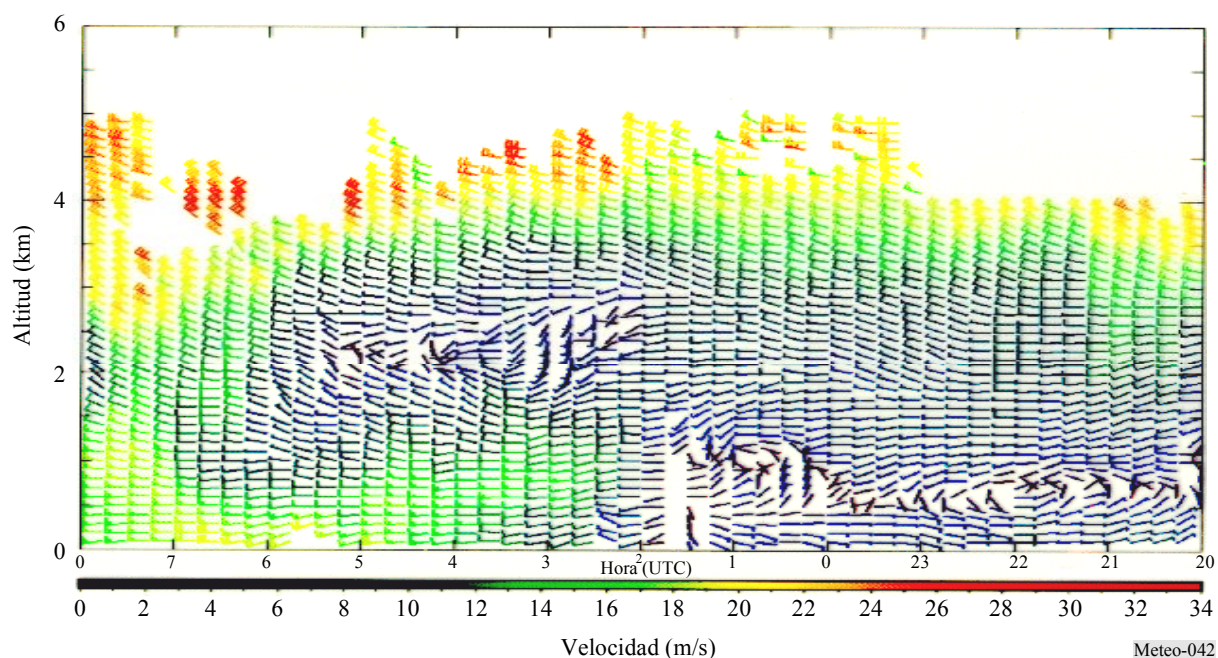
Un sistema móvil de determinación del perfil del viento de la NOAA que funciona a 924 MHz generó la gráfica de velocidad del viento en función de la altitud de la Fig. 4-2. La orientación de las banderas representa la dirección del viento en función de la altitud (eje vertical) y el tiempo (eje horizontal), el color representa la velocidad del viento. La NOAA está desarrollando actualmente un perfilador para barcos. Véase <http://www4.etl.noaa.gov/>.

4.3.5 Red de perfiladores del viento en la banda de 1,3 GHz del JMA

El organismo meteorológico del Japón (JMA, *Japan Meteorological Agency*) acaba de instalar una red de observación de la atmósfera superior compuesta de 25 WPR en la banda de 1,3 GHz y un centro de control de perfiladores (PCC, *profiler control centre*) que se encuentra en pleno funcionamiento desde abril de 2001. Junto con las estaciones de radiosondas existentes, el JMA ha formado una densa red de observación de la atmósfera superior. La red WPR está en funcionamiento continuo y suministra datos del viento para predicciones meteorológicas numéricas avanzadas y para previsiones meteorológicas a muy corto plazo (now-casting).

FIGURA 4-2

Velocidad del viento en función de la altitud



Los WPR de la banda L (denominados a menudo perfiladores de la capa límite) suelen medir datos del viento a niveles de escasos kilómetros. No obstante, los WPR del JMA recogen datos de hasta 5 km con resolución en altura de 100-600 m, empleando la técnica de compresión de impulsos, generando una gran potencia de transmisión y utilizando una antena de gran tamaño. Todos los WPR se controlan desde la sede del PCC del JMA en Tokio. Las principales características de los WPR se recogen en el Cuadro 4-2.

CUADRO 4-2

Características de los WPR de la banda de 1,3 GHz

Frecuencia de radiación (MHz)	1 357,5
Anchura de banda ocupada (MHz)	10
Potencia de cresta (W)	2 000
Compresión del impulso (bits)	8
Longitud del impulso (µs)	Seleccionable entre 0,67, 1,33, 2 y 4
Frecuencia de repetición de impulsos (kHz)	Seleccionable entre 5, 10, 15 y 20
Atenuación para un ángulo de elevación de 0° a 10° (dB)	-40

Como una barrera contra el eco de 2 m de altura atenúa el nivel del lóbulo lateral a 40 dB por debajo del lóbulo principal para un ángulo de elevación de 0° a 10°, las demás estaciones radioeléctricas que utilizan las bandas de frecuencias vecinas (tales como los radares de vigilancia de las rutas aéreas) quedan protegidos de las interferencias de los WPR. Esto permite utilizar los WPR incluso en zonas urbanas.

4.3.6 Redes de perfiladores del viento

Además de los numerosos radares individuales de perfil del viento construidos en todo el mundo, principalmente a título experimental, se han construido varias redes completas de perfiladores caracterizadas por sus mecanismos de compartición de datos. Entre éstas se cuentan:

- La red de Estados Unidos de América que fue la primera en construirse y se describe en el § 4.2.4. Se está ampliando y migrando a 449 MHz.
- La red japonesa a 1 357,5 MHz que se describe en el § 4.2.5.
- Australia utiliza cuatro radares de perfil del viento en el intervalo 45-56 MHz, prefiriendo 54-56 MHz para las instalaciones de nueva planta. Los cuatro radares de perfil del viento están funcionando en la proximidad de 920 MHz y dos en la banda 1 270-1 295 MHz, siendo esta última la preferida para las instalaciones de nueva planta. Se prevé que el número de sistemas crezca lentamente durante los próximos cinco años.
- En Europa, varias administraciones utilizan radares de perfil del viento en diversas bandas permitiendo la compartición continua de datos, y entre ellas cabe citar las siguientes:
 - Austria: 1 290 MHz (3)
 - Francia: 45 MHz (1), 52,05 MHz (1), 1 290 MHz (1)
 - Alemania: 482 MHz (1), 1 290 MHz (2)
 - Países Bajos: 1 290 MHz (1)
 - Suecia: 52 MHz (1)
 - Suiza: 1 290 MHz (1)
 - Reino Unido: 6,5 MHz (1), 915 MHz (2), 1 290 MHz (2).

Además, varias administraciones utilizan radares de perfil del viento durante periodos de prueba específicos para suministrar datos a la red cuando están activos.

Referencias Bibliográficas

GOSSARD, E. E. y STRAUCH, R. G. [1983] *Radar Observation of Clear Air and Clouds*, Elsevier, Nueva York, Estados Unidos de América, 280 páginas.

Bibliografía

- COST Action 76 [marzo de 2000] Development of VHF/UHF wind profilers and vertical sounders for use in European observing systems, Informe final editado por: J. Dibbern, W. Monna, J. Nash y G. Peters, Comisión Europea, Dirección de Ciencia General, Investigación y Desarrollo.
- DOVIAK, R. J. y ZRNIC, D. S. [1993] Doppler radar and weather observations, Academic Press, Inc., San Diego, Estados Unidos de América.
- LAW, D. y otros [marzo de 1994] Measurements of Wind Profiler EMC Characteristics, Informe NTIA 93-301, 63 páginas. National Telecommunications and Information Administration, Estados Unidos de América.
- MAMMEN, T. [1998] Weather radars used by members, WMO instruments and observing methods, Informe N.º 69.
- SESSIONS, W. B. [diciembre de 1995] SARP instrument performance when receiving emissions from NOAA 404 MHz wind profiler radars, NOAA, NESDIS, E/SP3, 87 páginas.
- SKOLNIK, M. [1990] *Radar Handbook*, Second Edition, McGraw-Hill, Inc., Nueva York, Estados Unidos de América.
- WMO [1996] WMO Guide to meteorological instruments and methods of observation, N.º 8, Organización Meteorológica Mundial.

CAPÍTULO 5

SISTEMAS SETS PARA ACTIVIDADES METEOROLÓGICAS

	Página	
5	Introducción	50
5.1	La teledetección radiométrica pasiva de microondas.....	51
5.1.1	Funciones generales	51
5.1.2	Requisitos espectrales	52
5.1.3	Parámetros de la calidad de funcionamiento.....	54
5.1.3.1	Sensibilidad radiométrica.....	54
5.1.3.2	Umbral radiométrico ΔP	56
5.1.3.3	Resolución geométrica	56
5.1.3.4	Tiempo de integración.....	56
5.1.4	Condiciones operativas típicas de los sensores pasivos.....	56
5.1.4.1	Satélites en órbita terrena baja	56
5.1.4.2	Satélites geoestacionarios.....	56
5.1.5	Observación de las características de la superficie terrestre	56
5.1.5.1	Sobre la superficie de los océanos.....	57
5.1.5.2	Sobre la superficie terrestre.....	58
5.1.5.3	Parámetros auxiliares de otros instrumentos de teledetección	59
5.1.6	Principales características técnicas.....	59
5.1.7	Criterios de calidad de funcionamiento y de interferencia.....	60
5.1.8	Medición tridimensional de parámetros atmosféricos	61
5.1.8.1	Sondas atmosféricas verticales pasivas de microondas.....	61
5.1.8.2	Mecanismo del sondeo atmosférico vertical	61
5.1.8.3	Utilización del sondeo atmosférico vertical	64
5.1.8.4	Características de los sensores pasivos orientados al nadir funcionando en la gama de 60 GHz.....	66
5.1.8.5	Sondas pasivas de limbo de microondas	67
5.2	Sensores activos	72
5.2.1	Introducción	72
5.2.2	Radares de abertura sintética.....	73
5.2.3	Altimetros.....	75
5.2.4	Dispersómetros.....	75
5.2.5	Radares de precipitación	79
5.2.6	Radares de perfil de nubes	79
5.2.7	Criterios de interferencia y de calidad de funcionamiento de los sensores.....	81
5.2.8	Niveles de interferencia.....	82
5.2.9	Estudios de compatibilidad	83
5.2.10	Estado actual	84

5 Introducción

La existencia de los satélites meteorológicos es sobradamente conocida en la mayor parte del mundo y las imágenes que transmiten se muestran periódicamente en la televisión y en la prensa. Por ello la gente está habituada a ver fotografías de mapas con color mejorado mostrando las capas de nubes, las temperaturas de la superficie, el manto de nieve y otros fenómenos meteorológicos. Son menos frecuentes pero suscitan un amplio interés en gran parte del mundo (aunque ocasionalmente) las imágenes de los satélites que muestran la distribución de los incendios forestales y las nubes de humo resultantes, las cenizas volcánicas y las temperaturas de la superficie del mar que han sido objeto de gran atención por parte del público a causa del fenómeno *El Niño*. Estas imágenes tienen en común el hecho de su grabación utilizando principalmente sensores en las regiones visible e infrarroja que muchos profanos consideran «luz» y no «radiocomunicaciones». Por consiguiente sorprende que las auténticas frecuencias de «radiocomunicaciones», desde las ondas métricas pasando por las microondas hasta las regiones superiores del espectro atribuido, deban ser utilizadas por los satélites de teledetección. Hay dos clases de teledetección ampliamente utilizadas: la pasiva y la activa.

La **teledetección pasiva** utiliza solamente receptores, no habiendo transmisores de ningún tipo. La radiación que estos receptores pretenden captar se presenta espontáneamente. Son interesantes los tipos de radiación que indican la presencia de determinados componentes químicos o la ausencia de ciertas frecuencias que indican la absorción de las señales de dichas frecuencias por los gases de la atmósfera. La intensidad o ausencia de señales de determinadas frecuencias se utiliza para determinar la presencia de gases específicos (de los que la humedad y los contaminantes son ejemplos obvios) y, en su caso, la cantidad y ubicación de los mismos. Hay una diversidad de información medioambiental que puede detectarse de este modo. La intensidad de una señal a una frecuencia determinada puede depender de varias variables, lo que implica utilizar diversas frecuencias para determinar las distintas incógnitas. La utilización de varias frecuencias es la técnica primordial para medir las diversas características de la superficie terrestre.

La **teledetección activa**, a su vez, utiliza tanto transmisores como receptores a bordo de satélites. Las aplicaciones de la teledetección activa se extienden desde la medición de las características de la superficie del mar hasta la determinación de la densidad forestal de los bosques hidrofílicos.

La cuestión de la compatibilidad entre ambas clases de teledetección plantea los mismos problemas que los de otros servicios espaciales: la interferencia mutua entre los satélites y otras estaciones transmisoras de RF, ya sea en tierra o en el espacio. La resolución de estos problemas pasa por la utilización de técnicas sobradamente conocidas que suelen implicar la coordinación con otros usuarios en términos de limitación de potencia, características de la antena y compartición en el tiempo y en la frecuencia. Una forma de vulnerabilidad peculiar de los satélites receptores, y especialmente de los que tienen una gran estampa, deriva del hecho de estar sujetos a la radiación acumulada de una diversidad de emisores en tierra. Por ello, aunque un solo emisor terrenal no radie la potencia suficiente para provocar daños, un gran número de ellos puede resultar pernicioso. Este hecho es el que suscita la preocupación actual en relación con las emisiones de los sistemas fijos de gran densidad (HDFS, *high density fixed service*). La raíz del problema es la densidad espacial de los emisores HDFS y no las características individuales de éstos.

En el caso de la detección pasiva, los problemas se circunscriben a un aspecto: el satélite es incapaz de provocar interferencias porque no transmite. Su vulnerabilidad a la interferencia recibida es singular y radica en la naturaleza no determinística de la señal que ha de recibir. Cuando se trata de conjuntos de transmisor y receptor, la naturaleza y características de las señales son conocidas por lo que resulta relativamente fácil determinar si las señales se reciben correctamente. A este respecto hay cantidad de tratados sobre detección y corrección de errores.

Por desgracia, todo lo que se conoce acerca de la corrección de errores no sirve de nada cuando no se conocen las características de las señales recibidas, y esto es exactamente lo que ocurre con la teledetección pasiva. El gran peligro para este tipo de sistemas es que la interferencia pase desapercibida y que se confundan los datos malos con los buenos de modo que las conclusiones extraídas del análisis de estos datos incorrectos contengan graves errores. En las aplicaciones meteorológicas hay vidas que dependen de la validez de estas conclusiones. Como los errores en los datos recibidos no pueden detectarse ni corregirse en los sistemas de teledetección pasiva, el mantenimiento de la integridad de los datos depende de la prevención de las interferencias. La única solución consiste en la imposición de límites estrictos a las interferencias y la asignación de valores idóneos a los límites actualmente en estudio.

En los últimos años la utilización de radares de ondas milimétricas en la aplicación de la investigación de las nubes ha suscitado un interés considerable. La necesidad de profundizar en la comprensión de la función que desempeñan las nubes en nuestro sistema climático es primordial en la investigación del cambio climático. Los últimos adelantos de la tecnología de radares de ondas milimétricas han hecho que este impulso investigador se convierta en el principal motor de desarrollo de los radares de perfiles de nubes de ondas milimétricas. Estos radares, que funcionan principalmente en la proximidad de 35 GHz (banda Ka) y de 94 GHz (banda W), son capaces de proporcionar la información cualitativa y cuantitativa que necesitan los investigadores meteorológicos. Su sensibilidad a los pequeños meteoros acuosos, su elevada resolución espacial, la mínima susceptibilidad al eco del suelo y su tamaño relativamente pequeño hace que los radares de ondas milimétricas constituyan un excelente instrumento para la investigación de las nubes. Pueden utilizarse en emplazamientos fijos en tierra, en emplazamientos móviles en tierra, transportados en aviones y embarcados en plataformas espaciales.

5.1 La teledetección radiométrica pasiva de microondas

5.1.1 Funciones generales

La radiometría pasiva de microondas es un instrumento de importancia primordial para el SETS. El SETS funciona mediante sensores pasivos diseñados para recibir y medir las emisiones naturales producidas por la superficie terrestre y por su atmósfera. La frecuencia e intensidad de estas emisiones naturales caracterizan el tipo y el estado de varios parámetros importantes, geofísicos, atmosféricos y de la superficie (tierra, mar y casquetes polares), que describen el estado del sistema Tierra/atmósfera/océanos y de sus mecanismos:

- parámetros de la superficie terrestre tales como la humedad del suelo, la temperatura de la superficie del mar, la intensidad de los vientos oceánicos, la extensión del hielo y su antigüedad, el manto de nieve, la pluviosidad sobre tierra, etc.; y
- parámetros atmosféricos tridimensionales (atmósfera baja, media y superior) tales como los perfiles de temperatura, el contenido de vapor de agua y los perfiles de concentración de los gases residuales de importancia radioactiva y química (por ejemplo el ozono).

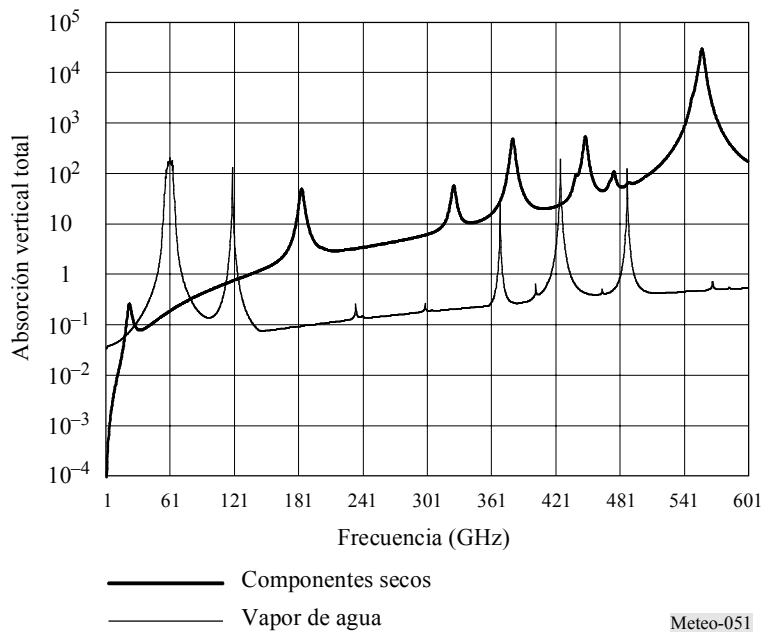
Las técnicas de microondas hacen posible la observación de la superficie terrestre y su atmósfera desde órbitas espaciales incluso con la existencia de nubes, que resultan prácticamente transparentes a frecuencias inferiores a 100 GHz. Esta independencia del clima tiene un enorme interés para el SETS porque más del 60% de la superficie terrestre está cubierta de nubes. La teledetección pasiva de microondas constituye un instrumento importante ampliamente utilizado para la supervisión y los estudios meteorológicos, climatológicos y medioambientales (para aplicaciones operacionales y científicas), para los que es indispensable la fiabilidad de la cobertura mundial reiterada.

5.1.2 Requisitos espectrales

Hay varios parámetros geofísicos que suelen contribuir, en mayor o menor medida, a las emisiones naturales y que pueden observarse a una frecuencia determinada. Por este motivo, las mediciones en varias frecuencias del espectro de microondas deben realizarse simultáneamente a fin de aislar y recuperar cada una de las contribuciones individuales. Las curvas de absorción atmosférica, mostradas en la Fig. 5-1, se caracterizan por crestas debidas a la resonancia molecular de los gases atmosféricos y por el continuum de vapor de agua que aumenta sensiblemente con la frecuencia.

FIGURA 5-1

Opacidad cenital de la atmósfera debida al vapor de agua y a los componentes secos



La selección de las frecuencias idóneas para la detección pasiva por microondas depende estrechamente de las características de la atmósfera:

- las frecuencias de observación de los parámetros de superficie se seleccionan por debajo de 100 GHz, donde la absorción atmosférica es más débil. Se necesita, por término medio, una frecuencia por octava; y
- las frecuencias de observación de los parámetros atmosféricos se seleccionan con mucho cuidado especialmente por encima de 50 GHz dentro de las crestas de absorción de los gases atmosféricos.

Las frecuencias, anchuras de banda y atribuciones de anchuras de banda requeridas se recogen en el Cuadro 5-1. La mayor parte de las atribuciones de frecuencia por encima de 100 GHz contienen líneas de absorción de elementos atmosféricos residuales importantes.

El Cuadro 5-2 muestra la ocupación del espectro, hasta 200 GHz, de los más importantes sensores pasivos de microondas orientados al nadir. Obsérvese que de acuerdo con la revisión del Cuadro de atribución de bandas de frecuencias del RR, algunas de las frecuencias utilizadas actualmente por los sensores quedarán en desuso cuando termine su vida útil.

CUADRO 5-1

Bandas de frecuencias y anchuras de banda utilizadas en la detección pasiva por satélites*

Frecuencia (GHz)	Anchura de banda necesaria o atribuida (MHz)	Mediciones principales
1,4-1,427	100 (27)	Humedad del suelo, salinidad, temperatura de la superficie de los océanos, índice de vegetación
2,69-2,7	60 (10)	Salinidad, humedad del suelo
4,2-4,4	200	Temperatura de la superficie del océano
6,7-7,1	400	Temperatura de la superficie del océano (sin atribución)
10,6-10,7	100	Lluvia, nieve, hielo, estado del mar, vientos oceánicos, temperatura de la superficie del océano, humedad del suelo
15,35-15,4	200	Vapor de agua, lluvia
18,6-18,8	200	Lluvia, estado del mar, hielo en el océano, vapor de agua, nieve
21,2-21,4	200	Vapor de agua, agua líquida en las nubes
22,21-22,5	300	Vapor de agua, agua líquida en las nubes
23,6-24	400	Vapor de agua, agua líquida en las nubes
31,3-31,8	500	Canal ventana asociado a las mediciones de temperatura
36-37	1 000	Lluvia, nieve, hielos oceánicos, vapor de agua, agua líquida en las nubes, vientos oceánicos, humedad del suelo
50,2-50,4	200	O ₂ (determinación de perfiles de temperatura)
52,6-59,3	6 700 ⁽¹⁾	O ₂ (determinación de perfiles de temperatura)
86-92	6 000	Nubes, hielo, nieve, lluvia
100-102	2 000	N ₂ O
109,5-111,8	2 300	O ₃
114,25-122,25	8 000 ⁽¹⁾	O ₂ (determinación del perfil de temperatura), CO
148,5-151,5	3 000	Canal ventana
155,5-158,5	3 000	Canal ventana (la atribución caducará el 1 de enero de 2018 conforme al número 5.562F del RR)
164-167	3 000	Canal ventana
174,8-191,8	17 000 ⁽¹⁾	H ₂ O (determinación del perfil de humedad), N ₂ O, O ₃
200-209	9 000 ⁽²⁾	H ₂ O, O ₃ , N ₂ O
226-232	6 000 ⁽²⁾	Nubes, CO
235-238	3 000 ⁽²⁾	O ₃
250-252	2 000 ⁽²⁾	N ₂ O
275-277 ⁽³⁾	2 000 ⁽²⁾	N ₂ O
294-306 ⁽³⁾	12 000 ⁽²⁾	N ₂ O, O ₃ , O ₂ , HNO ₃ , HOCl
316-334 ⁽³⁾	10 000 ⁽²⁾	Determinación del perfil del vapor de agua, O ₃ , HOCl
342-349 ⁽³⁾	7 000 ⁽²⁾	CO, HNO ₃ , CH ₃ Cl, O ₃ , O ₂ , HOCl, H ₂ O

CUADRO 5-1 (Fin)

Frecuencia (GHz)	Anchura de banda necesaria o atribuida (MHz)	Mediciones principales
363-365 ⁽³⁾	2 000 ⁽²⁾	O ₃
371-389 ⁽³⁾	18 000 ⁽²⁾	Determinación del vapor de agua
416-434 ⁽³⁾	18 000 ⁽²⁾	Determinación del perfil de temperatura
442-444 ⁽³⁾	2 000 ⁽²⁾	Vapor de agua
486-506 ⁽³⁾	9 000 ⁽²⁾	O ₃ , CH ₃ Cl, N ₂ O, BrO, ClO
546-568 ⁽³⁾	22 000 ⁽²⁾	Determinación del perfil de la temperatura
624-629 ⁽³⁾	5 000 ⁽²⁾	BrO, O ₃ , HCl, SO ₂ , H ₂ O ₂ , HOCl, HNO ₃
634-654 ⁽³⁾	20 000 ⁽²⁾	CH ₃ Cl, HOCl, ClO, H ₂ O, N ₂ O, BrO, O ₃ , HO ₂ , HNO ₃
659-661 ⁽³⁾	2 000 ⁽²⁾	BrO
684-692 ⁽³⁾	8 000 ⁽²⁾	ClO, CO, CH ₃ Cl
730-732 ⁽³⁾	2 000 ⁽²⁾	O ₂ , HNO ₃
851-853 ⁽³⁾	2 000 ⁽²⁾	NO
951-956 ⁽³⁾	5 000 ⁽²⁾	O ₂ , NO, H ₂ O

* Las actualizaciones de este Cuadro pueden consultarse en la Recomendación UIT-R SA.515.

