

RECOMENDACIÓN UIT-R S.1327

**REQUISITOS Y BANDAS IDÓNEAS PARA EL FUNCIONAMIENTO
DEL SERVICIO ENTRE SATÉLITES EN LA GAMA 50,2-71 GHz**

(Cuestión UIT-R 246/4)

(1997)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que la Resolución 643 de la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones (Ginebra, 1995) (CMR-95) encarga al UIT-R que efectúe los estudios necesarios para identificar las bandas más idóneas para el servicio entre satélites (SES), para que la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones (Ginebra, 1997) (CMR-97) pueda proceder a las atribuciones apropiadas a dicho servicio;
- b) que los requisitos técnicos y funcionales del SES en la gama de frecuencias 50,2-71 GHz están definidos en el Anexo 2 a la presente Recomendación;
- c) que las redes identificadas en el Anexo 2 suelen requerir grandes anchuras de banda y generalmente establecen enlaces troncales de alta velocidad de datos para los segmentos espaciales de las redes;
- d) que se prevé una utilización en gran escala del SES en la gama 50,2-71 GHz;
- e) que existe el riesgo de interferencias no deseadas provenientes de un gran número de enlaces entre satélites en el servicio de exploración de la Tierra por satélite (SETS) (pasivo) que funciona en dicha gama;
- f) que no se conocen sistemas terrenales o espaciales existentes o previstos en las actuales atribuciones de la gama 65-71 GHz;
- g) que las características de absorción de las ondas radioeléctricas en la atmósfera para la gama considerada pueden mejorar las condiciones de compartición con las estaciones terrenales de otros servicios;
- h) que los estudios han confirmado la viabilidad de la compartición entre el SES y los servicios terrenales en la banda 66-71 GHz (véase el Anexo 3),

recomienda

- 1** que las bandas más idóneas para el SES en la gama 50,2-71 GHz comprendan:
 - 54,25-58,2 GHz, limitado a las redes que utilicen la órbita de los satélites geoestacionarios (OSG) de conformidad con la Recomendación UIT-R S.1339;
 - 59-64 GHz;
 - 65-71 GHz;

2 que las atribuciones al SES en esta gama de frecuencias representen bandas contiguas de suficiente anchura como para responder a las necesidades exclusivas del SES.

NOTA 1 – La Recomendación UIT-R S.1339 examina la viabilidad de la compartición entre el SES y los sensores pasivos a bordo de vehículos espaciales en la gama de frecuencias 50-65 GHz.

NOTA 2 – La Recomendación UIT-R S.1326 aborda la compartición entre el servicio fijo por satélite (SFS) y el SES en la banda 50,4-51,4 GHz.

NOTA 3 – El Anexo 1 a la presente Recomendación resume las posibilidades de compartición del SES con otros servicios en la gama de frecuencias 50,2-71 GHz.

ANEXO 1

El presente Anexo resume las posibilidades de compartición del SES con los siguientes servicios:

- a) Servicio fijo en las bandas 50,2-51,4, 54,25-58,2 y 59-64 GHz

En dichas bandas, la compartición es viable. Sin embargo, la banda 50,2-51,4 GHz puede no tener anchura suficiente para satisfacer los requisitos del SES.

b) SFS en la banda 50,4-51,4 GHz

Los estudios han demostrado que la compartición entre el SES OSG y el SFS OSG en la banda mencionada sería viable utilizando algunas técnicas de atenuación. Sin embargo, en otros casos, como la compartición del SES no OSG con el SFS, OSG o no OSG, pueden presentarse algunas dificultades, por lo que requiere ulterior estudio (véase la Recomendación UIT-R S.1326).

c) Servicio móvil en las bandas 50,2-51,4, 54,25-58,2, 59-64 y 66-71 GHz

Los estudios han demostrado que la absorción por el oxígeno, así como la discriminación de la antena, atenuarán las señales de manera que sea posible la compartición con esos sistemas.

d) Servicio (pasivo) de exploración de la Tierra por satélite (SETS (pasivo)) y servicio (pasivo) de investigación espacial (SIE (pasivo)) en las bandas 50,2-50,4, 51,4-59, 59-64 y 64-65 GHz

Los estudios han indicado el riesgo de interferencias inaceptables provenientes de sistemas no OSG que utilizan el SES en dichas bandas. La compartición entre el SES OSG o un SES híbrido y el SETS (pasivo) es viable y las condiciones de compartición se presentan en la Recomendación UIT-R S.1339. En la banda 59-64 GHz, los sistemas SES no OSG existentes podrían también causar interferencias nocivas e incluso quizás dañar los sensores del SETS (pasivo). Se recomienda que los sensores pasivos estén preparados para soportar las posibles interferencias de los sistemas existentes. Se observa asimismo que no hay requisitos para el SETS (pasivo) o sistemas de teleobservación por satélite (pasivos) en la banda 64-65 GHz, por lo que esta banda puede ser conveniente para el SES no OSG. Sin embargo, mediante nota al pie de página se ha atribuido esta banda al servicio de radioastronomía y no se han efectuado estudios de compartición acerca de la viabilidad de la compartición del SES con el servicio de radioastronomía.

e) Servicio de radionavegación en la banda 66-71 GHz

Los estudios han demostrado que la absorción por el oxígeno, así como la discriminación de la antena, atenuarán las señales hasta tal grado, que sería posible la compartición entre dichos sistemas. Se requieren mayores informaciones sobre el servicio de radionavegación para establecer conclusiones definitivas al respecto.

f) Servicio móvil por satélite (SMS) en las bandas 66-71 GHz

Los estudios han demostrado que existen riesgos de interferencia del SES en receptores del SMS instalados en vehículos espaciales para los sistemas que operan a alturas de órbita similares. Sin embargo, la compartición a alturas de órbita similares sería posible mediante el uso de la discriminación por polarización. Otros riesgos de interferencia están vinculados al carácter bidireccional de las atribuciones del SMS. Las interferencias entre estos sistemas requieren ulterior estudio.

g) Servicio de radionavegación por satélite en la banda 66-71 GHz

Los estudios han demostrado que podría haber interferencia del SES en receptores del servicio de radionavegación por satélite a bordo de vehículos espaciales para sistemas que operan a alturas de órbita similares. Sin embargo, la compartición a alturas de órbita similares sería posible mediante el uso de la discriminación por polarización. Otros riesgos de interferencia están vinculados al carácter bidireccional de las atribuciones del servicio de radionavegación por satélite. Las interferencias entre estos sistemas requieren ulterior estudio.

h) SIE y SETS en la banda 65-66 GHz

Esta banda no se utilizará para teleobservación pasiva a bordo de vehículos espaciales y está destinada a la transmisión de datos en el sentido espacio-Tierra. La coordinación en el UIT-R ha revelado que no existen actualmente planes para la utilización de esta banda por sistemas SETS o SIE. La compartición entre redes de satélites en los servicios SETS y SIE (en ambos casos, en el sentido espacio-Tierra) con los del SES no debería presentar dificultades.

