

UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

Recomendación UIT-R RS.515-5
(08/2012)

**Bandas de frecuencias y anchuras de banda
para la teledetección pasiva por satélite**

Serie RS
Sistemas de detección a distancia



Prólogo

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

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

Política sobre Derechos de Propiedad Intelectual (IPR)

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

Series de las Recomendaciones UIT-R

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

Series	Título
BO	Distribución por satélite
BR	Registro para producción, archivo y reproducción; películas en televisión
BS	Servicio de radiodifusión (sonora)
BT	Servicio de radiodifusión (televisión)
F	Servicio fijo
M	Servicios móviles, de radiodeterminación, de aficionados y otros servicios por satélite conexos
P	Propagación de las ondas radioeléctricas
RA	Radioastronomía
RS	Sistemas de detección a distancia
S	Servicio fijo por satélite
SA	Aplicaciones espaciales y meteorología
SF	Compartición de frecuencias y coordinación entre los sistemas del servicio fijo por satélite y del servicio fijo
SM	Gestión del espectro
SNG	Periodismo electrónico por satélite
TF	Emisiones de frecuencias patrón y señales horarias
V	Vocabulario y cuestiones afines

Nota: Esta Recomendación UIT-R fue aprobada en inglés conforme al procedimiento detallado en la Resolución UIT-R 1.

Publicación electrónica
Ginebra, 2013

© UIT 2013

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

RECOMENDACIÓN UIT-R RS.515-5*

**Bandas de frecuencias y anchuras de banda
para la teledetección pasiva por satélite**

(1978-1990-1994-1997-2003-2012)

Cometido

Esta Recomendación proporciona información sobre las bandas de frecuencia y anchuras de banda utilizadas para la teledetección pasiva por satélite de la Tierra y su atmósfera mediante sensores pasivos de microondas.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que cada vez adquieren más importancia los datos sobre el medio ambiente relativos a la Tierra;
- b) que se están utilizando los sensores pasivos de microondas para la teleobservación desde satélites de meteorología y de exploración de la Tierra en determinadas bandas de frecuencias atribuidas para ese fin en el Reglamento de Radiocomunicaciones (RR);
- c) que algunas de esas bandas están también atribuidas a otros servicios de radiocomunicaciones;
- d) que para estas mediciones y aplicaciones es fundamental lograr protección contra las interferencias a determinadas frecuencias;
- e) que, para la medición de rayas espectrales conocidas, son de particular importancia determinadas bandas de frecuencias específicas;
- f) que, para otros tipos de mediciones por sensores pasivos, se utiliza un determinado número de bandas de frecuencias, cuyas posiciones exactas en el espectro no son de importancia crítica, siempre y cuando las frecuencias centrales estén más o menos uniformemente distribuidas en el espectro;
- g) que debido a los continuos desarrollos tecnológicos y científicos en las bandas de 275 GHz a 3 000 GHz, los requisitos de la detección pasiva deben examinarse periódicamente;
- h) que pueden identificarse tres categorías principales de sensores pasivos para su utilización en las bandas de 275 GHz a 3 000 GHz:
 - 1) sondas de atmósfera vertical tridimensional que requieren una fiabilidad de los datos muy elevada y una resolución media a lo largo de múltiples canales;
 - 2) radiómetros de imágenes que requieren una fiabilidad de los datos elevada, una resolución media e integración a lo largo de canales individuales con anchura de banda relativamente amplia; y
 - 3) sondas de limbo atmosférico que requieren una fiabilidad de los datos media a una muy alta resolución a lo largo de muchos canales de anchura de banda pequeña;

* La Comisión de Estudio 7 introdujo modificaciones redaccionales en esta Recomendación en 2010 de conformidad con la Resolución UIT-R 1.

j) que todo requisito de calidad debe basarse en requisitos científicos conocido para la medición; por tanto, la resolución de los datos y los niveles de disponibilidad deben ser científicamente significativos con respecto a las aplicaciones para las que se usan (por ejemplo, previsiones, observaciones de la superficie y supervisión del clima),

observando

a) que debido al gran número de rayas espectrales de interés para las observaciones de la Tierra en la región 1 000-3 000 GHz, no sería posible definir bandas individuales adecuadas para la teledetección en esta gama;

b) que la atmósfera en la gama 1 000-3 000 GHz es tan opaca a cualquier emisión que sólo son posibles las observaciones de sondeo del limbo desde la parte superior de la atmósfera;

c) que debido a la opacidad de la atmósfera en la gama 1 000-3 000 GHz, es esencial garantizar la adecuada protección de las operaciones de teledetección pasiva y la compartición de frecuencias es posible con cualquier servicio de radiocomunicaciones terrenales,

recomienda

1 que basándose en los Anexos 1 y 2, para la teledetección pasiva por satélite de las propiedades de la superficie, los océanos y la atmósfera de la Tierra, se utilicen las bandas de frecuencia y las anchuras de banda asociadas indicadas en el Cuadro 1, para bandas por debajo de 275 GHz y, para bandas comprendidas entre 275 y 1 000 GHz las indicadas en el Cuadro 2;

2 que sea posible la utilización cofrecuencia de la gama de frecuencias 1 000-3 000 GHz por los sistemas de teledetección pasiva por microondas de cualquier servicio de radiocomunicaciones terrenales.