(1) Esta anchura de banda la ocupan varios canales.

(2) Esta anchura de banda la ocupan varios sensores.

(3) Número 5.565 del RR.

5.1.3 Parámetros de la calidad de funcionamiento

Los sensores pasivos se caracterizan por su sensibilidad radiométrica y su resolución geométrica.

5.1.3.1 Sensibilidad radiométrica

Este parámetro se suele expresar como el menor diferencial de temperatura ΔT_e que el sensor es capaz de detectar. ΔT_e viene dado por:

$$\Delta T_e = \frac{\alpha T_s}{\sqrt{B\tau}} \quad \text{K} \quad (5-1)$$

siendo:

B : anchura de banda del receptor (Hz)

τ : tiempo de integración (s)

α : constante del sistema receptor (depende de la configuración)

T_s : temperatura de ruido del sistema receptor (K).

CUADRO 5-2

Frecuencias centrales o números de canal de los más importantes sensores pasivos de microondas existentes

Nombre	Portos	IRIS	MIRAS	MIMR	AMSR	AMSR-E	SMMR	SSM/I	SSM/T	SSM/S	TMI	MIVZA	MZOAS	MTVZA	MHS	AMSU-A/B	MWRS	MWRI
Misión Antena (cm)	En avión	En avión	En avión	METOP 150	ADEOS 200	Agua 160	NIMBUS 80	DMSP 65	DMSP 60	DMSP 65	TRMM 65	Meteor 40	Meteor 80	Meteor 20	NOAA / METOP 20	NOAA / METOP 20		FY-3
Exploración Frec. GHz	NA	Interf.	Interf.	Cónica	Cónica	Cónica	Cónica	Cónica	Transv.	Cónica	Cónica	Cónica	Cónica	Cónica	Transv.	Transv.		
Frecuencias centrales (Algunos canales tienen dos polarizaciones. Los canales marcados con el símbolo * sólo tienen polarización vertical.)																		
1,37-1,4:	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1,4-1,427:	1,41	-	1,40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2,69-2,7:	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4,2-4,4:	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4,99-5,0:	5,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6,425-7,25:	-	6,50	-	6,80	6,93	6,925	6,60	-	-	-	-	-	6,20	-	-	-	-	-
10,6-10,68:	10,65	-	-	10,65	10,65	10,65	-	-	-	-	10,65	-	-	-	-	-	-	-
10,68-10,7:	-	-	-	-	-	-	10,69	-	-	-	-	-	10,80	-	-	-	10,65	-
15,2-15,35:	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15,35-15,4:	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18,6-18,8:	-	-	-	18,70	18,70	18,70	18,00	19,35	-	19,35	19,35	-	-	-	-	-	18,70	-
21,2-21,4:	-	-	-	-	-	-	21,00	-	-	-	21,30	20,00	20,00	-	-	-	-	-
22,21-22,5:	-	-	-	-	-	-	-	22,24	-	22,24	-	-	22,20	-	-	-	-	-
23,6-24,0:	23,80	-	-	23,80	23,80	23,80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	23,80	23,80	23,9
31,3-31,5:	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	31,4	-	31,40
31,5-31,8:	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
36,0-37,0:	36,50	-	-	36,50	36,50	36,50	37,00	37,00	-	37,00	37,00	35,00	35,00	-	-	-	36,50	-
50,2-50,4:	-	-	-	-	50,30 *	-	-	-	50,50	50,30	-	-	-	-	-	50,30	-	50,31
51,4-54,25:	-	-	-	-	52,80 *	-	-	-	53,20	2 ca.	-	-	-	3 ca. y sub	3 ca. y sub	3 ca. y sub	-	53,74
54,25-58,2:	-	-	-	-	-	-	-	-	2 ca.	3 ca. y sub	-	-	-	12 ca. y sub	22 ca. y sub	-	54,96 y 57,95	-
58,2-59,0:	-	-	-	-	-	-	-	-	2 ca.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
59,0-64,0:	-	-	-	-	-	-	-	-	59,40	21 ca. y sub	-	-	-	-	-	12 ca. y sub	-	-
64,0-65,0:	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
86,0-92,0:	90,00	-	-	89,00	89,00	89,00	-	85,50	90,00	91,66	85,50	94,00	94,00	-	89	89,00	89,00	89,00
100-102:	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
105-116:	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
116-126:	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
150-151:	-	-	-	-	-	-	-	-	150,00	150,00	-	-	-	-	-	150,00	150,00	-
156-158:	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	157	-	-	-
164-168:	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
174,8-194,8:	-	-	-	-	-	-	-	-	6 ca. y sub	6 ca. y sub	-	-	-	-	6 ca. y sub	6 ca. y sub	-	-

5.1.3.2 Umbral radiométrico ΔP

Se trata de la variación mínima de temperatura que el sensor pasivo es capaz de detectar. ΔP viene dado por:

$$\Delta P = k\Delta T_e B \quad W \quad (5-2)$$

siendo:

$k = 1,38 \times 10^{-23}$ (J/K): la constante de Boltzmann.

La ΔP anterior se calcula a partir de ΔT_e . En el futuro, T_s disminuirá así como ΔT_e (véase la ecuación (5-1)). Por consiguiente ΔP debe calcularse a partir de una previsión razonable de ΔT_e y no a partir de la ΔT_e correspondiente a la tecnología actual. Del mismo modo, τ aumentará (concepto de barrido transversal). τ debe escogerse también en base a previsiones futuras razonables.

5.1.3.3 Resolución geométrica

Cuando se trata de mediciones bidimensionales de parámetros de la superficie (véase el § 5.1.4), se suele considerar que la abertura de -3 dB de la antena determina la resolución transversal. Cuando se trata de mediciones tridimensionales de parámetros atmosféricos (véase el § 5.1.5), hay que tener en cuenta la resolución longitudinal a lo largo del eje de la antena. Esta resolución longitudinal es una función compleja de las características de la atmósfera dependientes de la frecuencia y de la calidad de funcionamiento de ruido y de anchura de banda del receptor).

5.1.3.4 Tiempo de integración

El tiempo de integración es también un parámetro importante resultante de un complejo compromiso que tiene en cuenta especialmente la resolución geométrica deseada, la configuración de exploración del sensor y su velocidad con respecto a la escena observada.

5.1.4 Condiciones operativas típicas de los sensores pasivos

Los sensores pasivos del SETS se instalan básicamente en dos tipos complementarios de sistemas de satélite: los satélites en órbita baja y los satélites geoestacionarios.

5.1.4.1 Satélites en órbita terrena baja

Los sistemas basados en satélites en órbitas polares bajas heliosíncronas se utilizan para la adquisición de datos medioambientales de gran resolución a escala mundial. La mecánica orbital limita la frecuencia de repetición de las mediciones. Con un solo satélite se obtiene un máximo de dos coberturas mundiales al día en intervalos de 12 h. Los radiómetros pasivos funcionando en frecuencias inferiores a 100 GHz sólo vuelan actualmente en satélites de órbita terrena baja. Esto se debe principalmente a la dificultad que supone obtener una resolución geométrica adecuada a frecuencias relativamente bajas, pero puede cambiar en el futuro.

5.1.4.2 Satélites geoestacionarios

Los sistemas de satélites en órbitas geoestacionarias se utilizan para la recogida de datos de resolución baja a media a escala regional. La frecuencia de repetición de las mediciones queda únicamente limitada por la tecnología de los equipos físicos. Típicamente los datos de una región se recogen cada 30 min como máximo.

5.1.5 Observación de las características de la superficie terrestre

Para la medición de los parámetros de superficie, deben seleccionarse canales radiométricos «ventana» de modo que pueda haber un muestreo regular del espectro de microondas entre 1 GHz y 90 GHz (una frecuencia/octava por término medio). No obstante, no suele ser necesario realizar

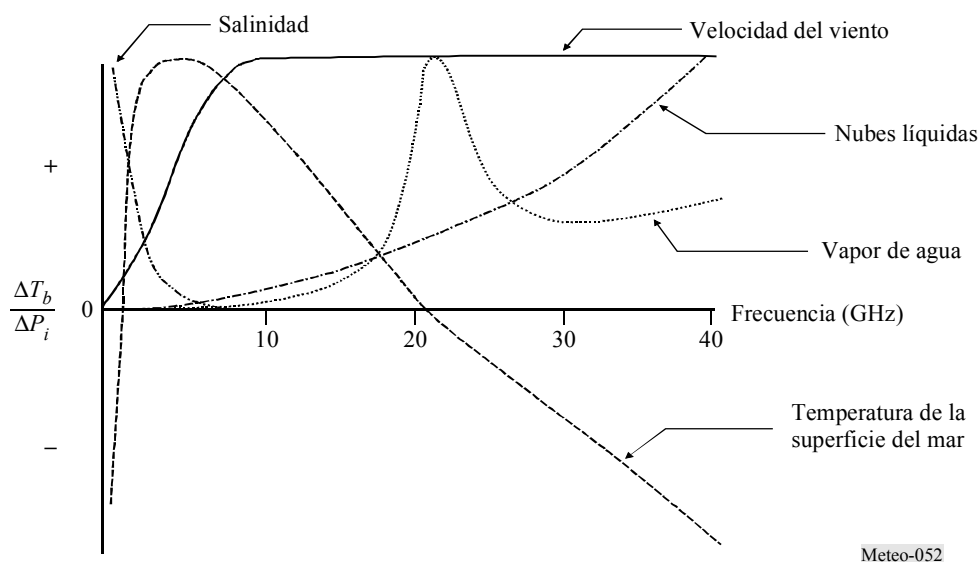
ajustes de frecuencia de más precisión porque las emisiones espontáneas de los parámetros de superficie no son excesivamente dependientes de la frecuencia. En general, hay varios parámetros geofísicos que contribuyen en mayor o menor medida a la emisión natural que puede observarse a una determinada frecuencia. Esto se refleja en las Figs. 5-2 a 5-4 que representan la sensibilidad de las emisiones naturales de microondas a varios parámetros geofísicos en función de la frecuencia.

5.1.5.1 Sobre la superficie de los océanos

La Fig. 5-2 muestra la sensibilidad de la temperatura de brillo a los parámetros geofísicos sobre la superficie de los océanos. Cabe observar lo siguiente:

FIGURA 5-2

Sensibilidad de la temperatura de brillo a los parámetros geofísicos sobre la superficie del océano

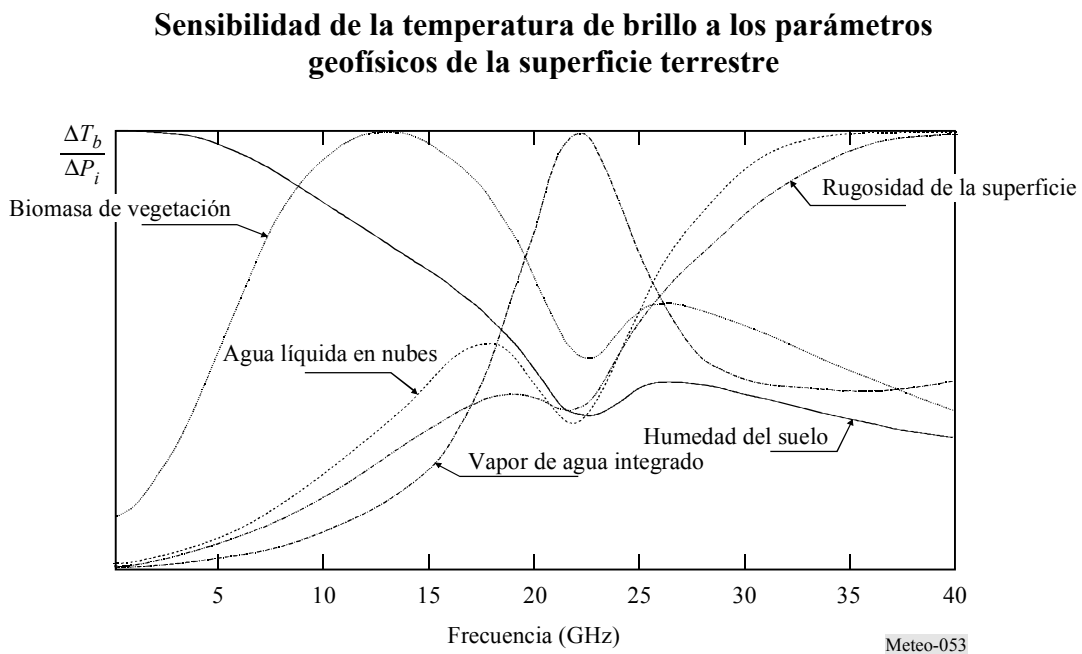


- las mediciones a baja frecuencia, típicamente en torno a 1,4 GHz, permiten obtener la salinidad de los océanos;
- las mediciones en torno a 6 GHz presentan la máxima sensibilidad para la temperatura de la superficie del mar, aunque contienen una pequeña contribución de la salinidad y la velocidad del viento que pueden suprimirse por medio de mediciones en torno a 1,4 GHz y en torno a 10 GHz;
- la región 17-19 GHz, donde la «firma» de la temperatura de la superficie del mar y del vapor de agua atmosférico es menor, resulta óptima para la emisividad de la superficie del océano, que está directamente vinculada a la velocidad del viento cerca de la superficie y a la presencia de hielo en el mar. La temperatura de la superficie del océano tiene también cierta sensibilidad al contenido total de vapor de agua y a las nubes líquidas;
- el contenido total de vapor de agua puede medirse con más exactitud en torno a 23 GHz, mientras que las nubes líquidas se obtienen a partir de mediciones en torno a 36 GHz;
- se necesitan cinco frecuencias (en torno a 6 GHz, 10 GHz, 18 GHz, 23 GHz y 36 GHz) para la determinación de los parámetros dominantes.

5.1.5.2 Sobre la superficie terrestre

El problema resulta algo más complejo sobre la superficie terrestre debido a la gran variabilidad temporal y espacial de las características de dicha superficie (que va de zonas cubiertas por el hielo y la nieve a desiertos y pluviselvas tropicales). Además, la señal recibida por el radiómetro debe atravesar varios medios distintos: básicamente el suelo, tal vez nieve o hielo, la capa de vegetación, la atmósfera, las nubes y a veces la lluvia. El segundo aspecto a considerar es que para cada uno de estos medios hay varios factores que pueden influir en la radiación emitida. Por ejemplo, la temperatura de brillo del suelo depende de su temperatura real del suelo, de la rugosidad de su superficie y de su textura. Análogamente, la contribución de la vegetación está relacionada con la temperatura y la estructura de la cubierta forestal a través de la opacidad y el albedo de dispersión simple. La forma en que estos factores afectan a la señal es interdependiente con la frecuencia. La Fig. 5-3 muestra la sensibilidad normalizada en función de la frecuencia para varios parámetros clave.

FIGURA 5-3



La Fig. 5-3 muestra que sobre tierra y para una zona de temperatura media, es necesario utilizar:

- baja frecuencia, para medir la humedad del suelo (en torno a 1 GHz);
- mediciones entre 5 GHz y 10 GHz, aproximadamente, para estimar la biomasa de vegetación una vez conocida la contribución de la humedad del suelo;
- dos frecuencias en torno a la cresta de absorción de vapor de agua (típicamente 18-19 GHz y 23-24 GHz), para evaluar la contribución atmosférica;
- una frecuencia en torno a 37 GHz para evaluar el agua líquida de las nubes (con 18 GHz) y/o la estructura de la vegetación (con 10 GHz), la rugosidad de la superficie (con 1 GHz y 5 GHz ó 10 GHz); y

resulta de utilidad una frecuencia a 85 GHz ó 90 GHz para la supervisión de la pluviosidad, pero sólo cuando todos los demás factores concomitantes puedan evaluarse a frecuencias bajas.

Los estudios realizados con el radiómetro de microondas de exploración multicanal (SMMR, *scanning multichannel microwave radiometer*) y el generador de imágenes de microondas de sensor especial (SMM/I, *special sensor microwave/imager*) han puesto de manifiesto que pueden recuperarse algunas otras variables. Entre éstas se encuentra la temperatura de la superficie (con menos precisión que las mediciones de infrarrojos pero viable en todas las condiciones meteorológicas) utilizando un canal de 19 GHz cuando pueda estimarse la contribución superficial y la atmosférica.

Es importante supervisar las zonas cubiertas de nieve y para ello es imprescindible utilizar varias frecuencias. Efectivamente hay que distinguir la nieve del hielo, así como la antigüedad de la nieve. La señal correspondiente depende de la estructura de las capas de nieve y del tamaño de sus cristales. Para recuperar esta información se ha puesto de manifiesto la necesidad de utilizar varias frecuencias, normalmente 19,37 GHz y 85-90 GHz.

5.1.5.3 Parámetros auxiliares de otros instrumentos de teledetección

Los altímetros de radar a bordo de vehículos espaciales funcionan actualmente a nivel mundial sobrevolando la superficie de los océanos y de los continentes, y dando soporte a importantes aplicaciones de la oceanografía y climatología. Para suprimir los efectos de la refracción atmosférica cuando se utilizan datos de altimetría de gran exactitud es preciso realizar un conjunto de mediciones pasivas auxiliares en torno a 18,7 GHz, 23 GHz y 36 GHz.

Para poder separar las diversas contribuciones a las señales captadas por un satélite es imprescindible tener acceso simultáneamente a mediciones efectuadas en cinco frecuencias distintas como mínimo.

5.1.6 Principales características técnicas

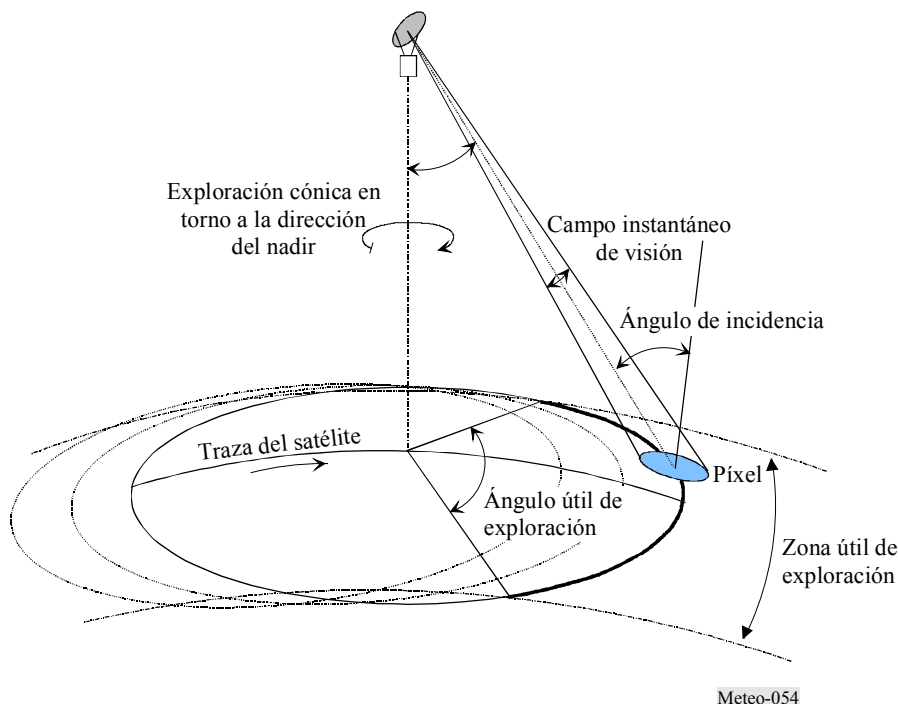
La mayor parte de los sensores pasivos de microondas diseñados para captar las características de la superficie terrestre utiliza una configuración de exploración cónica centrada sobre la dirección del nadir, debido a lo importante que resulta para la interpretación de las mediciones de superficie el mantenimiento de un ángulo de incidencia constante respecto al suelo a lo largo de todas las líneas de exploración. La geometría de los instrumentos de exploración cónica se describe en la Fig. 5-4.

A continuación se indican algunas características geométricas típicas (correspondientes a 803 km de altitud):

- ángulo de incidencia con el suelo en torno a 55°
- ángulo de medio cono $46,7^\circ$ respecto a la dirección del nadir
- anchura útil del barrido: 1 600 km (limitada por la configuración de la exploración), permite la ejecución de dos coberturas diarias por un instrumento a latitudes medias y altas
- tamaño del píxel variable con la frecuencia y tamaño de la parábola, típicamente desde 50 km a 6,9 GHz hasta 5 km a 89 GHz cuando se utilicen instrumentos AMST de la NASDA (parábolas de 2 m)
- el periodo de exploración y el sistema de alimentación se escogen de modo que se garantice plena cobertura y tiempo de integración (resolución radiométrica) óptimo a todas las frecuencias, a costa de aumentar la complejidad del equipo físico.

Se pueden utilizar asimismo instrumentos ajenos a la exploración orientados al nadir para suministrar datos auxiliares destinados a aplicaciones específicas, teniendo en cuenta la supresión de los efectos atmosféricos en las mediciones de los altímetros de radar. Para facilitar su acomodación en los satélites, se están desarrollando técnicas interferométricas destinadas básicamente a mejorar la resolución espacial a baja frecuencia. Estos sensores utilizarán sistemas fijos de pequeñas antenas en vez de grandes antenas de exploración.

