

RECOMENDACIÓN UIT-R S.1782

**Opciones de acceso mundial a Internet en banda ancha
con sistemas del SFS**

(Cuestión UIT-R 269/4)

(2007)

Cometido

Con el fin de abordar las cuestiones planteadas en la Asamblea de Radiocomunicaciones y en la CMR-03, se ha realizado un estudio preliminar sobre las opciones de acceso a Internet por satélite a muy alta velocidad. En el Anexo 1 se trata de determinar las bandas adecuadas del SFS y se seleccionan pares de anchura de banda de 500 MHz en las atribuciones 11/14 GHz, 20/30 GHz y 40/50 GHz del SFS. Suponiendo enlaces directos entre el satélite y los terminales de usuarios con antenas de 30 cm, se obtienen las características de los enlaces ascendente y descendente para cada caso y la capacidad por satélite. Se calcula la capacidad total de un sistema de este tipo para dar servicio a una zona de referencia de 10 000 000 km². En el Anexo 2 se determinan las características de los enlaces ascendente y descendente en las bandas 20/30 GHz y 11/14 GHz de un sistema que ofrece enlaces directos entre el satélite y los terminales de usuario con antenas de 1,2 m y nuevamente se calcula la capacidad por satélite y la capacidad total. En el Anexo 3 se calculan las características de un sistema de ejemplo en el que los usuarios acceden mediante enlaces de radiocomunicaciones terrenales a estaciones terrenas «comunitarias» y desde éstas, a través de un satélite de 20/30 GHz u 11/14 GHz, hasta una misma estación terrena central; se calculan de nuevo la capacidad por satélite y la total.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que la tecnología de telecomunicaciones por satélite tiene la propiedad de acelerar la disponibilidad de servicios Internet a alta velocidad en los países en desarrollo, en particular en los países menos adelantados, países sin litoral y países insulares, así como en los países con economía en transición;
- b) que conviene determinar las características técnicas y operativas de sistemas del SFS que pudieran facilitar la producción a gran escala de terminales de usuario sencillos con un precio asequible;
- c) que sería conveniente calcular la capacidad global que podría ofrecerse en las atribuciones de frecuencia del SFS mediante sistemas con las características indicadas en el *considerando* b);
- d) que al determinar las características mencionadas en el *considerando* b) se debe considerar la posibilidad de diseñar sistemas específicos para el acceso a Internet a velocidad muy alta mediante terminales de usuario pequeños y tener en cuenta el hecho de que algunos sistemas existentes disponen de servicio de acceso a Internet en banda ancha;
- e) que se utilizan estaciones terrenas de distintos tamaños para el acceso a Internet en banda ancha a través de los sistemas existentes del SFS, los cuales se utilizan también para otras aplicaciones y en diversas bandas de frecuencia;
- f) que la normalización de la tecnología de satélites mencionadas en el *considerando* a) para aplicaciones Internet fomentará la utilización de satélites para acceder a Internet,

observando

a) que en la Recomendación UIT-R S.1783 se describen las características de los sistemas de alta densidad del servicio fijo por satélite;

b) que en la Recomendación UIT-R S.1709 se describen las características técnicas de las interfaces radioeléctricas de los sistemas mundiales de comunicaciones por satélite en banda ancha,

reconociendo

a) que las atribuciones de frecuencia del SFS pueden utilizarse a corto, medio y largo plazo para la prestación de servicios Internet a velocidad elevada,

recomienda

1 que para ofrecer acceso mundial a Internet a velocidades muy elevadas mediante el SFS se tomen en consideración los tres ejemplos que figuran en los Anexos 1, 2 y 3.

Anexo 1

Opciones de acceso mundial¹ a Internet en banda ancha² con sistemas del SFS diseñados para antenas de estación terrena muy pequeñas

1 Consideraciones generales sobre las bandas de frecuencia

1.1 Bandas más adecuadas

El término «a corto plazo» se aplica a las bandas para las que ya existe una tecnología de satélite. Actualmente, esta tecnología existe para todas las atribuciones en las bandas 4/6 GHz y 11/14 GHz del SFS, y una parte de las atribuciones en 20/30 GHz del SFS. Es de suponer que «a medio plazo», es decir en los próximos diez años, se habrá desarrollado completamente la tecnología de satélites en las bandas 20/30 GHz, y aunque se habrán registrado algunos adelantos en las bandas 40/50 GHz, la experiencia demuestra que el desarrollo total en esta banda se alcanzará «a largo plazo». Si bien en el Artículo 5 del Reglamento de Radiocomunicaciones (RR) existen atribuciones al SFS por encima de 50 GHz, probablemente no se producirán adelantos significativos hasta dentro de un plazo muy largo, por lo que no se han tenido en cuenta en el presente documento.

De acuerdo con los resultados de los estudios preliminares es imposible utilizar las bandas 4/6 GHz para esta aplicación, porque si se desea que el coste de los terminales sea reducido es necesario utilizar antenas muy pequeñas, las cuales no pueden tener una ganancia suficiente a las frecuencias

¹ En el presente estudio por «mundial» se entiende cualquier lugar que tenga cobertura desde un satélite geoestacionario.

² En el presente estudio, se toma como ejemplo de «banda ancha» una velocidad de usuario de 2 Mbit/s.

a las que funcionan los satélites de gran anchura de haz empleados normalmente en esta aplicación. Por otra parte, las bandas 4/6 GHz se utilizan intensamente por lo que, aun cuando se emplearan satélites de haz puntual en la banda C, resultaría difícil la compartición de frecuencias entre las estaciones terrenas de antena parabólica pequeña, caracterizadas por una anchura del haz grande, y los servicios existentes. Por estas razones, las bandas 4/6 GHz no se toman en consideración en este Anexo.

Los estudios preliminares también muestran que las consideraciones mencionadas en el párrafo anterior son igualmente aplicables en mayor o menor grado a las bandas 11/14 GHz. La restricción resultante del tamaño de la antena de la estación terrena es menos grave en estas bandas que en 4/6 GHz, dado que la ganancia es mayor y el funcionamiento con haces puntuales (medios) es más común. Sin embargo, al igual que en las bandas 4/6 GHz, las frecuencias no planificadas en las bandas 11/14 GHz se utilizan intensamente desde hace muchos años, por lo que la compartición de frecuencias resultaría problemática.

Las atribuciones de 20/30 GHz del SFS se consideran decididamente las más adecuadas a corto plazo para el acceso a Internet en banda ancha, ya que la longitud de onda es compatible con antenas muy pequeñas, la tecnología está bastante desarrollada y, por el momento, estas bandas están relativamente poco explotadas. Es más, el acceso a Internet por particulares es incompatible con la manera en que hasta ahora se ha reglamentado la gran mayoría de las aplicaciones internacionales en las bandas del SFS, a saber, mediante la coordinación con cada una de las estaciones terrenas. Para lograr que los terminales de usuario se comercialicen al por menor en grandes cantidades y se instalen en hogares y oficinas, es necesario un régimen reglamentario similar al que se está creando para las aplicaciones de alta densidad del SFS. Por razones prácticas se reproduce a continuación el número 5.516B del RR, a la que hizo referencia la CMR-03 cuando solicitó que se realizaran estudios sobre posibles sistemas mundiales del SFS en banda ancha para aplicaciones Internet:

«Se han identificado las siguientes bandas para su utilización por las aplicaciones de alta densidad del servicio fijo por satélite:

17,3-17,7 GHz	(espacio-Tierra) en la Región 1
18,3-19,3 GHz	(espacio-Tierra) en la Región 2
19,7-20,2 GHz	(espacio-Tierra) en todas las Regiones
39,5-40 GHz	(espacio-Tierra) en la Región 1
40-40,5 GHz	(espacio-Tierra) en todas las Regiones
40,5-42 GHz	(espacio-Tierra) en la Región 2
47,5-47,9 GHz	(espacio-Tierra) en la Región 1
48,2-48,54 GHz	(espacio-Tierra) en la Región 1
49,44-50,2 GHz	(espacio-Tierra) en la Región 1
y	
27,5-27,82 GHz	(Tierra-espacio) en la Región 1
28,35-28,45 GHz	(Tierra-espacio) en la Región 2
28,45-28,94 GHz	(Tierra-espacio) en todas las Regiones
28,94-29,1 GHz	(Tierra-espacio) en las Regiones 2 y 3
29,25-29,46 GHz	(Tierra-espacio) en la Región 2
29,46-30 GHz	(Tierra-espacio) en todas las Regiones
48,2-50,2 GHz	(Tierra-espacio) en la Región 2»

Cabe destacar que estas designaciones se añaden a las siguientes anchuras de bandas combinadas:

<i>Bandas 20/30 GHz</i>	<u>Mundial</u>	más	<u>Región 1</u>	<u>Región 2</u>	<u>Región 3</u>
Descendente	500 MHz		400 MHz	1 000 MHz	–
Ascendente	1 030 MHz		320 MHz	470 MHz	160 MHz
<i>Bandas 40/50 GHz</i>					
Descendente	500 MHz		2 000 MHz	1 500 MHz	–
Ascendente	–		–	2 000 MHz	–

Así pues, suponiendo que las frecuencias en las bandas designadas para su utilización mundial puedan reutilizarse simultáneamente en dos o tres Regiones, el espectro total designado para las aplicaciones de alta densidad del SFS por Región en estas bandas es el siguiente:

Región 1 – 3 400 MHz enlace descendente, 1 350 MHz enlace ascendente;

Región 2 – 3 500 MHz enlace descendente, 3 500 MHz enlace ascendente;

Región 3 – 1 000 MHz enlace descendente, 1 190 MHz enlace ascendente.

De acuerdo con estas cifras totales, se necesita mayor anchura de banda en el enlace descendente que en el ascendente para cumplir las necesidades de las aplicaciones de alta densidad del SFS en la Región 1, mientras que en las otras dos Regiones las necesidades son del mismo orden en los dos sentidos de la transmisión.

En lo que respecta a las bandas 20/30 GHz y 40/50 GHz, las consideraciones en esta Recomendación se refieren a las bandas indicadas en el número 5.516B del RR para las tres Regiones; a saber, 19,7-20,2 GHz, 28,45-28,94 GHz, 29,46-30,0 GHz y 40,0-40,5 GHz (véase el Cuadro 1).

Aunque al solicitar al UIT-R que estudiara este asunto la CMR-03 y la Asamblea de Radiocomunicaciones previeron la utilización de las bandas del SFS, los resultados de los análisis que figuran en el presente Anexo para las bandas 11/14 GHz del SFS serían similares para el caso de las bandas adyacentes del SRS (es decir, 11,7-12,5 GHz en las Regiones 1 y 3, y 12,2-12,7 GHz en la Región 2).

