



Manual

**Utilización del espectro radioeléctrico en meteorología:
Observación y predicción del clima, de los fenómenos
meteorológicos y de los recursos hídricos**

Edición 2008

Oficina de Radiocomunicaciones



**Organización
Meteorológica
Mundial**



**Unión
Internacional de
Telecomunicaciones**



Manual

***Utilización del espectro radioeléctrico en meteorología:
Observación y predicción del clima, de los fenómenos
meteorológicos y de los recursos hídricos***

Edición 2008

Oficina de Radiocomunicaciones



**Organización
Meteorológica
Mundial**



**Unión
Internacional de
Telecomunicaciones**

© OMM-UIT 2009

Reservados todos los derechos. Ni una parte de esta publicación puede reproducirse por ningún procedimiento previa autorización inscrita por parte de la UIT.

PREFACIO

«El cambio climático es el reto moral de nuestra generación ...»

Ban Ki-moon, Secretario General de las Naciones Unidas

XV Congreso Meteorológico Mundial de la OMM 2007, Resolución 4 (Cg-XV):

Considerando:

La importancia primordial que tienen las bandas de radiofrecuencia para las actividades meteorológicas y medioambientales conexas y para la atenuación de los efectos de los desastres;

...

Recalcando

que algunas bandas de frecuencias radioeléctricas son un recurso natural único debido a sus características especiales y radiación natural que permiten la teledetección pasiva por vehículos espaciales de la atmósfera y de la superficie de la Tierra que merecen una protección absoluta;

...

Insta a todos los Miembros

a que hagan todo lo posible para asegurar la disponibilidad y protección de las bandas de frecuencias radioeléctricas necesarias a nivel nacional, regional e internacional;

...

Hace un llamamiento a la Unión Internacional de Telecomunicaciones y a sus Administraciones Miembros para que:

1) garantice la absoluta protección de las bandas de frecuencias radioeléctricas para la teledetección pasiva;

2) que presenten la debida consideración a las necesidades de la OMM en materia de asignación de frecuencias radioeléctricas y disposiciones reglamentarias para las operaciones e investigaciones meteorológicas y medioambientales conexas;

...

Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones de la UIT (Ginebra, 2007), Resolución 673 (CMR-07):

«considerando

a) que las capacidades de observación de la Tierra *in situ* y a distancia dependen de la disponibilidad de frecuencias radioeléctricas para diversos servicios de radiocomunicaciones que dan cabida a una gran variedad de aplicaciones pasivas y activas en plataformas en tierra y en satélite;

...

c) que los datos de observación de la Tierra también son indispensables para la supervisión y predicción de los cambios climáticos, para la predicción y supervisión de las catástrofes y para la mitigación de sus efectos, para mejorar el conocimiento, la elaboración de modelos y la verificación de todos los aspectos del cambio climático, y para la formulación de políticas en esta materia;»

...

«resuelve invitar al UIT-R

a llevar a cabo estudios sobre las posibles formas de aumentar el reconocimiento de la función esencial y la importancia mundial de las aplicaciones de radiocomunicaciones para la observación de la Tierra, así como el conocimiento y la comprensión de las administraciones en materia de utilización de estas aplicaciones y sus beneficios,»

...

Entre 1980 y 2005, más de 7 000 catástrofes naturales en todo el mundo se cobraron las vidas de más de 2 millones de personas y produjeron unas pérdidas económicas estimadas en más de 1,2 billones de USD. El 90% de estas catástrofes naturales, el 72% de las víctimas y el 75% de las pérdidas económicas se debieron a desastres provocados por fenómenos meteorológicos o relacionados con el agua tales como sequías, inundaciones, intensas tormentas y ciclones tropicales. Actualmente las aplicaciones basadas en radiocomunicaciones, tales como la teledetección, proporcionan la fuente principal de información sobre la atmósfera y la superficie de la Tierra. A su vez, esta información se utiliza para la observación, predicción y avisos relativos al clima, a los fenómenos meteorológicos y a los recursos hídricos, la reducción de los riesgos de las catástrofes naturales, el apoyo a las operaciones de socorro y salvamento y la planificación de medidas preventivas para adaptarse a los efectos negativos del cambio climático y disminuir las consecuencias del mismo.

Durante 135 años, ha habido una excelente colaboración y asociación entre la OMM y la UIT. Mientras la OMM centra sus esfuerzos en satisfacer las necesidades de información sobre el medio ambiente y los correspondientes recursos del espectro de radiofrecuencias, la UIT, como organismo internacional controlador del espectro, asigna las radiofrecuencias necesarias para permitir un funcionamiento sin interferencias de las aplicaciones radioeléctricas y los sistemas de radiocomunicaciones (terrenales y espaciales) utilizados para la observación y predicción del clima, las previsiones meteorológicas y los avisos tempranos y detección de catástrofes naturales.

Las sucesivas Conferencias Mundiales de Radiocomunicaciones de la UIT han tenido en cuenta las necesidades de la OMM para garantizar la disponibilidad y protección de las bandas de radiofrecuencias utilizadas por las herramientas de observación tales como radiosondas, radares meteorológicos y de perfil del viento y sondas de microondas e infrarrojas a bordo de vehículos espaciales.

Otras tecnologías de la información y la comunicación (TIC) no consideradas en este Manual, tales como los enlaces de las telecomunicaciones alámbricas y por satélite y las redes de ordenadores también forman parte esencial del sistema de información de la OMM (WIS). Muchas normas técnicas de la UIT (Recomendaciones UIT-R y UIT-T) son utilizadas para el desarrollo y explotación de este sistema.

Esta nueva versión del Manual sobre Utilización del espectro radioeléctrico en meteorología: Observación y previsión del clima, de los fenómenos meteorológicos y de los recursos hídricos, es una prueba más de la excelente cooperación entre la UIT y la OMM. Ha sido elaborado conjuntamente por expertos del Grupo de Trabajo 7C del UIT-R bajo la presidencia del Sr. E. Marelli (ESA) de la Comisión de Estudio 7 de Radiocomunicaciones (Servicios Científicos) y del Grupo de Dirección sobre coordinación de las frecuencias de radiocomunicaciones (SG-RFC) de la Comisión de Sistemas Básicos (CBS) de la OMM, bajo la presidencia del Sr. P. Tristant (Meteo France).

El Manual proporciona una completa información técnica y operacional sobre las actuales aplicaciones y sistemas de observación y sobre utilización de las frecuencias radioeléctricas por los sistemas meteorológicos, incluidos los satélites meteorológicos, las radiosondas, los radares meteorológicos, los radares de perfil del viento y los sistemas de teledetección desde vehículos espaciales. El Manual está dirigido a las comunidades meteorológica (es decir, la que estudia los fenómenos meteorológicos, los recursos hídricos y el clima) y de radiocomunicaciones, incluidas las instituciones gubernamentales, la industria y el público en general.

Sr. Michel JARRAUD
Secretario General
Organización Meteorológica Mundial

Dr. Hamadoun TOURÉ
Secretario General
Unión Internacional de Telecomunicaciones

ÍNDICE

Página

PRÓLOGO	vii
INTRODUCCIÓN	ix
CAPÍTULO 1 – Estructura general de los sistemas meteorológicos	1
CAPÍTULO 2 – Servicio de meteorología por satélite (MetSat)	7
CAPÍTULO 3 – Servicio de ayuda a la meteorología	17
CAPÍTULO 4 – Radares meteorológicos	33
CAPÍTULO 5 – Teledetección pasiva y activa a bordo de vehículos espaciales para actividades meteorológicas	61
CAPÍTULO 6 – Otros sistemas de radiocomunicaciones para actividades meteorológicas	89
ANEXO 1 – Acrónimos y abreviaturas de uso común en meteorología	97

PRÓLOGO

La Comisión de Estudio 7 de Radiocomunicaciones sobre Servicios Científicos se constituyó con ocasión de una reestructuración que tuvo lugar en la Asamblea Plenaria del CCIR en 1990 en Düsseldorf.

La Comisión de Estudio 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 y las actividades sobre el medio ambiente conexas son competencia del Grupo de Trabajo 7C (GT 7C), que lleva a cabo estudios relativos a la implementación y explotación de los sensores meteorológicos activos y pasivos, desde estaciones situadas en tierra o en plataformas espaciales, así como de las ayudas a la meteorología (fundamentalmente radiosondas). Como la meteorología también depende de las radiocomunicaciones para recopilar datos sobre los que basar sus predicciones y para procesar y divulgar la información y las alertas meteorológicas entre la población, esta actividad concierne al GT 7B. Puede observarse por último que los radares meteorológicos y los radares de perfil del viento se estudian en el seno del GT 5B bajo el servicio general de radiolocalización.

La meteorología forma parte fundamental de nuestra vida diaria y tiene mucha relación con las preocupaciones cotidianas. La previsión del tiempo es probablemente el programa más popular de televisión o de la radiodifusión sonora actualmente. No sólo afecta a la manera en que nos vestimos o decidimos qué hacer sino que también tiene muchas implicaciones sobre la seguridad pública. Los transportes públicos dependen en gran medida de la meteorología y poder predecir el tiempo con precisión es esencial para proporcionar un alto nivel de seguridad. En esta época de grandes perturbaciones meteorológicas y climáticas, esta actividad también desempeña un papel fundamental en la predicción, detección y disminución de los efectos negativos de las catástrofes naturales.

La elaboración de Recomendaciones y la preparación de las Conferencias Mundiales de Radiocomunicaciones (CMR) es el tema principal de las actividades de la Comisión de Estudio. Es absolutamente necesario que los expertos de la Comisión de Estudio compartan esta información no sólo con sus colegas cuyo trabajo depende de los datos meteorológicos para mejorar la precisión de las predicciones meteorológicas y del clima, sino también con una audiencia más general a fin de que las personas interesadas puedan entender la importancia de utilizar frecuencias específicas para objetivos meteorológicos y las formas de protegerlas con objeto de poder seguir realizando previsiones meteorológicas con el mayor grado de fiabilidad posible.

Por consiguiente, se decidió elaborar y publicar este Manual, en colaboración con el Grupo de Dirección sobre coordinación de las frecuencias de radiocomunicaciones (SG-RFC) 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. Un objetivo fundamental de este Manual es 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 y de otros científicos interesados en actividades del medio ambiente 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 mantener y mejorar la calidad y precisión de las predicciones meteorológicas y de las predicciones relativas al clima. Es esencial entender, por ejemplo, que si algunas de las bandas de frecuencias actualmente atribuidas para fines meteorológicos tuvieran que ser utilizadas por otros sistemas de radiocomunicaciones incompatibles con los sistemas de radiocomunicaciones meteorológicos, estas bandas podrían quedar inutilizables para los sistemas de predicción meteorológica, del clima y/o de catástrofes, haciendo muy difícil y a veces imposible las predicciones.

Como Presidente de la Comisión de Estudio 7, me complace 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.

El Manual no podría haberse completado sin la contribución del gran número de administraciones que participan en la Comisión de Estudio 7 y del SG-RFC. Sin embargo, cabe señalar la gran importancia de la labor de los Relatores de 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 Grupo de Trabajo 7C del UIT-R, Sr. Edoardo Marelli (ESA) y del SG-RFC de la OMM, Sr. Philippe Tristant (Meteo France), por su dirección de este proyecto. También merece nuestra más sincera gratitud el Sr. A. Vassiliev de la Oficina de Radiocomunicaciones que ha desempeñado una función importante en la publicación del Manual.

Vincent Meens
Presidente de la Comisión de Estudio 7
de Radiocomunicaciones

INTRODUCCIÓN

Un aviso a tiempo de inminentes catástrofes naturales y medioambientales, una predicción precisa del clima y una comprensión detallada del estado general de los recursos hídricos mundiales son temas que revisten enorme importancia para la comunidad mundial. Los servicios nacionales de meteorología del mundo son los responsables de proporcionar esta información, absolutamente necesaria para la protección del medio ambiente, el desarrollo económico (transporte, energía, agricultura, etc.) y la seguridad de la vida y propiedades.

Las frecuencias radioeléctricas representan un recurso escaso y fundamental utilizado por los servicios nacionales de meteorología para medir y recopilar los datos de observación en los que se basan o procesan los análisis y predicciones, incluidos los avisos, y para divulgar esta información a los gobiernos, responsables políticos, organizaciones de gestión en caso de catástrofe, intereses comerciales y al gran público.

De manera más general, también debe destacarse la importancia fundamental de las frecuencias radioeléctricas para todas las actividades de observación de la Tierra, en particular con respecto a los estudios sobre el calentamiento global y el cambio climático.

Los sistemas utilizados para obtener y difundir esta información requieren un acceso fiable a las frecuencias radioeléctricas que van desde unos pocos kHz a varios cientos de GHz y hacen uso de una gran variedad de tecnologías radioeléctricas, tales como radiocomunicaciones (por ejemplo, para radiosondas o satélites), radares (de precipitación y de perfil del viento) y detección basada en las radiocomunicaciones (por ejemplo, teledetección pasiva por satélite o detección del rayo).

Por consiguiente, las frecuencias radioeléctricas representan un recurso escaso y fundamental para la comunidad meteorológica.

Debe entenderse que estas aplicaciones de las radiofrecuencias están interrelacionadas y ayudan a componer un sistema meteorológico mundial y que la falta de alguno de estos componentes radioeléctricos del sistema, relativos a la observación o a la difusión de datos, puede poner en peligro todo el proceso meteorológico.

También es necesario destacar que los sistemas que utilizan estas frecuencias desempeñan un papel fundamental a la hora de detectar, avisar y prever las catástrofes relativas a fenómenos meteorológicos, acciones del agua y el clima. Como dichas catástrofes representan más del 90% de las catástrofes naturales, estos sistemas constituyen componentes esenciales de los sistemas de emergencia, de alerta temprana en caso de catástrofes y de reducción de las consecuencias de las mismas.

El desarrollo de nuevas aplicaciones radioeléctricas dirigidas al mercado de masas y de valor añadido está suponiendo más presión sobre las bandas de frecuencias utilizadas con fines de meteorología. Ello presenta el riesgo potencial de limitar las aplicaciones meteorológicas en el futuro. Un riesgo especialmente importante es la teledetección pasiva por satélite que implica la medición de radiaciones naturales emitidas con muy bajo nivel en un cierto número de bandas de radiofrecuencias. Estas bandas son sensibles a más de una variable geofísica y, por consiguiente, deben utilizarse conjuntamente para obtener un cierto número de distintas cantidades. Las frecuencias radioeléctricas necesarias para ello vienen determinadas por la física fundamental y son inalterables. La continuidad de las observaciones que utilizan estas bandas también es esencial para supervisar y evaluar el cambio climático.

Los usuarios del espectro para fines de meteorología deben permanecer vigilantes y plantear cada vez más temas relativos a la compartición del espectro con otros servicios de radiocomunicaciones. En reconocimiento a la importancia fundamental que tienen los servicios específicos de radiocomunicaciones para las actividades meteorológicas y relativas al medio ambiente necesarias para la seguridad de la vida y la propiedad, la protección del medio ambiente, los estudios sobre el cambio climático y la investigación científica, mediante su Resolución 4 (Cg-XV) la Organización Meteorológica Mundial (OMM) solicita a la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) y a sus Administraciones Miembros:

- que garanticen la disponibilidad y absoluta protección de las bandas de frecuencias radioeléctricas que, debido a sus características físicas especiales, son un recurso natural único para la teledetección pasiva por vehículos espaciales de la atmósfera y la superficie de la Tierra;
- que presten la debida consideración a las necesidades de la OMM en materia de asignaciones de frecuencias radioeléctricas y disposiciones reglamentarias para las operaciones e investigaciones meteorológicas y medioambientales conexas.

A este respecto, las últimas Conferencias Mundiales de Radiocomunicaciones (CMR-03 y CMR-07) realizaron varias atribuciones de frecuencia pertinentes, en particular relativas a la protección de la teledetección pasiva por satélite, del servicio de exploración de la Tierra por satélite (SETS) (pasivo). Probablemente, futuras CMR, como la próxima que se celebrará en 2011, ampliarán las atribuciones de frecuencia a varios servicios científicos, lo que mejorará y/o salvaguardará a los servicios asociados a los estudios de meteorología.

Recientes temas de compartición relativos a las bandas de frecuencias utilizadas por los sistemas de meteorología han dado lugar a un gran número de estudios en la UIT y especialmente en el Sector de Radiocomunicaciones (UIT-R) a fin de determinar la manera de aprovechar el espectro para nuevas aplicaciones de radiocomunicaciones. Estos estudios se han centrado principalmente en los requisitos del espectro y en cuestiones de compatibilidad técnica, como por ejemplo determinar en qué condiciones podrían compartir espectro las nuevas tecnologías con los sistemas de meteorología existentes y futuros. En algunos casos, estos estudios han puesto de manifiesto que la compartición cocanal no era posible y que la atribución de más espectro a las nuevas tecnologías supondría el desplazamiento de usuarios existentes, lo que inevitablemente 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 transferencia a una nueva banda? En ese caso cabe recordar que no todos los sistemas existentes son explotados por países ricos o entidades con fines de lucro y que, en particular, las bandas de frecuencias utilizadas por la teledetección pasiva vienen determinadas por leyes físicas y no pueden obtenerse en otras partes del espectro.
- ¿Podría, caso de ser necesario, obtenerse ayuda financiera de las nuevas tecnologías potencialmente rentables? ¿Cómo se relacionarían estos posibles beneficios con las repercusiones económicas y sociales de la meteorología?
- Caso de ser necesario su desalojo, ¿cuál es el plazo razonable que debe otorgarse a los actuales ocupantes de una banda para su transferencia a otras?

Con objeto de ofrecer un compendio de estos estudios, el Grupo de Trabajo 7C de Radiocomunicaciones «Sistemas de detección a distancia» de la Comisión de Estudio 7 de Radiocomunicaciones y el Grupo de Dirección de la OMM sobre coordinación de las frecuencias de radiocomunicaciones (SG-RFC) han elaborado el presente Manual destinado a servir de guía a los usuarios 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 comunidad de las radiocomunicaciones, incluidos los reguladores y la industria de las telecomunicaciones inalámbricas.

El Manual presenta los sistemas meteorológicos y realiza una introducción y exposición de las características técnicas y operacionales de cada uno de estos 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) Sistemas del servicio de meteorología por satélite.
- 3) Sistemas del servicio de ayudas a la meteorología, fundamentalmente radiosondas.
- 4) Radares meteorológicos en tierra, incluidos los radares meteorológicos y los radares del perfil del viento.
- 5) Sistemas pasivos y activos de teledetección a bordo de vehículos espaciales para actividades meteorológicas.
- 6) Otros sistemas de radiocomunicaciones para actividades meteorológicas.

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.

CAPÍTULO 1

ESTRUCTURA GENERAL DE LOS SISTEMAS METEOROLÓGICOS

Página

1.1	Sistemas meteorológicos del Programa de Vigilancia Meteorológica 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	Observaciones desde satélites	4
1.2	Sistemas de observación de otros 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
1.3	Futuros planes para los sistemas de observación de la OMM: el Sistema Mundial de Observación Integrado de la OMM (SMOIO)	6

1.1 Sistemas meteorológicos del Programa de Vigilancia Meteorológica Mundial

Para analizar, prevenir y predecir el tiempo, la moderna meteorología depende del intercambio casi instantáneo de informaciones meteorológicas a lo largo de todo el mundo. El sistema de Vigilancia Meteorológica Mundial (VMM), que es el núcleo de los programas de la OMM y combina los sistemas de observación, las instalaciones de telecomunicaciones y los centros de procesamiento de datos y de predicción, es explotado por los 187 Estados Miembros y pone a disposición la información meteorológica y geofísica conexa necesaria para proporcionar servicios eficaces en todos los países.

Este sistema de Vigilancia Meteorológica Mundial (VMM) está coordinado y supervisado por la OMM con objeto de garantizar que todos los países disponen de toda la información que necesitan para proporcionar cotidianamente los servicios de meteorología (análisis, avisos y predicciones), así como para la planificación a largo plazo y la investigación. Una parte cada vez más importante del Programa VMM ofrece soporte a programas internacionales relativos al clima mundial, especialmente el cambio climático así como otros temas medioambientales, y a un desarrollo sostenible.

El sistema de Vigilancia Meteorológica Mundial (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 parte del mundo y del espacio exterior.
- El **Sistema Mundial de Telecomunicaciones (SMT)** que proporciona el intercambio en tiempo real de datos procedentes de las observaciones meteorológicas, productos procesados e información afin, entre los servicios meteorológicos e hidrológicos nacionales.
- El **Sistema Mundial de Procesamiento de Datos y Previsiones** que proporciona productos meteorológicos procesados (análisis, alertas y predicciones) generados por una red de centros meteorológicos mundiales y regionales especializados.

FIGURA 1-1
Sistemas del programa de Vigilancia Meteorológica Mundial



1.1.1 Sistema Mundial de Observación

El Sistema Mundial de Observación (SMO) es la fuente primaria de información técnica de la atmósfera de todo el mundo y se trata de un sistema compuesto integrado por métodos, técnicas e instalaciones complejas para la medición de parámetros meteorológicos y medioambientales. El SMO garantiza la disponibilidad de

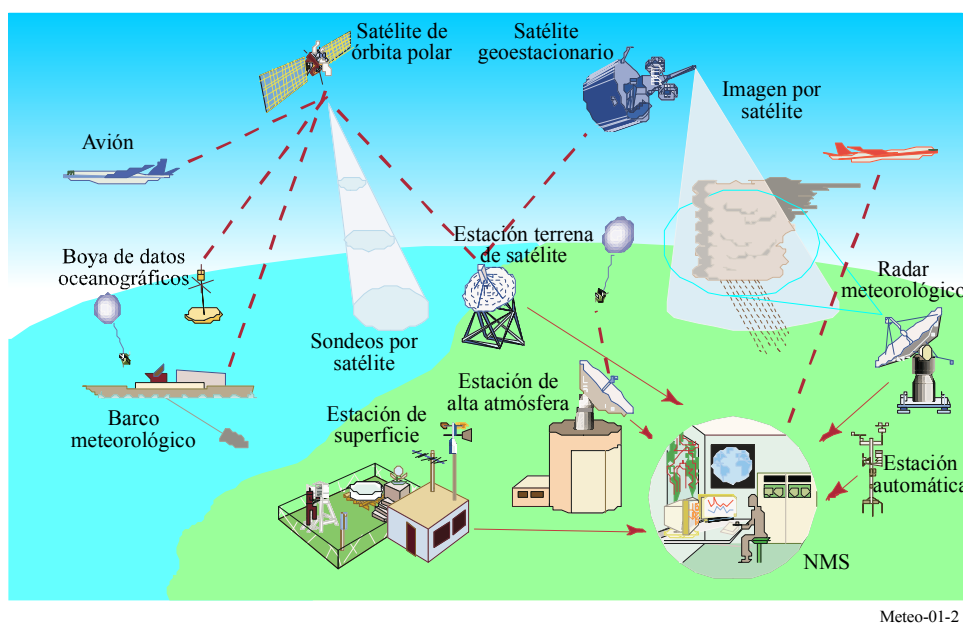
información crítica para todos los países a fin de que puedan generar diariamente análisis, previsiones y alertas meteorológicas. Como muestra la Fig. 1-2, el SMO comprende estaciones de observación situadas en tierra en el mar, en aeronaves y en satélites meteorológicos.

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 meteorológicos graves tales como tormentas locales, huracanes y ciclones extratropicales o tropicales. El SMO proporciona a la agrometeorología, a la meteorología aeronáutica y a la climatología, incluido el estudio del clima y el cambio global, datos procedentes de las observaciones. Los datos del SMO se utilizan también en apoyo de los programas de protección del medio ambiente en todo el mundo.

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 enormemente de las previsiones meteorológicas realizadas con una anticipación de días, semanas o incluso estaciones.

En la dirección www.wmo.int/pages/prog/www/OSY/GOS.html aparece información detallada sobre el SMO.

FIGURA 1-2
El Sistema Mundial de Observación (SMO) de la OMM



Meteo-01-2

1.1.1.1 Observación de la superficie

El núcleo del sistema basado en la superficie continúa siendo aproximadamente 10 000 estaciones en tierra que realizan observaciones en la superficie de la Tierra o cerca de la misma. Las observaciones se refieren a parámetros meteorológicos tales como la presión atmosférica, la velocidad y dirección del viento, la temperatura del aire y la humedad relativa cada hora, cada dos horas o cada tres horas. Los datos procedentes de estas estaciones se intercambian a nivel mundial en tiempo real. Un subconjunto de los datos conservados en estas estaciones de superficie se utiliza asimismo en la red de superficie del Sistema Mundial de Observación del Clima (SMOC).

1.1.1.2 Observación de la atmósfera superior

Hay una red de 900 observatorios de atmósfera superior, aproximadamente, repartidos por todo el mundo, lo que representa unos 800 000 lanzamientos anuales, 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. Un subconjunto de los observatorios de la atmósfera superior, equipados especialmente para supervisar el clima, constituye la red de atmósfera superior del SMOC.

1.1.1.3 Observaciones mediante radar

Los radares meteorológicos 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 meteorológicos 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. Los radares meteorológicos son especialmente útiles para efectuar estimaciones pluviométricas y, cuando tienen capacidad Doppler, para realizar mediciones del viento. 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 7 000 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 operacional de boyas a la deriva afecta a unas 900 unidades que entregan diariamente 12 000 informes de la temperatura del mar y de la presión del aire en la superficie.

Además, en los Océanos Pacífico e Índico se ha establecido el Sistema de Avisos de Maremotos, propiedad de los Estados Miembros y explotado por los mismos, bajo control de la Comisión Intergubernamental (COI) de la UNESCO en cooperación con la OMM, y está prevista su implantación en otras zonas marítimas. Este sistema incluye una red de sensores de superficie en tiempo real y de nivel de la profundidad del mar para la detección, alerta temprana y supervisión de maremotos.

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 espectacularmente en los últimos años llegando a alcanzar 300 000 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 Observaciones desde satélites

El Sistema Mundial de Observación por Satélite del medio ambiente y meteorológico está integrado por constelaciones de satélites de observación operacionales geoestacionarios y en órbita terrestre baja (órbita casi polar) como muestra la Fig. 1-3. En las siguientes direcciones web figura una lista de los actuales satélites meteorológicos operacionales y sus parámetros:

Satélites geoestacionarios: www.wmo.int/pages/prog/sat/GOSgeo.html

Satélites en órbita terrestre baja: www.wmo.int/pages/prog/sat/GOSleo.html

Además, un cierto número de satélites de investigación y desarrollo (por ejemplo, Aqua, CBERS, CloudSat, ERS, SPOT, TRMM, Landsat, QuikSCAT, etc.) incluyen igualmente una carga útil específica para meteorología o climatología que también contribuye al SMO. En la siguiente dirección web aparece una lista de los actuales satélites de investigación y desarrollo y sus parámetros:

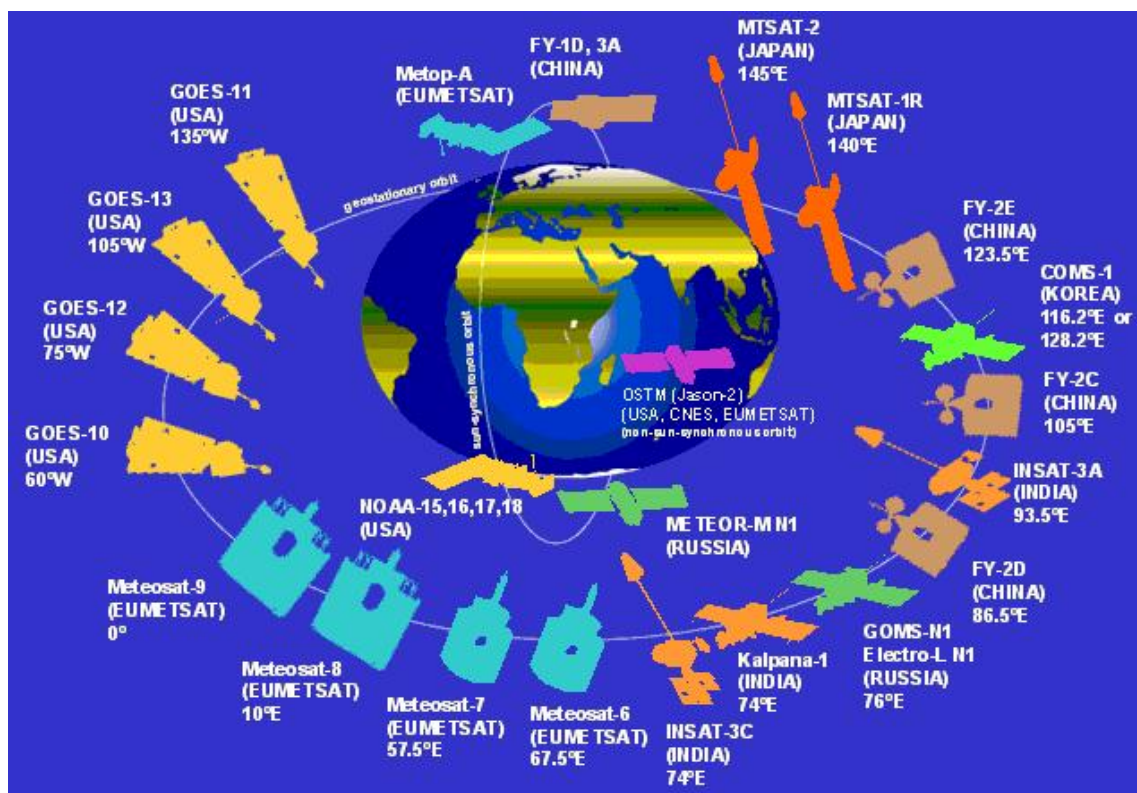
www.wmo.int/pages/prog/sat/GOSresearch.html

Los satélites en órbita polar y geoestacionarios están normalmente dotados de captadores de imágenes visibles e infrarrojas y sondas, que les permiten calcular muchos parámetros meteorológicos. Algunos de los satélites en órbita polar van equipados con instrumentos de sondeo por microondas capaces de proporcionar perfiles verticales de la temperatura y la humedad en todo el mundo. 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 constantemente y la gran cantidad de datos adicionales proporcionados por los satélites ha contribuido enormemente a mejorar la observación y la predicción del clima y de los fenómenos meteorológicos así como la difusión de alertas.

Los avances de la modelización numérica, en particular, han permitido desarrollar métodos cada vez más complejos para calcular la información relativa a la temperatura y la humedad directamente a partir de las radiancias de los satélites. Los espectaculares progresos logrados en los últimos años en el análisis y previsión del clima y los fenómenos meteorológicos, incluidas las alertas de fenómenos meteorológicos peligrosos (lluvias torrenciales, tormentas, ciclones) que afectan a todas las poblaciones y economías, se deben en gran medida a las observaciones realizadas a bordo de vehículos espaciales y su asimilación en modelos numéricos.

Los satélites de investigación y desarrollo incluyen la constelación más moderna en la componente espacial del SMO. Las misiones de I+D proporcionan datos válidos para uso operacional así como para muchos programas soportados por la OMM. Los instrumentos utilizados en estas misiones de I+D ofrecen datos que normalmente no se observan en los satélites meteorológicos operacionales o aportan mejoras a los actuales sistemas operacionales.

FIGURA 1-3
Constelación de satélites meteorológicos del Sistema Mundial
de Observación de la OMM (situación en 2008)



Meteo-01-3

1.2 Sistemas de observación de otros 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 más de 20 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 de observación VAG proporcionan observaciones de la radiación solar, detectan rayos y miden la escala de las mareas. El VAG constituye la componente química atmosférica al Sistema Mundial de Observación del Clima.

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 especialmente el cambio 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 (WHYCOS, *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.