FIGURA 5-4
Geometría típica de los radiométricos pasivos de microondas con exploración cónica



5.1.7 Criterios de calidad de funcionamiento y de interferencia

Los criterios de calidad de funcionamiento y de interferencia para las mediciones en superficie con arreglo a las Recomendaciones UIT-R SA.1028 – Criterios de calidad para la teledetección pasiva por satélite y UIT-R SA.1029 – Criterios de interferencia para la teledetección pasiva por satélite, se resumen en el Cuadro 5-3.

CUADRO 5-3

Resumen de los criterios de calidad de funcionamiento y de interferencia para las mediciones en superficie

Frecuencia (GHz)	Nivel de interferencia aceptable (dBW)	Anchura de banda de referencia (MHz)	ΔT_e requerida (K)
Cerca de 1,4	-171	27	0,1
Cerca de 2,7	-174	10	0,1
Cerca de 4	-161	100	0,3
Cerca de 6	-164	100	0,3
Cerca de 11	-163	20	1,0
Cerca de 15	-166	50	0,2
Cerca de 18	-155	100	1,0
Cerca de 21	-163	100	0,2
22,235	-160	100	0,4
Cerca de 24	-163	100	0,2
Cerca de 31	-163	100	0,2
Cerca de 37	-156	100	1,0
Cerca de 90	-153	200	1,0

5.1.8 Medición tridimensional de parámetros atmosféricos

El espectro electromagnético contiene muchas bandas de frecuencias en las que se presentan fenómenos de absorción por parte de ciertos gases atmosféricos debido a la resonancia molecular (véase la Fig. 5-1). Las frecuencias a las que se presentan estos fenómenos caracterizan a los gases (por ejemplo O₂, O₃, H₂O, ClO, etc). El coeficiente de absorción depende de la naturaleza del gas, de su concentración y de su temperatura. Las mediciones pasivas en torno a estas frecuencias para determinar los perfiles de la temperatura y de la concentración del gas absorbente pueden efectuarse desde plataformas espaciales. Son de especial importancia para el SETS por debajo de 200 GHz las frecuencias de resonancia del oxígeno entre 50 GHz y 70 GHz, a 118,75 GHz y la frecuencia de resonancia del vapor de agua a 183,31 GHz.

El gas absorbente a la longitud de onda λ radia energía (a la misma frecuencia) con una intensidad proporcional a su temperatura T y a su índice de absorción $\alpha = f(\lambda)$. Esto obedece a la ley de Kirchoff, cuya ecuación (5-3) es la siguiente:

$$I = \alpha \cdot L \quad (5-3)$$

siendo:

I : brillo espectral del gas a la temperatura T

$L = 2 \cdot k \cdot T/\lambda^2$: brillo espectral del cuerpo negro a T (W/(m² · sr · Hz))

$k = 1.38 \times 10^{-23}$: constante de Boltzman (J/K)

α : característica del gas (O₂, CO₂, H₂O, O₃, etc.).

Hay dos gases en la atmósfera, el CO₂ y el O₂, de importancia primordial debido a que su concentración y presión en la atmósfera (dos parámetros que determinan el índice de absorción α) son casi constantes y conocidos en todo el mundo. Por consiguiente se pueden recuperar los perfiles de temperatura de la atmósfera mediante mediciones radiométricas a diversas frecuencias en las bandas de absorción pertinentes (típicamente en la región de infrarrojos en torno a 15 μ m para el CO₂ y en la región de microondas en torno a 60 GHz y 118,75 GHz para el O₂).

Se efectúan asimismo mediciones radiométricas en las bandas de absorción específicas de otros gases atmosféricos de importancia radioactiva y química de concentración variable y desconocida (H₂O, O₃, CH₄, ClO, etc.). No obstante, en este caso, el conocimiento de los perfiles de temperatura de la atmósfera es obligatorio a fin de recuperar los perfiles verticales de concentración de estos gases que son desconocidos.

5.1.8.1 Sondas atmosféricas verticales pasivas de microondas

Las sondas atmosféricas verticales son sensores orientados al nadir diseñados fundamentalmente para recuperar los perfiles verticales de la temperatura y de la humedad atmosférica. Utilizan canales de frecuencia seleccionados concienzudamente dentro del espectro de absorción del O₂ y del H₂O atmosféricos. Las Figs. 5-5 a 5-7 muestran en detalle los espectros de absorción en la proximidad de sus principales frecuencias de resonancia por debajo de 200 GHz. La Fig. 5-5 muestra asimismo la posición y estado de las atribuciones requeridas por el SETS (pasivo) en la banda 50-71 GHz, como resultado de los estudios de compartición y de la CMR-97. Obsérvese la gran variabilidad del espectro de absorción de vapor de agua en torno a 183 GHz, dependiente de la zona climática y de las condiciones meteorológicas locales.

5.1.8.2 Mecanismo del sondeo atmosférico vertical

En el sondeo atmosférico vertical desde el espacio, el radiómetro mide la contribución total de la atmósfera desde la superficie hasta el límite superior, a distintas frecuencias (infrarrojo o microondas).

FIGURA 5-5

Espectro de absorción del O₂ a lo largo de un trayecto vertical en torno a 60 GHz

(varias líneas de absorción)

Requisitos de los sensores pasivos en el espectro de absorción del O₂ en torno a 60 GHz
(atmósfera normalizada de Estados Unidos de América)

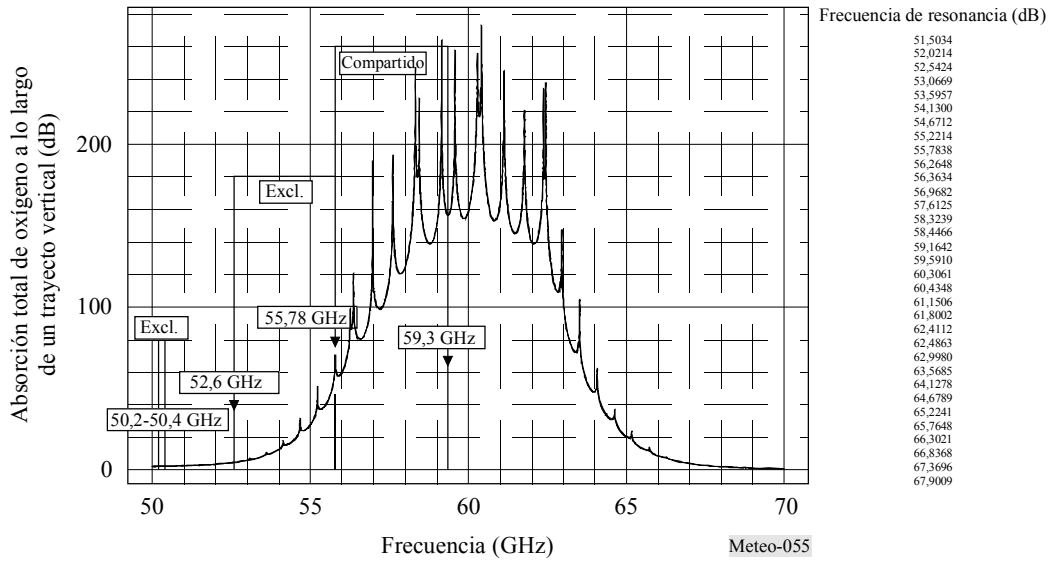


FIGURA 5-6

Espectro de absorción del O₂ a lo largo de un trayecto vertical en torno a 118,75 GHz

(una sola línea de absorción)

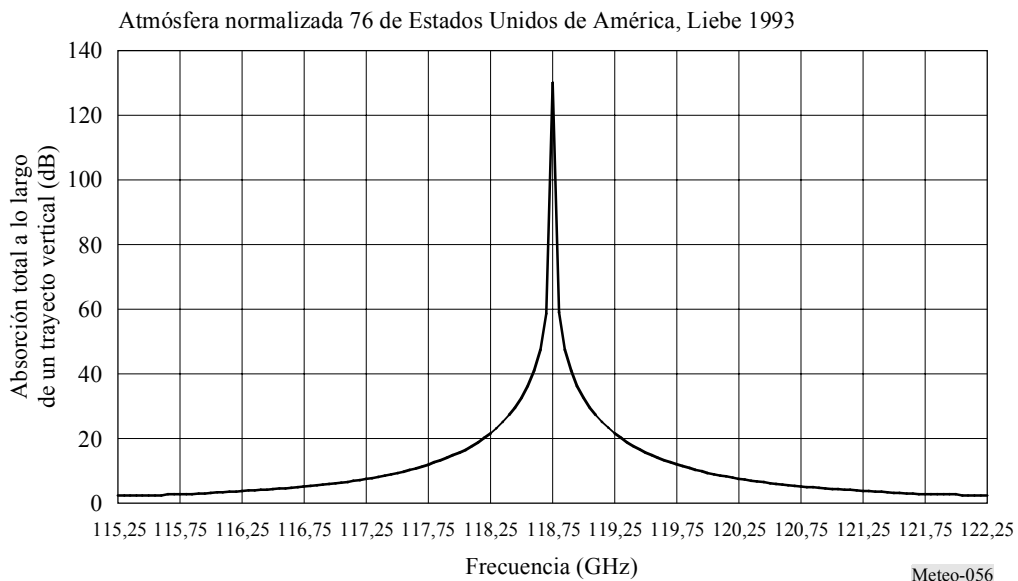
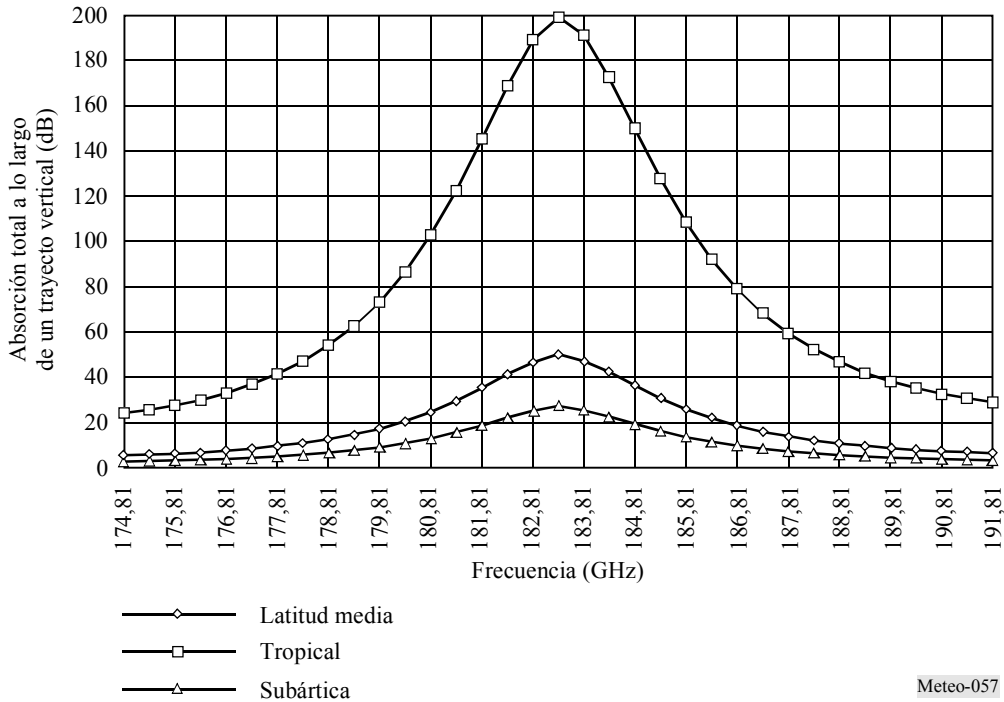


FIGURA 5-7

Espectro de absorción del vapor de agua a lo largo de un trayecto vertical en torno a 183,31 GHz



Cada capa (caracterizada por su altitud) radia energía proporcionalmente a su temperatura local y a su índice de absorción. La energía ascendente (en dirección del radiómetro) queda absorbida en parte por las capas superiores y, a su vez, cada capa absorbe parte de las emisiones ascendentes procedentes de las capas inferiores.

La integración de la ecuación de transferencia de la energía radiativa a lo largo del trayecto desde la superficie terrestre al satélite refleja este mecanismo y se traduce en una función de ponderación que describe la contribución relativa de cada capa atmosférica en función de su altitud que representa asimismo la resolución longitudinal (vertical) del sensor.

La cresta de la función de ponderación se presenta a cualquier altitud y depende del índice de absorción a la frecuencia considerada. Si en una frecuencia la absorción es baja, la cresta estará próxima a la superficie terrestre. Si en una frecuencia la absorción es alta, la cresta estará próxima al límite superior de la atmósfera. Las sondas incorporan varios canales de frecuencia. Éstos se seleccionan con el mayor esmero dentro de la banda de absorción para cubrir una amplia gama de niveles de absorción a fin de obtener las mejores muestras atmosféricas posibles desde la superficie hasta altitudes estratosféricas.

Las funciones de ponderación típicas para una sonda de temperatura de microondas funcionando en la banda de 60 GHz se muestran en la Fig. 5-8.

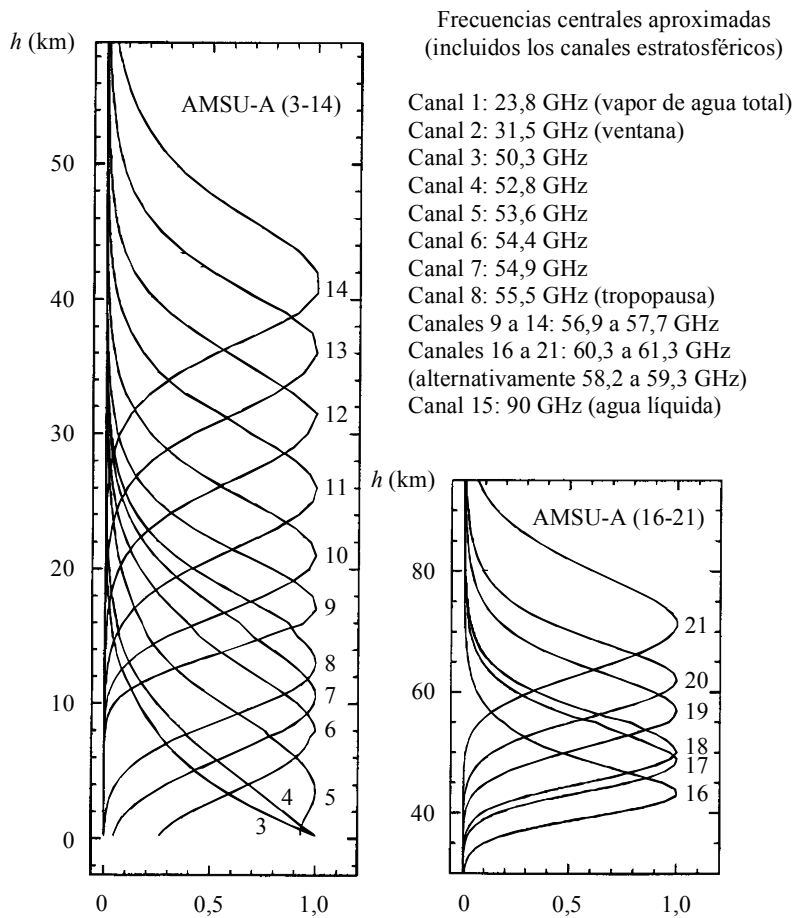
Obsérvese la especial importancia de los canales 1 (23,8 GHz), 2 (31,5 GHz) y 15 (90 GHz). Se trata de canales auxiliares que juegan un papel primordial en el proceso de recuperación de mediciones efectuadas en el espectro de absorción del O₂. Por este motivo, deben tener geometrías y calidades de funcionamiento radiométrico semejantes y deben recibir una protección análoga contra la interferencia. En la Fig. 5-8 se pone de manifiesto que:

- el canal 1 está próximo a la cresta de absorción del H₂O. Se utiliza para recuperar el contenido total de vapor de agua a lo largo de la línea de visibilidad directa y para determinar las correcciones necesarias en los demás canales;

- el canal 2 es el que presenta menos efectos acumulativos debidos al oxígeno del vapor de agua. Se trata del canal ventana óptimo para observar la superficie terrestre y es la referencia para los demás canales; y
- el canal 15 puede detectar el agua líquida en la atmósfera y se utiliza para depurar las mediciones efectuadas en los demás canales de los efectos de las precipitaciones.

FIGURA 5-8

Funciones de ponderación típicas para una sonda de temperatura de microondas funcionando cerca de 60 GHz



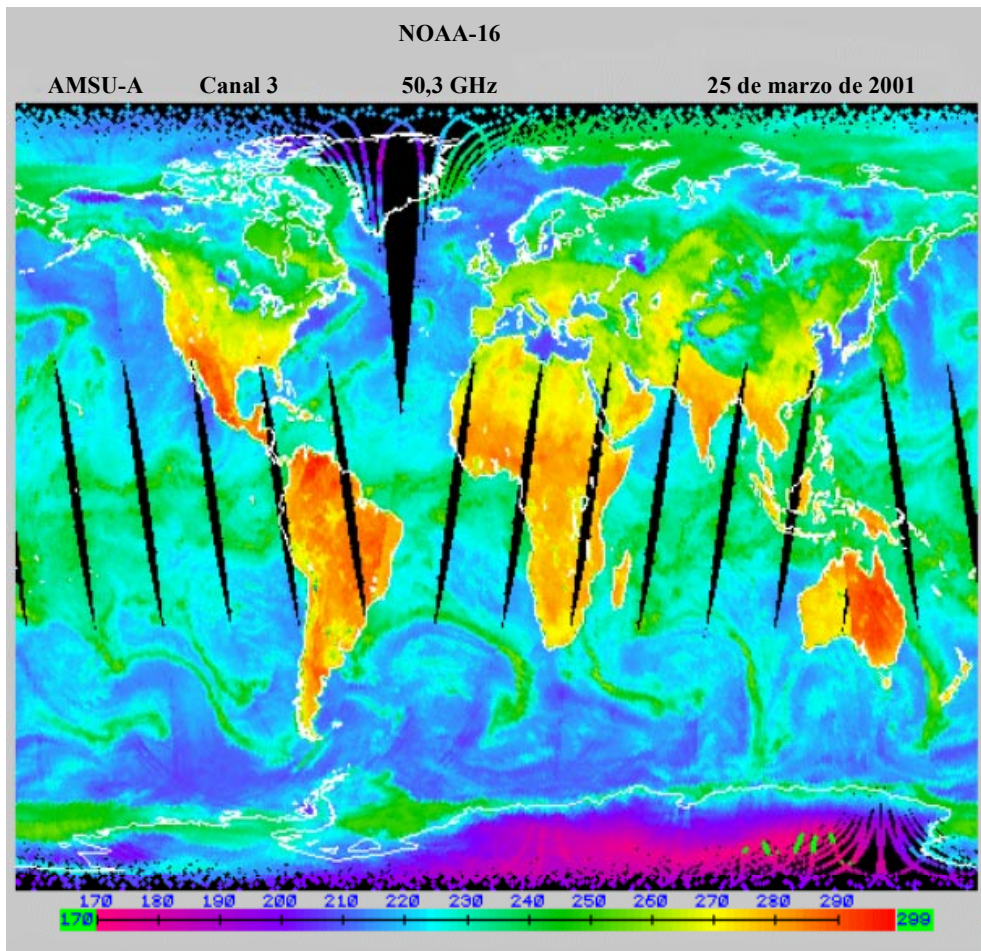
Meteo-058

5.1.8.3 Utilización del sondeo atmosférico vertical

Los perfiles verticales de temperatura y humedad se utilizan básicamente como entrada a los modelos numéricos de predicción meteorológica (NWP, *numerical weather prediction*), que necesitan inicializarse cada 6 h como mínimo. Hay modelos NWP mundiales y también en Estados Unidos de América, Europa, China, Australia, Brasil, etc. que permiten obtener predicciones meteorológicas con una anticipación de 5 a 10 días y una resolución geográfica de 50 km. Asimismo, hay cada vez más modelos regionales y locales para la predicción a un nivel más detallado (de 10 km o menos) a corto plazo (de 6 a 48 h). La Fig. 5-9 muestra las mediciones de la composición mundial de la temperatura (K) de luminancia energética a partir del canal 3, AMSU-A, realizadas en una

ventana temporal de 12 h aproximadamente. Las observaciones del canal 3 incluyen la emisión y la reflexión de la superficie más la emisión del oxígeno principalmente en los primeros 5 km por encima de la superficie (véase la Fig. 5-8).

FIGURA 5-9
**Composición mundial de las mediciones de la temperatura (K)
de luminancia obtenidas del canal 3 AMSU-A**



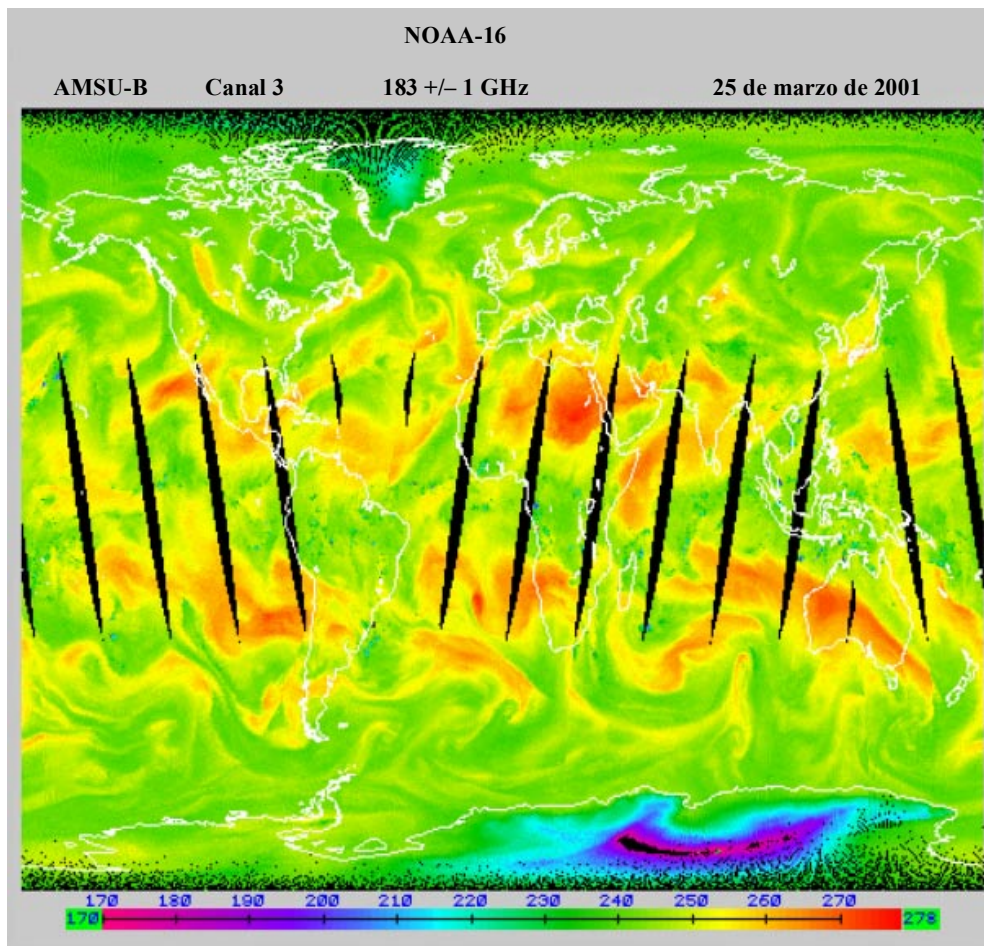
Meteo-059

La Fig. 5-10 muestra la composición mundial de las mediciones de la temperatura (K) de luminancia energética obtenidas del canal 3 del AMSU-B, con las mediciones obtenidas en una ventana temporal de 12 h aproximadamente. El AMSU-B es un radiómetro explotado en colaboración con AMSU-A para mejorar la detección del vapor de agua troposférico. A 183 GHz, el radiómetro observa una temperatura elevada (entre naranja y rojo) en los trópicos y en las latitudes medias cuando las partes superiores de la troposfera están secas y las observaciones del sensor se aproximan a la superficie, y temperaturas de escaso brillo (verde) cuando la humedad es elevada y la radiación se origina en los niveles altos.

