

RECOMENDACIÓN UIT-R SA.515-3

**BANDAS DE FRECUENCIAS Y ANCHURAS DE BANDA UTILIZADAS
PARA LA DETECCIÓN PASIVA POR SATÉLITE**

(Cuestión UIT-R 140/7)

(1978-1990-1994-1997)

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 está aplicando la tecnología de 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;
- 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 deben determinarse las frecuencias y anchuras de banda preferidas y esenciales;
- h) que en el futuro pueden identificarse nuevas frecuencias que permitirían nuevos tipos de mediciones,

recomienda

1 que, basándose en los Anexos 1 y 2, las bandas de frecuencias y las anchuras de banda asociadas necesarias para la observación pasiva de las características de la superficie terrestre y marítima, así como de la atmósfera de la Tierra, sean las indicadas en el Cuadro 1;

2 que se aliente el empleo de las frecuencias indicadas en el Cuadro 1 para los sensores pasivos.

CUADRO 1

Frecuencia (GHz)	Anchura de banda (MHz)	Mediciones
Cerca de 1,4	100	Humedad del suelo, salinidad, temperatura del mar, índice de vegetación
Cerca de 2,7	60	Salinidad, humedad del suelo
Cerca de 4	200	Temperatura de la superficie de los océanos
Cerca de 6	400	Temperatura de la superficie de los océanos
Cerca de 11	100	Lluvia, nieve, hielo, estado del mar, viento del océano
Cerca de 15	200	Vapor de agua, lluvia
Cerca de 18	200	Lluvia, estado del mar, hielo de los océanos, vapor de agua
Cerca de 21	200	Vapor de agua, agua líquida
22,235	300	Vapor de agua, agua líquida
Cerca de 24	400	Vapor de agua, agua líquida
Cerca de 31	500	Hielo de los océanos, vapor de agua, manchas de petróleo, nubes, agua líquida

CUADRO 1 (continuación)

Frecuencia (GHz)	Anchura de banda (MHz)	Mediciones
Cerca de 37	1 000	Lluvia, nieve, hielo de los océanos, vapor de agua
50,2-50,4	200	Perfil de la temperatura
52,6-59,0	6 400 ⁽¹⁾	Perfil de la temperatura
60,3-61,3	1 000 ⁽¹⁾	Perfil de la temperatura (atmósfera superior)
Cerca de 90	6 000	Nubes, manchas de petróleo, hielo, nieve
100,49	2 000	Óxido nitroso
110,80	2 000	Ozono
115-122	7 000 ⁽¹⁾	Temperatura, monóxido de carbono
125,61	2 000	Óxido nitroso
150,74	2 000	Óxido nitroso
155,5-158,5	3 000	Parámetros de la Tierra y de las nubes
164-168	4 000	Óxido nitroso, contenido de agua y hielo en las nubes, lluvia, óxido de cloro
175-192	17 000 ⁽¹⁾	Vapor de agua, óxido nitroso, ozono
200,98	2 000	Óxido nitroso
217-231	14 000	Nubes, humedad, óxido nitroso
230,54	2 000	Monóxido de carbono
235,71	2 000	Ozono
237,15	2 000	Ozono
251,21	2 000	Óxido nitroso
276,33	2 000	Óxido nitroso
301,44	2 000	Óxido nitroso
325,10	2 000	Vapor de agua
345,80	2 000	Monóxido de carbono
364,32	2 000	Ozono
380,20	2 000	Vapor de agua

⁽¹⁾ Esta anchura de banda está ocupada por múltiples canales.