1.3 Futuros planes para los sistemas de observación de la OMM: el Sistema Mundial de Observación Integrado de la OMM (SMOIO)

Los Miembros de la OMM, en su Congreso de 2007, decidieron trabajar hacia la integración mejorada de los sistemas de observación de la OMM y de los sistemas de observación soportadas por la OMM tales como el Sistema Mundial de Observación de los Océanos (SMOO), el Sistema Mundial de Observación de la Tierra (SMOT) y el SMOC. El concepto del Sistema Mundial de Observación Integrado de la OMM (SMOIO) consiste en centrarse en las funciones operacionales y de gestión de todos los sistemas de observación de la OMM así como un mecanismo para establecer la interacción en los sistemas de observación copatrocinados por la OMM. Con la integración se obtendrá más eficacia y se ahorrarán costes. Los principales objetivos del SMOIO son los siguientes:

- Aumentar la interoperabilidad entre sistemas prestando especial atención a los componentes espaciales e *in situ* de los sistemas.
- Abordar las necesidades de los dominios atmosférico, hidrológico, oceanográfico, crioesférico y terrenal en el ámbito operacional de un sistema integrado completo.
- Garantizar unos marcos de control más amplios y mejorar la gestión y gobernanza de la OMM.

CAPÍTULO 2

SERVICIO DE METEOROLOGÍA POR SATÉLITE (METSAT)

Página

2.1	Definición del servicio de meteorología por satélite (MetSat) y sus atribuciones de frecuencia	8
2.1.1	Concepto general de los sistemas de satélites MetSat	8
2.2	Sistemas MetSat con satélites geoestacionarios (OSG)	10
2.2.1	Transmisiones de datos en bruto de los sensores de imágenes MetSat OSG	10
2.2.2	Difusión de los datos del MetSat OSG	11
2.2.2.1	Difusión de imágenes de alta resolución (IAR)	11
2.2.2.2	Radiómetro ampliado de barrido rotatorio en el espectro visible y el infrarrojo (S-VISSR)	11
2.2.2.3	Variables de los satélites geoestacionarios operacionales del medio ambiente (GOES) (GVAR)	11
2.2.2.4	Facsímil meteorológico (WEFAX)	12
2.2.2.5	Transmisión de información a baja velocidad (LRIT)	12
2.2.2.6	Transmisión de información a alta velocidad (HRIT)	12
2.2.3	Plataformas de recogida de datos (PRD) del MetSat OSG	13
2.3	Sistemas MetSat con satélites no OSG	13
2.3.1	Transmisión de datos en bruto tomados por un instrumento del MetSat no OSG	14
2.3.2	Difusión de los datos del MetSat no OSG	14
2.3.2.1	Transmisión automática de imágenes (APT)	14
2.3.2.2	Transmisión de imágenes de baja resolución (LRPT)	14
2.3.2.3	Transmisión de imágenes de alta resolución (HRPT)	14
2.3.2.4	Datos a baja velocidad (LRD)	15
2.3.3	Sistema de recogida de datos (SRD) del MetSat no OSG	15
2.4	Mecanismos alternativos de difusión de datos	15

2.1 Definición del servicio de meteorología por satélite (MetSat) y sus 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». Permite el empleo de enlaces de radiocomunicaciones entre las estaciones terrenas y una o más estaciones espaciales a fin de suministrar:

- Información sobre las características de la Tierra y sus fenómenos naturales procedente 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 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;
- difusión de datos alternativa a los usuarios.

El Cuadro 2-1 señala las bandas de radiofrecuencia (RF) atribuidas a la transmisión de datos de RF en el marco del MetSat.

CUADRO 2-1

Bandas de frecuencias utilizadas por los satélites de meteorología para las transmisiones de datos

Banda de frecuencias (MHz)	Atribuciones al MetSat
137-138	Primaria en el sentido espacio-Tierra
400,15-401	Primaria en el sentido espacio-Tierra
401-403	Primaria en el sentido Tierra-espacio
460-470	Secundaria en el sentido espacio-Tierra
1 670-1 710	Primaria en el sentido espacio-Tierra
7 450-7 550	Primaria en el sentido espacio-Tierra, únicamente satélites geoestacionarios
7 750-7 850	Primaria en el sentido espacio-Tierra, únicamente satélites no geoestacionarios
8 025-8 400	Primaria en el sentido espacio-Tierra para satélites de exploración de la Tierra (Nota 1)
8 175-8 215	Primaria en el sentido Tierra-espacio
18 000-18 300	Primaria en el sentido espacio-Tierra en la Región 2, únicamente satélites geoestacionarios
18 100-18 400	Primaria en el sentido espacio-Tierra en las Regiones 1 y 3, únicamente satélites geoestacionarios
25 500-27 000	Primaria en el sentido espacio-Tierra para satélites de exploración de la Tierra (Nota 1)

NOTA 1 – Como el MetSat es una subcategoría del servicio de exploración de la Tierra por satélite, las atribuciones a este servicio (por ejemplo, la banda 25 500-27 000 MHz) también pueden utilizarse para el funcionamiento de aplicaciones del MetSat.

2.1.1 Concepto general de los sistemas de satélites MetSat

El sistema MetSat suele recoger una variedad de datos con sensores de imágenes visibles e infrarrojos así como con instrumentos para la detección pasiva y activa utilizando también frecuencias de microondas atribuidas a tal fin (véase el Capítulo 5).

Los datos en bruto recogidos por los instrumentos a bordo de un satélite meteorológico se transmiten a una estación en tierra primaria de la empresa de explotación, que los procesa y los distribuye a diversos centros meteorológicos nacionales, archivos oficiales y usuarios comerciales. Los datos en bruto incluyen, por ejemplo, imágenes de la Tierra tomadas a varias longitudes de ondas de manera que suministran una variedad de datos de medición. Los datos procesados se suelen devolver al satélite meteorológico para su retransmisión por radiodifusión directa a las estaciones de usuario mediante señales digitales de baja y/o alta velocidad de transmisión o se distribuyen directamente a usuarios utilizando medios alternativos de difusión de datos.

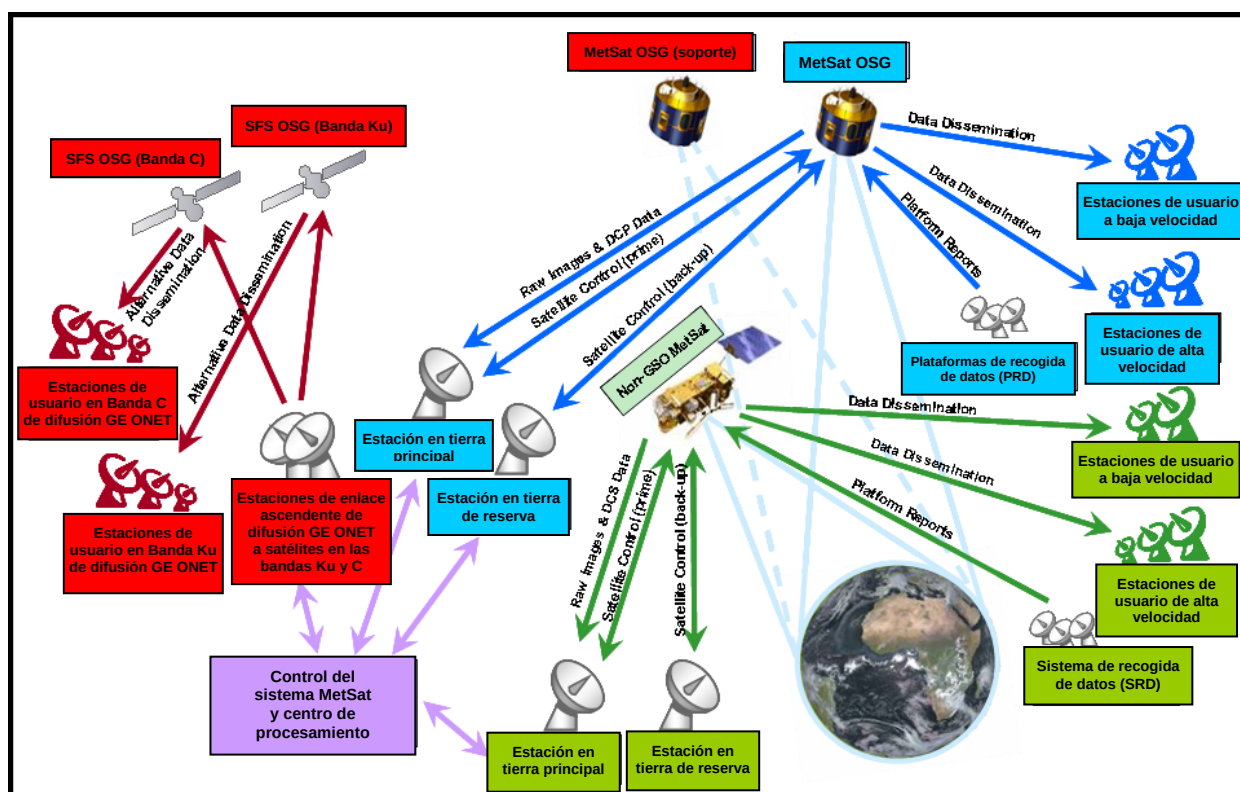
Los satélites meteorológicos también incorporan sistemas de recogida de datos (SRD), a saber plataformas de recogida de datos (PRD) en satélites geoestacionarios (OSG) y sistemas tales como Argos en satélites no geoestacionarios (no OSG).

Las PRD, normalmente situadas en el suelo, aeronaves, barcos y boyas flotantes, transmiten a satélites meteorológicos geoestacionarios, y en la banda 401-403 MHz, datos recogidos sobre parámetros tales como temperatura de la superficie, velocidad del viento, intensidad de lluvia, altura de la corriente, gases en la atmósfera y, en el caso de las boyas flotantes, contaminantes del mar. También pueden transmitir su posición actual, permitiendo la determinación del movimiento. Además del funcionamiento de los canales PRD regionales, los operadores MetSat también contribuyen al sistema internacional de recogida de datos (SIRD) mediante la explotación de canales internacionales. Como una futura aplicación adicional, también puede atribuirse un número especializado de canales SIRD para su utilización como sistema de supervisión en caso de emergencia/catástrofe.

Las plataformas recogida de datos tales como el sistemas Argos, transmiten a satélites MetSat no OSG en la banda 401,580-401,690 MHz. Cuando están instalados en boyas y flotadores, estas plataformas miden la presión atmosférica, la velocidad y dirección del viento, las corrientes de la superficie marina y otros parámetros del mar. Entre otras aplicaciones, los sistemas PRD en satélites no OSG también se utilizan para realizar un seguimiento del desplazamiento de los animales así como para supervisar la flota pesquera.

La Fig. 2-1 muestra la arquitectura general de un sistema MetSat.

FIGURA 2-1
Arquitectura general de un sistema MetSat



2.2 Sistemas MetSat con satélites geoestacionarios (OSG)

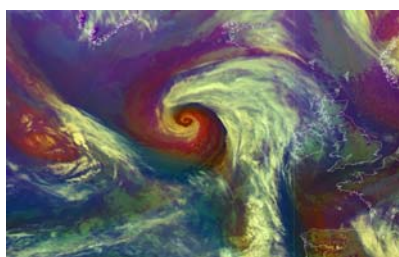
En el marco del Sistema Mundial de Observación que pertenece al Sistema de Vigilancia Meteorológica Mundial, actualmente funciona un cierto número de satélites meteorológicos para garantizar observaciones con cobertura completa de la Tierra desde la órbita de los satélites meteorológicos (véase la Fig. 1-3). Se asegura la cobertura mundial continua y a largo plazo de observaciones desde la órbita de los satélites geoestacionarios programando futuros lanzamientos de satélites meteorológicos, sustituyendo los actuales o complementando los sistemas de satélites existentes.

2.2.1 Transmisiones de datos en bruto de los sensores de imágenes MetSat OSG

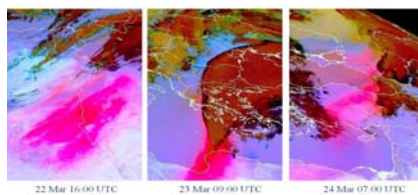
Los datos obtenidos por los sensores de imágenes visibles, casi infrarrojas e infrarrojas y otros sensores a bordo de satélites meteorológicos OSG se transmiten a las principales estaciones de operación (denominadas a menudo estaciones de telemando y adquisición de datos o estaciones TAD) en la banda 1 670-1 690 MHz.

La Fig. 2-2 proporciona ejemplo de imágenes de datos procesados procedentes de un instrumento sensor de imágenes a bordo de un satélite meteorológico OSG.

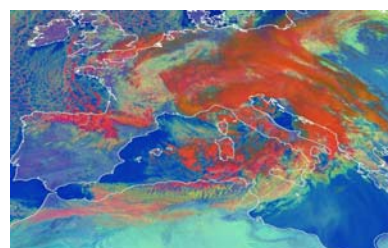
FIGURA 2-2
Imagen de datos procesados procedentes de un satélite meteorológico OSG



Tormenta ciclónica sobre el Atlántico Norte (Meteosat-9 Airmass RGB, 19/05/08 12:00 UTC)



Inicio de una tormenta de polvo de gran intensidad procedente del Norte de África y que se dirige hacia Grecia, Turquía, Rusia y Kazajstán (Meteosat-9, Dust RGB, 22/03/08 – 24/03/08)



Meteo-02-2

Viento mistral intenso y ciclón sobre el Golfo de Génova con fuerte precipitación en el sur de los Alpes (Meteosat-8 RGB: VIS0.8, IR3.9r, IR10.8, 20/03/07 09:00 UTC)

Existen sólo unas pocas estaciones de este tipo en el mundo, normalmente una o dos por cada sistema de satélites. Están equipadas con antenas de aproximadamente 10 m a 18 m de diámetro y suelen funcionar con un mínimo ángulo de elevación de 3°. El factor de calidad (G/T) de estas estaciones es del orden de 23 dB/K. Las anchuras de banda de transmisión típicas de la actual generación de las redes MetSat OSG se encuentran entre 2 MHz y 20 MHz dependiendo de las características del instrumento y de los métodos de modulación empleados.

En este contexto cabe señalar que en los sistemas MetSat cuyas asignaciones se han notificado después del 1 enero de 2004, la banda 1 670-1 675 MHz no estará protegida contra la interferencia perjudicial procedente de aplicaciones del servicio móvil por satélite (SMS) y, por consiguiente, ya no es utilizable por los nuevos sistemas MetSat.

Para la próxima generación de sistemas MetSat OSG (que estarán operativos en torno a 2015) las velocidades de transmisión de datos y los requisitos de anchura de banda asociados para el enlace descendente de los datos del instrumento aumentarán significativamente (del orden de 100 a 300 Mbit/s). En consecuencia, será necesario utilizar frecuencias más elevadas tales como las de las bandas 7 450-7 550 MHz; 18,0-18,3 GHz (Región 2), 18,1-18,4 GHz (Regiones 1 y 3) y 25,5-27 GHz.

2.2.2 Difusión de los datos del MetSat OSG

Los siguientes puntos 2.2.2.1 a 2.2.2.6 describen las funciones de difusión directa de los sistemas MetSat OSG que funcionan en el marco del Sistema Mundial de Observación perteneciente al Sistema de Vigilancia Meteorológica Mundial.

2.2.2.1 Difusión de imágenes de alta resolución (IAR)

El servicio de difusión de IAR funciona con la primera generación de vehículos espaciales Meteosat (Meteosat-6 y Meteosat-7). La señal digital se transmite a una velocidad de datos de 166,7 kbit/s con MIC/PM/SPL. El formato IAR es específico a Meteosat y la zona de cobertura es idéntica a la zona de telecomunicaciones Meteosat (es decir, OSG ubicado a 57,5° Este y 67,5° Este). Las transmisiones de datos contienen imágenes de alta resolución, incluida la información de calibración y navegación. Los principales usuarios son los centros meteorológicos nacionales, las universidades, los meteorólogos privados y las emisoras de televisión.

La difusión de datos IAR a los usuarios se realiza 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; los diámetros de antena típicos son de 3 m y el mínimo ángulo de elevación de la antena es de 3°.

2.2.2.2 Radiómetro ampliado de barrido rotatorio en el espectro visible y el infrarrojo (S-VISSR)

El servicio de radiometría ampliada de barrido rotatorio en el espectro visible y en el infrarrojo (S-VISSR) funciona con los satélites FY-2C, -2D y -2E del sistema MetSat OSG de China Feng-Yun-2.

Los datos observados mediante sensores VISSR se transmiten a las estaciones principales de operaciones en tierra de este sistema MetSat. En tierra, los datos se preprocesan prácticamente en tiempo real y se retransmiten por el 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 estas transmisiones está en torno a 6 MHz. El factor de calidad de las estaciones receptoras es de 10,5 dB/K y el mínimo ángulo de elevación de las antenas es de 5°.

2.2.2.3 Variables de los satélites geoestacionarios operacionales del medio ambiente (GOES) (GVAR)

Los satélites geoestacionarios operacionales del medio ambiente (GOES, *geostationary operational environmental satellites*), propiedad de Estados Unidos de América, transmiten datos de medición 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, España 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.

2.2.2.4 Facsímil meteorológico (WEFAX)

El servicio de facsímil meteorológico (WEFAX), aún utilizado hoy en día, está siendo sustituido por el servicio de transmisión digital de información a baja velocidad (LRIT) en los sistemas de satélites meteorológicos de segunda generación. El servicio WEFAX consiste en transmisiones analógicas dirigidas a estaciones meteorológicas de usuario de bajo coste situadas en la zona de recepción de los satélites meteorológicos. Los parámetros del servicio WEFAX se definieron y fueron acordados en el Grupo de Coordinación sobre Satélites Meteorológicos (CGMS, *Co-ordination Group for Meteorological Satellites*), que es un foro para el intercambio de información técnica sobre sistemas de satélites meteorológicos geoestacionarios y en órbita polar. Los servicios WEFAX funcionan en los satélites Meteosat-6 y Meteosat-7 así como en el FY-2C, -2D y 2E.

La Organización Meteorológica Mundial (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) o 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° y utilizan antenas de 1,2 m de diámetro con un factor de calidad (G/T) 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.

2.2.2.5 Transmisión de información a baja velocidad (LRIT)

LRIT es un nuevo servicio que se inició en 2003 sobre los satélites meteorológicos geoestacionarios operacionales del medio ambiente (GOES) para la transmisión con destino a estaciones de usuario de bajo coste. Se pretende que este servicio sustituya al servicio WEFAX en otros satélites del MetSat geoestacionarios, dando servicio a una comunidad de usuarios semejante. Se prevé que habrá miles de estaciones de usuario denominadas estaciones de usuario de baja velocidad (LRUS, *low rate user stations*).

Las LRIT se efectúan en la subbanda de 1 690-1 698 MHz con frecuencias centrales en torno a 1 691 MHz. La anchura de banda es de hasta 600 kHz. Las antenas de las estaciones de usuario tienen diámetros comprendidos entre 1,0 m y 1,8 m y funcionan con un mínimo ángulo de elevación de 3°. El factor de calidad de las LRUS es 5-6 dB/K dependiendo de la ubicación de la estación de usuario.

2.2.2.6 Transmisión de información a alta velocidad (HRIT)

El servicio HRIT comenzó en enero de 2004 con el funcionamiento del primer satélite (Meteosat-8) perteneciente a la serie de satélites de segunda generación Meteosat. Con el inicio del funcionamiento el satélite japonés MTSAT-1R en junio de 2005, los servicios HRI y S-VISSR fueron sustituidos por el servicio HRIT de MTSAT.

El servicio HRIT funciona en las subbandas 1 684-1 690 MHz o 1 690-1 698 MHz. El tamaño de antena para las estaciones de usuario de alta velocidad (HRUS) y las MDUS es de 4 m y el mínimo ángulo de elevación es de 3°. El factor de calidad para las estaciones de usuario es 12-14 dB/K dependiendo de la ubicación de la estación de usuario.

2.2.3 Plataformas de recogida de datos (PRD) del MetSat OSG

Los sistemas de recogida de datos funcionan en los satélites meteorológicos para la recopilación de datos meteorológicos y de otros datos medioambientales desde PRD remotas. Las transmisiones desde cada PRD dirigidas a un satélite meteorológico se realizan en la banda de frecuencias 401-403 MHz. Las PRD funcionan en modo temporal secuencial. Los intervalos temporales de transmisión son normalmente de 1 min. La velocidad de transmisión es de 100 bit/s. Las PRD de transmisión de datos más elevadas (300 bit/s y 1 200 bit/s) empezaron a funcionar en 2003 y cabe esperar que su número aumente rápidamente en un próximo futuro. Las anchuras de banda de canal de estas PRD de velocidades de transmisión de datos elevadas son 0,75 kHz o 2,2 kHz para las velocidades de 300 y 1 200 bit/s, respectivamente.

Hay varios tipos de transmisores PRD funcionando normalmente con potencias de salida de 5 W, 10 W y 20 W con una antena directiva, o una potencia de salida de 40 W con una antena omnidireccional. La potencia isotropa radiada equivalente (p.i.r.e.) resultante en el enlace ascendente se encuentra entre 40 y 52 dBm. Los sistemas de recogida de datos funcionan actualmente en varios sistemas de satélites meteorológicos geoestacionarios.

Las PRD que informan a los MetSats geoestacionarios utilizan frecuencias en la gama 401,1-402,4 MHz, destinándose la banda 402-402,1 MHz a la actividad internacional (33 canales de 3 kHz de anchura de banda). Utilizando bandas estrechas (de tan sólo 0,75 kHz) y acortando los periodos de comunicación de informes a unos 10 s, es posible recibir datos de un gran número de estas plataformas. Por ejemplo, en el caso de los GOES, en 2007 hubo en torno a unas 27 000 PRD de GOES y hasta 400 000 mensajes por día y cabe esperar que estas cifras aumenten significativamente. Tal incremento exigirá probablemente ampliar la utilización del espectro a frecuencias superiores, desplazándose estas plataformas informantes hacia 403 MHz.

2.3 Sistemas MetSat con satélites no OSG

Además de los numerosos satélites MetSat OSG, los sistemas MetSat no OSG complementan la contribución de los satélites al Sistema Mundial de Observación mediante los datos de medición de cobertura mundial procedente de una gran variedad de sensores pasivos y activos que realizan observaciones en las regiones espectrales visible, infrarroja y de microondas.

La cobertura continua y a largo plazo de las observaciones desde satélites no geoestacionarios se garantizará mediante el funcionamiento de los actuales y futuros satélites explotados por un cierto número de organizaciones meteorológicas nacionales y regionales de todo el mundo.

La Fig. 2-3 proporciona ejemplos de un radiómetro avanzado de resolución muy elevada a bordo de sistemas MetSat no OSG operacionales que toman imágenes de nubes, océanos y superficies terrestres en los espectros visible, casi infrarrojo e infrarrojo. En el Capítulo 5 aparecen ejemplos de sensores pasivos y activos que realizan observaciones en la región espectral de microondas y funcionan en los sistemas MetSat no OSG.

FIGURA 2-3
Muestras de imágenes tomadas por un radiómetro avanzado de resolución muy elevada



Meteo-02-3

2.3.1 Transmisión de datos en bruto tomados por un instrumento del MetSat no OSG

Los datos en bruto tomados por algunos satélites meteorológicos en órbita polar se transmiten en la banda de frecuencias 7 750-7 850 MHz a las estaciones principales situadas en latitudes elevadas. Las transmisiones tienen lugar en ráfagas en el momento en que cada satélite sobrevuela la estación principal, desconectándose los transmisores el tiempo restante. Otros sistemas MetSat no OSG utilizan o utilizarán las bandas de frecuencias 8 025-8 400 MHz (por ejemplo, el FY-3 el METEOR y el NPP) o 25,5-27 GHz (por ejemplo el NPOESS) para el enlace descendente de los datos en bruto medidos con el instrumento.

2.3.2 Difusión de los datos del MetSat no OSG

Los siguientes puntos 2.3.2.1 a 2.3.2.4 describen las funciones de difusión directa de los sistemas MetSat no OSG explotados en el marco del Sistema Mundial de Observación perteneciente al Sistema de Vigilancia Meteorológica Mundial.

2.3.2.1 Transmisión automática de imágenes (APT)

El servicio de transmisión automática de imágenes (APT, *automatic picture transmission*) se introdujo en algunos vehículos espaciales en los años 60 llegando a ser el sistema de más éxito de difusión directa de datos a los usuarios de la comunidad meteorológica. Miles de estaciones receptoras APT aún siguen funcionando en todo el mundo. Estas estaciones APT son muy económicas y las explotan no sólo los servicios meteorológicos y las universidades sino también una gran comunidad de usuarios ajenos a la meteorología.

Las transmisiones APT se basan en un esquema de modulación analógica. Las transmisiones se realizan en cuatro subbandas de la banda 137-138 MHz, con anchuras de banda típicas de 30-50 kHz, aunque pueden alcanzar los 175 kHz. Las transmisiones APT en el futuro se restringirán a dos subbandas de la banda 137-138 MHz: la subbanda 137,025-137,175 MHz y la subbanda 137,825-138 MHz.

Las estaciones APT suelen estar normalmente 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 coste con programas informáticos económicos ejecutados en ordenadores de sobremesa de fácil adquisición.

2.3.2.2 Transmisión de imágenes de baja resolución (LRPT)

El servicio de transmisión de imágenes de baja resolución (LRPT, *low resolution picture transmission*) está sustituyendo a la aplicación APT en la mayoría de los sistemas MetSat no OSG. El servicio LRPT se basa en esquemas de transmisión digital y hace uso de las mismas bandas de frecuencias que las actualmente utilizadas por la APT. La anchura de banda también puede llegar hasta 175 kHz.

2.3.2.3 Transmisión de imágenes de alta resolución (HRPT)

El servicio de transmisión de imágenes de alta resolución (HRPT, *high resolution picture transmission*) proporciona imágenes de alta resolución para la comunidad meteorológica. Los transmisores HRPT están activados continuamente y sus emisiones puede recibirlas cualquier estación de usuario. Hay cientos de estaciones receptoras HRPT en todo el mundo registradas en la OMM. Sin embargo, cabe señalar que este número no es totalmente fiable puesto que el registro de estas estaciones no tiene carácter obligatorio. Los datos HRPT son indispensables para el funcionamiento de los servicios meteorológicos y son asimismo de gran utilidad en otros cometidos.

Las transmisiones HRPT se efectúan en la banda de frecuencias 1 698-1 710 MHz con anchuras de banda de la señal comprendidas entre 2,7 MHz y 4,5 MHz. Las estaciones de usuario van equipadas con antenas parabólicas de seguimiento que suelen tener entre 2,4 y 3 m de diámetro. El mínimo ángulo de elevación recomendado para la recepción es de 5°, aunque algunas estaciones funcionan con ángulos de elevación inferiores al indicado. El factor de calidad de las estaciones es de 5 dB/K. Existen otros sistemas HRPT funcionando con velocidades de transmisión de datos que son aproximadamente el doble de la velocidad de los sistemas HRPT originales.

También existe una aplicación HRPT avanzada (AHRPT) destinada a sustituir a la HRPT en los satélites meteorológicos del futuro. Los operadores de los satélites pueden pasarse a este nuevo servicio o pueden decidir continuar las transmisiones HRPT durante algún tiempo.

Las transmisiones AHRPT se introducirán en la misma banda utilizada por los otros sistemas HRPT. La anchura de banda estará comprendida entre 4,5 y 5,6 MHz. Las estaciones de recepción AHRPT recibirán con mínimos ángulos de elevación de 5°. Las antenas son parabólicas con diámetros típicos comprendidos entre 2,4 m y 3 m. El G/T de las estaciones AHRPN será de 6,5 dB/K.

2.3.2.4 Datos a baja velocidad (LRD)

El primer satélite NPOESS, que se lanzará en torno a 2013, iniciará la aplicación LRD con una anchura de banda de 6 MHz sustituyendo al actual servicio APT proporcionado por los satélites NOAA. Este servicio funcionará en la banda de frecuencias 1 698-1 710 MHz.

2.3.3 Sistema de recogida de datos (SRD) del MetSat no OSG

Los sistemas de recogida de datos en satélites del MetSat no OSG proporcionan una amplia variedad de información utilizada principalmente por las agencias estatales pero también por entidades comerciales. Estos datos incluyen varios parámetros del medio ambiente sobre océanos, ríos, lagos, tierra firme y atmósfera relativos a procesos físicos, químicos y biológicos. También incluye datos sobre el seguimiento de los movimientos de animales. La utilización por entidades comerciales es limitada y comprende, por ejemplo, la supervisión de las condiciones de oleoductos a fin de proteger el medio ambiente. Algunos transmisores también se instalan para comunicar emergencias y suministrar datos relativos por ejemplo, al reconocimiento de peligros o catástrofes. Como ejemplos de sistemas de recogida de datos que funcionan desde satélites meteorológicos no geoestacionarios puede citarse el ARGOS y el SRD de Brasil. La generación del sistema Argos-2 actualmente sólo se utiliza a bordo de los satélites de órbita polar NOAA-15, -16, -17 y -18. La tercera generación de Argos (Argos-3), ya operativa sobre Metop-A, funcionará sobre los satélites NOAA-N', Metop-B y Metop-C y también irá incorporada en un satélite SARAL.

El sistema Argos funciona en la banda 401,580-401,690 MHz a través de miles de plataformas (conocidas como terminales transmisores de plataforma) cada una de las cuales requiere sólo unos pocos kHz de anchura de banda. Aprovechando el carácter polar de las órbitas de estos satélites, es posible acomodar muchas plataformas Argos. La generación del sistema Argos-3 introduce nuevos servicios de recogida de datos que ofrecen transmisiones de datos a alta velocidad (4 800 bit/s) y capacidad de interrogación en plataforma. La plataforma conocida como tranceptor de mensajería de plataforma (PMT, *platform messaging transceiver*) es interrogada por satélites que utilizan la banda 460-470 MHz.

Para la cuarta generación del sistema Argos (Argos-4), cabe esperar que la capacidad del sistema y la anchura de banda aumenten significativamente.

El SRD de Brasil se basa en los satélites SCD (órbita con inclinación de 25°) y CBERS y utiliza la banda 401,605-401,665 MHz para la recepción en la plataforma de recogida de datos. Debido a la compatibilidad del SRD de Brasil con el sistema Argos y con satélites en órbita complementaria, el intercambio de datos entre ambos sistemas tiene lugar desde 2001.

2.4 Mecanismos alternativos de difusión de datos

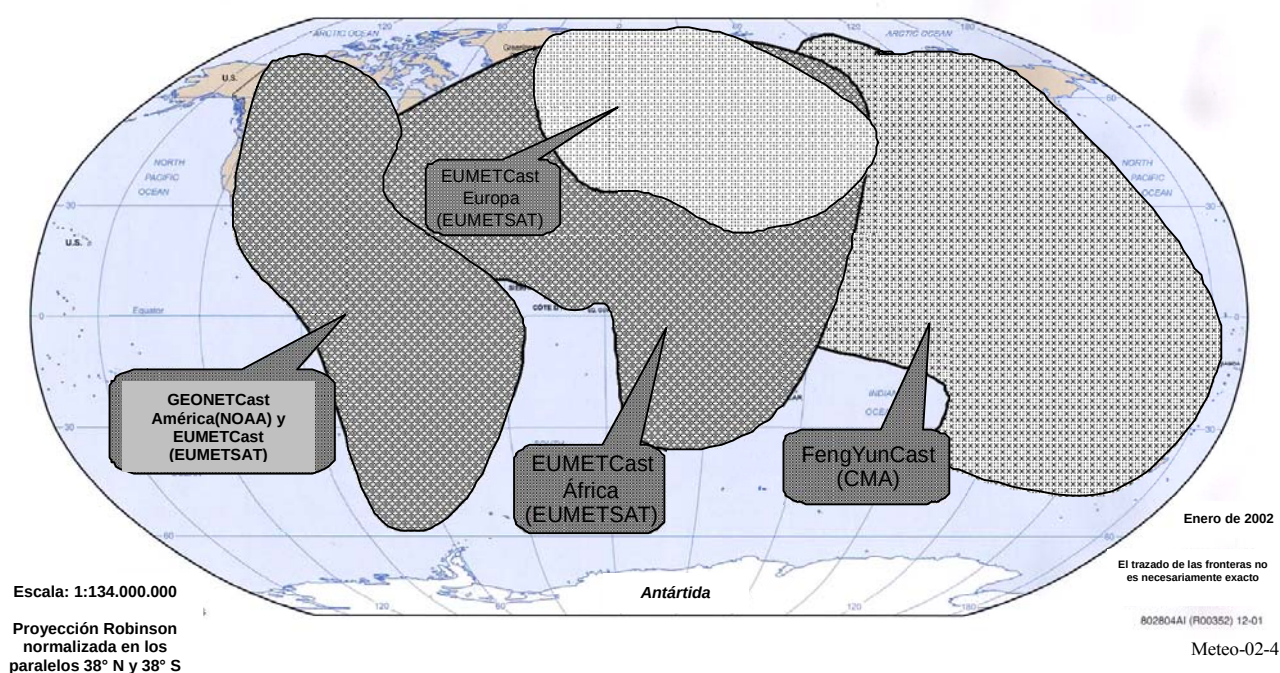
Además de los mecanismos tradicionales de difusión de datos de los sistemas MetSat OSG y no OSG, se está estableciendo un sistema adicional de difusión, denominado GEONETCast (véase la Fig. 2-4), que es una iniciativa del Sistema Mundial de Observación de la Tierra (GEOSS, *Global Earth Observation System of Systems*) para desarrollar un sistema mundial de recogida y distribución de datos sobre observaciones de la Tierra, operacional y de extremo a extremo, utilizando la actual infraestructura de telecomunicaciones comerciales. El concepto GEONETCast consiste en utilizar la capacidad de multidifusión de una red mundial de satélites de comunicaciones para transmitir desde satélites del medio ambiente datos *in situ* y productos de los suministradores a los usuarios. La cobertura mundial está prevista proporcionarla mediante la integración del sistema FENGYUNCast, el componente americano GEONETCast y el sistema EUMETCast.

