

RECOMENDACIÓN UIT-R SA.515-4

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

(1978-1990-1994-1997-2003)

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 radio-comunicaciones;
- 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 para la observación pasiva de las características de la superficie terrestre y marítima, así como de la atmósfera de la Tierra, indicadas en el Cuadro 1 deben utilizarse para la detección pasiva por satélite.

CUADRO 1

Requisitos para la detección pasiva de datos relativos al medio ambiente

| Bandas de frecuencia⁽¹⁾ (GHz) | Anchura de banda total necesaria (MHz) | Rayas espectrales o frecuencia central (GHz) | Mediciones | Modo de exploración N, L⁽²⁾ |
|---|---|---|--|---|
| 1,37-1,4s, 1,4-1,427P | 100 | 1,4 | Humedad del suelo, salinidad de los océanos, temperatura de la superficie del mar, índice de vegetación | N |
| 2,64-2,655s, 2,655-2,69s, 2,69-2,7P | 45 | 2,7 | Salinidad de los océanos, humedad del suelo, índice de vegetación | N |
| 4,2-4,4s, 4,95-4,99s | 200 | 4,3 | Temperatura de la superficie del mar | N |
| 6,425-7,25 | 200 | 6,85 | Temperatura de la superficie del mar | N |
| 10,6-10,68p, 10,68-10,7P | 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 |
| 15,2-15,35s, 15,35-15,4P | 200 | 15,3 | Vapor de agua, tasa de lluvia | N |
| 18,6-18,8p | 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 |
| 21,2-21,4p | 200 | 21,3 | Vapor de agua, agua líquida | N |
| 22,21-22,5p | 300 | 22,235 | Vapor de agua, agua líquida | N |
| 23,6-24P | 400 | 23,8 | Vapor de agua, agua líquida, canal asociado para sondeo atmosférico | N |
| 31,3-31,5P, 31,5-31,8p | 500 | 31,4 | Hielo del mar, vapor de agua, manchas de petróleo, nubes, agua líquida, temperatura superficial, ventana de referencia para la gama de 50-60 GHz | N |
| 36-37p | 1 000 | 36,5 | Índice de pluviosidad, nieve, hielo del mar, nubes | N |
| 50,2-50,4P | 200 | 50,3 | Ventana de referencia para el perfil de la temperatura atmosférica (temperatura de la superficie) | N |
| 52,6-54,25P, 54,25-59,3p | 6 700 ⁽³⁾ | Varias entre 52,6-59,3 | Perfil de la temperatura atmosférica (rayas de absorción del O ₂) | N |
| 86-92P | 6 000 | 89 | Nubes, manchas de petróleo, hielo, nieve, lluvia, ventana de referencia para sondeos de temperatura a proximidad de 118 GHz | N |

CUADRO 1 (Continuación)

| Bandas de frecuencia ⁽¹⁾ (GHz) | Anchura de banda total necesaria (MHz) | Rayas espectrales o frecuencia central (GHz) | Mediciones | Modo de exploración N, L ⁽²⁾ |
|---|---|---|--|--|
| 100-102P | 2 000 | 100,49 | N ₂ O, NO | L |
| 109,5-111,8P | 2 000 | 110,8 | O ₃ | L |
| 114,25-116P | 1 750 | 115,27 | CO | L |
| 115,25-116P, 116-122,25p | 7 000 ⁽³⁾ | 118,75 | Perfil de la temperatura atmosférica (raya de absorción del O ₂) | N, L |
| 148,5-151,5P | 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 ⁽⁴⁾ p | 3 000 | 157 | Parámetros de la Tierra y las nubes | N |
| 164-167P | 3 000 ⁽³⁾ | 164,38; 167,2 | N ₂ O, agua y hielo de nubes, lluvia, CO, ClO | N, L |
| 174,8-182p, 182-185P, 185-190p, 190-191,8P | 17 000 ⁽³⁾ | 175,86; 177,26; 183,31; 184,75 | N ₂ O, perfil del vapor de agua, O ₃ | N, L |
| 200-209P | 9 000 ⁽³⁾ | 200,98; 203,4; 204,35; 206,13; 208,64 | N ₂ O, ClO, vapor de agua, O ₃ | L |
| 226-231,5P | 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 |
| 235-238p | 3 000 | 235,71; 237,15 | O ₃ | L |
| 250-252P | 2 000 | 251,21 | N ₂ O | L |
| 275-277 | 2 000 ⁽³⁾ | 276,33 | NO, N ₂ O (276,33 GHz) | L |
| 294-306 | 12 000 ⁽³⁾ | 301,44 | NO, N ₂ O (301,44 GHz), O ₃ , O ₂ , HNO ₃ , HOCl, | N, L |
| 316-334 | 18 000 ⁽³⁾ | 325,15 | Perfil del vapor de agua (325,1 GHz), O ₃ , HOCl | N, L |
| 342-349 | 7 000 ⁽³⁾ | 345,8; 346 | CO (345,8 GHz), HNO ₃ , CH ₃ Cl, O ₃ , oxígeno, HOCl | N, L |
| 363-365 | 2 000 | 364,32 | O ₃ | L |
| 371-389 | 18 000 ⁽³⁾ | 380,2 | Perfil del vapor de agua | N |
| 416-434 | 18 000 ⁽³⁾ | 425 | Perfil de la temperatura | N |
| 442-444 | 2 000 ⁽³⁾ | 443 | H ₂ O, O ₃ , HNO ₃ , N ₂ O, CO | N, L |
| 496-506 | 10 000 ⁽³⁾ | 498,1; 498,2; 498,3; 498,4; 498,5; 498,6 | O ₃ , CH ₃ Cl, N ₂ O, BrO, ClO, perfil del vapor de agua | N, L |