1.2 Uso actual de las bandas en el SFS

Para evaluar en qué medida pueden satisfacerse las necesidades de acceso a Internet en banda ancha mediante los futuros satélites en las bandas mencionadas en § 2.1, es preciso determinar el grado de utilización actual de los recursos orbitales/de espectro en esas bandas por los satélites existentes y la utilización prevista a corto plazo por los sistemas que se encuentran actualmente en fase de desarrollo para otras aplicaciones en el SFS. La diferencia entre la utilización actual y la prevista de cada banda se ha obtenido de la base de datos de sistemas y redes espaciales (SNS) de la Oficina de Radiocomunicaciones. En el Cuadro 1 se compara el número de aplicaciones en el espectro para redes del SFS/OSG hasta enero de 2005 en una anchura de banda de 500 MHz de cada una de las atribuciones al SFS en las bandas 11/14 GHz, 20/30 GHz y 40/50 GHz. Cada una de estas bandas de 500 MHz (salvo la última) está atribuida al SFS en las tres Regiones:

Sabiendo que hay muchas más cargas útiles de satélite funcionando actualmente en 11/14 GHz que en las bandas de frecuencias más altas, de la información que figura en el Cuadro 1 se desprende lo siguiente:

- Las principales atribuciones mundiales del SFS a 11/14 GHz se utilizan mucho más intensamente que aquellas partes de las atribuciones a 20/30 GHz destinadas para aplicaciones de alta densidad del SFS mundial en el futuro.

- En el SFS todavía no se utilizan las frecuencias 40/50 GHz destinadas para aplicaciones de alta densidad del SFS en el futuro.

CUADRO 1

Comparación de aplicaciones de asignaciones de espectro

Atribución al SFS	Anchura de banda	Sentido de la transmisión	Uso principal	Número de notificaciones
10,95-11,2 GHz } 11,45-11,7 GHz }	500 MHz	Espacio-Tierra	Aplicaciones generales de comercio del SFS	12 417
14,0-14,5 GHz	500 MHz	Tierra-espacio		16 467
19,7-20,2 GHz	500 MHz	Espacio-Tierra	Previstas para aplicaciones de alta densidad del SFS	5 245
29,5-30,0 GHz	500 MHz	Tierra-espacio		4 830
40,0-40,5 GHz	500 MHz	Espacio-Tierra	Previstas para aplicaciones de alta densidad del SFS	1 205
(48,2-48,7 GHz ⁽¹⁾)	500 MHz	Tierra-espacio		(797)

⁽¹⁾ Esta es una parte de la banda identificada por la CMR-03 para los enlaces ascendentes del HDFSS en la Región 2. Aunque no existe analogía con respecto a las Regiones 1 y 3, se incluye para que el Cuadro abarque los enlaces ascendentes complementarios de los descendentes a 40 GHz.

2 Posibles características técnicas

2.1 Haces de satélite

Según los estudios realizados, los sistemas más idóneos para ofrecer servicios de acceso a Internet por satélite a velocidades elevadas mediante terminales de usuario a precios asequibles serían los diseñados para terminales de apertura ultrapequeña (USAT) en el lado del usuario del enlace. En el presente estudio se ha tomado como ejemplo un diámetro de 30 cm. Con la ganancia relativamente pequeña de estos terminales, especialmente a las bajas frecuencias que se considera, se obtendría una capacidad por satélite moderada y, por ello, el coste del sector espacial por bit de información sería muy alto, a no ser que cada satélite se diseñara para reutilizar frecuencias mediante múltiples haces puntuales.

En los Cuadros 3, 4 y 5 se resumen los parámetros de interés para este estudio, obtenidos de los Anexos a la Recomendación UIT-R S.1328, y se indican las dimensiones de los haces puntuales probablemente disponibles ahora y en el futuro próximo. En el caso de las bandas 11/14 GHz, los datos indicados en el Cuadro 3 se han multiplicado por las cifras de ganancia de la antena receptora del satélite obtenidas de las respuestas al cuestionario de la Oficina de Radiocomunicaciones en 1998. Puede suponerse que los satélites que se diseñen en el futuro inmediato para proporcionar acceso a Internet en banda ancha incorporarán múltiples haces puntuales que apuntan a un objetivo estrecho (es decir, tendrán una ganancia elevada) con las características indicadas en los Cuadros 3, 4 y 5. En consecuencia, para determinar las características de los enlaces de usuarios de los sistemas de satélites adecuados se han seleccionado los parámetros indicados en el Cuadro 2. A los efectos de facilitar los cálculos, se parte del supuesto de que los subsistemas de la antena del satélite se diseñaran de modo que cada par de haces transmisor y receptor tengan la misma anchura del haz y su huella esté en la misma posición fija sobre la superficie de la Tierra.

Cabe observar que el requisito de precisión de puntería aumenta cuando la anchura del haz disminuye y, por tanto, aumenta la dificultad y coste de controlar las huellas del haz.

CUADRO 2

Características seleccionadas del haz puntual del satélite

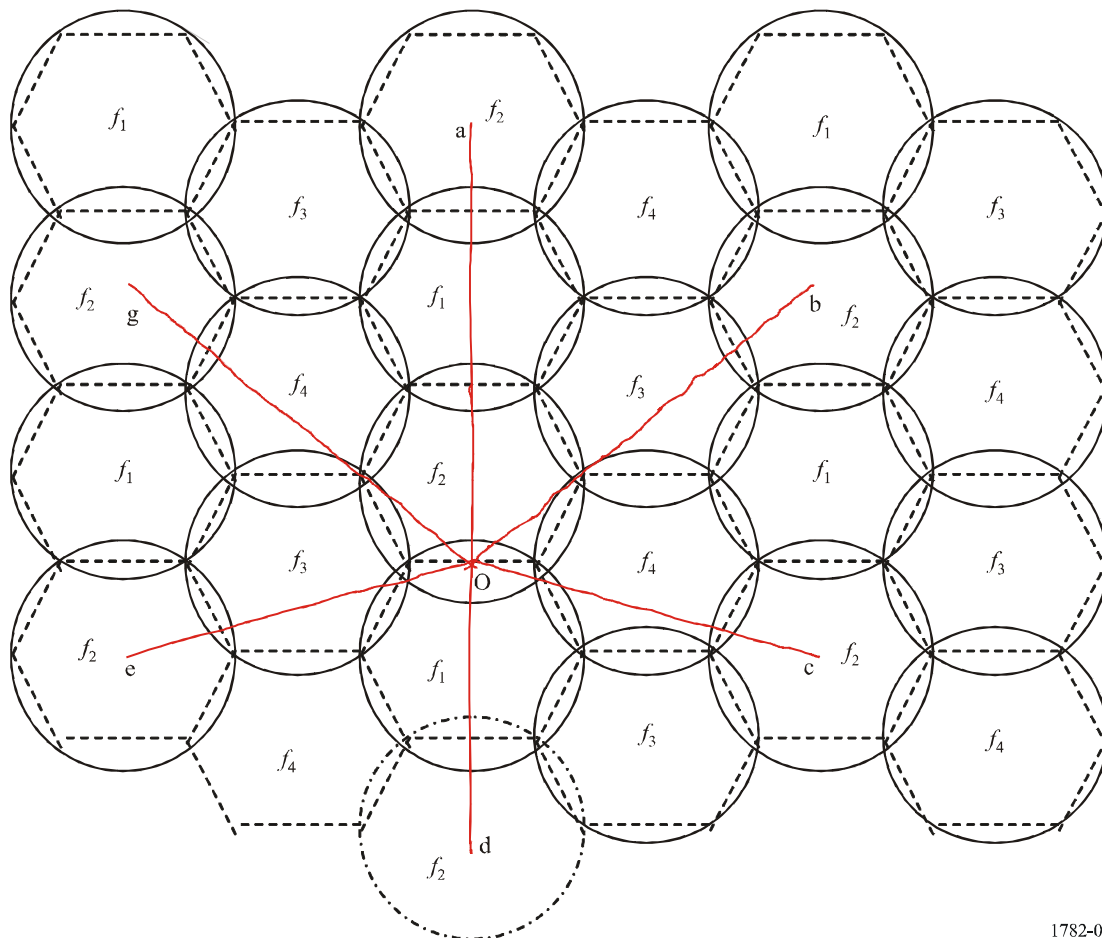
Gama de frecuencias del SFS	11/14 GHz	20/30 GHz	40/50 GHz
Ganancia en el centro del haz (dBi)	42	50	55
Anchura de haz a -3 dB (grados)	1,4	0,6	0,3
Número (n) de haces de transmisión/recepción doble polar por satélite	12	32	64

Habida cuenta de los adelantos registrados en los vehículos espaciales estos últimos años, es razonable suponer la existencia de una configuración de alimentación de la antena que compense la curvatura de la superficie de la Tierra con el fin de que todos los haces generados por un determinado satélite tengan huellas circulares de idéntico diámetro, con independencia de la dirección de puntería. Así pues, salvo los que apunten al punto subsatelital, cada haz tendrá una sección transversal aproximadamente elíptica y su relación axial y orientación dependerá de la dirección de puntería con respecto a la dirección del punto subsatelital. La anchura de haz de los ejes mayor (φ_a) y menor (φ_b) será tal que se cumpla $((\varphi_a) \cdot (\varphi_b))^{0,5} = (\varphi_0)$, siendo (φ_0) la anchura a -3 dB del haz (circular) que apunta al punto subsatelital.

En el caso de cobertura continua mediante múltiples haces de huellas circulares, se supondrá que los solapamientos forman una figura hexagonal, como se muestra en la Fig. 1.

FIGURA 1

Figura hexagonal que forman las huellas de haces de satélite solapados



En la Fig. 1 se muestra un modelo de reutilización de frecuencias de cuatro a uno y cada haz se supone con doble polarización. Suponiendo tasas factibles de caída en los diagramas de antena y que los niveles del primer lóbulo lateral son los que se describen en las ecuaciones de la Recomendación UIT-R S.672, la discriminación entre el centro de un haz y el extremo más próximo del siguiente haz en la misma frecuencia debe ser un poco mayor que la suficiente para permitir este modo de funcionamiento. Por ejemplo, en un punto «o» del extremo de una de las zonas hexagonales en la que se emplea el haz de frecuencia f_2 , las contribuciones a la interferencia de los seis haces en la misma frecuencia puede calcularse a partir de los ángulos con respecto al eje oa, ob, oc, od, oe y og subtendidos en el satélite. Según la geometría del diagrama:

$$\begin{aligned} oa &= 5(\varphi_0/2) \cdot \cos(30^\circ) = 2,165(\varphi_0) \\ ob = og &= (\{2(\varphi_0/4) + \varphi_0\}^2 + \{3(\varphi_0/2) \cdot \cos(30^\circ)\}^2)^{0,5} = 1,984(\varphi_0) \\ oc = oe &= (\{(\varphi_0/2) \cdot \cos(30^\circ)\}^2 + \{2(\varphi_0/4) + \varphi_0\}^2)^{0,5} = 1,561(\varphi_0) \text{ y} \\ od &= 3(\varphi_0/2) \cdot \cos(30^\circ) = 1,299(\varphi_0) \end{aligned}$$

CUADRO 3

Dimensiones de los haces puntuales de satélites OSG/SFS diseñados para funcionar en las bandas 11/14 GHz

a) Información obtenida de la Recomendación UIT-R S.1328

Cuadro en los Anexos a la Recomendación UIT-R S.1328	Cuadro 2		Cuadro 17	Cuadro 29
	OSG-C	OSG-D	OSG-VX	Pan-Af
Sistema de satélites				
Ganancia de cresta de la antena transmisora del satélite (dBi)	30	30	33,5	32-38
Anchura a -3 dB del haz de transmisión del satélite (grados)	(5,6)	(5,6)	(3,7)	(4,5-2,2)
Ganancia de cresta de la antena receptora del satélite (dBi)			33,5	
Anchura a -3 dB del haz de recepción del satélite (grados)			(3,7)	
Polarización	Circular	Doble C	Doble C	Lineal
Número de haces de servicio por satélite				10

b) Información obtenida de las respuestas al cuestionario de la Oficina de Radiocomunicaciones

90 de los enlaces 11/14 GHz para los que se comunicaron datos tenían una ganancia de cresta de la antena receptora del satélite mayor que 30 dBi. Así pues, las correspondientes anchuras de haz a media potencia son inferiores a 6°, por lo que los haces pueden considerarse puntuales.