CUADRO 1

Bandas de frecuencia para la teledetección pasiva por satélite por debajo de 275 GHz

Bandas de frecuencia⁽¹⁾ (GHz)	Anchura de banda total necesaria (MHz)	Rayas espectrales o frecuencia central (GHz)	Mediciones (meteorología-climatología, química) (véase el Cuadro 3)	Modelo de exploración típico N, C, L⁽¹⁾
1,37-1,427	57	1,4	Humedad del suelo, salinidad de los océanos, temperatura de la superficie del mar, índice de vegetación	N, C
2,64-2,7	60	2,67	Salinidad de los océanos, humedad del suelo, índice de vegetación	N
4,2-4,4	200	4,3	Temperatura de la superficie del mar	N, C
6,425-7,25	350 ⁽⁴⁾	6,85	Temperatura de la superficie del mar	N, C
10,6-10,7	100	10,65	Índice de pluviosidad, contenido de agua de la nieve, morfología del hielo, estado del mar, velocidad de los vientos del océano	N, C
15,2-15,4	200	15,3	Vapor de agua, tasa de lluvia	N, C
18,6-18,8	200	18,7	Índice de pluviosidad, estado del mar, hielo del mar, vapor de agua, velocidad de los vientos del océano, emisividad y humedad del suelo	N, C

CUADRO 1 (Fin)

Bandas de frecuencia⁽¹⁾ (GHz)	Anchura de banda total necesaria (MHz)	Rayas espectrales o frecuencia central (GHz)	Mediciones (meteorología-climatología, química) (véase el Cuadro 3)	Modelo de exploración típico N, C, L⁽¹⁾
21,2-21,4	200	21,3	Vapor de agua, agua líquida	N
22,21-22,5	290	22,235	Vapor de agua, agua líquida	N
23,6-24	400	23,8	Vapor de agua, agua líquida, canal asociado para sondeo atmosférico	N, C
31,3-31,8	500	31,4	Hielo del mar, vapor de agua, vertidos de crudo, nubes, agua líquida, temperatura superficial, ventana de referencia para la gama 50-60 GHz	N, C
36-37	1 000	36,5	Índices de pluviosidad, nieve, hielo del mar, nubes	N, C
50,2-50,4	200	50,3	Ventana de referencia para el perfil de la temperatura atmosférica (temperatura de la superficie)	N, C
52,6-59,3	6 700 ⁽²⁾	Varias entre 52,6-59,3	Perfil de la temperatura atmosférica (rayas de absorción del O ₂)	N, C
86-92	6 000	89	Nubes, vertidos de crudo, hielo, nieve, lluvia, ventana de referencia para sondeos de temperatura a proximidad de 118 GHz	N, C
100-102	2 000	100,49	N ₂ O, NO	L
109,5-111,8	2 300	110,8	O ₃	L
114,25-116	1 750	115,27	CO	L
115,25-122,25	7 000 ⁽²⁾	118,75	Perfil de la temperatura atmosférica (raya de absorción del O ₂)	N, L
148,5-151,5	3 000	150,74	N ₂ O, temperatura de la superficie de la Tierra, parámetros de nubes, ventana de referencia para sondeo de temperatura	N, L
155,5-158,5 ⁽³⁾	3 000	157	Parámetros de la Tierra y las nubes	N, C
164-167	3 000 ⁽²⁾	164,38, 167,2	N ₂ O, agua y hielo de nubes, lluvia, CO, ClO	N, C, L
174,8-191,8	17 000 ⁽²⁾	175,86, 177,26, 183,31, 184,75	N ₂ O, perfil del vapor de agua, O ₃	N, C, L
200-209	9 000 ⁽²⁾	200,98, 203,4, 204,35, 206,13, 208,64	N ₂ O, ClO, vapor de agua, O ₃	L
226-231,5	5 500	226,09, 230,54, 231,28	Nubes, humedad, N ₂ O (226,09 GHz), CO (230,54 GHz), O ₃ (231,28 GHz), ventana de referencia	N, L
235-238	3 000	235,71, 237,15	O ₃	L
250-252	2 000	251,21	N ₂ O	L

Notas relativas al Cuadro 1:

- (1) N: Nadir, las formas de exploración del nadir son fundamentalmente el sondeo y la observación de la superficie de la Tierra según ángulos de incidencia casi perpendiculares. La exploración finaliza en la superficie o en diversos niveles de la atmósfera de conformidad con las funciones ponderadas. L: Limbo, las formas de exploración del limbo observan la atmósfera «en el borde» y finalizan en el espacio en lugar de la superficie, por lo que la ponderación es cero en la superficie y máxima en la altura del punto de tangencia. C: Cónica, los modos de exploración cónica observan la superficie de la Tierra girando la antena un cierto ángulo con respecto a la dirección del nadir.
- (2) Esta anchura de banda está ocupada por canales múltiples.
- (3) Esta banda será necesaria hasta 2018 a fin de tener en cuenta los sensores existentes y los previstos.
- (4) Esta anchura de banda es la anchura de banda del sensor requerida en la gama de frecuencias indicada en la Columna 1.

