

RECOMENDACIÓN UIT-R F.1249*

POTENCIA ISÓTROPA RADIADA EQUIVALENTE MÁXIMA DE LAS ESTACIONES DE TRANSMISIÓN DEL SERVICIO FIJO QUE FUNCIONAN EN LA BANDA DE FRECUENCIAS DE 25,25-27,5 GHz COMPARTIDA CON EL SERVICIO ENTRE SATÉLITES

(Cuestiones UIT-R 118/7 y UIT-R 163/9)

(1997)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que la Conferencia Administrativa Mundial de Radiocomunicaciones para examinar la atribución de frecuencias en ciertas partes del espectro (Málaga-Torremolinos, 1992) (CAMR-92) atribuyó la banda de frecuencias de 25,25-27,5 GHz al servicio entre satélites a título primario con el servicio fijo (SF) y otros servicios;
- b) que se proyecta utilizar esta banda de frecuencias para aplicaciones de investigación espacial y de exploración de la Tierra en los enlaces de retorno entre satélites a los satélites de retransmisión de datos en la órbita de satélites geoestacionarios, conforme a las Recomendaciones UIT-R SA.1018 y UIT-R SA.1019;
- c) que en la Recomendación UIT-R SA.1155 se recomienda que los niveles máximos de densidad espectral de potencia de interferencia combinada, recibidos en la banda de 25,25-27,5 GHz por satélites geoestacionarios de retransmisión de datos en el servicio entre satélites, no excedan de -178 dB(W/kHz) durante más de 0,1% del tiempo;
- d) que las aplicaciones del SF pueden comprender sistemas punto a punto y sistemas punto a multipunto;
- e) que ciertas estaciones de transmisión del SF pueden utilizar la regulación automática de la potencia del transmisor (ATPC) (véase la Recomendación UIT-R F.1101) para reducir su potencia isótropa radiada equivalente (p.i.r.e.) en condiciones de tiempo claro, pero que normalmente las estaciones de base centrales de los sistemas punto a multipunto no podrán utilizar esa ATPC;
- f) que los rigurosos objetivos de calidad de transmisión de la Recomendación UIT-T G.826 requieren un aumento de la ganancia de los sistemas de relevadores radioeléctricos, lo cual exige un aumento del valor de la p.i.r.e.;
- g) que se ha observado que la interferencia combinada de los lóbulos laterales de las antenas de un gran número de estaciones de transmisión del SF que no apuntan hacia un satélite de retransmisión de datos (DRS) es tolerable, pero que se considera que el acoplamiento del haz principal de una sola estación de transmisión del SF que no apunta hacia un DRS representa un riesgo de interferencia potencialmente grave (véase el Anexo 1);
- h) que en el número 2504A.1 (CAMR-92) del Reglamento de Radiocomunicaciones (RR) se invita al UIT-R a que formule una Recomendación sobre los límites de densidad de p.i.r.e. que se deben aplicar en la banda;
- j) que se ha proyectado crear en la órbita de los satélites geoestacionarios un número limitado de redes de satélites de retransmisión de datos enumeradas en la Recomendación UIT-R SA.1276, (véase la Nota 1);
- k) que, por motivos económicos y operacionales, el SF tiende a utilizar sistemas con las densidades de p.i.r.e. más bajas que cumplen los objetivos de calidad de transmisión;
- l) que, si bien los enlaces excepcionalmente largos del SF requieren un funcionamiento con densidades de p.i.r.e. elevadas, suelen funcionar con ángulos de elevación próximos o iguales a cero en los cuales la atenuación atmosférica reduce notablemente el riesgo de interferencia;
- m) que, en determinadas circunstancias, la topografía del terreno y las estructuras artificiales obstruyen las emisiones del SF hacia el espacio o introducen una atenuación considerable en el trayecto de interferencia potencial;
- n) que en ambos servicios se pueden utilizar técnicas de reducción de la interferencia a fin de reducir al mínimo la interferencia causada a sistemas DRS por las emisiones de sistemas del SF,

* Esta Recomendación fue elaborada conjuntamente por las Comisiones de Estudio 7 y 9 de Radiocomunicaciones y se encargarán también conjuntamente de cualquier futura revisión.

recomienda

1 que, habida cuenta de los números 2508 y 2511 del RR, la potencia suministrada por el transmisor a la antena en la anchura de banda de canal de una estación del SF en la banda de frecuencias de 25,25-27,5 GHz, no exceda de +10 dBW;

2 que la p.i.r.e. máxima en la anchura de banda de canal de esas estaciones del SF sea, en la medida de lo posible, la mínima necesaria para un funcionamiento satisfactorio y, teniendo en cuenta los números 2505 y 2511 del RR, no exceda de +55 dBW;

3 que, para las posiciones orbitales de satélites geoestacionarios especificadas en la Recomendación UIT-R SA.1276 (véase la Nota 1):

3.1 en la medida de lo posible, la densidad de p.i.r.e. de esas estaciones del SF en el sentido de las citadas posiciones no exceda de +24 dBW en ninguna banda de 1 MHz (véase la Nota 3);

3.2 en situaciones en que se produce una atenuación debida a las precipitaciones entre estaciones de transmisión y recepción del SF, la estación de transmisión pueda utilizar la ATPC para aumentar su potencia de transmisión, sin rebasar la atenuación debida a las precipitaciones de modo que la densidad de p.i.r.e. en el sentido de las citadas posiciones orbitales de los satélites geoestacionarios no exceda de +33 dBW en ninguna banda de 1 MHz;

3.3 cuando la atenuación atmosférica en el sentido de las posiciones orbitales de los satélites geoestacionarios indicadas anteriormente, calculada mediante los procedimientos del Anexo 1 a la Recomendación UIT-R P.676 teniendo en cuenta el ángulo de elevación hacia esas posiciones orbitales, la altitud de la antena de transmisión del SF, la información local sobre el contenido de vapor de agua medio durante el mes más seco y otros parámetros meteorológicos (véase la Nota 4), exceda de 3 dB, la densidad de p.i.r.e. de la estación del SF se podrá aumentar en la misma proporción;

3.4 cuando las zonas de Fresnel en el trayecto desde esa estación SF de transmisión hacia las citadas posiciones orbitales estén total o parcialmente bloqueadas, la densidad de p.i.r.e. en ese sentido se podrá aumentar en una proporción calculada mediante los métodos de la Recomendación UIT-R P.526 (véase el Anexo 4), teniendo debidamente en cuenta la refracción atmosférica en ese trayecto (véase la Recomendación UIT-R F.1333);

3.5 el Anexo 2 contiene un método que podrá utilizarse para calcular ángulos de separación con respecto a las posiciones específicas en la órbita de los satélites geoestacionarios;

4 que, para todas las demás posiciones en la órbita de los satélites geoestacionarios:

4.1 la densidad de p.i.r.e. de esas estaciones del SF en el sentido de la órbita de los satélites geoestacionarios no deberá exceder de +33 dBW en ninguna banda de 1 MHz;

4.2 el Anexo 2 a la Recomendación UIT-R SF.765 contiene un método que podrá utilizarse para calcular ángulos de separación con respecto a la órbita de los satélites geoestacionarios (véase la Nota 2).

NOTA 1 – En la Recomendación UIT-R SA.1276 se indican las siguientes posiciones en la órbita de los satélites geoestacionarios:

16,4° E, 21,5° E, 47° E, 59° E, 85° E, 90° E, 95° E, 113° E, 121° E, 160° E, 177,5° E,
16° W, 32° W, 41° W, 44° W, 46° W, 49° W, 62° W, 139° W, 160° W, 170° W, 171° W, 174° W.

NOTA 2 – La Recomendación UIT-R SF.765 se formuló originalmente para indicar separaciones precisas de hasta 2°, pero se considera que se efectuarán cálculos adicionales para valores de hasta 10° con $B = 10^\circ$ en el § 1 del Anexo 2 a esa Recomendación.

NOTA 3 – La interferencia potencial causada a satélites DRS por sistemas de relevadores radioeléctricos punto a punto, que exceda los límites de densidad de p.i.r.e. indicados en el *recomienda* 3.1, podrá reducirse evitando utilizar las frecuencias centrales de esos DRS, siempre que sea posible. Se ha de estudiar más detenidamente esta técnica de reducción.

NOTA 4 – En el Anexo 3 se propone una estimación de la atenuación atmosférica a partir de información detallada sobre parámetros meteorológicos locales. Cuando no se disponga de esos parámetros se propone, a título provisional, un método simple basado en modelos climatológicos simplificados que deberá estudiarse más detenidamente. Se ruega a las administraciones que hayan obtenido parámetros meteorológicos locales para efectuar estimaciones de la atenuación gaseosa que pongan esos datos a la disposición del UIT-R y, en particular, de las Comisiones de Estudio 3 y 9 de Radiocomunicaciones.

ANEXO 1

Densidad de p.i.r.e. máxima de los transmisores de sistemas de relevadores radioeléctricos que funcionan en la banda de 25,25-27,5 GHz compartida con el servicio entre satélites**1 Introducción**

En el presente Anexo se resumen varios análisis en los cuales se demuestra que se pueden cumplir los criterios de protección de la Recomendación UIT-R SA.1155 para los DRS, salvo en caso del acoplamiento entre haces principales por las emisiones de estaciones de relevadores radioeléctricos punto a punto.

2 Modelos de sistemas**2.1 Instalación de relevadores radioeléctricos en la banda de 25,25-27,5 GHz**

Las siguientes hipótesis relativas a las características técnicas y operacionales de las estaciones de relevadores radioeléctricos punto a punto están extrapoladas a partir de sistemas de 23 GHz existentes:

- Se supone que hay 100 000 transmisores en el mundo en la banda de 25,25-27,5 GHz (la banda de 26 GHz).
- Estimación de la distribución de los niveles de densidad de p.i.r.e. de los transmisores:
 - se estima que más del 70% de todos los enlaces del SF en la banda de 25,25-27,5 GHz funcionan por debajo de +24 dB(W/MHz);
 - se estima que menos del 25% funcionan en la gama de +24 dB(W/MHz) a +33 dB(W/MHz);
 - se estima que menos del 5% funcionan por encima de +33 dB(W/MHz).
- Una sola frecuencia por transmisor. La mitad de los transmisores son «de ida», la mitad «de retorno».
- Distribución de frecuencias en canales conforme a la Recomendación UIT-R F.748-1 (las anchuras de banda de canal recomendadas van de 112 MHz a 3,5 MHz, y 2,5 MHz; existe la posibilidad de añadir las anchuras de banda de 1,75 MHz y 1,25 MHz en el futuro).
- Los canales de explotación están distribuidos en toda la banda.
- Los ángulos de elevación son normalmente de 0° a 5°.
- La longitud de los trayectos es normalmente de 2 a 5 km.
- Se precisan amplios márgenes para el desvanecimiento debido a la lluvia en la banda de 26 GHz, para obtener una disponibilidad de 99,999%.
- Los proveedores de SF a gran escala utilizan cada vez más las opciones más bajas posible de potencia del transmisor a fin de reducir las distancias de reutilización de frecuencias.
- Sólo un pequeño número de los equipos actuales disponen de la regulación automática de potencia.