Estos valores de la ganancia varían entre 30,1 y 45,6 dBi, siendo su valor medio 36,5 dBi, que corresponden a anchuras de haz de 5,5° (máxima), 0,93° (mínima) y 2,7° (media), respectivamente.

CUADRO 4

**Dimensiones de los haces de satélites del SFS/OSG diseñados para funcionar en las bandas 20/30 GHz;
información obtenida de la Recomendación UIT-R S.1328**

Cuadro en los Anexos a la Recomendación UIT-R S.1328 Sistema de satélites	Cuadro 1		Cuadro 2		Cuadro 3			Cuadro 5		Cuadro 6	Cuadro 12		Cuadro 13
	OSG13	OSG20	OSG30	OSGF	OSG11	OSG12	OSG13	Sistema P		Sist. Q	OSG Ka-J		EKX
Ganancia de cresta de la antena transmisora del satélite (dBi)	46,5	43,5	55	49	49,5	33	46,5	53,2	46,2	49	41	47	48,4
Anchura a -3 dB del haz de transmisión del satélite (grados)	(0,84)	(1,18)	(0,32)	(0,63)	0,44	(3,97)	1,4	0,3	0,6	0,55	(1,58)	(0,79)	(0,67)
Ganancia de cresta de la antena receptora del satélite (dBi)	46,5	43,5	55	49	~50 ⁽¹⁾		~47 ⁽¹⁾	57,2	47,7	49			48,4
Anchura a -3 dB del haz de recepción del satélite (grados)	(0,84)	(1,18)	(0,32)	(0,63)	(~0,56)		0,9	0,3	0,6	0,55			(0,67)
Polarización	Circ.	Doble C	Doble C		Doble L	Circ.	Doble C			Doble C	Circ.	Circ.	Doble
Número de haces de servicio por satélite					7 + 7	1	24 + 24						

⁽¹⁾ Obtenida a partir de la relación G/T .

CUADRO 5

**Dimensiones de los haces de satélites del SFS/OSG diseñados para funcionar en las bandas 40/50 GHz;
información obtenida de la Recomendación UIT-R S.1328**

Cuadro en los Anexos a la Recomendación UIT-R S.1328	Cuadro 17	Cuadro 18	Cuadro 19	Cuadro 21	Cuadro 22	Cuadro 27	Cuadro 28
Sistema de satélites	OSG-VX	OSG-SV	OSG-LV	OSG-VI	GEOSAT-X	OSGV-B1	OSGV-B2
Ganancia de cresta de la antena transmisora del satélite (dBi)	49,0	58,0	52,0	53,0	56,5	51,5	53,1
Anchura a -3 dB del haz de transmisión del satélite (grados)	(0,63)	0,15	0,15	(0,4)	(0,27)	0,3	(0,39)
Ganancia de cresta de la antena receptora del satélite (dBi)	49,0	58,0	52,0	53,0			53,1
Anchura a -3 dB del haz de recepción del satélite (grados)	(0,63)	(0,22)	0,15	(0,4)			(0,39)
Polarización	Doble Circ.	Doble Circ.	Doble Circ.	Doble Circ.	Doble Circ.	Lineal	
Número de haces de servicio por satélite		40		24	48	24	80

Notas a los Cuadros 3, 4 y 5:

Las cifras que no figuran entre paréntesis en estos Cuadros se tomaron directamente de la Recomendación UIT-R S.1328. Las anchuras de haz que figuran entre paréntesis se obtuvieron a partir de la cifras de la ganancia de cresta del modo siguiente:

Para una antena parabólica $G_m = 10 \log((4\pi/\lambda^2)(\pi D^2/4)\eta)$

siendo:

G_m : ganancia de cresta (dBi)

D : diámetro (m)

λ : longitud de onda (m)

η : apertura eficaz, por ejemplo 0,65.

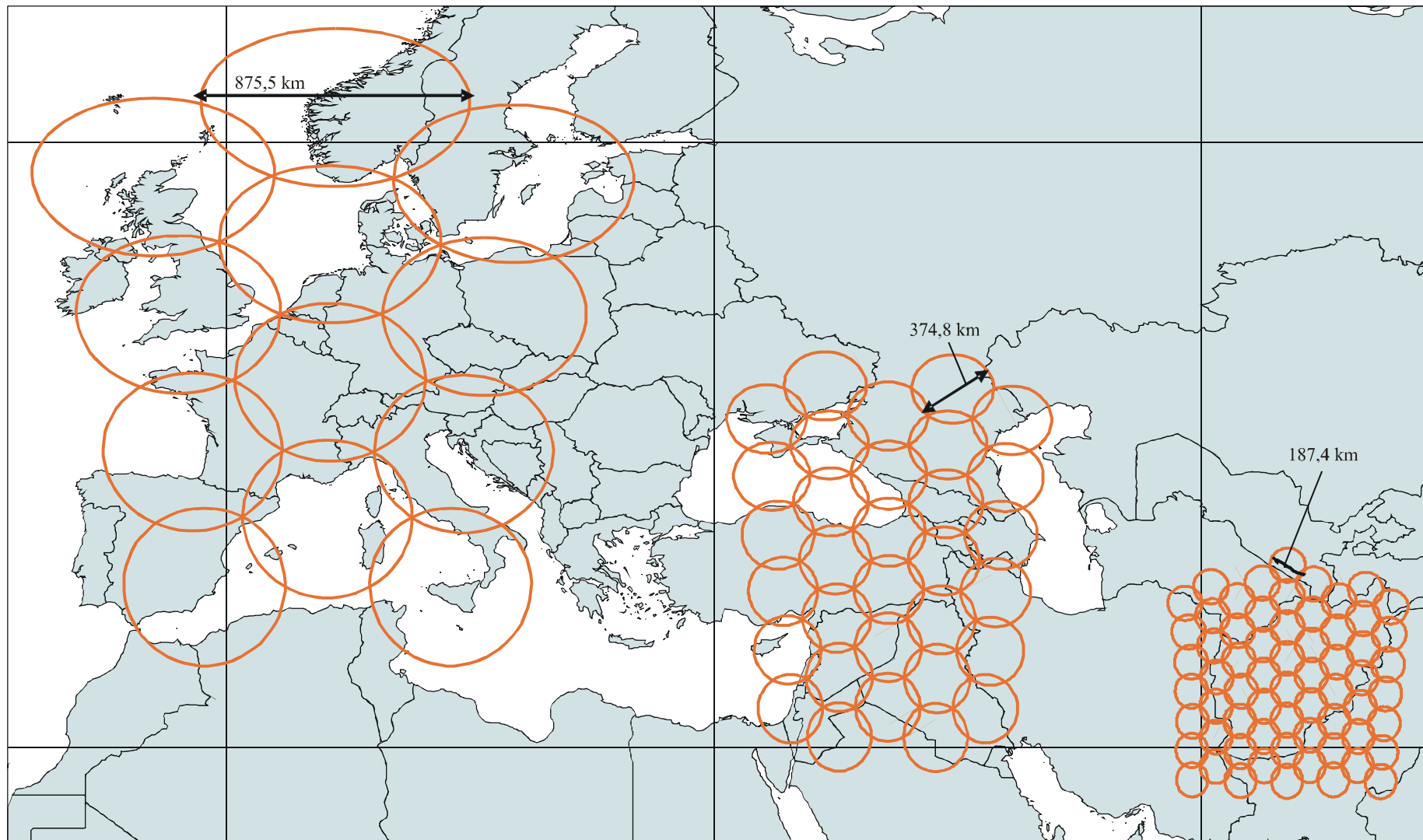
Por tanto $D/\lambda = (10^{0,05G_m})/(\pi\sqrt{(0,65)})$.

Por otra parte, la expresión empírica de la anchura de haz a potencia mitad es $\phi_{-3} = 70\lambda/D$ grados, por lo que sustituyendo en D/λ se obtiene: $\phi_{-3} = (177,3)10^{-0,05G_m}$ grados.

Las casillas en blanco en los cuadros indican que los respectivos datos no figuran en la Recomendación UIT-R S.1328 y que no pueden deducirse de manera fiable a partir de los datos disponibles.

FIGURA 2

Ejemplos de configuración de haces para satélites del SFS que podrían proporcionar acceso a Internet a alta velocidad



Huellas de 12 haces
en las bandas 11/14 GHz

Huellas de 32 haces
en las bandas 20/13 GHz

Huellas de 64 haces
en las bandas 40/50 GHz

De acuerdo con la Recomendación UIT-R S.672 en lo tocante a haces elípticos y circulares sencillos, si la ganancia del primer lóbulo lateral es 25 dB inferior a la ganancia de cresta, y suponiendo que en cada centro del haz la p.i.r.e. sea la misma y que la relación entre las p.i.r.e. copolar y contrapolar de cada haz sea también 25 dB, la relación portadora-interferencia en la reutilización de frecuencia viene dada por la siguiente expresión:

$$(C/I)_{FR} = -10 \log(7 \{10^{-(25/10)}\}) = 16,5 \text{ dB}$$

En la práctica, la relación $(C/I)_{FR}$ será probablemente mayor que ésta, debido a que es poco probable que las seis contribuciones correspondan a valores de cresta del lóbulo lateral.

En la Fig. 2 se ilustran los ejemplos de coberturas de satélites geoestacionarios cuya configuración de haces se resumen en el Cuadro 2. Cabe observar que la cobertura general disminuye abruptamente con la inversa de la frecuencia.

2.2 Ejemplos de parámetros de enlace

En el presente estudio se examina el caso en el que cada usuario accede directamente al satélite mediante terminales de antena ultrapequeña (USAT). En los Anexos 2 y 3 se describe otra opción que consiste en utilizar estaciones terrenas con antenas más grandes.