ANEXO 2

Características de los sistemas que prevén la utilización del SES cerca de 60 GHz

1 Este Anexo identifica los sistemas en funcionamiento o previstos del SES cerca de 60 GHz. Una característica propia de estos sistemas es su exigencia de grandes anchuras de banda. Los usuarios del SES suelen establecer enlaces troncales de alta velocidad de datos para los segmentos espaciales de las redes. Un usuario típico de las redes es aquél

que utiliza el SFS o el SMS. El usuario típico puede atenderse con un enlace de señales vocales de 2,4 kbit/s o un enlace de datos de 1,544 Mbit/s, pudiendo participar hasta 250 000 usuarios de voz final en un solo enlace entre satélites (EES) de 1 Gbit/s.

2 Estimación de los requisitos de banda ancha para sistemas del SES cerca de 60 GHz

Con el fin de estimar la banda ancha que requiere el funcionamiento del SES OSG, se efectuó un estudio de los sistemas actuales y previstos SES OSG. Para fines de 1996 estaba previsto el funcionamiento de 10 sistemas SES OSG cerca de 60 GHz y mediante 74 satélites, con un total de hasta 178 EES OSG. Muchos de los emplazamientos OSG se concentran en las regiones de Europa y los Estados Unidos de América. Se proponen cuatro sistemas SES no OSG, con cerca de 1 000 satélites y unos 8 000 enlaces. La mayoría de estos sistemas son de órbita baja.

2.1 EES cortos (enlaces cortos)

Se estima que los EES cortos (con abertura de sistema de 10° o menos) requieren hasta 10° de separación orbital respecto de los sistemas SES OSG de frecuencia compartida. Cada nodo de un enlace corto requiere hasta 2 GHz de anchura de banda. Considerando 10° de separación orbital entre cada enlace corto de frecuencia compartida y 2° de separación orbital entre dos satélites OSG, se estima que un factor 5 puede proporcionar un espectro adecuado para enlaces cortos SES OSG, en un total de 10 GHz.

2.2 EES largos (enlaces largos)

Para los EES largos (con una separación orbital de más de 10°), una separación orbital de 2° entre los sistemas SES OSG es suficiente para cumplir el criterio de calidad de funcionamiento de $C/I \geq 30$ dB. En estas condiciones, una anchura de 4 GHz del espectro es suficiente para la reutilización de frecuencias, ya que por lo menos un sistema SES OSG está previsto para un mínimo de 4 GHz. Sin embargo, no está garantizado que puedan mantenerse las separaciones orbitales de 2° , sobre todo en las zonas de gran afluencia del arco geoestacionario. Una separación de 1° entre los sistemas traería consigo una necesidad doble de espectro, es decir, 8 GHz.

2.3 Crecimiento

El análisis anterior no contempla el crecimiento de los sistemas del SES OSG. Un factor de crecimiento del orden del 1,5 puede utilizarse para estimar el crecimiento posible del SES en un futuro próximo (10 a 20 años). La aplicación del factor de crecimiento conduce a un requisito estimado de 15 GHz para enlaces cortos, o 12 GHz para enlaces largos en los sistemas SES OSG.

2.4 Estimación de los requisitos de banda ancha para sistemas del SES no OSG cerca de 60 GHz

La anchura de banda total para los sistemas propuestos no OSG se estima en 8,2 GHz. Suponiendo un factor de crecimiento de 1,5, el requisito estimado para los sistemas no OSG es aproximadamente de 12 GHz.

2.5 Resumen

Como consecuencia de las separaciones orbitales requeridas entre los sistemas SES OSG con EES cortos y dadas las condiciones de superpoblación en algunas regiones del arco geoestacionario, las necesidades del espectro para un uso pleno de los sistemas previstos y futuros del SES OSG se estiman en 15 GHz. Para los sistemas no OSG, la estimación se cifra en 12 GHz.

3 Trabajo adicional que queda por hacer

Estas velocidades de datos pueden asociarse a las normas del trayecto digital ficticio de referencia, permitiendo así definir una sensibilidad significativa a la interferencia.

CUADRO 1

Características de los sistemas OSG

Sistema OSG	W-1	W-2a ⁽¹⁾	W-2b ⁽¹⁾	W-3	W-4	W-5	W-6	W-7	W-8	W-10
Número de satélites	3	4	15	12	17	4	2	2	5	10
Número de pares transmisores/ receptores por satélite	2	2	2	2	2-4	2	1	1	2	1
Anchura de banda (GHz)	1	3,2	0,04	0,5	1	1	0,12	0,12	1	2,5
Anchura de banda total requerida (GHz)	2	3,2	0,08	1	4	2	0,24	0,24	2	5,0
Potencia de cresta (dBW)		16	-1	8,5	8	11,76	13	13	13	21
p.i.r.e. máxima (dBW)	71,3	75	57	54,5/63,5	68,3	64,78	63,3	62,1	68,7	75
Ganancia de antena (dBi)	58,5	60,3	58	46/55,5	60,3				55,7	53,5
Diámetro de antena (m)	1,8	2		0,4/1,2	1,8		0,75	0,75	1	1
Temperatura de ruido del sistema (K)	468,4	800	2034		630		290	290	330	800
Receptor G/T (dB(K ⁻¹))			24,9	19/28,5		19,8/25,9	23,4	23,4	27,4	24,5
Ángulo máximo de separación longitudinal (grados)	145	163	163	141	163	17	34	24	100	106

⁽¹⁾ Cualquier nodo del sistema W-2 puede comunicarse con otros nodos del mismo sistema.

