

RECOMENDACIÓN UIT-R SA.577-5

**FRECUENCIAS PREFERIDAS Y ANCHURAS DE BANDA NECESARIAS
PARA LA TELEDETECCIÓN ACTIVA DESDE VEHÍCULOS ESPACIALES**

(Cuestión UIT-R 140/7)

(1982-1986-1990-1994-1995-1997)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que se han atribuido ciertas bandas para la teledetección activa en microondas desde vehículos espaciales;
- b) que los sensores activos de microondas situados a bordo de vehículos espaciales pueden proporcionar información única sobre las propiedades físicas de la Tierra;
- c) que la obtención de datos sobre las diferentes propiedades físicas requiere el uso de frecuencias distintas;
- d) que la resolución espacial de las mediciones determina la anchura de banda necesaria;
- e) que quizá sea preciso efectuar mediciones simultáneas en varias frecuencias para distinguir las diferentes propiedades;
- f) que en las bandas del servicio de radiolocalización (véase la Recomendación UIT-R SA.516) por lo general es posible la compartición entre los sensores activos de microondas situados a bordo de vehículos espaciales y los radares terrenales,

recomienda

1 que para efectuar mediciones de la superficie de la Tierra por medio de sensores activos relativas a:

- humedad del suelo,
- cartografía de la vegetación,
- distribución, profundidad y contenido acuoso de la nieve,
- cartografía geológica,
- cartografía del aprovechamiento del terreno,
- límites, profundidad, tipo y edad de los hielos,
- estructura de las olas oceánicas,
- velocidad y dirección de los vientos oceánicos,
- cartografía de la circulación oceánica (corrientes y remolinos),
- derramamiento de petróleo,
- cartografía geodésica,
- índices de intensidad de lluvia,
- altura y extensión de las nubes,
- presión en la superficie,
- medición de biomasa en bosques tropicales;

se utilicen las siguientes bandas de frecuencias:

- cerca de 1 GHz,
- cerca de 3 GHz,
- cerca de 5 GHz,
- cerca de 10 GHz,
- cerca de 14 GHz,
- cerca de 17 GHz,
- cerca de 24 GHz,
- cerca de 35 GHz,
- cerca de 78 GHz o cerca de 95 GHz,
- cerca de 400 MHz;

- 2 que se requieren anchuras de banda de aproximadamente 100 MHz para las aplicaciones de los sensores activos excepto para los referidos en los *recomienda* 3 y 4;
- 3 que se requieren anchuras de banda de aproximadamente 500 MHz, próximas a 5, 14 y 35 GHz;
- 4 que se requieren anchuras de banda de aproximadamente 10 a 40 MHz próximas a 400 MHz para aplicaciones que utilicen radares de apertura sintética para realizar mediciones de la humedad del suelo y la biomasa;
- 5 que las frecuencias preferidas y las anchuras de banda necesarias para la detección activa por satélite se determinen de conformidad con el Anexo 1.

NOTA 1 – Actualmente no está prevista ninguna atribución para el servicio de exploración de la Tierra por satélite (activo) cerca de 95 GHz, aunque esta banda sería más indicada para medir los índices de precipitaciones y de nubosidad, que la banda atribuida en las proximidades de 78 GHz o de 400 MHz.

ANEXO 1

Factores relacionados con la determinación de frecuencias preferidas y anchuras de banda necesarias para la detección activa por satélite

1 Introducción

Los sensores activos se diferencian de los pasivos en que iluminan el objeto observado y responden a la energía reflejada por él.

Hay 4 tipos básicos de sensores activos:

- dispersímetros,
- altímetros,
- sensores de imágenes,
- radares de precipitación y nubes.

Los dispersímetros de radar permiten determinar las irregularidades de grandes objetos. Cuando funciona a frecuencias superiores a 300 MHz, el dispersímetro mide la retrodispersión causada por la irregularidad de la superficie, que es clasificada en amplias categorías, desde la lisa a la muy accidentada. En frecuencias próximas a 200 MHz, la reflectividad depende de la constante dieléctrica del objeto; en frecuencias inferiores, la reflectividad depende principalmente de la conductividad eléctrica. Estas frecuencias inferiores pueden utilizarse para penetrar bajo la superficie de la Tierra con objeto de detectar estructuras del subsuelo.