Al realizar cálculos para obtener los parámetros de los enlaces de usuario con un satélite, para los tres conjuntos de bandas de frecuencia mencionados anteriormente en § 1, se partió de los siguientes supuestos:

- Si bien las estaciones terrenas de usuario se basarán en los USAT, las estaciones terrenas con las que se comunicarán vía satélite y que constituirán la interfaz con Internet, tienen antenas más grandes y en adelante se denominarán «estaciones de base». Habrá muchas menos estaciones de base que terminales de usuario.
- Se utilizará la modulación MDP-4 con FEC de relación 3/4. El umbral de disponibilidad se define como una BER a la salida del demodulador menor que 1×10^{-6} , lo que corresponde a una $C/N = 8,5$ dB. Para tener en cuenta las degradaciones debidas al enlace de conexión y a la interferencia causada por la reutilización de frecuencias descrita en § 2.1 ($C/I = 16,5$ dB), los valores de la relación $(C/N)_\uparrow$ y la $(C/N)_\downarrow$ correspondientes al umbral no deben ser inferiores a 9,85 dB.

NOTA 1 – Es posible reducir la C/N necesaria si se utiliza una FEC con relación 1/2 y se añade una codificación, por ejemplo Reed Solomon, lo que a su vez reduciría también la p.i.r.e. necesaria de los enlaces ascendente y descendente, así como la potencia primaria del satélite. La codificación turbo también permitiría alcanzar un resultado similar. Los resultados basados en los valores umbral $(C/N)_\uparrow$ y $(C/N)_\downarrow$ de 7,0 dB, suponiendo una codificación más intensa como las indicadas, se añaden a los resultados que figuran a continuación.

- Los sistemas funcionarán con terminales de usuario de antenas de 30 cm de diámetro, lo que permite minimizar los precios de los terminales y que éstos sean portátiles. La ganancia de transmisión de la antena será 30,2 dBi a 12,75 GHz, 31,0 dBi a 14 GHz, 37,2 dBi a 28,45 GHz y 41,7 dBi a 48,2 GHz. La ganancia de recepción de la antena será 28,7 dBi a 10,7 GHz, 28,9 dBi a 10,95 GHz, 34,0 dBi a 19,7 GHz y 40,1 dBi a 40 GHz.
- El mínimo ángulo de elevación operativo será 10° a 11/14 GHz, 17° a 20/30 GHz y 25° a 40/50 GHz.
- Los niveles p.i.r.e. se han ajustado de modo que incluyan los siguientes márgenes para poder compensar las degradaciones resultantes de la atenuación debida a la lluvia durante al menos el 99% del tiempo en la mayoría de los climas:

Enlaces ascendentes: 4,5 dB a 14 GHz, 11 dB a 30 GHz y 21 dB a 50 GHz;

Enlaces descendentes: 3,5 dB a 11 GHz, 7 dB a 20 GHz y 20 dB a 40 GHz.

Es probable que en las bandas de 30 y 50 GHz se emplee un control de potencia en el enlace ascendente, salvo quizá en climas muy secos, con el fin de minimizar el riesgo de causar interferencia. Ahora bien, seguirá siendo necesario que las etapas de salida de los terminales de usuario sean capaces de generar la p.i.r.e. calculada incluido el margen, aun cuando la mayor parte del tiempo el nivel será considerablemente inferior. El control de potencia en el enlace ascendente permite ahorrar batería en terminales portátiles, pero la p.i.r.e. en cielo despejado debe mantenerse a unos 2,5 dB por encima del umbral de disponibilidad para garantizar una BER normal de 1×10^{-9} como mínimo.

- Los valores mínimos de la ganancia del haz de satélite utilizada en los cálculos son 3 dB inferiores a los valores indicados en la segunda fila del Cuadro 2, es decir, valores en el extremo del haz.
- La temperatura de ruido en el enlace ascendente, incluido un margen para la interferencia externa, es del orden de 800 K en la banda de 14 GHz , 1 000 K en la banda de 30 GHz y 1 200 K en la banda de 50 GHz.
- La temperatura de ruido en el enlace descendente, con un margen para la interferencia externa, es del orden de 200 K en la banda de 11 GHz , 300 K en la banda de 20 GHz y 500 K en la banda de 40 GHz.
- Por «banda ancha» y «alta velocidad» se entiende, en el contexto de acceso a Internet, una velocidad binaria para el usuario de 2 Mbit/s en los dos sentidos de la transmisión, es decir, desde el satélite y hacia el mismo. En el caso de la modulación MDP-4 con FEC de relación 3/4 y con un margen de filtrado de atenuación del coseno del 50%, la anchura de banda correspondiente es de 1,6 MHz por portadora.

Aplicando estas hipótesis a las ecuaciones del balance del enlace se obtienen los siguientes niveles de potencia de portadora que debe aplicarse a la antena del terminal de usuario en condiciones de cielo despejado (las cifras entre llaves, {}, corresponde al caso hipotético mencionado en el que se emplea una codificación de errores adicional, en cuyo caso la anchura de banda por portadora será de unos 3 MHz).

Banda de 14 GHz:	14,3 dBW (27 W) ó 12,3 dBW (17 W) si se utiliza el control de potencia en el enlace ascendente;
	{11,5 dBW (14 W)} {9,5 dBW (8,8 W)}
Banda de 30 GHz:	13,6 dBW (23 W) ó 5,1 dBW (3,2 W) si se utiliza el control de potencia en el enlace ascendente;
	{10,8 dBW (12 W)} {2,3 dBW (1,7 W)}
Banda de 50 GHz:	19,2 dBW (83 W) o 0,7 dBW (1,2 W) si se utiliza el control de potencia en el enlace ascendente;
	{16,4 dBW (43 W)} {-2,2 dBW (0,6 W)}

obteniéndose los siguientes niveles de potencia de portadora que deberá recibir la antena de transmisión de satélite:

Banda de 11 GHz:	7,3 dBW (5,4 W); {4,5 dBW (2,8 W)}
Banda de 20 GHz:	4,4 dBW (2,8 W); {1,6 dBW (1,4 W)}
Banda de 40 GHz:	14,4 dBW (27,5 W); {11,6 dBW (14,3 W)}.

Se supone que no se emplea control de potencia en los enlaces descendentes, por lo que si los márgenes de la atenuación debida a la lluvia son considerablemente mayores que 2,5 dB, la BER en cielo despejado será mucho mejor que 1×10^{-9} en el sentido de la estación concentradora hacia el terminal de usuario en las tres bandas del enlace descendente.

Si bien las necesidades de equipos de usuario en aplicaciones de salud pública no son prerrogativa de la UIT, es importante que al planificar los sistemas se tomen en consideración los niveles de protección contra radiación establecidos a escala nacional e internacional y las directrices que garantizan el cumplimiento de los mismos, particularmente en el caso de una instalación masiva.

2.3 Capacidad por satélite (C_s)

NOTA 1 – Los resultados en este punto y los de § 3, se calcularon para portadoras MDP-4 con codificación de relación 3/4. Al final de este punto y del § 3 figuran los correspondientes resultados aproximados basados en la codificación intensa mencionada en § 2.2.

En muchos satélites de comunicaciones, la potencia de salida del transpondedor es de unos 40 W en el límite de saturación de una sola portadora, aunque existen satélites con transpondedores más potentes diseñados para aplicaciones específicas. Existen en órbita varios satélites que funcionan en la banda 14/11 GHz con transpondedores de 90 W a 120 W. En el modo multiportadora es necesario una reducción a la salida de unos 4 dB para que los efectos de la intermodulación sean lo suficientemente pequeños y no se produzca la degradación debida a la reutilización de frecuencias, con lo que la potencia de salida utilizable resultante es de unos 16 W. De acuerdo con los valores de potencia de salida del transmisor de satélite por portadora obtenidos en § 2.2, se podrían utilizar muy pocas portadoras (cada una de 1,6 MHz de anchura de banda) por transpondedor. El gran número de transpondedores necesario para utilizar exhaustivamente la banda de 500 MHz daría lugar a una carga útil no óptima y, por tanto, se supone en la presente aplicación que se emplean transpondedores de mayor potencia. Así pues, se supondrá que la potencia de salida de los transpondedores es de 100 W en el límite de saturación, es decir, 40 W con una reducción de salida de 4 dB, para los satélites en las bandas 11/14 GHz y 20/30 GHz. Debido al gran margen de desvanecimiento necesario en el enlace descendente, para los satélites que funcionan en la banda 40/50 GHz la potencia de los transpondedores será de 500 W en el límite de saturación, es decir, 200 W después de la reducción. Cabe destacar que, además de utilizar una p.i.r.e. elevada, es posible compensar el desvanecimiento de otros modos –por ejemplo, mediante la codificación adaptable– y puede que estudios ulteriores revelen que es preferible emplear transpondedores de menor potencia, a fin de limitar la potencia necesaria en el terminal de usuario y en el satélite. Esto podría considerarse prioritario para la banda 40/50 GHz, dado que si bien existen transmisores de satélite de 100 W a 11 GHz y 20 GHz, todavía no son realizables transmisores de 500 W a 40 GHz.

En el caso del satélite a 20/30 GHz, el número de portadoras de 2 Mbit/s que puede transmitir un transpondedor es igual a $40/2,8 = 14$. Suponiendo una banda de guarda entre portadoras del 10 por ciento, la anchura de banda del transpondedor necesaria es $1,6 \times 1,1 \times 14 = 24,6$ MHz, lo que está en consonancia con la separación de 25 MHz entre transpondedores adyacentes. Con estas cifras se pueden conectar cinco transpondedores a cada haz de satélite, lo que da lugar a una anchura de banda total de 125 MHz, es decir, 500 MHz para cuatro haces. Estos parámetros son compatibles con el diagrama de reutilización de frecuencias 4 a 1 de la Fig. 1. La capacidad total de este satélite se calcula mediante la siguiente expresión.

$$\text{Capacidad} = (2 \text{ Mbit/s por portadora}) \times (14 \text{ portadoras por transpondedor}) \times (2 \text{ polarizaciones}) \\ \times (5 \text{ transpondedores por polarización y por haz}) \times (32 \text{ haces}) = 8\,960 \text{ Mbit/s.}$$

La capacidad del satélite a 11/14 GHz calculada de este mismo modo resulta 3 024 Mbit/s, y para el satélite a 40/50 GHz se obtiene 16 128 Mbit/s. En las Figs. 3, 4 y 5 se ilustran las características del transpondedor y del haz obtenidas antes para un satélite en las tres bandas consideradas.