CUADRO 2

Características de los sistemas no OSG

Sistema no OSG	LEOSAT 1	W-2c	W-2d	W-9
<i>Parámetros orbitales</i>				
Número de planos	21	10	12	12
Número de satélites por plano	44	1	1	6
Periodo medio (min)	98,77	718,03	105	113
Inclinación media (grados)	98,16	63,4	55-110	47
Espaciamiento de los nodos ascendentes (grados)	9,5	Diverso	Diverso	30
Excentricidad		0,72	Diversa	0,0013
<i>Parámetros de RF</i>				
Número de pares transmisores/receptores por satélite	8	2	2	4
Anchura de banda para cada haz (GHz)	1	3,2	3,2	1,5
Anchura de banda total requerida (GHz)	2	3,2	3,2	3
Potencia de cresta (dBW)	7,4	16	16	4
p.i.r.e. máxima (dBW)	55,4	75	75	59,9
Ganancia de antena (dBi)	48	60,3	60,3	55,9
Diámetro de antena (m)	0,5	2	2	1,2
Temperatura de ruido del sistema (K)	438	800	800	501
Ángulo máximo de separación geocéntrica (grados)	19	-	-	30

NOTA 1 – Cualquier nodo del sistema W-2 puede comunicarse con otros nodos del mismo sistema.

NOTA 2 – Se indica la anchura de banda máxima. También pueden usarse valores menores.

ANEXO 3

Evaluación de posible atribución al SES en la banda 66-71 GHz**1 Introducción**

El SES tiene una atribución a título primario común en la banda 54,25-58,2 GHz, también utilizada por el SETS para observaciones pasivas. Los sensores de microondas a bordo de vehículos espaciales operacionales pueden suministrar datos ambientales y climáticos cuya importancia es cada vez mayor para comprobar la temperatura de la atmósfera de la Tierra. Los perfiles de temperatura atmosférica son de importancia decisiva para inicializar modelos numéricos de predicción del tiempo y obtener otros datos científicos importantes.

La comunidad mundial de usuarios, entre otros la Organización Meteorológica Mundial, el Sistema Mundial de Observación del Clima y el Programa Mundial de Investigaciones Climáticas, ha procedido a definir los requisitos de datos de satélites en materia de parámetros atmosféricos, tales como perfiles de temperatura y de presencia de vapor de agua, concentración de ozono y otros gases residuales radiactiva y químicamente activos, que sólo pueden ser detectados por sensores pasivos en satélites. Las líneas de absorción del oxígeno en la región de 50,2-66 GHz representan el único recurso natural utilizado en todas las formas de teleobservación de la atmósfera por microondas pasivas con fines climatológicos. No existe alternativa en otras bandas de frecuencia.

La banda de frecuencias 54,25-58,2 GHz está compartida entre los servicios SETS (pasivo), fijo, móvil y entre satélites. En estudios anteriores se llegó a la conclusión de que los sistemas del SES con un gran número de satélites de órbita baja pueden producir niveles inadmisibles de interferencia en los sensores pasivos de microondas. El Grupo de Coordinación de Frecuencias Espaciales resolvió que sería sumamente deseable reservar la banda de frecuencia correspondiente a los servicios pasivos, reatribuyendo al SES la gama de frecuencias 66-71 GHz, salvo en lo que respecta a la banda de 56,9 a 57 GHz, para permitir el relevamiento de la temperatura atmosférica evitando tener que limitar los parámetros de los servicios activos. La banda 66-71 GHz suministra una anchura de banda de 5 GHz en lugar de 3,95 GHz en el caso de la banda 54,25-58,2 GHz, por lo que debería ser una alternativa atractiva a la actual atribución.

El presente estudio se concentra en la evaluación de la compartición entre el SES y todos los servicios primarios atribuidos en la banda 66-71 GHz.

2 Características de los sistemas del SES

Resulta difícil predecir de una manera general las características de los sistemas del SES que utilizarán frecuencias por encima de 50 GHz. Hay no obstante un sistema que ya se encuentra en una etapa avanzada de planificación y que podría servir de ejemplo representativo a los efectos de evaluar la compartición. El sistema propuesto, de tipo no OSG, se conoce como LEOSAT-1 y estaría compuesto de 924 satélites de órbita baja (840 satélites activos y 84 de reserva) previstos para suministrar servicios vocales básicos, conferencias por multimedia, telemedicina, enseñanza a distancia y videotelefonía a escala mundial. Los EES están diseñados de tal suerte que cada uno se conecta con los cuatro satélites más cercanos en el mismo plano de órbita y con otros dos, situados en ambos planos adyacentes. Se prevé que las transmisiones se efectúen en 56 y 59 GHz, con polarización circular levógira y dextrógira, para reducir las interferencias recíprocas. Las características técnicas típicas de un posible sistema futuro de este tipo, para el cual una información con arreglo al Apéndice 3 al Reglamento de Radiocomunicaciones se presentó a la UIT en 1995, figuran en el Cuadro 3.

Cada satélite está conectado a otros ocho, de modo que ha de considerarse un total de 8 transmisiones por satélite. Los enlaces entre los diversos satélites aparecen en la Fig. 1.

A los efectos de este estudio, se supone que las transmisiones en 56 GHz pueden trasladarse a frecuencias cercanas a 66 GHz, y las de 59 GHz a 70 GHz. En relación con la atenuación atmosférica, el caso de 70 GHz es el más arriesgado, ya que la atenuación debida al aire seco es considerablemente mayor en 66 GHz, resultando, por consiguiente, en niveles inferiores de señal de interferencia en la superficie de la Tierra. A fin de analizar el caso menos favorable, el estudio se concentrará en las transmisiones alrededor de 70 GHz.