CUADRO 2

Bandas de frecuencia para la teledetección pasiva por satélite
entre 275 y 1 000 GHz

Bandas de frecuencia (GHz)	Anchura de banda total necesaria (MHz)	Rayas espectrales (GHz) (véase el Cuadro 3)	Medición			Modo de exploración típico N, C, L ⁽¹⁾
			Meteorología-climatológica	Ventana (GHz)	Química	
275-285,4	10 400	276,33 (N ₂ O), 278,6 (ClO)		276,4-285,4	N ₂ O, ClO	L
296-306	10 000	Ventana para 325,1, 298,5, (HNO ₃), 300,22 (HOCl), 301,44 (N ₂ O), 303,57 (O ₃), 304,5 (O ¹⁷ O), 305,2 (HNO ₃)	Canal lateral para sonda de temperatura	296-306	OXÍGENO, HNO ₃ , HOCl, N ₂ O, O ₃ , O ¹⁷ O,	N, L
313,5-355,6	42 100	313,8 (HDO), {315,8, 346,9, 344,5, 352,9} (ClO), {318,8, 345,8, 344,5} (HNO ₃), {321,15, 325,15} (H ₂ O), {321, 345,5, 352,3, 352,6, 352,8} (O ₃), {322,8, 343,4} (HOCl), {345,0, 345,4} (CH ₃ Cl), 345,0 (O ¹⁸ O), 345,8 (CO), 346 (BrO), 349,4 (CH ₃ CN), 351,67 (N ₂ O), 354,5 (HCN)	Perfil de vapor de agua, nube. Canal lateral para sonda de temperatura	339,5-348,5	HDO, ClO, HNO ₃ , H ₂ O, O ₃ , HOCl, CH ₃ Cl, O ¹⁸ O, CO, BrO, CH ₃ CN, N ₂ O, HCN	N, C, L
361,2-365	3 800	364,32 (O ₃)	Canal lateral para el perfil de vapor de agua		O ₃	N, L

CUADRO 2 (Continuación)

Bandas de frecuencia (GHz)	Anchura de banda total necesaria (MHz)	Rayas espectrales (GHz) (véase el Cuadro 3)	Medición			Modo de exploración típico N, C, L ⁽¹⁾
			Meteorología-climatológica	Ventana (GHz)	Química	
369,2-391,2	22 000	380,2 (H ₂ O)	Perfil de vapor de agua		H ₂ O	N, L
397,2-399,2	2 000		Perfil de vapor de agua			N, L
409-411	2 000		Sonda de temperatura			L
416-433,46	17 460	424,7 (O ₂)	Oxígeno, perfil de temperatura		O ₂	N, L
439,1-466,3	27 200	442 (HNO ₃), {443,1, 448} (H ₂ O), 443,2 (O ₃), 452,09 (N ₂ O), 461,04 (CO)	Perfil de vapor de agua, nube	458,5-466,3	HNO ₃ , H ₂ O, O ₃ , N ₂ O, CO	N, L, C
477,75-496,75	19 000	487,25 (O ₂)	Oxígeno, perfil de temperatura		O ₂	L
497-502	5 000	{497,6, 497,9} (BrO), 497,9 (N ₂ ¹⁸ O), 498,6 (O ₃)	Canal lateral para el perfil de vapor de agua	498-502	BrO, N ₂ ¹⁸ O, O ₃	L, N
523-527	4 000	Ventana para 556,9	Canal lateral para el perfil de vapor de agua	523-527		N
538-581	43 000	{541,26, 542,35, 550,90, 556,98} (HNO ₃), {544,99, 566,29, 571,0} (O ₃), 556,93 (H ₂ O), 575,4 (ClO)	Perfil de vapor de agua	538-542	HNO ₃ , O ₃ , H ₂ O, ClO	N, L
611,7-629,7	18 000	620,7 (H ₂ O), 624,27 (ClO ₂), {624,34, 624,89, 625,84, 626,17} (SO ₂), {624,48, 624,78} (HNO ₃), 624,77 (⁸¹ BrO), 624,8 (CH ₃ CN), 624,98 (H ³⁷ Cl), 625,04 (H ₂ O ₂), {625,07, 628,46} (HOCl), 625,37 (O ₃), 625,66 (HO ₂), 625,92 (H ³⁵ Cl), 627,18 (CH ₃ Cl), 627,77 (O ¹⁸ O)	Perfil de vapor de agua, oxígeno		OXÍGENO, H ₂ O, ClO ₂ , SO ₂ , HNO ₃ , BrO, CH ₃ CN, (H ³⁷ Cl), H ₂ O ₂ , HOCl, O ₃ , HO ₂ , H ³⁵ Cl, CH ₃ Cl, O ¹⁸ O	L