2.2 Instalación de DRS que utilizan enlaces espacio-espacio en el servicio entre satélites

A continuación se resumen las características técnicas y operacionales de los DRS que explotarán la NASA (Estados Unidos de América), la Agencia Espacial Europea (ESA), la Agencia Espacial Rusa y la Agencia Nacional de Desarrollo Espacial de Japón (NASDA), y utilizarán enlaces espacio-espacio en la banda de 26 GHz:

- Las posiciones orbitales se indican en la Recomendación UIT-R SA.1276.
- Características típicas de los DRS:
 - dos antenas de un solo acceso y de ganancia elevada con una ganancia de cresta de 58 dBi;
 - anchura de haz de 3 dB de la antena receptora inferior a 0,2°;
 - antena receptora admite una señal de retorno en banda de 20/30 GHz a la vez;
 - temperatura de ruido de receptor DRS, $T = 703 \text{ K}$ (–140,13 dB(W/MHz));

- velocidades de datos de retorno: 1 kbit/s-300 Mbit/s en una anchura de banda de 225 MHz;
- velocidades de datos de retorno: 1 kbit/s-800 Mbit/s en una anchura de banda de 650 MHz;
- frecuencia central de recepción sintonizable por pasos de 25 MHz (o más pequeños).
- Las frecuencias centrales de DRS seleccionadas conforme a las recomendaciones del Grupo sobre interfuncionamiento de redes espaciales (SNIP – Space Network Interoperability Panel) sobre canales de retorno DRS comunes serán las siguientes: 25,60 GHz, 25,85 GHz, 26,10 GHz, 26,35 GHz, 26,60 GHz, 26,85 GHz, 27,10 GHz ó 27,35 GHz.

No se han estudiado ni aplicado técnicas de reducción de la interferencia en la generación actual de DRS de 26 GHz.

3 Evaluación de la interferencia

3.1 Criterios de protección de los DRS

En la Recomendación UIT-R SA.1155 «Criterios de protección relativos a la explotación de los sistemas de satélites de retransmisión de datos», se recomienda que los niveles máximos de densidad espectral de potencia de interferencia combinada, procedentes de todas las fuentes y que no deben rebasarse más de 0,1% del tiempo, sean de -178 dB(W/kHz) en la banda de 25,25-27,5 GHz (equivalente a -148 dB(W/MHz)). Este nivel se basa en una relación $I/N = -10$ dB y una degradación marginal del enlace de 0,4 dB. La anchura de banda de referencia máxima recomendada es de 1 kHz. El criterio de protección se traduce en una densidad de p.i.r.e. interferente máxima en el SF de 13,5 dB(W/MHz) en el sentido del DRS cuando se produce un acoplamiento de haz principal, según se muestra en el Cuadro 1.

CUADRO 1

Densidad de p.i.r.e. máxima en el SF en el sentido de un DRS cuando se produce acoplamiento de haz principal

Densidad de p.i.r.e. en el SF (dB(W/MHz))	13,5
Atenuación atmosférica (dB)	3
Atenuación de polarización (dB)	3
Atenuación en el espacio libre (dB)	213,5
Ganancia de cresta de la antena de recepción del DRS (dBi)	58
Densidad máxima de interferencia (dB(W/MHz))	-148

3.2 Interferencia en el haz principal

Los criterios de interferencia en el haz principal comprenden:

- el límite admisible de densidad de p.i.r.e. del SF que cumple los criterios de protección de DRS de la Recomendación UIT-R SA.1155;
- la probabilidad de que se produzca interferencia entre haces principales. El límite admisible de densidad de p.i.r.e. del SF se calcula a partir de la hipótesis de una interferencia cocanal en una órbita DRS no inclinada. La evaluación de la probabilidad de que se produzca una interferencia en el haz principal se basa en las condiciones de funcionamiento de ambos sistemas.

Se considera el caso de un relevador radioeléctrico del SF que transmite hacia un DRS y un acoplamiento en el haz principal de la antena de ganancia elevada del satélite de retransmisión de datos para una gama de niveles de densidad de p.i.r.e. Los resultados se indican en el Cuadro 2. Ese Cuadro muestra que una densidad espectral de p.i.r.e. de más de 13,5 dB(W/MHz), suponiendo una atenuación de 3 dB debida a la absorción atmosférica y una atenuación de polarización de 3 dB, dará como resultado un nivel de interferencia superior al valor especificado en la Recomendación UIT-R SA.1155 en caso de alineación directa.

CUADRO 2

Rebasamiento de los criterios de interferencia con respecto a la densidad de p.i.r.e. del SF radiada hacia el DRS

Densidad p.i.r.e. SF (dB(W/MHz))	13,5	24	33
Ganancia antena recepción vehículo espacial DRS (dBi)	58	58	58
Atenuación espacio libre (dB)	213,5	213,5	213,5
Atenuación atmosférica (dB)	3	3	3
Atenuación de polarización (dB)	3	3	3
Potencia interferente, I (dB(W/MHz))	-148	-137,5	-128,5
Criterios interferencia máxima (dB(W/MHz))	-148	-148	-148
<i>Criterios rebasados en (dB)</i>	<i>0</i>	<i>10,5</i>	<i>19,5</i>

Cabe observar que la atenuación atmosférica puede ser inferior a 3 dB en ciertas condiciones climatológicas y con ángulos de elevación superiores.

Se efectuaron simulaciones para evaluar la interferencia con respecto al porcentaje de tiempo cuando el DRS sigue a un satélite en órbita terrestre baja (LEO). Para analizar la interferencia con respecto al porcentaje de tiempo, es necesario simular el vuelo orbital del satélite LEO. Para ello se utilizan diversos ángulos de inclinación correspondientes a los satélites LEO. En cada caso, la longitud de la estación terrenal se determina de forma que el DRS se halle en el haz principal de la antena de la estación terrenal, que está orientada en el plano horizontal.

Se efectuaron 3 simulaciones diferentes. Cada simulación se llevó a cabo durante 100 días con incrementos de 0,1 min y en cada incremento se calculó el nivel de la interferencia recibida con respecto al nivel recibido para el acoplamiento en el eje de puntería en el receptor del DRS. Las simulaciones se realizaron con respecto a tres casos, con los resultados indicados en la Fig. 1. Los casos fueron los siguientes:

Caso 1: satélite de usuario en órbita baja, altitud 300 km, inclinación 85° y latitud de estación SF 50°.

Caso 2: satélite de usuario en órbita baja, altitud 300 km, inclinación 65° y latitud de estación SF 60°.

Caso 3: satélite de usuario en órbita baja, altitud 300 km, inclinación 28,5° y latitud de estación SF 28,5°.

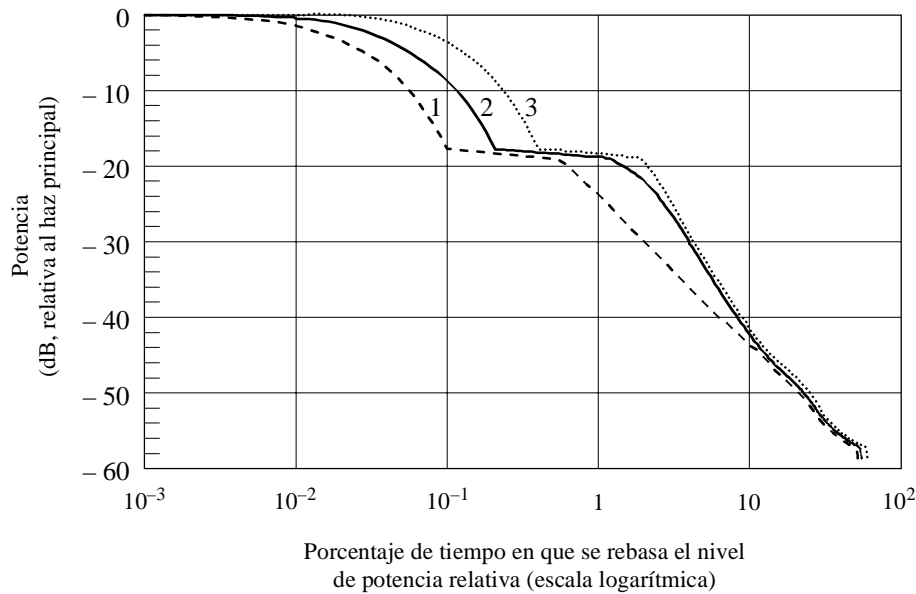
Las curvas de la Fig. 1 se pueden utilizar para determinar la densidad espectral de p.i.r.e. obtenida en condiciones de propagación en el espacio libre con la cual se garantiza que la potencia interferente recibida por el DRS no excede de -148 dB(W/MHz) durante más de 0,1% del tiempo. Los cálculos se resumen en el Cuadro 3, donde se observa que la densidad espectral de p.i.r.e. requerida para satisfacer los criterios es función de los parámetros orbitales del LEO seguido por el DRS y de la posición de la estación transmisora del SF. El nivel admisible de densidad espectral de p.i.r.e. va de 31,5 dB(W/MHz) en el caso 1 a 17,5 dB(W/MHz) en el caso 3. A los efectos de la presente Recomendación, es aceptable un valor único de 24 dB(W/MHz). La densidad espectral de p.i.r.e. se obtiene en condiciones de propagación en el espacio libre.

Varias condiciones operacionales reducen considerablemente la probabilidad y los efectos de la interferencia causada por el SF al DRS, a saber:

- la distribución de los niveles de densidad de p.i.r.e. del SF (véase el § 2.1), que indica que menos de 30% de los sistemas del SF funcionarán probablemente por encima del límite de +24 dB(W/MHz);
- la utilización de bandas de frecuencias diferentes por los sistemas del SF y el DRS (véase el Cuadro 5), que indica que sólo aproximadamente 4% de los casos de acoplamiento de haz directo pueden llegar a ocasionar interferencia;
- la puntería de la antena transmisora de SF con un ángulo de acimut aleatorio distribuido uniformemente entre 0° y 360°, y con un ángulo de elevación aleatorio distribuido uniformemente entre 0° y 5° (véanse los § 3.1 y 3.3 del presente Anexo), que reducen en por lo menos tres órdenes de magnitud adicionales la probabilidad de acoplamiento de haz directo.

El orden de magnitud resultante de la probabilidad de que se produzca un acoplamiento de haz directo es inferior a 10^{-5} .

FIGURA 1
Porcentaje de tiempo en que se rebasa la potencia de interferencia relativa



1249-01

CUADRO 3

Resumen de los cálculos realizados para determinar la densidad espectral de p.i.r.e. admisible de las emisiones de estaciones del SF en dirección de un DRS

Caso	Potencia con respecto al haz principal en el nivel de percentil 0,1 (véase la Fig. 1) (dB)	Densidad de p.i.r.e. para $I = -148$ dB(W/MHz)	Densidad de p.i.r.e. aceptable (dB(W/MHz))
1	-18	13,5	31,5
2	-9	13,5	22,5
3	-4	13,5	17,5

3.3 Interferencia combinada

La densidad de p.i.r.e. máxima se obtiene a partir del valor máximo en cada gama de la distribución de la densidad de potencia transmitida de los relevadores radioeléctricos del SF indicada en el § 2.1 del presente Anexo. La media ponderada más desfavorable de la distribución arroja un nivel de densidad de p.i.r.e. de 36,2 dB(W/MHz), según se indica en el Cuadro 4.

El número de interferentes cocanal se obtuvo a partir del modelo de instalación del § 2.1 del presente Anexo. Se ha estimado que en el mundo había hasta 100 000 transmisores del SF instalados en la banda de 25,25-27,5 GHz. Sobre la base del ejemplo del «Plan Alemán» de la Recomendación UIT-R F.748, se puede suponer que hay:

- 50 000 transmisores en la parte inferior de la banda (25,56-26,06 GHz);
- 50 000 transmisores en la parte superior de la banda (26,68-27,18 GHz).