CUADRO 3

Características técnicas de un posible sistema SES

Parámetro	Valor
Frecuencias portadoras (GHz)	56 ó 59
Potencia por canal (dBW)	7,4
Ganancia de antena máxima (dBi)	48
Ganancia de antena mínima (dBi)	-10
p.i.r.e. máxima (dBW)	55,4
Diagrama de antena	Recomendación UIT-R S.672
Polarización	Circular levógira y dextrógira
Anchura de banda de canal (GHz)	1
Velocidad máxima de datos por canal (Gbit/s)	1,24416
Densidad espectral máxima de potencia (dB(W/MHz))	-22,6
Densidad máxima de p.i.r.e. (dB(W/MHz))	25,4
Altura de órbita (km)	695-705
Excentricidad	0,00118
Inclinación (grados)	98,2
Ángulo de ascensión recta (grados)	$n \times 9,5$ ($n = 0$ a 20)
Número de planos de órbita	21
Espaciamiento entre planos (grados)	9,5
Espaciamiento entre satélites de un mismo plano (grados)	9
Número de satélites por plano	40 (44)
Periodo orbital (min)	98,8

La reatribución de las conexiones requiere algunas modificaciones menores de diseño. Para lograr la misma calidad de funcionamiento de enlace en 70 GHz como en 59 GHz, debe compensarse una pérdida espacial diferencial de 1,5 dB. Este resultado puede alcanzarse aumentando levemente la ganancia de antena en el satélite receptor, al igual como en el transmisor. Se considera que una ganancia máxima de antena de 49 dBi en lugar de 48 dBi sería suficiente. La longitud de onda, en 70 GHz, es de 4,3 mm.

A partir de los datos indicados, puede calcularse el diámetro de la antena y la semiapertura de potencia. Para una eficiencia del 60%, el diámetro de una antena parabólica de 49 dBi de ganancia es de aproximadamente 0,5 m en 70 GHz. Como resultado, se obtiene una semiapertura de potencia unilateral de $0,31^\circ$ (apertura de 3 dB). Para obtener dichos parámetros, se han utilizado las siguientes ecuaciones:

$$G_m = 10 \log (110 \eta D^2 f^2) \quad (1)$$

$$\theta_3 = 36,4 (\lambda / D) \quad (\text{unilateral}) \quad (2)$$

donde:

G_m : ganancia de antena máxima

η : eficiencia

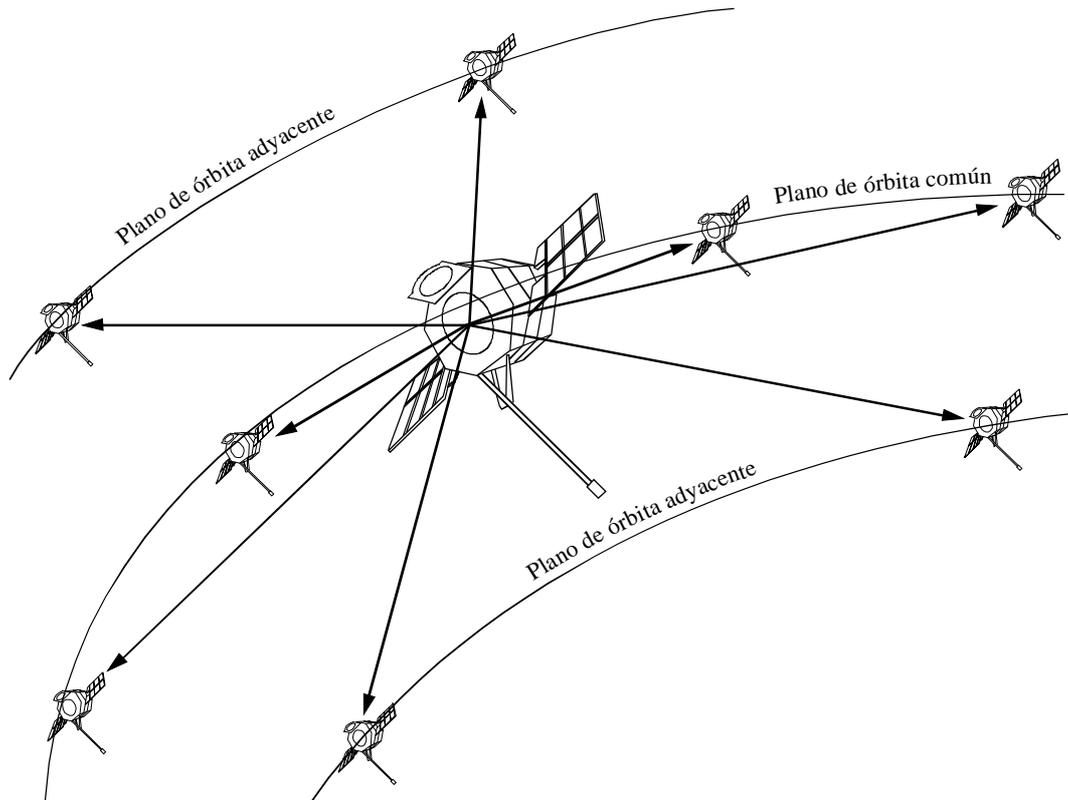
D : diámetro de la antena (m)

f : frecuencia (GHz)

θ_3 : semiapertura de potencia (3 dB, unilateral)

λ : longitud de onda.

FIGURA 1
Constelación de interconexiones



Interconexiones:

- Circular levógira de 56 GHz
- Circular levógira de 59 GHz
- Circular dextrógira de 56 GHz
- Circular dextrógira de 59 GHz

1327-01

El diagrama de referencia de la antena es sumamente importante para calcular la caída de su ganancia y, por lo tanto, la distribución de la densidad de flujo de potencia (dfp). El diagrama que se considera más representativo figura en la Recomendación UIT-R S.672 y está caracterizado por las siguientes ecuaciones:

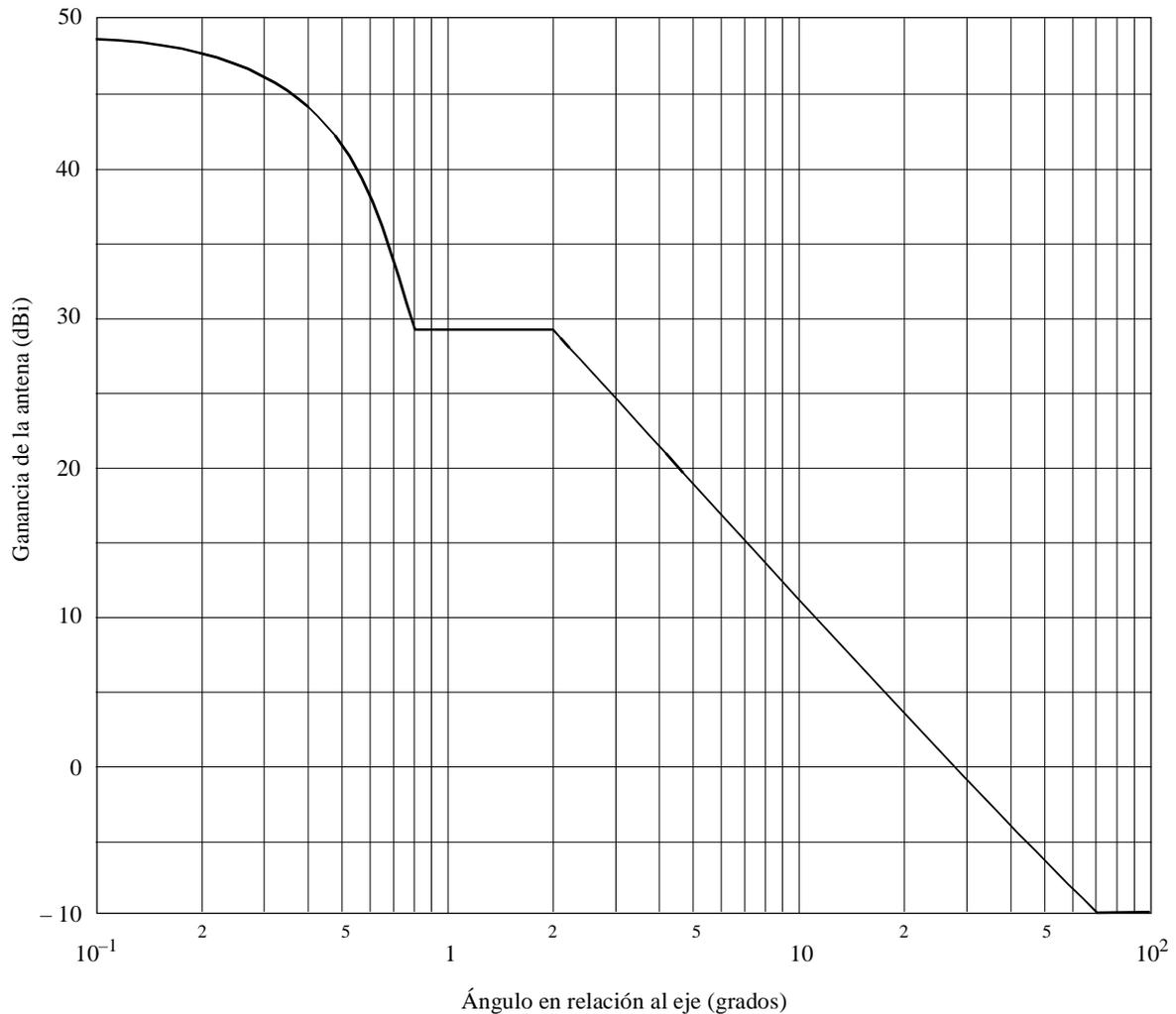
$$G = \begin{cases} G_m - 3(\theta / \theta_3)^2 & \text{para } \theta \leq 2,6 \theta_3 & (3) \\ G_m - 20 & \text{para } 2,6 \theta_3 < \theta \leq 6,3 \theta_3 & (4) \\ G_m - 25 \log(\theta / \theta_3) & \text{para } \theta > 6,3 \theta_3 & (5) \end{cases}$$

La Fig. 2 ilustra el diagrama de referencia de ganancia de antena para una antena de 0,5 m en 70 GHz. De conformidad con las especificaciones del sistema, se ha introducido una ganancia mínima de -10 dBi.

3 Requisitos de protección de los servicios afectados

Actualmente la banda 66-71 GHz está atribuida a título primario a los servicios móvil, SMS, de radionavegación y de radionavegación por satélite. No se dispone de indicadores de dirección para ambos servicios por satélite, por lo que cabe suponer que las bandas en cuestión aún no han sido consideradas para aplicaciones. Como en la documentación de la UIT no se especifican requisitos de protección, se hace necesario elaborar algunas hipótesis relativas a una correcta protección.

FIGURA 2
Contorno de ganancia de antena para interconexiones



1327-02

Los servicios terrenales y los enlaces espacio-Tierra pueden protegerse generalmente mediante límites adecuados de dfp aplicables en la superficie de la Tierra. Es de suponer que semejante límite de dfp puede aplicarse a cualquiera de los dos servicios por satélite o a ambos a la vez, cuando funcionan en la dirección espacio-Tierra. Por consiguiente, sería útil definir un límite adecuado de dfp para el SES en la banda 66-71 GHz.

El RR no establece límites de dfp por encima de 40,5 GHz. Los valores más cercanos que pueden considerarse son, en consecuencia, los siguientes límites aplicables en la banda de 31 a 40,5 GHz:

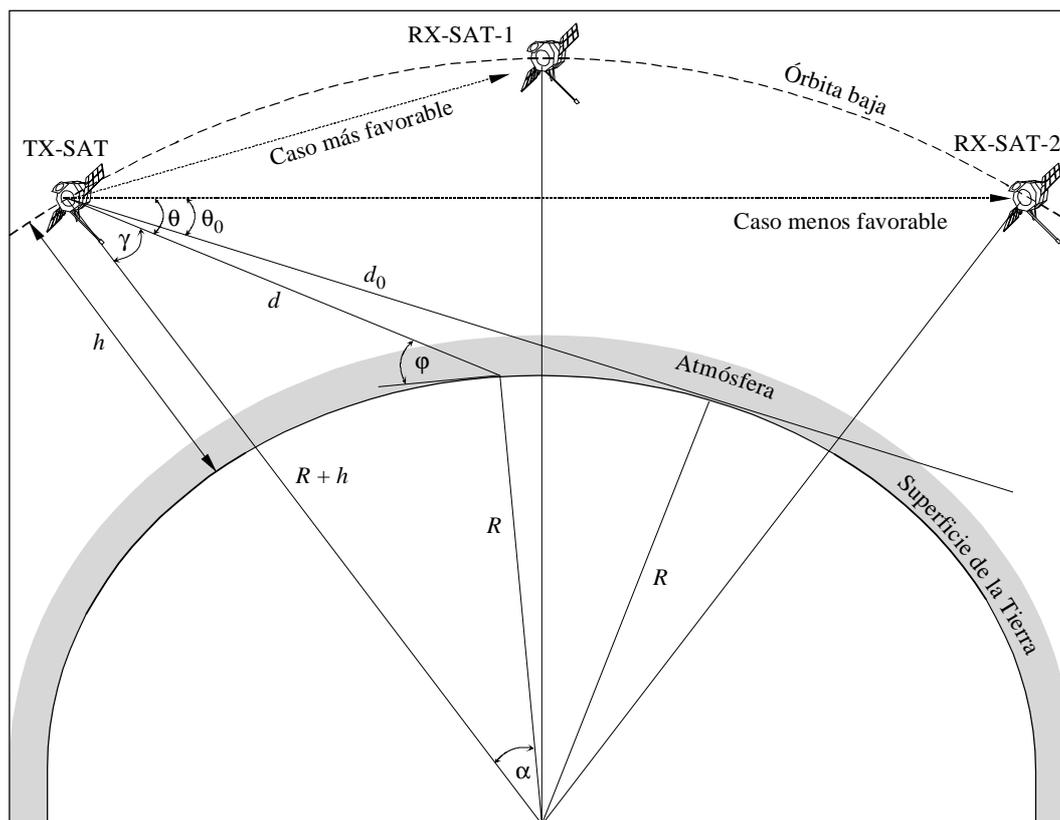
- 115 dB(W/m²): en cualquier banda de 1 MHz para ángulos de incidencia entre 0° y 5° por encima del plano horizontal
- 115 + 0,5(θ - 5) dB(W/m²): en cualquier banda de 1 MHz para ángulos de incidencia entre 5° y 25° por encima del plano horizontal
- 105 dB(W/m²): en cualquier banda de 1 MHz para ángulos de incidencia entre 25° y 90° por encima del plano horizontal.

4 Evaluación de la compartición

La Fig. 1 ilustra las diversas constelaciones con transmisiones interconectadas. Para enlaces a corta distancia, el ángulo de caída de la antena respecto de la superficie de la Tierra es mayor que para enlaces a larga distancia. También los niveles de potencia pueden reducirse para transmisiones a corta distancia.

Las dos constelaciones representadas en la Fig. 3 que sigue constituyen el caso menos favorable y el más favorable para calcular las d_{fp} en la superficie de la Tierra. En el caso menos favorable, el satélite TX-SAT transmite una señal al satélite más distante RX-SAT-2. El ángulo de transmisión se acerca más a la Tierra que en el caso de una transmisión al satélite RX-SAT-1, que se encuentra en el mismo plano de órbita. La constelación para transmisiones a satélites situados en planos adyacentes es diferente, pero en todo caso se espera que comporte menos riesgos en comparación con el caso menos favorable de una constelación en el mismo plano. En algunas constelaciones específicas, cercanas a los polos, las distancias pueden ser inclusive inferiores a la menor distancia posible de los casos de constelación en un mismo plano. La Fig. 3 desarrolla e ilustra las constelaciones geométricas. Para facilitar la visualización, el dibujo no está a escala.

FIGURA 3
Relaciones geométricas para el cálculo de d_{fp}



Nota 1 - Dibujo fuera de escala.

1327-03

El cálculo de niveles de d_{fp} en la superficie de la Tierra sería relativamente sencillo si no hubiera que tomar en consideración la atenuación atmosférica. Los principales factores determinantes de los niveles de d_{fp} son la densidad espectral de potencia, la ganancia resultante de antena en dirección de la superficie de la Tierra y la distancia hasta el punto de incidencia. Sin embargo, a altas frecuencias, tampoco puede pasarse por alto el efecto de la atenuación atmosférica debida al aire seco (principalmente oxígeno) y al vapor de agua.

Puede calcularse la d_{fp} en la superficie de la Tierra mediante la relación:

$$d_{fp} = DEP + G - 10 \log (4\pi d^2) - A_a \quad (6)$$

donde:

DEP : densidad espectral de potencia máxima

G : contorno de ganancia de la antena

d : distancia a la superficie de la Tierra

A_a : atenuación atmosférica.

La Recomendación UIT-R P.676 contiene las ecuaciones aplicables al efecto del aire seco y el vapor de agua. La atenuación específica γ_o debida al aire seco para una presión de 1 013 hPa y una temperatura de 15° C está dada por:

$$\gamma_o = \left[0,00719 + \frac{6,09}{f^2 + 0,227} + \frac{4,81}{(f - 57)^2 + 1,5} \right] f^2 \times 10^{-3} \quad \text{dB/km} \quad (7)$$

Para frecuencias alrededor de 70 GHz, el valor de $\gamma_o = 0,18$ dB/km. Este valor es de por sí considerablemente inferior a la atenuación máxima registrable a 60 GHz, que es superior a 10 dB/km. La atenuación específica γ_w debida al vapor de agua para una presión de 1 013 hPa y una temperatura de 15° C está dada por:

$$\gamma_w = \left[0,05 + 0,0021 \rho + \frac{3,6}{(f-22,2)^2 + 8,5} + \frac{10,6}{(f-183,3)^2 + 9,0} + \frac{8,9}{(f-325,4)^2 + 26,3} \right] f^2 \rho \times 10^{-4} \quad \text{dB/km} \quad (8)$$

Para una densidad del vapor de agua típica de $\rho = 7,5$ g/m³ y una frecuencia cercana a 70 GHz, el valor de $\gamma_w = 0,25$ dB/km.