Los modelos NWP utilizan ecuaciones diferenciales parciales Navier-Stokes. Debido a que estos modelos simulan mecanismos atmosféricos de gran inestabilidad, resultan extremadamente sensibles a la calidad de la determinación inicial de perfiles tridimensionales. Este problema ha sido descrito por Lorentz y ha quedado totalmente explicado por la «teoría del caos». Para ejecutar los modelos NWP, se necesitan los supercomputadores más potentes.

FIGURA 5-10

**Composición mundial de las mediciones de la temperatura (K) de
luminancia energética obtenidas del canal 3 AMSU-B**



Meteo-0510

Hay que mejorar y aumentar la inicialización de los modelos cada 6 h como mínimo, a nivel mundial y con una resolución de 50 km para los NWP mundiales y de 10 km para los NWP regionales o locales. En el futuro, habrá que obtener la información cada 3 h como máximo.

5.1.8.4 Características de los sensores pasivos orientados al nadir funcionando en la gama de 60 GHz

La mayor parte de los sensores de microondas pasivos diseñados para la medición de parámetros troposféricos y estratosféricos son instrumentos orientados al nadir. Utilizan una configuración de exploración mecánica transversal a la trayectoria (los actuales) o de barrido transversal (los futuros) en un plano normal a la velocidad del satélite que contiene la dirección del nadir. Esta configuración proporciona el campo de visión óptimo (FOV, *optimum field-of-view*) y la calidad media de datos óptima. El Cuadro 5-4 resume las características típicas de las sondas de temperatura que funcionan en torno a 60 GHz a bordo de satélites en órbita terrena baja.

CUADRO 5-4

Características típicas de las sondas verticales de microondas en torno a 60 GHz

Característica	Exploración mecánica (actual)	Exploración de barrido transversal (futura)
Anchura de banda del canal (MHz)	400	15
Tiempo de integración (s)	0,2	2,45
Diámetro de la antena (cm)	15	45
Puntos de 3 dB en el FOV instantáneo (grados)	3,3	1,1
Campo de visión transversal a la trayectoria (grados)	±50	±50
Ganancia de la antena (dBi)	36	45
Ganancia de lóbulo (dBi)	-10	-10
Eficacia del haz (%)	> 95	> 95
Resolución radiométrica (K)	0,3	0,1
Anchura de la zona de exploración (km)	2 300	2 300
Tamaño del píxel del nadir (km)	49	16
Número de píxels/línea	30	90

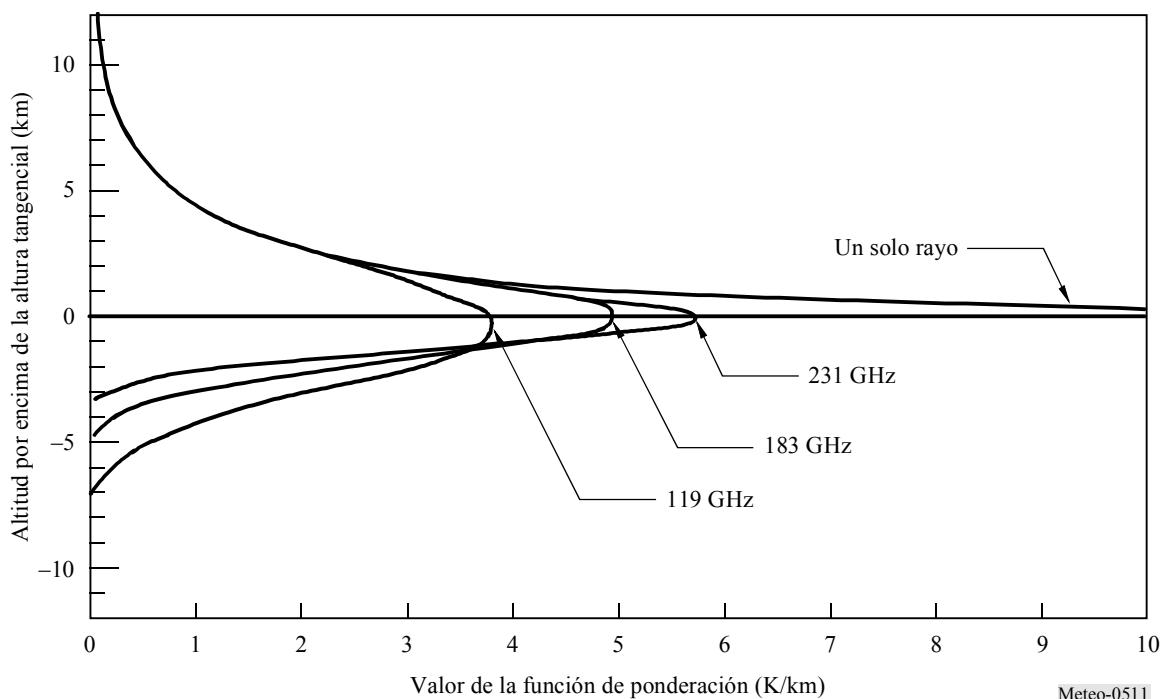
5.1.8.5 Sondas pasivas de limbo de microondas

Las sondas de limbo de microondas (MLS, *microwave limb sounders*), que observan la atmósfera en direcciones tangenciales a las capas atmosféricas se utilizan para estudiar desde la región atmosféricas baja a la superior, donde las intensas actividades fotoquímicas pueden tener una gran repercusión en el clima terrestre. Las características más importantes de las mediciones tangenciales de la emisión del limbo son las siguientes:

- se utiliza el trayecto más largo, lo que maximiza las señales procedentes de los componentes atmosféricos de menor importancia y baja concentración, y permite efectuar sondeos a gran altitud;
- la resolución vertical se determina por la transferencia de energía radiativa a través de la atmósfera y por el campo de visión vertical de la antena. La Fig. 5-11 muestra un ejemplo característico;
- La resolución horizontal normal a la línea de visibilidad directa se determina principalmente por el campo de visión horizontal de la antena y por el arrastre corto provocado por el movimiento del satélite;
- la resolución horizontal a lo largo de la línea de visibilidad directa se determina principalmente por la transferencia de energía radiativa a través de la atmósfera;
- el fondo espacial es óptimo para la medición de las emisiones;
- las mediciones del limbo son extremadamente vulnerables a las interferencias provocadas por los enlaces entre satélites.

FIGURA 5-11

**Funciones de ponderación vertical de las MLS
(antena de 1,6 m de difracción limitada, a 600 km de altitud)**



5.1.8.5.1 MLS – Satélite de investigación de la atmósfera superior (UARS)

Las MLS UARS fueron lanzadas por primera vez en 1991 por el JPL de la NASA para ejecutar las siguientes funciones:

- la exploración vertical de la atmósfera en el intervalo 15-120 km de altitud, en dos direcciones ortogonales de radiación lateral;
- la resolución vertical típica para las mediciones de los perfiles (anchuras de las funciones de ponderación a su valor mitad) es de 3 a 6 km, aproximadamente, como se muestra en la Fig. 5-11;
- la resolución horizontal típica es de 30 km a lo ancho y 300 km a lo largo de la dirección de observación;
- se obtienen perfiles completos en menos de 50 s; y
- se observa la emisión térmica del limbo en cinco regiones espectrales de microondas (véase el Cuadro 5-5).

5.1.8.5.2 Nueva generación de MLS (EOS-B)

La nueva generación de MLS (EOS-B) mide las temperaturas estratosféricas más bajas y las concentraciones de H₂O, O₃, ClO, BrO, HCl, OH, HO₂, HNO₃, HCN y N₂O, por sus efectos sobre la disminución de la capa de ozono, la transformación de los gases que producen el efecto invernadero y el condicionamiento radiativo del cambio climático, así como el diagnóstico de estos efectos. Las MLS miden asimismo el H₂O, O₃, CO y HCN de las capas troposféricas superiores por sus efectos sobre el condicionamiento radiativo del cambio climático y para diagnosticar el intercambio entre la troposfera y la estratosfera.

CUADRO 5-5

Objetivos de las mediciones de las MLS y regiones espectrales

Parámetro geofísico	Región espectral (GHz)	Altitud (km)	Ruido eficaz (intervalo de tiempo)
Presión atmosférica	63	30-70	1% (2 s)
Velocidad del viento	119	70-110	2-10 m/s (10 s)
Temperatura		20-100	0.5-3 K (2 s)
O ₂		80-120	3×10^{-3} v/v (2 s)
Campo magnético		80-110	0,3-1 m gauss (10 s)
H ₂ O		183	15-90
ClO	205	20-40	2×10^{-10} v/v (10 s)
O ₃		15-90	1×10^{-8} v/v (2 s)
H ₂ O ₂		20-50	9×10^{-10} v/v (10 s)
O ₃	231	15-90	1×10^{-8} v/v (2 s)
CO		15-100	1×10^{-7} v/v (10 s)

Las MLS observan los detalles de la química del ozono midiendo muchos radicales, reservas y focos de gases en los procesos químicos que destruyen el ozono. Este conjunto de mediciones proporcionará pruebas estrictas para la comprensión de la química estratosférica mundial, contribuirá a explicar las tendencias observadas en el ozono y podrá alertar anticipadamente de los cambios que se produzcan en la química de esta región.

El UARS ya ha demostrado la capacidad de las MLS para medir los perfiles de vapor de agua de la capa superior de la troposfera, cuyo conocimiento es indispensable para la comprensión de la variabilidad climática y del calentamiento de la Tierra, cuya observación con garantías a escala mundial era extremadamente difícil hasta la fecha.

La MLS EOS-B continúa los trabajos de sondeo del limbo atmosférico iniciados por la MLS UARS y utiliza tecnologías avanzadas para proporcionar nuevas e importantes mediciones.

CUADRO 5-6

Regiones espectrales de la MLS (EOS-B) y objetivos de las mediciones

Región espectral (GHz)	Elementos atmosféricos	Sensibilidad requerida, con 0,6 s de integración y BLU (K)
642,85	CH ₃ Cl, ClO, BrO, HCl, HOCl, SO ₂	$T_{sys} < 10\ 000$
1 228,95	HF	$T_{sys} < 15\ 000$
2 522,78	OH	$T_{sys} < 30\ 000$

5.1.8.5.3 Observación submilimétrica de procesos en atmósfera de ozono significativo

El sistema de observación submilimétrica de procesos en atmósferas de ozono significativo (SOPRANO, *sub-millimetre observation of process in the atmosphere noteworthy for ozone*), ha sido desarrollado por la ESA. Este sistema tiene por objeto la detección de elementos tales como el O₃, ClO, HCl, NO, O₂, BrO, HOCl, CH₃Cl, N₂O, HNO₃, etc. Las observaciones se efectúan típicamente en el intervalo de 10-50 km de altitud. La ganancia de la antena se encuentra en torno a 70 dBi. Los canales SOPRANO y los objetivos radiométricos se muestran en el Cuadro 5-7.

CUADRO 5-7

Canales SOPRANO y objetivos radiométricos

Canales de ondas milimétricas (GHz)	Elementos atmosféricos	Temperatura de ruido del sistema (BLU, K)	Temperatura equivalente de ruido (intervalo de 0,3 s, resolución de 3 MHz (K)
497-506	BrO, O ₃ , ClO, CH ₃ Cl, N ₂ O	3 800	2,5
624,6-629	HCl, HOCl	7 900	8
952-955	O ₂ , NO	7 600	8

5.1.8.5.4 Adquisición en ondas milimétricas para la investigación de intercambios entre estratosfera y troposfera

La ESA ha desarrollado asimismo el sistema de adquisición en ondas milimétricas para la investigación de intercambios entre estratosfera y troposfera (MASTER, *millimetre-wave acquisitions for stratosphere-troposphere exchanges research*).

Este instrumento se proyectó para el satélite explorador de la química atmosférica (ACE, *atmospheric chemistry explorer*) en órbita terrena baja heliosíncrona. Su objetivo es la detección de CO, O₃, H₂O, O₂, SO₂, N₂O, HNO₃, ClO, BrO, CH₃Cl, etc. Las observaciones se efectúan típicamente en el intervalo de 0-50 km de altitud. La ganancia de la antena se encuentra en torno a los 70 dBi. El Cuadro 5-8 muestra los canales MASTER y los objetivos radiométricos.

CUADRO 5-8

Canales MASTER y objetivos radiométricos

Canales de ondas milimétricas (GHz)	Elementos atmosféricos	Temperatura de ruido del sistema (BLU, K)	Temperatura equivalente de ruido (intervalo de 0,3 s, resolución de 50 MHz (K)
199-207	O ₃ , N ₂ O, H ₂ O	3 500	1
296-306	O ₃ , N ₂ O, O ₂ , HNO ₃	5 200	1,5
318-326	O ₃ , H ₂ O, HNO ₃	5 200	1,5
342-348	O ₃ , CO, HNO ₃	5 200	1,5
498-505	O ₃ , N ₂ O, CH ₃ Cl, BrO, ClO	5 200	1,5

5.1.8.5.5 Sonda superconductor de ondas submilimétricas para la emisión del limbo

El instrumento de la sonda superconductor de ondas submilimétricas para la emisión del limbo (SMILES, *superconducting submillimeter-wave limb-emission sounder*) ha sido desarrollado por NASDA/CRL. El Cuadro 5-9 muestra las regiones espectrales SMILES y los objetivos de las mediciones.

CUADRO 5-9

Regiones espectrales SMILES y objetivos de las mediciones

Región espectral (GHz)	Elementos atmosféricos	Temperatura de ruido del sistema (BLU, K)
624-629	O ₃ , HCl, SO ₂ , H ₂ O ₂ , HO ₂ ,	$T_{sys} < 500$
649-653	HOCl, HNO ₃ , ClO, BrO	

El instrumento SMILES explora la antena para obtener una resolución en altitud de 3,5 km aproximadamente a una altitud tangencial que va desde la troposfera superior (10 km) a la mesosfera inferior (60 km) respecto de la órbita de la estación espacial internacional (ISS, *international space station*). SMILES utiliza un receptor de ruido extremadamente bajo con mezcladores de superconductor-aislante-superconductor (SIS, *superconductor-insulator-superconductor*). El instrumento SMILES tiene previsto su lanzamiento en 2005.

5.1.8.5.6 Vulnerabilidad de las sondas pasivas de microondas a la interferencia

Los sensores pasivos integran todas las emisiones naturales (deseadas) y artificiales (no deseadas). Normalmente, no pueden diferenciar entre estos tipos de señales porque la atmósfera es un medio extremadamente inestable cuyas características varían con gran velocidad, tanto en el espacio como en el tiempo. Por consiguiente son extremadamente vulnerables a la interferencia, lo que puede provocar graves perjuicios.

- se ha demostrado que con sólo el 0,1% de datos del satélite contaminados podrían generarse errores inaceptables en las predicciones meteorológicas numéricas, provocando la desaparición de la confianza en estas singulares mediciones pasivas válidas para cualquier clima;
- la supresión sistemática de datos cuando aumenta la probabilidad de interferencias puede imposibilitar el reconocimiento de los nuevos sistemas meteorológicos en desarrollo, pudiendo perderse indicaciones vitales de tormentas de rápida evolución potencialmente peligrosas; y
- en los estudios climatológicos y especialmente en la supervisión del cambio climático mundial, la interferencia puede hacer que se interpreten erróneamente las señales climáticas.

Las Recomendaciones UIT-R SA.1028 y UIT-R SA.1029 establecen la calidad de funcionamiento radiométrica requerida y los niveles de interferencia admisibles siguientes:

- *En la banda de frecuencias 50-66 GHz:* Las resoluciones radiométricas requeridas son 0,3 K para los sensores de exploración y 0,1 K para los sensores de barrido transversal. Los umbrales de interferencia resultante son -161 dBW para los sensores de exploración y -166 dBW para los sensores de barrido transversal, con una anchura de banda de referencia de 100 MHz. Estos niveles son equivalentes a un aumento de la temperatura de ruido de 0,06 K y 0,02 K respectivamente y puede considerarse como una contribución normal al presupuesto de errores del instrumento.

- *Por encima de 100 GHz:* La resolución radiométrica requerida es actualmente 0,2 K a todas las frecuencias, lo que supone un umbral de interferencia de –160 dBW, con una anchura de banda de referencia de 200 MHz. No obstante, estas cifras han de revisarse a la luz de los últimos avances de las ciencias atmosféricas.

La Recomendación UIT-R SA.1029 afirma que «los niveles de interferencia indicados anteriormente se excedan en menos de 0,01% del tiempo en la zona de servicio del sensor para mediciones tridimensionales de la temperatura atmosférica o la concentración de gases en las bandas de absorción, incluidas las bandas de la gama 50,2-61,3 GHz y las bandas próximas a 118 GHz y 183 GHz».

5.2 Sensores activos

5.2.1 Introducción

El objeto de este punto es la descripción de las necesidades de frecuencias del espectro radioeléctrico que tienen los sensores activos a bordo de vehículos espaciales, especialmente los utilizados en la supervisión de los fenómenos meteorológicos. Se pretende presentar los tipos de sensores y las características de los mismos que determinan sus necesidades específicas de frecuencias; se pretende asimismo exponer los criterios necesarios de calidad de funcionamiento y de interferencia para los estudios de compatibilidad con otros servicios en las bandas de frecuencias de interés, exponiendo asimismo el estado actual de los estudios que se realizan sobre la compatibilidad de los sensores activos en plataformas espaciales con otros servicios, así como otras cuestiones y asuntos de interés.

En este Manual se contemplan cinco tipos principales de sensores activos a bordo de vehículos espaciales:

Tipo 1: Radares de abertura sintética (SAR, synthetic aperture radars) – Sensores orientados hacia un lado de la trayectoria nadiral, reuniendo la historia en fase y tiempo del eco coherente del radar a partir del cual suele generarse una imagen de radar de la superficie terrestre.

Tipo 2: Altimetros – Sensores orientados al nadir, midiendo el tiempo exacto entre un evento de transmisión y uno de recepción, para obtener la altitud exacta de la superficie del océano terrestre.

Tipo 3: Dispersómetros – Sensores orientados en diversos ángulos de presentación a los lados del trayecto nadiral, utilizando la medición de la variación de potencia del eco devuelto con el ángulo de presentación para determinar la dirección y la velocidad del viento en la superficie de los océanos terrestres.

Tipo 4: Radares de precipitación – Sensores de exploración perpendicular a la trayectoria nadiral que miden el eco del radar de las precipitaciones, para determinar el índice de pluviosidad sobre la superficie terrestre y la estructura tridimensional de la lluvia.

Tipo 5: Radares de perfil de nubes – Sensores orientados al nadir que miden el eco del radar devuelto por las nubes para determinar los perfiles de reflectividad de las nubes sobre la superficie terrestre.

El Cuadro 5-10 resume las características de los cinco tipos principales de sensores activos a bordo de vehículos espaciales.

CUADRO 5-10

Características de los sensores activos a bordo de vehículos espaciales

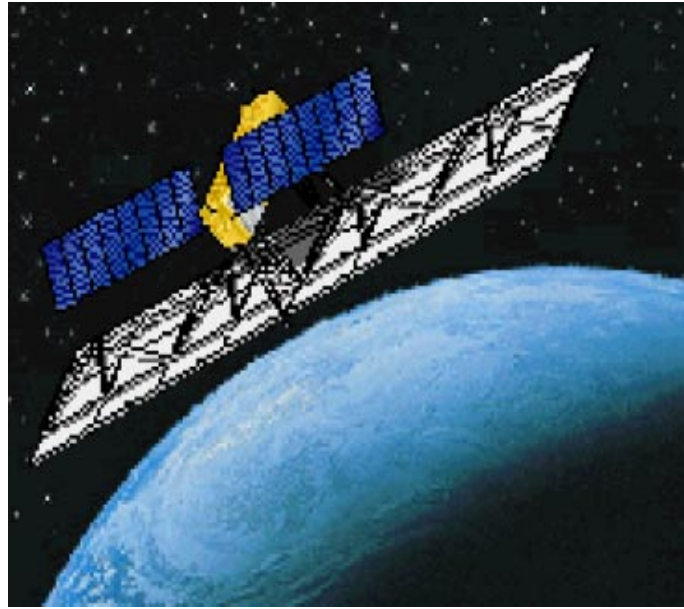
Características	Tipos de sensor				
	SAR	Altímetro	Dispersómetro	Radars de precipitación	Radars de perfil de nubes
Geometría de la observación	Orientación lateral con una separación de 10°-55° del nadir	Orientación al nadir	<ul style="list-style-type: none"> - Seis haces acimutales en abanico - Dos haces cónicos de exploración 	Orientado al nadir	Orientado al nadir
Dinámica de la estampa del haz	<ul style="list-style-type: none"> - Fija a un lado - ScanSAR 	Fija en el nadir	<ul style="list-style-type: none"> - Fija en acimut - Exploración 	Exploración transversal a la trayectoria del nadir	Fija en el nadir
Haz de la antena	Haz en abanico	Haz en pincel	<ul style="list-style-type: none"> - Haces en abanico - Haces en pincel 	Haz en pincel	Haz en pincel
Potencia de cresta radiada (W)	1 500-8 000	20	100-5 000	600	1 000-1 500
Forma de onda	Impulsos en MF lineal	Impulsos en MF lineal	Onda continua interrumpida o pulsos cortos	Impulsos cortos	Impulsos cortos
Anchura de banda	20-300 MHz	320 MHz	5-80 kHz	14 MHz	300 kHz
Factor de duración de los impulsos (%)	1-5	46	31	0,9	1-14
Zona de servicio	Tierra/costera/océano	Océano/hielo	Océano/hielo/tierra	Tierra/océano	Tierra/océano

5.2.2 Radars de abertura sintética

Los SAR proporcionan imágenes de radar de la superficie terrestre. La Fig. 5-12 muestra una representación artística de un sistema LightSAR propuesto en la banda L. La elección de la frecuencia central de RF depende de la interacción de la superficie terrestre con el campo electromagnético. La anchura de banda de RF afecta a la resolución de los píxeles de imagen. En la Fig. 5-13a) se muestra el impulso modulado linealmente en frecuencia y a continuación la anchura de banda de RF correspondiente. La resolución de la determinación de distancia es igual a $c/2/(BW \text{ sen } \theta)$, siendo c la velocidad de la luz, BW la anchura de banda de RF y θ el ángulo de incidencia. Para obtener una resolución en la determinación de distancia de 1 m con un ángulo de incidencia de 30°, por ejemplo, la anchura de banda de RF debe ser de 300 MHz. Muchos SAR efectúan el barrido a un lado del vector de velocidad, como se puede ver en la Fig. 5-13b). Las fuentes de interferencia que puedan existir en la zona de barrido iluminada se devolverán al receptor SAR. La degradación admisible de la calidad del píxel de imagen determina el nivel de interferencia admisible. La Fig. 5-14 muestra una imagen del Mar Muerto entre Israel y Jordania tomada por el SIR-C.