El altímetro de radar ofrece tres posibles conceptos de aplicación en sistemas prácticos. Uno de ellos se basa en la utilización de un haz muy estrecho (2 mrad) y en la transmisión de un impulso muy corto (2 ns). La medición del tiempo de ida y retorno del borde anterior del impulso transmitido proporciona datos relativos a la altitud. Una técnica similar es la de compresión de los impulsos. Un impulso de corta duración genera un impulso más largo modulado en frecuencia; el impulso devuelto, que tiene una anchura de banda grande, se comprime de nuevo en un impulso corto, del que se detecta su borde anterior. La tercera técnica requiere antenas de tamaños moderados y una cierta estabilización del vehículo espacial, obteniéndose el impulso radárico desde el punto del nadir mediante una técnica de «puerta de tiempo». Para obtener con este sistema información sobre la altitud, se mide el baricentro de la primera porción de la onda radárica en vez del borde anterior de un impulso muy corto.

Los sistemas reproductores de imágenes por radar se emplean para producir las imágenes de alta resolución que necesitan los usuarios en los campos de la geología, la oceanografía y la agricultura. A fin de obtener una resolución razonable desde el espacio, se utilizarán radares de apertura sintética para muchas aplicaciones, ya que su resolución es independiente de la distancia. En el campo de la exploración meteorológica, se pueden utilizar asimismo radares de efecto Doppler.

Hay que conocer las distribuciones mundiales de lluvia y nubes para comprender y predecir el cambio del clima mundial. Los sensores de microondas tienen una ventaja evidente con respecto a los sensores en la región visible/infrarroja porque tienen la capacidad de penetrar la cobertura de nubes, proporcionando así información directa del volumen de lluvia y nubes. Los sensores activos son especialmente importantes porque son los únicos instrumentos que proporcionan estructuras verticales de la lluvia y las nubes, y por consiguiente son esenciales para estudiar la circulación atmosférica y el presupuesto de radiación en gran escala. Además, los sensores activos pueden proporcionar información cuantitativa sobre la lluvia y las nubes con independencia de las propiedades de las emisiones de microondas de las superficies del medio.

La teledetección activa en la región de las microondas ofrece varias ventajas sobre los sensores de la región visible y los sensores de microondas pasivos. Además de ser particularmente sensible a diversas variables del suelo, el océano y la atmósfera (por ejemplo, la humedad de las plantas y la altura de las nubes), la detección activa, por ejemplo, penetra en la superficie y la vegetación, funciona independientemente de las condiciones meteorológicas y tanto de día como de noche, ofrece una alta resolución espacial (radar de apertura sintética), permite poner de relieve ciertas características cambiando el ángulo de iluminación y funciona en gamas espectrales amplias independientemente de las emisiones procedentes de fenómenos de banda estrecha.

Los sensores activos iluminan el objeto observado y reaccionan a la energía reflejada. A fin de recoger desde el espacio información sobre la superficie de la Tierra, la señal transmitida debe atravesar la atmósfera dos veces. En consecuencia, las propiedades de absorción y dispersión electromagnéticas de la atmósfera desempeñan un papel importante en la determinación de las regiones espectrales adecuadas para los sensores activos que han de funcionar a distancia.

La atenuación atmosférica sólo es grande a las longitudes de onda más cortas y, por esta razón, los sensores activos suelen funcionar por debajo de la región de absorción del oxígeno en 60 GHz y evitan también la región espectral cerca de la raya del vapor de agua en 22 GHz.

La dispersión electromagnética debida a las precipitaciones y a las nubes puede presentar problemas más importantes que el de la absorción atmosférica. Los ecos producidos por las gotitas de agua aumentan con el diámetro de las mismas y disminuyen a medida que aumenta la longitud de onda. Por consiguiente, las nubes producen escaso eco para longitudes de ondas más largas, pero las precipitaciones pueden producir mayores ecos debido al mayor diámetro de las gotas de lluvia.

A continuación se presentan diversos aspectos sobre la investigación de los sensores activos, especialmente por lo que se refiere a la elección de frecuencias para medir variables relacionadas con la Tierra desde una plataforma situada en el espacio. Debe señalarse, al determinar las frecuencias óptimas que, a causa de la amplia gama de respuestas de frecuencia de los fenómenos de interés, es a menudo necesario efectuar mediciones simultáneas en varias frecuencias de manera que puedan distinguirse los ecos de radar procedentes de diferentes fuentes.