FIGURA 3

Configuración del transpondedor y de haces para un satélite del SFS a 11/14 GHz destinado a ofrecer acceso a Internet a alta velocidad

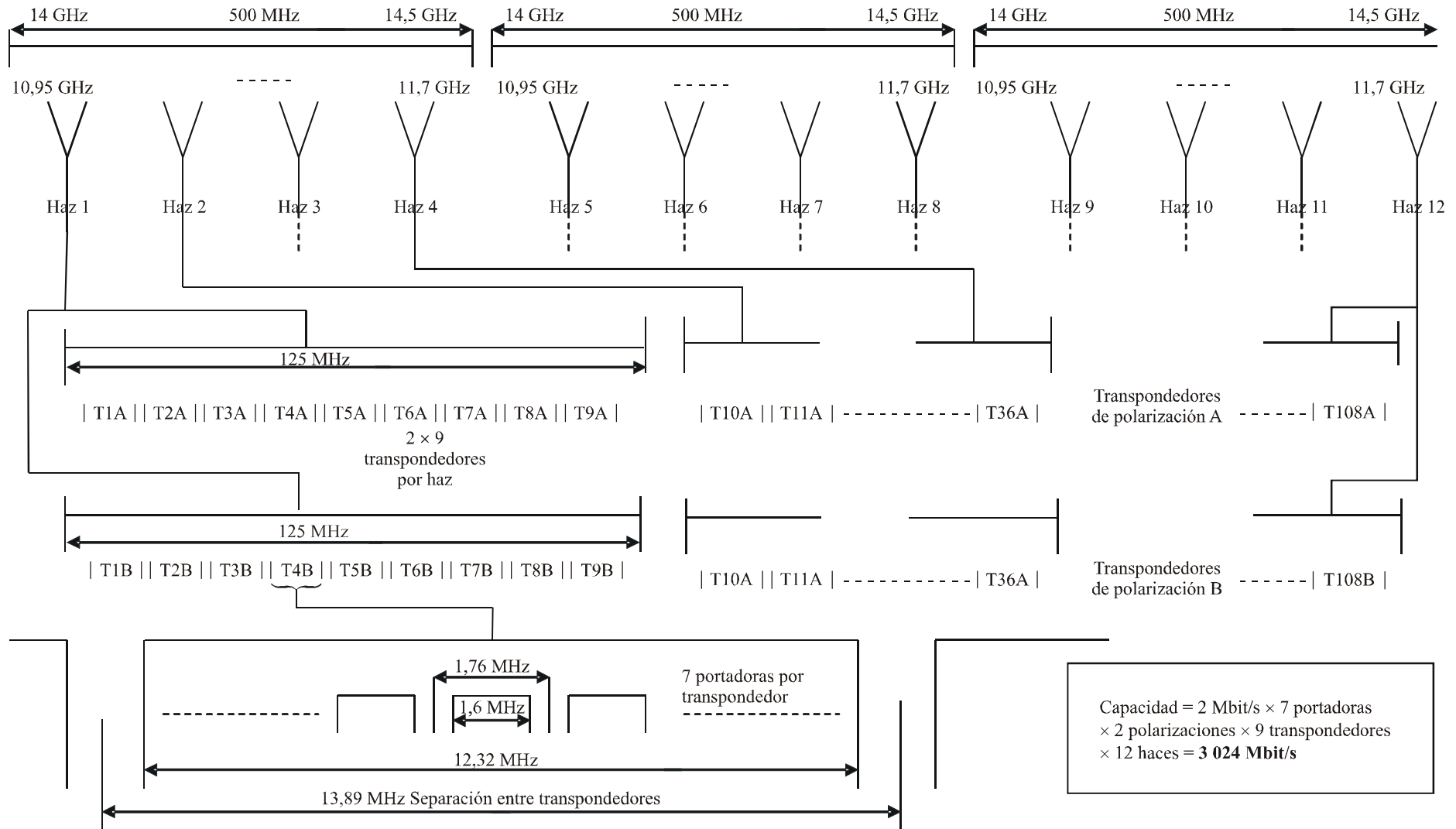


FIGURA 4

Configuración del transpondedor y de haces para un satélite del SFS a 20/30 GHz destinado a ofrecer acceso a Internet a alta velocidad

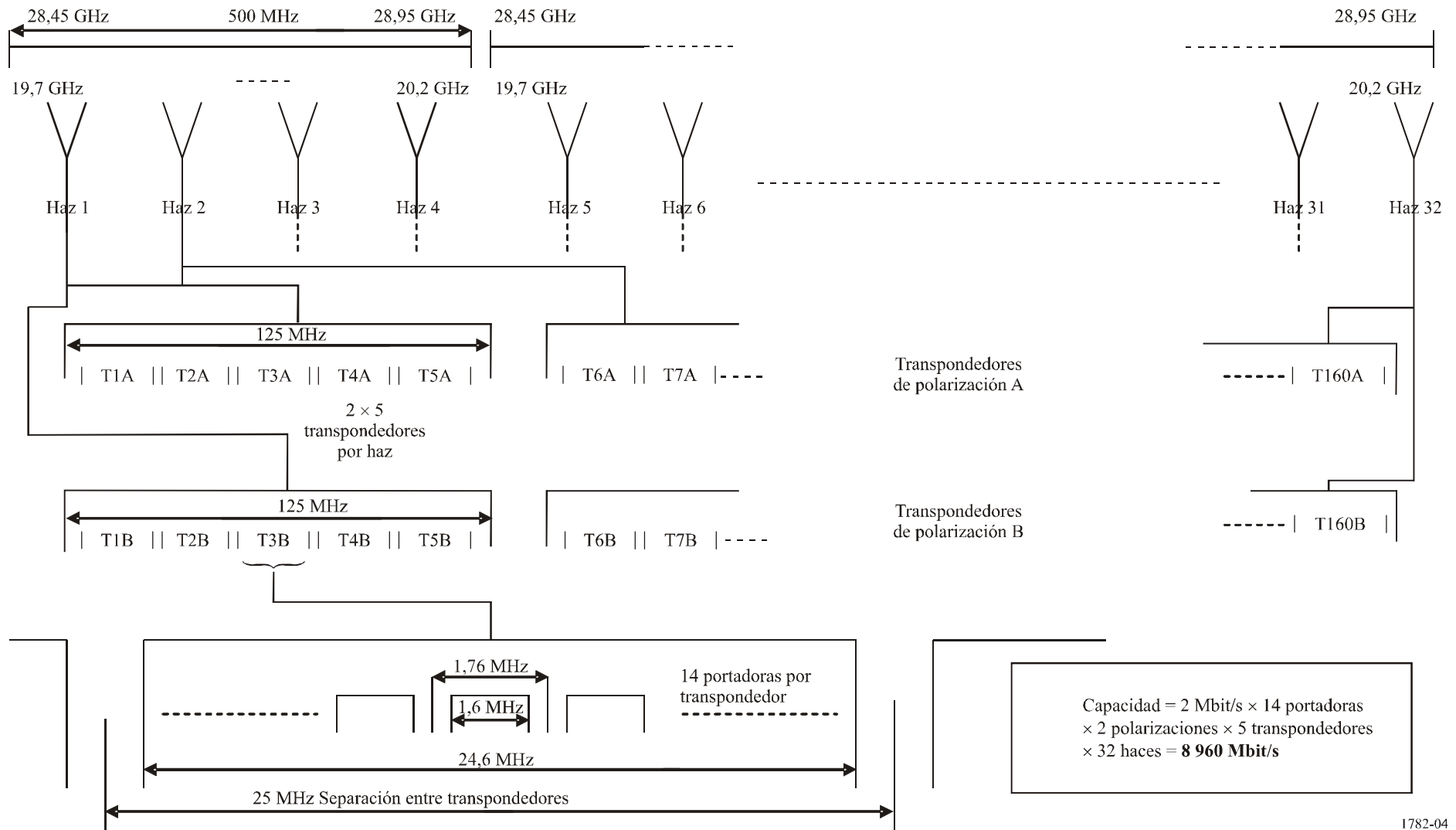
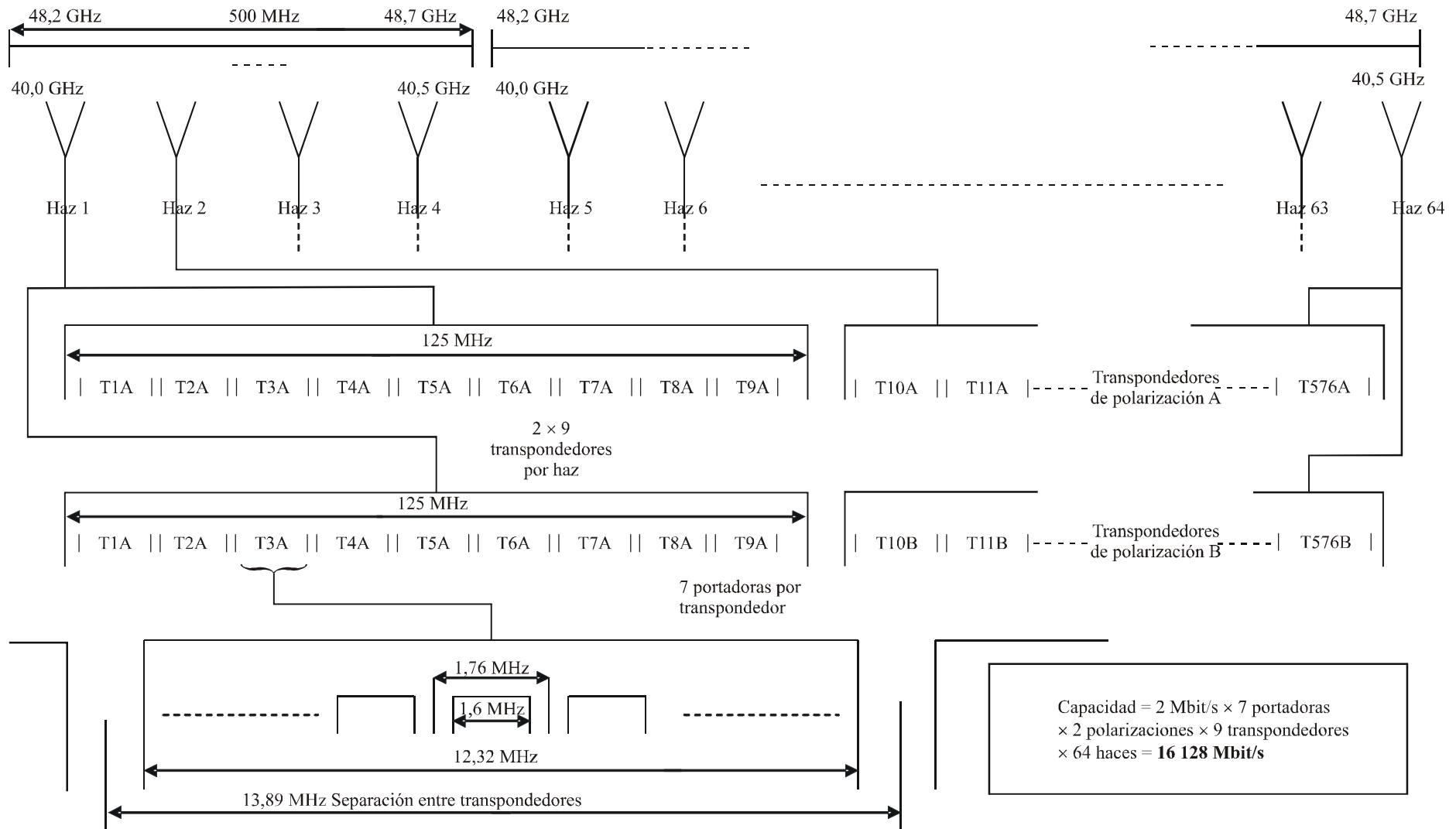