Por ejemplo, el sistema EUMETCast es el sistema de radiodifusión de EUMETSAT para datos medio-ambientales, que es un sistema de difusión multiservicio basado en la tecnología de radiodifusión de vídeo digital (DVB) normalizada. Utiliza satélites geoestacionarios de telecomunicaciones comerciales para difundir ficheros, (datos y productos) a una amplia comunidad de usuarios ubicados dentro de las zonas de cobertura geográfica de los satélites de comunicaciones comerciales, que incluyen Europa, África y el Continente Americano.

Utilizado fundamentalmente para la distribución de datos de imágenes y productos derivados desde los satélites de Meteosat y Metop, EUMETCast también proporciona acceso a datos y servicios proporcionados por varios suministradores de datos externos; por ejemplo, los servicios de meteorología nacional y los operadores MetSat.

FIGURA 2-4

Cobertura mundial del GEONETCast



CAPÍTULO 3

SERVICIO DE AYUDA A LA METEOROLOGÍA

Página

3	Introducción	18
3.1	Bandas de RF atribuidas	18
3.2	Funciones meteorológicas del MetAids	19
3.3	Ejemplos de sistemas de detección MetAids	20
3.3.1	Radiosondas	20
3.3.2	Radiosondas en paracaídas	22
3.3.3	Cohetes sonda	23
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	Sistemas de procesamiento en tierra	25
3.4.3	Módulos sensores no recuperables	25
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	28
3.6.1	Tecnología disponible	28
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	30
3.6.6	Requisitos para la retención de ambas bandas	31
3.7	Tendencias para el futuro	31

3 Introducción

El servicio de ayudas 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 parámetros meteorológicos 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 bandas de frecuencia utilizadas por el servicio MetAids (además de las reguladas por disposiciones específicas) son las que figuran en el Cuadro 3-1 ¹⁾.

CUADRO 3-1

Bandas de frecuencias utilizadas por los sistemas/aplicaciones MetAids

Banda de frecuencias	Utilización
400,15-401 MHz	MetAids
401-402 MHz	MetAids
402-403 MHz	MetAids
403-406 MHz	MetAids
1 668,4-1 670 MHz	MetAids MetSat
1 670-1 675 MHz	MetAids MetSat
1 675-1 690 MHz	MetAids MetSat
1 690-1 700 MHz	MetAids MetSat
35,2-36 GHz	MetAids SETS

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.

¹⁾ Para la atribución actual de frecuencias en estas bandas, véase el Artículo 5 del RR.

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 de la atribuida por el RR debido a los acuerdos de compartición nacional con otros servicios de radiocomunicaciones, como se ha indicado anteriormente.

Dejó de utilizarse la radiosonda convencional en la banda 27,5-28 MHz debido a problemas de interferencia con otros servicios. El análisis de la utilización del servicio MetAids puso de manifiesto la existencia en el mercado de sistemas de radiosonda funcionando en la red OMM en las bandas de frecuencias 400,15-406 MHz y 1 668,4-1 700 MHz. La justificación para seguir utilizando estas dos bandas del servicio MetAids se indica en un Capítulo posterior, tras la exposición detallada de los sistemas utilizados.

3.2 Funciones meteorológicas del 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 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 de todas estas radiosondas, al menos 400 se utilizan para mediciones en los emplazamientos establecidos del Sistema Mundial de Observación de la Tierra (GCOS, *Global Climate Observing System*). 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 medioambientales 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 Radiosondas

Cada año se llevan a cabo en todo el mundo más de 800 000 vuelos de radiosondas; véanse las Figs. 3-1 y 3-2. Además, se realizan otros 400 000 vuelos para diversas aplicaciones. Los emplazamientos de las estaciones de base para el lanzamiento de radiosondas suelen estar dotados de equipos especiales para que el

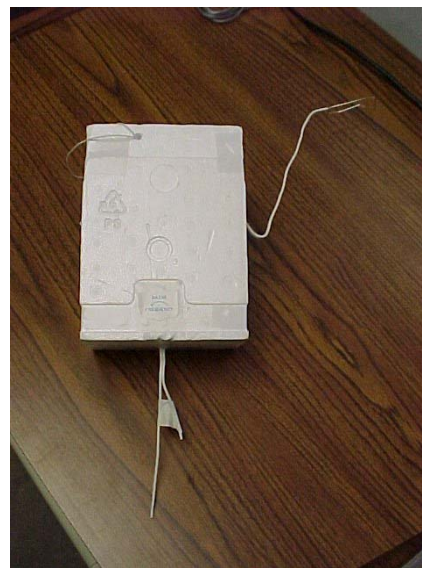
lanzamiento de los globos pueda realizarse con independencia de las condiciones meteorológicas. Los emplazamientos más críticos están dotados de equipos de alimentación de reserva y del correspondiente alojamiento de modo que las mediciones puedan realizarse incluso en el caso de que las infraestructuras locales queden dañadas por condiciones meteorológicas extremas, por accidentes laborales o por otras circunstancias.

FIGURA 3-1
Tren de vuelo de una radiosonda



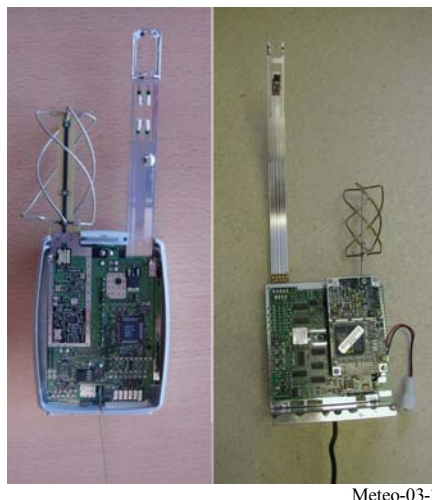
Meteo-03-1

FIGURA 3-2
Radiosondas



Meteo-03-2

FIGURA 3-3
Circuitos electrónicos de una radiosonda moderna



Una radiosonda típica está integrada por varios elementos importantes: el transmisor, la batería, el módulo sensor y, normalmente, un receptor de ayuda a la navegación (NAVAID/GPS) (véase la Fig. 3-3). El transmisor envía los datos a la estación receptora. 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 . 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.

Los sistemas de radiosonda que no se basan en las aplicaciones NAVAID/GPS utilizan seguimiento mediante un radar suspendido en un reflector situado bajo un globo. Si la radiosonda se basa en las señales NAVAID/GPS para la medición del viento, también incorporará un receptor NAVAID/GPS para el tipo de señales utilizadas. Las radiosondas NAVAID/GPS utilizan las señales procedentes del sistema mundial de determinación de la posición (GPS), LORAN y VLF.

La descomposición de costes de una radiosonda típica supone que el 20%-30% corresponde al transmisor, el 45%-60% al módulo sensor, el 20%-50% al receptor NAVAID/GPS (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 una gran anchura 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 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 NAVAID/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.

3.3.3 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 NAVAID/GPS 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-03-4

FIGURA 3-5
Cohete sonda



Meteo-03-5

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 RS.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. 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 directivas (401-406 MHz)



Meteo-03-6

La medición del viento suele realizarse mediante radiogoniometría 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 funcionan 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-03-7

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 coste 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/GPS para la medición del viento encargan el procesamiento de la señal NAVAID/GPS al sistema de procesamiento de señal, en la medida de lo posible. Algunas MetAids se limitan a recibir la señal NAVAID/GPS 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 coste 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 coste 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 coste 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. Actualmente está aumentando el empleo de circuitos integrados específicos de aplicación (ASIC) disponibles en el mercado, ya que cada vez se cuenta con más dispositivos adecuados capaces de funcionar con gamas de temperatura extremas.

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 cajas de espuma de poliuretano, de cartón o de plástico, muy ligeras y fácilmente destruibles. 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 de teledifusión 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 costes 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.

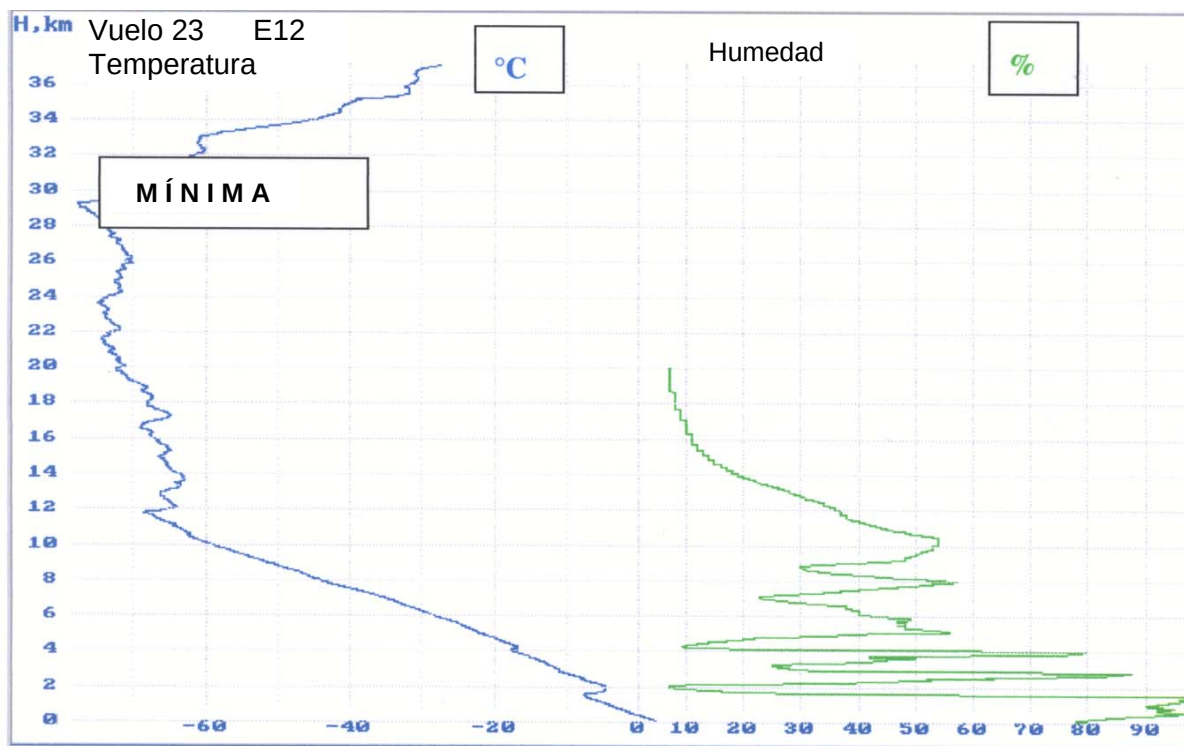
La Fig. 3-8 muestra las mediciones de temperatura y humedad relativa en función de la altura, realizadas en un emplazamiento de observación meteorológica a 60° N en el Reino Unido (en Lerwick, Islas Shetland, el 23 de enero de 2000). El error de las mediciones de la temperatura de la radiosonda es pequeño, 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.

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



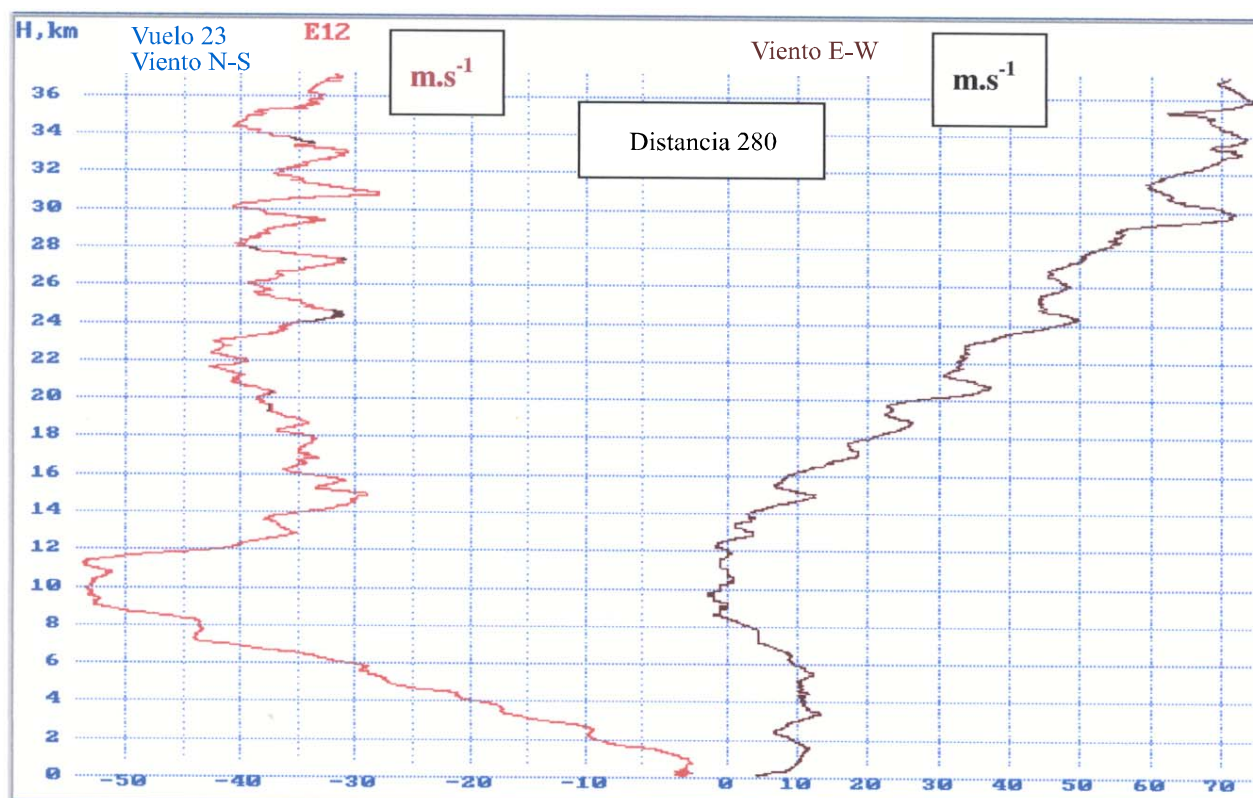
Meteo-03-8

Debido a limitaciones en la tecnología de los sensores, las mediciones de humedad finalizan a una altura de 20 km. La mínima temperatura en la Fig. 3-8 corresponde a unos 29 km ²⁾. El brusco aumento de la temperatura por encima de 29 km puede atribuirse al importante calentamiento que se produce como resultado de los movimientos de las capas atmosféricas superiores durante los inviernos en el hemisferio 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.

²⁾ En este punto, la temperatura ha caído hasta un valor próximo a las condiciones necesarias para que se inicien los mecanismos químicos que destruyen la capa de ozono durante los inviernos en el hemisferio septentrional.

FIGURA 3-9
Mediciones de viento con radiosonda



Meteo-03-9

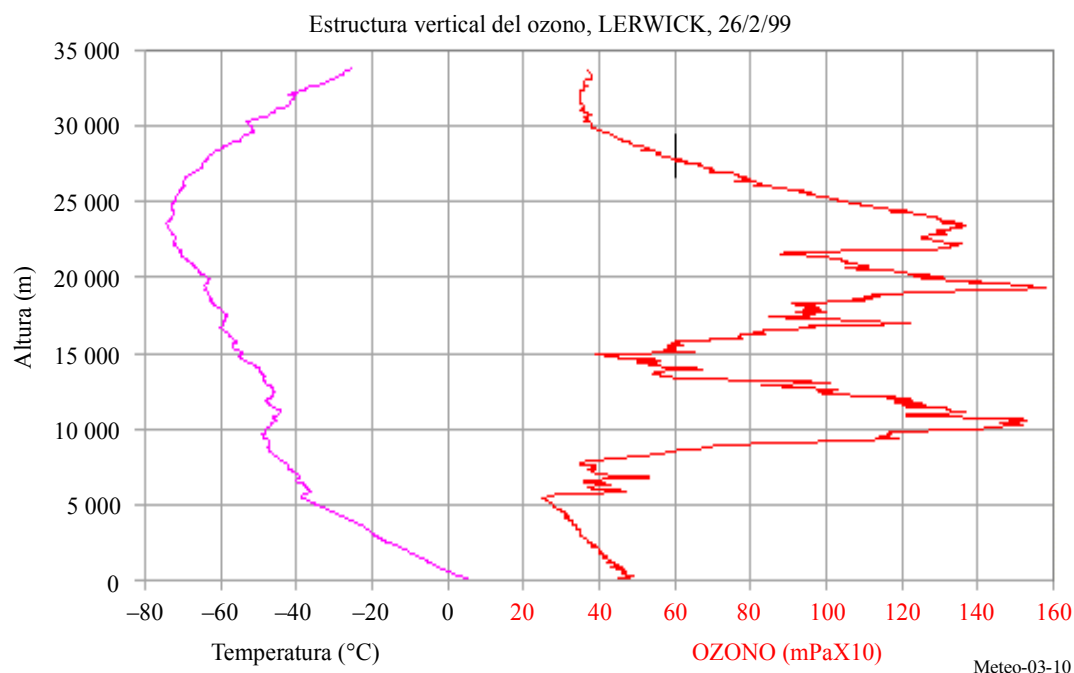
La Fig. 3-10 muestra una medición de la estructura vertical del ozono desde el mismo emplazamiento del Reino Unido que el de la Fig. 3-8. Aquí, se representa la presión parcial del ozono en función de la altura, junto con una medición simultánea de la temperatura. Las mediciones del ozono se realizan 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.

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 5 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. Cabe esperar que ello pueda lograrse en 2012.

FIGURA 3-10
Medición de la distribución vertical de ozono mediante una ozonosonda



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 desvien tanto como éste. A latitudes elevadas en el invierno del Hemisferio Norte, los vientos a alturas superiores a 16 km no suelen distribuirse 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 NAVAID/GPS. 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 NAVAID/GPS 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

La OMM ha definido y examina periódicamente los mínimos requisitos de densidad mundial y regional de las redes del servicio MetAids. 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 puede que no tengan los recursos necesarios 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).

Hay ciertas zonas del planeta en las que existe un número limitado de estaciones de lanzamiento. En tales casos 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. La OMM llegó a la conclusión de que se necesita toda la banda 401-406 MHz para el funcionamiento del servicio MetAids en el futuro previsible y también determinó que las operaciones de radiosonda convencionales en la banda 400,15-401 MHz no sería posible debido a que no es viable la compartición cocanal con los servicios por satélite.

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. La mayoría de los países 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.

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 radionavegación (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. Algunos países explotan sus sistemas MetAids de manera independiente de los sistemas NAVAID/GPS 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.

Además, la aplicación de los GPS a las radiosondas para efectuar las mediciones de los vientos está teniendo como consecuencia una importante mejora en el rendimiento espectral de las radiosondas NAVAID/GPS. En la mayor parte de los países también supone 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 NAVAID/GPS. 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.

Bibliografía

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	Tipos de radares meteorológicos	34
4.1.2	Ecuación del radar	35
4.2	Radares meteorológicos	36
4.2.1	Requisitos del usuario	36
4.2.2	Redes de radares meteorológicos	36
4.2.3	Aspectos operacionales de la reflectividad	38
4.2.4	Esquemas de emisión de radares meteorológicos y estrategias de exploración	39
4.2.4.1	Esquemas de emisión	39
4.2.4.2	Calibración del ruido	40
4.2.4.3	Estrategias de exploración	41
4.2.4.4	Supresión del eco fijo	41
4.2.5	Radares Doppler	41
4.2.6	Radares de doble polarización	42
4.2.7	Productos de base del radar meteorológico convencional	43
4.2.7.1	Reflectividad de base	44
4.2.7.2	Velocidad radial media	44
4.2.7.3	Anchura del espectro	44
4.2.7.4	Productos del radar meteorológico de polarización doble	46
4.2.7.5	Productos de datos derivados	46
4.2.8	Requisitos actuales y futuros del espectro	46
4.2.9	Vulnerabilidad de los radares meteorológicos	47
4.2.9.1	Tipos de posible interferencia	48
4.2.9.2	Repercusión de una interferencia constante	48
4.2.9.3	Repercusión de la interferencia impulsiva	50
4.2.9.4	Interferencia procedente de parques eólicos	51
4.2.10	Vulnerabilidad de los sistemas que comparten espectro con radares meteorológicos	54
4.3	Radares de perfil del viento (WPR)	54
4.3.1	Requisitos de usuario	55
4.3.2	Aspectos operativos y de frecuencia	56
4.3.3	Requisitos espectrales actuales y futuros	57
4.3.4	Aspectos de la compartición de los radares de perfil del viento	58

4.1 Introducción

Los radares meteorológicos en tierra funcionan en el servicio de radiolocalización y se utilizan para meteorología operacional, predicción del tiempo, investigación de la atmósfera y navegación aeronáutica y marítima. Desempeñan un cometido fundamental en los procesos de alerta inmediata por fenómenos meteorológicos e hidrológicos. Representan la última barrera de defensa contra la pérdida de vidas y propiedad en caso de inundaciones repentinas o severas tormentas y, por consiguiente, se encuentran entre los instrumentos meteorológicos que más vidas han salvado.

Los radares meteorológicos son normalmente radares de exploración de volumen con haz estrecho que detectan y miden las intensidades de los hidrometeoros y las velocidades del viento. Se utilizan para predecir la formación de huracanes, tornados y otros fenómenos meteorológicos peligrosos y determinan el curso de las tormentas en su camino de destrucción. Los radares modernos permiten determinar el trayecto de las tormentas, ya sean grandes o pequeñas, y proporcionan información sobre las intensidades de precipitación, que se utiliza para predecir la posibilidad de inundaciones repentinas. Además, proporcionan información pertinente sobre vientos intensos y posibles rayos.

Este Capítulo trata de los radares en tierra utilizados normalmente en meteorología y sus especificidades en comparación con otros radares.

4.1.1 Tipos de radares meteorológicos

El primero y más conocido de los tipos de radar es el radar meteorológico. Estos radares proporcionan datos de un volumen centrado en su propio emplazamiento. Sobradamente conocidos, la información que suministran estos radares aparecen normalmente en las previsiones meteorológicas que salen por televisión. El Cuadro 4-1 proporciona la lista de bandas de frecuencias utilizadas generalmente para el funcionamiento de los radares meteorológicos.

CUADRO 4-1

Principales bandas de frecuencias utilizadas por los radares meteorológicos

Banda de frecuencias (MHz)	Nombre de la banda
2 700-2 900	Banda S
5 250-5 725 (principalmente 5 600-5 650 MHz)	Banda C
9 300-9 500	Banda X

El radar de perfil del viento (WPR, *wind profiler radar*) es el segundo tipo de radar meteorológico. Estos radares proporcionan datos de un volumen de forma aproximadamente cónica dirigido directamente sobre el radar. El WPR es un dispositivo relativamente reciente y mide la velocidad del viento, su magnitud y dirección, en función de la altura sobre el suelo. Se incorporan los equipos necesarios, un WPR también puede medir la temperatura del aire (en función de la altura). Las bandas de radiofrecuencia utilizadas por el WPR se encuentran normalmente en torno a 50 MHz, 400 MHz, 1 000 MHz y 1 300 MHz (véanse los detalles en la sección 4.3).

Un 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.

Todos los radares funcionan emitiendo señales radioeléctricas, reflejándose en blancos que pueden ser vehículos, aviones, gotas de lluvia o turbulencias atmosféricas. Aunque emiten señales de gran potencia, las señales de retorno de los radares son débiles porque la señal radiada debe recorrer el trayecto dos veces, una vez desde el radar al blanco y otra en sentido contrario. En el caso de radares meteorológicos, esta debilidad de las señales viene incrementada porque el blanco (ya sean gotas de precipitaciones (lluvia, granizo, nieve, ...) o en el caso del modo Doppler, polvo, insectos o simplemente perturbaciones atmosféricas) no es un reflector particularmente 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 débiles puede afrontarse de diversas maneras, por ejemplo utilizando potencias de transmisión superiores, grandes antenas con un producto de anchura de haz por ganancia elevado, receptores extremadamente sensibles y un gran tiempo de integración de las señales. Por consiguiente, es un requisito técnico que el espectro sea relativamente silencioso, es decir, que esté libre de interferencia y de ruidos electrónicos artificiales.

4.1.2 Ecuación del radar

La ecuación (4-1) del radar describe la relación entre la potencia de retorno y las características del radar y el blanco. La ecuación puede expresarse como sigue:

$$\overline{P_r} = \frac{\pi^3 \cdot P_t \cdot G^2 \cdot \theta^2 \cdot c \cdot \tau \cdot |K|^2 \cdot L \cdot Z}{2^{10} \cdot \lambda^2 \cdot R^2 \cdot \ln 2} \quad (4-1)$$

donde:

- $\overline{P_r}$: potencia de retorno media (W)
- P_t : potencia de salida del transmisor (W)
- G : ganancia de antena (adimensional)
- K : índice de refracción complejo (adimensional)
- λ : longitud de onda del radar (m)
- c : velocidad de la luz (m/s)
- θ : anchura de haz de la antena a potencia mitad (3 dB) (rad)
- τ : anchura del impulso
- r : distancia al blanco
- L : factores de pérdidas asociados a la propagación y a la detección del receptor (dB)
- Z : reflectividad efectiva del radar (m^3).

Reordenando los términos se obtiene una formulación más sencilla de la ecuación (4-2) del radar que muestra las diferentes contribuciones a la potencia recibida en términos de constantes, factores del radar y factores del blanco.

$$\overline{P_r} = \underbrace{\frac{\pi^3 c}{1024 \cdot \ln 2}}_{\text{Constantes}} \cdot \underbrace{\frac{P_t \cdot G^2 \cdot \theta^2 \cdot L}{\lambda^2}}_{\text{Factores del radar}} \cdot \underbrace{|K|^2 \frac{Z}{R^2}}_{\text{Factores del blanco}} \quad (4-2)$$

La ecuación (4-2) del radar puede aplicarse a un blanco distribuido si se cumplen las siguientes hipótesis:

- el blanco ocupa todo el volumen del impulso
- las partículas están distribuidas a lo largo de la región de contribución
- las partículas de precipitación son esferas dieléctricas homogéneas con diámetros pequeños comparados con la longitud de onda del radar
- el tamaño de las partículas satisface la condición de dispersión de Rayleigh
- la constante dieléctrica $|K|^2$ y la distribución del tamaño de los dispersores son homogéneos en el volumen V considerado
- el diagrama de antena puede aproximarse mediante la forma gaussiana
- las ondas incidente y de retrodispersión presentan una polarización lineal
- se desprecian los efectos de dispersión múltiple.

En la ecuación (4-3) aparece una forma logarítmica de la ecuación (4-2) del radar [Doviak y Zrníc, 1984]:

$$Z(A_z, E_l, R) \text{ (dBZ)} = 10 \log(P_r) + 20 \log(R) - 10 \log(L_p) + 10 \log(C) \quad (4-3)$$

Esta ecuación es la más útil puesto que pone en evidencia la necesidad de identificar claramente los diversos parámetros del sistema para efectuar una medición de la reflectividad calibrada. Estos parámetros incluyen:

- la potencia recibida P_r (W),
- el alcance R (m),
- el acimut y los ángulos de elevación (grados),
- la pérdida de propagación en exceso L_p (dB), y
- la denominada constante del radar C .

La constante del radar normalmente incluye factores tales como anchura del haz de la antena, anchura del impulso, ganancia de conversión del receptor y pérdidas del sistema y los emplazamientos.

Hay que destacar que para los radares que realizan el seguimiento de blancos discretos la ecuación del radar indica una señal recibida proporcional a $1/r^4$ (siendo r la distancia). Para radares meteorológicos, la situación es muy distinta porque blancos tales como las precipitaciones a menudo llenan todo el haz estrecho del radar. En este caso, la ecuación del radar indica una señal recibida proporcional a $1/r^2$. Como resultado, los radares meteorológicos permiten mayores distancias de detección pero, en consecuencia, presentan una mayor sensibilidad a la interferencia.

4.2 Radares meteorológicos

4.2.1 Requisitos del usuario

Los meteorólogos utilizan radares meteorológicos para, por un lado, detectar, localizar y medir el volumen de precipitación dentro de las nubes o que se está descargando de las nubes y, por otro lado, determinar las velocidades del viento utilizando el movimiento de la precipitación o de las partículas atmosféricas. Los radares miden la intensidad de la precipitación en periodos de tiempo específicos así como el movimiento de precipitación o de las partículas atmosféricas que se acercan o se alejan de la antena del radar meteorológico, permitiendo de esa forma medir la rotación en los fenómenos meteorológicos. Se trata de un factor crítico para detectar fenómenos meteorológicos intensos tales como tornados o inundaciones repentinas y para proporcionar alertas tempranas. El principal requisito de usuario del radar meteorológico es detectar las precipitaciones sólidas y líquidas y estimar la intensidad de la precipitación y la velocidad radial³⁾.

4.2.2 Redes de radares meteorológicos

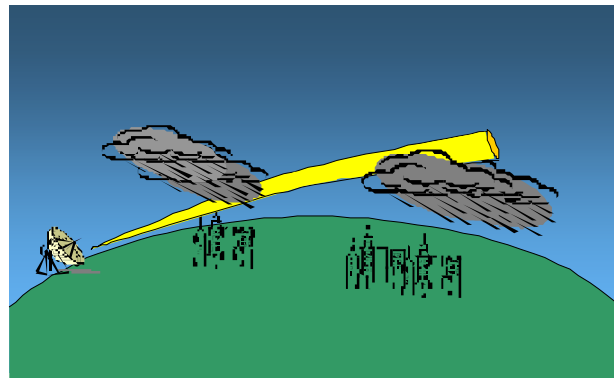
La principal limitación de un radar meteorológico es el hecho de que la intensidad de los ecos devueltos por un fenómeno meteorológico determinado tiende a disminuir al aumentar la distancia desde el radar. Ello se debe no sólo a la atenuación en espacio libre y a otros tipos de atenuación atmosférica sino también al hecho de que como la distancia hasta el radar aumenta, el haz del radar se ensancha debido a la cobertura de la Tierra y al ángulo de elevación del haz (véase la Fig. 4-1).

Ello da lugar a una disminución en el porcentaje del fenómeno meteorológico iluminado por el haz. Si bien la parte superior del fenómeno puede aún ser observada por el radar, su parte inferior podría ya no ser visible. La precipitación que tiene lugar a una cierta distancia del radar puede permanecer sin detectar o puede mostrar una intensidad reducida limitando por tanto el alcance operacional del radar.