La cantidad de eco de radar devuelto por cualquier superficie es función de la frecuencia del radar, de la irregularidad de la superficie, de sus propiedades dieléctricas, del ángulo de incidencia y del aspecto, y de la microestructura del subsuelo. En cada una de las aplicaciones enumeradas, la energía reflejada que vuelve al sensor del radar se ve fuertemente afectada por lo menos por un mecanismo de retrodispersión relacionado con el fenómeno medido. En general se estima que se trata de: la fragosidad oceánica (utilizada en el estudio de la estructura oceánica y los vientos que soplan sobre las superficies del mar); la absorción del O₂ (utilizada para determinar la presión en la superficie sobre los océanos), y las irregularidades y variaciones de la constante dieléctrica de la superficie (utilizadas en estudios de los parámetros de los hielos, la nieve y la tierra).

2 Estudios del océano y de los vientos oceánicos mediante sensores activos

En los estudios oceánicos que se realizan mediante sensores activos predominan la identificación de la estructura de las olas, la medición del viento sobre la superficie del mar y las investigaciones de las corrientes oceánicas. Generalmente, la energía de microondas reflejada procede de la fragosidad del océano; concretamente, el eco del radar es función de los efectos de difracción producidos tanto por las grandes olas como por las pequeñas ondulaciones capilares de tensión de la superficie que se desplazan sobre las grandes olas y la espuma. La cantidad de radiación reflejada debida a cada uno de esos efectos observados por un sensor activo depende del estado del mar y de la técnica de medición activa que se utilice.

Los trabajos a varias frecuencias en la banda 10 han demostrado que predominan los efectos de las grandes olas cuando la incidencia es casi normal, y los de las olas capilares a ángulos de incidencia superiores a 20°. Por lo tanto, para detectar la fragosidad del mar (que es función de las pequeñas ondulaciones, muy dependientes de la brisa) y el tamaño y la dirección de las olas grandes de larga duración (estructura aproximada del mar), se utiliza un concepto con dos componentes. En el estudio de los vientos de superficie del océano (importantes para los modelos de predicción meteorológica), el principio subyacente es que la fragosidad del océano es un indicador a partir del cual se pueden

producir las variables del viento, puesto que los pequeños elementos de irregularidad a través de los cuales se transmite el impulso del viento al océano están, por lo menos, en cuasi equilibrio con el viento. Utilizando frecuencias, polarizaciones y ángulos de incidencia variables, los investigadores pueden obtener detalles del viento en la superficie del océano, la altura significativa de las olas y los valores de inclinación cuadrática media de las olas, un logro que va más allá de las capacidades de la detección pasiva. Los experimentos han demostrado que a frecuencias próximas a 14 GHz se obtiene una buena sensibilidad a la velocidad del viento, y que dicha sensibilidad se reduce a 1,3 GHz.

Los radares de apertura sintética han dado resultados prometedores en la medición de la estructura oceánica aproximada (altura significativa media de las olas). En un diseño se emplean cuatro bandas de frecuencias en la gama 1 a 10 GHz y tres polarizaciones con posibilidades de medición con barrido amplio y ángulos de incidencia múltiples. Las manchas de petróleo en el océano eliminan las olas oceánicas de corta onda y, por lo tanto, la zona manchada puede distinguirse de la superficie limpia circundante utilizando radares de microondas para formar imágenes.

Los altímetros se han utilizado con éxito en cierto número de satélites sobre los océanos del mundo. Para los estudios oceanográficos, se necesita un sistema de altimetría con una precisión global de medición de la distancia superior a 2 cm. Para lograr esta precisión de 2 cm, será necesario suprimir los errores de medición de distancia debidos al contenido de electrones en la ionosfera, que causa errores de hasta 22 cm a 13,5 GHz. Un sistema de altimetría de dos frecuencias podría eliminar esta incertidumbre de distancia debida a la ionosfera. Asimismo, un sistema de altimetría de dos frecuencias podría proporcionar mediciones precisas de franjas continuas de contenido de electrones en la ionosfera, mediciones que no son posibles hoy día sobre amplias zonas de los océanos de la Tierra. Una región del espectro separada más de una octava de la banda 13,4-14 GHz sería una elección adecuada para la segunda frecuencia del altímetro. La segunda frecuencia podría situarse en unos 5 GHz, con la frecuencia principal en las proximidades de 14 GHz. A más largo plazo, se prevé la utilización de frecuencias más elevadas, cercanas a 35 GHz.