Se observa que la atenuación disminuye al aumentar la altura respecto de la superficie de la Tierra. Por lo tanto, debe considerarse la altura del terminal receptor interferido. Para calcular la atenuación a lo largo del trayecto de transmisión dado un ángulo de elevación específico, pueden utilizarse las siguientes ecuaciones:

$$A_a = \frac{h_o \gamma_o e^{-h_s/h_o} + h_w \gamma_w}{\text{sen } \varphi} \quad \text{dB} \quad \text{para } 10^\circ < \varphi \leq 90^\circ \quad (9)$$

$$A_a = \frac{\sqrt{R_e}}{\cos \varphi} \left[\sqrt{h_o} \gamma_o F(x_1) e^{-h_s/h_o} + \sqrt{h_w} \gamma_w F(x_2) \right] \quad \text{dB} \quad \text{para } 0^\circ < \varphi \leq 10^\circ$$

$$F(x_i) = \frac{1}{0,661x_i + 0,339 \sqrt{x_i^2 + 5,51}} \quad \text{para } i = 1, 2 \quad (10)$$

$$x_1 = \cos \varphi \left[\text{sen } \varphi \text{ tg}^2 \varphi \sqrt{\frac{R_e}{h_o}} + \sqrt{\frac{R_e}{h_o} + 2 \frac{h_i}{h_o} + \frac{h_i^2}{2R_e h_o}} \right] \quad (11)$$

$$x_2 = \cos \varphi \left[\text{sen } \varphi \text{ tg}^2 \varphi \sqrt{\frac{R_e}{h_w}} + \sqrt{\frac{R_e}{h_w} + 2 \frac{h_i}{h_w} + \frac{h_i^2}{2R_e h_w}} \right] \quad (12)$$

$$h_w = h_{w0} \left[1 + \frac{3,0}{(f - 22,2)^2 + 5} + \frac{5,0}{(f - 183,3)^2 + 6} + \frac{2,5}{(f - 325,4)^2 + 4} \right] \quad \text{km} \quad (13)$$

donde:

h_o : altura equivalente para el aire seco (6 km)

h_w : altura equivalente para el vapor de agua

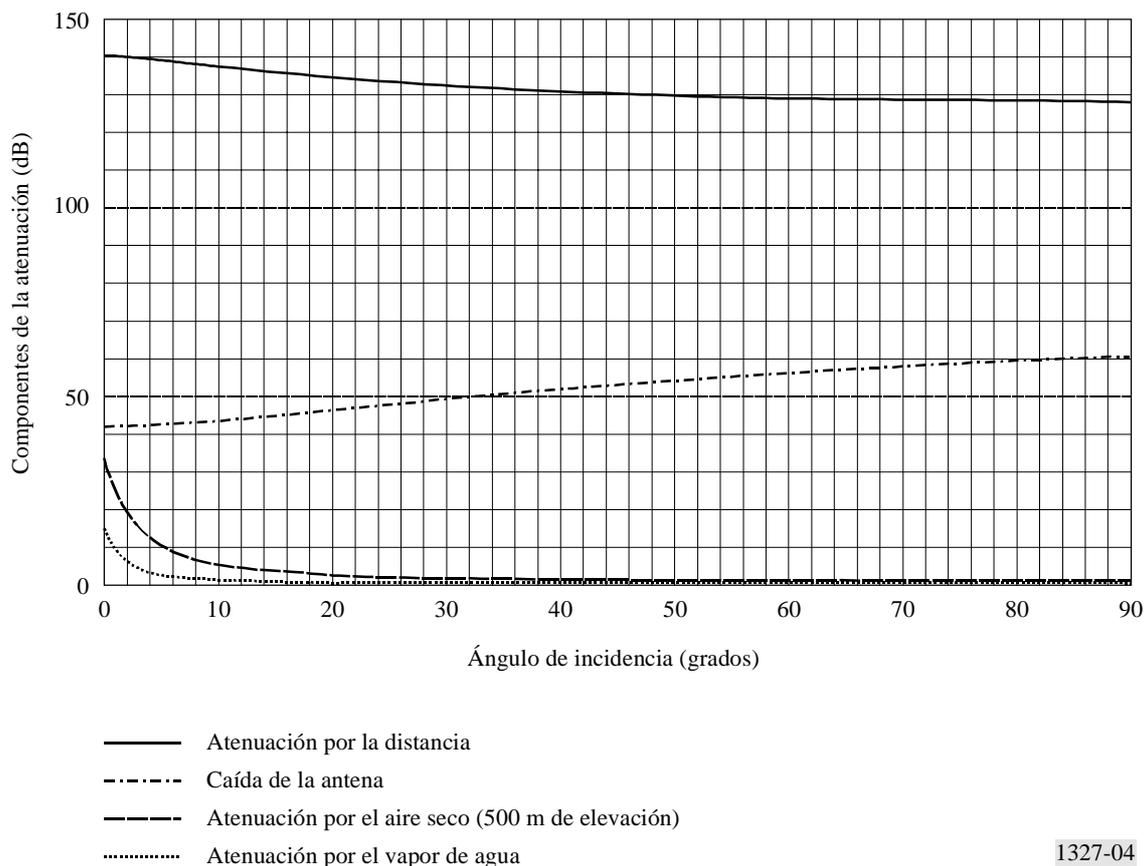
h_{w0} : 1,6 en tiempo despejado; 2,1 en tiempo lluvioso (km)

R_e : radio efectivo de la Tierra incluida la refracción (8 500 km)

φ : ángulo de elevación.

Se ha elaborado un programa informatizado para calcular los niveles de dfp en la superficie de la Tierra como una función de todos los factores mencionados para ángulos de elevación entre 0° y 90°. El programa se ha diseñado de manera que permita probar la sensibilidad de los resultados frente a cualquier parámetro de entrada. Sobre la base de una serie de hipótesis pesimistas se ha seleccionado un caso «desfavorable» representativo. La Fig. 4 analiza comparativamente los distintos factores de atenuación.