FIGURA 5

Configuración del transpondedor y de haces para un satélite del SFS a 40/50 GHz destinado a ofrecer acceso a Internet a alta velocidad



Obsérvese que el número de transpondedores por satélite es elevado. El satélite a 11/14 GHz tendrá 216 transpondedores, lo que puede ser practicable utilizando etapas de salida de estado sólido, y el requisito principal de potencia será del orden de 54 kW. Para el satélite a 20/30 GHz el número de transpondedores será de 320 y 80 kW, y para el satélite de 40/50 GHz habrá no menos de 1 152 transpondedores y 1,44 MW. Las estaciones espaciales a 11/14 GHz y 20/30 GHz serán más grandes y relativamente más costosas³, y en cada caso conviene considerar la posibilidad de dividir la cobertura entre dos o más satélites ubicados, en teoría, en la misma posición y proporcionalmente con menos haces y transpondedores de menor potencia primaria. Esta opción parece inevitable en el caso de 40/50 GHz, en el que será preciso dividir la cobertura entre unos 20 satélites más pequeños para reducir el tamaño y la potencia de cada uno a los respectivos a un sólo satélite a 11/14 GHz o 20/30 GHz.

NOTA 1 – Si se utiliza una codificación con corrección de errores más potente, es posible que la configuración del transpondedor sea distinta a la que aparece en las Figs. 3, 4 y 5, debido al aumento de la anchura de banda por portadora, pero a los efectos de la comparación con lo anterior los parámetros esenciales serían aproximadamente los siguientes:

Capacidad por satélite:

11/14 GHz – 1 612 Mbit/s; 20/30 GHz – 4 778 Mbit/s; 40/50 GHz – 8 600 Mbit/s

Potencia primaria del satélite:

11/14 GHz – 29 kW; 20/30 GHz – 43 kW; 40/50 GHz – 770 kW.

En lo que respecta a la potencia primaria del satélite, cabe destacar que el valor máximo en las plataformas diseñadas hasta la fecha, es de 20 kW, por lo que conviene averiguar la forma de reducir el requisito. A este respecto, conviene investigar la posibilidad de mantener el AMDF en los enlaces ascendentes y utilizar AMDT en los descendentes, ya que de este modo se evitaría tener que reducir la potencia del transportador y la consiguiente reducción de la potencia primaria del satélite en 4 dB.

3 Capacidad total posible (C_T)

Para poder expresar la capacidad total de satélites del SFS en una determinada banda a fin de proporcionar acceso a Internet en banda ancha es preciso definir la zona geográfica del caso. Las opciones posibles son toda la superficie de la Tierra, la zona terrestre total de la superficie de la Tierra, la superficie de la Tierra comprendida entre determinadas latitudes (por ejemplo, entre 60° N y 60° S), la zona terrestre comprendida entre dos latitudes, la zona terrestre en que la densidad de población es superior a un determinado umbral y diversos ejemplos de tamaños y latitudes. Para determinar la opción más adecuada se recomienda realizar estudios y debates sobre el particular. A efectos del presente estudio inicial se ha tomado una zona circular de 10 000 000 km² centrada en el Ecuador. En la Figura 6 se muestra una superficie de ejemplo ubicada en el África central, aunque los resultados serían idénticos para cualquier otra posición sobre el Ecuador.

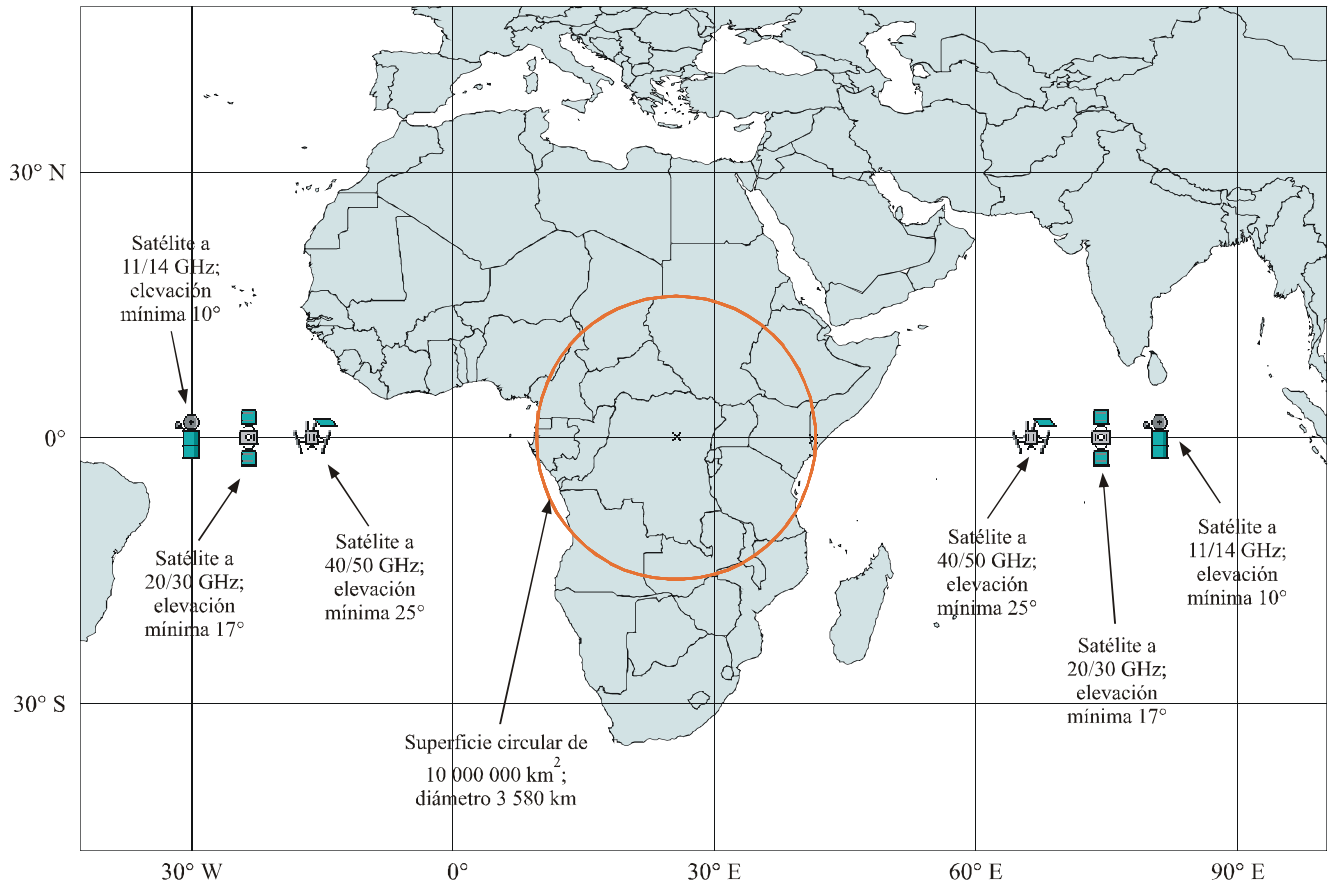
Como los ángulos de elevación mínimos en las tres bandas de frecuencia son diferentes, el intervalo de longitudes en el que una estación geoestacionaria puede atender la zona de referencia también es distinto. Estos intervalos se indican en la Fig. 6 y sus valores numéricos son los siguientes:

- para 11/14 GHz, de 30,1° W a 81,0° E, un intervalo de longitud de 111,1°;
- para 20/30 GHz, de 23,4° W a 74,3° E, un intervalo de longitud de 97,7°;
- para 40/50 GHz, de 15,8° W a 66,7° E, un intervalo de longitud de 82,5°.

³ El coste de construir y lanzar un satélite grande físicamente realizable es (en 2006) varios cientos de millones USD.

FIGURA 6

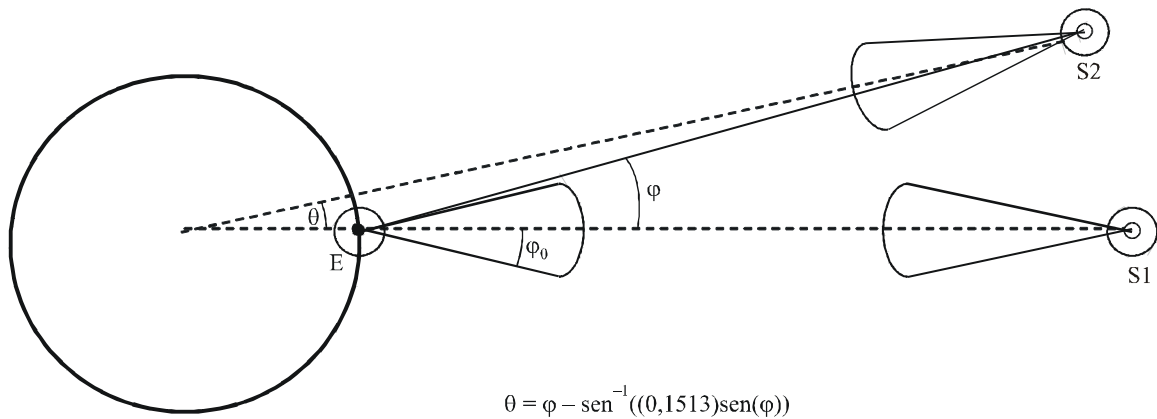
Ejemplo de superficie ecuatorial de 10 millones de kilómetros cuadrados



1782-06

El número de satélites dentro de estos tres intervalos que podrían dar servicio a la zona utilizando las mismas frecuencias y la configuración de haces dependerá de la separación mínima entre satélites adyacentes, lo que a su vez es función del nivel aceptable de interferencia causada a los enlaces ascendente y descendente por sus satélites adyacentes. Para no afectar demasiado a las relaciones C/N totales calculadas en § 3.2, la relación de portadora-interferencia entre dos satélites adyacentes debe ser como mínimo 20 dB aproximadamente y, por tanto, la relación portadora-interferencia para cada uno de dichos satélites ($(C/I)_{ADI}$) deberá ser al menos de 23 dB. Como se muestra en la Fig. 7, el nivel de interferencia queda determinado principalmente por el factor de discriminación de los diagramas de radiación de las antenas transmisoras y receptores en el terminal de usuario, y sus relaciones de reducción en satélites distintos de las dos estaciones espaciales adyacentes cuyo efecto es insignificante (suponiendo una idéntica separación entre ellos).