Por consiguiente, puede decirse que el uso de varias frecuencias ha resultado adecuado para la teledetección activa de la estructura de las olas oceánicas. Debido al rango dinámico de los vientos de alta velocidad y a la relativa ausencia de efectos atmosféricos, la tecnología de la medida de la velocidad de los vientos converge en la región de 10 a 15 GHz.

3 Detección activa de las superficies cubiertas de hielo

Las investigaciones indican que las siguientes variables del hielo pueden ser objeto, en distinto grado, de teledetección activa por microondas; el tipo de hielo (joven, viejo, etc.), la irregularidad de su superficie, la concentración, el tamaño y número de las masas de hielo flotantes, los afloramientos de agua, la deriva, la topografía de la superficie, las características de presión, el espesor y los cambios en la naturaleza y distribución de los tipos de hielo. Tomando como base esos estudios, parece ser que una frecuencia en la banda 10 es la mejor para determinar los tipos de hielo del mar. El radar en banda 9 es útil para resolver las ambigüedades resultantes de las mediciones del hielo delgado, especialmente cuando se utiliza junto con radares en banda 10. Se está estudiando la posibilidad de utilizar frecuencias más altas.

Los sensores activos de microondas más importantes a bordo de vehículos espaciales para estudiar el hielo en el mar son los radares de apertura sintética, el altímetro de radar y el dispersímetro de radar. La investigación por satélite del hielo en el mar ha sido realizada principalmente por los radares de apertura sintética a 1,3 GHz. Las imágenes de radares de apertura sintética aeroportados (1,3 y 9,1 GHz) han demostrado que, en ciertos casos, incluida la cartografía del hielo del mar, es preferible utilizar el canal de frecuencia superior. Aunque la posibilidad de interpretar las imágenes de hielo del mar mejora a frecuencias más altas, no hay dudas respecto a la utilidad del resultado a 1,3 GHz. Se han utilizado altímetros para cartografiar los parámetros del hielo del mar y la altura de la capa de hielo en Groenlandia.

4 Observaciones meteorológicas y climatológicas

Los conocimientos obtenidos a partir de las mediciones, hechas en el suelo y con aeronaves, de la lluvia, las características de las tormentas y los campos de presión en los modelos de predicción del tiempo se están aplicando a sistemas transportados en vehículos espaciales. Las técnicas se basan en los cambios que se producen en el índice de refracción de la atmósfera despejada a causa de características relacionadas con la lluvia o la reflectividad diferencial de los ecos de frecuencias múltiples. Los estudios realizados con radares de polarización ortogonal y cobertura por múltiples haces estrechos en varias frecuencias entre 2 y 37,5 GHz, han permitido medir el índice, la intensidad, la distribución espacial y el tamaño de las gotas de lluvia, la presión en la superficie de los océanos y los movimientos de los vientos dentro de las tormentas. Los resultados de experimentos en vuelo realizados para medir la intensidad de la lluvia sugieren la posibilidad de emplear sensores a bordo de vehículos espaciales para la cartografía global de la intensidad de la lluvia. Hay varios factores que limitan la elección de la frecuencia. Debe elegirse una combinación de bandas con arreglo a la sensibilidad mínima a las precipitaciones, pero sin que tenga lugar una saturación por el eco de la

Tierra en los ángulos de observación necesarios. Solamente los haces de exploración descendentes muy estrechos (contrariamente a los haces en forma de abanico azimutales o transversales) permiten deducir la intensidad de la lluvia a partir de estimaciones realizadas con altímetros de la capa de congelación. Se está desarrollando un radar de lluvia de a bordo en banda Ku para la medición de las precipitaciones tropicales. Los sistemas de frecuencia única y multifrecuencia para medir la atenuación causada por la lluvia y las reflectividades radar ofrecen la posibilidad de derivar cuantitativamente la tasa de lluvia desde satélites.