FIGURA 4
Componentes de la atenuación de dfp

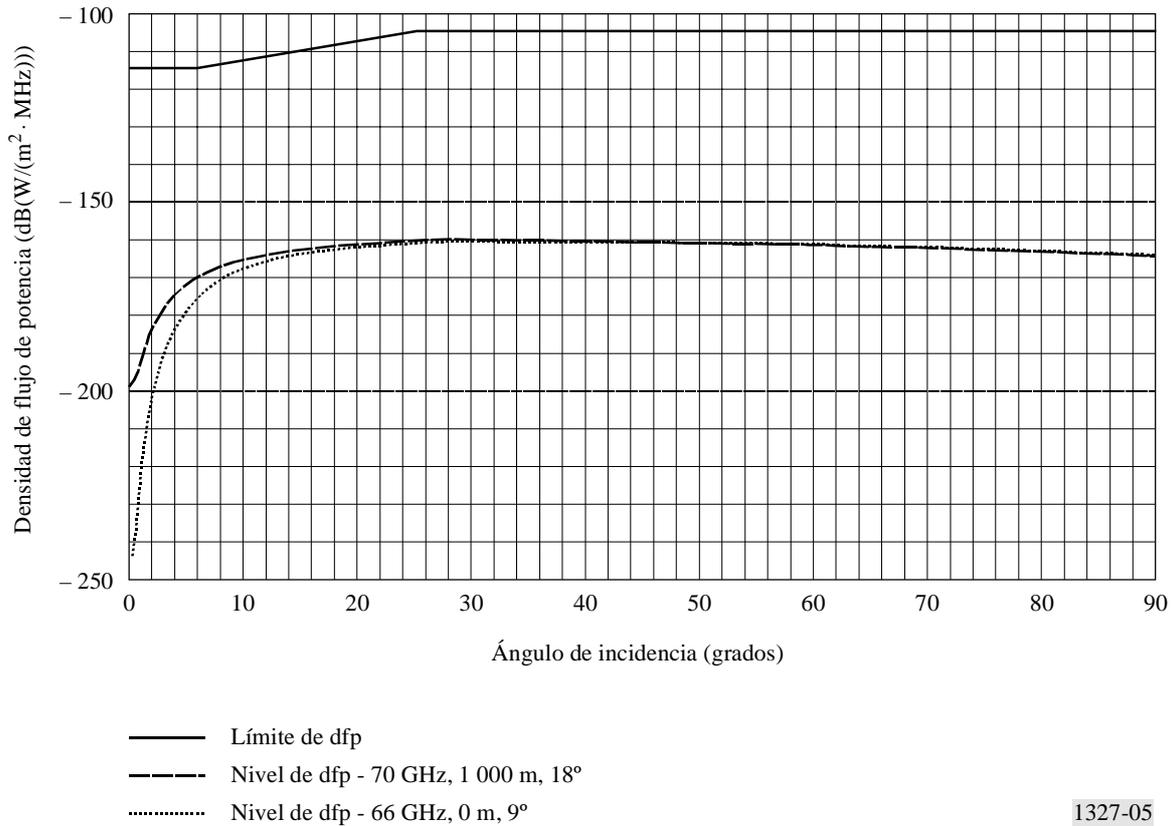


1327-04

La Fig. 5 representa las dfp resultantes para el caso menos favorable y más favorable de constelación en un solo plano, considerando elevaciones de 1 000 m y el nivel del mar, frecuencias de 70 y 66 GHz respectivamente, una temperatura de 15° C y una densidad del vapor de agua de 7,5 g/m³. Puede verse que los niveles de dfp producidos en la superficie de la Tierra son más de 50 dB inferiores al límite de dfp potencial definido para la banda más cercana, alrededor de 40 GHz.

En ningún caso un satélite LEOSAT 1 único se acercará a ningún límite de dfp potencial. No obstante, es de prever que muchos satélites transmitan al mismo tiempo. De ahí que sea de interés analizar el efecto acumulativo de todo el sistema SES. El límite superior de dicho efecto acumulativo puede deducirse tomando en cuenta la superficie abarcada por un satélite y efectuando una extrapolación para el número total de satélites del sistema. Un satélite de órbita baja que evolucione a una altura de 700 km abarcará aproximadamente el 5% de la superficie de la Tierra si se consideran los ángulos de incidencia en sucesión descendente hasta 0°. En consecuencia, 840 satélites activos, situados a intervalos regulares alrededor de la Tierra, con cuatro enlaces en cada frecuencia de transmisión, producen un efecto acumulativo de elevación del nivel medio de dfp en aproximadamente 22 dB. Esta hipótesis no tiene en cuenta los diversos planos de polarización. Por otra parte, la suposición de que los niveles de dfp disminuirán constantemente hasta un ángulo de incidencia de 0° es demasiado pesimista, ya que los niveles de dfp caen bruscamente por debajo de unos 10°.

FIGURA 5
Contorno de dfp y límite de dfp



Hasta ahora sólo se han considerado las interferencias provenientes del SES que afectan a otros servicios. Puede haber también casos de interferencia producida al SES por otros servicios que comparten la misma banda. Cabe la siguiente breve evaluación:

Servicios móvil y de radionavegación:

Por lo general, las transmisiones tendrán lugar siguiendo la superficie de la Tierra. Las atenuaciones del aire seco y el vapor de agua (véase la Fig. 4), así como la discriminación de la antena, atenuarán las señales en tal medida que seguramente no darán lugar a ningún nivel de interferencia perjudicial.

SMS y servicio de radionavegación por satélite:

Son posibles las interferencias para sistemas de altura orbital similar al de un sistema SES. No obstante, incluso en tal caso, puede compartirse la banda si las transmisiones se efectúan con polarizaciones inversas. Ello es así porque el estrecho haz de las antenas empleadas permite una mayor discriminación por polarización.

5 Conclusiones

La compartición entre cualquier servicio terrenal y el SES en la banda de frecuencias 66-71 GHz es sin duda viable, debido al haz estrecho de las antenas y los efectos atmosféricos. La misma conclusión se aplica a los sistemas basados en satélites que funcionan en la dirección espacio-Tierra. Se espera que las dfp producidas por un solo satélite SES sean entre 50 y 80 dB inferiores a los límites de dfp actualmente definidos para la región de 40 GHz. Incluso el efecto acumulativo de un gran número de satélites sólo elevará los niveles combinados de dfp entre 10 y 20 dB aproximadamente, lo cual sigue estando muy por debajo de los límites de dfp razonables.