CUADRO 4

**Estimación de la distribución de los niveles de densidad
de p.i.r.e. de transmisión del SF**

50%	26 dB(W/MHz)	398 W/MHz
40%	33 dB(W/MHz)	1 995 W/MHz
10%	45 dB(W/MHz)	31 623 W/MHz
Media ponderada		36,19 dB(W/MHz)

En el Cuadro 5 se indica la distribución de canales utilizada en las simulaciones de Monte Carlo para un segmento de banda de 500 MHz en el Plan de tipo Alemán. Del total de 100 000 transmisores instalados en todo el mundo, puede haber hasta 2 001 transmisores cocanal en cualquier banda de 1 MHz.

CUADRO 5

**Hipótesis de distribución de la anchura de banda de canal utilizada
por las estaciones de relevadores radioeléctricos**

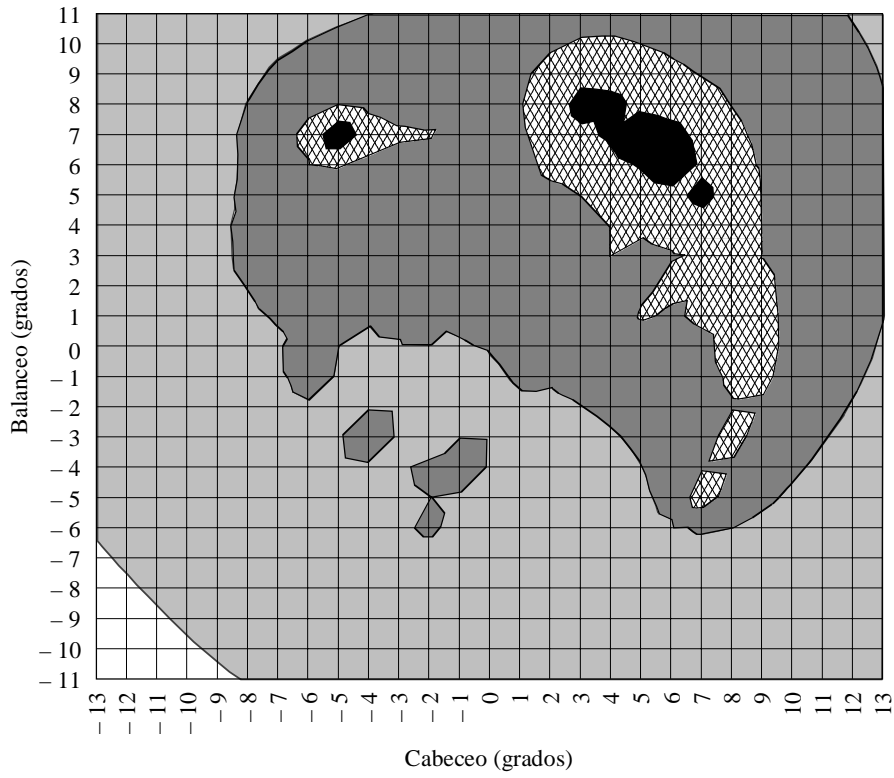
Anchura de banda de canal (MHz)	Utilización estimada (%)	N.º en 50 000	N.º cocanal
112	5	2 500	625
56	5	2 500	312
28	10	5 000	312
14	30	15 000	428
7	30	15 000	210
3,5	15	7 500	106
1,75	5	2 500	8
Total			2 001

La distribución espacial de la interferencia se determina a partir de una simulación de Monte Carlo suponiendo que el equivalente de 2 000 transmisores de relevadores radioeléctricos del SF están instalados en las principales ciudades del mundo. Los transmisores son cocanal con una densidad de p.i.r.e. media de 36 dB(W/MHz) y las antenas del SF apuntan con un ángulo de acimut aleatorio distribuido uniformemente entre 0° y 360°. Las Figs. 2 y 3 representan la densidad de interferencia combinada recibida por dos DRS situados, respectivamente, a 41° W y 174° W, en función del ángulo de puntería de la antena del vehículo espacial (balanceo y cabeceo).

Para el DRS a 41° W (Fig. 2), el nivel máximo de interferencia combinada es de -148 dB(W/MHz) y se han de cumplir los criterios de protección salvo en caso de acoplamiento de haz principal en que un solo transmisor SF cocanal puede causar una interferencia superior al criterio.

En la Fig. 3 se observa que el nivel máximo de interferencia combinada en el caso de un DRS a 174° W es de -149,5 dB(W/MHz), o 1,5 dB por debajo del criterio. En este caso también, el criterio de protección DRS se ha de cumplir en los casos de acoplamiento de haz principal.

FIGURA 2
Interferencia combinada (dB(W/MHz)) causada a un DRS situado a 41° W, en función de los ángulos de puntería de la antena de vehículo espacial

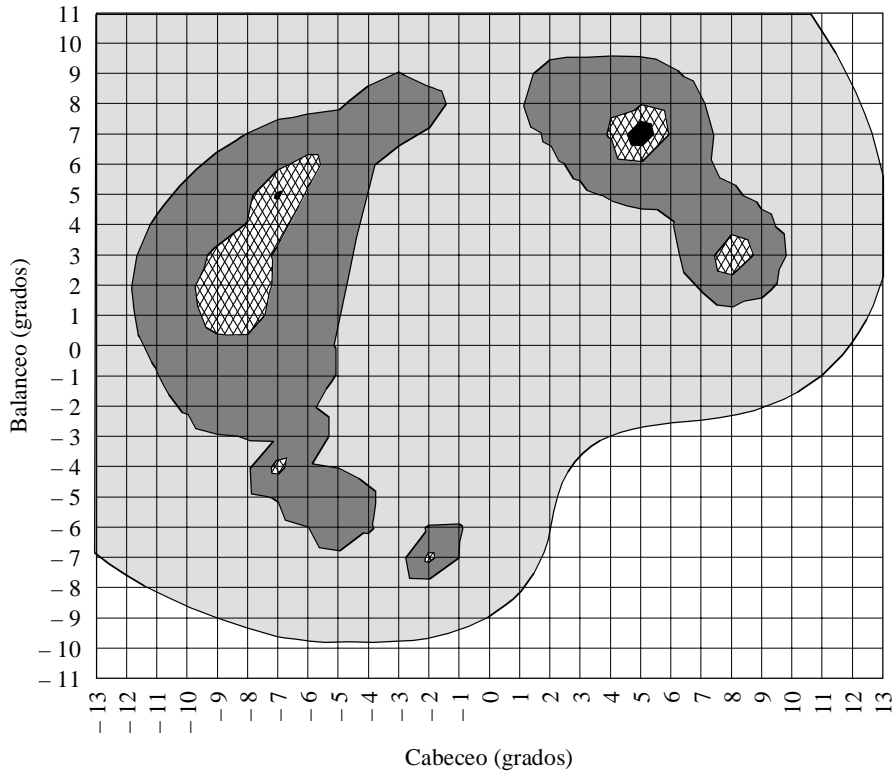


Interferencia combinada máxima = - 148 dB(W/MHz)
 Criterio: - 148 dB(W/MHz)



FIGURA 3

Interferencia combinada (dB(W/MHz)) causada a un DRS situado a 174° W, en función de los ángulos de puntería de la antena de vehículo espacial



Interferencia combinada máxima = - 149,5 dB(W/MHz)
 Criterio: - 148 dB(W/MHz)



1249-03

Como puede verse en las Figs. 2 y 3, la interferencia combinada, causada por la instalación aleatoria de sistemas de relevadores radioeléctricos tomada como hipótesis para las simulaciones de Monte Carlo, no parece causar una interferencia superior a los criterios de la Recomendación UIT-R SA.1155. De estas simulaciones se desprende que la interferencia combinada causada a satélites de retransmisión de datos por emisiones de estaciones de relevadores radioeléctricos punto a punto instaladas aleatoriamente no excederá de un valor de -148 dB(W/MHz), y que el acoplamiento entre haces principales, examinado en el § 3.2, tendrá como resultado una interferencia superior a los criterios de la Recomendación UIT-R SA.1155.

4 Técnicas de reducción de la interferencia

4.1 Sistemas del SF

Para reducir la interferencia se han de diseñar sistemas básicos coherentes y se han de utilizar técnicas definidas con el único objeto de reducir la interferencia, a saber:

- explotación con la densidad de p.i.r.e. mínima necesaria, por motivos económicos y operacionales tales como costes de equipo y mantenimiento inferiores, equipos más pequeños y ligeros, consumo inferior de energía primaria y distancias más cortas de reutilización de frecuencias;
- diseño de sistema que tiene en cuenta el efecto de la atenuación atmosférica (véase el Anexo 3);
- selección y configuración de emplazamientos que reduce considerablemente la radiación más allá del alcance requerido del SF, ya sea por un bloqueo causado por obstáculos naturales y/o artificiales, o por un bloqueo parcial de la zona de Fresnel que causa una atenuación por difracción (véase el Anexo 4);
- la utilización de la regulación automática de la potencia del transmisor.

4.2 Sistemas DRS

Las técnicas de reducción de la interferencia que se utilizan en los sistemas DRS pueden ser, entre otras, la agilidad y/o redundancia de frecuencias, la asociación de situaciones de interferencia y la supresión de interferencia adaptativa. El UIT-R ha comenzado a estudiar técnicas de reducción de la interferencia.

4.3 Cooperación en materia de compartición de frecuencias

La coexistencia prevista del SF y el servicio de satélites de retransmisión de datos plantea varios nuevos problemas de compartición de frecuencias que exigen un nuevo planteamiento. Entre otros planteamientos, el más prometedor es el establecimiento de un sistema de cooperación a nivel de funcionamiento, que:

- facilite la comprensión mutua de las necesidades de servicio y condiciones de explotación;
- permita definir los métodos de compartición apropiados;
- promueva la adopción de medidas destinadas a contrarrestar la interferencia en ambos servicios.

5 Conclusiones

Suponiendo una densidad de p.i.r.e. media del SF de 36 dB(W/MHz) emitida con ángulos de elevación bajos y ángulos de acimut aleatorios, una utilización de haces de antena estrechos y de ganancia elevada por estaciones del SF y del DRS, y planes de disposición de canales de frecuencias del SF, parece que se pueden cumplir los criterios de protección DRS de la Recomendación UIT-R SA.1155, salvo en los casos de acoplamiento o casi acoplamiento de haz principal. Se precisa un límite de 24 dB(W/MHz) de las emisiones de estaciones SF hacia las posiciones orbitales de satélites DRS a fin de satisfacer los criterios de protección de la Recomendación UIT-R SA.1155. Este valor se aplica a condiciones de propagación en el espacio libre.

El establecimiento de una cooperación en materia de compartición de frecuencias facilitará la aplicación práctica de esta Recomendación.

ANEXO 2

Método de cálculo de ángulos de separación entre haces de antena de transmisión del SF y las direcciones hacia satélites geostacionarios de retransmisión de datos

1 Introducción

En este Anexo se indica un método para calcular ángulos de separación entre haces de antena de transmisión del SF y las direcciones hacia satélites geostacionarios de retransmisión de datos situados en las posiciones especificadas en el *recomienda 3* del texto principal de la presente Recomendación, teniendo en cuenta los efectos de la refracción atmosférica y el horizonte local.