CUADRO 1 (*Fin*)

| Bandas de frecuencia ⁽¹⁾ (GHz) | Anchura de banda total necesaria (MHz) | Rayas espectrales o frecuencia central (GHz) | Mediciones | Modo de exploración N, L ⁽²⁾ |
|--|---|--|--|--|
| 546-568 | 22 000 ⁽³⁾ | 557 | Perfil del vapor de agua | N, L |
| 624-629 | 5 000 ⁽³⁾ | 624,27; 624,34; 624,77; 625,37; 625,92; 627,18; 627,77; 628,46 | HCl, BrO, O ₃ , HCl, SO ₂ , H ₂ O ₂ | L |
| 634-654 | 20 000 ⁽³⁾ | 635,87; 642,85; 647,2; 649,45; 649,7; 650,28; 650,73; 651,77; 652,83 | CH ₃ Cl, HOCl, ClO, vapor de agua, N ₂ O, BrO, O ₃ | N, L |
| 659-661 | 2 000 | 660,49 | BrO | L |
| 684-692 | 8 000 ⁽³⁾ | 688 | ClO, CO, CH ₃ Cl | L |
| 730-732 | 2 000 ⁽³⁾ | 731 | Oxígeno, HNO ₃ | L |
| 851-853 | 2 000 | 852 | NO | L |
| 951-956 | 5 000 ⁽³⁾ | 952; 955 | Oxígeno, NO | L |

⁽¹⁾ P: Atribución primaria, compartida sólo con servicios pasivos (número 5.340 del RR); p: atribución primaria, compartida con servicios activos; s: atribución secundaria.

⁽²⁾ 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.

⁽³⁾ Esta anchura de banda está ocupada por canales múltiples.

⁽⁴⁾ Esta banda será necesaria hasta 2018 a fin de tener en cuenta los sensores existentes y los previstos.