FIGURA 5-12

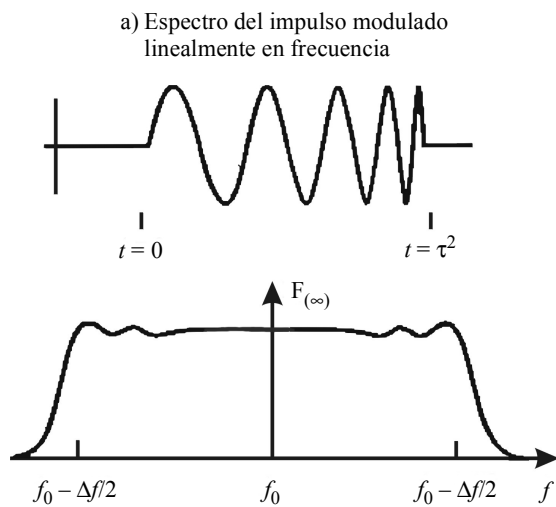
SAR LightSAR en la banda L



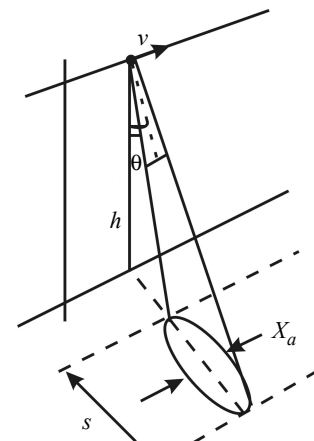
Meteo-0512

FIGURA 5-13

Espectro del impulso modulado linealmente en frecuencia y zona de iluminación del SAR



b) Zona de iluminación del SAR



Meteo-0513

FIGURA 5-14

Imagen SAR de la orilla oeste del Mar Muerto entre Israel y Jordania



Meteo-0514

5.2.3 Altimetros

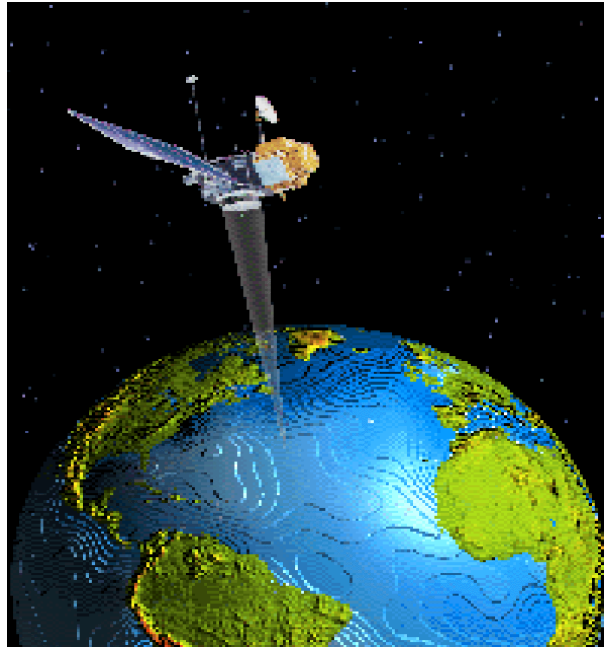
Los altímetros proporcionan la altitud de la superficie de los océanos terrestres. Las Figs. 5-15, 5-16a) y 5-16b) son una ilustración del altímetro TOPEX y de su precisión. La elección de la frecuencia central de RF depende de la interacción de la superficie del océano con el campo electromagnético. El funcionamiento en doble frecuencia permite compensar el retardo ionosférico. Por ejemplo, TOPEX/POSEIDON utiliza frecuencias en torno a 13,6 GHz y 5,3 GHz. La anchura de banda en RF afecta a la precisión de la medición de la altura. La precisión diferencial de tiempo Δt es inversamente proporcional a BW, siendo BW la anchura de banda en RF. La degradación permisible en la precisión de la altura determina el nivel de interferencia admisible.

5.2.4 Dispersómetros

Los dispersómetros proporcionan la dirección y velocidad del viento sobre la superficie de los océanos terrestres. La elección de la frecuencia central de RF depende de la interacción de la superficie del océano con el campo electromagnético y su variación con el ángulo de presentación. La Fig. 5-18 muestra la variación del grado de retrodispersión con el ángulo de presentación relativo a la dirección del vector velocidad del viento.

FIGURA 5-15

Satélite TOPEX

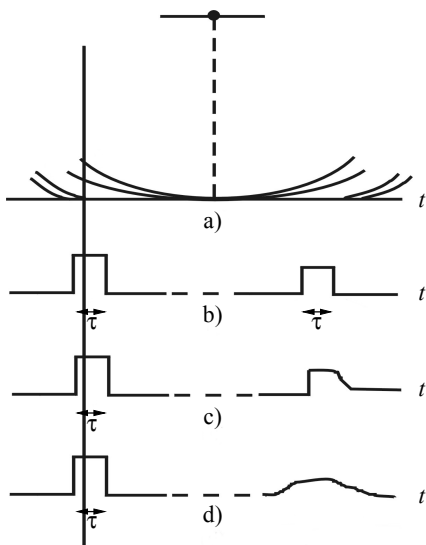


Meteo-0515

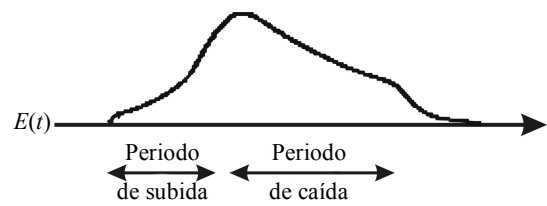
FIGURA 5-16

Ilustración del retorno del altímetro y ensanchamiento del impulso de retorno

a) Ilustración del retorno del altímetro



b) Ensanchamiento del impulso de retorno



Meteo-0516

FIGURA 5-17

Detección por el TOPEX/POSEIDON de las temperaturas marítimas cálidas de El Niño en el Océano Pacífico

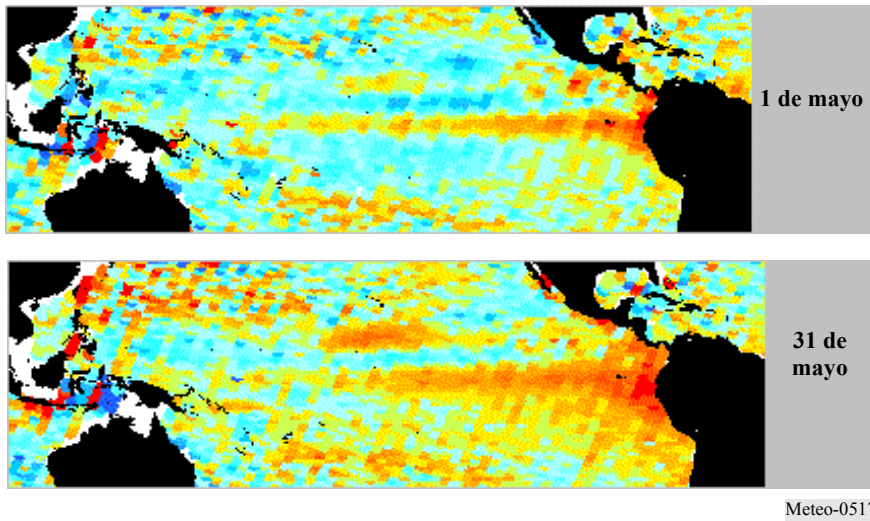
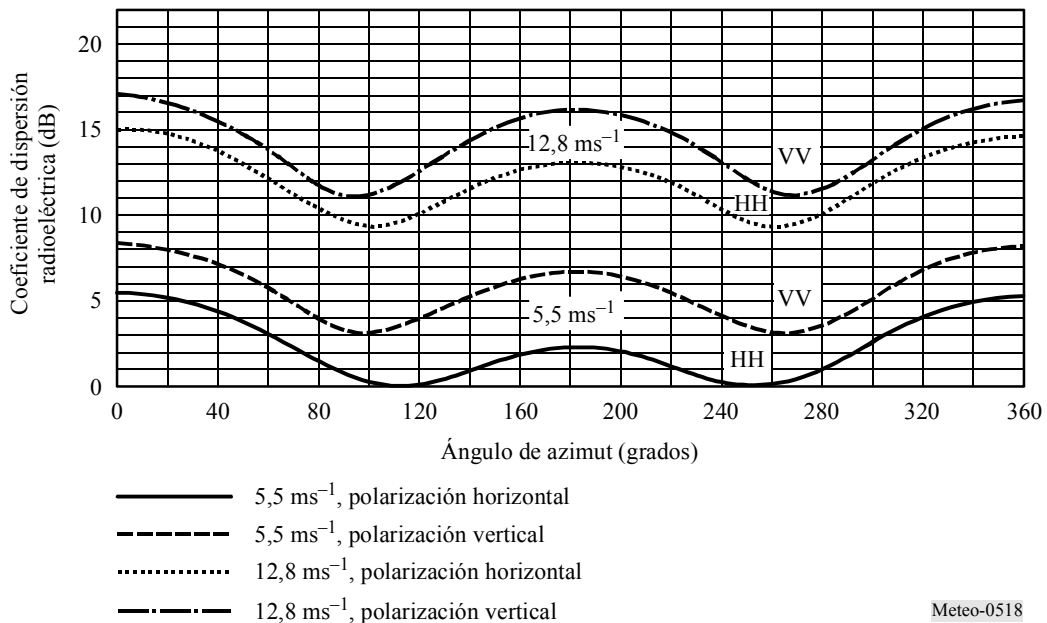


FIGURA 5-18

Variación de la retrodispersión con el ángulo de presentación



Como muestra la Fig. 5-19, el SCAT ilumina la superficie de la Tierra bajo varios ángulos de presentación fijos. En la Fig. 5-20 el haz explorador de pincel del SEAWINDS efectúa un barrido en dos ángulos diferentes respecto al nadir y explora 360° en acimut alrededor del nadir. La pequeña anchura de banda de la señal de RF proporciona la resolución de la célula de medición necesaria. En el NSCAT sólo se necesitan 2-15 kHz para una resolución de 25 km. La degradación permisible en la precisión de la velocidad del viento determina el nivel de interferencia admisible.

FIGURA 5-19
Estampa fija del NSCAT

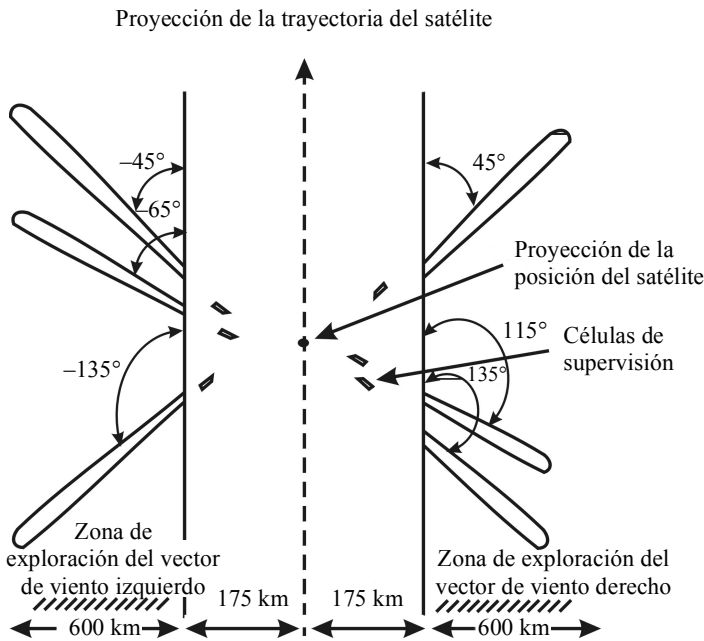
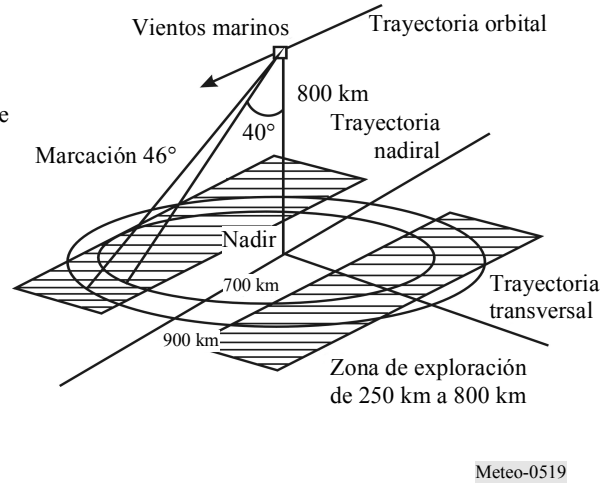
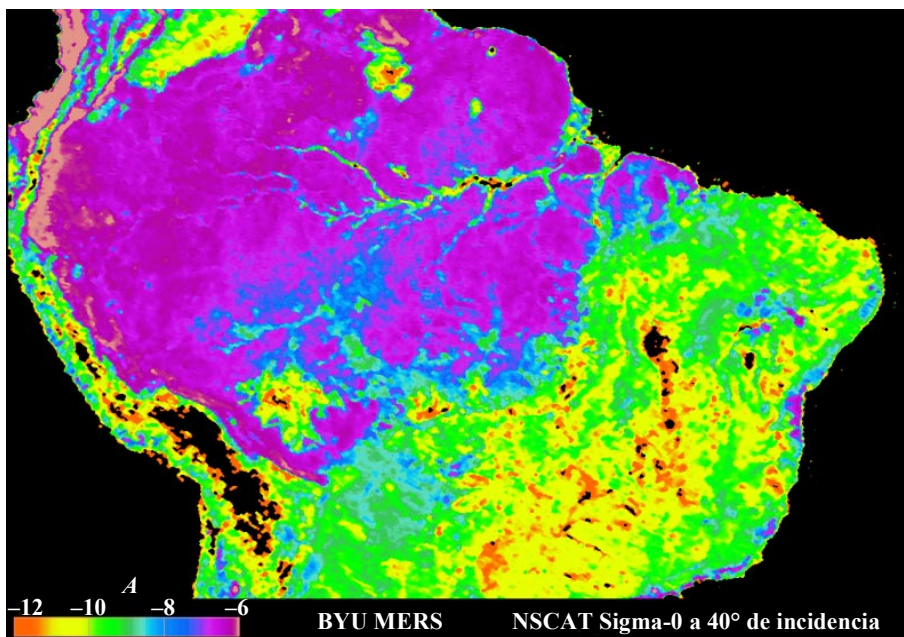


FIGURA 5-20
Exploración por haz de pincel del Seawinds



La Fig. 5-21 muestra una imagen de la pluviselva amazónica de América del Sur, realizada por el radar del NSCAT. Otros ejemplos de dispersómetros utilizados para fines meteorológicos son el ERS AMI (en modalidad de viento) y el METOP Ascát.

FIGURA 5-21
Imagen de la pluviselva amazónica de América del Sur
realizada por el radar del NSCAT



5.2.5 Radares de precipitación

Los radares de precipitación suministran los índices de precipitación de la superficie terrestre, centrándose típicamente en la pluviosidad de los trópicos. La Fig. 5-22 es una ilustración del satélite TRMM.

FIGURA 5-22

Ilustración del satélite TRMM



La elección de la frecuencia central de RF depende de la interacción de la precipitación con el campo electromagnético. La sección transversal de retrodispersión de un meteoro acuoso esférico es:

$$\sigma_b = \pi^5 |K_W|^2 D^6 / \lambda^4 = \pi^5 |K_W|^2 Z / \lambda^4 \quad (5-4)$$

siendo:

$|K_W|^2$: función del índice de refracción de las gotas de agua

D : diámetro de las gotas de agua

λ : longitud de onda del radar

Z : factor de reflectividad del radar.

La retrodispersión aumenta con la cuarta potencia de la frecuencia de RF.

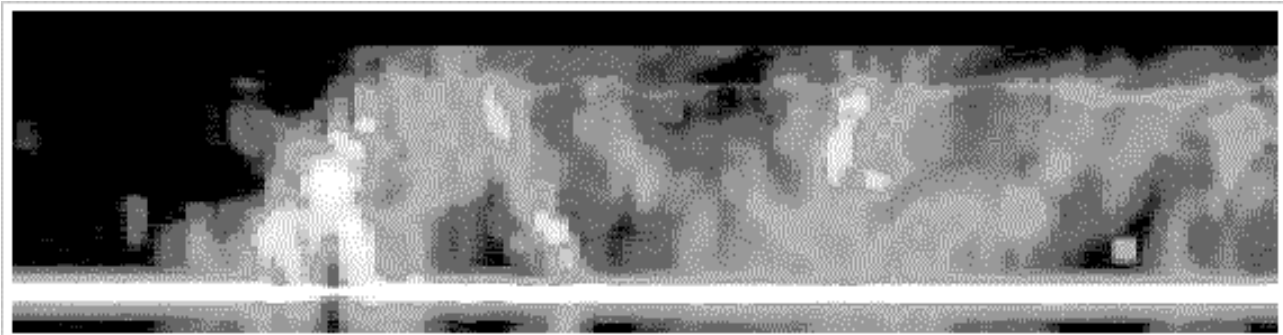
La Fig. 5-23 muestra un ejemplo de sección vertical del factor de reflectividad del radar. La pequeña anchura del impulso de la señal de RF proporciona la resolución necesaria para la medición de la distancia. El TRMM utiliza una anchura de impulso de 1,6 μ s. La degradación mínima permisible de la reflectividad de la precipitación determina el nivel de interferencia admisible.

5.2.6 Radares de perfil de nubes

Los radares de perfil de nubes proporcionan un perfil tridimensional de la reflectividad de las nubes en la superficie terrestre. La Fig. 5-24 muestra un ejemplo representativo de la reflectividad por retrodispersión en función de la altitud.

FIGURA 5-23

Reflectividad del TRMM PR sintetizada a partir de mediciones de la reflectividad del ARMAR

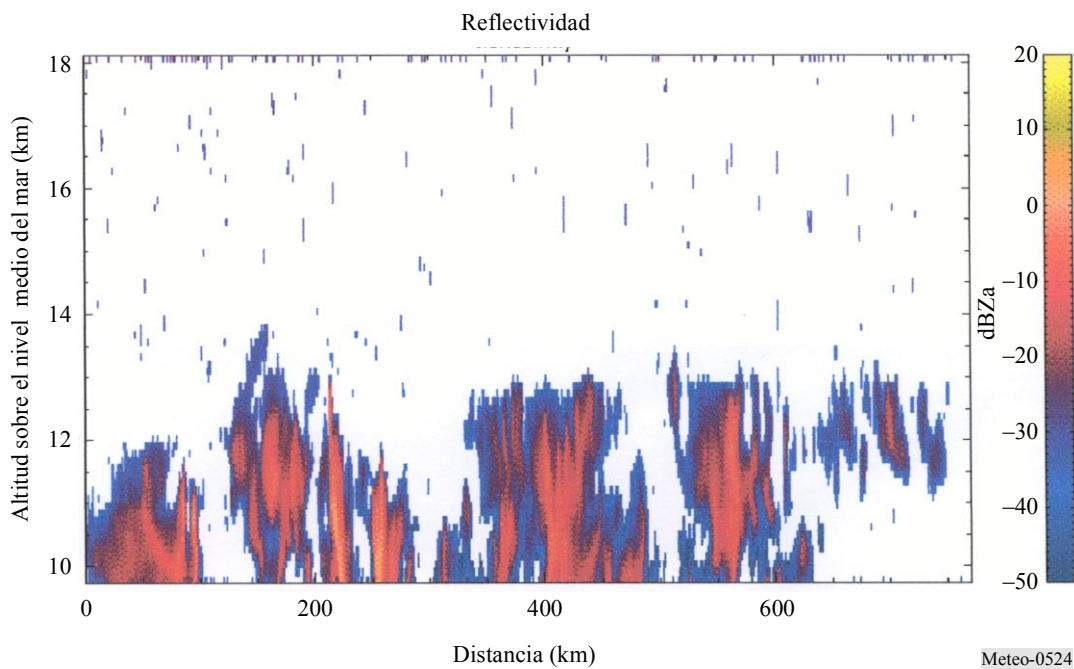


Meteo-0523

FIGURA 5-24

Ejemplo de la reflectividad de los cirros

Cirros tropicales observados durante el tránsito de Hawai a Nueva Zelanda



Meteo-0524

La selección de la frecuencia central de RF depende de la interacción de la superficie oceánica con el campo electromagnético y su variación en función del ángulo de presentación.

La ecuación (5-5) es la expresión que permite calcular el nivel de potencia devuelto por las nubes.

$$\tilde{P} = \frac{\pi^5 10^{-17} P_r G^2 t \theta_r^2 |K_W|^2 Z_r}{6,75 \times 2^{14} (\ln 2) r_0^2 \lambda^2 l_r^2} \quad \text{mW} \quad (5-5)$$

siendo:

\tilde{P} : nivel de potencia devuelta por las nubes (mW)

P_r : potencia de transmisión del radar (W)

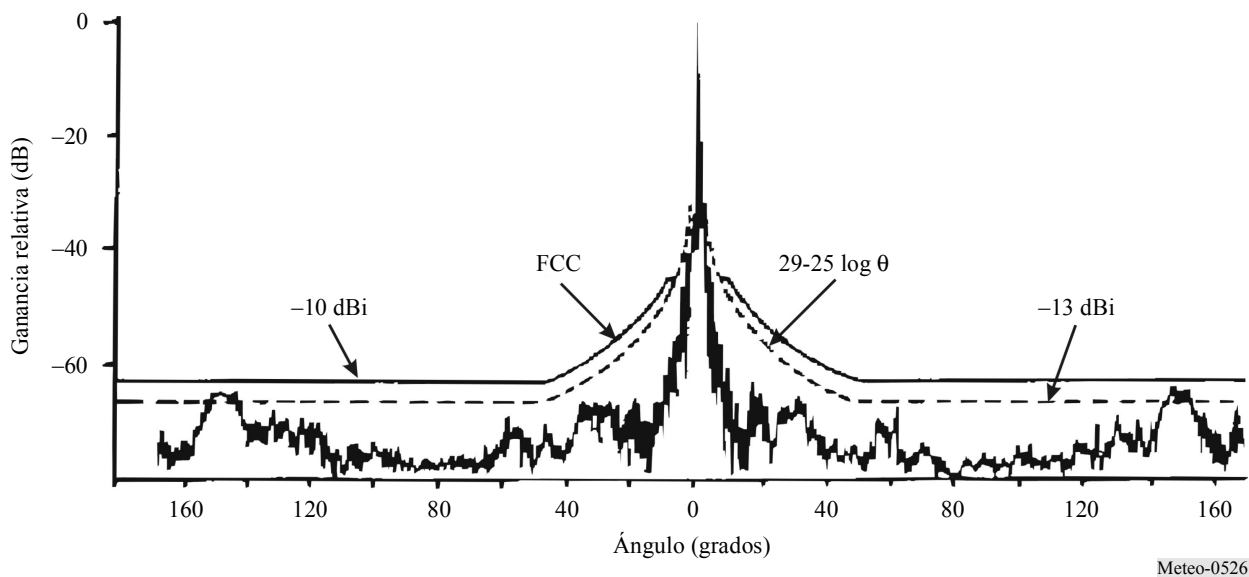
- G : ganancia de la antena (numérica)
- t : anchura del impulso (μs)
- θ_r : anchura del haz de la antena de 3 dB (grados)
- K_W : factor dieléctrico del contenido de agua de la nube
- Z_r : factor de reflectividad de la nube (mm^6/m^3)
- r_0 : alcance (km)
- λ : longitud de onda del radar (cm)
- l : pérdida de la señal debida a la absorción atmosférica
- l_r : pérdidas del sistema de radar.