Para evitar este problema, se instalan múltiples radares generalmente equiespaciados en redes distribuidas. Estas redes funcionan 24 horas al día y cubren normalmente grandes zonas tales como países o incluso parte de un continente a fin de poder detectar y seguir la evolución de los fenómenos meteorológicos, permitiendo de esa forma la emisión de alertas tempranas frente a peligros meteorológicos. En la Fig. 4-2 aparece un ejemplo de dicha red, que comprende radares de la Banda S y la Banda C instalados en Europa Occidental.

³⁾ Se trata de la velocidad de precipitación desplazándose hacia el radar o alejándose del mismo (en una dirección radial). No se indica ninguna información sobre la intensidad de la precipitación. La precipitación que se desplaza hacia el radar se considera que tiene una velocidad negativa y la precipitación que se desplaza alejándose del radar, una velocidad positiva. La precipitación que se desplaza de manera perpendicular al haz del radar (en un círculo alrededor del radar) tendrá una velocidad radial cero. La velocidad se expresa en nudos.

FIGURA 4-1
Descripción sintética del incremento de la altura
del haz del radar con la distancia



Meteo-04-1

FIGURA 4-2
Ejemplo de una red de radares meteorológicos



Meteo-04-2

Un método complementario para resolver este problema consiste en instalar radares pequeños de bajo coste y baja potencia en la Banda X que podrían complementar los datos procedentes de las actuales redes de radares meteorológicos. El (CASA²) es un ejemplo de dicha red, de la que cabe esperar que mejore espectacularmente la detección cerca del suelo mediante un proceso denominado detección adaptativa con colaboración distributiva (DCAS, *distributive collaborative adaptive sensing*). En el proceso DCAS, los datos procedentes de múltiples radares en Banda X se asimilarán en tiempo real para su utilización en algoritmos de detección, predicción meteorológica numérica y modelos de transporte. Debido a las diversas ventajas que presenta dicha red de radares, caben esperar mejoras significativas del sistema en lo referente al análisis y predicción de las condiciones meteorológicas en la superficie.

4.2.3 Aspectos operacionales de la reflectividad

La reflectividad es un término del radar relativo a la capacidad que tiene un blanco de radar de devolver energía. La reflectividad η de la lluvia se relaciona con la permitividad relativa 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 (4-4):

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

donde $|K|^2$ es 0,93 para el agua líquida y 0,18 para el hielo. La reflectividad se utiliza para estimar la intensidad de precipitación y las intensidades de lluvia y se mide a partir de la potencia devuelta.

Para eventos de precipitación en los que se conoce (o se supone), el tamaño de la gota de lluvia, el volumen de reflectividad puede relacionarse con el volumen total de agua líquida por unidad de volumen. El volumen total de agua junto con la distribución del tamaño de las gotas y la correspondiente velocidad terminal de la gota facilita el cálculo de la intensidad de lluvia.

El factor de reflectividad del radar Z puede definirse como sigue:

$$Z = \frac{1}{V_e} \sum_i D_i^6 \quad (4-5)$$

donde:

- Z : volumen estimado en función de la sección transversal del número total de esferas del radar dispersor en dicho volumen
- D : diámetro de la gota de agua
- V_e : volumen efectivo de la gota.

El volumen Z está relacionado con la sección transversal del radar por unidad de volumen η mediante la expresión:

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 Z \quad (4-6)$$

donde:

- Z : volumen
- η : sección transversal del radar por volumen unitario
- λ : longitud de onda incidente
- $|K|$: índice de refracción complejo.

Como el diámetro de las gotas de lluvia en el volumen de dispersión no es uniforme, las distribuciones de gotas de lluvia pueden aproximarse mediante la expresión:

$$N(D) = N_0 \exp(-\Lambda D) \quad (4-7)$$

donde:

- $N(D)$: concentración del número del diámetro
- D : diámetro
- ΛD : tamaño de intervalo
- N_0 y Λ : constantes para un fenómeno meteorológico determinado.

Cuando se conoce la distribución del tamaño de las gotas de lluvia, el sumatorio $\sum_i D_i^6$ por un volumen unitario viene dado por la expresión:

$$Z = \int_0^{\infty} D^6 N(D) dD \quad (4-8)$$

Cuando la velocidad vertical del aire es cero la intensidad de lluvia, R , viene dada por:

$$R = \frac{\pi \rho}{6} \int_0^{\infty} D^3 v_t(D) N(D) dD \quad (4-9)$$

donde:

- R : intensidad de lluvia
- D^3 : volumen de la gota de lluvia que es proporcional a Z
- $v_t(D)$: velocidad terminal de una gota de lluvia con un diámetro D
- ρ : densidad del agua.

Cuando N_0 es constante, la relación Z - R estimada puede describirse mediante la ecuación (4-10):

$$Z = AR^b \quad (4-10)$$

Donde Z normalmente se expresa como debe $dB_Z = 10 \log Z \text{ (mm}^6/\text{m}^3)$ y A y b son constantes. (A es la constante de dispersión y b es un multiplicador). La relación Z - R más comúnmente utilizada es la de Marshall-Palmer en la que: $Z = 200 \cdot R^{1.6}$ y R se expresan en mm^6/mm^3 y en mm/h , respectivamente. La relación Z - R sin embargo no es única. 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.

4.2.4 Esquemas de emisión de radares meteorológicos y estrategias de exploración

4.2.4.1 Esquemas de emisión

Para asegurar el procesamiento de exploración de un volumen, en las denominadas «estrategias de exploración» (normalmente de una duración de 10-15 min), los radares meteorológicos utilizan distintos esquemas de emisión a diferentes elevaciones empleando conjuntos de diversas anchuras de impulso, frecuencias de repetición de impulsos y velocidades de rotación. No hay esquemas típicos puesto que estos esquemas varían basándose en un cierto número de factores tales como las capacidades del radar, el medio ambiente del radar y los productos meteorológicos requeridos.

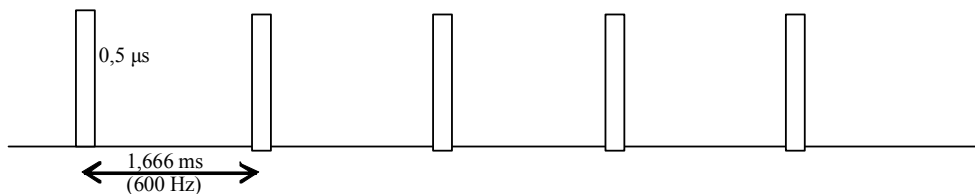
Como ejemplo, una reciente encuesta sobre radares meteorológicos en la banda C en Europa mostró las siguientes amplias gamas de los diferentes parámetros del esquema de emisión:

- Ángulo de elevación operacional entre 0° y 90°
- Anchura del impulso entre 0,5 y 2,5 μs (para radares operacionales)
- Frecuencia de repetición de impulsos (PRF) entre 250 y 1 200 Hz
- Velocidad de rotación entre 1 y 6 rpm
- Utilización de radares determinados con diferentes esquemas de emisión y diversas combinaciones de anchuras de impulsos y PRF y, en particular, el empleo de PRF fijas, escalonadas o intercaladas (es decir distintas PRF durante un solo esquema).

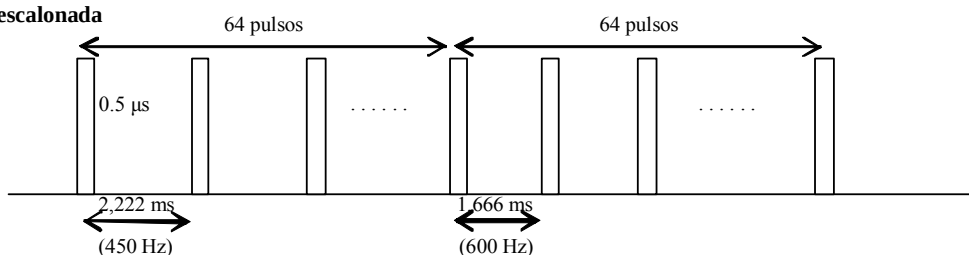
En la Fig. 4-3 aparecen ejemplos de diferentes esquemas de emisión.

FIGURA 4-3
Algunos tipos de esquemas de emisión de radares meteorológicos

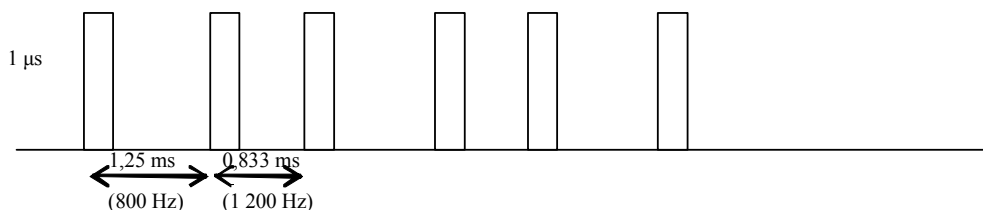
PRF fija



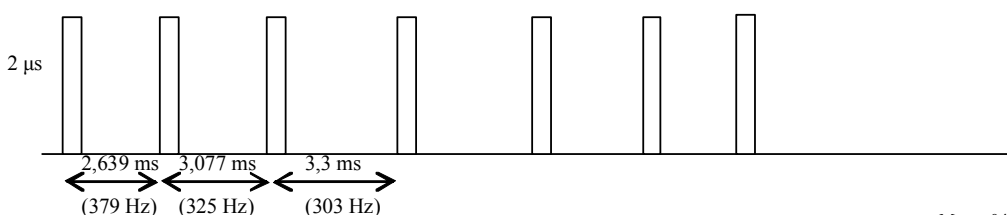
PRF escalonada



PRF intercalada doble (PRT doble)



PRF intercalada triple (PRT triple)



Meteo-04-3

4.2.4.2 Calibración del ruido

Considerando la debilidad de la señal de retorno en los radares meteorológicos, el nivel de ruido debe extraerse de la señal para lograr las mediciones más precisas y recuperar los productos meteorológicos pertinentes.

Siendo N el nivel de ruido y S la señal útil (es decir, la señal de retorno meteorológica), los radares meteorológicos realizan el siguiente proceso:

- 1) Para cada puerta, el radar mide la señal de retorno correspondiente a la señal útil (S) y el ruido (N), es decir $N + S$.
- 2) Para determinar S , el radar extrae de $N + S$, el nivel de ruido N .
- 3) A continuación, a partir de S , el radar puede determinar todos los productos meteorológicos tales como la precipitación (dB_Z) o la velocidad del viento mediante análisis Doppler.

Para obtener productos meteorológicos más precisos, la señal S debe ser lo más exacta posible, lo que significa que la calibración del ruido del radar es un tema fundamental.

Esta calibración del ruido, también denominada «**Verificación cero**», se lleva a cabo por lo tanto de manera periódica ya sea durante las emisiones regulares del radar (por estimación) o durante periodos de tiempo de medición específicos (véase a continuación el ejemplo de estrategia de exploración).

Cabe señalar que, en un cierto número de radares, esta medición del ruido se realiza sin ninguna emisión del radar, lo que significa que podría tener repercusiones en el diseño de algunos sistemas radioeléctricos destinados a detectar señales de radar para reducir la interferencia o, si aparece alguna interferencia durante esta calibración, que podría repercutir en todas las mediciones del radar tras esta calibración, y probablemente en toda la estrategia de exploración. En particular, esta interferencia haría probablemente que se indicasen tasas de precipitación inferiores a las que se están produciendo realmente, con las evidentes consecuencias sobre los procesos operacionales y de alerta.

4.2.4.3 Estrategias de exploración

Los distintos esquemas de emisión indicados anteriormente son utilizados por diversos radares en su estrategia de exploración, durante la cual, para diferentes elevaciones y velocidades de rotación, se transmite un esquema de emisión. También en este caso no hay una estrategia típica de exploración ya que estas estrategias varían según un cierto número de parámetros, incluidos los requisitos meteorológicos básicos, el medio ambiente del radar, las condiciones meteorológicas específicas, etc.

En las Figs. 4-4 y 4-5 aparece un ejemplo de esta estrategia de exploración.

4.2.4.4 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). Los ecos causados por blancos distintos a la precipitación se conocen como ecos parásitos y deben eliminarse. En los radares meteorológicos actuales se utilizan diversos métodos de supresión del eco parásito procedente del suelo:

- El filtrado Doppler emplea un filtro paso alto para reducir el eco parásito procedente del suelo. Este proceso es eficaz si la velocidad radial del viento es lo suficientemente alta como para estar por encima de la frecuencia de corte del filtro Doppler.
- El filtrado estadístico basado en el hecho de que la varianza de la lluvia es superior a la varianza de la reflectividad del eco parásito procedente 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 para la discriminación de la lluvia y del eco parásito procedente del suelo.

4.2.5 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 radial. Ello 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 parásito procedente del suelo constituye asimismo una importante funcionalidad. Los avances más importantes en este campo se centran en los transmisores coherentes tales como los klystrones o los tubos de ondas progresivas (TOP). La integridad de fase del espectro del radar convencional está limitada actualmente por la tecnología de los magnetrones. Sin embargo, los actuales magnetrones pueden suministrar una gran potencia media a bajo coste para mejorar la relación señal/ruido.

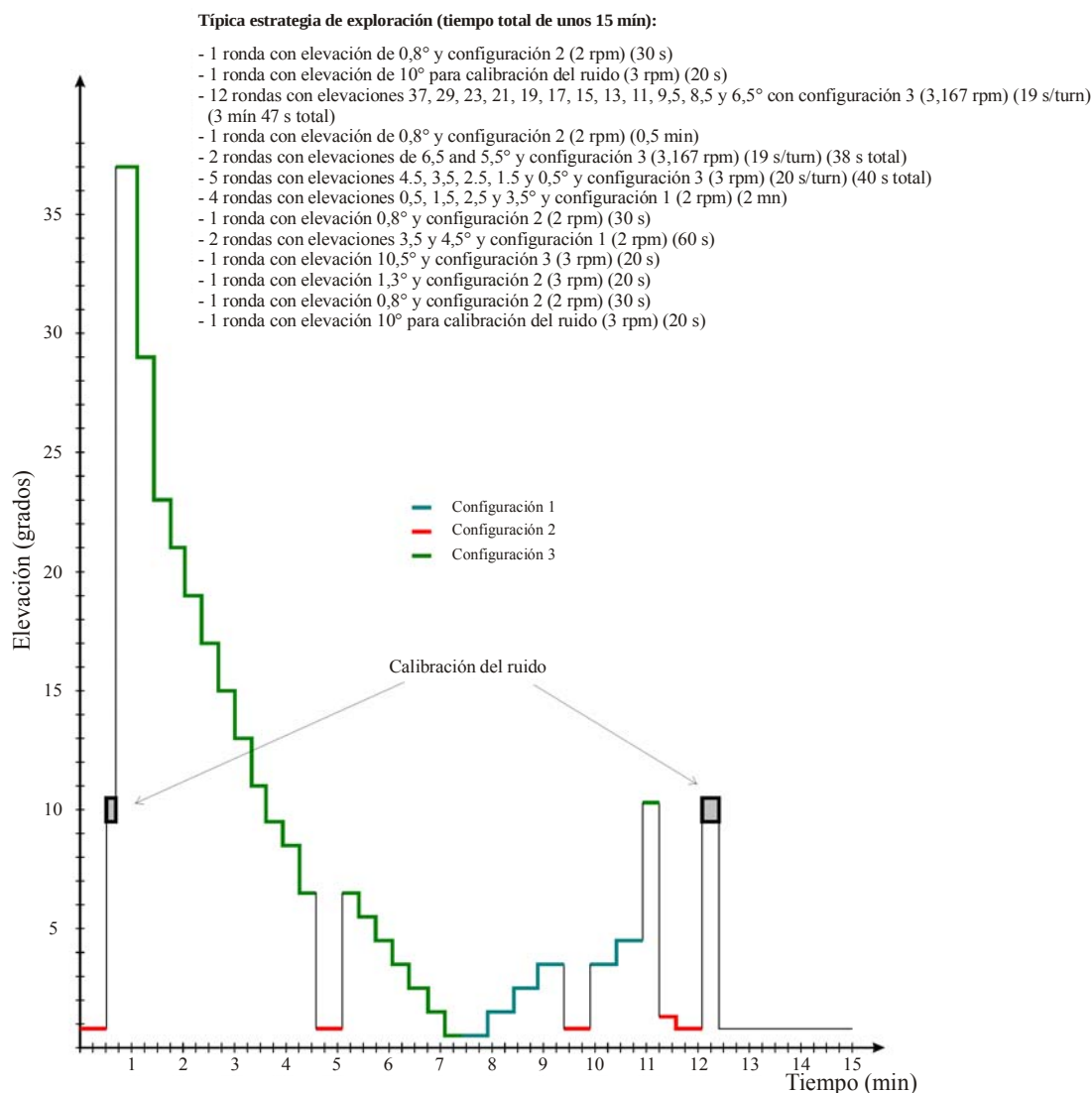
4.2.6 Radares de doble polarización

La tecnología de radares polarimétricos o de doble polarización permite identificar dispersores por tele-detección de sus formas. Los radares meteorológicos polarimétricos pueden utilizarse para mejorar la identificación de los hidrometeoros y la fiabilidad y precisión de los índices de precipitación, lo cual es necesario para aplicaciones hidrológicas. De hecho, las gotas de lluvia tienden a aplanarse en su caída (esferas obsoletas), aumentando el aplanamiento con el tamaño de la gota en dirección horizontal. Combinando las mediciones de reflectividad y fase por medio de dos polarizaciones, horizontal (h) y vertical (v), se puede 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 hidrometeoros se caracterizan por sus constantes dieléctricas, factor primordial en el cálculo de las secciones transversales de dispersión y atenuación. Las propiedades dieléctricas de los hidrometeoros varían con la frecuencia del radar, existiendo notables diferencias entre el agua y el hielo. Aprovechando estas características, se han implementado algoritmos para discriminar entre la lluvia y la nieve y para cuantificar el agua y el hielo en las nubes a partir de mediciones de la atenuación diferencial efectuadas con radares de doble banda.

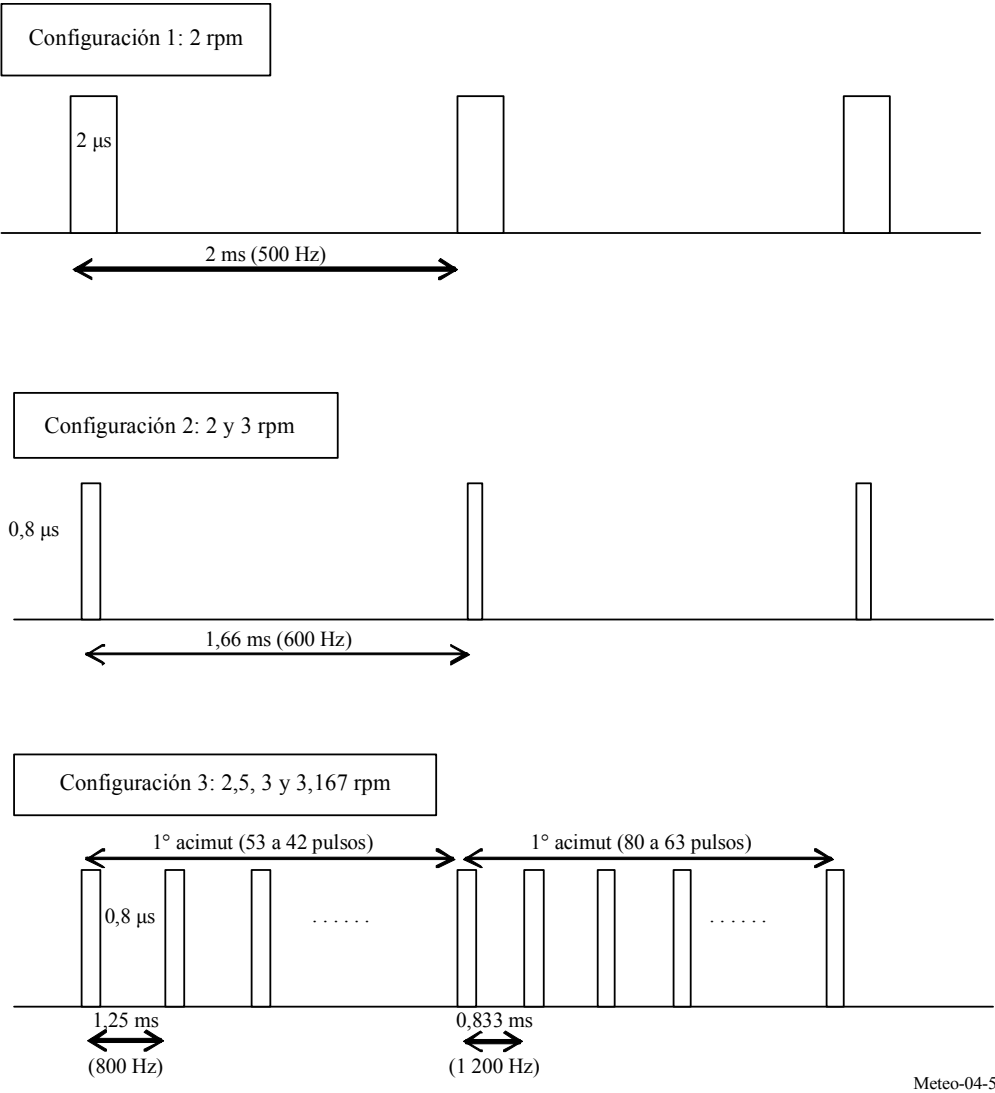
FIGURA 4-4
Descripción de una estrategia de exploración de un radar meteorológico



4.2.7 Productos de base del radar meteorológico convencional

Un radar meteorológico Doppler genera tres categorías de productos de datos de base a partir de los retornos de señal: reflectividad de base, velocidad radial media y anchura del espectro. Todos los productos de nivel más elevado se generan a partir de estos tres productos de base. La precisión del producto de base se especifica a menudo como un requisito de calidad fundamental para el diseño del radar. Sin la precisión requerida en este nivel bajo, como se indica en el Cuadro 4-2, no puede lograrse la precisión del producto obtenida a nivel más elevado.

FIGURA 4-5
Esquemas de emisión asociados con la estrategia de exploración de la Fig. 4-4



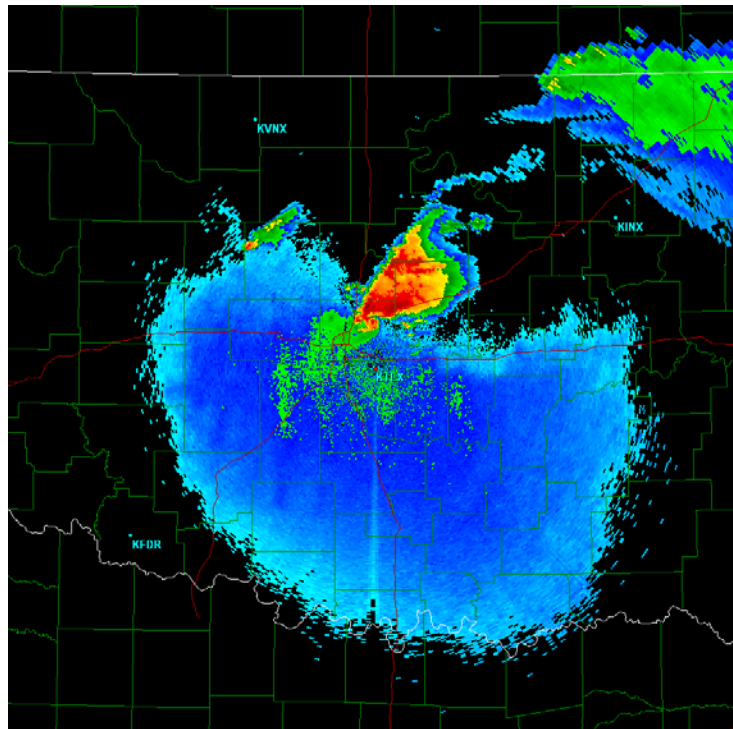
CUADRO 4-2
Requisitos de la precisión de los datos de base de
un radar meteorológico representativo

Producto de datos de base	Requisitos de precisión del diseño
Reflectividad de base	< 1 dB
Velocidad radial media	< 1 m/s
Anchura del espectro	< 1 m/s

4.2.7.1 Reflectividad de base

La reflectividad de base se utiliza en múltiples aplicaciones de radares meteorológicos, la más importante de las cuales es la estimación de la intensidad de lluvia. La reflectividad de base es la intensidad de los impulsos de retorno y se calcula determinando el valor medio lineal de la potencia de retorno. Toda interferencia que sufra el radar se añade a la potencia de los impulsos de retorno y deforma los valores de reflectividad. Las mediciones de reflectividad pueden resultar comprometidas si esta deformación rebasa los requisitos de precisión de los datos de base.

FIGURA 4-6
Representación de la reflectividad típica



Meteo-04-6

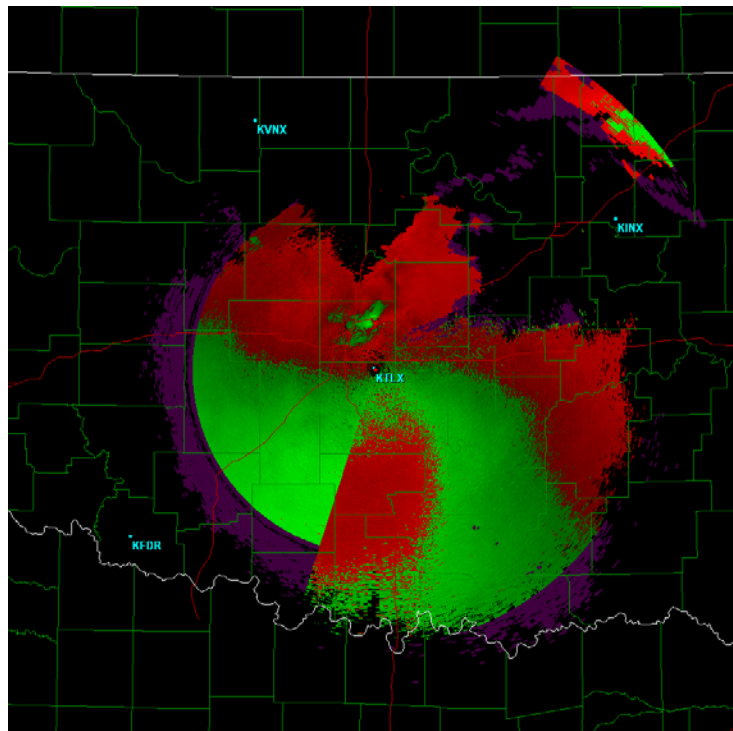
4.2.7.2 Velocidad radial media

La velocidad radial media también se conoce como velocidad Doppler media y representa la velocidad media ponderada por la reflectividad de los blancos en una determinada muestra de volumen. La velocidad radial media se refiere al primer momento de la densidad espectral; la velocidad radial se refiere a los datos de base. Se determina normalmente a partir de un gran número de impulsos sucesivos y se calcula a partir del argumento de la varianza compleja de retardo única. El argumento de la covarianza compleja proporciona una estimación del desplazamiento angular del vector de señal Doppler de impulso de radar a impulso de radar. La velocidad angular del vector Doppler es igual al desplazamiento dividido por el intervalo de tiempo entre impulsos. El espectro Doppler revela la reflectividad y la distribución de las velocidades ponderadas del radar en el volumen del radar.

4.2.7.3 Anchura del espectro

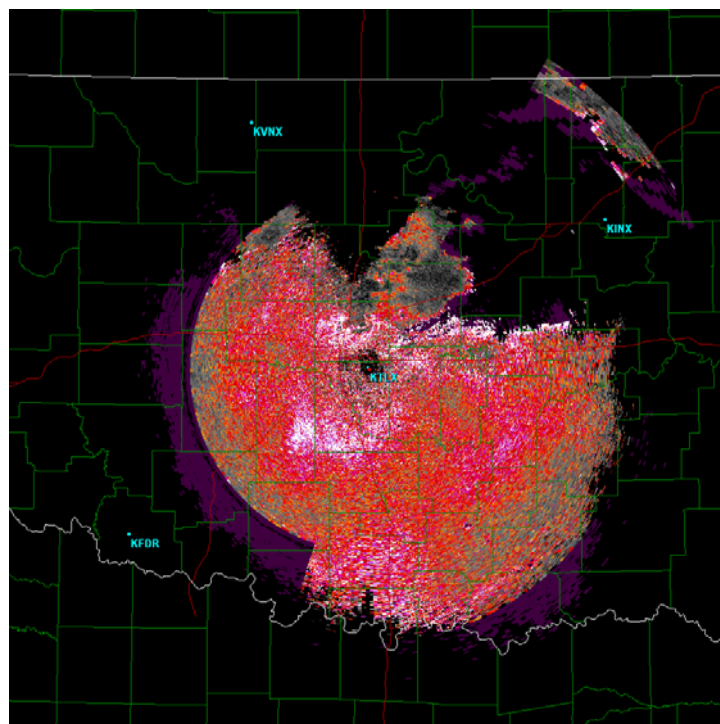
En el diseño de los radares meteorológicos, la anchura del espectro se calcula a partir de la simple correlación de retardos suponiendo una densidad espectral gaussiana. Es una medida de la dispersión de las velocidades dentro del volumen de muestra del radar y se trata de la desviación típica del espectro de velocidad. La anchura espectral depende de los gradientes de la reflectividad y la velocidad a lo largo del volumen del impulso y de la turbulencia dentro del volumen del impulso [Doviak y Zrnic 1984]. No se realiza ninguna promediación de las muestras utilizadas en los cálculos de anchura del espectro. Sin embargo, hay una acumulación de las partes real e imaginaria de la serie de muestras; es decir, las muestras tomadas a lo largo del radial.

FIGURE 4-7
Representación típica de la velocidad radial



Meteo-04-7

FIGURA 4-8
Representación típica de anchura del espectro



Meteo-04-8

4.2.7.4 Productos del radar meteorológico de polarización doble

4.2.7.4.1 Reflectividad diferencial

La reflectividad diferencial es un producto asociado a los radares meteorológicos polarimétricos y se trata de la relación entre los retornos de potencia reflejada horizontal y vertical. Entre otras cosas, es un buen indicador de la forma de la gota. A su vez, esta forma es una buena estimación del tamaño medio de la gota.

4.2.7.4.2 Coeficiente de correlación

El coeficiente de correlación es un producto del radar meteorológico polarimétrico y consiste en una correlación estadística entre los retornos de potencia reflejada horizontal y vertical. El coeficiente de correlación describe las similitudes en las características de retrodispersión de los ecos polarizados horizontalmente y verticalmente. Es un buen indicador de las regiones donde existe una combinación de tipos de precipitación, tales como lluvia y nieve.

4.2.7.4.3 Relación de despolarización lineal

Otro producto del radar polarimétrico es la relación de despolarización lineal que se trata de la relación del retorno de potencia vertical de un impulso horizontal o del retorno de potencia horizontal de un impulso vertical. Se trata igualmente de una buena indicación de las regiones donde se producen combinaciones de tipos de precipitación.

4.2.7.4.4 Fase diferencial específica

La fase diferencial específica también es un producto del radar meteorológico polarimétrico. Es una comparación de la diferencia de fases de retorno entre los impulsos horizontal y vertical. Esta diferencia de fases viene causada por la diferencia en el número de ciclos de onda (o longitudes de onda) a lo largo del trayecto de propagación para las ondas con polarización horizontal y vertical. No debe confundirse con el desplazamiento de frecuencia Doppler, que está provocado por el movimiento de la nube y de las partículas de precipitación. A diferencia de la reflectividad diferencial, en el coeficiente de correlación y en la relación de despolarización lineal, que dependen de la potencia reflejada, la fase diferencial específica es un «efecto de la propagación». También se trata de un buen estimador de la intensidad de lluvia.

4.2.7.5 Productos de datos derivados

Utilizando los productos de datos de base, el procesador elabora productos de datos derivados de nivel más elevado para el usuario del radar. Este documento no considerará detalladamente los productos de datos derivados pues estos productos varían de un radar a otro y el número de productos es bastante elevado. Para garantizar la precisión de los productos de datos derivados los productos de datos de base deben mantenerse con precisión.