HNO₃: Ácido nítrico

H₂O₂: Peróxido de hidrógeno

SO₂: Dióxido de azufre

CH₃Cl: Cloruro de metilo

HOCl: Ácido hipocloroso

NO: Óxido nítrico

BrO: Monóxido de bromo

N₂O: Ácido nitroso

CO: Monóxido de carbono

HCl: Ácido clorhídrico

ClO: Monóxido de cloro

O₃: Ozono

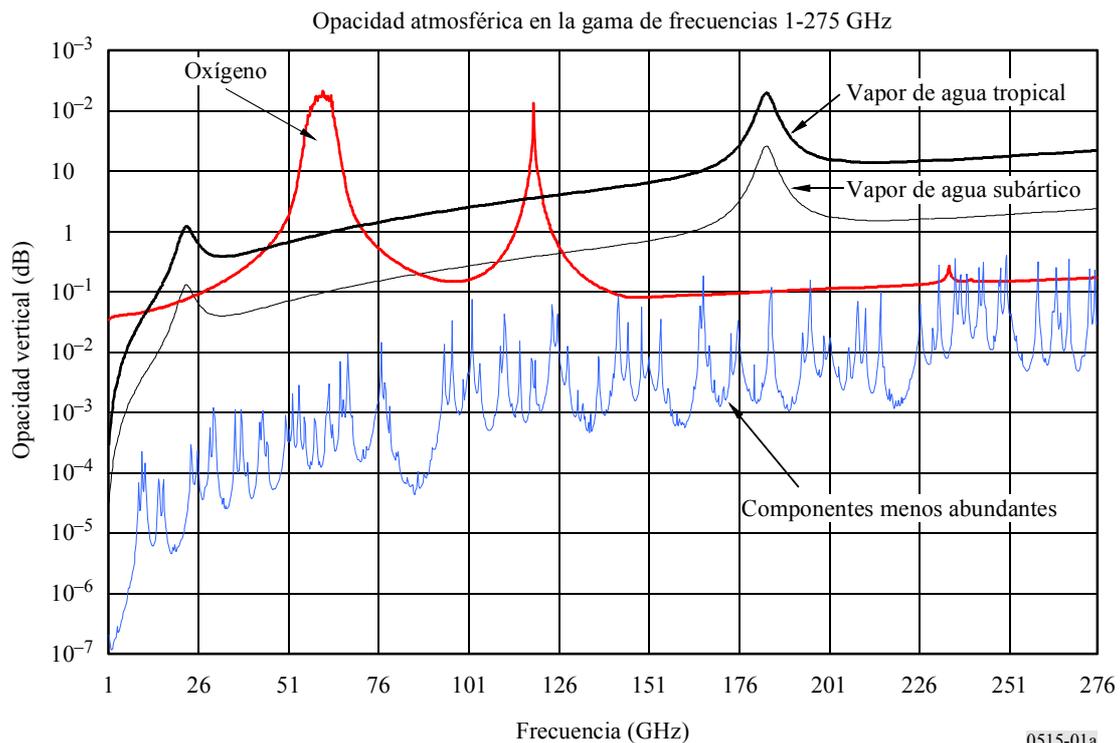
Anexo 1

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.

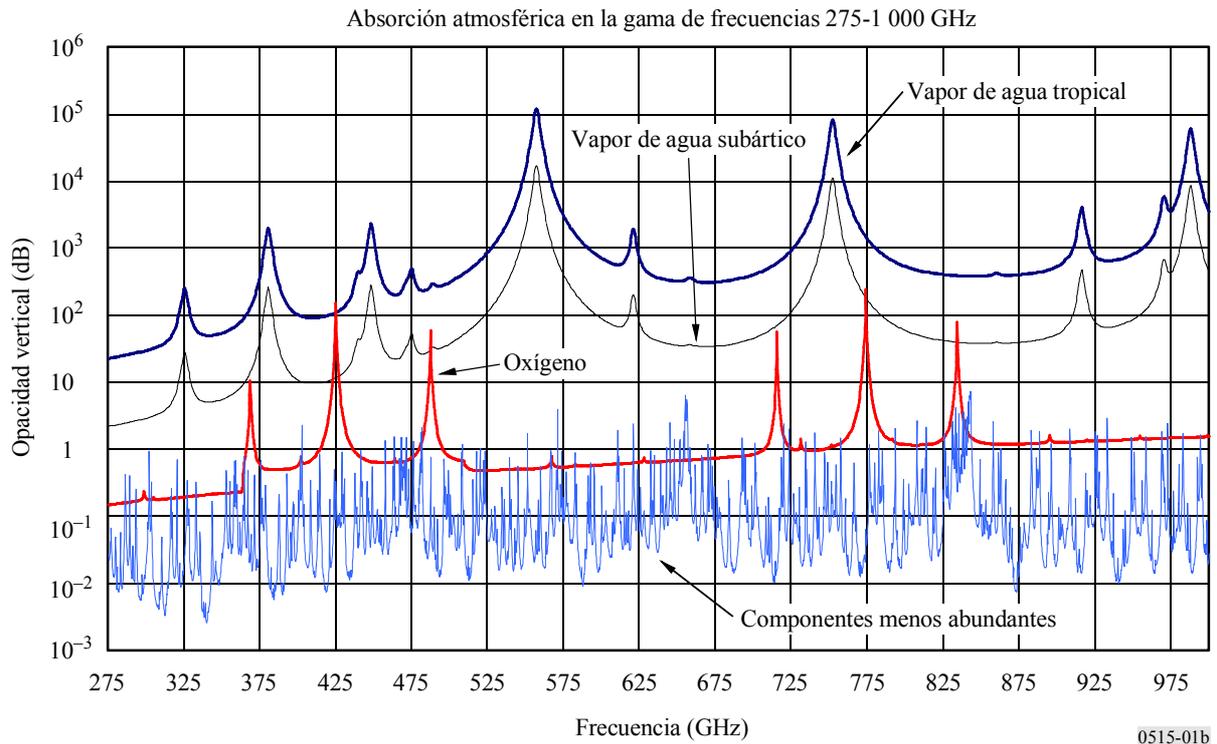
FIGURA 1a
Atenuación en dirección del cenit en función de la frecuencia, 1-275 GHz



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 1b

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



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 nítrico 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 las Recomendaciones UIT-R SA.1028 y UIT-R SA 1029.