De acuerdo con esta expresión, la potencia devuelta disminuye con el cuadrado de la longitud de onda. Dado que la frecuencia es inversamente proporcional a la longitud de onda, la potencia devuelta aumenta con el cuadrado de la frecuencia de RF. En el caso de partículas pequeñas (en régimen de Rayleigh) la potencia devuelta aumenta con la frecuencia elevada a la cuarta potencia puesto que el índice depende del tamaño relativo de las partículas respecto a la longitud de onda. Las antenas de los radares de perfil de nubes tienen lóbulos laterales muy pequeños con objeto de aislar el retorno de la nube del retorno de la superficie iluminada por los lóbulos laterales, que es más intenso.

La Fig. 5-25 muestra los lóbulos laterales de -60 dB para una antena característica. La pequeña anchura de banda de la señal de RF proporciona la resolución necesaria para la célula de medición. La degradación permisible de la precisión de la reflectividad determina el nivel de interferencia admisible.

FIGURA 5-25

Ganancia relativa en función del ángulo de la antena



Meteo-0526

5.2.7 Criterios de interferencia y de calidad de funcionamiento de los sensores

A continuación se muestran los criterios de calidad de funcionamiento y de interferencia para los diversos tipos de sensores activos a bordo de vehículos espaciales:

- SAR: El 10% de la degradación de la desviación típica de la potencia del píxel es $I/N = -6$ dB con efectos atenuantes del procesamiento
- Altímetro: El 4% de degradación del ruido de altura da $I/N = -3$ dB

Dispersómetro: La degradación de la medición del coeficiente normalizado de retro-dispersión del radar con simulación del plan de medición da $I/N = -5$ dB

Radar de precipitación: El 7% de aumento del índice de pluviosidad mínimo da $I/N = -10$ dB

Radar de nubes: El 10% de degradación de la reflectividad mínima de nube da $I/N = -10$ dB.

El Cuadro 5-11 resume los criterios de calidad de funcionamiento y de interferencia.

CUADRO 5-11

Criterios de la calidad de funcionamiento y de la interferencia

Tipo de sensor	Criterio I/N (dB)	Criterio de disponibilidad (%)	
		Sistemático	Aleatorio
Radar de abertura sintética	-6	99	95
Altímetro	-3	99	95
Dispersómetro	-5	99	95
Radar de precipitación	-10	No aplicable	99,8
Radar de perfil de nubes	-10	99	95

5.2.8 Niveles de interferencia

Las características de los diversos tipos de sensores activos a bordo de vehículos espaciales mostrados en el Cuadro 5-10 indican que la potencia de cresta transmitida, y por consiguiente los niveles de potencia recibidos en la superficie terrestre, variarán significativamente de nivel. El Cuadro 5-12 muestra los niveles del flujo de la densidad de potencia del sensor activo en la superficie terrestre para algunas configuraciones de sensores típicas.

CUADRO 5-12

Niveles de interferencia típicos en la superficie terrestre

Parámetro	Tipo de sensor				
	SAR	Altímetro	Dispersómetro	Radares de precipitación	Radares de perfil de nubes
Potencia radiada (W)	1 500	20	100	578	630
Ganancia de la antena (dB)	36,4	43,3	34	47,7	63,4
Distancia (km)	695	1 344	1 145	350	400
DFP (dB(W/m ²))	-59,67	-77,25	-78,17	-46,55	-31,64

5.2.9 Estudios de compatibilidad

En el UIT-R se han realizado estudios de compatibilidad de los sensores activos a bordo de vehículos espaciales en muchas de las bandas de frecuencias. El Cuadro 5-13 resumen las bandas de frecuencias y los tipos de sensores de dichas bandas cuya compatibilidad se ha analizado.

CUADRO 5-13

Estudios de compatibilidad por banda de frecuencias y tipo de sensor

Banda de frecuencias (MHz)	Tipo de sensor				
	SAR	Altimetro	Dispersómetro	Radares de precipitación	Radares de perfil de nubes
430-440	(F)				
1 215-1 300	SIR-C, JERS-1, PALSAR (ALOS)				
3 100-3 300	ALMAZ	RA2 (F)			
5 150-5 250	RADARSAT-2 (F)	JASON (F)			
5 250-5 350	RADARSAT, ASAR, ERS1/2, ENVISAT ASAR (F)	TOPEX	ERS1/2, NSCAT (F), METOP ASCAT (F)		
5 350-5 470	RADARSAT-2 (F)	JASON (F)			
8 550-8 650	(P)	(P)	(P)		
9 500-9 800	X-SAR, Okean-O SLR	(P)	(P)		
9 975-10 025					
13 250-13 400		JASON	NSCAT, SEAWINDS	Nueva TRMM (F)	
13 400-13 750		JASON, ERS1/2	NSCAT, SEAWINDS, ENVISAT RA-2 (F)	Nueva TRMM (F)	
17 200-17 300			(P)	(P)	
24 050-24 250				(P)	
35 500-35 600		(P)	(P)	Nueva TRMM (F)	
78 000-79 000					(P)
94 000-94 100					CLOUDSAT (F)
133 500-134 000					(P)
237 900-238 000					(P)

NOTA – (F) propuesto para el futuro; (P) postulado; en los demás casos actualmente en funcionamiento.

5.2.10 Estado actual

El Cuadro 5-14 resume el estado de las atribuciones de los sensores activos a bordo de vehículos espaciales.

CUADRO 5-14

Estado de atribución de los sensores activos a bordo de vehículos espaciales

Banda de frecuencias (GHz)	Objetivos del usuario	Estado de las atribuciones	Atribuciones necesarias	Usuarios
0,420-0,470	Supervisión de los bosques (biomasa)	Inexistente	PRIMARIA o secundaria, 6 MHz como mínimo	SAR en banda P
1,215-1,300	Estructura de las olas, geología, humedad del suelo, interferometría (DEM)	PRIMARIA Números 5.332 y 5.335 del RR	PRIMARIA	SAR en banda L (JERS-1, SIR-C, PALSAR)
3,1-3,3	Geología	Secundaria	PRIMARIA	SAR en banda S, altímetro (Envisat RA-2 segunda frecuencia)
5,15-5,25	Geología, oceanografía, hielo en el mar, utilización terrestre, interferometría. (DEM)	Inexistente	PRIMARIA	Altímetros de radar de gran resolución (Jason)
5,25-5,46	Geología, oceanografía, hielo en el mar, utilización terrestre, interferometría. (DEM)	PRIMARIA Números 5.447D, 5.448A y 5.448B del RR	PRIMARIA 5 460-5 570 MHz	SAR, dispersómetros, altímetros (AMI, ASCAT, ASAR, ALT/dual, IKAR-N)
8,55-8,65	Aplicaciones SAR de gran resolución (tácticas) más nieve y hielo	PRIMARIA Números 5.468 y 5.469 del RR	PRIMARIA	No determinados
9,5-9,8	Aplicaciones SAR de gran resolución (tácticas) más nieve y hielo	PRIMARIA Número 5.476A del RR	PRIMARIA	SAR en banda X, Okean-O SLR
9,975-10,025	Aplicaciones SAR de gran resolución (tácticas) más nieve y hielo	Secundaria Número 5.479 del RR	Sin determinar	Sin determinar
13,25-13,75	Viento, nieve geoide	PRIMARIA Números 5.498A, 501A y 501B del RR	PRIMARIA	Dispersómetros en banda Ku, altímetros (NSCAT, ALT/dual PR, R225, IKAR-D & N, RA, RA-2, DPR)
17,2-17,3	Vegetación, nieve, lluvia, viento	PRIMARIA Número 5.513A del RR		Radares de lluvia, radares de precipitación, dispersómetros
24,05-24,25	Lluvia	Secundaria	PRIMARIA	Radares de lluvia, radar de precipitación (IKAR-D & N)

CUADRO 5-14 (Fin)

Banda de frecuencias (GHz)	Objetivos del usuario	Estado de las atribuciones	Atribuciones necesarias	Usuarios
35,5-36,0	Hielo, viento, geoide, nieve	PRIMARIA Número 5.551A del RR		Altímetros, dispersómetros, radares de precipitación (IKAR-N, DPR)
78-79	Altimetría (tierra y hielo) de gran resolución espacial	PRIMARIA Número 5.560 del RR		Altímetros radioeléctricos
94-94,1	Determinación de perfiles de nubes	PRIMARIA Número 5.562 del RR	PRIMARIA	Radares de perfil de nubes (ESA CPR, CPR/NASA, IKAR-D & N)
133,5-134	Determinación de perfiles de nubes	PRIMARIA Número 5.562E del RR		Radares de perfil de nubes
237,9-238	Determinación de perfiles de nubes	PRIMARIA Número 5.563B del RR		Radares de perfil de nubes

Bibliografía

Sensores pasivos

AMSR: <http://adeos2.hq.nasda.go.jp/>

AMSR-E: <http://eos-pm.gsfc.nasa.gov/>

SMILES: <http://smiles.tksc.nasda.go.jp/>

Sensores activos

ELACHI, DR. C. *Spaceborne Radar Remote Sensing: Applications and Techniques*. IEEE Press, Nueva York, Estados Unidos de América.

WU, DR. C. y otros [1994] *The SeaWinds Scatterometer Instrument*, IGARSS '94.

BROOKNER, E. Editor [1988] *Aspects of Modern Radar*. Artech House, Boston, Estados Unidos de América.

Direcciones de acceso a las Figuras en Internet:

SAR: <http://www.jpl.nasa.gov/radar/sircxsar/dsea.html>

PALSAR/ALOS: <http://www.eorc.nasda.go.jp/ALOS>

Altimeter: http://ibis.grdl.noaa.gov/SAT/near_rt/enso/topex_97.html

SLR: <http://sputnik1.infospace.ru>

<http://planet.iitp.ru>

Textos del UIT-R

Recomendación UIT-R SA.515 – Bandas de frecuencias y anchuras de banda utilizadas para la detección pasiva por satélite.

CAPÍTULO 6

OTROS SISTEMAS DE RADIOCOMUNICACIONES PARA ACTIVIDADES METEOROLÓGICAS

	Página
6	Introducción 88
6.1	Sistemas de radiodifusión y divulgación..... 88
6.2	Ejemplos de sistemas de radiocomunicaciones hidrológicas 89
6.2.1	Introducción 89
6.2.2	Sistemas hidrológicos representativos 89
6.3	Otros sistemas de satélites..... 90
6.4	Sistemas remotos fijos..... 90
6.5	Usos meteorológicos de los sistemas de radionavegación 91
6.5.1	Servicios terrenales 91
6.5.2	Los sistemas mundiales de navegación por satélite (GNNS)..... 91
6.6	Sistemas de detección y localización de rayos..... 92
6.7	Teledetección desde tierra 95

6 Introducción

De acuerdo con lo expuesto en el Capítulo 1 los servicios meteorológicos necesitan reunir observaciones de muchos lugares remotos, tanto en tierra como en el mar. Las mediciones en tiempo real desde aviones comerciales son cada vez más importantes para los servicios meteorológicos. Estas mediciones deben realizarse durante el ascenso y el descenso en la proximidad de los aeropuertos, pero también a largas distancias y a alturas de crucero. Así pues, los sistemas de observación meteorológica dependen de muchos otros servicios de radiocomunicaciones además de los servicios MetSat y MetAids descritos en los anteriores Capítulos.

Resulta asimismo indispensable que los meteorólogos transmitan la información y los avisos a los clientes lo antes posible, ya sea en zonas densamente pobladas o en zonas distantes escasamente pobladas. Los servicios meteorológicos dan soporte a las operaciones marítimas y aeronáuticas en todo el mundo. Los sistemas de radiodifusión y divulgación de los productos meteorológicos utilizan asimismo una gran variedad de servicios de radiocomunicaciones.

En los siguientes puntos se considerarán tres temas que constituyen ejemplos de utilización de otros servicios de radiocomunicaciones.

- 6.1 Sistemas de radiodifusión y divulgación
- 6.2 Sistemas de radiocomunicaciones hidrológicas
- 6.3 Otros sistemas de satélites.

El servicio fijo se utiliza en apoyo del funcionamiento de ciertos sistemas meteorológicos. Estos usos se tratarán brevemente en el punto:

- 6.4 Sistemas remotos fijos.

Los servicios de radiodeterminación y radionavegación se han utilizado ampliamente en meteorología durante los últimos años. En ciertos casos, los usos meteorológicos son peculiares y pueden plantear limitaciones adicionales al servicio. Éstas se tratarán más detalladamente en el punto:

- 6.5 Usos meteorológicos de los sistemas de radionavegación.

Ciertas formas de utilización del espectro de radiofrecuencias no son fáciles de acomodar en la actual estructura de los servicios de radiocomunicaciones de la UIT. Esto se ilustrará mediante dos temas en los puntos:

- 6.6 Sistemas de detección y localización de rayos
- 6.7 Teledetección pasiva desde tierra.

6.1 Sistemas de radiodifusión y divulgación

La divulgación de las predicciones meteorológicas tiene la misma importancia que la captura y archivo de los datos meteorológicos para la preparación de aquéllas. Sólo cuando las predicciones están al alcance de la población pueden salvarse vidas, porque sólo conociendo lo que se aproxima pueden las personas adoptar las medidas necesarias para la protección de sus vidas y bienes.

A lo largo de los años se han desarrollado sistemas de radiocomunicaciones especializados que hacen posible la distribución de las predicciones y demás datos meteorológicos. Entre los más sencillos se encuentra la radiodifusión sonora. Estos sistemas que utilizan típicamente las radiocomunicaciones en la banda de ondas métricas requieren la utilización de equipos sencillos por parte del público en general. Estos sistemas permiten alertar a la población de la amenaza de tormentas, inundaciones, temperaturas extremas y otros peligros naturales o provocados. Pueden realizarse mejoras tales como la transmisión de datos informativos accesible a las personas con

problemas auditivos por medio de equipos especiales. Estos sistemas pueden diseñarse asimismo para proporcionar la distribución continua de datos o para permanecer en reposo hasta su activación por un tono de alerta que indique la presencia de un evento especial tal como mal tiempo u otro peligro inminente. Los sistemas de divulgación pueden basarse en servicios fijos y móviles, como el servicio móvil marítimo. Otros sistemas de divulgación utilizan la radiodifusión sonora, la televisión y los enlaces MetSat descendentes.

A lo largo de los años muchas administraciones han utilizado las radiocomunicaciones de alta frecuencia para la difusión de información meteorológica y de alertas a barcos y aviones. Estos sistemas suelen ofrecer transmisiones sonoras y facsímil meteorológico (WEFAX). No obstante, la escasa fiabilidad de las transmisiones en alta frecuencia ha provocado la migración de muchos de estos sistemas a las transmisiones por satélite.

6.2 Ejemplos de sistemas de radiocomunicaciones hidrológicas

6.2.1 Introducción

En gran parte del mundo las inundaciones son parte natural de la vida inevitablemente y los sistemas de ayuda a la predicción de las mismas, de su situación y magnitud han salvado muchas vidas y muchos bienes. El conocimiento anticipado de las mismas permite la evacuación de las poblaciones en peligro, la construcción de diques y presas y la reubicación de los bienes y valores vulnerables que puedan ser trasladados. Los sistemas hidrológicos suelen utilizarse para medir variables tales como la precipitación, la altura de la corriente y la profundidad del manto de nieve que resultan útiles para la predicción de las inundaciones y para el cálculo de la disponibilidad de recursos hídricos. Estos sistemas suelen funcionar en las bandas de ondas métricas y decimétricas de los servicios fijo y móvil.

El valor medio de los daños provocados cada año por las inundaciones sólo en Estados Unidos de América se aproxima a los 4000 millones de dólares. Las comunidades con problemas de inundaciones recurrentes y las susceptibles de incurrir en grandes pérdidas cuando se presentan las inundaciones no cesan de buscar el modo de reducir al mínimo estas pérdidas. Los sistemas hidrológicos automáticos constituyen una solución atractiva por su bajo costo de explotación y porque pueden mejorar el funcionamiento de otros métodos destinados a mitigar los efectos de las inundaciones tales como la instalación de compuertas de aliviadero en embalses, la contratación de seguros contra inundaciones y la delimitación de las llanuras de inundación.

6.2.2 Sistemas hidrológicos representativos

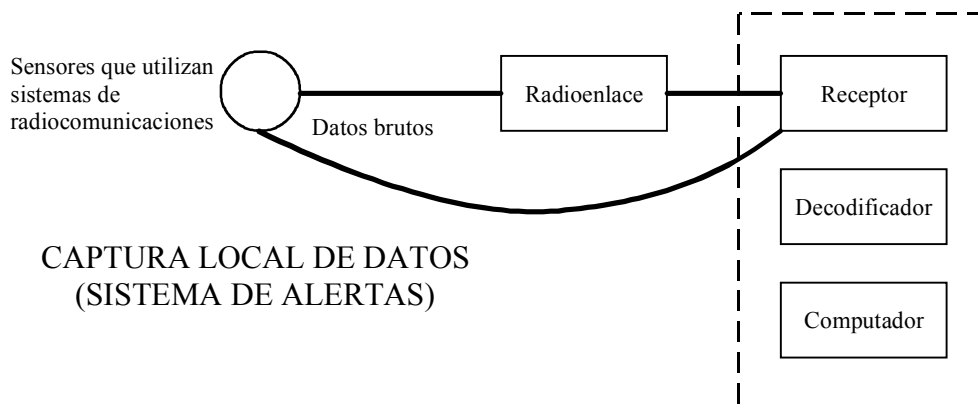
En Estados Unidos de América, el Servicio Meteorológico Nacional (NWS, *National Weather Service*) es el responsable del establecimiento de alertas locales y regionales. Los datos que obtiene el NWS de los sistemas automáticos de alerta a inundaciones locales (ALFWS, *automated local flood warning systems*) utilizando frecuencias radioeléctricas hidrológicas contribuyen a la emisión puntual y precisa de alertas. Hay más de 400 de estos sistemas en Estados Unidos de América y se utilizan 42 frecuencias radioeléctricas hidrológicas. Estas frecuencias se encuentran en las bandas de ondas métricas (162-174 MHz) y decimétricas (406,1-420 MHz) reservadas principalmente a los sistemas hidrológicos. Se prevé que aumente el número de ALFWS que utilicen radiocomunicaciones conforme vayan entrando en funcionamiento nuevos sistemas de detección de inundaciones repentinas.

El sistema de evaluación automática local en tiempo real (ALERT, *automated local evaluation in real time*) está integrado por un generador automático de informes de eventos, sensores meteorológicos e hidrológicos, equipos de comunicaciones y programas y equipos informáticos. En su versión más sencilla, los sensores ALERT transmiten señales codificadas, normalmente mediante

sistemas radioeléctricos en las bandas de ondas métricas o decimétricas, a una estación base, a menudo mediante repetidores (véase la Fig. 6-1). La estación base recibe estas señales codificadas y las procesa convirtiéndolas en información hidrometeorológica útil visualizable o comunicada a un sistema de alarma a fin de notificar a las unidades de control de emergencias los criterios predefinidos vulnerados.

FIGURA 6-1

Esquema de un sistema ALERT



Los datos de los sensores se procesan en instalaciones informáticas locales.

No hay comunicaciones dedicadas con otras instalaciones informáticas.

La zona de cobertura está limitada por el alcance radioeléctrico de los sensores y los radioenlaces.

Meteo-061

6.3 Otros sistemas de satélites

La captura de datos, su transmisión y divulgación empieza a apoyarse en otros sistemas de satélites cuya utilización cabe esperar aumente en el futuro. En la actualidad, los datos meteorológicos brutos y los procesados se transmiten en cada país y por todo el mundo gracias al servicio fijo por satélite (SFS). El nuevo servicio móvil por satélite (SMS), aún en fase de desarrollo, tal vez pueda facilitar la captura de datos en el futuro, especialmente los procedentes de las ubicaciones remotas e inaccesibles. Los sistemas SMS se dividen en dos clases. Los que operan por debajo de 1 GHz proporcionan un servicio exclusivamente de datos de bajo costo conocido como SMS no vocal no geoestacionario (NVNG) o pequeños satélites en órbita terrestre baja (LEO). Los sistemas vocales y de datos que funcionan con sus propios enlaces de servicio (con usuarios individuales) en el intervalo 1-3 GHz se denominan grandes LEO.

6.4 Sistemas remotos fijos

Las características técnicas de estos sistemas, en particular sus frecuencias de funcionamiento, varían considerablemente, pudiendo utilizarse cualquier banda de RF meteorológica. Se suelen seleccionar en función de la anchura de banda necesaria, que a su vez depende del tipo y cantidad de información a transportar. Los sistemas remotos fijos se utilizan para muchos fines meteorológicos y funcionan en varias bandas de RF. Como su nombre indica, funcionan en atribuciones fijas. Entre los usos más característicos se pueden citar:

Sistemas de conmutación por voz de los enlaces de conexión para transmitir señales de control o datos a los transmisores de difusión de datos, que a menudo están ubicados en lugares remotos (por ejemplo en la cima de las montañas) a fin de aumentar al máximo su cobertura.

Conexión remota con radares para transmitir las señales de retorno a los radares desde éstos (que suelen estar emplazados en lugares remotos) al centro de proceso de datos. Los operadores utilizan también la RF para el telemando de los equipos de las instalaciones del radar.

Captura de datos para transmitir desde los emplazamientos remotos a los archivos o instalaciones informáticas centrales los datos capturados por los sensores hidrológicos y meteorológicos procedentes de la medición de la lluvia, el viento, la temperatura, la profundidad de la nieve, los temblores de tierra (para la detección y predicción de terremotos) u otros fenómenos naturales cualesquiera.

6.5 Usos meteorológicos de los sistemas de radionavegación

6.5.1 Servicios terrenales

Los meteorólogos utilizan las señales del servicio de radionavegación para varios fines. La utilización de señales de navegación Omega (con frecuencias entre 10 y 13 kHz) se generalizó a partir de 1985, aproximadamente, para el seguimiento de las radiosondas del servicio MetAids hasta que éste dejó de funcionar. Esto ocurrió porque los sistemas de radiosonda podían utilizarse con antenas sencillas en la estación de base, efectuando el proceso automáticamente, y por la facilidad de mantenimiento del sistema en las ubicaciones remotas. También se utilizaron señales del Loran-C a 100 kHz con los mismos fines, habiendo aumentado la utilización del Loran-C en las zonas donde se ha mantenido una cobertura conveniente.