2 Parámetros de las estaciones del SF

Los parámetros de una estación del servicio fijo se definen como sigue:

ζ : latitud de la estación (valor absoluto)

α_r : acimut del haz de antena medido en el sentido de las agujas de un reloj a partir del Norte

ε_r : ángulo de elevación del haz de la antena

h : altitud de la antena por encima del nivel del mar (km)

δ : diferencia longitudinal (valor absoluto) entre la estación y uno de los satélites especificados en el *recomienda 3*.

Si δ es superior a 90° (es decir, precisamente, si $\cos \delta < 0$), el satélite no es visible desde la estación del SF y, por lo tanto, no es necesario llevar a cabo otros cálculos. (Incluso cuando δ es ligeramente inferior a 90° el satélite puede no ser visible, pero esta situación se examinará más adelante.)

3 Determinación del acimut del satélite

En un modelo elipsoidal, la forma de la Tierra se caracteriza por $R = 6\,378,14$ km (radio ecuatorial de la Tierra) y $f = 1/298,25$ (factor de achatamiento de la Tierra). Por consiguiente, el radio polar de la Tierra viene dado por $(1 - f)R$.

En este caso, la latitud geocéntrica ζ_1 y el radio efectivo de la Tierra R_1 en la latitud geográfica ζ y con una altitud de antena h , vienen dados por:

$$\zeta_1 = \arctan [(1 - f) \tan \zeta] \quad (1)$$

$$R_1 = R(1 - f \sin^2 \zeta_1) + h \quad (2)$$

A continuación, se calcula el valor de Ψ (arco de círculo máximo entre la estación del SF y el punto subsatelital) como sigue:

$$\Psi = \arccos (\cos \zeta_1 \cos \delta) \quad (3)$$

El acimut (α_s) del satélite visto desde la estación del SF es el siguiente:

$$\alpha_s' = \arccos (\tan \zeta_1 \cos \Psi) \quad (4)$$

$$\alpha_s = \alpha_s' + 180^\circ \quad \text{para una estación del SF situada en el hemisferio Norte y satélites situados al Oeste de la estación del SF} \quad (5a)$$

$$\alpha_s = 180^\circ - \alpha_s' \quad \text{para una estación del SF situada en el hemisferio Norte y satélites situados al Este de la estación del SF} \quad (5b)$$

$$\alpha_s = 360^\circ - \alpha_s' \quad \text{para una estación del SF situada en el hemisferio Sur y satélites situados al Oeste de la estación del SF} \quad (5c)$$

$$\alpha_s = \alpha_s' \quad \text{para una estación del SF situada en el hemisferio Sur y satélites situados al Este de la estación del SF} \quad (5d)$$

4 Determinación de la elevación del satélite

En primer lugar, la elevación (ϵ'_s) del satélite vista desde la estación del SF se calcula como sigue, sin tener en cuenta el efecto de la refracción atmosférica:

$$\epsilon'_s = \text{arc tg} \left(\frac{K \cos \Psi - 1}{K \sin \Psi} \right) \quad (6)$$

donde:

$$K = R_s/R_1$$

$$R_s = 42\,164 \text{ km (radio orbital).}$$

Para tener en cuenta los efectos de la refracción atmosférica y el horizonte local, se definen los siguientes ángulos de elevación:

ϵ_{m1} : ángulo de elevación hacia el horizonte local con una curvatura atmosférica máxima, visto desde la altitud de la antena del SF en el acimut del satélite (α_s) (véase la Nota 1);

ϵ_{m2} : ángulo de elevación hacia el horizonte local con una curvatura atmosférica mínima, visto desde la altitud de la antena del SF en el acimut del satélite (α_s) (véase la Nota 1).

A continuación la visibilidad del satélite se determina como sigue:

- se calcula $\epsilon_1 = \epsilon_{m1} - \tau_{m\acute{a}x}(\epsilon_{m1}, h)$ y $\epsilon_2 = \epsilon_{m2} - \tau_{m\acute{i}n}(\epsilon_{m2}, h)$, donde $\tau_{m\acute{a}x}(\epsilon, h)$ y $\tau_{m\acute{i}n}(\epsilon, h)$ son respectivamente las curvaturas atmosféricas máxima y mínima correspondientes al ángulo de elevación ϵ , cuyas fórmulas numéricas se indican en la Nota 2;
- si $\epsilon_2 \leq \epsilon'_s$, el satélite es siempre visible;
- si $\epsilon_1 \leq \epsilon'_s < \epsilon_2$, el satélite es visible durante cierto porcentaje de tiempo;
- si $\epsilon'_s < \epsilon_1$, el satélite no es visible en ninguna condición de refracción atmosférica y, por lo tanto, no es necesario continuar los cálculos.

Cuando $\epsilon_2 \leq \epsilon'_s$, los ángulos de elevación $\epsilon_{s\,m\acute{a}x}$ y $\epsilon_{s\,m\acute{i}n}$ del satélite, correspondientes respectivamente a las curvaturas atmosféricas máxima y mínima, se pueden calcular resolviendo las siguientes ecuaciones (véase la Nota 3):

$$\epsilon_{s\,m\acute{a}x} - \tau_{m\acute{a}x}(\epsilon_{s\,m\acute{a}x}, h) = \epsilon'_s \quad (7a)$$

$$\epsilon_{s\,m\acute{i}n} - \tau_{m\acute{i}n}(\epsilon_{s\,m\acute{i}n}, h) = \epsilon'_s \quad (7b)$$

Cuando $\epsilon_1 \leq \epsilon'_s < \epsilon_2$, no es necesario resolver la ecuación (7b), sólo es necesario resolver la ecuación (7a). En ese caso, se toma $\epsilon_{s\,m\acute{i}n} = \epsilon_{m2}$.

El ángulo de elevación ϵ_s que da el ángulo de separación mínimo con una precisión suficiente se determina como sigue:

$$\epsilon_s = \epsilon_{s\,m\acute{a}x} \quad \text{para } \epsilon_{s\,m\acute{a}x} \leq \epsilon_r \quad (8a)$$

$$\epsilon_s = \epsilon_r \quad \text{para } \epsilon_{s\,m\acute{i}n} \leq \epsilon_r < \epsilon_{s\,m\acute{a}x} \quad (8b)$$

$$\epsilon_s = \epsilon_{s\,m\acute{i}n} \quad \text{para } \epsilon_r < \epsilon_{s\,m\acute{i}n} \quad (8c)$$

5 Determinación del ángulo de separación

El ángulo de separación mínimo (SA – separation angle) entre el haz de antena del SF y la dirección de un satélite geoestacionario de retransmisión de datos, visto desde la estación de SF, se puede calcular de la manera siguiente:

$$SA = \arccos [\cos \varepsilon_r \cos \varepsilon_s \cos(\alpha_r - \alpha_s) + \sin \varepsilon_r \sin \varepsilon_s] \quad (9)$$

El ángulo de separación se debe calcular para cada satélite geoestacionario de retransmisión de datos según se especifica en el *recomienda* 3.

NOTA 1 – Si el horizonte local está constituido por un terreno plano o el mar, ε_m viene dado por:

$$\varepsilon_m = -\arccos \left[\frac{R + h_1}{R + h} \times \frac{1 + N_0 \times 10^{-6} (1 + \Delta N/N_0)^{h_1}}{1 + N_0 \times 10^{-6} (1 + \Delta N/N_0)^h} \right] \quad (10)$$

donde:

h : altitud de la antena (km) de la estación por encima del nivel del mar

h_1 : altitud (km) del horizonte local ($h \geq h_1$)

R : radio de la Tierra, que se supone es de 6 370 km.

Conforme a la Recomendación UIT-R SF.765, ε_{m1} es un ángulo de elevación que corresponde a la curvatura máxima debida a la atmósfera ($N_0 = 400$ y $\Delta N = -68$) y ε_{m2} es un ángulo de elevación correspondiente a la curvatura mínima debida a la atmósfera ($N_0 = 250$ y $\Delta N = -30$). Cabe observar que $\varepsilon_{m1} \geq \varepsilon_{m2}$.

En la práctica, puede resultar incómodo estimar los valores precisos de ε_{m1} y ε_{m2} teniendo en cuenta el perfil complejo del horizonte local. En esos casos, puede resultar más sencillo estimar los valores de ε_{m1} y ε_{m2} utilizando la fórmula (10) con la hipótesis $h_1 = 0$. De este modo se obtiene generalmente un ángulo de separación preciso. No obstante, si $\varepsilon_{s\text{máx}}$ es superior a ε_{m1} pero muy próximo a ese valor, existe la posibilidad de que el satélite no sea visible debido al efecto del horizonte local. En ese caso, el cálculo se ha de realizar de nuevo con los valores reales de ε_{m1} y ε_{m2} .

NOTA 2 – La curvatura debida a la atmósfera (grados) se puede calcular utilizando las fórmulas siguientes, sobre la base del Anexo 2 a la Recomendación UIT-R SF.765:

$$\tau_{\text{máx}}(\varepsilon, h) = 1 / [0,7885809 + 0,175963 h + 0,0251620 h^2 + \varepsilon (0,549056 + 0,0744484 h + 0,0101650 h^2) + \varepsilon^2 (0,0187029 + 0,0143814 h)] \quad (11a)$$

$$\tau_{\text{mín}}(\varepsilon, h) = 1 / [1,755698 + 0,313461 h + \varepsilon (0,815022 + 0,109154 h) + \varepsilon^2 (0,0295668 + 0,0185682 h)] \quad (11b)$$

donde:

ε : ángulo de elevación (grados)

h : altitud (km) de la antena de la estación por encima del nivel del mar.

Estas fórmulas son válidas para valores de $\varepsilon \geq \varepsilon_{m1}$ o $\varepsilon \geq \varepsilon_{m2}$. El algoritmo del presente Anexo garantiza que estas fórmulas sólo se aplican si son válidas.

NOTA 3 – Es necesario tomar precauciones con respecto a la convergencia para resolver la ecuación (7a), especialmente cuando h es grande y ε'_s es negativo. Por lo tanto, una manera de resolver la ecuación (7a) consiste en aplicar el método Newton-Raphson con $\varepsilon_{s\text{máx}} = \text{máx}(\varepsilon'_s, \varepsilon_{m1})$ como valor inicial. Tras varias iteraciones, se llegará a la convergencia.

Puede aplicarse un método similar para resolver la ecuación (7b). En este caso, el valor inicial debe ser $\varepsilon_{s\text{mín}} = \text{máx}(\varepsilon'_s, \varepsilon_{m2})$.

NOTA 4 – En el Apéndice 1 figura un programa informático para calcular los ángulos de separación sobre la base del presente Anexo.