CUADRO 2 (Fin)

Bandas de frecuencia (GHz)	Anchura de banda total necesaria (MHz)	Rayas espectrales (GHz) (véase el Cuadro 3)	Medición			Modo de exploración típico N, C, L ⁽¹⁾
			Meteorología-climatológica	Ventana (GHz)	Química	
634-654	20 000	635,87 (HOCl), 647,1 (H ₂ ¹⁸ O), 649,24 (SO ₂), 649,45 (ClO), 649,7 (HO ₂), 650,18 (⁸¹ BrO), 650,28 (HNO ₃), 650,73 (O ₃), 651,77 (NO), 652,83 (N ₂ O)	Canal lateral para el perfil de vapor de agua	634,8-651	HOCl, H ₂ ¹⁸ O, SO ₂ , ClO, HO ₂ , BrO, HNO ₃ , O ₃ , NO, N ₂ O	L, N
656,9-692	35 100	658 (H ₂ O), 660,49 (HO ₂), 687,7 (ClO), 688,5 (CH ₃ Cl), 691,47 (CO)	Perfil de vapor de agua, nube	676,5-689,5	H ₂ O, HO ₂ , ClO, CH ₃ Cl, CO	L, N, C
713,4-717,4	4 000	715,4 (O ₂)	Oxígeno		O ₂	L
729-733	4 000	731 (HNO ₃), 731,18 (O ¹⁸ O)	Oxígeno		HNO ₃ , O ¹⁸ O	L
750-754	4 000	752 (H ₂ O)	Agua		H ₂ O	L
771,8-775,8	4 000	773,8 (O ₂)	Oxígeno		O ₂	L
823,15-845,15	22 000	834,15 (O ₂)	Oxígeno		O ₂	N, C, L
850-854	4 000	852 (NO)			NO	L
857,9-861,9	4 000	859,9 (H ₂ O)	Agua		H ₂ O	L
866-882	16 000		Nube, ventana			N, C
905,17-927,17	22 000	916,17 (H ₂ O)	Agua		H ₂ O	N, L
951-956	5 000	952 (NO), 955 (O ¹⁸ O)	Oxígeno		NO, O ¹⁸ O	L
968,31-972,31	4 000	970,3 (H ₂ O)	Agua		H ₂ O	L
985,9-989,9	4 000	987,9 (H ₂ O)	Agua		H ₂ O	L

⁽¹⁾ N: Nadir, las formas de exploración del nadir son fundamentalmente el sondeo y la observación de la superficie de la Tierra según ángulos de incidencia casi perpendiculares. La exploración finaliza en la superficie o en diversos niveles de la atmósfera de conformidad con las funciones ponderadas. L: Limbo, las formas de exploración del limbo observan la atmósfera «en el borde» y finalizan en el espacio en lugar de la superficie, por lo que la ponderación es cero en la superficie y máxima en la altura del punto de tangencia. C: Cónica, los modos de exploración Cónica observan la superficie de la Tierra girando la antena un cierto ángulo con respecto a la dirección del nadir.

CUADRO 3

**Moléculas principales para la teledetección pasiva
por debajo de 1 000 GHz**

Molécula	Nombre químico	Molécula	Nombre químico	Molécula	Nombre químico
BrO	Monóxido de bromo	CH ₃ Cl	Metilclorato	CH ₃ CN	Acetonitrilo
ClO	Monóxido de cloro	ClO ₂	Dióxido de cloro	CO	Monóxido de carbono
H ³⁵ Cl	Cloruro de hidrógeno	HCN	Cianuro de hidrógeno	HDO	Óxido de deuterio-protio
HNO ₃	Ácido nítrico	H ₂ O	Agua	H ₂ ¹⁸ O	
HO ₂	Hidroperoxilo	H ₂ O ₂	Peróxido de hidrógeno	HOCl	Ácido hipocloroso
NO	Óxido nítrico	N ₂ O	Óxido nitroso	O ₃	Ozono