FIGURA 7
Interferencia entre satélites adyacentes



1782-07

E representa una estación terrena de usuario que comunica con el satélite S1, y E-S2 es el trayecto de interferencia (recibida y causada) debida al satélite adyacente S2. Dado que los dos satélites S1 y S2 dan servicio a la misma zona, ninguno de los diagramas de antena alcanza una discriminación suficiente en la dirección del trayecto de interferencia. La interferencia que causa E a S2 se produce en φ° con respecto al eje de la antena situado en E, y la interferencia que recibe E de S2 también se produce en ese ángulo con respecto al eje. Como en este estudio se considera un solo tipo de portadora, las p.i.r.e. de las estaciones terrenas «deseadas» e «interferentes» son idénticas, y las p.i.r.e. de los satélites «deseados» e «interferentes» también son iguales. De lo anterior, tanto en el enlace ascendente como en el descendente, se desprende que:

$$(C/I)_{ADJ} = G_M - G(\varphi)$$

siendo:

G_M : ganancia sobre el eje de la antena en E

$G(\varphi)$: ganancia en la dirección de la interferencia.

Aplicando la hipótesis inicial de que el diámetro de la antena de usuario es de 30 cm, en el Cuadro 6 se indica la anchura calculada de los haces (φ_0) correspondientes a la frecuencia más baja en cada una de las bandas seleccionadas.

CUADRO 6

Número máximo de satélites con cobertura y frecuencias idénticas ($\varphi_0 = 70.\lambda/D$)

Frecuencia (GHz)	10,95	14,0	19,7	28,45	40,0	48,2
Anchura de haz (φ_0°)	6,39	5,0	3,55	2,46	1,75	1,45
φ_{min} (grados)	8,84	6,92	4,91	3,40	2,42	2,01
θ_{min} (grados)	7,51	5,88	4,17	2,89	2,05	1,71
N	14	18	23	33	40	48

Suponiendo una reducción del haz principal cuadrática, $G(\varphi) = G_M - 12(\varphi/\varphi_0)^2$ dBi, por lo que la discriminación mínima necesaria se produce cuando $G_M - (G_M - 12(\varphi/\varphi_0)^2) = 23$ dB, es decir, cuando $12(\varphi/\varphi_0)^2 = 23$ dB. Sustituyendo $\varphi = 1,384\varphi_0$ para la separación mínima entre satélites se

obtiene los ángulos designados φ_{min} en la tercera fila del Cuadro 6. Los respectivos valores de θ figuran en la cuarta fila. Habida cuenta de que el valor de la separación entre satélites es generalmente 3° (o 2° en la Región 2) para las redes del SFS convencionales en las bandas 11/14 GHz, los valores de θ_{min} indicados en el Cuadro 6 permiten deducir la dificultad que probablemente extrañaría la compartición de estas bandas con los sistemas existentes en las mismas. Si bien es cierto que en las bandas 20/30 GHz los valores de θ_{min} también son incompatibles con la separación de 3° ó 2° deseada, al menos existen actualmente pocos satélites, por lo que el problema de la compartición es más bien hipotético. Por regla general, los valores θ_{min} indican que la utilización de antenas pequeñas en el terminal de usuario limita la eficiencia orbital/espectral.

Dividiendo el intervalo de longitud mostrado en la Fig. 6 por θ_{min} se obtiene el número de satélites con la misma frecuencia que pueden dar servicio a la zona de referencia en cada una de las bandas de 500 MHz seleccionadas, que figura en la quinta columna del cuadro titulada «N». Como en el presente estudio sólo se toman en consideración las conexiones bidireccionales, los valores de N pertinentes para el caso que nos ocupa quedan determinados por las frecuencias en el enlace descendente, valores que figuran en negritas en el Cuadro 6.

La superficie hexagonal, A , dentro de la huella de un solo haz de satélite puede deducirse de la geometría de las Figs. 1 y 2, obteniéndose $A = 211\,375\,383(1 - \cos(d/222,63)) \text{ km}^2$, siendo d el diámetro de la huella (km) según se muestra en la Fig. 2. Los valores de A que habrán de utilizarse son los siguientes:

$$A = 497\,683,88 \text{ km}^2 \text{ para } 11/14 \text{ GHz, } 91\,238,83 \text{ km}^2 \text{ para } 20/30 \text{ GHz y } 22\,810,94 \text{ km}^2 \text{ para } 40/50 \text{ GHz}$$

Para calcular el número de satélites de los tipos descritos en § 3 que pueden dar servicio a la zona de referencia desde una sola ubicación OSG, se multiplican estas superficies de huella por el número, n , de haces por satélite que aparecen en el Cuadro 5 y el resultado se divide entre la superficie de la zona de referencia de la Fig. 6. Estos números no tienen por qué ser enteros, ya que pueden haber haces cuya huella quede fuera de la zona de referencia y representen fracciones de la capacidad por satélite no disponibles para usuarios en la zona de referencia. La capacidad total, C_T , para la zona de referencia viene dada por:

$$C_T = N.C_S.(10\,000\,000)/(A.n) \text{ Mbit/s}$$

siendo C_S la capacidad por satélite definida en § 3.

Por último, los valores de C_T para el caso de conexiones bidireccionales en las bandas de 500 MHz seleccionadas son aproximadamente:

10,95-11,2 GHz + 11,45-11,7 GHz en sentido descendente y 14,00-14,50 GHz en sentido ascendente – **71 {38} Gbit/s;**

19,7-20,2 GHz en sentido descendente y 28,45-28,95 GHz en sentido ascendente – **706 {380} Gbit/s;**

40,0-40,5 GHz en sentido descendente y 48,20-48,70 GHz en sentido ascendente – **4 400 {2 400} Gbit/s.**

NOTA 1 – Las cifras entre llaves corresponden al caso hipotético en que se utiliza una codificación con corrección de errores potente.

Teniendo en cuenta los costes normales de la construcción y lanzamiento de un satélite grande, resulta evidente que la prestación de capacidades de este orden sería muy costosa. Sin embargo, el mercado potencial de acceso mundial a Internet a velocidad elevada es proporcionalmente grande.

Estas capacidades son para uso continuo, pero suponiendo que en general la velocidad de usuario es de 2 Mbit/s, el número máximo de conexiones bidireccionales simultáneas representa la mitad de la

capacidad en cada par de bandas. Si cada portadora se atribuye dinámicamente de acuerdo con la «demanda», el número de usuarios sería mayor que el número de portadoras disponibles en una proporción inversa al factor de actividad media por usuario.

Las capacidades por satélite indicadas en § 2.3 y, por ende, las capacidades totales aquí especificadas, se han calculado para el acceso a Internet mediante terminales de usuario con una antena de 30 cm. Para diámetros más grandes, los resultados serían distintos, aunque para calcularlos sería necesario en primer lugar decidir si conviene modificar otras hipótesis además del diámetro de la antena. Dejando el resto de hipótesis iguales, un diámetro de, por ejemplo, 60 cm permitiría suprimir la codificación FEC con relación 3/4 y se obtendría una velocidad binaria mayor, de unos 2 560 kbit/s, lo que se traduciría en una capacidad por satélite un 28% mayor y la capacidad total en la zona quedaría multiplicada por un factor 2,5 aproximadamente. Ahora bien, en función del tamaño de la antena deseado, quizá sería conveniente sacrificar una parte o todo el aumento de capacidad logrado para reducir la potencia del transmisor de usuario o la potencia primaria del satélite. Otra posibilidad sería emplear una parte o todo el aumento de la ganancia de la antena de usuario para reducir proporcionalmente la ganancia por haz de satélite, lo que aumentaría la anchura del haz de cada satélite y, a su vez, permitiría abarcar la misma superficie con menos haces. Es evidente que al evaluar la capacidad correspondiente a antenas de usuario más grandes deberán emplearse las hipótesis más adecuadas para cada caso.

4 Conclusiones

En este Anexo se describen las características fundamentales de un tipo de sistema SFS diseñado para lograr el acceso mundial a Internet en banda ancha y se da una estimación general de la capacidad total que podrían ofrecer dichos sistemas. Dada la importancia que reviste la flexibilidad necesaria para realizar un análisis más preciso adaptado a las características geográficas y las circunstancias del mercado, se estima que sería inadecuado incluir en el Reglamento de Radiocomunicaciones las características de sistemas de acceso a Internet en banda ancha por satélite, y que esta Recomendación debe revisarse de vez en cuando teniendo en cuenta los últimos adelantos.

Anexo 2

Opciones de acceso mundial a Internet en banda ancha con sistemas del SFS diseñados para estaciones terrenas con antenas más grandes

1 Consideraciones generales

La arquitectura de sistema descrita en el Anexo 1 resulta en buena parte de seleccionar antenas de 30 cm para las estaciones terrenas de usuario, que corresponden a la categoría denominada a veces «terminales de apertura ultrapequeña» o USAT. Con antenas más grandes es posible cumplir los requisitos de acceso a Internet en banda ancha por satélite (salvo el relativo a la portabilidad de los terminales) mediante diversas arquitecturas de sistema. Cabe destacar que en el presente Anexo se describe un ejemplo de las tantas posibles.

En § 1 del Anexo 1 se analiza cuáles son las bandas más adecuadas para el acceso a Internet en banda ancha entre las diversas bandas atribuidas al SFS hasta 50 GHz, por lo que es innecesario

reproducir de nuevo dicho análisis. Partiendo de ese análisis, en el presente Anexo se determinan los parámetros únicamente para las bandas 20/30 GHz y 11/14 GHz del SFS, utilizando la misma arquitectura en ambos casos.

Aunque el tamaño de la antena de usuario es menos dominante en los diseños de sistemas distintos a los USAT, sigue siendo importante y, por consiguiente, conviene seleccionar un tamaño habitual a efectos del presente Anexo. Según las respuestas al cuestionario distribuido por la Oficina de Radiocomunicaciones en 1998, relativo a estaciones terrenas a 20/30 GHz con antenas de diámetro comprendido entre 0,3 m y 7,6 m, el tamaño más común es de 1,2 m. En las respuestas a este mismo cuestionario para las estaciones terrenas a 11/14 GHz con antenas entre 0,4 m y 18,0 m de diámetro, el tamaño más frecuente es de 1,2 m. Así pues, para este ejemplo se optó por un diámetro de 1,2 m, que es uno de los tamaños utilizados en las estaciones terrenas conocidas como terminales de muy pequeña apertura (VSAT).