4.2.8 Requisitos actuales y futuros del espectro

Como para un cierto número de aplicaciones radioeléctricas, la elección de la banda de frecuencias (o longitud de onda λ) se efectúa principalmente como un compromiso entre el alcance/reflectividad, que varía como λ^{-4} , la atenuación debida a la lluvia, que disminuye a medida que λ aumenta hasta llegar a ser despreciable para las longitudes de onda decimétricas, la precisión de los datos y el coste. Por ejemplo, la Banda Ka (en torno a 35 GHz, 8,6 mm de longitud de onda) es muy adecuada para la detección de gotas de agua pequeñas, como las que forman las nubes que no precipitan ($\leq 200 \mu\text{m}$) mientras que, por otro lado, la Banda S (2 700-2 900 MHz, 10 cm de longitud de onda) es más adecuada para detectar lluvia intensa a gran distancia (hasta 300 km) en climas tropicales y templados.

Generalmente se prefiere la Banda C (5 600-5 650 MHz, 5,4 cm de longitud de onda) para su utilización y climas templados ya que representa un compromiso importante entre los parámetros antes mencionados, permitiendo la detección de lluvia a grandes distancias (hasta 200 km) aunque su cuantificación se vería de hecho limitada por encima de 100 km y ofrecería la ventaja de un menor coste resultante de una potencia inferior y un menor tamaño de antena en comparación con los radares de frecuencias más bajas con la misma resolución espacial.

Los radares meteorológicos en la Banda X (9 300-9 500 MHz, 2,5-3,2 cm de longitud de onda) son más sensibles y pueden detectar partículas de menor tamaño pero, como experimentan una atenuación más intensa, se utilizan únicamente para observación meteorológica de muy corto alcance (unos 50 km). Estos radares se emplean para estudios de desarrollo de nubes debido a que pueden detectar pequeñas partículas de agua y también se utilizan para detectar precipitaciones ligeras tales como nieve. Además, debido a su reducido tamaño, los radares meteorológicos en la Banda X se utilizan a menudo como unidades portátiles móviles. 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 los radares de impulsos, el tiempo entre impulsos determina el máximo alcance⁴⁾ 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 máxima velocidad sin ambigüedad que el radar es capaz de medir. El diseño del radar queda limitado por el producto alcance-velocidad sin ambigüedad, que es una constante dada por:

$$R_m \cdot V_m = c \frac{\lambda}{8} \quad (4-11)$$

donde:

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

V_m : velocidad del radar sin ambigüedad (máxima velocidad 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 del máximo alcance y la máxima velocidad del radar. Una reducción de longitud de onda exige disminuir la capacidad de medición del alcance eficaz, de la velocidad eficaz o una combinación de ambas en la misma magnitud que el incremento de frecuencia. Para limitar el efecto de ambigüedad y mejorar el producto alcance-velocidad, los modernos radares meteorológicos, en particular los de Banda C, a menudo utilizan distintos esquemas de emisión que combinan diferentes PRF (véase el punto 4.2.4).

Se proporcionan 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.

4.2.9 Vulnerabilidad de los radares meteorológicos

Un radar meteorológico determina la distancia a los blancos 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. 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.

⁴⁾ El máximo alcance sin ambigüedad es la mayor distancia a la que puede desplazarse un impulso transmitido y volver al radar antes de que se transmita el siguiente impulso. En otras palabras, el máximo alcance sin ambigüedad es la máxima distancia que la energía del radar puede desplazarse en un viaje de ida y vuelta entre impulsos y seguir produciendo información fiable.

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.

4.2.9.1 Tipos de posible interferencia

La capacidad de los radares meteorológicos de determinar con precisión el estado actual de las condiciones atmosféricas puede degradarse debido a varias formas de interferencia que podrían limitar o, en el peor de los casos, incluso anular la capacidad de los radares para detectar la velocidad y dirección del viento a diversas altitudes así como para localizar y realizar el seguimiento de huracanes, tifones, tornados, temporales y otros tipos de fenómenos relativos a las tormentas. Debido a la sensibilidad de los radares, las señales interferentes pueden disminuir significativamente el comportamiento del radar meteorológico. Por consiguiente, es importante identificar los tipos de interferencia que pueden degradar las capacidades operacionales de los radares.

Las señales intrusivas constantes, variables en el tiempo y de tipo impulsivo son los tipos fundamentales de interferencia que pueden experimentar los radares meteorológicos. Una vez identificadas estas formas de interferencia, puede establecerse el máximo nivel de interferencia que pueden soportar los sistemas de radares meteorológicos antes de comprometer su capacidad de previsión.

Los niveles de los criterios de protección del radar para los radares meteorológicos figuran en las Recomendaciones UIT-R pertinentes y, en particular, puede señalarse un máximo valor de $I/N = -10$ dB en el caso de interferencia constante.

4.2.9.2 Repercusión de una interferencia constante

4.2.9.2.1 Cobertura geográfica

La interferencia constante puede disminuir el alcance del radar, lo que limita la zona geográfica de cobertura debido al correspondiente incremento del ruido. La cobertura actual de los radares meteorológicos se extiende aproximadamente hasta 200 km. El Cuadro 4-3 resume las pérdidas en alcance y cobertura a medida que crece la interferencia (ruido).

4.2.9.2.2 Intensidad de lluvia

La interferencia constante también provoca un incremento de la energía recibida por el radar que puede repercutir en la medición de la reflectividad asociada con diversos tipos de precipitación (por ejemplo, lluvia, nieve y granizo). El Cuadro 4-4 resume el porcentaje de incremento para varios eventos de precipitación a medida que aumenta la interferencia (ruido).

CUADRO 4-3
Pérdidas en alcance y cobertura

Incremento de ruido (dB)	I/N correspondiente (dB)	Pérdidas de cobertura (km)	Pérdida de cobertura (% con respecto a la superficie total)
0,5	-10	11	11%
1	-6	22	21%
2	-2,3	42	38%
3	0	59	50%
4	1,8	75	61%
5	3,3	88	69%
6	4,7	100	75%
7	6	111	80%
8	7,3	121	84%
9	8,4	130	88%
10	9,5	137	90%

CUADRO 4-4
Aumento de la intensidad de precipitación

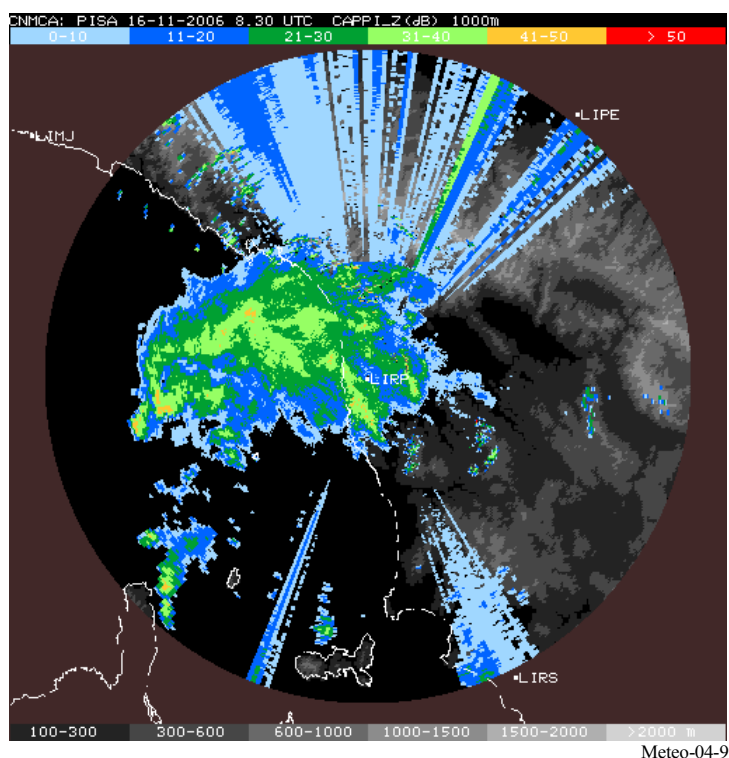
Incremento de ruido (dB)	I/N correspondiente (dB)	Incremento de la intensidad de estratoforma (%)	Incremento de la tasa de convección (%)	Incremento de la intensidad de nieve (%)	Incremento de la intensidad de granizo (%)
0,5	-10	7,5	8,0	5,9	9,3
1	-6	15,5	16,6	12,2	19,5
2	-2,3	33,4	35,9	25,9	42,9
3	0	54,0	58,5	41,3	70,8
4	1,8	77,8	84,8	58,5	104,2
5	3,3	105,4	115,4	77,8	144,1
6	4,7	137,1	151,2	99,5	191,8
7	6	173,8	192,9	123,9	248,8
8	7,3	216,2	241,5	151,2	317
9	8,4	265,2	298,1	181,8	398,5
10	9,5	321,7	364,2	216,2	495,9

Conviene señalar que un incremento de la interferencia no modificaría la capacidad de los radares de detectar células de lluvia (es decir, una medición no considerada como una célula de lluvia seguiría sin ser considerada como tal célula) sino que tendría solamente repercusiones en la intensidad de lluvia medida.

También es interesante señalar que para las pérdidas de cobertura o una sobrestimación de la intensidad de lluvia, el actual criterio de protección acordado de $I/N = -10$ dB representa una degradación en el comportamiento del radar en la gama del 7 al 11%, comparable a los porcentajes de degradación de comportamiento generalmente admitidos para todos los servicios de radiocomunicaciones.

En la Fig. 4-9 puede observarse un ejemplo de la repercusión de una interferencia constante sobre un radar en modo precipitación. Es importante destacar que aunque sea una interferencia constante, la variación en la repercusión se debe al giro de la antena y la máxima interferencia (de color verde en la imagen) se produce en el acimut de la fuente de interferencia.

FIGURA 4-9
Ejemplo de interferencia en modo precipitación de un radar meteorológico



4.2.9.2.3 Medición del viento

En el caso de mediciones Doppler, la evaluación de la repercusión de una interferencia constante determinada es algo diferente y depende en particular de la manera en que la fase de la señal interferente modifique la fase de la señal deseada influenciando de esa forma la medición del viento correspondiente.

Esta última hipótesis no es evidentemente trivial de determinar y dependerá de la señal y/o del medio ambiente. No obstante, se propone considerar las diferentes situaciones de un modo teórico:

- *Caso 1* – Si la fase de la señal interferente detectada por el radar es aleatoria, ello significa que el vector resultante sería estadísticamente nulo, cualquiera que sea su nivel. Por tanto, teóricamente no habría ninguna repercusión en las mediciones del viento.
- *Caso 2* – Por el contrario, si la fase detectada no es aleatoria y es casi constante, daría lugar a un vector constante con un cierto módulo y la repercusión en la medición del viento dependerá tanto de la fase como del módulo de dicho vector. Sin embargo, determinar dicha repercusión, incluso para un nivel de referencia constante, probablemente no será una tarea fácil y, en consecuencia, no se aborda en este texto.

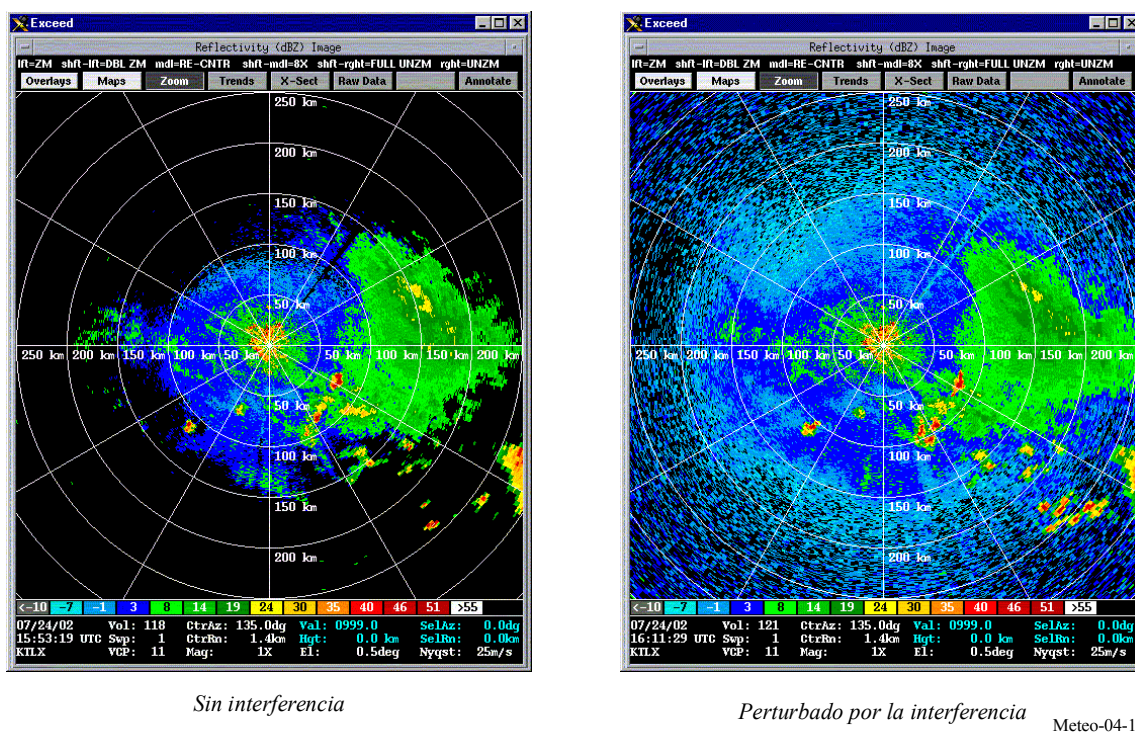
Además, puede suponerse que cuando el nivel de interferencia es muy inferior al de la señal deseada, la fase de esta última no resulta modificada mientras que, por el contrario, si la señal interferente es mucho más elevada, la fase detectada por el radar será la fase de la señal interferente. En esta última situación, seguirá siendo válido lo indicado en los Casos 1 y 2 anteriores. Entre estas dos situaciones, es decir cuando los niveles de las señales interferente y deseada son similares, parece bastante difícil determinar qué señal controlará la detección de fase.

4.2.9.3 Repercusión de la interferencia impulsiva

La interferencia impulsiva puede tener una influencia significativa sobre los datos de reflectividad que utilizan los meteorólogos para predecir importantes fenómenos climatológicos. En algunos casos la interferencia impulsiva puede dar lugar a un retorno de datos de los que no puede extraerse con fiabilidad una imagen de los blancos en la atmósfera. Un ejemplo de esta situación puede verse en la Fig. 4-10.

FIGURA 4-10

Comparación entre los modos de precipitación de un radar meteorológico sin interferencia y perturbados por la interferencia



4.2.9.4 Interferencia procedente de parques eólicos

En los últimos años, cada vez se construyen turbinas de viento (aerogeneradores) de mayor tamaño debido en parte a las eficacias logradas en los generadores, al interés de aprovechar mejor los vientos, a los parques eólicos de nivel más elevado, etc. Evidentemente, el incentivo económico es la principal fuente impulsora y un detenido análisis ha proporcionado las bases para diseñar turbinas de viento más grandes. Un aerogenerador típico consta de un mástil, un soporte, un rotor y tres aspas. Una instalación eólica típica de generación de energía eléctrica, o parque eólico, está constituida por varios generadores eólicos. Los aerogeneradores y los parques eólicos, incluso a muy largas distancias, presentan un elevado potencial de degradación de los datos meteorológicos a lo largo de zonas muy amplias y podrían tener una repercusión muy significativa en las previsiones meteorológicas a largo, medio y corto plazo.

A fin de lograr previsiones meteorológicas precisas, los radares meteorológicos se diseñan para que estén dirigidos a una banda de altitud relativamente estrecha. Debido a la sensibilidad de los radares, si se instalan aerogeneradores en línea de visibilidad directa con radares meteorológicos, pueden reducir significativamente la calidad de funcionamiento de dichos radares. Existen tres mecanismos a través de los cuales puede degradarse esta calidad de funcionamiento: enmascaramiento, eco y retrodispersión.

4.2.9.4.1 Enmascaramiento

Todo obstáculo geográfico o estructura que se encuentre entre el radar y el blanco provocará un apantallamiento o efecto de enmascaramiento. Es posible que, dependiendo de su tamaño, los aerogeneradores puedan causar efectos de sombra. Cabe esperar que estos efectos varíen según las dimensiones del aerogenerador, del tipo de radar transmisor y de la orientación del aerogenerador con respecto al radar.

4.2.9.4.2 Eco

Los retornos del radar pueden ser recibidos por cualquier superficie reflectora del radar. En algunas zonas geográficas, o bajo condiciones meteorológicas particulares, el comportamiento del radar puede resultar muy afectado por retornos no deseados que pueden enmascarar los retornos de interés. Tales señales de retorno no deseadas se conocen con el nombre de eco del radar. Para realizar previsiones meteorológicas, los aerogeneradores o las turbinas en las proximidades de un radar meteorológico pueden causar problemas operacionales.

Las señales de ecos en el suelo presentan una gran reflectividad, un desplazamiento Doppler casi nulo y una pequeña anchura de espectro, y están permanentemente localizadas. En comparación con los ecos en el suelo que aparecen normalmente, la interferencia causada por los aerogeneradores representan un reto mucho más difícil de abordar. Las reflexiones directas pueden recibirse tanto desde la torre (estacionaria) como desde las aspas (no estacionarias). Al igual que el eco del suelo, la señal del eco del aerogenerador (WTC, *wind turbine clutter*) seguirá teniendo una reflectividad significativamente elevada, con una posible modulación debido al giro de las aspas lo que puede causar una variación sistemática en la sección transversal del radar.

El desplazamiento Doppler resultará afectado por varios factores, incluida la velocidad de rotación de las aspas y la orientación del rotor con respecto al haz del radar. Las velocidades Doppler deben ser máximas cuando el rotor está orientado a 90° con respecto a la línea de visibilidad del radar y casi cero cuando el rotor está frente al radar o detrás de él. Como el volumen de resolución del radar probablemente englobará toda la estructura del aerogenerador, cabe esperar que la anchura de espectro aumente significativamente. Ello se debe al giro de las aspas en la misma dirección y en dirección opuesta del radar. Si existen múltiples turbinas dentro de un volumen de resolución se exacerbará este efecto.

4.2.9.4.3 Energía retrodispersada por remolinos turbulentos

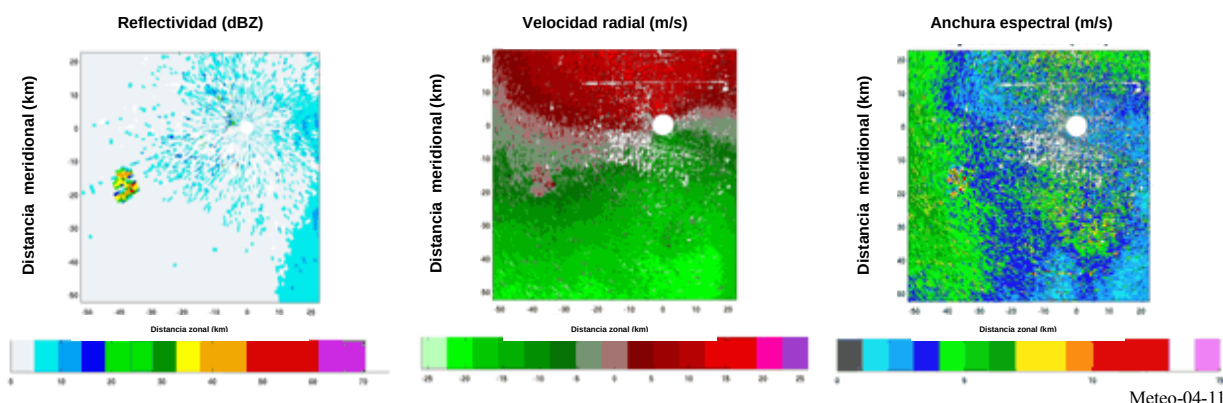
Además de las señales WTC causadas por reflexiones procedentes de aerogeneradores reales, puede observarse una retrodispersión de energía provocada por remolinos turbulentos procedentes del parque eólico. Cabe esperar que estos ecos presenten características similares a la retrodispersión en cielo despejado causada por discontinuidades en el índice de refracción en la escala de Bragg del radar. Estos ecos se desplazarían con el viento y probablemente tendrían una reflectividad mucho menor en comparación con las reflexiones directas procedentes de las turbinas. No obstante podrían incrementar significativamente la zona de cobertura del radar afectada por WTC y por consiguiente exacerbar el problema.

4.2.9.4.4 Ejemplos de eco del aerogenerador

En la Fig. 4-11 aparecen dos ejemplos distintos de interferencia producida por parques eólicos⁵⁾ [Palmer e Isom, 2006]. Como cabía esperar, la reflectividad presenta grandes valores cerca de 45 dB_Z con anchuras de espectro esporádicamente elevadas de más de 10 m/s . La región relativamente pequeña de elevada reflectividad situada hacia el sudoeste del radar es claramente visible y coincide con la ubicación de un parque eólico que se encuentra a unos 45 km del emplazamiento de los radares meteorológicos.

FIGURA 4-11

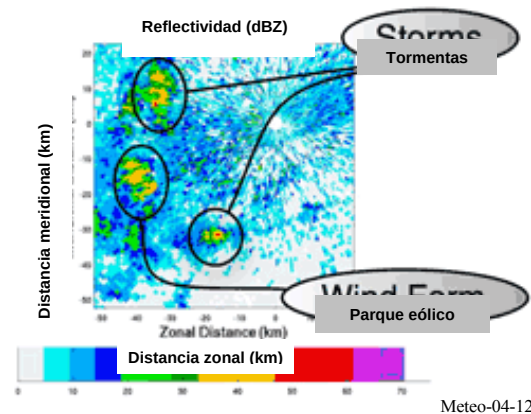
Ejemplos de interferencia causada por un parque eólico a un radar meteorológico en condiciones de cielo despejado



⁵⁾ Los parques eólicos son agrupaciones de turbinas eólicas (aerogeneradores) utilizadas para generar energía eléctrica.

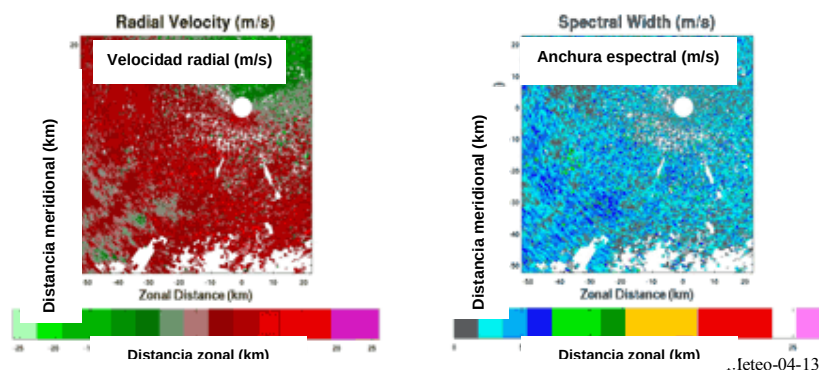
La Fig. 4-12 muestra ese mismo parque eólico durante una tormenta.

FIGURA 4-12
Ejemplo de interferencia causada por un parque eólico y su repercusión
en la reflectividad durante un incidente aislado de tormenta



Sin previo conocimiento, sería extremadamente difícil distinguir entre el WTC y la tormenta. Como las aspas giran hacia el radar y alejándose del radar, cabe esperar una velocidad Doppler media casi nula. Evidentemente, las anchuras de espectro elevadas reducirán la precisión de las estimaciones de velocidad Doppler como ilustra la Fig. 4-13 para pequeñas desviaciones con respecto al cero.

FIGURA 4-13
Ejemplos de estimaciones de datos de velocidad Doppler durante una tormenta



4.2.9.4.5 Repercusión del WTC en el funcionamiento de un radar meteorológico y en la precisión de las previsiones meteorológicas

Los estudios de campo que se han llevado a cabo recientemente ilustran la repercusión del WTC sobre los radares meteorológicos. Estos estudios han demostrado que los parques eólicos pueden tener un efecto muy significativo en los radares meteorológicos y degradar la precisión con que se detectan fenómenos meteorológicos importantes.

Estos análisis han demostrado claramente que el eco producido por un aerogenerador estará presente en un gran sector (varias decenas de grados) comparado con la dirección del aerogenerador, incluso a grandes distancias. Por consiguiente, no puede despreciarse la repercusión de estos aerogeneradores sobre el funcionamiento de reflectividad de los radares meteorológicos.

En particular, los análisis han puesto en evidencia que la repercusión de un solo aerogenerador sobre los radares meteorológicos funcionando en modo Doppler es muy significativa incluso a distancias de varias decenas de kilómetros. También puede señalarse que a distancias inferiores a 10 km, todos los datos del radar serán erróneos para cualquier acimut, incluso a 180° del sector en el que se encuentra el parque eólico.

Es preciso tomar algunas medidas para reducir el WTC con objeto de proteger los radares meteorológicos contra la interferencia perjudicial causada por los parques eólicos. Antes de llegar a conclusiones definitivas sobre los métodos de actuación para disminuir el WTC, deben realizarse estudios adicionales sobre este fenómeno a fin de comprender la magnitud e influencia del WTC sobre los radares meteorológicos. Una vez definidas, puede que sea necesario elaborar métodos para reducir el WTC teniendo en cuenta el crecimiento esperado de los sistemas de generación de energía eólica.

A la espera de los resultados de los estudios en curso sobre reducción de la interferencia WTC causada a los radares meteorológicos, la solución actual para evitar o limitar la repercusión de los parques eólicos consiste en garantizar unas distancias de separación determinadas entre los dos sistemas. Por ejemplo, algunos países europeos están considerando actualmente las siguientes recomendaciones:

- 1) No instalar ningún aerogenerador a una distancia de la antena del radar inferior a:
 - 5 km para radares en la banda C
 - 10 km para radares en la banda S.
- 2) Que los proyectos de parques eólicos se sometan a un estudio de posibles repercusiones en distancias inferiores a:
 - 20 km para radares en la banda C
 - 30 km para radares en la banda S.

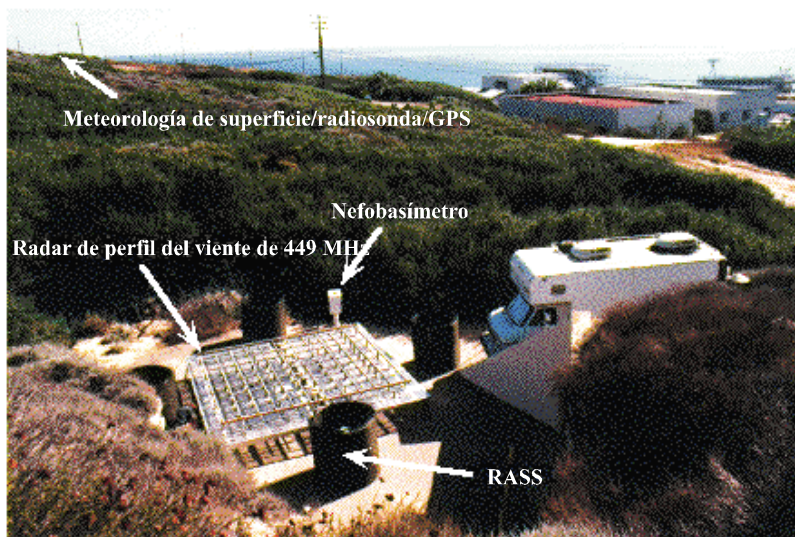
4.2.10 Vulnerabilidad de los sistemas que comparten espectro con radares meteorológicos

Como se ha indicado anteriormente, la potencia del transmisor y la ganancia de antena de los radares meteorológicos suelen ser lo suficientemente elevadas para compensar la mayor longitud de los trayectos (normalmente en torno a 100 dBW de p.i.r.e. de cresta). Estas características tienden a aumentar la distancia en la que el radar puede interferir a sistemas que funcionan en la misma frecuencia (respetando la anchura del canal del radar). También se han dado casos en los que el radar y los enlaces fijos de microondas, que han coexistido durante algún tiempo, resultaron incompatibles cuando el sistema de microondas se actualizó dejando de utilizar equipos analógicos para utilizar equipos digitales que presentan una mayor sensibilidad a la interferencia impulsiva.

4.3 Radares de perfil del viento (WPR)

Los radares de perfil del viento (WPR, *wind profiler radars*) se utilizan para obtener perfiles verticales del viento en emplazamientos desatendidos, y a veces remotos, detectando minúsculas fracciones de la potencia emitida devueltas por la turbulencia en atmósfera despejada. La Fig. 4-14 es una fotografía de una instalación típica de un radar de perfil del viento.

FIGURA 4-14
Fotografía de una instalación de radar de perfil del viento



Una de las mayores ventajas de los radares de perfil del viento con respecto a otros sistemas de medición del viento es su capacidad de supervisar continuamente los campos de viento. Además, también pueden utilizarse para detectar las precipitaciones, medir las principales perturbaciones en el campo de velocidad vertical (ondas de gravedad y corrientes ascendentes convectivas), medir la intensidad de la turbulencia y medir la estabilidad atmosférica. Igualmente pueden proporcionar información detallada sobre la temperatura virtual de la atmósfera mediante la adición de un sistema de sondeo acústico por radar (RASS, *radar acoustic sounding system*)⁶⁾.

4.3.1 Requisitos de usuario

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]:

$$SNR = \text{const} \frac{\bar{P}_t A_e \Delta_z \lambda^{1/6} t_{obs}^{1/2}}{T_{sys}} \frac{C_n^2}{z^2} \quad (4-12)$$

donde:

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

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.

⁶⁾ El RASS utiliza una fuente acústica adaptada en frecuencia de manera que la longitud de onda de la señal acústica se adapta a la mitad de la longitud de onda electromagnética transmitida por el radar. El RASS mide la velocidad de la onda acústica que depende de la temperatura. De esta forma el RASS proporciona medición a distancia de la temperatura virtual atmosférica.

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.

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 (4-13):

$$A_e = 10^{G/10} \lambda^2 / 4\pi \quad (4-13)$$

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 lanzamientos 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.

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

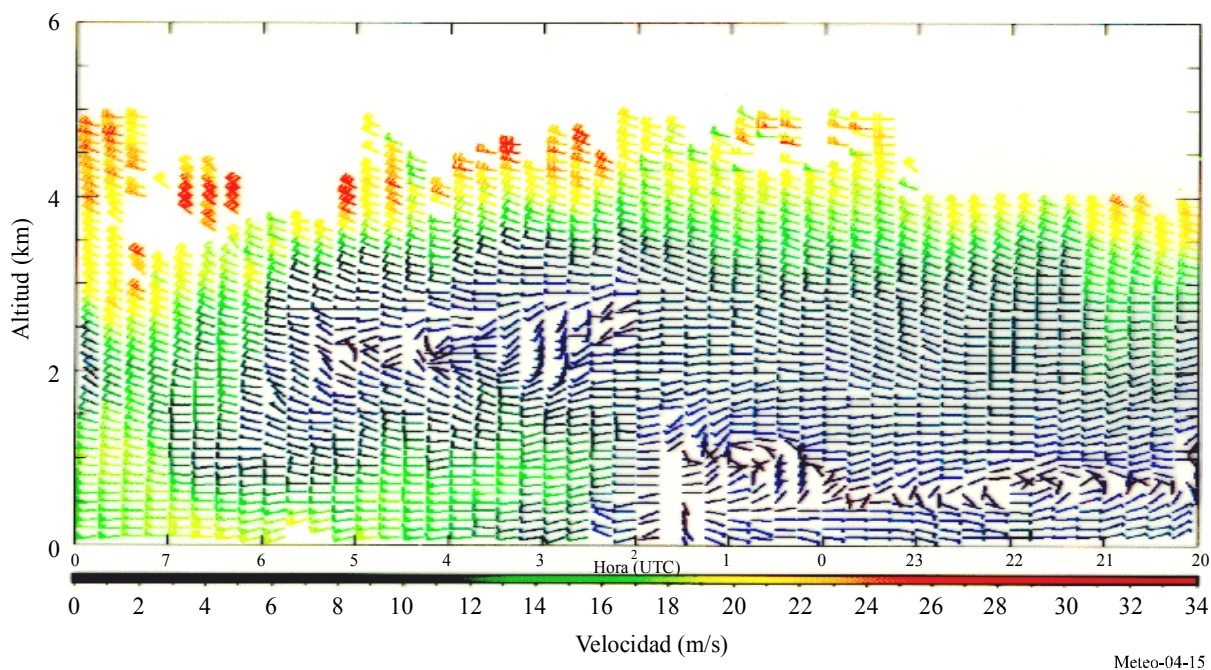
- medir los perfiles del viento entre 0,5-16 km aproximadamente por encima del radar con resoluciones verticales de 250 m a baja altitud y 1 000 m a alta altitud utilizando antenas de 32 dBi de ganancia aproximadamente;
- potencias medias de 500 W y 2 000 W aproximadamente para el sondeo a baja y gran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

Aumentando la frecuencia operacional de un radar de perfil del viento se obtiene mayor grado de resolución en la medición a costa de disminuir las mediciones de altura global. Por consiguiente, los radares de perfil del viento que funcionan a 915 MHz y en la banda 1 270-1 375 MHz se consideran típicamente como osciladores de capas limítrofes, capaces de medir el perfil del viento sólo en los primeros kilómetros de la atmósfera. Éstos funcionan con resoluciones verticales de unos 100 m utilizando antenas de ganancias inferiores a 30 dBi y potencias medias de unos 50 W aunque funcionando con las anchuras de banda necesarias de 8 MHz o más.