Anexo 1

Selección de frecuencias para la detección pasiva por satélite

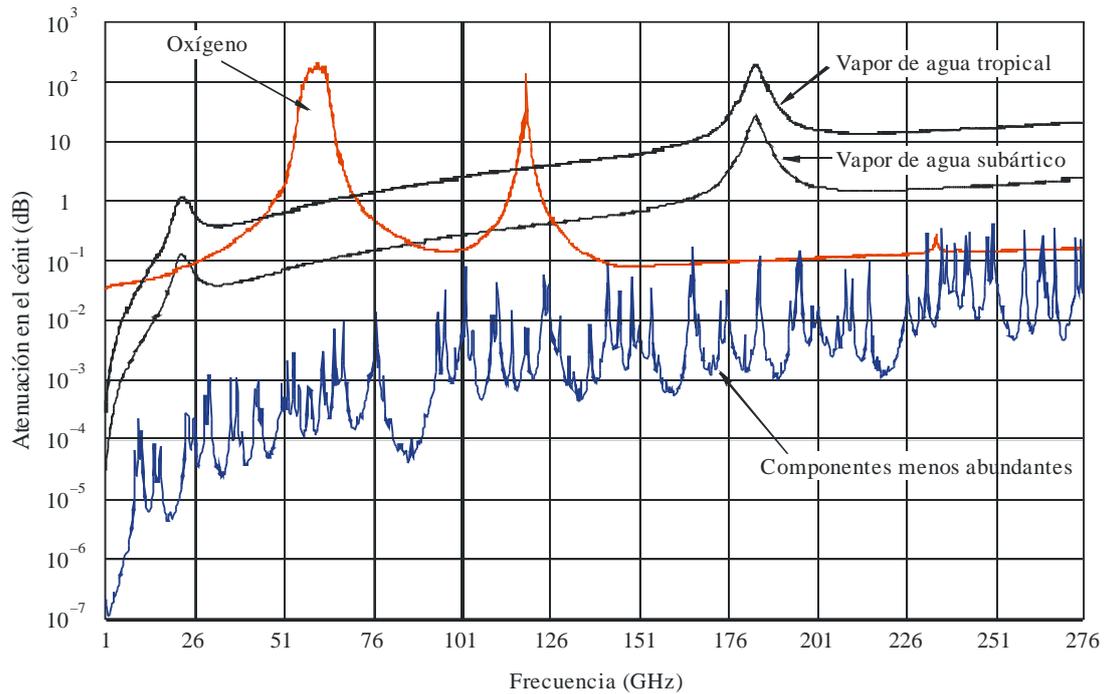
1 Introducción

Tanto la superficie de la Tierra como la atmósfera por encima de ella emiten y absorben energía en las frecuencias de microondas. Las propiedades de transmisión de esta atmósfera absorbente varían en función de la frecuencia, según se muestra en las Figs. 1a y 1b. En estas Figuras se representan los valores calculados de atenuación en dirección del cenit (ángulo de elevación de 90°), para el oxígeno, el vapor de agua y otros componentes menos abundantes. Estos cálculos se han efectuado para un trayecto entre la superficie y un satélite, y ponen de manifiesto que en ciertas bandas de frecuencias la atmósfera es efectivamente opaca y en otras es casi transparente. Por ejemplo, para el sondeo del nadir, las regiones o ventanas que son casi transparentes permiten detectar fenómenos de la superficie; las regiones opacas se utilizan para detectar la atmósfera.

La temperatura de brillo de la superficie, la temperatura atmosférica en los puntos a lo largo del trayecto y los coeficientes de absorción son parámetros desconocidos que deben determinarse a partir de mediciones de la temperatura de la antena, T_A . La temperatura de brillo en la superficie y los coeficientes de absorción dependen cada uno a su vez de las propiedades físicas de la superficie o de la atmósfera que, a su vez, deberán detectarse. Una única observación a una única frecuencia no puede utilizarse para estimar un único parámetro físico. Las observaciones deben efectuarse de forma simultánea a un cierto número de frecuencias y combinarse con modelos relativos a la dependencia en frecuencia y la dependencia de los parámetros físicos con respecto a la temperatura de brillo en la superficie y al coeficiente de absorción, antes de obtener soluciones.