APÉNDICE 1
AL ANEXO 2

```

/*****
/* file name : drsang_b.c
/* language : C
/* function : Calculate separation angles between fixed service
/* transmitting antenna beams and the directions
/* towards geostationary data relay satellites
*****/

/*---- include files -----*/
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <errno.h>

static double pi,rd,dr,em1,em2,a[3],b[3];

/*-----*/
/* module : bending
/* function : setup atmospheric bending characteristics
/* in h0 : antenna altitude (km) of the station above sea level
/* h1 : altitude (km) of the local horizon (h0>=h1)
/* out em1,2 : elevation angles towards the local horizon at maximum
/* and minimum atmospheric bending (see eq.(8))
/* a,b : coefficients of atmospheric bending
/* at maximum and minimum atmospheric bending
/*-----*/

void bending(h0,h1)
double h0,h1;

{
double r=6378.0; /* earth radius (km) */
em1=-acos((r+h1)/(r+h0)*
(1+0.00040*pow(0.83,h1))/(1+0.00040*pow(0.83,h0)));
em2=-acos((r+h1)/(r+h0)*
(1+0.00025*pow(0.88,h1))/(1+0.00025*pow(0.88,h0)));

a[0]=(0.7885809+0.1759630*h0+0.0251620*h0*h0)*rd;
a[1]=(0.5490560+0.0744484*h0+0.0101650*h0*h0)*rd*rd;
a[2]=(0.0187029+0.0143814*h0)*rd*rd*rd;
b[0]=(1.7556980+0.3134610*h0)*rd;
b[1]=(0.8150220+0.1091540*h0)*rd*rd;
b[2]=(0.0295668+0.0185682*h0)*rd*rd*rd;
}

/*-----*/
/* module : tmax,tmin,dtmax,dtmin
/* function : calculate atmospheric bending in degree
/* in e : elevation angle (degree)
/* out tmax : atmospheric bending (see eq.(11a))
/* dtmax : derivative of tmax
/* tmin : atmospheric bending (see eq.(11b))
/* dtmin : derivative of tmin
/*-----*/

double tmax(e)
double e;
{ return (1.0/(a[0]+e*(a[1]+a[2]*e))); }

double dtmax(e)
double e;
{ return (-(a[1]+2.0*a[2]*e)*pow(tmax(e),2.0)); }

```

```

double  tmin(e)
double  e;
{return (1.0/(b[0]+e*(b[1]+b[2]*e)));}

double  dtmin(e)
double  e;
{return (-(b[1]+2.0*b[2]*e)*pow(tmin(e),2.0));}

/*-----*/
/* module : sangle */
/* function : calculate separation angle in degrees */
/* in slon : longitude of the data-relay satellite (radian) */
/* ilat : northern or southern hemisphere */
/* rlat : latitude of the radio-relay station (radian) */
/* rlon : longitude of the radio-relay station (radian) */
/* az0 : azimuth of the antenna beam (radian) */
/* e0 : elevation angle of the antenna beam (radian) */
/* h0 : antenna altitude (km) of the station above sea level */
/* out sa : separation angle */
/*-----*/
double  sangle(sl原因,ilat,rlat,rlon,az0,e0,h0)
double  slon,ilat,rlat,rlon,az0,e0,h0;

{
double delta,zeta,r1,arc,tanarc;
double azss,azs,ees,e1,e2,es1,esmax,es2,esmin,es,sa;
double r=6378.14; /* earth's equatorial radius */
double f=1/298.25; /* earth's flatness factor */
double rs=42164; /* orbit radius */

delta=rlon-sl原因;
if(cos(delta)<=0) {sa=500.0;goto end_sa;}
/* ----- Determination of the satellite azimuth ----- */
zeta=atan(pow(1-f,2.0)*tan(rlat)); /* eq.(1) */
r1=r*(1-f*pow(sin(zeta),2.0))+h0; /* eq.(2) */
arc=acos(cos(zeta)*cos(delta)); /* eq.(3) */
tanarc=tan(arc); if(tanarc<tan(zeta)) tanarc=tan(zeta);
if(tanarc==0.0) azss=0.0;
else azss=acos(tan(zeta)/tanarc); /* eq.(4) */
if((ilat>0)&&(sin(delta)>=0)) azs=azss+pi; /* eq.(5a) */
else if((ilat>0)&&(sin(delta)<0)) azs=pi-azss; /* eq.(5b) */
else if(sin(delta)>=0) azs=2*pi-azss; /* eq.(5c) */
else azs=azss; /* eq.(5d) */
/* ----- Determination of the satellite elevation ----- */
if(arc==0.0) ees=pi/2.0;
else ees=atan((cos(arc)-r1/rs)/sin(arc)); /* eq.(6) */
e1=em1-tmax(em1);
e2=em2-tmin(em2);
if(ees<e1) {sa=500.0; go to end_sa;}
else{
/* ----- solve eq.(7a), (see Note 3) ----- */
es1=10.0;if(ees<em1) esmax=em1; else esmax=ees;
while(fabs(esmax-es1)>1.0e-5){
es1=esmax;
esmax=es1-(es1-tmax(es1)-ees)/(1.0-dtmax(es1));
}
if(ees<e2) esmin=em2;
else{
/* ----- solve eq.(7b), (see Note 3) ----- */
es2=10.0;if(ees<em2) esmin=em2; else esmin=ees;
while(fabs(esmin-es2)>1.0e-5){
es2=esmin;
esmin=es2-(es2-tmin(es2)-ees)/(1.0-dtmin(es2));
}
}
}
}

```

```

if(esmax<=e0) es=esmax;          /* eq.(8a)      */
else if(esmin<=e0) es=e0;       /* eq.(8b)      */
else es=esmin;                  /* eq.(8c)      */
/* ----- Determination of the separation angle ----- eq.(9)      */
sa=rd*acos(cos(e0)*cos(es)*cos(az0-azs)+sin(e0)*sin(es));
end_sa:
return sa;
}

/*-----*/
/* main program */
/*-----*/

void main()
{
double lonsat[23]={-174,-171,-170,-160,-139,-62,-49,
-46,-44,-41,-32,-16,16.4,21.5,47,59,85,90,95,113,121,160,177.5};
double sa[23];
char str[1];
double ilat,latd,latm,lats,rlat;
double ilon,lond,lonm,lons,rлон;
double az0d,az0,e0d,e0,h0m,h0,h1m,h1;
double slon,samin;
int isat;

pi=4.0*atan(1.0);          /* circular constant */
rd=180.0/pi;              /* radian to degree */
dr=pi/180.0;              /* degree to radian */
/* ----- Parameter input ----- */
printf("Parameters of the fixed service station \n");
input_NS:
printf("Hemisphere of the station : northern or southern (N/S) ? \n");
scanf("%s",&str);
if(*str=='N' || *str=='n') ilat=1;
else if(*str=='S' || *str=='s') ilat=-1;
else go to input_NS;
input_LAT:
printf("LAT : latitude (degree,minute,second) ? \n");
scanf("%le,%le,%le",&latd,&latm,&lats);
latd=ilat*(latd+latm/60.0+lats/3600.0); rlat=fabs(latd*dr);
input_EW:
printf("Longitude : east or west (E/W) ? \n");
scanf("%s",&str);
if(*str=='E' || *str=='e') ilon=1.0;
else if(*str=='W' || *str=='w') ilon=-1.0;
else go to input_EW;
input_LON:
printf("LON : longitude (degree,minute,second) ? \n");
scanf("%le,%le,%le",&lond,&lonm,&lons);
lond=ilon*(lond+lonm/60.0+lons/3600.0);rлон=lond*dr;
input_AZ:
printf("AZ0 : antenna azimuth, clockwise from the North (degree) ?\n");
scanf("%le",&az0d); az0=az0d*dr;
input_E0:
printf("E0 : antenna elevation (degree) ? \n");
scanf("%le",&e0d); e0=e0d*dr;
input_ALT:
printf("H0 : antenna altitude (m) ? \n");
scanf("%le",&h0m); h0=h0m/1 000.0;
printf("H1 : horizon altitude (m) ? \n");
scanf("%le",&h1m); h1=h1m/1 000.0;
if(h1>h0) {printf("h1<=h0"); go to input_ALT;}
}

```



```

/* ----- Calculations ----- */
bending(h0,h1);
samin=1 000.0;
for(isat=0;isat<23;isat++){
    slon=dr*lonsat[isat];
    sa[isat]=sangle(slon,ilat,rlat,r lon,az0,e0,h0);
    if(sa[isat]<samin) samin=sa[isat];
}
/* ----- Print separation angle ----- */
printf("\nParameters of the fixed service station \n");
printf(" latitude   : %7.2f (degree) \n",latd);
printf(" longitude   : %7.2f (degree) \n",lond);
printf(" antenna azimuth : %7.2f (degree) \n",az0d);
printf(" antenna elevation : %7.2f (degree) \n",e0d);
printf(" antenna altitude : %7.0f (m) \n",h0m);
printf(" horizon altitude : %7.0f (m) \n",h1m);
printf("\nGeostationary data relay satellites \n");
printf(" No. Longitude Separation angle \n");
for(isat=0;isat<23;isat++){
    printf("%5d %7.2f %7.2f \n",
        isat+1,lonsat[isat],sa[isat]);
}
printf("Minimum separation angle = %7.2f (degree) \n",samin);

```

ANEXO 3

Atenuación de la propagación debida a gases atmosféricos, incluido el vapor de agua, en la banda de 26 GHz

La atenuación en un trayecto oblicuo resultante de la absorción debida a gases atmosféricos, incluido el vapor de agua, afectará a la densidad espectral de p.i.r.e. admisible de las emisiones del SF desde emplazamientos individuales hacia las posiciones orbitales de satélites de retransmisión de datos indicadas en la Recomendación UIT-R SA.1276. La atenuación en un trayecto oblicuo es función de la situación geográfica del emplazamiento, el mes del año, la densidad de vapor de agua en la superficie, la altitud de la antena transmisora por encima del nivel del mar y el ángulo de elevación del trayecto oblicuo. El procedimiento de cálculo de la atenuación del trayecto oblicuo es el procedimiento raya a raya indicado en el Anexo 1 a la Recomendación UIT-R P.676.

En el cálculo detallado de la atenuación atmosférica se puede utilizar información local sobre el contenido medio de vapor de agua en el mes más seco y otros parámetros meteorológicos, junto con los modelos atmosféricos de la Recomendación UIT-R P.835. Cuando no se dispone de esa información, los resultados siguientes constituyen a título preliminar un procedimiento sencillo para determinar la atenuación atmosférica que se ha de tener en cuenta en el *recomienda* 3.3.

A los efectos de esta determinación simplificada, se considera que un transmisor del SF se halla en una de las tres zonas climatológicas siguientes que dependen únicamente de la latitud de la estación:

- clima de latitud baja para latitudes inferiores o iguales a 22,5° con relación al Ecuador;
- clima de latitud media para latitudes superiores a 22,5°, pero inferiores a 45° con relación al Ecuador;
- clima de latitud elevada para latitudes superiores o iguales a 45° con relación al Ecuador.

En el Cuadro 6 se indican los parámetros climatológicos para cada uno de estos climas. Obsérvese que la densidad de vapor de agua a nivel del mar para el clima de latitud baja es menor que la prescrita por la Recomendación UIT-R P.835 correspondiente a la estación seca. Los valores de atenuación para esos climas se han determinado en función del ángulo de elevación del trayecto de transmisión real desde el transmisor del SF hacia la posición de la estación espacial geostacionaria, como se indica en las Figs. 4, 5 y 6. Para la pérdida atmosférica a 27,7 GHz se obtuvieron las siguientes fórmulas numéricas que se aproximan a los valores teóricos. Los resultados se indican a continuación:

$$A_L(h, \theta) = 22,59 / [1 + 0,3011 h + 0,2560 h^2 + \theta (0,9085 + 0,4630 h + 0,1345 h^2) + 0,04969 \theta^2] \quad (12)$$

$$A_M(h, \theta) = 11,92 / [1 + 0,2591 h + 0,1474 h^2 + \theta (0,7772 + 0,4841 h) + 0,04607 \theta^2] \quad (13)$$

$$A_H(h, \theta) = 8,77 / [1 + 0,2169 h + 0,1068 h^2 + \theta (0,8264 + 0,3028 h)] \quad (14)$$

donde:

$A_L(h, \theta)$, $A_M(h, \theta)$ y $A_H(h, \theta)$: respectivamente, las pérdidas de absorción atmosférica totales (dB) para las zonas de latitud baja, latitud media y latitud elevada

h y θ : respectivamente, la altitud de la antena transmisora por encima del nivel del mar (km) y el ángulo de elevación (grados).