Se prefiere una frecuencia entre 92 y 95 GHz para los radares de perfil de nubes a bordo de vehículos espaciales basándose en los siguientes factores: reflectividad mínima detectable de las nubes, propagación y dispersión, resolución, interferencia en el haz de la antena, operaciones anteriores y tecnología. La reflectividad de las nubes marinas en estratos, que son muy importantes para la determinación del balance de radiación de la Tierra, puede llegar a ser de sólo -30 dBZ, nivel situado a 70 dB por debajo de la reflectividad de la lluvia (10 mm/h). El objetivo de una misión de perfilado de nubes a bordo de vehículos espaciales sería la de medir el perfil de reflectividad para todas las nubes dentro de su campo de visión con una reflectividad de tan solo -30 dBZ. Se requiere una frecuencia próxima a 95 GHz para medir este nivel de reflectividad, satisfaciendo al mismo tiempo los objetivos de resolución del seguimiento. Se ha realizado ya una gran labor experimental en forma de desarrollo de sistemas de radares en tierra y aerotransportados y acopio de datos en 95 GHz. Junto con este desarrollo de equipo, se han efectuado cálculos encaminados a estudiar el comportamiento de dispersores que no siguen una distribución de Rayleigh en 95 GHz.

5 Detección activa de la capa de vegetación y de la humedad del suelo

La detección activa de la humedad del suelo cobró interés a causa de la limitada resolución espacial de los sensores pasivos. La potencia de radar reflejada por el suelo depende de la irregularidad de éste y de su constante dieléctrica, de la capa de vegetación y del ángulo de incidencia del haz de microondas transmitido. Los primeros estudios de laboratorio mostraron que la humedad del suelo influye en la reflectividad de éste, a causa de los cambios en su constante dieléctrica. Los ángulos de incidencia inferiores a 45° pueden ayudar a distinguir los ecos producidos por las irregularidades de los ecos producidos por la humedad. Esta investigación, que utilizó las gamas de frecuencia de 4,7; 5,9 y 13,3 GHz, indica que un sistema de dispersímetros a bordo de un satélite que funcione a 4,7 GHz con ángulos de incidencia de 5° a 17° podría distinguir adecuadamente los ecos producidos por la humedad del suelo de los producidos por la capa de vegetación y las irregularidades del terreno. Con todo, son necesarias frecuencias adicionales cuando la capa de vegetación constituye un factor o cuando es necesario efectuar mediciones del subsuelo.

Por otro lado, la capa de vegetación ha sido el objeto mismo del estudio, especialmente en los experimentos de identificación de cosechas, donde los ecos del suelo constituyen un factor de imprecisión. En ellos se han utilizado reproductores de imágenes y dispersímetros, habiéndose relacionado la potencia de reflexión procedente de la vegetación con la irregularidad, la humedad y constante dieléctrica de la vegetación, y el ángulo de observación. Los resultados de esas investigaciones indican que los satélites pueden ser de utilidad en la identificación, mediante sensores activos, de cosechas y bosques, de utilización de la tierra (praderas, bosques, etc.) y de parámetros de las vertientes. Los sistemas de observación multispectro, multipolarización o multitemporal con ángulos de incidencia elevados (para reducir al mínimo los ecos del suelo) han producido resultados prometedores en la investigación en 1,3; 5,9; 9,0; 9,4; 13; 16 y 35 GHz. La clasificación de las cosechas se puede mejorar teniendo en cuenta los periodos de crecimiento, empleando varias frecuencias y repitiendo las mediciones durante varias semanas.

Debido al aumento de la penetración en vegetaciones densas en frecuencias próximas a 400 MHz y a un incremento de la información sobre dispersión, se han utilizado radares aerotransportados con funcionamiento cerca de 400 MHz en zonas tropicales donde la vegetación suele ser la más densa, para contribuir a medir la biomasa de madera en los bosques tropicales. Estos radares se han aplicado no sólo para analizar la deforestación y la reforestación, sino también para medir la biomasa de madera por encima del suelo. En varios lugares de bosques boreales y templados, los datos sobre polarización en frecuencias próximas a 400 MHz con transmisión horizontal y recepción horizontal, transmisión horizontal y recepción vertical y transmisión vertical y recepción vertical dan como resultado valores estimados de la biomasa de madera seca por encima del suelo comprendidos entre el 12% y el 27% de la biomasa real, dependiendo de la complejidad del bosque. En los bosques tropicales los radares en frecuencias próximas a 400 MHz pueden contribuir a estimar su biomasa forestal y proporcionan resultados que no pueden lograrse por otros medios, aun cuando los niveles de biomasa superen con mucho los 20 kg/m².