FIGURA 1a

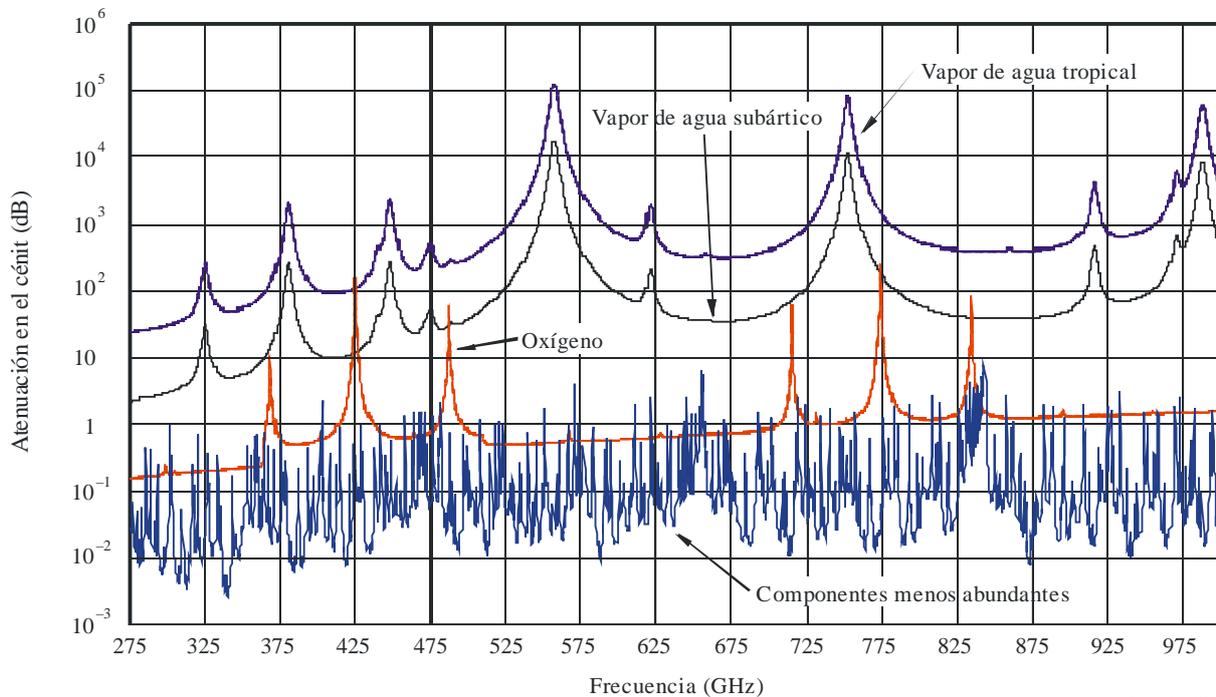
Atenuación en dirección del cenit en función de la frecuencia, 1-275 GHz



RS.0515-01a

FIGURA 1b

Atenuación en dirección del cenit en función de la frecuencia, 275-1 000 GHz



RS.0515-01b

Las frecuencias de trabajo de los sensores pasivos de microondas dependen principalmente de los fenómenos que han de medirse. Para determinadas aplicaciones, por ejemplo, medida de las emisiones de microondas de gases atmosféricos, la elección de frecuencias es bastante limitada y está determinada por las frecuencias de las rayas espectrales de estos gases. Otras aplicaciones tienen amplias regiones de frecuencias donde pueden detectarse los fenómenos.

2 Mediciones atmosféricas

La atenuación atmosférica no se produce dentro de una sola capa atmosférica de temperatura constante. El valor medido de la temperatura de la antena depende mucho de la temperatura atmosférica en la región donde la atenuación (total hasta el satélite) es inferior a 10 dB, y poco de las temperaturas en regiones donde la atenuación es muy pequeña o la atenuación total hasta el satélite es grande. Los valores de la temperatura pueden detectarse a diferentes alturas o distancias a lo largo del trayecto, seleccionando las frecuencias cerca de los bordes de las regiones opacas con diferentes atenuaciones que proporcionan diferentes funciones de ponderación o multiplicadores de $T(s)$, que es la temperatura atmosférica en un punto determinado.

Pueden seleccionarse diferentes frecuencias con el fin de obtener un conjunto razonable de funciones de ponderación para las mediciones del perfil de la temperatura atmosférica, del vapor de agua, del ozono, del óxido de cloro, del óxido nitroso y del monóxido de carbono. En relación a las cuatro últimas mediciones moleculares, cada una de las rayas individuales carece de estructura lo suficientemente fina, como en el caso de la banda de perfil de temperatura del O_2 , o de suficiente anchura, como en el caso de la banda de vapor de agua a unos 22,235 GHz, para permitir mediciones del perfil en torno a una raya, habida cuenta de las limitaciones del satélite en cuanto al tiempo de integración. Por consiguiente, para poder obtener informaciones sobre el perfil de estos elementos, será necesario realizar mediciones de múltiples rayas.

Actualmente, los perfiles de la temperatura atmosférica se obtienen mediante instrumentos de sondeo a bordo de vehículos espaciales que efectúan mediciones en el espectro del infrarrojo y de las microondas (absorción de oxígeno en torno a 60 GHz).

En comparación con las técnicas del infrarrojo, la capacidad de funcionar con todo tipo de condiciones climatológicas (la posibilidad de que un sensor a bordo de un vehículo espacial «vea» a través de la mayoría de las nubes) es probablemente la característica más importante que ofrecen las técnicas de microondas. Esto es fundamental para las aplicaciones operacionales de predicción de las condiciones meteorológicas y de las ciencias atmosféricas, ya que más del 60% de la superficie terrestre, por término medio, está completamente cubierta de nubes y sólo el 5% de cada parcela de $20 \times 20 \text{ km}^2$ (correspondiente a la resolución espacial característica de las sondas en el infrarrojo) carece totalmente de nubes. Esta situación obstaculiza seriamente el funcionamiento de las sondas en el infrarrojo, cuyo acceso a regiones extensas y activas desde el punto de vista meteorológico es escaso o inexistente.