Para la integración se utilizó el método del Anexo 1 a la Recomendación UIT-R P.676. Se utilizaron los perfiles de temperatura, presión y densidad de vapor de agua en función de la altura definidos en la Recomendación UIT-R P.835 para calcular la pérdida. La aproximación se llevó a cabo para $0 \leq h \leq 3$ km y $0 \leq \theta \leq 10^\circ$.

Las ecuaciones (12), (13) y (14) dan también aproximaciones razonables para $\theta > 10^\circ$.

El ángulo de elevación real se puede determinar a partir del ángulo de elevación calculado en condiciones de espacio libre mediante el método que figura en la Recomendación UIT-R F.1333. Para ángulos de elevación reales inferiores a 0° , debe utilizarse la atenuación correspondiente a 0° .

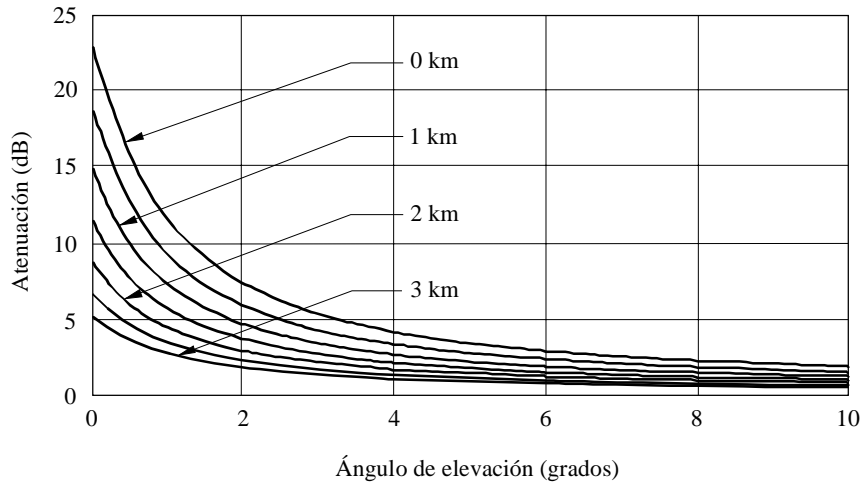
CUADRO 6

Parámetros a nivel del mar para las zonas climatológicas

Zona climatológica	Temperatura (K)	Presión atmosférica (hPa)	Densidad de vapor de agua (g/m^3)
Latitud baja	300,4	1 012,0	10,0
Latitud media	272,7	1 018,9	3,5
Latitud elevada	257,4	1 010,8	1,23

FIGURA 4

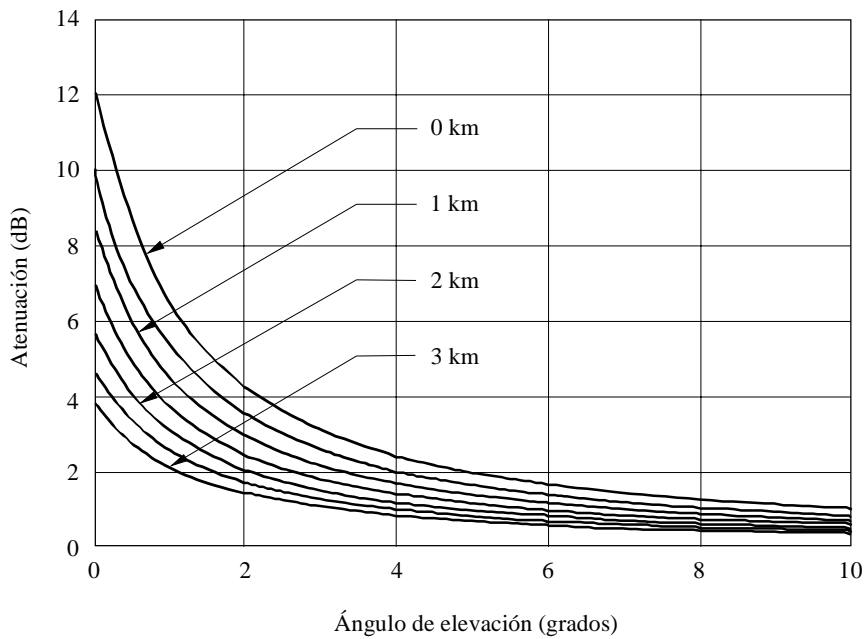
Atenuación mínima Tierra-espacio a 27,5 GHz para clima de latitud baja modificado para estaciones situadas entre el nivel del mar (altitud de 0 km) y altitudes de hasta 3 km en tramos de 500 m



1249-04

FIGURA 5

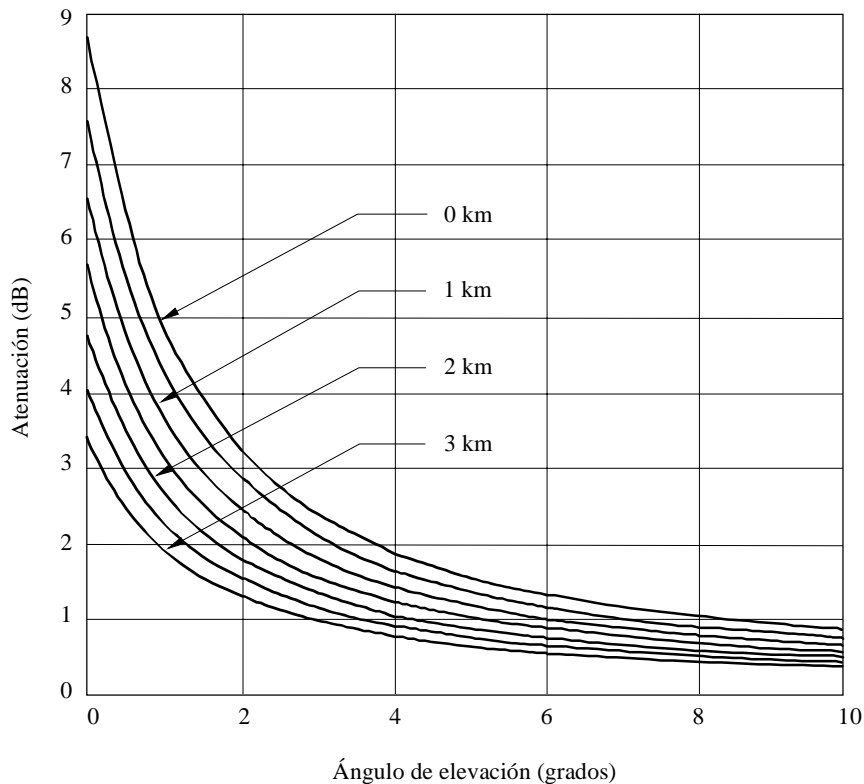
Atenuación mínima Tierra-espacio a 27,5 GHz para clima de latitud media para estaciones situadas entre el nivel del mar (altitud de 0 km) y altitudes de hasta 3 km en tramos de 500 m



1249-05

FIGURA 6

Atenuación mínima Tierra-espacio a 27,5 GHz para clima de latitud elevada para estaciones situadas entre el nivel del mar (altitud de 0 km) y altitudes de hasta 3 km en tramos de 500 m



1249-06

ANEXO 4

Reducción de la interferencia mediante la atenuación de la difracción

1 Introducción

En determinadas circunstancias, el bloqueo de la zona de Fresnel reduce la densidad espectral de p.i.r.e. de las emisiones de una estación SF hacia posiciones orbitales DRS. La mayoría de los sistemas de relevadores radioeléctricos punto a punto instalados en la banda de 26 GHz están situados en zonas urbanas en las cuales los edificios pueden obstruir el trayecto de transmisión entre la estación SF de transmisión y la posición orbital DRS. Cabe observar que esa obstrucción no se debe necesariamente al edificio en el que está instalada la antena SF de recepción.

Se puede demostrar que este bloqueo es sensible a pequeños cambios de la posición de la estación SF de transmisión, que pueden reducir notablemente la interferencia potencial. Además, se puede demostrar que este bloqueo también es sensible a pequeños cambios de la posición del DRS debidos a perturbaciones orbitales normales, de modo que la interferencia, causada por situaciones sucesivas en las que las posiciones respectivas de los satélites en órbita baja, el transmisor SF y el DRS pueden ser perjudiciales, varía notablemente; dicho de otro modo, una situación de interferencia considerable puede ir seguida por una situación de interferencia aceptable.

En el presente Anexo se demuestra mediante un ejemplo simplificado las diferentes atenuaciones de difracción que puede ocasionar un bloqueo de la zona de Fresnel.

2 Cálculos básicos de la atenuación por difracción

La Recomendación UIT-R P.526 contiene los métodos y fórmulas básicos para calcular la atenuación por difracción. El § 4 de la Recomendación trata de la atenuación por difracción en función de la importancia del bloqueo de la zona de Fresnel y de las características del obstáculo. Los valores de atenuación resultantes son la suma de dos elementos:

- a) la atenuación por difracción obtenida utilizando un modelo en filo de cuchillo del obstáculo;
- b) un elemento adicional debido a las características físicas del obstáculo real, que difiere de la del modelo en filo de cuchillo.

El resultado combinado puede exceder con creces el elemento de atenuación en filo de cuchillo.

El párrafo a) modelo básico en filo de cuchillo, se examina en el § 4.1 de la Recomendación UIT-R P.526. Contiene fórmulas para calcular la atenuación por difracción mediante un parámetro sin dimensión que especifica la extensión del bloqueo de la primera zona de Fresnel; la Fig. 7 (igual a la Fig. 7 de la Recomendación UIT-R P.526) es un gráfico de la atenuación por difracción resultante en función de este parámetro sin dimensión. Por ejemplo, se produce una atenuación por difracción de 6 dB si está bloqueada la mitad de la primera zona de Fresnel; los valores de atenuación correspondientes para bloqueos de $\frac{1}{4}$, $\frac{3}{4}$ y completo son respectivamente de 2 dB, 10 dB y 14 dB. Si se extiende el bloqueo a toda la segunda zona de Fresnel, la atenuación por difracción alcanza los 22 dB.

El párrafo b), elemento adicional de la atenuación por difracción, debido a características del obstáculo diferentes de un modelo en filo de cuchillo, se examina en los § 4.2 a 4.5 de la Recomendación UIT-R P.526.

El § 4.3 de la Recomendación UIT-R P.526 trata del caso de un obstáculo único de forma redondeada. Es aplicable cuando se puede representar de este modo la parte superior del edificio que obstaculiza el trayecto hacia la estación orbital DRS. El método presentado se puede utilizar para calcular la atenuación adicional debida a la forma y a la profundidad del obstáculo.

3 Ejemplos de atenuación por difracción

Un análisis de primer orden en el que se utilizan los métodos de cálculo de la Recomendación UIT-R P.526 sirve para hacerse una idea del significado de la atenuación por difracción variable como factor que conduce a la disminución de los límites de densidad espectral de p.i.r.e. de las emisiones de estaciones SF hacia posiciones orbitales DRS.