ANEXO 1

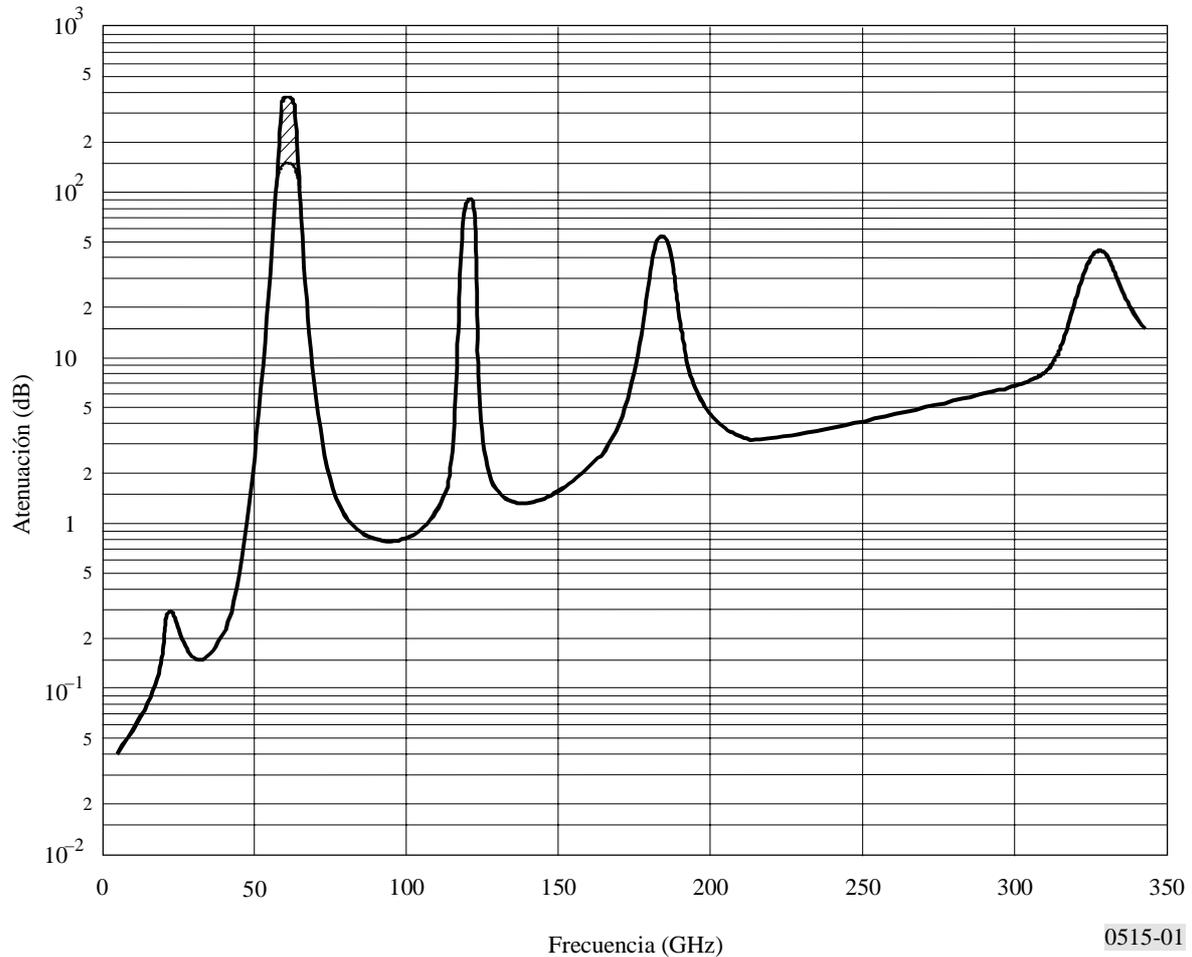
Selección de frecuencias para la detección pasiva por satélite

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 la Fig. 1. En esta Figura se representan los valores calculados de atenuación en dirección del cenit (ángulo de elevación de 90°), para el oxígeno y el vapor de agua. 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. Las regiones o ventanas que son casi transparentes permiten detectar fenómenos de la superficie; las regiones opacas se utilizan para detectar la parte superior de la atmósfera.

FIGURA 1

Atenuación en dirección del cénit en función de la frecuencia
(en enero, a una latitud media y con una concentración de vapor de agua
en la superficie de 7,5 g/m³)



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.

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 la 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.

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 : valor r.m.s. (raíz cuadrada de la media cuadrática) de la incertidumbre en el cálculo del ruido total de sistema, $T_A + T_N$
- α : constante del sistema receptor
- T_A : temperatura de la antena
- T_N : temperatura de ruido del receptor
- B : anchura de banda
- τ : tiempo de integración.