La amplia región opaca entre 50 y 66 GHz está formada por algunas rayas de absorción estrechas (opacas), y las observaciones pueden hacerse en los bordes del conjunto de rayas o en los valles entre las rayas. El siguiente espectro de absorción de O_2 en torno a 118 GHz tiene un potencial inferior debido a su estructura particular (monocromática en comparación con la rica estructura multirraya en torno a 60 GHz) y resulta más afectado por la atenuación causada por la humedad atmosférica.

Las nubes y la lluvia pueden causar una atenuación adicional cuando se producen a lo largo del trayecto. Tanto la lluvia como las nubes pueden ser detectadas en las ventanas atmosféricas entre 5 y 150 GHz. Se requieren múltiples observaciones en una amplia gama de frecuencias para discriminar la lluvia de las nubes, así como para distinguir entre estos efectos y las radiaciones emitidas por la superficie de la Tierra.

La geometría de sondeo del limbo, es decir, cuando la atmósfera se observa tangencialmente, se puede utilizar a partir de un satélite o de un instrumento aerotransportado para determinar los perfiles de concentración de elementos residuales útiles para investigaciones de la química atmosférica. El sondeo del limbo es más sensible y permite una mayor resolución vertical que el sondeo del nadir. Las frecuencias submilimétricas, a partir de aproximadamente 500 GHz, permiten

el sondeo de la estratosfera inferior. Las frecuencias milimétricas, en particular entre 180 y 360 GHz, permiten sondear hasta altitudes inferiores, es decir, hasta la troposfera superior.

3 Mediciones terrestres y oceánicas

Las emisiones de la superficie de la Tierra se propagan hasta el satélite a través de la atmósfera. Cuando los valores de atenuación son elevados, esta emisión no puede ser detectada. Cuando son bajos, como los que se requieren para detectar la temperatura de las capas inferiores de la atmósfera, se combinan las contribuciones tanto de la superficie como de la atmósfera. Para discriminar ambos tipos de contribuciones, se necesitan mediciones adicionales dentro de los canales-ventana. La emisión de la superficie de la Tierra es proporcional a la temperatura y emisividad del suelo. Esta última está en relación con las propiedades dieléctricas y la irregularidad de la superficie de la Tierra. Si la emisividad es inferior a la unidad, la superficie emite y a la vez dispersa la radiación. La dispersión de la radiación es consecuencia de la emisión atmosférica descendente que proviene de la parte situada encima de la superficie. En un canal-ventana con valores de atenuación muy pequeños, esta última contribución es despreciable; en otro caso, ha de tenerse en cuenta en la solución.

Las temperaturas de brillo de la superficie no muestran la rápida variación con la frecuencia que presentan las emisiones producidas por las rayas de absorción atmosférica. Para determinar valores de las variaciones relativamente lentas de los efectos debidos a los parámetros de la superficie con la frecuencia, se requieren observaciones simultáneas en una amplia gama de frecuencias dentro de las ventanas atmosféricas. Los parámetros sólo pueden discriminarse cuando difieren sus relaciones de dependencia con respecto a la frecuencia. La temperatura de brillo de la superficie del océano depende de la salinidad, la temperatura y la velocidad del viento. El viento influye en la temperatura de brillo ondulando la superficie y produciendo espuma, cuyas propiedades dieléctricas son diferentes de las del agua subyacente. La salinidad se detecta mejor a frecuencias por debajo de 3 GHz, y si se requiere una precisión extrema de medición, a frecuencias por debajo de 1,5 GHz. La temperatura de la superficie del mar se detecta mejor a frecuencias comprendidas entre 3 y 10 GHz, siendo 5 GHz la frecuencia más próxima a la óptima. La velocidad del viento afecta a las observaciones en todas las frecuencias, pero se detecta mejor a frecuencias por encima de 15 GHz.

Las capas superficiales de hielo o de petróleo que flotan en la superficie tienen propiedades dieléctricas distintas al agua y puede detectarse por el cambio resultante en la temperatura de brillo. Las manchas de petróleo pueden cambiar la temperatura de brillo por encima de 30 GHz en más de 50 K y el hielo puede alterar la temperatura de brillo en más de 50 K a frecuencias comprendidas entre 1 y 40 GHz. Aunque el hielo y las manchas de petróleo pueden hacer variar en gran medida la temperatura de brillo, se requieren varias observaciones en cada una de las ventanas atmosféricas para discriminar los efectos del hielo y del petróleo respecto de la lluvia y las nubes.