Se supone que la estación SF vista desde el DRS se halla en el horizonte y está orientada hacia el DRS. Las emisiones de la estación SF hacia el DRS están parcialmente bloqueadas por un obstáculo situado en la antena de recepción SF o próximo a la misma. El obstáculo se representa como un solo filo de cuchillo como se indica en la Fig. 8. La estación de transmisión está situada en P_1 y el DRS de recepción en P_2 . La distancia entre la estación de transmisión y el obstáculo que causa la difracción es d_1 . La distancia hasta el DRS es tan grande que no constituye un factor para calcular la pérdida por difracción. La altura del obstáculo por encima del trayecto directo es h . El ángulo de difracción, θ (rad) es del mismo signo que h (se supone que θ es inferior a 0,2 rad, ó 12°).

Se introduce un parámetro sin dimensión v que permite calcular el campo resultante a partir de la Fig. 7 sobre la base de los factores geométricos indicados anteriormente y la longitud de onda λ de la frecuencia de explotación. Se obtiene a partir de la ecuación (14) de la Recomendación UIT-R P.526.

$$v = \theta \sqrt{\frac{2d_1}{\lambda}} \quad (15)$$

Con un ejemplo se indicarán ciertos límites de la atenuación de las emisiones previsibles en emplazamientos en que el bloqueo de la zona de Fresnel constituye un factor.

Supongamos que el obstáculo es un edificio situado a 4 km de la antena de transmisión. La cresta del edificio se asemeja a un obstáculo único en filo de cuchillo. La antena de transmisión tiene una ganancia de 40 dB, una anchura de haz de 3 dB de $1,64^\circ$ y un trayecto sin obstáculos hacia la antena de recepción. Se supone además que el haz de la antena de transmisión pasa por partes iguales por encima y por debajo de la cresta del edificio. Para una frecuencia de explotación de 26 GHz, la ecuación (15) viene a ser:

$$v = 833 \theta \quad (16)$$

Cuando $\theta = 0$, el parámetro v es 0 para un ángulo fuera del eje de 0° . En la Fig. 7, esto conduce a una pérdida por difracción de 6 dB para una antena de recepción DRS situada más allá del obstáculo en una línea recta que conecta estos tres puntos: la antena de transmisión, la cresta del obstáculo y la antena DRS de recepción.

No obstante, si la cresta del obstáculo se halla a $0,0017$ rad ó $0,1^\circ$ por encima de la línea trazada entre la antena de transmisión del SF y la estación DRS, lo cual corresponde a que el obstáculo sea 7 m más alto o la antena de transmisión del SF esté instalada 7 m más bajo, entonces $v = 1,45$ y la pérdida por difracción alcanza los 16,5 dB.

Por otra parte, si la cresta del obstáculo se halla a 7 m por debajo del trayecto de interferencia, $v = -1,45$ y la pérdida por difracción, para el modelo único en filo de cuchillo, causa una mejora de la señal de aproximadamente 1 dB.

FIGURA 7
Pérdida por difracción en filo de cuchillo (véase la Recomendación UIT-R P.526)

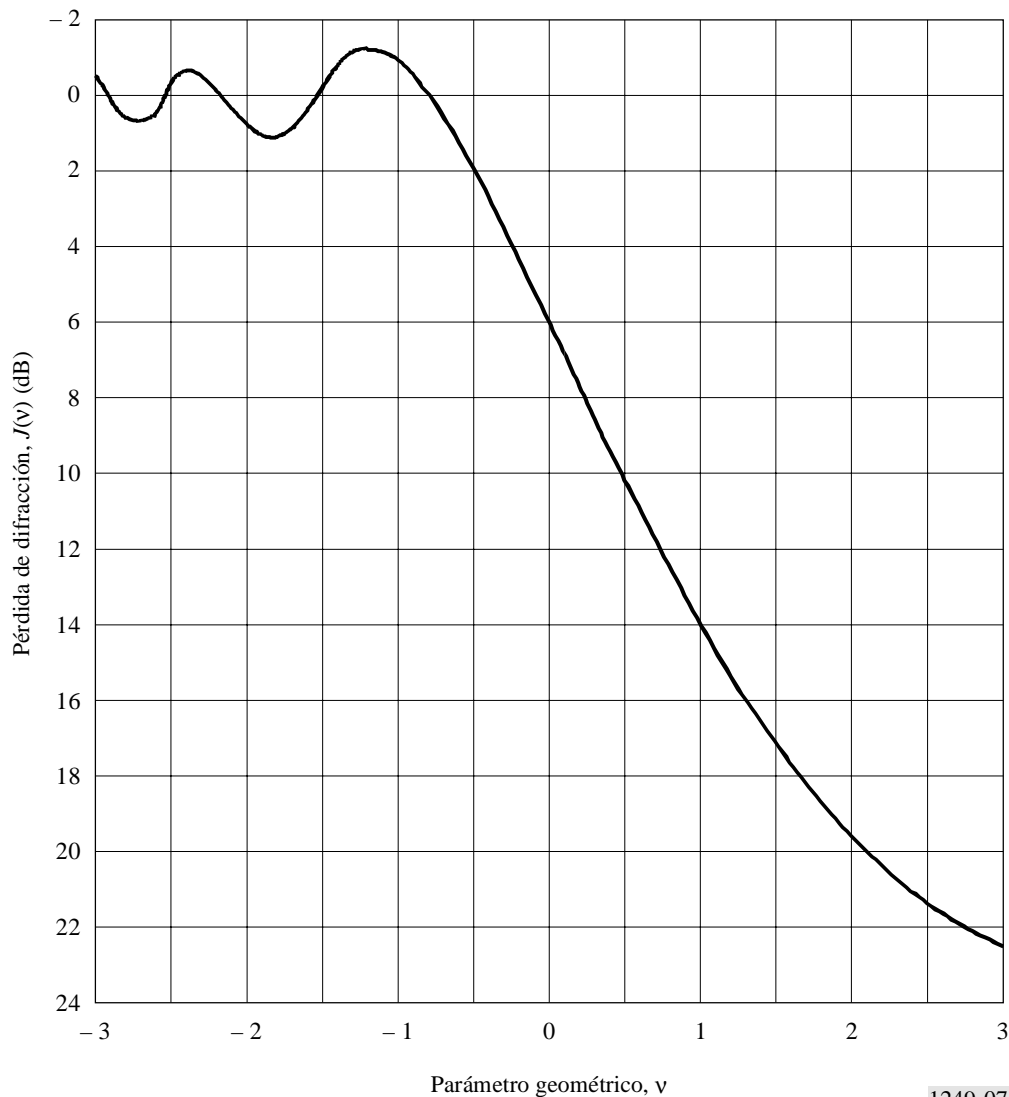
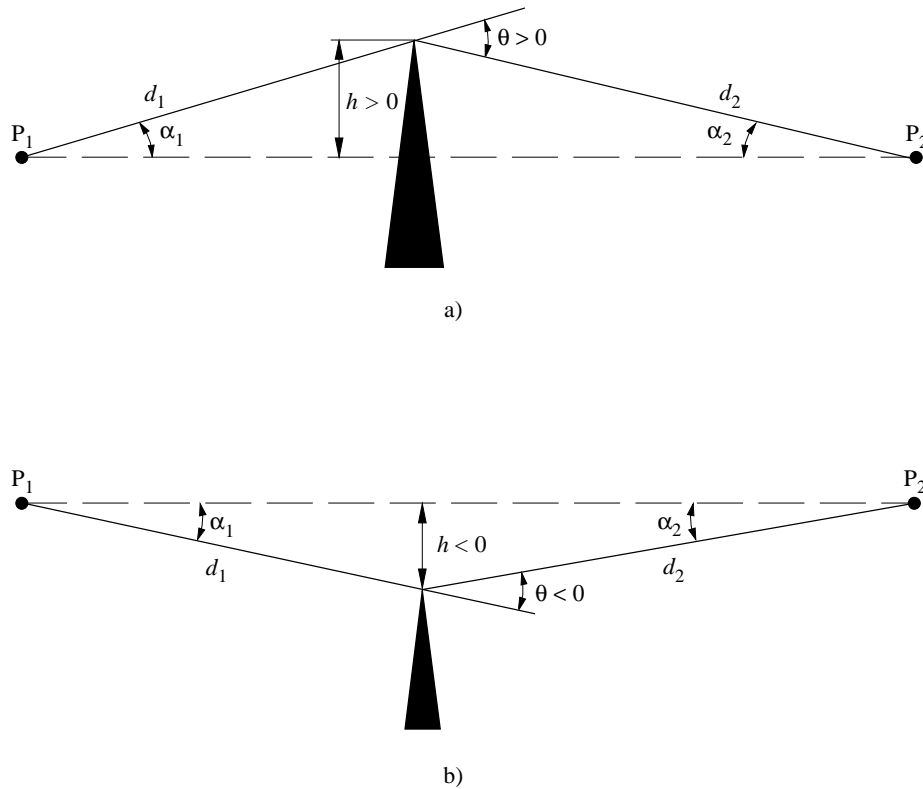


FIGURA 8
Elementos geométricos (Recomendación UIT-R P.526)



α_1, α_2 : ángulos bajo los que, a partir de un extremo, se ven la cima del obstáculo y el extremo opuesto.

1249-08

4 Variaciones de la atenuación por difracción en función de la exposición de los DRS a la interferencia

En este ejemplo se ha evaluado la variación del nivel de interferencia causada a un DRS en una órbita inclinada $0,1^\circ$ para una estación del SF situada a 45° de latitud Norte. Se ha supuesto que el DRS se halla en una línea recta que va de la estación de transmisión del SF a la cresta del obstáculo en filo de cuchillo y el DRS. El DRS se halla en su posición orbital nominal, es decir en el plano ecuatorial. Por lo tanto, el nivel de interferencia nominal es de -6 dB con respecto al nivel en el espacio libre examinado anteriormente.

Con un ángulo de inclinación orbital finito pero pequeño, la latitud y longitud del punto subsatelital DRS durante un periodo de 24 h vienen dadas por:

$$\varphi_s = i \operatorname{sen}(\omega_e t) \tag{17a}$$

$$\Delta\lambda_s = \frac{i^2}{4} \operatorname{sen}(2\omega_e t) \tag{17b}$$

siendo:

- φ_s : latitud del punto subsatelital DRS
- $\Delta\lambda_s$: incremento de la longitud del punto subsatelital DRS
- i : ángulo de inclinación del plano orbital del DRS
- ω_e : velocidad de rotación de la tierra
- t : tiempo transcurrido.

La variación diurna de la potencia de interferencia recibida por el DRS se puede evaluar utilizando la ecuación (16) para los cambios en el ángulo de elevación. Se supone que la cresta del obstáculo es paralela al plano horizontal local.

Se han analizado dos casos para determinar el efecto de una desviación en la posición nominal del DRS. En el primer caso, se supone que la posición nominal del DRS es $0,1^\circ$ por encima de la línea que va de la antena de transmisión del SF al borde del edificio obstaculizador y, en el segundo caso, se supone que la posición nominal del DRS es $0,1^\circ$ por debajo de esa línea. Estas desviaciones caben holgadamente en la mitad de la anchura de banda de 3 dB de $1,64^\circ$. Se supone además que la estación del SF está situada a 45° de latitud Norte y que el plano orbital del DRS está inclinado $0,1^\circ$ con respecto al plano ecuatorial. La variación diurna de la potencia de interferencia recibida por el DRS con respecto al valor en el espacio libre se muestra en las Figs. 9 y 10 para ambos casos. En la Fig. 9 se observan variaciones diurnas relativamente pequeñas de la potencia de interferencia, mientras que en la Fig. 10 se observa que las variaciones diurnas van de aproximadamente $-9,5$ dB a -21 dB.