En la Fig. 4-15 se representa, como ejemplo, el gráfico de la velocidad del viento en función de la altitud que se obtuvo de un sistema de radar de perfil del viento móvil funcionando a 924 MHz. La orientación de cada bandera representa la dirección del viento en función de la altitud (eje vertical) y el tiempo (eje horizontal), mientras que su color representa la velocidad del viento.

FIGURA 4-15
Velocidad del viento en función de la altitud



4.3.3 Requisitos espectrales actuales y futuros

Los radares de perfil del 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 radares de perfil del viento. Por consiguiente, una red asequible de estos radares, 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 estos motivos, los radares de perfil del viento suelen ser compatibles con la mayoría de los servicios situados en tierra.

Es bien sabido que se necesitan anchuras de banda de 2 a 3 MHz en las proximidades de 400 MHz y de 8 a 10 MHz en las proximidades de 1 000 MHz o 1 300 MHz y puede suponerse que las disposiciones de la Resolución 217 (CMR-97), indicadas a continuación, son suficientes para satisfacer estos requisitos:

«... 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 nociones 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 incompatibilidad entre los radares de 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.»

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 detenidamente para reducir al mínimo la probabilidad de interferencia entre los usuarios de estas bandas. Antes de identificar las bandas para los radares de perfil del viento se desarrolló una red experimental en la banda 400,15-406 MHz. Esta experiencia operacional demostró que el funcionamiento de los radares de perfil del viento en dicha banda 400,15-406 MHz provocaba interferencia al sistema COSPAS-SARSAT.

Como resultado, la Resolución 217 (CMR-97) indica específicamente que los radares de perfil del viento no deben funcionar en la citada banda de 400,15-406 MHz. La existencia de esta red experimental proporcionó considerable información sobre la compatibilidad de los radares de perfil del viento con otros servicios. La densidad espectral de p.i.r.e. de estos radares 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 del trayecto proporcionales a $1/r^4$ para la propagación por la superficie de la Tierra, 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 de radar de perfil del viento audible a 3 km de distancia sobre una pradera.

Sin embargo, en el haz principal, la densidad espectral de p.i.r.e. es 57 dB mayor y, en consecuencia, los receptores a bordo de aviones y satélites están sujetos a niveles de interferencia muy superiores. Las pérdidas de trayecto proporcionales a $1/r^2$ agravan el problema. Los esfuerzos subsiguientes para aminorar el problema con los radares de perfil del viento en la banda 400,15-406 MHz pusieron de manifiesto que la modulación utilizada por estos radares en 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. Sin embargo, 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 por un factor de 64. Así, los transmisores de los perfiladores se desconectaban bajo control mediante un ordenador cuando aparecía el satélite del 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.)

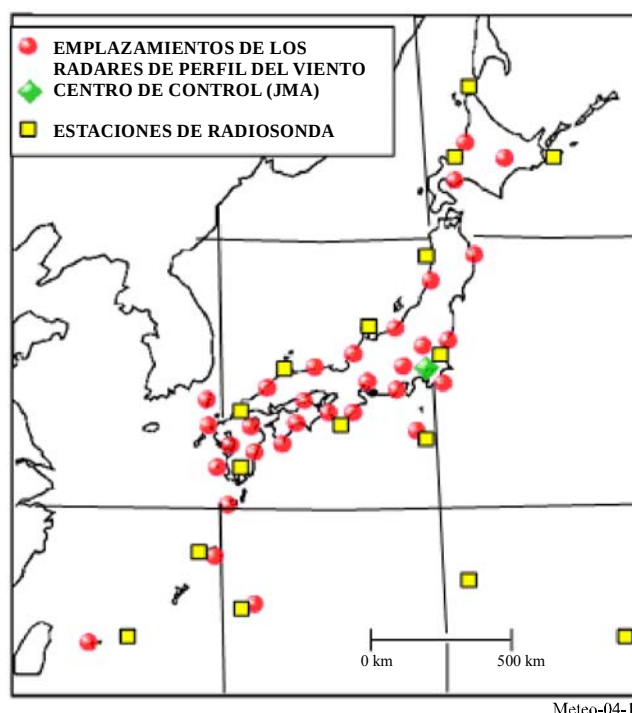
La codificación de fase aplicada a las emisiones del perfilador de 404 MHz deben «deshacerse» en el receptor. Por ello, la interferencia de otros sistemas distintos a los radares de perfil del viento aparece incoherente y como ruido para el radar perfilador. Por consiguiente, la mínima señal detectable (perfilador) es de unos -170 dBm, mientras que la interferencia sólo es problemática a niveles de -135 dBm o superiores.

La Resolución 217 (CMR-97) identifica el espectro que deben utilizar los radares de perfil del viento. Se aconseja la adopción 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.

Como otro ejemplo de compartición con los radares de perfil del viento, la banda 1215-1300 MHz fue atribuida al servicio de radionavegación por satélite en la CMR-2000. Desde entonces, se han realizado algunos estudios técnicos para evaluar la compatibilidad entre estos sistemas del SRNS y los radares de perfil del viento que funcionan en la banda 1270-1295 MHz. Los resultados de estos estudios figuran en el Informe 90 de ECC. Este Informe llega a la conclusión de que, en algunas condiciones, los sistemas del SRNS podrían interferir y degradar el funcionamiento de los radares de perfil del viento, al menos en el caso de radares con tres haces. No obstante, este Informe indica un cierto número de técnicas de reducción de la interferencia (por hardware o software) que podrían ayudar a superar estas dificultades. Algunas de estas técnicas incluyen la selección de puntería de la antena, la adición de haces o la implementación de radares de perfil del viento a las frecuencias de 1274 ó 1294 MHz, en los nulos de las modulaciones del SRNS, siendo este último método probablemente el más sencillo de aplicar.

La Agencia de Meteorología de Japón (JMA) explota una red de radares de perfil del viento y un sistema de adquisición de datos (WINDAS) para supervisar y predecir el desarrollo de fenómenos atmosféricos violentos. La red consta de treinta y un radares de perfil del viento de 1,3 GHz instalados a lo largo de Japón que se comunican con un centro de control ubicado en la sede central de la JMA en Tokio (Fig. 4-16).

FIGURA 4-16
Ejemplo de una red de radares de perfil del viento



Meteo-04-16

Los datos procedentes de este sistema se han utilizado como valores iniciales en los modelos numéricos de predicción meteorológica de JMA desde junio de 2001, para llegar a predecir fenómenos atmosféricos violentos. Los datos se combinan con los procedentes de los radares Doppler y las aeronaves comerciales para proporcionar un «análisis completo de los vientos de la atmósfera superior». Este análisis se difunde por todo el mundo a través del sistema mundial de telecomunicaciones y también figura en la dirección web de JMA (<http://www.jma.go.jp/jp/windpro/>).

Referencias

- DOVIK, R. J. y ZRNIC, D. S. [1984] *Doppler radar and weather observations*. Academic Press, Inc., San Diego, Estados Unidos de América.
- GOSSARD, E. E. y STRAUCH, R. G. [1983] *Radar Observation of Clear Air and Clouds*. Elsevier, Nueva York, Estados Unidos de América, 280 páginas.
- PALMER, R. y ISOM, B. [Febrero de 2006] Mitigation of Wind Turbine Clutter on the WSD88D Network. School of Meteorology. University of Oklahoma, Radar Operations Center Presentation.

Texto del UIT-R

Recomendación UIT-R M.1464-1 – Características de los radares de radiolocalización y características y criterios de protección para estudios de compartición de los radares de radionavegación aeronáutica y meteorológicos en el servicio de radiodeterminación que funcionan en la banda de frecuencias 2 700-2 900 MHz (2002).

Bibliografía

- DIBBERN, J., MONNA, W., NASH, J. y PETERS, G. (Ed.) [Marzo de 2000] COST Action 76. Development of VHF/UHF wind profilers and vertical sounders for use in European observing systems, Final Report. European Commission, Directorate-General Science, Research and Development.
- DOVIK, R. J. y ZRNIC, D. S. [1993] *Doppler radar and weather observations*. Academic Press, Inc., San Diego, Estados Unidos de América.
- DOVIK, R., ZRNIC, D. y SIRMANS, D. [Noviembre de 1979] Doppler Weather Radar. *Proc. IEEE*, Vol. 67, 11.
- Intercomparison of Techniques to Correct for Attenuation of C-Band Weather Radar Signals. *J. Applied Meteorology*: Vol. 37, 8, p. 845–853.
- LAW, D. y otros. [Marzo de 1994] Measurements of Wind Profiler EMC Characteristics, NTIA Informe 93-301, 63 páginas. National Telecommunications and Information Administration.
- MAMMEN, T. [1998] Weather radars used by members, WMO instruments and observing methods, Informe N.º 69.
- MCLAUGHLIN, D. J., CHANDRASEKAR, V., DROEGEMEIER, K., FRASIER, S., KUROSE, J., JUNYENT, F., PHILIPS, B., CRUZ-POL, S. y COLOM, J. [Enero de 2005] Distributed Collaborative Adaptive Sensing (DCAS) for Improved Detection, Understanding, and Prediction of Atmospheric Hazards. Ninth Symposium on Integrated Observing and Assimilation Systems for the Atmosphere, Oceans, and Land Surface (IOAS-AOLS), American Meteor. Society.
- SESSIONS, W. B. [Diciembre de 1995] SARSAT 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 Guide to meteorological instruments and methods of observation, No. 8, World Meteorological Organization.

CAPÍTULO 5

TELEDETECCIÓN PASIVA Y ACTIVA A BORDO DE VEHÍCULOS
ESPACIALES PARA ACTIVIDADES METEOROLÓGICAS

Página

5	Introducción	62
5.1	La teledetección radiométrica pasiva de microondas	63
5.1.1	Requisitos espectrales	64
5.1.2	Observaciones de las características de la superficie terrestre	66
5.1.2.1	Observación de la superficie de los océanos	66
5.1.2.2	Observación sobre la superficie terrestre	67
5.1.2.3	Parámetros auxiliares de otros instrumentos de teledetección	68
5.1.3	Parámetros de calidad de funcionamiento	69
5.1.3.1	Sensibilidad radiométrica	69
5.1.3.2	Umbral del radiómetro ΔP	69
5.1.3.3	Resolución geométrica	69
5.1.3.4	Tiempo de integración	69
5.1.4	Típicas condiciones de funcionamiento de los sensores pasivos	69
5.1.4.1	Satélites en órbita terrestre baja	69
5.1.4.2	Satélites geoestacionarios	70
5.1.5	Principales características técnicas	70
5.1.6	Criterios de calidad de funcionamiento y de interferencia	71
5.1.7	Medición tridimensional de parámetros atmosféricos	71
5.1.7.1	Sondas atmosféricas verticales pasivas de microondas	72
5.1.7.2	Mecanismo del sondeo atmosférico vertical	73
5.1.7.3	Utilización del sondeo atmosférico vertical	75
5.1.7.4	Características de los sensores pasivos orientados al nadir funcionando en la gama de 60 GHz	76
5.1.7.5	Sondas pasivas de limbo de microondas	77
5.1.7.6	Vulnerabilidad de las ondas pasivas de microondas a la interferencia	79
5.2	Sensores activos	79
5.2.1	Introducción	79
5.2.2	Radares de abertura sintética (SAR)	80
5.2.3	Altímetros	82
5.2.4	Dispersímetros	83
5.2.5	Radares de precipitación	84
5.2.6	Radares de perfil de nubes	85
5.2.7	Criterios de interferencia y de calidad de funcionamiento de los sensores	86
5.2.8	Niveles de densidad de flujo de potencia (DFP)	86

5 Introducción

La existencia de los satélites meteorológicos es sobradamente conocida en la mayor parte del mundo y las imágenes que transmiten se muestran regularmente en la televisión, en la prensa y en Internet. La mayoría de la gente, por tanto, está acostumbrada a ver imágenes 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*.

La mayoría de estas imágenes tienen en común el hecho de que han sido generadas utilizando fundamentalmente datos registrados mediante sensores en las regiones visibles e infrarroja del espectro de frecuencias que muchos profanos consideran «luz» y no «radiocomunicaciones». Sin embargo, la mayoría de estos productos y otros productos que el público no ve regularmente se generan utilizando una gran variedad de frecuencias de microondas, de manera independiente o en combinación con otras mediciones.

Por consiguiente, no es muy conocido el hecho de que la teledetección a bordo de vehículos espaciales de la superficie de la Tierra y la atmósfera, utilizando frecuencias radioeléctricas, desde las ondas métricas pasando por las microondas hasta las regiones superiores del espectro, desempeñan un papel fundamental y cada vez más importante en la meteorología operacional y de investigación, en particular para reducir el impacto de las catástrofes debidas al clima y a los fenómenos meteorológicos y en la comprensión, observación y predicción científica del cambio climático y sus repercusiones.

Los enormes progresos realizados en los últimos años en los análisis y previsiones meteorológicas y del clima, incluidos los avisos de fenómenos climatológicos peligrosos (lluvias torrenciales, tormentas, ciclones) que afectan a todas las poblaciones y economías, se deben en gran medida a las observaciones realizadas a bordo de vehículos espaciales y su representación mediante modelos numéricos.

Hay dos clases de teledetección a bordo de vehículos espaciales ampliamente utilizadas, **pasiva** y **activa**, que funcionan en el servicio de exploración de la Tierra por satélite (SETS).

La **teledetección pasiva** utiliza solamente receptores, no habiendo transmisores de ningún tipo. La radiación que estos receptores pretenden captar se produce espontáneamente, normalmente con niveles de potencia muy bajos, y contiene información esencial sobre los procesos físicos que se están investigando. 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 en 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 evidentes) y, en su caso, la cantidad y ubicación de los mismos. Puede obtenerse una gran diversidad de información sobre el medio ambiente utilizando sensores pasivos, en bandas de frecuencias que vienen determinadas únicamente por propiedades físicas fijas (resonancia molecular) y que no pueden, por consiguiente, cambiarse o ignorarse, ni pueden duplicarse estas propiedades físicas en otras bandas. La intensidad de la señal a una frecuencia específica puede depender de diversas variables, lo que implica utilizar distintas frecuencias para determinar las diferentes incógnitas. La utilización de varias frecuencias es la técnica primordial para medir las diversas características de la atmósfera y de la superficie de la Tierra.

La **teledetección activa** difiere de la teledetección pasiva en que intervienen tanto transmisores como receptores a bordo de satélites. Normalmente se transmite una señal y la señal reflejada es recibida por el mismo satélite. La aplicación de la teledetección activa se extiende desde la medición de las características de la superficie del mar, tales como los vientos y la altura de las ondas marinas, hasta la determinación de la densidad forestal de los bosques tropicales.

La cuestión de compatibilidad entre ambas clases de teledetección plantea los mismos problemas que los de otros servicios espaciales: 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 el empleo de técnicas sobradamente conocidas que suelen implicar la coordinación con otros usuarios en términos de limitación de potencia, características de antena y compartición en el tiempo y en la frecuencia.

Una forma de vulnerabilidad peculiar de los satélites para la teledetección pasiva, y particularmente para los que proyectan una gran huella sobre la superficie terrestre, deriva del hecho de estar sujetos a la radiación acumulada de una multitud de emisores en tierra, tanto emisiones en banda como emisiones fuera de banda. Por consiguiente, si bien un solo emisor terrenal puede que no radie suficiente potencia como para causar daños, un gran número de estos emisores puede resultar pernicioso para las mediciones que deben realizarse, teniendo en cuenta la combinación de sus señales. Este hecho es el que suscita la preocupación actual en relación con las emisiones de los sistemas del servicio fijo de alta densidad (HDSF, *high density fixed service*), las aplicaciones de banda ultraamplia (UWB, *ultra wide-band*) y los dispositivos de corto alcance (SRD, *short-range devices*) o industriales científicos y médicos (ICM). La raíz del problema es la densidad espacial de dichos emisores y no las características individuales de cada uno de ellos. La situación es cada vez más crítica porque está aumentando la densidad de tales dispositivos activos terrenales y ya se han informado de casos de intensa interferencia.

Varios parámetros geofísicos contribuyen, a diversos niveles, a estas emisiones naturales que pueden observarse a una frecuencia determinada con propiedades únicas. Por lo tanto, las mediciones a diversas frecuencias en el espectro de las microondas deben realizarse simultáneamente para aislar y recuperar cada contribución individual del conjunto de emisiones naturales y extraer los parámetros de interés del conjunto determinado de mediciones. En consecuencia, la interferencia que podría tener repercusiones en cierto número de bandas de frecuencias «pasivas» podría también tener repercusiones sobre la medición global de una componente atmosférica específica.

En el caso de los pares transmisor-receptor, la naturaleza y características de las señales son conocidas por lo que resulta relativamente sencillo determinar si esas señales van a recibirse correctamente. A este respecto hay muchas publicaciones sobre técnicas útiles para la detección y corrección de errores en los sistemas de radiocomunicaciones, pero estas técnicas por desgracia no sirven cuando no se conocen las características de las diversas señales recibidas. Esto es exactamente lo que ocurre con la teledetección pasiva cuya vulnerabilidad a la interferencia es única porque esta vulnerabilidad viene causada por el carácter no determinístico de la señal natural para cuya recepción se ha diseñado el sensor pasivo y por el nivel extremadamente bajo de la radiación natural.

Incluso los niveles muy bajos de interferencia recibidos por un sensor pasivo pueden degradar sus datos y la mayor amenaza consiste en que la interferencia no se detecte, los datos incorrectos se confundan con datos válidos y las conclusiones obtenidas a partir de los análisis de estos datos incorrectos contengan graves errores. En la mayoría de los casos los sensores pasivos no pueden discriminar entre las radiaciones natural y artificial y los errores en los datos a menudo no pueden detectarse ni corregirse. Por consiguiente, mantener la integridad de los datos depende de la prevención de la interferencia y la imposición de límites estrictos sobre la interferencia y la máxima potencia a escala mundial parece actualmente la única solución. Puede observarse que un cierto número de disposiciones del Reglamento de Radiocomunicaciones utilizan estos límites de potencia para activar transmisores de servicio a fin de proteger a los sensores pasivos contra la interferencia en banda y fuera de banda.

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 hidrometeoros, 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

La radiometría pasiva de microondas es un instrumento de importancia primordial para la observancia de la Tierra. 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:

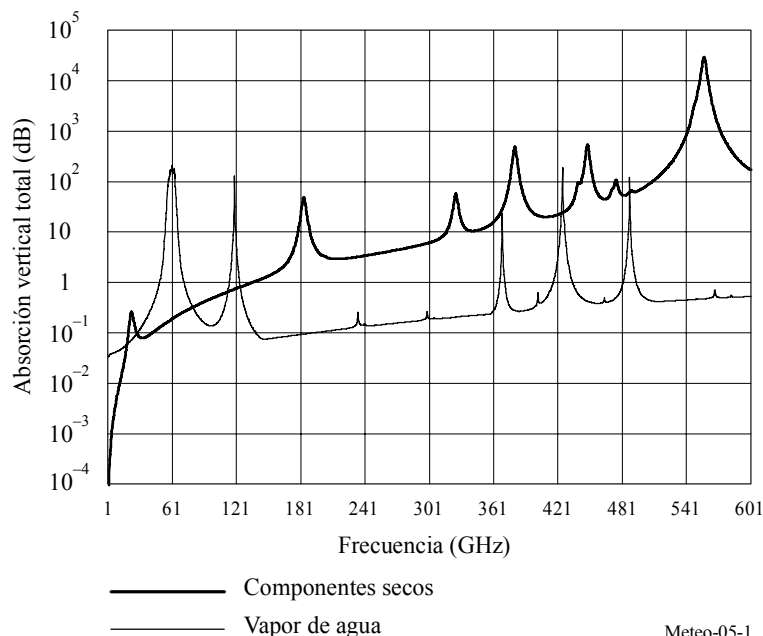
- parámetros de la superficie terrestre tales como la humedad del suelo, la temperatura de la superficie del mar, la intensidad de los vientos oceánicos, la extensión del hielo y su antigüedad, el manto de nieve, la pluviosidad sobre tierra, etc.; y
- parámetros atmosféricos tridimensionales (atmósfera 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, el ácido nitroso y el cloro).

Las técnicas de microondas permiten la observación de la superficie de la Tierra y su atmósfera desde órbitas terrestres incluso en presencia de nubes, que resultan transparentes a frecuencias por debajo de 100 GHz. Esta independencia del clima tiene un enorme interés para la observación de la Tierra porque más del 60% de la superficie terrestre está cubierta normalmente de nubes. Además de esta independencia del clima, las mediciones pasivas por microondas pueden realizarse a cualquier hora del día puesto que no dependen de la luz solar. La teledetección pasiva de microondas constituye un instrumento importante ampliamente utilizado para supervisión y para los estudios meteorológicos, climatológicos y medioambientales (en aplicaciones operacionales y científicas), para los que es indispensable la fiabilidad de la cobertura mundial reiterada.

5.1.1 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



Meteo-05-1

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 y anchuras de banda requeridas de interés por debajo de 1 000 GHz 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 compuestos químicos atmosféricos residuales importantes.

CUADRO 5-1

**Bandas de frecuencias y anchuras de banda de interés científico
en la detección pasiva por satélites por debajo de 1 000 GHz***

Banda de frecuencias (GHz)	Anchura de banda deseada⁽³⁾ (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), nubes, hielo, nieve, N ₂ O, O ₃
200-209	9 000 ⁽²⁾	H ₂ O, O ₃ , N ₂ O
226-232	6 000 ⁽²⁾ (5 500)	Nubes, CO
235-238	3 000 ⁽²⁾	O ₃
250-252	2 000(2)	N ₂ O
275-277	2 000(2)	N ₂ O
294-306	12 000(2)	N ₂ O, O ₃ , O ₂ , HNO ₃ , HOCl
316-334	10 000(2)	Determinación del perfil del vapor de agua, O ₃ , HOCl, H ₂ O, hielo en las nubes

CUADRO 5-1 (*fin*)

Banda de frecuencias (GHz)	Anchura de banda deseada ⁽³⁾ (MHz)	Mediciones principales
342-349	7 000 ⁽²⁾	CO, HNO ₃ , CH ₃ Cl, O ₃ , O ₂ , HOCl, H ₂ O, canal ventana, hielo en las nubes y cirros
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, hielo en las nubes y cirros
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

* NOTA – Para obtener información actual sobre atribuciones de frecuencias a sensores pasivos, debe consultarse el Cuadro de atribución de bandas de frecuencias del Artículo 5 del RR. Para obtener información adicional sobre frecuencias preferidas para la teledetección pasiva, debe consultarse la última versión de la Recomendación UIT-R RS.515.

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

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

(3) Algunas veces, la anchura de banda deseada rebasa la atribución. En tales casos la anchura de banda atribuida actual aparece entre paréntesis.

5.1.2 Observaciones de las características de la superficie terrestre

Para la medición de los parámetros de superficie (por ejemplo, el vapor de agua, la temperatura de la superficie del mar, la velocidad del viento, intensidad de lluvia, etc.), deben seleccionarse los llamados canales radiométricos «ventana» de modo que puede haber un muestreo regular del espectro de microondas entre 1 GHz y 90 GHz (una frecuencia/octava por término medio). No obstante, por regla general no suele ser necesario realizar ajustes de frecuencia de gran precisión porque las emisiones naturales de los parámetros de superficie no dependen excesivamente 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 frecuencia determinada. Esto se refleja en las Figs. 5-2 a 5-3 que representan la sensibilidad de las emisiones naturales de microondas a varios parámetros geofísicos en función de la frecuencia. La temperatura de brillo es una medida de la intensidad de la radiación térmica emitida por un objeto y se expresa en unidades de temperatura porque existe una correlación entre la intensidad de la radiación emitida y la temperatura física del cuerpo radiante.

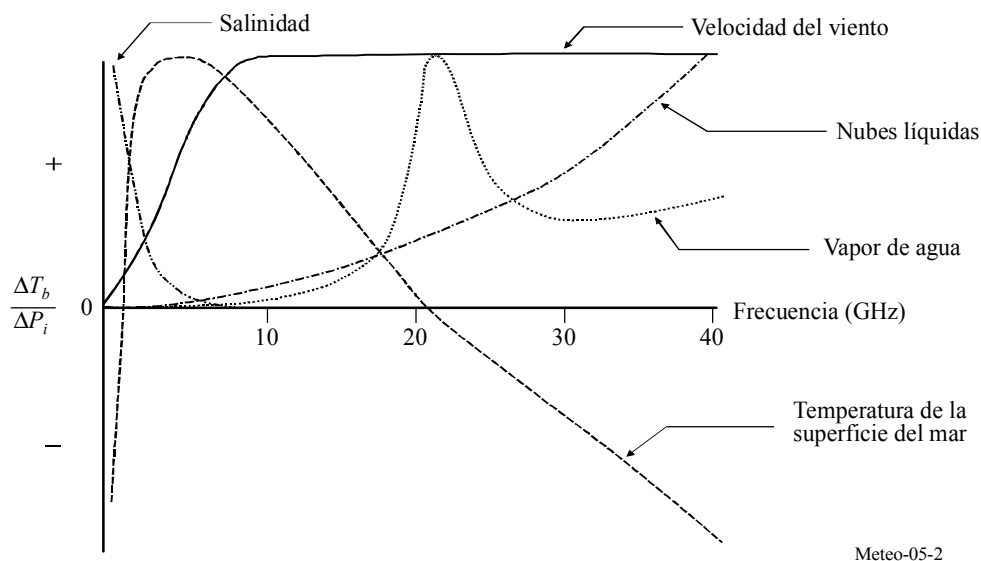
5.1.2.1 Observación de la superficie de los océanos

La teledetección sobre la superficie de los océanos se utiliza para medir muchos de los mismos parámetros que se miden sobre tierra (por ejemplo, vapor de agua, intensidad de lluvia y velocidad del viento) así como parámetros que proporcionan información sobre el estado del propio océano (por ejemplo, temperatura de la superficie del mar, salinidad del océano, espesor de la capa de hielo en el mar, etc.).

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:

- 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 24 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, 24 GHz y 36 GHz) para la determinación de los parámetros dominantes.

FIGURA 5-2
Sensibilidad de la temperatura de brillo a los parámetros geofísicos sobre la superficie del océano



5.1.2.2 Observación sobre la superficie terrestre

La teledetección sobre la superficie terrestre resulta algo más complejo 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 selvas tropicales). Además, la señal recibida por el sensor pasivo debe propagarse por varios medios distintos: básicamente el suelo, tal vez nieve o hielo, la capa de vegetación, la atmósfera, las nubes y a veces la lluvia o la nieve. 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, del contenido de humedad 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 (es decir, la relación entre la luz reflejada y la incidente). 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.

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

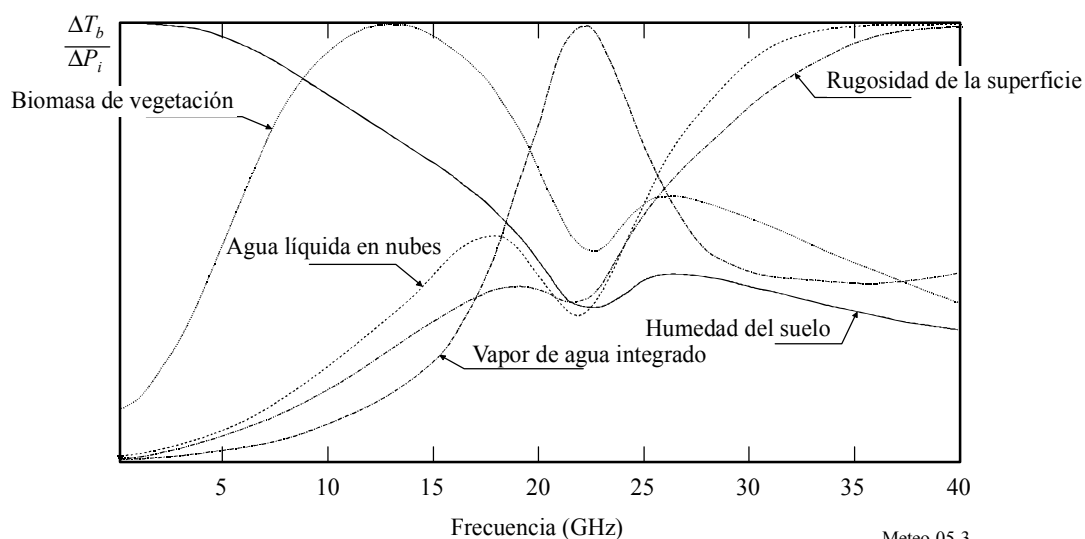
- baja frecuencia, para medir la humedad del suelo (en torno a 1 GHz);
- mediciones entre 5 GHz y 10 GHz, aproximadamente, para estimar la biomasa de vegetación una vez conocida la contribución de la humedad del suelo;
- dos frecuencias en torno a la cresta de absorción de vapor de agua (típicamente 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).

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 en las proximidades 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.

FIGURA 5-3
Sensibilidad de la temperatura de brillo a los parámetros geofísicos sobre la superficie terrestre



5.1.2.3 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 (véase el punto 5.2.3). 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, 24 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.

5.1.3 Parámetros de calidad de funcionamiento

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

5.1.3.1 Sensibilidad radiométrica

Este parámetro generalmente se expresa como la temperatura diferencial más pequeña, ΔT_e , que puede detectar el sensor. ΔT_e viene dada por la expresión:

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

donde:

- 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).

5.1.3.2 Umbral del radiómetro ΔP

Se trata de la variación de potencia más pequeña que puede detectar el sensor pasivo, ΔP viene dado por:

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

donde:

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

El valor de ΔP se calcula utilizando ΔT_e . En el futuro, T_s disminuirá como ΔT_e (véase la ecuación (5-1)). Por consiguiente, ΔP debe calcularse utilizando un valor de ΔT_e previsto razonable en vez del valor de ΔT_e de la actual tecnología. De la misma forma, el tiempo de integración, τ , probablemente aumentará a medida que se desarrolle la tecnología de teledetección (por ejemplo, el denominado concepto de barrido transversal). En consecuencia, el tiempo de integración también debe elegirse basándose en unas futuras expectativas razonables.

5.1.3.3 Resolución geométrica

En el caso de mediciones bidimensionales de parámetros de superficie, generalmente se considera que la apertura de la antena a -3 dB determina la resolución transversal. Si se trata de mediciones tridimensionales de parámetros atmosféricos, también debe considerarse la resolución longitudinal a lo largo del eje de la antena. Esta resolución longitudinal es una función compleja de características de la atmósfera dependientes de la frecuencia y de las características de ruido y anchura de banda del receptor.