El contenido en humedad de las capas de la superficie puede detectarse a frecuencias de microondas. La temperatura del brillo de la nieve y del suelo cambian con el contenido en humedad y con la frecuencia. En general, cuanto más baja sea la frecuencia, más espesas son las capas que pueden detectarse. Puesto que la humedad en la superficie está relacionada con el perfil de humedad del subsuelo, también puede ser conveniente realizar observaciones a frecuencias superiores. Para detectar el deshielo cerca de la superficie, las observaciones a frecuencias de 37 GHz y superiores proporcionan la mayor información. Para detectar el suelo, especialmente debajo de una cubierta de vegetación, las frecuencias por debajo de 3 GHz son las más adecuadas. En la práctica, se requieren varias frecuencias, primero para calificar la superficie en términos de irregularidad, vegetación, edad del hielo marino, etc., y segundo, para medir parámetros como el espesor del hielo o el contenido de humedad.

Anexo 2

Factores que intervienen en la determinación de las anchuras de banda necesarias

1 Sensibilidad de los receptores radiométricos

Los receptores radiométricos detectan la emisión térmica captada por la antena y el ruido térmico del receptor. Mediante la integración de la señal recibida, pueden reducirse las fluctuaciones del ruido aleatorio y calcularse con precisión la suma de las potencias de ruido del receptor y de la emisión térmica exterior. Si se expresa la potencia de ruido por unidad de anchura de banda como una temperatura de ruido equivalente, el efecto de la integración de reducir la incertidumbre de la medición puede expresarse como sigue:

$$\Delta T_e = \frac{\alpha(T_A + T_N)}{\sqrt{B\tau}}$$

donde:

- ΔT_e : resolución radiométrica (valor eficaz de la incertidumbre en el cálculo del ruido total de sistema, $T_A + T_N$)
- α : constante del sistema receptor, ≥ 1 , constante que depende del diseño del sistema
- T_A : temperatura de la antena
- T_N : temperatura de ruido del receptor
- B : resolución espectral de espectrorradiómetro o anchura de banda de un monocanal radiométrico
- τ : tiempo de integración.

La constante del sistema receptor α , depende del tipo de sistema de detección. Para los radiómetros de potencia total que utilizan los sensores del servicio de exploración de la Tierra por satélite, esta constante no puede ser inferior a la unidad; en la mayoría de los modernos radiómetros de potencia total. En la práctica, se aproxima mucho a la unidad.

Para longitudes de onda superiores a 3 cm, puede obtenerse una temperatura de ruido del receptor inferior a 150 K utilizando amplificadores paramétricos de estado sólido. Para longitudes de onda inferiores a 3 cm, el tipo de receptor más común utilizado hoy en día es el superheterodino con una temperatura de ruido que oscila entre varias centenas de grados para una longitud de onda de 3 cm y unos 2000 K para una longitud de onda de 3 mm. Las mejoras obtenidas en la tecnología de transistores de alta movilidad electrónica están haciendo posible la utilización de preamplificadores de bajo nivel de ruido con una temperatura de ruido del receptor de unos 300 K para longitudes de onda de 5 mm.

Aparte de la mejora de la temperatura de ruido del receptor que puede obtenerse con la introducción de preamplificadores de bajo nivel de ruido, en los radiómetros a bordo de vehículos espaciales sólo pueden reducirse significativamente los valores de ΔT_e (o aumentar la sensibilidad) incrementando las anchuras de banda de los sistemas e introduciendo configuraciones de instrumentos que permitan optimizar el tiempo de integración. En función de la resolución espacial necesaria, los radiómetros a bordo de vehículos espaciales en órbita baja están limitados a tiempos de integración del orden de segundos o menos, debido a la velocidad relativa del vehículo espacial.

2 Características de los sensores pasivos

El sensor típico utilizado para medir las diversas características de la atmósfera y la superficie es el sensor de exploración. Utilizando sensores de barrido transversal se pueden obtener coberturas de mayor anchura y anchuras de banda reducidas. El uso de esos sensores también permite obtener valores de ΔT_e inferiores, ya que es posible prolongar el tiempo de integración por observación.

La anchura de banda que necesita un sensor pasivo que mide los gases residuales en la atmósfera está determinada por la anchura de las rayas de los gases observados y por la oportunidad de observar en la misma ventana un número de rayas del mismo gas o de diferentes gases.

La anchura de las rayas de emisión de los gases atmosféricos depende principalmente de la presión. Ello determina la mínima anchura de banda necesaria (y también la resolución). Al nivel de la Tierra, las anchuras de las rayas son del orden de unos pocos gigahertzios. En la estratosfera, estas anchuras se reducen a unos pocos megahertzios. Debido a esa gran anchura de las rayas a altitudes inferiores, las sondas del limbo de ondas milimétricas (por encima de 100 GHz) que miden la atmósfera superior necesitan bandas muy anchas (del orden de los 10 GHz).

Se han llevado a cabo estudios para determinar qué sensibilidad de sensor, resolución espacial, tiempo de integración y resolución espectral se necesitan. Los resultados de esos estudios se indican en la Recomendación UIT-R RS.2017.