5 Diseño de enlace del SF y métodos de instalación que aumentan la eficacia de la reducción de interferencia mediante una atenuación de la difracción

Según se desprende del *recomienda* 3.4 de la presente Recomendación, el objetivo es promover en caso necesario métodos de diseño e instalación de enlaces del SF que garanticen el mayor bloqueo posible de los trayectos potenciales de interferencia al DRS, de modo que los niveles de las transmisiones SF interferentes queden reducidos efectivamente mediante una atenuación por difracción.

Este objetivo de compartición entre los servicios SF y DRS coincide con el objetivo de control de la interferencia en el servicio SF, a fin de reducir las distancias de reutilización de frecuencias en instalaciones urbanas y suburbanas a gran escala que constituyen la gran mayoría de las aplicaciones existentes y futuras del SF en la banda de 26 GHz. Para este fin, es preferible instalar las antenas de estaciones SF en los costados de los edificios en lugar de la cresta y, si se han de instalar en la cresta, es preferible hacerlo lo más bajo posible.

FIGURA 9

Variación diurna de la potencia de interferencia recibida por un DRS en una órbita inclinada a $0,1^\circ$:
posición orbital del DRS desplazada $0,1^\circ$ en el plano de elevación;
estación del SF situada a 45° de latitud Norte

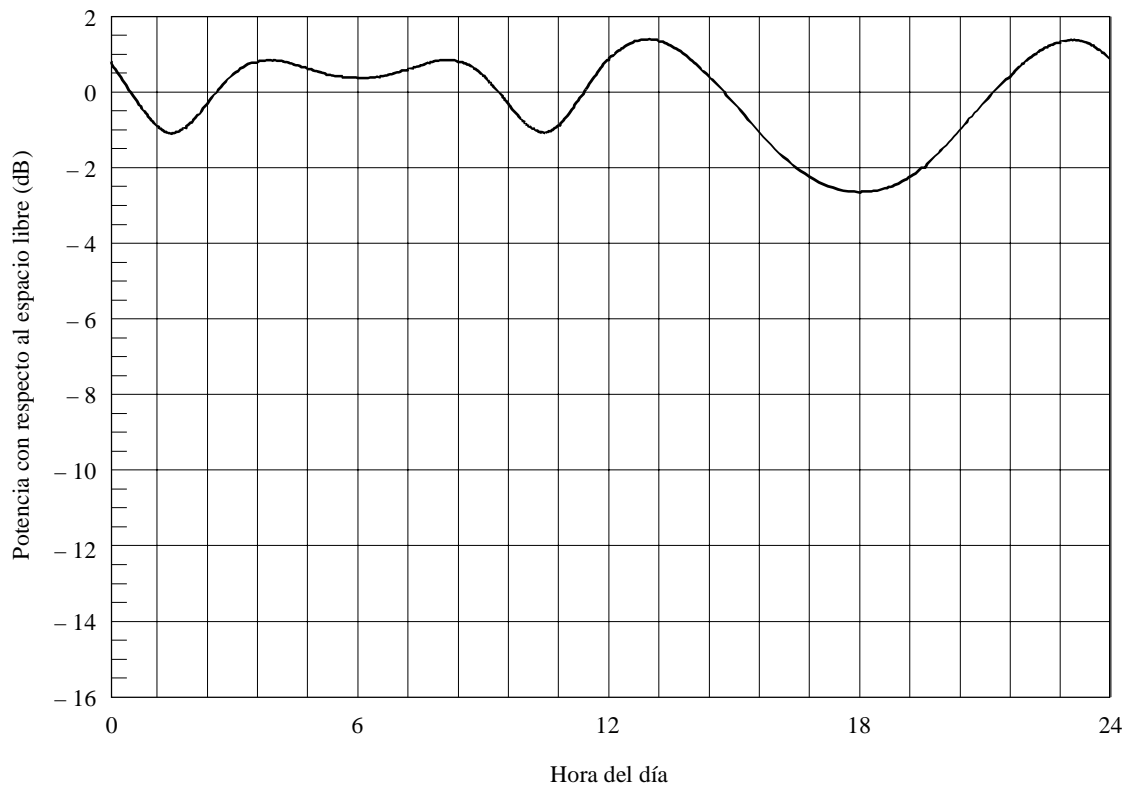
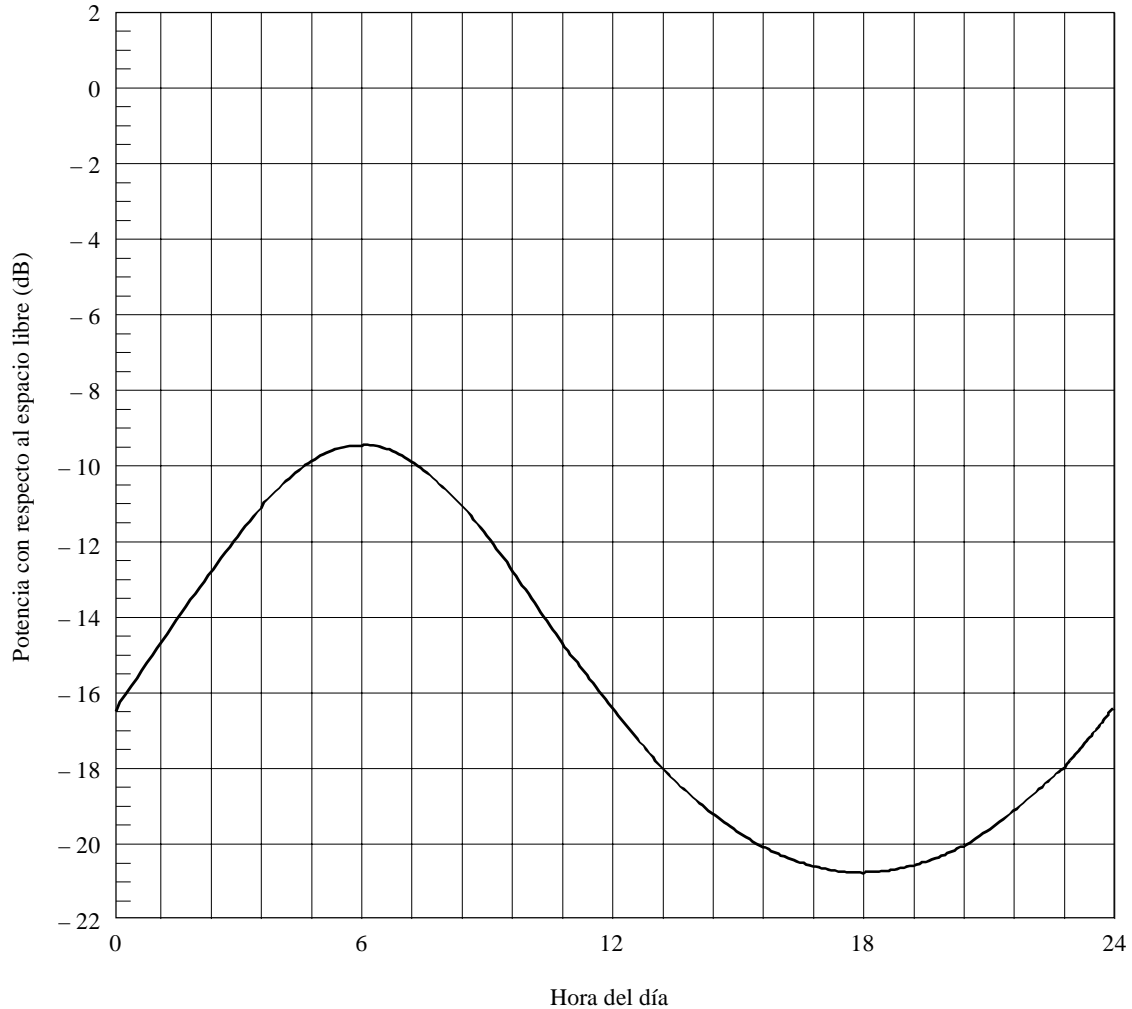


FIGURA 10

Variación diaria de la potencia de interferencia recibida por un DRS en una órbita inclinada a $0,1^\circ$:
 posición orbital del DRS desplazada $-0,1^\circ$ en el plano de elevación;
 estación del SF situada a 45° de latitud Norte



1249-10

Si se generalizan estos métodos se garantizan atenuaciones por difracción lo más elevadas posible, no solamente en trayectos de interferencia potencial en el SF, sino también en trayectos de interferencia potencial entre SF y DRS. No obstante, esta situación todavía se puede mejorar de la forma siguiente:

- difusión efectiva de la información pertinente sobre el problema de la interferencia potencial;
- instrucciones sencillas y fácilmente comprensibles para aprovechar al máximo la atenuación por difracción en los trayectos de interferencia potencial en los cuales, en caso contrario, las emisiones del SF excederían del límite de densidad espectral de p.i.r.e. recomendado.

El montaje de las antenas del SF en torres es el caso más desfavorable desde el punto de vista de la interferencia, ya que la atenuación por difracción que se puede obtener es despreciable a menos que el trayecto de interferencia potencial quede bloqueado detrás de la torre por un obstáculo natural o artificial. Cuando esa instalación no se pueda evitar por motivos de explotación, convendrá prestar la debida atención a esos enlaces potencialmente interferentes si las emisiones del SF pueden llegar a rebasar el límite recomendado de densidad espectral de p.i.r.e. En ese caso también es importante facilitar instrucciones sencillas y fácilmente comprensibles a fin de que se cumplan los requisitos.

6 Resumen y conclusiones

Al seleccionar los emplazamientos del SF y su configuración en instalaciones a gran escala típicas de las aplicaciones en la banda de 26 GHz, el objetivo es reducir la interferencia dentro del servicio mediante una atenuación por difracción. De este modo también se reduce la interferencia potencial entre servicios causada por estaciones de transmisión del SF a receptores DRS geoestacionarios que siguen a un vehículo espacial en órbita terrestre baja. Si bien el caso de interferencia «estática» en el servicio se presta a un simple análisis basado en la Recomendación UIT-R P.526, la interferencia entre servicios constituye un problema mucho más complejo.

El análisis de primer orden presentado, en el cual se trata de dar una idea del significado del bloqueo de la zona de Fresnel como factor de una posible disminución de los límites de densidad espectral de p.i.r.e. en las emisiones de estaciones del SF hacia posiciones orbitales DRS, ejemplifica variaciones diurnas de la atenuación por difracción y el hecho de que dependen de la posición nominal del DRS con respecto a la línea trazada entre las antenas de transmisión y recepción del SF. En estos ejemplos, el nivel nominal puede corresponder al valor en el espacio libre o puede llegar a ser hasta 16,5 dB inferior a ese valor. Ello demuestra que el nivel admisible de la p.i.r.e. de las estaciones del SF que presentan un bloqueo de la zona de Fresnel se ha de determinar en cada emplazamiento teniendo en cuenta los factores geográficos y geométricos que afectan al trayecto entre la estación del SF y el DRS.

Cabe observar que cuando la estación orbital DRS se halla en el haz principal de la antena de transmisión del SF pero es ocultada por un edificio u otro accidente topográfico, es probable que otra parte del arco geoestacionario sea visible en el haz principal de la antena del SF sin ninguna obstrucción, de modo que la estación del SF habrá de cumplir los requisitos del *recomienda 4*.