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 2 000 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 Parámetros técnicos de los sensores pasivos

2.1 Caso de los radiómetros de exploración

Se han realizado estudios para determinar las necesidades de sensibilidad del sensor, los requisitos de resolución espacial y las exigencias de anchura de banda sin exploración. Los resultados de los estudios se resumen en el Cuadro 2 para cada una de las frecuencias preferidas. Este Cuadro presenta asimismo la anchura de cobertura que puede obtenerse con las anchuras de banda sugeridas, utilizando sensores de exploración. Cabe señalar que una anchura de cobertura de 185 km permite cubrir toda la superficie de la Tierra en unos 18 días en el caso de una órbita típica, del servicio de exploración de la Tierra por satélite como la que utilizan los satélites de la serie Landsat. Para satisfacer plenamente las necesidades de los especialistas en meteorología y medio ambiente, deben actualizarse los datos con un intervalo inferior a 18 días.

CUADRO 2

**Consideraciones técnicas relativas a los sensores pasivos a bordo de naves espaciales
(caso en que se utilizan radiómetros de exploración)**

Frecuencia (GHz)	Aplicación principal	ΔT_e requerida (K)	Resolución (km)	Temperatura de ruido del sistema (K)	Anchura de banda sin exploración (MHz)	Anchura de banda sugerida (MHz)	Anchura de cobertura (km)
Próxima a 1,4	Humedad del suelo, salinidad, temperatura del mar, índice de vegetación	0,1	20	450	42	100	48
Próxima a 2,7	Salinidad, humedad del suelo	0,1	2	450	60	60	2
Próxima a 4	Temperatura de la superficie del océano	0,3	2	450	45	200	9
Próxima a 6	Temperatura de la superficie del océano	0,3	20	450	5	400	1 600
Próxima a 11	Lluvia ⁽¹⁾ , nieve, hielo, viento	1,0	1	1 000	60	100	2
Próxima a 15	Vapor de agua, lluvia	0,2	2	1 000	180	200	2
Próxima a 18	Lluvia ⁽¹⁾ , nieve, hielo, viento, vapor de agua	1,0	2	1 000	180	200	2
Próxima a 21	Vapor de agua, agua líquida	0,2	2	1 000	180	200	2
22,235	Vapor de agua, agua líquida	0,4	2	1 000	45	300	13
Próxima a 24	Vapor de agua, agua líquida	0,2	2	1 000	180	400	4
Próxima a 31	Hielo, manchas de petróleo, nubes	0,2	2	1 000	180	500	6
Próxima a 37	Lluvia, nieve, hielo, vapor de agua	1,0	1	2 300	230	1 000	4
50,2-61,3	Perfil de la temperatura atmosférica	0,3	10	2 300	235	Múltiple ⁽²⁾	10
Próxima a 90	Nubes, manchas de petróleo, hielo, nieve	1,0	1	2 300	230	6 000	26
Superior a 100	Óxido nitroso, O ₃ , CO, H ₂ O, ClO, temperatura	0,2	1	4 300	1 850	2 000	1

⁽¹⁾ Parámetros indicados para esta aplicación.

⁽²⁾ Varias bandas entre 50,2 y 61,3 GHz.

2.2 Caso de los radiómetros de barrido transversal

Utilizando radiómetros de barrido transversal puede aumentarse la anchura de la cobertura y reducirse la anchura de banda. También pueden obtenerse valores inferiores de ΔT_e debido a que es posible utilizar un tiempo de integración más largo. En el Cuadro 3 figuran las consideraciones técnicas para la gama 50-66 GHz.

CUADRO 3

**Consideraciones técnicas relativas a los sensores pasivos a bordo de naves espaciales
(caso en que se utilizan radiómetros de barrido transversal)**

Frecuencia (GHz)	Aplicación principal	ΔT_e requerida (K)	Resolución (km)	Temperatura de ruido del sistema (K)	Anchura de banda sugerida (MHz)	Anchura de cobertura (km)
50,2-61,3	Perfil de la temperatura atmosférica	0,1	10	550	20 ⁽¹⁾	2 000

⁽¹⁾ Varias bandas de 20 MHz.