La penetración en la superficie en las proximidades de 400 MHz supera a la de 1 250 MHz en un factor de 8 a 10, y resulta, por tanto, más favorable para los estudios de penetración en la Tierra. Si se utilizan radares de imagen en las proximidades de 400 MHz, cabe la posibilidad de documentar la historia geológica y los cambios climáticos en los desiertos más extensos de la Tierra, utilizando mapas de sistemas fluviales enterrados y de su topografía circundante, así como de establecer modelos a escala regional de la tectónica de las regiones semiáridas del mundo, utilizando mapas de superficie y estructuras geológicas enterradas, tales como fallas, fracturas, sinclinales y anticlinales.

6 Requisitos de anchura de banda para la dirección activa

La anchura de banda necesaria para los sensores activos varía según el tipo de sensor, es decir, radar de abertura sintética, radar de abertura real, dispersímetro o altímetro. En todo caso, la anchura de banda está determinada por la resolución de distancia requerida, y es igual a:

$$B = \frac{1}{\tau} = \frac{c}{2\Delta R} \quad (1)$$

donde:

B : anchura de banda (Hz)

τ : duración equivalente del impulso (equivalente a la inversa de la anchura de banda de compresión del impulso) (s)

c : velocidad de la luz (m/s)

ΔR : resolución de distancia en el haz del radar (m).

Se señala que la resolución de alcance en la superficie (o resolución transversal) de los radares de exploración lateral viene dada por $\Delta R/\cos \theta_d$, siendo θ_d el ángulo de depresión desde el satélite o, lo que es equivalente, el ángulo de llegada a la Tierra. En el caso de radares de precipitación y nubes en que ha de obtenerse un gran número de muestras independientes en un corto espacio de tiempo en cada posición de exploración puede utilizarse la técnica de agilidad de frecuencia, en cuyo caso la anchura de banda total del radar habrá de ser $B \times N_f$ o mayor (N_f es el número de canales en el sistema de agilidad de frecuencia) considerando que la separación de frecuencia debe mantener el aislamiento necesario entre canales del receptor radar.

En conclusión, una anchura de banda de 100 MHz sería compatible con la inmensa mayoría de las aplicaciones previstas por los científicos para los sensores espaciales activos de microondas, excepto los altímetros.

7 Resumen de frecuencias preferidas y bandas necesarias para detección activa

Aun cuando la tecnología de detección activa en microondas está avanzando rápidamente y todavía quedan muchas cosas que aprender, puede definirse una serie de frecuencias preferidas que satisfagan las necesidades de medición y permitan efectuar las mediciones multifrecuencia necesarias para separar las contribuciones de señal procedentes de fuentes diferentes. Las consideraciones relativas a la compartición hacen que las bandas de frecuencias específicas para sensores activos deban estar en bandas compartidas con el servicio de radiolocalización. Por tanto, las frecuencias preferidas para las mediciones con sensores activos a bordo de vehículos espaciales están cerca de 400 MHz y de 1, 3, 5, 10, 14, 17, 24, 35 y 78 ó 95 GHz. Una anchura de banda de 100 MHz resulta apropiada para la mayoría de las aplicaciones que utilizan instrumentos de teledetección activa distintos de los altímetros. Las mediciones con altímetro pueden requerir una anchura de banda de hasta 500 MHz para satisfacer requisitos de precisión aunque, por el momento, este requisito puede cumplirse solamente en la banda atribuida cerca de 14 GHz para la detección activa. Una segunda banda de frecuencias con una anchura de banda de 500 MHz permitiría lograr una precisión de 2 cm para la aplicación de altímetros a la oceanografía. Dos bandas de frecuencias que serían útiles para lograr esta precisión son, por ejemplo, las que se encuentran en torno a 5 y 35 GHz. Una anchura de banda de unos 10 a 40 MHz próxima a 400 MHz sería suficiente para las aplicaciones que utilizan radares de apertura sintética en las mediciones de humedad del suelo y la biomasa y para documentar la historia geológica y los cambios climáticos.