Cuando dejaron de utilizarse los transmisores Omega en 1997, tuvo que modificarse más del 20% de los sistemas de radiosondas de la red de la OMM. La mayor parte de estos sistemas de tierra se modificaron o sustituyeron por radiosondas capaces de recibir y procesar las señales de navegación GPS.

6.5.2 Los sistemas mundiales de navegación por satélite (GNSS)

Los meteorólogos utilizan las señales GPS que se transmiten actualmente en 1575,42 MHz (designadas por L1) y 1227,6 MHz (designadas por L2) (y las del GLONASS y del sistema Galileo propuesto) para los siguientes fines:

- *Localización de plataformas móviles de observación meteorológica:* por ejemplo de radiosondas transportadas en globos atmosféricos, de radiosondas con paracaídas, aviones telecontrolados con sensores meteorológicos (véase el Capítulo 3) y sistemas meteorológicos marinos tales como las boyas oceánicas.
- *Sincronización temporal de gran precisión:* entre los lugares de observación remotos, necesaria por ejemplo para los sistemas de detección de rayos (véase el § 6.6).
- *Medición del contenido total de vapor de agua de la atmósfera:* calculado a partir del retardo de fase de las señales GPS captadas por los receptores terrestres. El cálculo del contenido total de vapor de agua exige determinaciones muy precisas de la posición de los distintos satélites GPS y de la temporización de los relojes de los satélites. La posición del receptor en tierra debe conocerse asimismo con gran precisión. Los receptores GPS se suelen instalar en una plataforma fija adecuada para el seguimiento preciso de la posición de la superficie terrestre así como para el suministro de información meteorológica. Por consiguiente, las mediciones pueden constituir un subproducto de las observaciones geodésicas y sismológicas o efectuarse mediante sensores instalados específicamente por los meteorólogos. Los retardos de fase introducidos en la transmisión de la señal a través de la ionosfera se determinan a partir de las diferencias de retardo de fase entre dos frecuencias GPS, L1 y L2. Si se conocen la presión y la temperatura de la superficie, puede

calcularse el retardo de fase hidrostático seco introducido por la atmósfera de modo que el retardo de fase remanente sea proporcional al contenido total de vapor de agua a lo largo del trayecto del satélite. El sensor GPS en la superficie terrestre recibe las señales GPS de muchas direcciones en un breve periodo de tiempo. De este modo, se puede calcular el contenido total de vapor de agua en la vertical así como los gradientes del contenido total de vapor de agua en la dirección horizontal en torno al sensor. Esta técnica es de importancia para los estudios de la propagación atmosférica ya que permite una medición directa del contenido total de vapor de agua a lo largo del trayecto oblicuo que une al receptor en tierra con el satélite. Véase asimismo [Coster y otros, 1997].

- *Medición de la temperatura y la humedad relativa en función de la altura calculada a partir de las mediciones de ocultación espacial de las señales GPS:* en esta aplicación, un receptor situado en un satélite independiente capta señales de la constelación GPS que pasa por la atmósfera en incidencia rasante con la superficie terrestre. La refracción de las señales GPS se mide en un intervalo de altura sobre la superficie terrestre. Esto permite calcular el índice de refracción del aire en función de la altura. A niveles superiores, en la atmósfera central, la humedad relativa es muy baja y el índice de refracción del aire puede suponerse que es función directa de la temperatura. A niveles más próximos a la superficie, por debajo de la tropopausa, tanto la temperatura como la presión parcial del vapor de agua influyen en el índice de refracción. La presión parcial del vapor de agua puede calcularse si se conoce la temperatura a partir de otra fuente. Las mediciones de las variables meteorológicas efectuadas mediante esta técnica tienen una resolución vertical mejor que la de los radiómetros de sensores pasivos de orientación nadiral (véase el Capítulo 5) pero se promediarán para distancias relativamente largas en la dirección horizontal. Al igual que la medición del contenido total de vapor de agua, esta técnica exige una temporización muy exacta y el conocimiento de las posiciones de ambos satélites. Los receptores de los GNSS están proyectados para la próxima generación de satélites meteorológicos de órbita polar METOP y NPOESS aunque se encuentran asimismo a bordo de satélites especializados tales como el COSMIC.

6.6 Sistemas de detección y localización de rayos

Las necesidades de los meteorólogos operacionales en el ámbito de la teledetección de la actividad de rayos son cada vez mayores. Se van incorporando los requerimientos de los clientes a los productos que se diseñan para la utilización de los radares y satélites meteorológicos, y en muchos países desarrollados se les otorga una gran prioridad dada la necesidad de realizar automáticamente observaciones meteorológicas de superficie. El funcionamiento fiable de estos sistemas guarda una estrecha relación con los aspectos de la seguridad pública en tierra, mar y aire. La existencia de un servicio eficaz de predicción tiene una gran repercusión en la eficacia de las actividades comerciales y defensivas. La seguridad de los ingenieros que trabajan en líneas de transporte de energía y el personal que maneja explosivos constituyen ejemplos de actividades que se benefician de la eficacia de las predicciones de rayos.

La detección de los rayos es una actividad pasiva que supone la utilización de receptores de radio-comunicaciones para detectar los frentes de onda generados por la caída de los rayos. Los datos procedentes de las ubicaciones de detección individuales pueden distribuirse por los medios habituales, entre ellos los enlaces fijos, el teléfono, Internet, etc.

En los actuales sistemas operativos, la posición del rayo (véase la Fig. 6-2) se determina ya sea midiendo la dirección de llegada de la onda esférica asociada (onda atmosférica) o el tiempo de llegada de la onda esférica o una combinación de ambos.

FIGURA 6-2

Fotografía en exposición de rayos cayendo cerca de Norman, Oklahoma, Estados Unidos de América



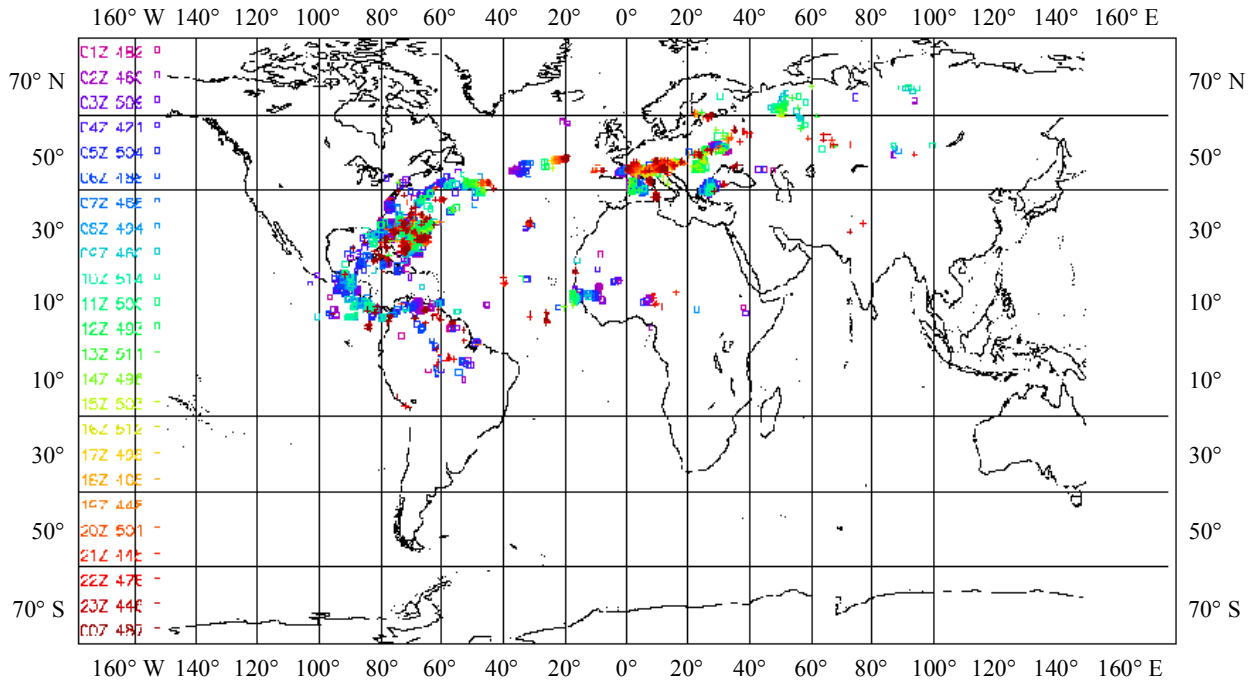
Meteo-062

Las mediciones deben ser efectuadas en más de tres lugares de detección bastante espaciados. El número de emplazamientos que se suele utilizar suele ser mayor que el mínimo a fin de mejorar la fiabilidad de las ubicaciones señaladas. Los sistemas basados en el tiempo de llegada suelen proporcionar ubicaciones más precisas que los sistemas basados en la localización de la dirección en las observaciones efectuadas a una distancia de cientos de kilómetros. Esto se debe a que la dirección de recepción de las señales ionosféricas captadas en el emplazamiento suele ser ligeramente diferente de la dirección real de descarga, variando en función del estado de las capas superficiales cerca del lugar de detección. Los sistemas basados en el tiempo de llegada suelen utilizar principalmente las señales de radionavegación GPS para obtener la sincronización temporal necesaria en los diferentes lugares de detección. Todos los sistemas utilizan comunicaciones eficaces y fiables entre los emplazamientos remotos y el procesador central. La frecuencia radioeléctrica utilizada para la localización de la actividad de rayos varía en función de la zona de supervisión necesaria y del fin específico del sistema.

La localización a muy larga distancia, varios miles de kilómetros, se efectúa en la práctica observando las frecuencias centradas en 10 kHz (2-15 kHz) (véase la Fig. 6-3). En este sistema, las ondas esféricas se reciben en estaciones periféricas remotas por toda Europa [Lee, 1986] separadas hasta 2000 km. Las ondas esféricas se someten a un análisis de Fourier y se les introduce una indicación de tiempo en los lugares de emplazamiento de los sensores. Las muestras temporizadas se transmiten inmediatamente a la estación de control donde se calculan las descargas de los rayos a partir de las diferencias de los tiempos de llegada a los emplazamientos. Las interferencias son extremadamente perniciosas para el funcionamiento del sistema y todas las estaciones periféricas están dotadas de filtros de ranura ajustables para poder discriminar la señal de la contaminación local.

FIGURA 6-3

Mapa de los datos de rayos correspondiente a un día generados por un sistema de largo alcance



11 581 informes de tormentas eléctricas en este periodo de 24 horas

Meteo-063

Los sistemas operativos más utilizados cubren en detalle una zona más limitada. En este caso, la onda esférica se observa a frecuencias superiores centradas en torno a 200 kHz (los receptores de banda ancha utilizados son más sensibles en el centro del intervalo de 1 kHz a 350 kHz) y los lugares de detección suelen estar separados entre 100 km y 400 km, en función de que el objetivo sea los rayos dirigidos desde las nubes a la tierra o los que se producen entre nubes. A estas frecuencias tan altas, las descargas desde las nubes a la tierra pueden identificarse por la brusca subida en amplitud que define el borde anterior de la onda esférica. El tiempo de llegada de este frente anterior puede determinarse con exactitud. Los tiempos obtenidos en los emplazamientos de la red se transmiten a un procesador central y se utilizan para calcular las posiciones de las descargas. En muchos casos, las redes de detección de diferencias de los tiempos de llegada funcionan en combinación con los sistemas magnéticos de detección de dirección instalados en años anteriores. [Holle y López, 1993] examinan diversos sistemas de detección de rayos y [Diendorfer y otros, 1994] analizan las observaciones de su propia red situada en Austria.

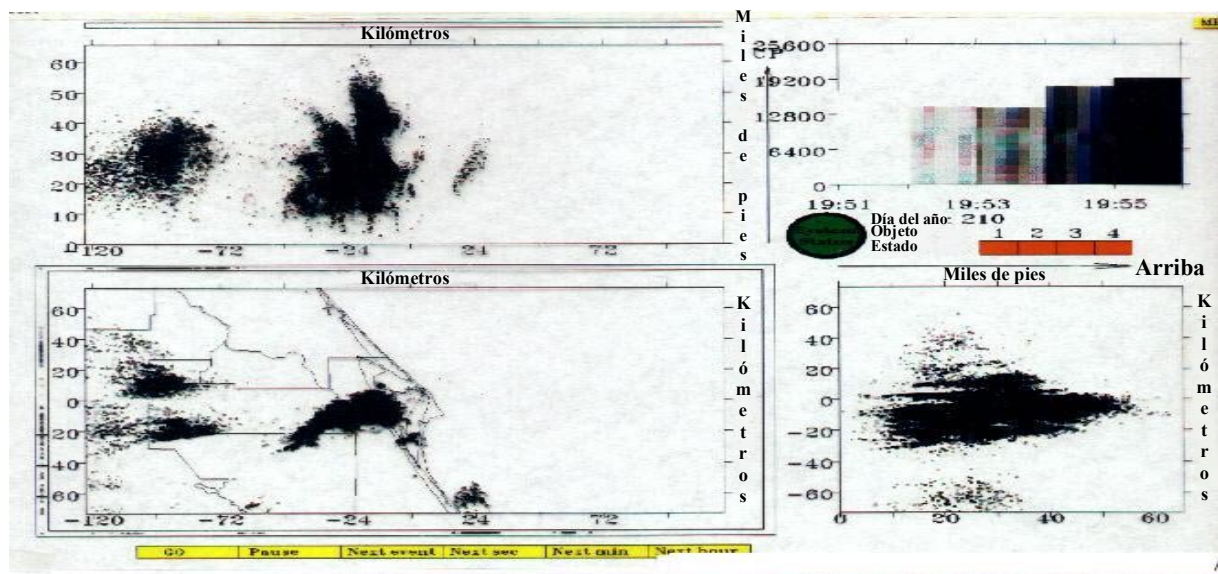
Por otra parte, en ciertas áreas hay que observar todas las descargas eléctricas asociadas con la actividad tormentosa, ya sean descargas de las nubes al suelo o entre nubes. Esto se efectúa mediante la observación a frecuencias mucho más altas (el sistema de detección y determinación de la distancia de los rayos (LDAR, *lightning detection and ranging*) utiliza 63 MHz y 225 MHz, mientras que el SAFIR utiliza de 110 a 118 MHz). El LDAR (desarrollado por la NASA se describe en [Lennon and Maier, 1991] y el sistema SAFIR desarrollado en Francia se expone en [Kawasaki y

otros, 1994]. La Fig. 6-4 muestra la pantalla LDAR en tiempo real. Las tormentas deberán quedar dentro de la línea de visibilidad directa cuando deba observarse toda la actividad. Esto exige que los sensores de tierra estén situados de acuerdo con una configuración de línea de base muy corta – los sensores han de estar separados 30 km y a una distancia del suelo de 50 m aproximadamente para satisfacer los criterios de horizonte del radar. En la práctica, no obstante, algunos sistemas operacionales de observación de la actividad entre nubes funcionan con una separación de los sensores en tierra bastante mayor, apoyándose en los sistemas de nubes a tierra, de frecuencias inferiores, para suministrar el detalle de las descargas a niveles inferiores.

El panel inferior izquierdo de la Fig. 6-4 muestra datos LDAR en un mapa de la costa Este de Florida (sólo parte de ella). Después los datos se proyectan en un panel Este-Oeste en función de la altitud (superior izquierda) y Norte-Sur en función de la altitud (inferior derecha). (Obsérvese que este panel está girado 90° a un lado.) Hay un histograma (superior derecha) que muestra los datos en cinco incrementos de un minuto.

FIGURA 6-4

Pantalla LDAR en tiempo real



Meteo-064

6.7 Teledetección desde tierra

El sondeo atmosférico vertical que utiliza teledetección pasiva desde satélites se ha tratado en profundidad en el § 5.1. Los meteorólogos que elaboran predicciones locales detalladas y los científicos que investigan los límites planetarios necesitan sondeos atmosféricos de mejor resolución vertical cerca del suelo que la que facilitan los sistemas de satélites.

Un modo de obtener esta información es utilizar la teledetección pasiva de orientación cenital mediante radiómetros instalados en la superficie terrestre. En la actualidad existen en el mercado radiómetros diseñados para estos fines. Estos radiómetros utilizan una serie de canales en la banda del oxígeno, entre 50 GHz y 58 GHz, para efectuar mediciones estructurales de la temperatura. Los

canales comprendidos entre 21 GHz y 24 GHz se utilizan para suministrar información sobre la variación vertical del contenido de vapor de agua y una ventana de observación en la región de 30 GHz se utiliza para la identificación de las nubes. En el futuro la medición del contenido del vapor de agua podrá beneficiarse también de las observaciones adicionales en los segmentos inferiores de la banda de absorción de vapor de agua a 183 GHz.

Aunque los canales destinados a la teledetección en tierra de la temperatura y la humedad se encuentran en una región similar a los de la teledetección pasiva desde satélites, no son idénticos a los utilizados por los satélites. A ciertas frecuencias, la teledetección por satélite puede compartir frecuencias con los servicios terrestres sin problemas, pero los radiómetros de tierra pueden necesitar protección. El número de radiómetros de tierra en funcionamiento sigue siendo pequeño pero si los trabajos en curso llegan a buen fin, podría instalarse un gran número de ellos en el futuro. Tal vez haya que definir un método práctico de compartición consistente en ubicar los radiómetros de modo que se eviten las interferencias de otros servicios.

Se prevé que la teledetección pasiva de otros elementos atmosféricos, como el ozono, se beneficie asimismo del aumento del número de emplazamientos radiométricos en tierra.

Referencias Bibliográficas

- COSTER, A. J., NIELL, A. E., BURKE, H. K. y CZERWINSKI, M. G. [17 de diciembre de 1997] The Westford water vapor experiment: use of GPS to determine total precipitable water vapour. MIT/Lincoln Laboratories.
- DIENDORFER y otros, [1994] Results of performance analysis of the Austrian lightning location network. ALDIS, 22ª Conferencia Internacional sobre Protección contra Rayos, Budapest, Hungría.
- HOLLE, R. L. y LOPEZ, R. E. [1993] Overview of real-time lightning detection systems and their meteorological uses. NOAA Technical Memorandum ERL NSSL-102, National Severe Storms Laboratory, Norman, Oklahoma, Estados Unidos de América, p. 68.
- LEE, A. C. L. [1986] An experimental study of the remote location of lightning flashes using a VLF arrival time difference technique. *Quarterly J. R. Meteorological Society*.
- LENNON, C. y MAIER, L. [1991] Lightning mapping system. Proc. of International Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity, Cocoa Beach, FL., Estados Unidos de América. NASA Conf. Pub. 3106, Vol. II, p. 89-1 – 89-10.
- KAWASAKI, Z. I., YAMAMOTO, K., MATSURA, K., RICHARD, P., MATSUI, T., SONOI, Y. y SHIMOKURA, N. [1994] SAFIR operation and evaluation of its performance, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 21, 12, p. 1133-1136.

ANEXO 1

ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS DE USO COMÚN EN METEOROLOGÍA

A		ATMS	Sonda de microondas de tecnología avanzada (NPOESS/NASA)
A/D	Análogo a digital	ATOVS	Sonda vertical operacional TIROS avanzada
AAAS	American Association for the Advancement of Science	ATSR	Radiómetro de exploración longitudinal de la traza
AARS	Sistema de información automática de aviones	AVCS	Sistema de videocámara avanzado
ABSN	Red sinóptica antártica básica	AVHRR	Radiómetro avanzado de muy alta resolución
ACARS	Sistema de direccionamiento e información para comunicaciones con aviones	AWIPS	Sistema de proceso de la información meteorológica avanzado
ACCAD	Comité Asesor sobre Aplicaciones y Datos Meteorológicos	B	
ACMAD	Centro Africano de Aplicaciones Meteorológicas para el Desarrollo	BCD	Decimal codificado en binario
ADAS	Sistema de adquisición de datos en aviones	BER	Proporción de bits erróneos
ADC	Convertidor analógico/digital	BPS	Bits por segundo
ADEOS	Satélite de observación avanzada de la Tierra (Japón)	BR	Oficina de Radiocomunicaciones de la UIT
ADP	procesamiento automático de datos	BW	Anchura de banda
ADPE	Equipos de procesamiento automático de datos	C	
AFOS	Sistema automático de predicción y observación	C&DH	Tratamiento de instrucciones y datos
AGRHYMET	Centro Regional de Formación en Agrometeorología e Hidrología Operacional y sus Aplicaciones	C/N_0	Índice de densidad portadora/ruido
AIRS	Sonda de infrarrojos avanzada (instrumento de la NASA)	CAD	Convertidor analógico/digital
ALC	Control automático de nivel	CaeM	Comisión para la Meteorología Aeronáutica
AMDAR	Retransmisión de datos meteorológicos de aviones	CAF	Control automático de frecuencia
AMI	American Meteorological Society	CAG	Control automático de ganancia
AMSR	Sonda de temperaturas meteorológicas avanzadas	CAgM	Comisión para la Meteorología Agrícola
ANSI	American National Standards Institute	CAS	Comisión para las Ciencias Atmosféricas)
AOPC	Grupo de Expertos en observación atmosférica del clima	CBS	Comisión para los Sistemas Básicos
AOS	Adquisición de la señal	CCD	Dispositivo de acoplamiento de cargas
AP	Amplificador de potencia	CCIR	Comité Consultivo Internacional de Radiocomunicaciones (véase UIT-R)
APT	Transmisión automática de imágenes	CCI	Comisión para la Climatología
ARGOS	Sistema de captura y localización de datos en los satélites de la serie NOAA	CCRS	Centro de Teledetección de Canadá
ASCII	Código normalizado americano para el intercambio de información	CCSDS	Consultative Committee for Space Data Systems
ASIC	Circuito integrado específico de la aplicación	CDA	Telemando y adquisición de datos
		CDAS	Estación de telemando y adquisición de datos
		CEM	Compatibilidad electromagnética
		CEOS	Comisión de Satélites de Observación de la Tierra
		CEPMMP	Centro Europeo de Previsión Meteorológica a medio plazo