5.1.3.4 Tiempo de integración

Los receptores radiométricos detectan las emisiones térmicas similares al ruido recogidas por la antena y el ruido térmico del receptor. Integrando la señal recibida, pueden reducirse las fluctuaciones de ruido aleatorio y puede estimarse con precisión la suma del ruido del receptor y de la potencia de ruido de emisión térmica externa. El tiempo de integración es simplemente la cantidad de tiempo que necesita el receptor para integrar la señal recibida. El tiempo de integración también es un parámetro importante para la teledetección pasiva, que se deriva de una solución de compromiso compleja a la que se ha llegado teniendo en cuenta, en particular, la resolución geométrica deseada, la configuración de exploración del sensor y su velocidad con respecto a la escena observada.

5.1.4 Típicas condiciones de funcionamiento de los sensores pasivos

Los sensores pasivos a bordo de vehículos espaciales se instalan fundamentalmente en dos tipos de sistemas de satélites complementarios: satélites en órbita terrestre baja y satélites geoestacionarios.

5.1.4.1 Satélites en órbita terrestre baja

Los sistemas basados en satélites en órbitas bajas, heliosíncronas (es decir, una órbita en la que el satélite pasa sobre un determinado punto de la superficie de la Tierra siempre a la misma hora solar local) y polares se utilizan para recoger datos medioambientales de alta resolución a escala mundial. El carácter de estas

órbitas limita la frecuencia de repetición de las mediciones. Con un solo satélite se obtiene diariamente un máximo de dos coberturas mundiales a intervalos de 12 horas. Los radiómetros pasivos que funcionan en frecuencias inferiores a 100 GHz actualmente están instalados sólo en satélites en órbita baja. Ello se debe fundamentalmente a la dificultad de obtener la adecuada resolución geométrica en frecuencias relativamente bajas desde órbitas más altas, pero esto puede cambiar en el futuro.

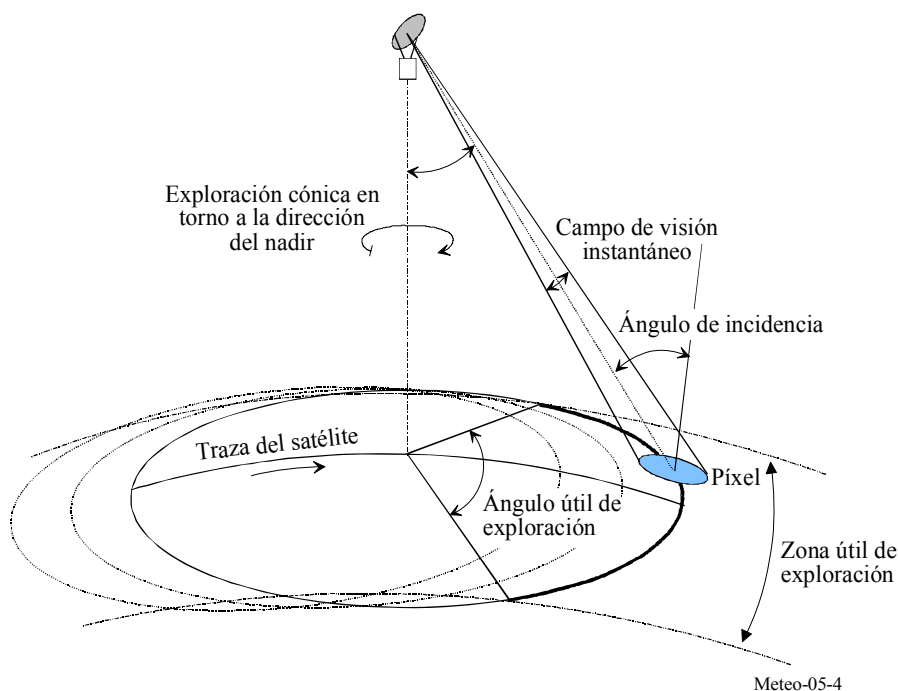
5.1.4.2 Satélites geoestacionarios

Los sistemas que utilizan satélites geoestacionarios se emplean para recoger datos con resolución baja a media a escala regional. La frecuencia de repetición de las mediciones viene limitada únicamente por la tecnología del hardware. Normalmente, se recogen datos de una región aproximadamente cada 30 minutos.

5.1.5 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 (véase la Fig. 5-4) centrada en la dirección del nadir (es decir, el punto que se encuentra directamente bajo el satélite), 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.

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



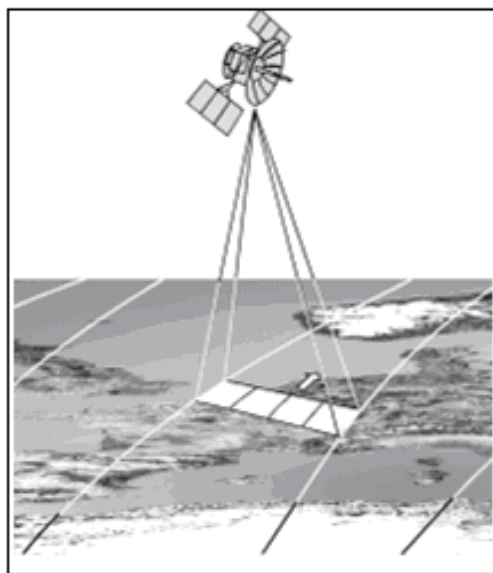
A continuación se indican algunas características geométricas típicas (correspondientes a 803 km de altitud):

- ángulo de incidencia con el suelo en torno a 55°
- semiángulo del cono $46,7^\circ$ respecto a la dirección del nadir
- anchura del barrido: 1600 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 con el tamaño de la antena, típicamente desde 50 km a 6,9 GHz hasta 5 km a 89 GHz (basándose en un diámetro 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 (y, por consiguiente, resolución radiométrica) óptimo a todas las frecuencias de medición, 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.

Un sensor de barrido transversal (a lo largo de la traza) es un tipo de sistema sensor que consta de una línea de sensores dispuesta perpendicularmente a la dirección de vuelo del vehículo espacial, como ilustra la Fig. 5-5. A medida que el vehículo espacial se desplaza hacia adelante van detectándose distintas zonas de la superficie. El radiómetro de barrido transversal es un instrumento puramente estático sin partes móviles. La característica principal de este radiómetro es que todos los pixels en una línea de exploración se obtienen simultáneamente y no de manera secuencial, como sucede con los sensores de exploración mecánica, lo que hace que este tipo de sensor aumente significativamente la resolución radiométrica obtenible. Los sensores de barrido transversal pueden utilizarse para una gran variedad de aplicaciones, incluidas las mediciones de los perfiles de temperatura de la atmósfera, de la humedad del suelo y de la salinidad de los océanos.

FIGURA 5-5
**Geometría típica de los radiométricos pasivos
de microondas de barrido transversal**



Meteo-05-5

5.1.6 Criterios de calidad de funcionamiento y de interferencia

Los criterios de calidad de funcionamiento y de interferencia para los sensores pasivos a bordo de vehículos espaciales que funcionan en el SETS figuran en las Recomendaciones UIT-R RS.1028 y UIT-R RS.1029, respectivamente.

5.1.7 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 O_2 , O_3 , H_2O , 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 los sensores de teledetección pasiva que funcionan 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 relación expresada en la ecuación (5-3):

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

donde:

- I : brillo espectral del gas a la temperatura T
 $L = 2 \cdot k \cdot T / \lambda^2$: brillo espectral del cuerpo negro a T ($W/(m^2 \cdot sr \cdot Hz)$)
 $k = 1,38 \times 10^{-23}$: constante de Boltzman (J/K)
 α : característica del gas (O_2 , CO_2 , H_2O , O_3 , etc.).

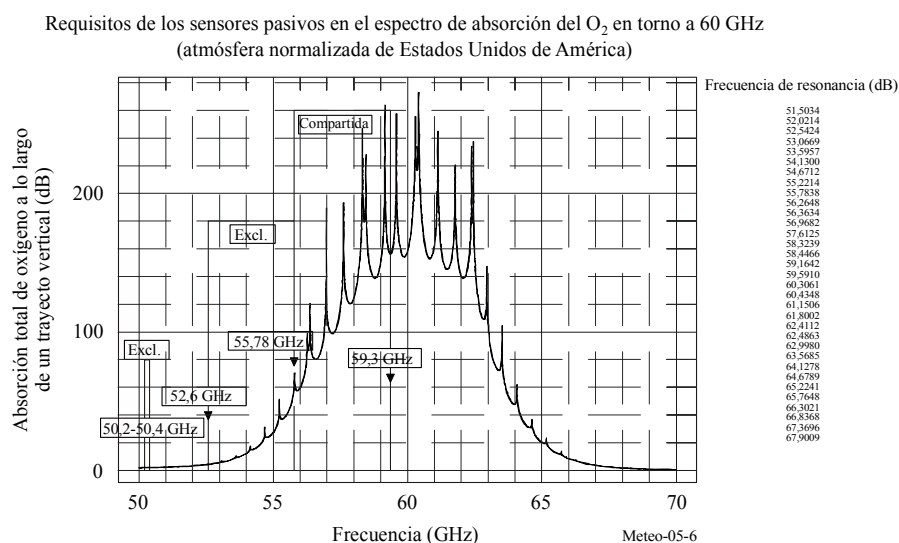
Hay dos gases en la atmósfera, el CO_2 y el O_2 , de importancia primordial en la detección pasiva para meteorología debido a que su concentración y presión en la atmósfera (dos parámetros que determinan el índice de absorción α) son casi constantes y conocidos en todo el mundo. Por consiguiente se pueden 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 $15 \mu m$ para el CO_2 y en la región de microondas en torno a 60 GHz y 118,75 GHz para el O_2).

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 (H_2O , O_3 , CH_4 , 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.

5.1.7.1 Sondas atmosféricas verticales pasivas de microondas

El sondeo atmosférico es una medición de la distribución vertical de las propiedades físicas de una columna de la atmósfera, tales como presión, temperatura, velocidad del viento, dirección del viento, contenido de agua líquida, concentración de ozono, contaminación y otras propiedades. Las sondas atmosféricas verticales, (es decir, los instrumentos que realizan mediciones por sondeo atmosférico) son sensores orientados al nadir diseñados fundamentalmente para recuperar los perfiles verticales de la temperatura y de la humedad atmosférica. Utilizan canales de frecuencias seleccionados cuidadosamente dentro del espectro de absorción del O_2 y del H_2O atmosféricos. Las Figs. 5-6 a 5-8 muestran en detalle los espectros de absorción en la proximidad de sus principales frecuencias de resonancia por debajo de 200 GHz. 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.

FIGURA 5-6
Espectro de absorción del O_2 a lo largo de un trayecto vertical en torno a 60 GHz
(varias líneas de absorción)



NOTA – La Fig. 5-6 también representa la posición y las atribuciones al SETS y su categoría entre 50 y 60 GHz (50,2-50,4 GHz (exclusiva), 52,6-55,78 GHz (exclusiva) y 55,78-59,3 GHz (compartida)).

FIGURA 5-7
Espectro de absorción del O₂ a lo largo de un trayecto vertical en torno a 118,75 GHz
 (una sola línea de absorción)

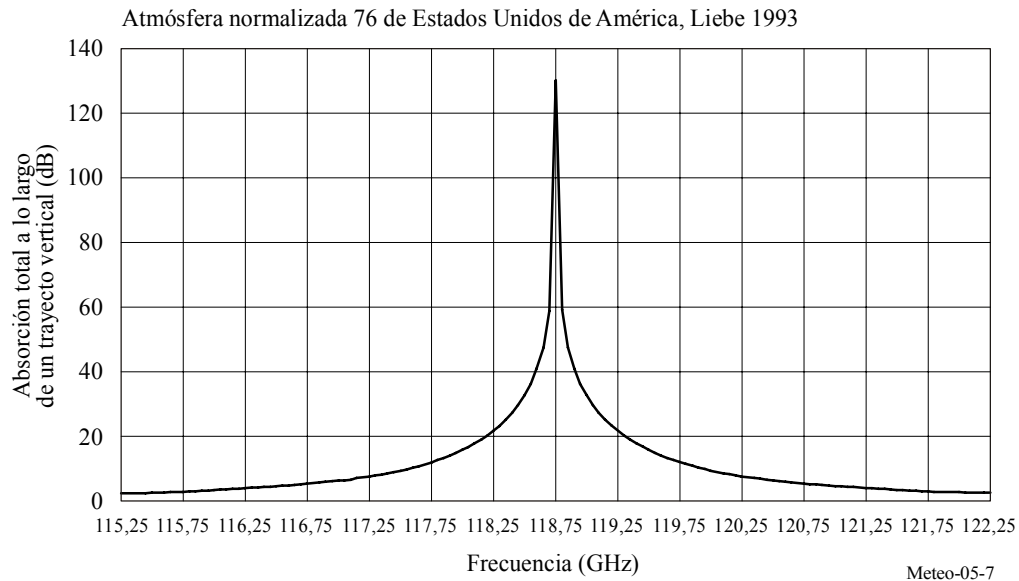
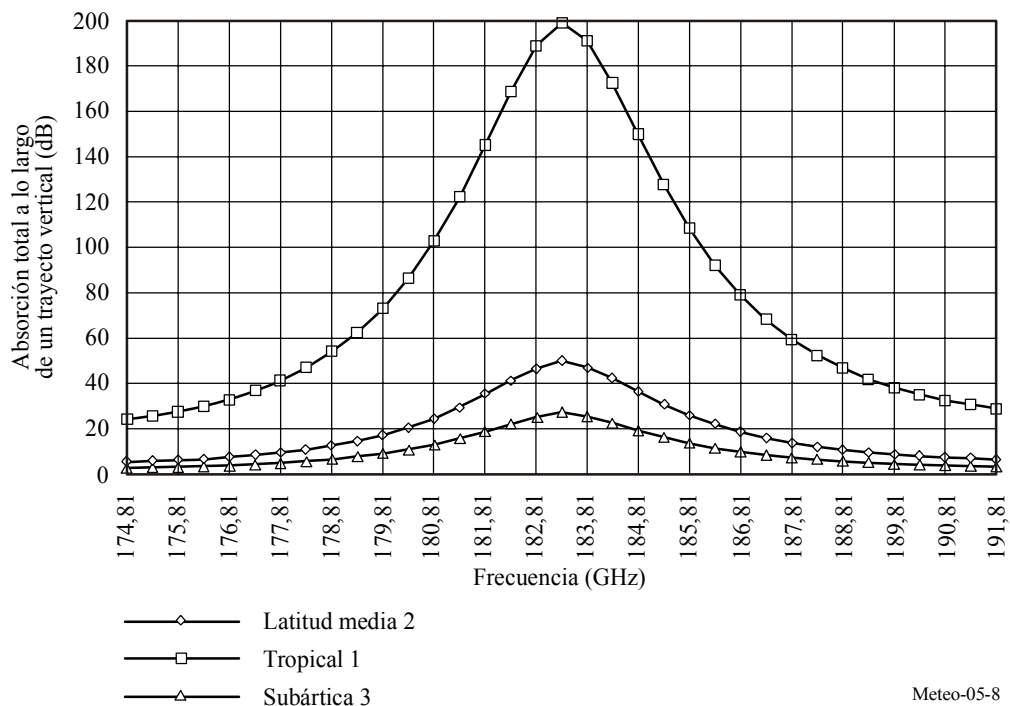


FIGURA 5-8
Espectro de absorción del vapor de agua a lo largo de un trayecto vertical en torno a 183,31 GHz



5.1.7.2 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).

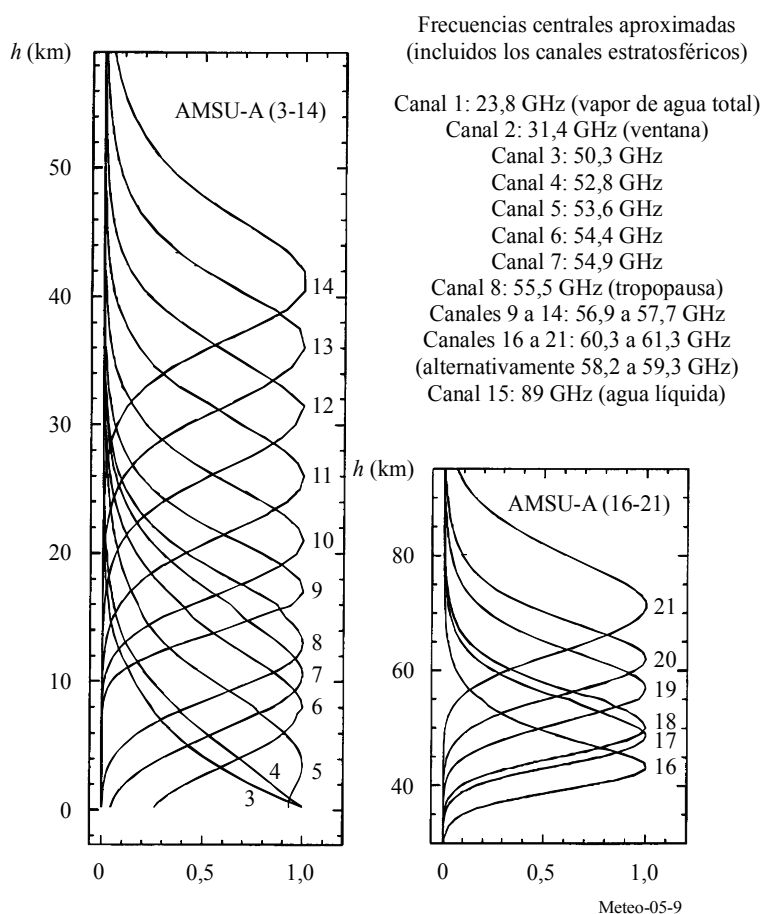
Cada capa (caracterizada por su altitud) radia energía proporcionalmente a su temperatura local y a su índice de absorción. La energía ascendente (en dirección del radiómetro) queda absorbida en parte por las capas superiores y, a su vez, cada capa absorbe parte de las emisiones ascendentes procedentes 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 (véase, por ejemplo, la Fig. 5-9). 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. 5-9.

FIGURA 5-9
Funciones de ponderación típicas para una sonda de temperatura de microondas funcionando cerca de 60 Hz



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 O_2 . Por este motivo, deben tener geometrías y calidades de funcionamiento radiométrico semejantes y deben recibir una protección análoga contra la interferencia. En la Fig. 5-9 se pone de manifiesto que:

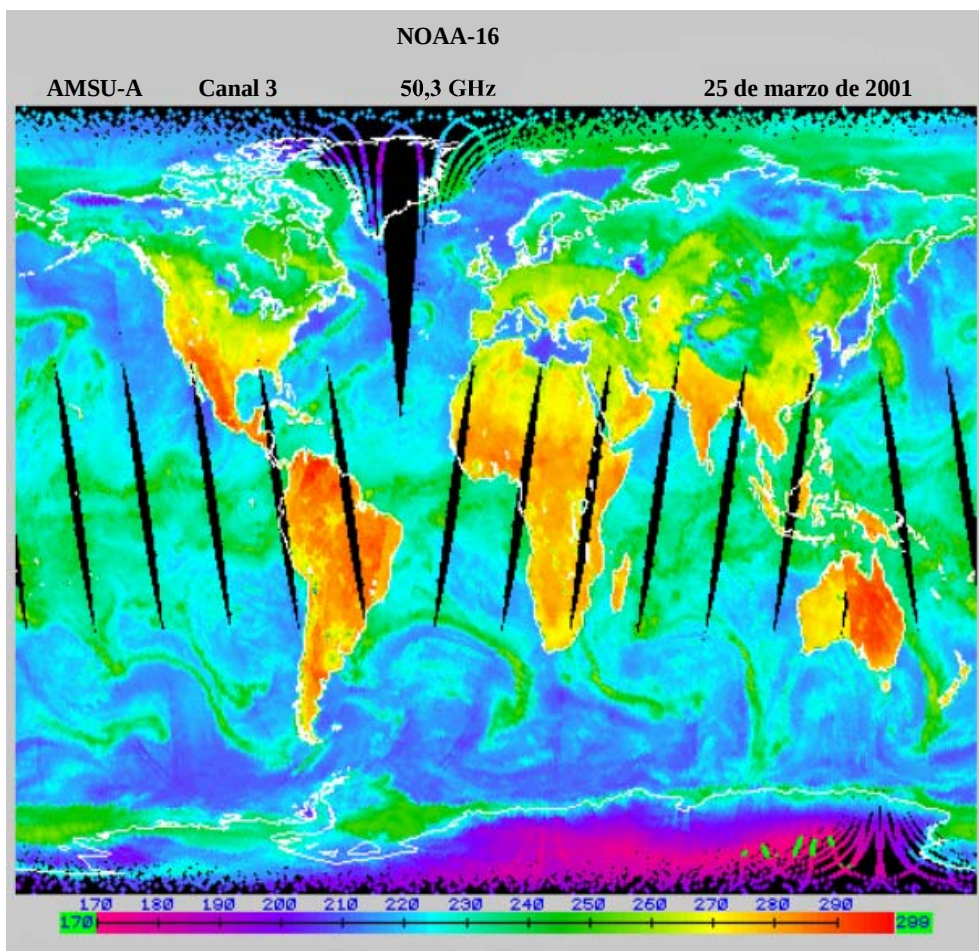
- el canal 1 está próximo a la cresta de absorción del H_2O . Se utiliza para recuperar el contenido total de vapor de agua a lo largo de la línea de visibilidad directa y para determinar las correcciones necesarias en los demás canales;
- el canal 2 es el que presenta menos efectos acumulativos debidos 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.

5.1.7.3 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. Los modelos NWP mundiales se utilizan para 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. 5-10 muestra las mediciones de la temperatura (K) a partir del sensor pasivo de microondas, AMSU-A, realizadas en un periodo de tiempo de 12 h aproximadamente. Las observaciones 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. 5-9).

FIGURA 5-10
Composición mundial de las mediciones de la temperatura (K) obtenidas del AMSU-A

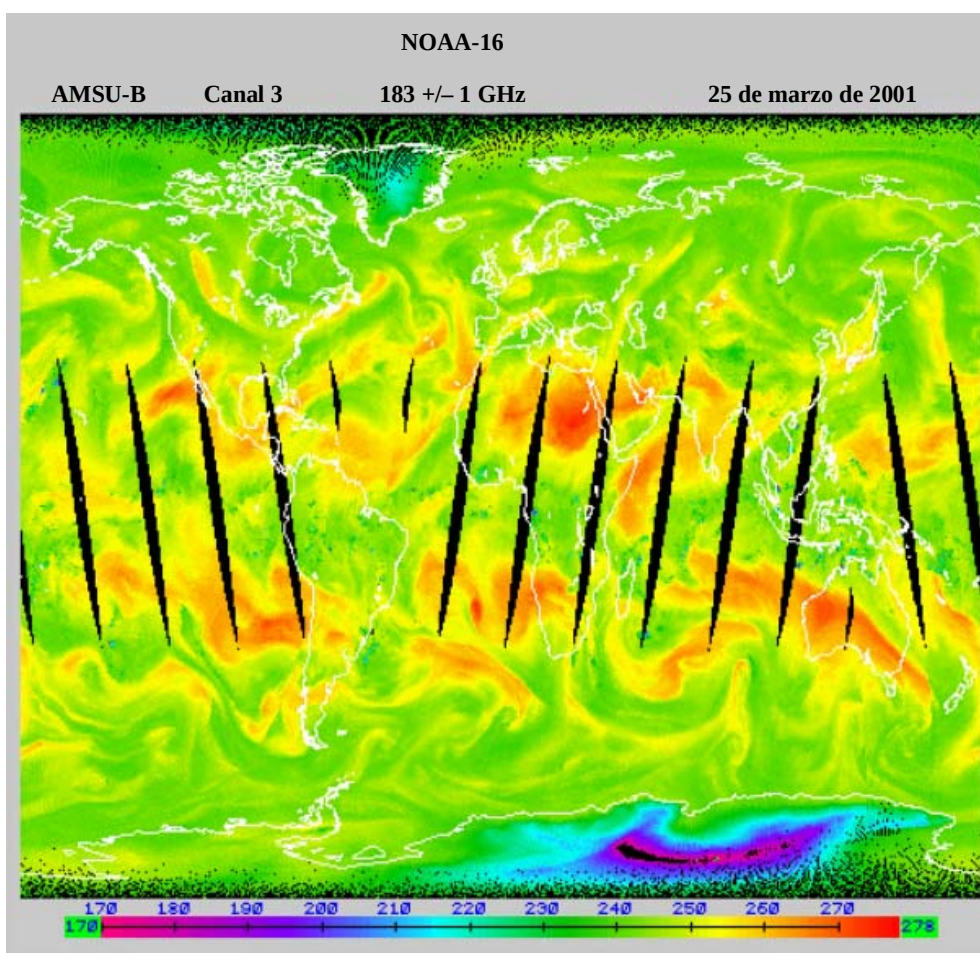


Meteo-05-10

La Fig. 5-11 muestra la composición mundial de las mediciones de la temperatura (K) obtenidas del AMSU-B, contiene las mediciones obtenidas en un periodo de tiempo de 12 h aproximadamente. El AMSU-B es un radiómetro explotado conjuntamente 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 superordenadores más potentes.

FIGURA 5-11
Composición mundial de las mediciones de la temperatura (K) obtenidas del AMSU-B



Meteo-05-11

Para aumentar la eficacia de los modelos NWP, será necesario 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 aproximadamente cada 3 h.

5.1.7.4 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 5-2 resume las características típicas de las sondas de temperatura que funcionan en torno a 60 GHz a bordo de satélites en órbita terrestre baja.

CUADRO 5-2

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

5.1.7.5 Sondas pasivas de limbo de microondas

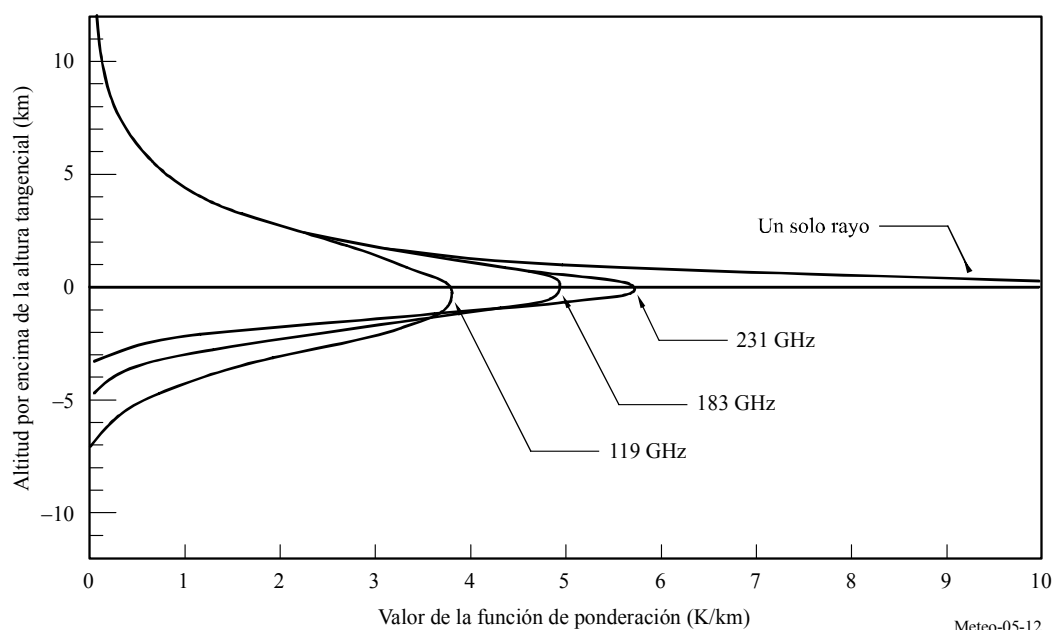
Las sondas de limbo de microondas (MLS, *microwave limb sounders*), que observan la atmósfera en direcciones tangenciales a las capas atmosféricas se utilizan para estudiar desde la región atmosféricas baja a la superior, donde las intensas actividades fotoquímicas pueden ejercer gran influencia en el 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. 5-12 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.

Las sondas de limbo de microondas fueron lanzadas por primera vez en 1991 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. 5-12;
- 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 5-3).

FIGURA 5-12
Función de ponderación vertical de las sondas de limbo de microondas
(basadas en una antena de 1,6 m a 600 km de altitud)



CUADRO 5-3

Ejemplo de objetivos de las mediciones de las sondas de limbo de microondas típicas 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	1×10^{-7} v/v (2 s)
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)

La nueva generación de sondas de limbo de microondas 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.

Las sondas de limbo de microondas 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.

Las sondas de limbo de microondas originales han demostrado su capacidad para medir los perfiles de vapor de agua de la capa superior de la troposfera. Este 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.

Las futuras sondas de limbo de microondas podrán efectuar observaciones de componentes y especies químicas atmosféricas adicionales a otras frecuencias.

5.1.7.6 Vulnerabilidad de las ondas 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 pues la atmósfera es un medio extremadamente inestable cuyas características varían con gran velocidad, tanto en el espacio como en el tiempo. Un problema particular para los sensores pasivos es la presencia de un gran número de emisores de baja potencia en el interior de la zona de medición del sensor. Entre estos emisores de baja potencia se encuentran los dispositivos de banda ultraamplia (UWB), los dispositivos para aplicaciones industriales, científicas y médicas (ICM) y los dispositivos de corto alcance (SRD). La situación es cada vez más crítica porque está aumentando la densidad de estos dispositivos activos terrenales y ya hay casos en que se ha informado de la aparición de interferencia intensa.

Los sensores pasivos, por consiguiente, son extremadamente vulnerables a la interferencia, incluso con niveles muy bajos de potencia, lo que puede provocar graves perjuicios.

- Se ha demostrado que con sólo el 0,1% de datos de satélites 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 interferencia (si es detectable) puede imposibilitar el reconocimiento de los nuevos sistemas meteorológicos en desarrollo, pudiendo perderse indicaciones vitales de tormentas de rápida evolución potencialmente peligrosas.
- Si no se detectan, que es lo más probable, los datos contaminados se tomarán como datos válidos y las conclusiones obtenidas de los análisis de estos datos por ser muy erróneas.
- 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 RS.1028 y UIT-R RS.1029 proporcionan, respectivamente, la calidad de funcionamiento radiométrica requerida y los niveles de interferencia admisibles.

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: Radars de abertura sintética (SAR, synthetic aperture radars) – Sensores orientados hacia un lado de la trayectoria del nadir, 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: Dispersímetros – Sensores orientados en diversos ángulos de presentación a los lados del trayecto del nadir, 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 del nadir 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 5-4 resume las características de los cinco tipos principales de sensores activos a bordo de vehículos espaciales.

CUADRO 5-4

Características de los sensores activos a bordo de vehículos espaciales

Características	Tipos de sensor				
	SAR	Altímetro	Dispersímetro	Radares de precipitación	Radares de perfil de nubes
Geometría de la observación	Orientación lateral con una separación de 10°-55° del nadir	Orientación al nadir	– Seis haces acimutales en abanico – Dos haces cónicos de exploración	Orientado al nadir	Orientado al nadir
Dinámica de la huella del haz	– Fija a un lado – ScanSAR	Fija en el nadir	– 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	– 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 con MF lineal	Impulsos con MF lineal	Onda continua interrumpida o impulsos 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 Radares de abertura sintética (SAR)

Los SAR proporcionan imágenes de radar de la superficie terrestre. 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 $c/2(BW \sin \theta)$, 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 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.