CERES	Sistema de energía radiativa de las nubes y la Tierra	CrIS	Sonda de infrarrojos transversal a la trayectoria (instrumento NPOESS)
CGMS	Co-ordination Group for Meteorological Satellites (Grupo de Coordinación sobre Satélites Meteorológicos)	CrMIS	Sonda-captador de imágenes de microondas transversal a la trayectoria (instrumento NPOESS)
CIEM	Consejo Internacional para la Exploración del Mar	CRT	Tubo de rayos catódicos
CIESIN	Consortium for International Earth Science Information Networks	CSA	Agencia Espacial de Canadá
CIMO	Comisión para los instrumentos y los métodos de observación	CS&C	Conmutación y control de comunicaciones (segmento CDA del sistema GMACS)
CIMSS	Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies	CSIRO	Organización de Investigación Científica e Industrial de la Commonwealth
CIUC	Consejo Internacional de Uniones Científicas	CSIS	Sistema de información centralizada sobre tormentas
CLICOM	Informática del clima	CSM	Supervisión del sistema climático
CLINO	Normales climatológicas	CSMA/CD	Acceso múltiple por detección de la portadora con detección de colisiones
CLIPS	Servicios de información y predicción climática	CSTR	Council for Scientific and Technical Research
CLIVAR	Variabilidad y predictabilidad climática	CTCS	Sistema de telemetría y telemando CDA (segmento CDA del sistema GIMTACS)
CMA	Administración Meteorológica China	CW	Onda continua
CMD	Instrucción	CZCS	Explorador en color de zonas costeras
CMIS	Sonda/captador de imágenes de microondas de exploración cónica (instrumento NPOESS)	CHy	Comisión para la Hidrología (OMM)
		D	
CMM	Comisión para la Meteorología Marina	D/A	Digital/analógica
CMR	Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones	DAAC	Centro de Archivos Activos
CNES	Centro Nacional de Estudios Espaciales	DADS	Distribuido
CNIE	Comision Nacional de Investigaciones Espaciales	DAPS	Sistema de archivo y distribución de datos
COADS	Conjunto de datos completo sobre el océano y la atmósfera	DAS	Sistema de procesamiento automático
COI	Comisión Oceanográfica Intergubernamental	DCS	Sistema de adquisición de datos
CONUS	Estados Unidos Continental	DAS	Sistema de administración de la base de datos
COP	Conferencia de las partes	DAS	Sistema de acceso directo
COPUOS	Comisión sobre la utilización del espacio ultraterrestre con fines pacíficos	dB	Decibelio
		DB	Radiodifusión directa
CORSSAC	Civil Operational Remote Sensing Satellite Advisory Committee	DBMS	Sistema de gestión de la base de datos
COSPAS	Sistema de búsqueda y salvamento a bordo de satélite ruso. Véase SARSAT	DCP	Plataforma de recogida de datos
		DCPI	Interrogación de las plataformas de recogida de datos
CPCSA	Coordinación y actividades complementarias del programa climático	DCPLS	Sistema de recogida de datos y localización de plataformas
		DCPR	Recepción de las plataformas de recogida de datos
CPR	Radiómetro físico de nubes o reanimación cardiopulmonar	DCR	Radiómetro de correlación diferencial
		DCS	Sistema de recogida de datos
CPU	Unidad Central de Proceso	DEMUX	Demultiplexor
CRC	Verificación por redundancia cíclica/código de redundancia cíclica	DEPIRE	Densidad espectral de potencia isotropa radiada equivalente
		dfp	Densidad de flujo de potencia
		DIFAX	Facsímil digital
		DIR	Infrarrojo diurno

DLI	Interfaz del enlace descendente (DM/PM)	ETS	Satélite para pruebas de ingeniería
DLM	Supervisor del enlace descendente	EUMETSAT	Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos
DLR	Agencia Espacial Alemana		
DMSP	Programa de Satélites Meteorológicos de Defensa	EUV	Ultravioleta extremo
DN	Nodo descendente	F	
DOMSAT	Satélite nacional (comunicaciones)	FAX	Facsímil
DPT	Terminal de imagen digital	FC	Color falso
DR	Lectura directa	FCC	Composición en color falso
DRGS	Estación terrena de lectura directa	FCC	Federal Communications Commission
DS	Sondeo de permanencia o sondeo (nodo operativo GOES-4/7 VAS)	FI	Frecuencia intermedia
DSARS	Sistema de archivo y recuperación del satélite DAMUS	FIFO	Primero en entrar, primero en salir
DSB	Baliza de sonda directa	FOV	Campo de visión
DSB	Radiodifusión de sonda directa	fps	Tramas por segundo
DSN	Red de comunicaciones con el espacio lejano	FSS	Sistema informático de planificación de vuelo
DUS	Sistema de utilización de datos	FTM	Función de transferencia de modulación
E		G	
EBR	Registrador de haz electrónico	<i>G/T</i>	Relación ganancia de la antena/ temperatura de ruido del sistema (dB/K)
EC/AGE	Grupo Asesor del Consejo Ejecutivo sobre el intercambio de calibrado meteorológico y electrónico	GAC	Cobertura global regional
ECMWF	Centro Europeo de Previsión Meteorológica a medio plazo	GAME	Experimento GEWEX sobre los monzones de Asia
EDC	Centro de Datos EROS	GARP	Programa Mundial de Investigación de la Atmósfera
EDIMS	Sistemas de gestión de datos e información medioambiental	GARS	Sistema de archivo y recuperación del GOES
ELT	Transmisor de localización de siniestros	GAW	Vigilancia de la atmósfera global
ELV	Vehículo de lanzamiento no recuperable	GCIP	Proyecto Internacional GEWEX a escala continental
EMI	Interferencia electromagnética	GCM	Modelo de circulación general
ENSO	Fenómeno de oscilación meridional de El Niño	GCOS	Sistema mundial de observación del clima
ENVISAT	Satélite medioambiental	GDTA	Groupement pour le Développement de la Télédétection Aérospatiale
EOS	Satélites de observación de la Tierra	GEO	Órbita terrestre geostacionaria
EPOCS	Estudios climáticos del Océano Pacífico ecuatorial	GEWEX	Experimento mundial sobre la energía y el ciclo hídrico
EPS	Sensor de partículas energéticas	GHz	Gigahertzio
ERB	Radiación térmica global de la Tierra	GIMGSP	Proyecto de sistema de tierra
ERBE	Experimento sobre radiación térmica global de la Tierra	GOES I-M	GOES I-M
ERL	Laboratorio de Investigación Medioambiental	GIMTACS	Sistema de telemetría y telemando
EROS	Satélite de observación de recursos terrestres	GOES I/M	GOES I/M
ERS	Satélite europeo de teledetección	GIS	Sistemas de información geográfica
ESA	Agencia Espacial Europea	GIMACS	Sistema de supervisión y control
ESD	Descarga electrostática	GOES (actualmente GIMTACS)	GOES (actualmente GIMTACS)
ESMR	Radiómetro de microondas de barrido electrónico	GMS	Satélite meteorológico geostacionario
ETA	Hora prevista de llegada	GMT	Tiempo medio de Greenwich
ETM	Modelo de pruebas de ingeniería	GOES	Satélite geostacionario operacional del medio ambiente
ETM	Trazador temático ampliado	GOMS	Satélite meteorológico operacional geostacionario

GOOS	Sistema mundial de observación de los océanos	ICES	Consejo Internacional para la Exploración del Mar
GOS	Sistema mundial de observación	ICSAR	International Committee for Search and Rescue
GOSSP	Panel espacial de sistemas de observación mundial	ICSU	Consejo Internacional de Uniones Científicas
GPCP	Proyecto de climatología de precipitación mundial	IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
GPS	Sistema mundial de determinación de posición	IFOV	campo instantáneo de visión
GPSOS	Sensor de ocultación GPS	IFRB	Junta Internacional del Registro de Frecuencias, véase BR
GRC	Glenn Research Center formerly the Lewis Research Center (LeRC)	IGBP	Programa Internacional Geosfera-Biosfera
GRS	Estación receptora en tierra	IGF	Servicio de generación de imágenes
GRT	Tiempo real GOES (base de datos)	IGFOV	Campo geométrico instantáneo de visión
GSFC	Centro de Vuelos Espaciales Goddard	IGOSS	Integrated Global Ocean Services System
GSN	Red de superficie SMOC	IHP	Programa Hidrológico Internacional
GSTDN	Ground Spaceflight Tracking and Data Network	INDOEX	Experimento del Océano Índico
GTOS	Sistema mundial de observación de la Tierra	INPE	Instituto de Investigaciones Espaciales
GUAN	Red SMOC de atmósfera superior	INR	Navegación y registro de imágenes
GVAR	Variable GOES	INR	Relación interferencia a ruido
GWC	Centro Meteorológico Mundial	INSAT	Satélite indio
H		IOC	Comisión Oceanográfica Intergubernamental
H1/3	Altura de onda significativa	IODE	Comité de la COI sobre intercambio internacional de datos e información
HEPAD	Detector de protones y partículas alfa de alta energía	IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el cambio climático
HiRID	Datos del captador de imágenes de alta resolución	IR	Infrarrojo
HIRS	Sonda en infrarrojo de gran resolución (instrumento TIROS)	IRIG	Inter-Range Instrumentation Group
HOMS	Subprograma de hidrología operativa para fines múltiples	IRIS	Espectro interferómetro de infrarrojos
HRD	Día de investigación de huracanes	IRS	Satélite de teledetección indio
HRD (10)	Día de investigación de huracanes – El GOES-Este explora cada 10 min en instantes predeterminados	IRU	Unidad de referencia inercial
HRIS	Sonda de infrarrojos de alta resolución o sonda interferométrica de alta resolución	ISETAP	Intergovernmental Science Engineering & Technology Advisory Panel
HRPT	Transmisión de imágenes de alta resolución	ISO	Organización Internacional de Normalización
HRSD (S)	Día de exploración rápida de huracanes (estereofónica) el GOES-Este y el Oeste exploran cada 7 1/2	ITOS	Sistema operacional TIROS mejorado
Hz	Hertzio (antes ciclos por segundo)	ITPR	Radiómetro de determinación de perfil de temperaturas de infrarrojos
I		J	
I/O	Entrada/salida	JDIMP	Grupo Mixto de Expertos sobre gestión de datos e información SMOC/SMOO/SMOT
I/S	Captador de imágenes y sonda	JERS	Satélite japonés de recursos terrestres
I+D	Investigación y desarrollo	JIC	Centro Conjunto sobre el Hielo
IAHS	Asociación Internacional de Ciencias Hidrológicas	JMA	Japan Meteorological Agency
IAMAS	Asociación Internacional de Ciencias Meteorológicas y Atmosféricas	JPL	Jet Propulsion Laboratory
IASI	Interferómetro de sonda atmosférica de infrarrojos	JSC	Joint Scientific Committee Johnson Space Center
		JSTC	Comité Mixto Científico Técnico

K

K	Kelvin
kb	kilobit(s)
kB	kilobyte(s)
kBPS o kbit/s	Kilobits por segundo
keV	Kiloelectrón-voltios
kHz	Kilohertzio
KSC	Kennedy Space Center
KSPS	Miles de muestras por segundo

L

LANDSAT	Satélite de teledetección terrestre de Estados Unidos de América
LANDSAT-TM	Trazador temático cartográfico LANDSAT
LaRC	Langley Research Center
LAT/LON	Latitud/Longitud
LE	Levantamiento de puntos de referencia
LEO	Órbita terrestre baja
LEOP	Fase de lanzamiento y de inicio de la órbita
LeRC	Véase GRC
LGSOWG	LANDSAT Ground Station Operations Working Group
LHCP	Polarización circular levógiara
LIDAR	Detección y localización por ondas luminosas
LMT	Hora media local
LOS	Pérdida de la señal
LPA	Amplificador de baja potencia
IPD	Detector de presencia IF (CDA)
lpi	Líneas por pulgada
lpm	Líneas por minuto
LRIT	Transmisión de la información a baja velocidad
LRPT	Transmisión de imágenes de baja resolución
LUT	Tabla de consulta o terminal de usuario local
LW	Onda larga
LWIR	Infrarrojos de onda larga

M

MA	Modulación de amplitud
mb	Milibares
Mbit/s	megabits por segundo
Mbps	Megabits por segundo
MBps	Megabytes por segundo
MCC	Centro de Control de la Misión
MCDW	Datos climáticos mundiales mensuales
MCS	Soprote del canal de humedad
MDF	Multiplexación por división de frecuencia
MDHS	Sistema de tratamiento de datos meteorológicos

MDP	Modulación por desplazamiento de fase
MDP-2	Modulación por desplazamiento de fase binaria
MDP-4	Modulación por desplazamiento de fase cuaternaria
MDP-4D	Modulación por desplazamiento de fase cuaternaria descentrada
MDT	Múltiplex por división en tiempo
MDUS	Estaciones de utilización de datos a media escala
MEO	Órbita terrestre media
MEPED	Detector de protones y electrones de media energía
MetAids	Ayudas a la meteorología
METEOSAT	Satélite meteorológico geostacionario europeo
METOP	Satélite meteorológico europeo de órbita polar
MetSat	Satélite meteorológico
MeV	Megaelectrón-voltio
MeV/n	Megaelectrón voltios por nucleón
MF	Modulación de frecuencia
MHS	Sonda de humedad de microondas
MHz	Megahertzios
MIA	Modulación de impulsos en amplitud
MIC	Modulación por impulsos codificados
MID	Modulación de impulsos en anchura
μrad	Microrradián
μs	Microsegundo
MLS	Sonda de limbo de microondas
MODEM	Modulador/demodulador
MODIS	Espectrorradiómetro captador de imágenes de resolución moderada (instrumento de la NASA)
MOPITT	Medición de la contaminación troposférica (NASA)
MOS	Satélite de observación marina (Japón)
MP	Modulación de fase
MPERSS	Sistema de soporte de respuesta a emergencias de polución marina
mr	Milirradianes
MSFC	Marshall Space Flight Center
MSI	Captación de imágenes multiespectral
MSS	Analizador multiespectral
MSU	Sonda de microondas
MTBF	Tiempo medio entre fallos
MTF	Función de transferencia de modulación
MUX	Multiplexor
MW	Volante inercial, onda media, microondas, megavatio
N	
N/S	Norte/Sur
NASA	National Aeronautics and Space Administration

NASCOM	NASA Communications Network	P	
NASDA	National Space Development Agency		
NCDC	Centro Nacional de Datos Climáticos	p.i.r.e.	Potencia isotrópica radiada equivalente
NE-delta-N	Equivalente de ruido del cambio de radiancia	P/SEC	Impulsos por segundo
NE-delta-T	Equivalente de ruido del cambio de temperatura	PDL	Carga de datos del procesador
		PDR	Retransmisión de datos procesados (enlace de RF GVAR)
NERC	National Environmental Research Council (Consejo Nacional de Investigación Medioambiental)	PE	Ecuación primitiva
		PEP	Potencia de cresta de la envolvente
NESDIS	National Environmental Satellite Data and Information Service	PEP	Protección contra errores en los polinomios (NASA)
NF	Factor de ruido	PHI	Programa Hidrológico Internacional
NHC	National Hurricane Center	PIGB	Programa Internacional Geosfera-biosfera
NHS	Servicio Hidrológico Nacional		
NIR	Infrarrojo nocturno o próximo al infrarrojo	p.i.r.e.	Potencia isotrópica radiada equivalente
		Píxels	Elementos de imagen
NMC	Centro Meteorológico Nacional	PKM	Motor impulsor de perigeo
NMS	Servicio Meteorológico Nacional o Servicio Hidrometeorológico	PLL	Bucle enganchado en fase
		PN	Pseudorruído
NNODS	Sistema de datos oceánicos NOAA/NOSS	PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration	POES	Satélite medioambiental operacional de órbita polar
NOAA	METSAT polar	P-P	Cresta a cresta
NOS	Centro Nacional de Estudios Oceánicos	PPM	Partes por millón
		PPS	Impulsos por segundo
NPOESS	Sistema nacional de satélite medioambiental operacional de órbita polar	PR	Radar de precipitación
		PRF	Frecuencia de repetición de impulsos
		PROFS	Program for Regional Observing and Forecasting Service
NRCT	National Research Council of Thailand	PROMET	Grupo de Trabajo sobre el suministro de información meteorológica
NROSS	Navy Remote Ocean Sensing System		
NRSA	National Remote Sensing Agency	Q	
NRZ	Sin retorno a cero	QC	Control de calidad
NRZ-L	Sin retorno al nivel cero	R	
NSSFC	National Severe Storms Forecast Center	R	Rayleighs
NSSL	National Severe Storms Laboratory	R&D	Investigación y desarrollo
nT	Nanotesla	R/Y	Balanceo y guiñada
NWP	Predicción meteorológica numérica	RA	Altímetro de radar
NWS	Servicio Meteorológico Nacional	RLS	Radiobaliza de localización de siniestros
O			
O&M	Operaciones y mantenimiento	RBSN	Red sinóptica básica regional
OAD	Determinación de la órbita y de la actitud	RCS	Sistema de control de reacción
		RF	Radiofrecuencia
OAR	Oficina de Investigación Oceánica y Atmosférica	RFI	Interferencia de radiofrecuencia
		RGB	Rojo/verde/azul
OCTS	Sensor de temperatura de color del océano	RH	Humedad relativa
		RHCP	Polarización circular dextrógira
OHP	Programa hidrológico operacional	RMDCN	Red regional de comunicaciones de datos meteorológicos
OMI	Instrumento de medición del ozono		
OMM	Organización Meteorológica Mundial	RMS	Valor eficaz
OMPS	Ozone Mapping and Profiler Suite (NPOESS)	RPM	Revoluciones por minuto
		RSS	Ley cuadrática
OOPC	Ocean Observations Panel for Climate	RSU	Unidad de teledetección
		RT	Tiempo real

RW	Volante de reacción	SMOO	Sistema mundial de observación de los océanos
RWA	Conjunto del volante de reacción	SMOT	Sistema mundial de observación de la Tierra
S		SMS	Servicio móvil por satélite
S/C	Vehículo espacial	SMSSM	Sistema mundial de socorro y seguridad marítimos
S/N	Relación señal/ruido	SMT	Sistema mundial de telecomunicación
S/N ₀	Relación de densidad señal/ruido	SN	Red espacial
SAD	Datos auxiliares de la sonda	SOCC	Spacecraft Operations Control Center
SAGE	Experimentos sobre aerosoles y gases estratosféricos	SOES	Subcomité sobre satélites medioambientales operacionales
SAR	Radar de abertura sintética o búsqueda y salvamento	SOLAS	Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar
SARSAT	Seguimiento por satélite de búsqueda y salvamento, véase COSPAS	SPM	Captador de protones solares
SATCOM	Comunicaciones por satélite	SPOT	Satélite experimental de observación de la Tierra
SBUV	Ultravioleta de retrodispersión solar	SPREP	Programa Regional del Medio Ambiente para el Pacífico Sur
SC/N ₀	Relación de densidad subportadora/ruido	SQPSK	Modulación por desplazamiento alternado de fase en cuadratura (<i>stagered QPSK</i>)
SC/OES	Subcomité sobre satélites medioambientales operacionales	SR	Radiómetro de exploración
SC/OMS	Subcomité sobre satélites meteorológicos operacionales	sr	Estereorradián
SCIAMACHY	Espectrómetro de absorción de exploración y captura de imágenes para la cartografía atmosférica	SR-IR	Canal infrarrojo del radiómetro de exploración
SCO	Oscilador de subportadora	SR-VIS	Canal visible del radiómetro de exploración
SCSMEX	Experimento sobre los monzones en el Mar del Sur de China	SSA	Actividades de apoyo al sistema WWW
SCHOTI	Conferencia Permanente de Directores de Institutos de Formación de los Servicios Meteorológicos Nacionales	SSM/I	Generador de imágenes de microondas de sensor especial
SDUS	Estación de usuario de datos secundarios	SST	Temperatura de la superficie del mar
SeaWiFS	Sensor de gran campo de visión para la observación del mar	SSU	Equipo de sondeo estratosférico
SEC	Segundo	STA	Science and Technology Agency
SEM	Aparato de observación del medio espacial	STC	Comité Científico y Técnico
SET	Satélite de exploración de la Tierra	Ster	Estereorradián
SETS	Servicio de exploración de la Tierra por satélite	STS	Sistema de transporte espacial
SEU	Perturbación frente a un evento	S-VAS	Sonda atmosférica con radiómetro de barrido giratorio en el infrarrojo visible ampliado
SFS	Servicio fijo por satélite	S-VISSR	Radiómetro de barrido giratorio en el infrarrojo visible ampliado
SGISO	Sistema global integrado de servicios oceánicos	SW	Onda corta
SGLS	Sistema de enlace espacio-Tierra	SW	Conmutador o central
SIGWX	Tiempo significativo	SWIR	Infrarrojo de onda corta
SIR	Radar de captación de imágenes del transbordador espacial	SXI	Captador de imágenes de rayos X solares
SIRS	Espectrómetro infrarrojo de satélite	SXT	Telescopio de rayos X solares (misión solar-A)
SIT	equipo de implementación estratégica del CEOS	T	
SLAR	Radar de exploración lateral aerotransportado	T&C	Telemetría y telemando
SMO	Sistema mundial de observación	T/P	Topex/Poseidon
SMOC	Sistema mundial de observación del clima	T/V	Vacío térmico

TAD	Telemando y adquisición de datos	VDUC	Centro de utilización de datos VAS
TBUS	Sigla de cuatro letras de los mensajes de datos Ephemeris	VIIRS	Conjunto de captador de imágenes en el infrarrojo visible y de radiómetro (Instrumento NPOESS)
TDRS	Satélite de seguimiento y retransmisión de datos	VIP	Procesador de imágenes VAS (SPS de corriente P/DU)
TDRSS	Sistema de satélites de seguimiento y retransmisión de datos	VIRGS	Sistema de registro de imágenes y cuadrulado VISSR
TED	Detector de energía total o aparejo excluidor de tortugas	VISSR	Radiómetro de barrido giratorio en el espectro visible e infrarrojo
TEMS	Sistema de supervisión del ecosistema terrenal	VMM	Vigilancia Meteorológica Mundial
TES	Espectrómetro de emisión troposférica	VOS	Barco voluntario de observación
TIP	Procesador de información TIROS	VREC	Grabador de datos de radiómetro de muy alta resolución
TIR	Infrarrojo térmico	VSWR	Relación de onda estacionaria
TIROS	Satélite de observación por televisión sensible al infrarrojo	VTPR	Radiómetro de medida del perfil vertical de la temperatura
TLM	Telemetría	W	
TM	Trazador cartográfico temático	W AFC	Centro de predicciones de ámbito mundial
TMI	Captador de imágenes de microondas TRMM	WCASP	Programa de aplicaciones y servicios del clima mundial
TMR	Radiómetro de microondas Topex	WCDA	(Estación de) adquisición de telemando y datos Wallops)
TO	Órbita de transferencia	WCDMP	Programa de datos y supervisión del clima del mundo
TOGA	Océanos tropicales y atmósfera mundial	WCFP	Programa mundial de datos climáticos
TOMS	Espectrómetro de distribución del ozono total	WCP	Programa mundial del clima
TOPC	Grupos de Expertos de observación terrestre para el clima	WCRP	Programa mundial de investigación del clima
TOS	Sistema operacional TIROS	WDC	Centro mundial de datos
TOVS	Sonda vertical operacional TIROS	WEFAX	Facsímil meteorológico
TRF	Transformada rápida de Fourier	WHYCOS	Sistema mundial de observación del ciclo hidrológico
TRMM	Misión de medida de la precipitación tropical	WSFO	Weather Service Forecast Office
TRUCE	Experimento climático urbano tropical	WSFO-Tap	Radioenlace terrestre de comunicaciones del WSFO para datos GOES
TT&C	Seguimiento telemando y telemedida	WWRP	Programa Mundial de Investigación Atmosférica
TV	Vacío térmico o televisión	WWW	Vigilancia Meteorológica Mundial
TVM	Modalidad VAS transparente	WX	Tiempo atmosférico
U		X	
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones	XBT	Batitermógrafo no recuperable
UIT-R	Sector de Radiocomunicaciones de la UIT (anteriormente CCIR)	XRI	Captador de imágenes de rayos X
UNEP	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente	XRS	Sensor de rayos X (solares)
UTC	Tiempo Universal Coordinado	Y	
UV	Ultravioleta	yr	Año
V		Z	
VAG	Vigilancia de la atmósfera global	Z	Abreviatura usual de hora del meridiano de Greenwich u hora universal
VAS	Sonda atmosférica VISSR		
VCP	Programa de cooperación voluntaria		
VDB	Base de datos VISSR		