FIGURA 5-13

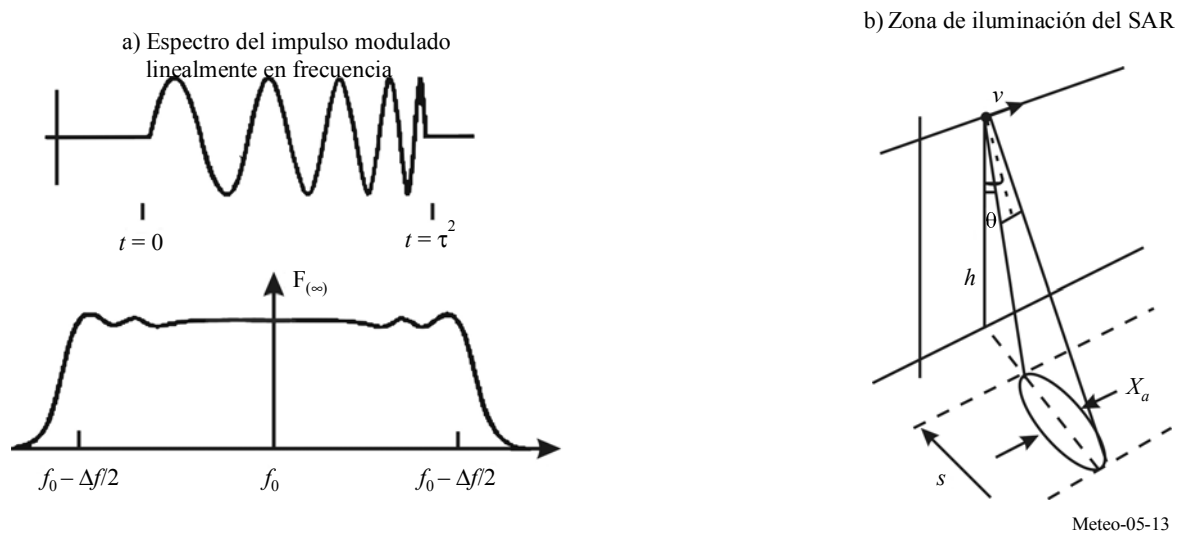
Espectro del impulso modulado linealmente en frecuencia y zona de iluminación del SAR

FIGURA 5-14

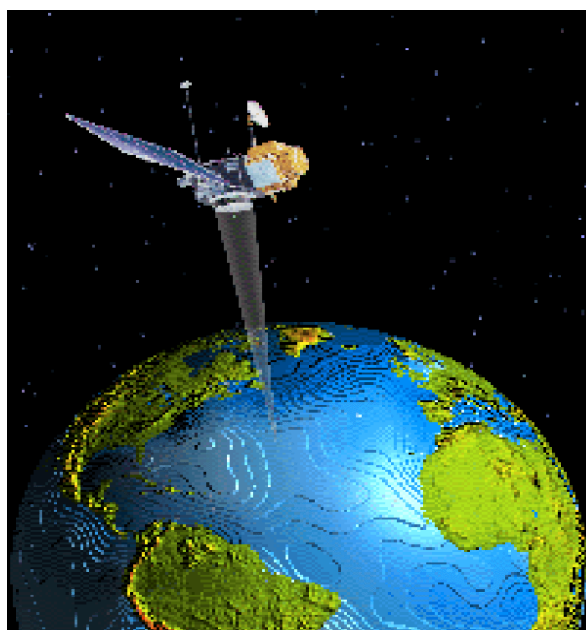
Imagen SAR de la ribera occidental del Mar Muerto entre Israel y Jordania

Meteo-05-14

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 de un altímetro de satélite y de su precisión típica. 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, la utilización de frecuencias en torno a 13,6 GHz y 5,3 GHz ilustra una posible disposición de doble frecuencia. 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. Algunos altímetros de satélite han medido la topografía de los océanos con una precisión de 4,2 cm.

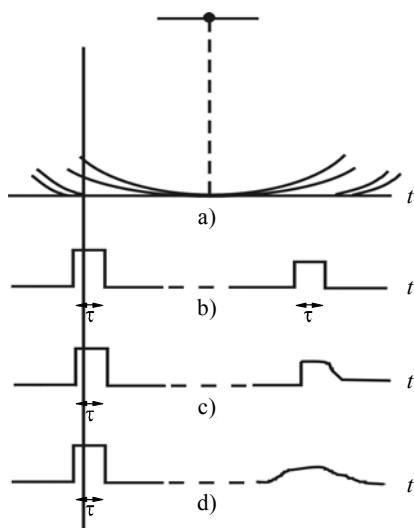
FIGURA 5-15
Altimetro de satélite de microondas



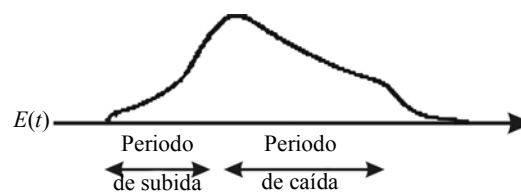
Meteo-05-15

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

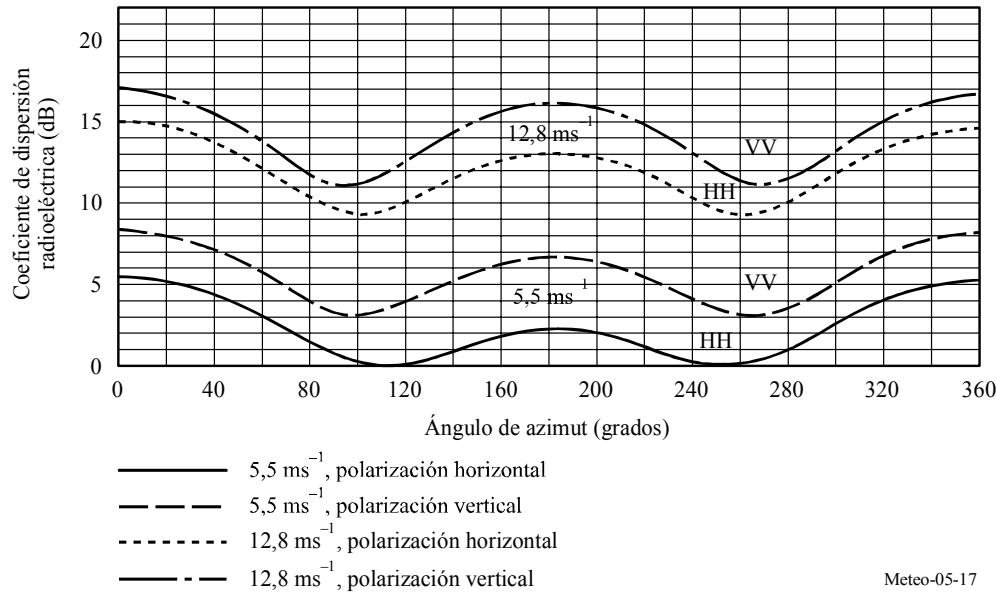


Meteo-05-16

5.2.4 Dispersímetros

Los dispersímetros proporcionan dirección y velocidad del viento sobre la superficie de los océanos de la Tierra. La elección de la frecuencia central de RF depende de la interacción de la superficie oceánica con el campo electromagnético y su variación con el ángulo de presentación. La Fig. 5-17 muestra la variación del nivel de retrodispersión con el ángulo de presentación en relación a la dirección del vector velocidad del viento.

FIGURA 5-17
Variación de la retrodispersión con el ángulo de presentación



Como muestra la Fig. 5-18, un dispersímetro típico ilumina la superficie de la Tierra bajo varios ángulos de presentación fijos. En la Fig. 5-19 el haz explorador de pincel del dispersímetro 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.

FIGURA 5-18
Huella fija del dispersímetro

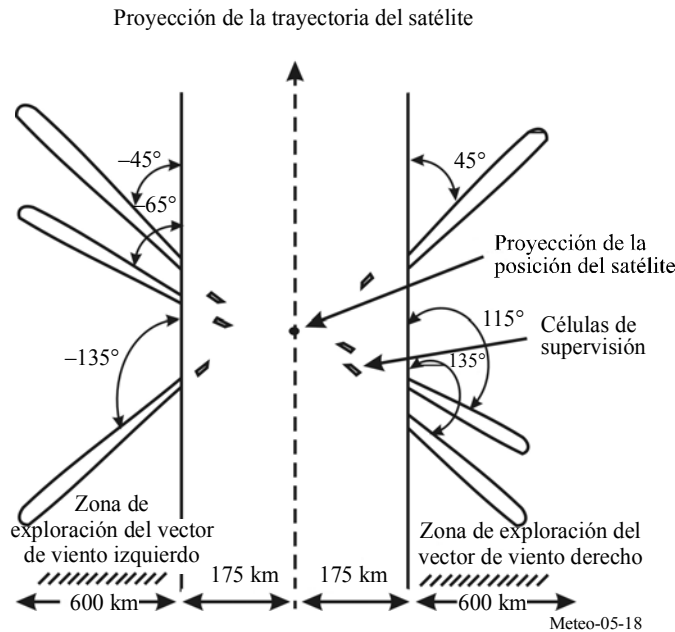
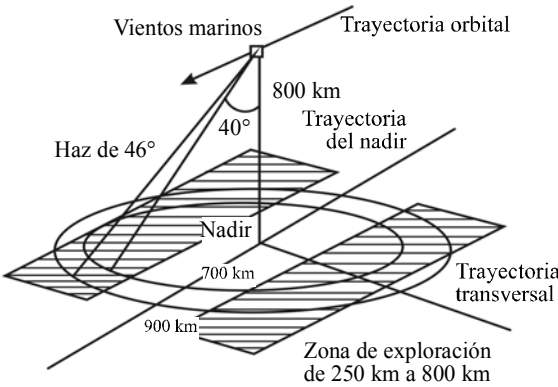
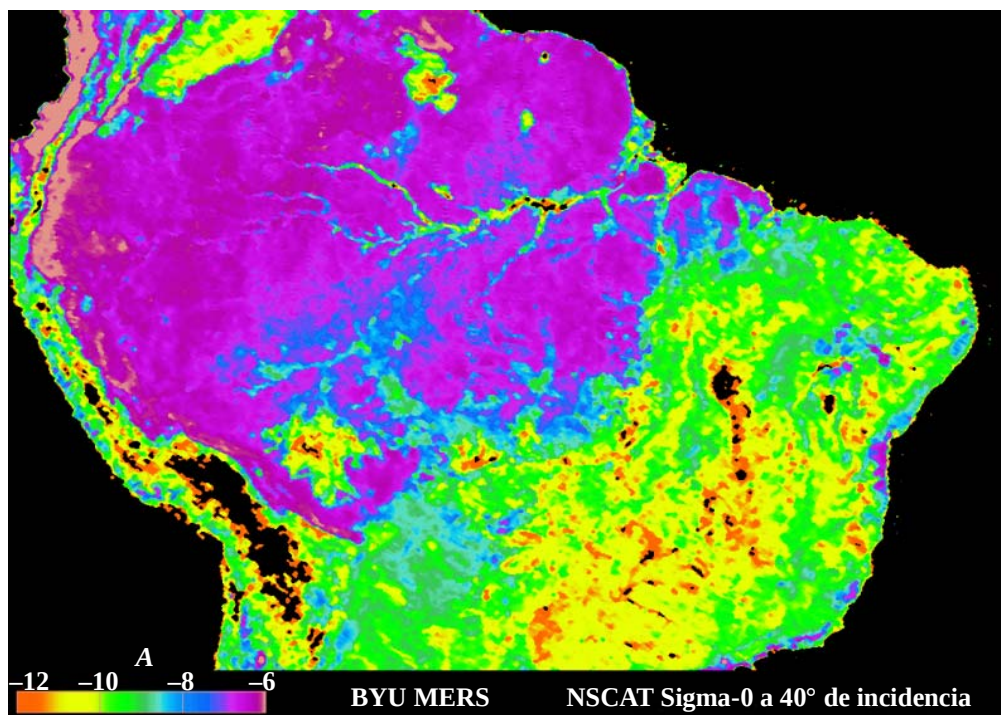


FIGURA 5-19
Exploración por haz de pincel del dispersímetro



La Fig. 5-20 muestra un ejemplo de imagen de radar de la selva amazónica en América del Sur, realizada por el dispersímetro NSCAT.

FIGURE 5-20
Imagen de la selva amazónica en América del Sur
realizada por el radar dispersímetro NSCAT



Meteo-05-20

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 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 (m)

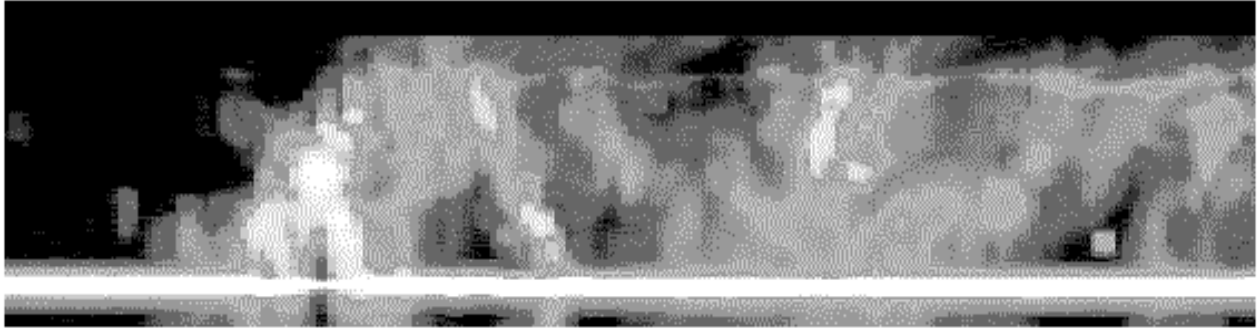
λ : longitud de onda del radar (m)

Z : factor de reflectividad del radar.

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

La Fig. 5-21 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. Un ejemplo de radar de precipitación utiliza una anchura de impulso de 1,6 μ s, aunque este valor puede variar con otros sistemas. La degradación mínima permisible de la reflectividad de la precipitación determina el nivel de interferencia admisible.

FIGURA 5-21
Reflectividad sintetizada a partir de mediciones de la reflectividad



Meteo-05-21

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. 5-22 muestra un ejemplo representativo de la reflectividad por retrodispersión en función de la altitud.

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.

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

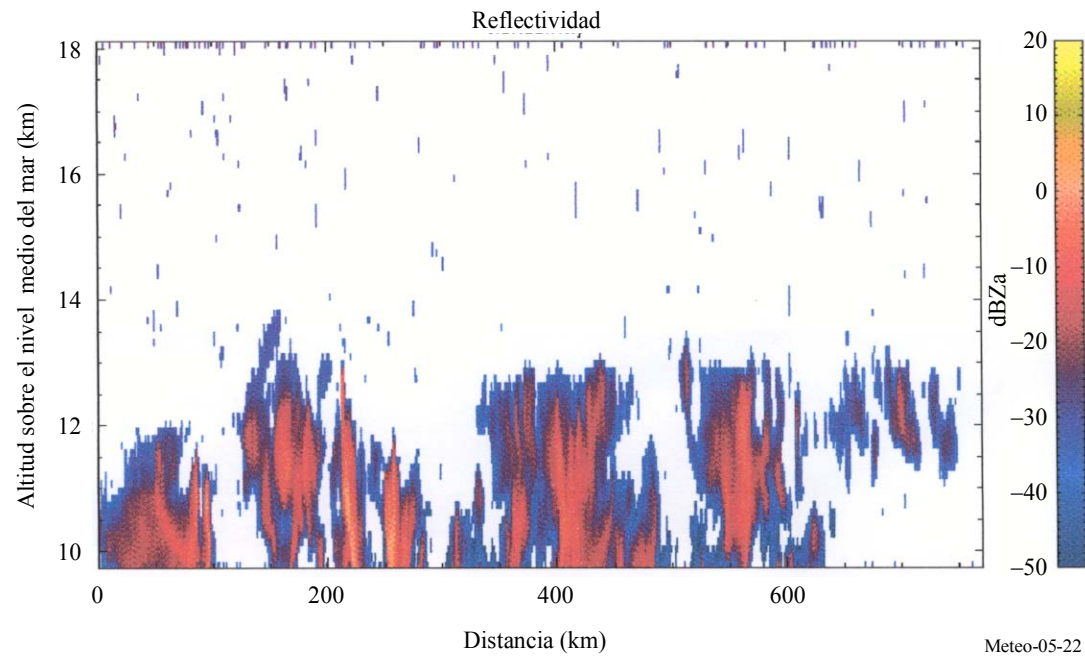
donde:

- $\tilde{P}$: 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.

Como indica esta ecuación, 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.

FIGURA 5-22
Ejemplo de la reflectividad de los cirros

Cirros tropicales observados durante el tránsito de Hawai a Nueva Zelanda



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

Los criterios de calidad de funcionamiento y de interferencia para los diversos tipos de sensores activos a bordo de vehículos espaciales figuran en la Recomendación UIT-R RS.1166.

5.2.8 Niveles de densidad de flujo de potencia (DFP)

Las características de los diversos tipos de sensores activos a bordo de vehículos espaciales mostrados en el Cuadro 5-5 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 5-5 muestra los niveles de la densidad de flujo de potencia del sensor activo en la superficie terrestre para algunas configuraciones de sensores típicas.

CUADRO 5-5
Niveles típicos de densidad de flujo de potencia en la superficie terrestre

Parámetro	Tipo de sensor				
	SAR	Altímetro	Dispersímetro	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

Bibliografía

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

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

Textos del UIT-R

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

Recomendación UIT-R RS.577 – Bandas de frecuencias y anchuras de banda requeridas utilizadas para la detección activa desde vehículos espaciales que funcionan en los servicios de exploración de la Tierra por satélite (activo) y de investigación espacial (activo)

Recomendación UIT-R RS.1028 – Criterios de calidad para la teledetección pasiva por satélite

Recomendación UIT-R RS.1029 – Criterios de interferencia para la teledetección pasiva por satélite

Recomendación UIT-R RS.1166 – Criterios de calidad de funcionamiento y de interferencia para sensores activos a bordo de vehículos espaciales

CAPÍTULO 6**OTROS SISTEMAS DE RADIOCOMUNICACIONES
PARA ACTIVIDADES METEOROLÓGICAS***Página*

6	Introducción	90
6.1	Sistemas de divulgación	90
6.2	Sistemas hidrológicos	90
6.3	Radiocomunicaciones para sistemas meteorológicos y medioambientales remotos	91
6.4	Usos meteorológicos de los sistemas mundiales de navegación por satélite (GNSS)	92
6.5	Sistemas de detección de rayos	93
6.6	Teledetección desde tierra	95
6.7	Sistemas de aeronaves no tripuladas	96

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. 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.

6.1 Sistemas de 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 (terrenal y por satélite) y los enlaces descendentes del MetSat.

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.

Por último, cabe señalar que los sistemas del servicio fijo por satélite, a través de las cargas útiles comerciales en la banda C (3 400-4 200 MHz) y la banda Ku (10 700-11 700 MHz), se utilizan en todo el mundo para divulgar información relativa al clima, a los fenómenos meteorológicos y a los recursos hídricos, incluidas las alertas de catástrofe a las agencias de meteorología y a las comunidades de usuarios. El empleo de **satélites en la banda C** es especialmente importante en zonas donde las condiciones de propagación (por ejemplo, lluvias torrenciales en zonas tropicales y ecuatoriales) hacen imposible la utilización de cualquier otro medio de telecomunicación.

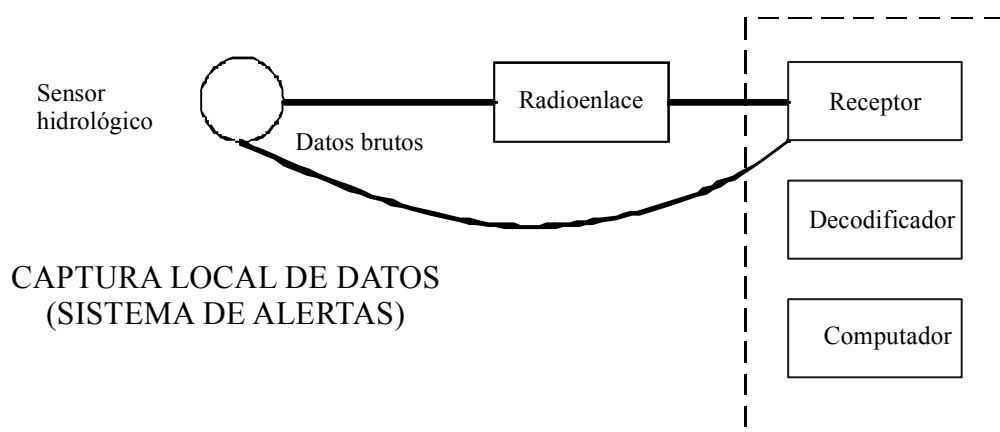
6.2 Sistemas hidrológicos

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 son necesarias para la predicción y alerta temprana de las inundaciones. También son útiles para el cálculo de la disponibilidad de recursos hídricos.

El valor medio de los daños provocados cada año por las inundaciones sólo en Estados Unidos de América se aproxima a los 4 000 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.

Un sistema hidrológico está integrado por un generador de informes de eventos, sensores meteorológicos e hidrológicos, equipos de radiocomunicaciones y programas y equipos informáticos. En su versión más sencilla, las señales codificadas se transmiten mediante equipos de radiocomunicaciones, normalmente utilizando las bandas de ondas métricas o decimétricas de los servicios fijo o móvil 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 hidrológico



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-6-1

6.3 Radiocomunicaciones para sistemas meteorológicos y medioambientales remotos

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.

6.4 Usos meteorológicos de los sistemas mundiales de navegación por satélite (GNSS)

Los meteorólogos utilizan las señales GPS que se transmiten actualmente en 1 575,42 MHz (designadas por L1) y 1 227,6 MHz (designadas por L2) (y las del GLONASS) para los siguientes fines:

- *Localización de plataformas móviles de observación meteorológica:* por ejemplo de radiosondas transportadas en globos atmosféricos, de radiosondas con paracaídas, aviones no tripulados 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 § 6.5).
- *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.

6.5 Sistemas de detección 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.

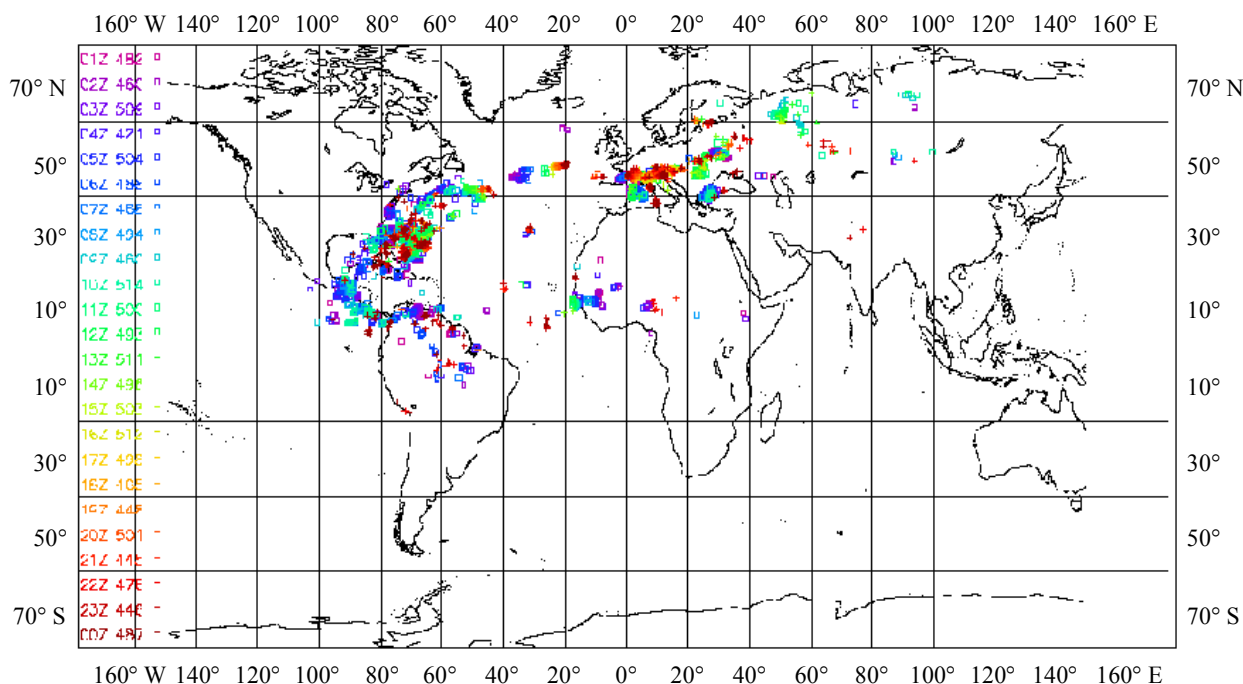
La detección de los rayos es una actividad pasiva que supone la utilización de receptores de radio-comunicaciones para detectar los frentes de onda generados por la caída de los rayos. Los datos procedentes de las ubicaciones de detección individuales pueden distribuirse por los medios habituales, entre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

En los actuales sistemas operativos, la posición del rayo 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.

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. 6-2). En este sistema, las ondas esféricas se reciben en estaciones periféricas remotas por toda Europa 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. Los niveles de interferencia bajos a veces pueden contrarrestarse utilizando un filtro de ranura ajustable en los emplazamientos del sensor afectado, pero las interferencias muy extendidas y de mayor nivel son muy perjudiciales para el funcionamiento del sistema.

FIGURA 6-2
**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.

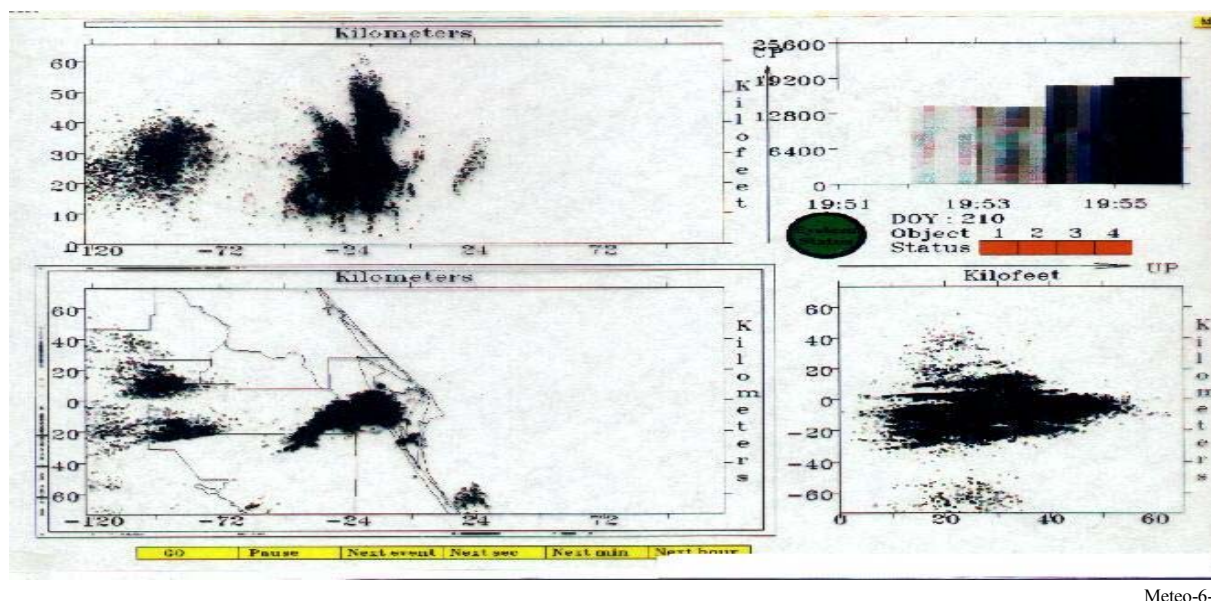
Meteo-6-2

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 sistema de vigilancia y alerta contra el rayo por interferometría radioeléctrica SAFIR (Surveillance et Alerte Foudre par Interférométrie Radioélectrique) utiliza de 110 a 118 MHz). La Fig. 6-3 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. 6-3 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 6-3
Pantalla LDAR en tiempo real



Meteo-6-3

6.6 Teledetección desde tierra

El sondeo atmosférico vertical que utiliza teledetección pasiva desde satélites se ha tratado en profundidad en la sección 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 también se beneficiará de las observaciones adicionales en los segmentos inferiores de la banda de absorción de vapor de agua a 183 GHz (por confirmar).

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.

La teledetección pasiva de otros elementos atmosféricos, como el ozono (en particular a 142 GHz) se beneficia asimismo del aumento del número de emplazamientos radiométricos en tierra.

6.7 Sistemas de aeronaves no tripuladas

Los sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS, *unmanned aircraft systems*) cada vez adquieren más importancia en las observaciones meteorológicas y de la Tierra. Los UAS satisfacen los requisitos de observación en zonas donde no pueden instalarse sistemas tradicionales, donde no es posible realizar vuelos con aeronaves tripuladas debido a la larga duración del vuelo y donde existen condiciones peligrosas. El funcionamiento de los UAS (2008) a efectos meteorológicos normalmente hace uso de espectro sin licencia para el mando y control de la aeronave, aunque algunos sistemas emplean frecuencias con su correspondiente licencia. Los UAS se utilizan en aplicaciones que incluyen lanzamientos rutinarios de radiosondas con paracaídas sobre zonas oceánicas donde los datos de la radiosonda normalmente se pierden, vuelos en el interior de huracanes y ciclones para la recopilación de datos *in situ*, reconocimiento aéreo de zonas afectadas por condiciones climatológicas o sequías severas y supervisión de la fusión de hielo ártico.

El empleo de los UAS a efectos meteorológicos mejora la predicción de las zonas que van a resultar dañadas por un huracán, amplía la antelación con que puede advertirse al público en general y permite lograr una mejor comprensión de nuestros fenómenos climatológicos. Además de para el mando y control del UAS, se necesita espectro para la transmisión de datos de carga útil. Este espectro podría encontrarse en bandas adecuadas atribuidas para fines meteorológicos (MetAids) o, dependiendo del volumen de datos, en otras bandas de frecuencias.

Referencias

- 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.

Bibliografía

- 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 radiactiva 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 Distribuido
CNES	Centro Nacional de Estudios Espaciales	DADS	Sistema de archivo y distribución de datos
CNIE	Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales	DAPS	Sistema de procesamiento automático DCS
COADS	Conjunto de datos completo sobre el océano y la atmósfera	DAS	Sistema de adquisición de datos
COI	Comisión Oceanográfica Intergubernamental	DAS	Sistema de administración de la base de datos
CONUS	Estados Unidos Continental	dB	Sistema de acceso directo
COP	Conferencia de las partes	Decibelio	
COPUOS	Comisión sobre la utilización del espacio ultraterrestre con fines pacíficos	DB	Radiodifusión directa
		DBMS	Sistema de gestión de la base de datos
CORSSAC	Civil Operational Remote Sensing Satellite Advisory Committee	DCP	Plataforma de recogida de datos
COSPAS	Sistema de búsqueda y salvamento a bordo de satélite ruso. Véase SARSAT	DCPI	Interrogación de las plataformas de recogida de datos
		DCPLS	Sistema de recogida de datos y localización de plataformas
CPCSA	Coordinación y actividades complementarias del programa climático	DCPR	Recepción de las plataformas de recogida de datos
		DCR	Radiómetro de correlación diferencial
CPR	Radiómetro físico de nubes o reanimación cardiopulmonar	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 isotrópica 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	G/T	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 geoestacionaria
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
ERL	Laboratorio de Investigación Medioambiental	GIMTACS	Sistema de telemetría y telemando
EROS	Satélite de observación de recursos terrestres		GOES I/M
ERS	Satélite europeo de teledetección	GIS	Sistemas de información geográfica
ESA	Agencia Espacial Europea	GMACS	Sistema de supervisión y control
ESD	Descarga electrostática		GOES (actualmente GIMTACS)
ESMR	Radiómetro de microondas de barrido electrónico	GMS	Satélite meteorológico geoestacionario
ETA	Hora prevista de llegada	GMT	Tiempo medio de Greenwich
ETM	Modelo de pruebas de ingeniería	GOES	Satélite geoestacionario operacional del medio ambiente
ETM	Trazador temático ampliado	GOMS	Satélite meteorológico operacional geoestacionario

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



* 3 3 7 3 3 *

Impreso en Suiza
Ginebra, 2009
ISBN 92-61-12843-2

Derechos de las fotografías: © ITU, © WMO