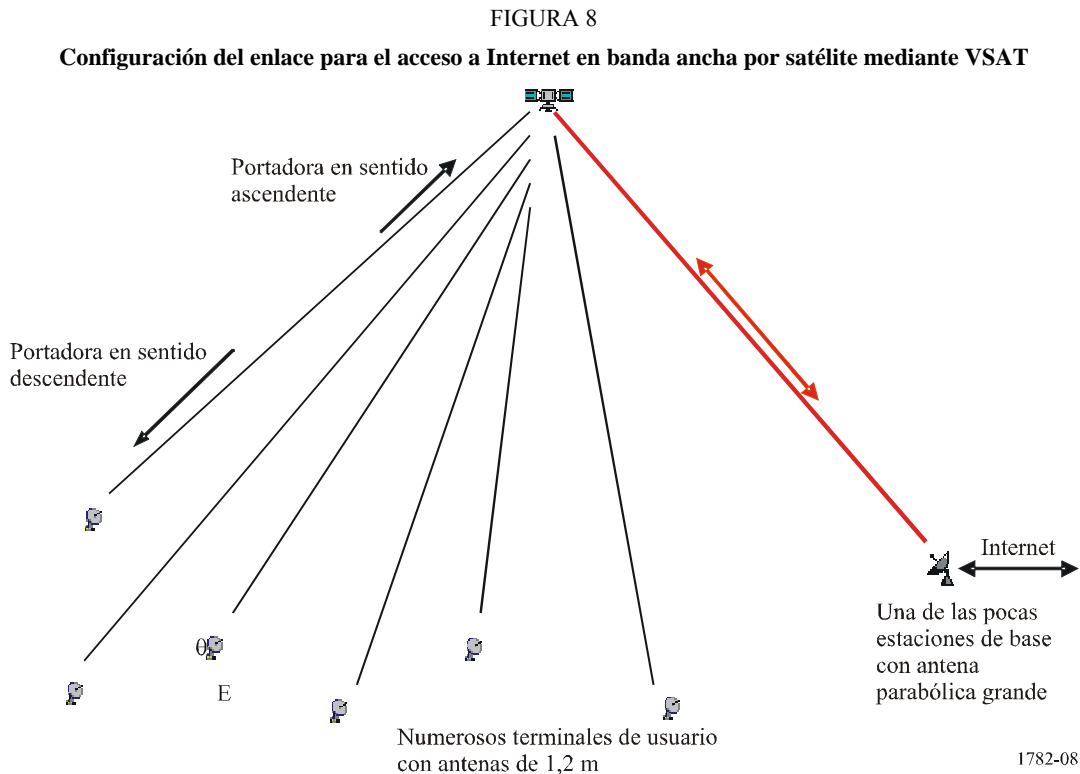
Al igual que en el Anexo 1, estas antenas se utilizarán para la comunicación bidireccional con los usuarios a una velocidad de datos de 2 Mbit/s. Se supone que el método de acceso de cada transpondedor de satélite es AMDF y que se emplea MDP-4. Además, se supone codificación FEC con relación 1/2 para lograr una eficacia razonable de la potencia de salida del transpondedor.

2 Arquitectura del sistema

Al igual que en el Anexo 1, el presente ejemplo se basa en una configuración «en estrella», en la que el acceso a varias estaciones terrenas de usuario se realiza a través de enlaces por satélite hacia una sola estación terrena «central» conectada a Internet. Para minimizar el efecto del enlace entre el satélite y la estación central sobre la relación C/N de las portadoras saliente y entrante, se supondrá que la antena de la estación central es grande (7,6 m de diámetro). La Fig. 8 ilustra la configuración del enlace.

En este ejemplo, los satélites utilizan un espectro de 500 MHz en los dos sentidos de la transmisión y las bandas son las mismas que antes:

- Sistema 20/30 GHz – 19,7-20,2 GHz espacio-Tierra y 28,45-28,95 GHz Tierra-espacio;
- Sistema 11/14 GHz – 10,95-11,2 GHz y 11,45-11,7 GHz espacio-Tierra, y
- 14,0-14,5 GHz Tierra-espacio.



3 Cobertura

En el caso de MDP-4 con FEC de relación 1/2, se requiere una relación C/N de unos 7,5 dB a la entrada del demodulador/decodificador típico para obtener una BER de 1×10^{-6} en el tren binario de salida, lo cual puede considerarse como el umbral de disponibilidad para la presente aplicación. Al igual que en el Anexo 1, se parte del supuesto de que este valor de BER se cumple al menos durante el 99% del tiempo en la mayoría de los climas, por lo que el enlace entre el usuario y el satélite debe diseñarse para una atenuación debida a la lluvia de 11 dB a 30 GHz, 7 dB a 20 GHz, 4,5 dB a 14 GHz y 3,5 dB a 11 GHz, siempre que el mínimo ángulo de elevación sea 17° para el sistema 20/30 GHz y 10° para el sistema 11/14 GHz. Muchos de los satélites actuales disponen de transpondedores de 40 W de potencia de salida en el nivel de saturación de una sola portadora. Habida cuenta de estos factores y de que el diámetro de la antena de usuario es de 1,2 m, y dejando márgenes suficientes para el ruido y las contribuciones a la interferencia interna y externa, los resultados de los cálculos del enlace apuntan a que es necesario un haz de satélite de anchura de haz a potencia mitad de 2° . Como puede verse en los Cuadros 3 y 4, este requisito puede satisfacerse con la tecnología existente.

Según la Fig. 9, es posible abarcar una superficie continua de tamaño aproximadamente igual a la zona de referencia circular de 10 millones de kilómetros cuadrados utilizada en el Anexo 1 (Fig. 6) mediante ocho haces circulares (A a H), cada uno con una anchura de haz de 2° , dispuestos de manera tal que sus límites superpuestos forman hexágonos entrelazados. En § 2.1 del Anexo 1 se demuestra que con un factor de reutilización de frecuencia de 4 a 1 se obtiene una relación C/I de al menos 16,5 dB para la interferencia multihaz.

4 Configuración de la carga útil del satélite

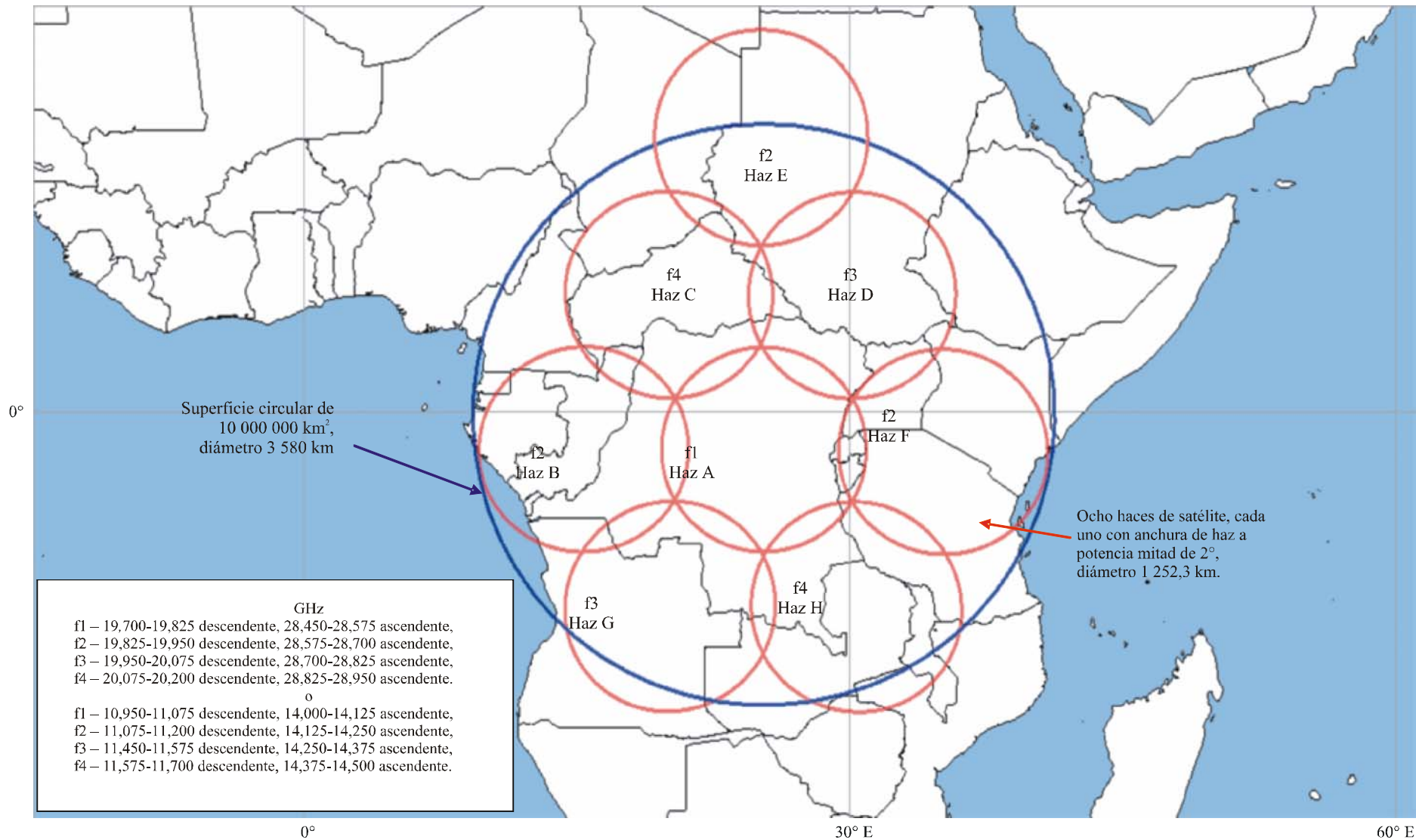
En la Fig. 10 se muestra una configuración de transpondedores óptima en cuanto a la utilización de potencia y anchura de banda, habida cuenta de los parámetros indicados anteriormente en este Anexo. La anchura de banda de cada portadora viene dada por la siguiente expresión:

$$\{2 \text{ (Mbit/s de velocidad de datos)/2 (MDP-4)}\} \times 2/1 \text{ (FEC de relación 1/2)} \times 1,2 \text{ (conformación espectral)} = 2,4 \text{ MHz}$$

Con un 18% de anchura de banda del transpondedor como bandas de guarda entre portadoras, este valor corresponde a una separación entre portadoras de 2,84 MHz. Este margen relativamente grande es compatible con el funcionamiento de 10 portadoras en una anchura de banda del transpondedor de 28,4 MHz, y se traduce en una utilización óptima de la potencia de salida del transpondedor, como se verá más adelante. Con otro 10% de margen para las bandas de guarda entre transpondedores se obtiene una separación entre éstos de 31,25 MHz, lo que permite el acomodo de cuatro transpondedores en 125 MHz, esto es, un cuarto de la anchura de banda del satélite. Por lo tanto, cada uno de los ocho haces cuyas huellas a potencia mitad se ilustran en la Fig. 9 puede contener cuatro transpondedores para cada una de las dos polarizaciones (doble lineal o circular levógira o dextrógira). Por consiguiente, el número total de transpondedores será de 64.

FIGURA 9

Ejemplo de configuración de haces de satélite para el acceso a Internet por satélite en banda ancha mediante estaciones de usuario con antenas de 1,2 m



5 Balances de enlace

Para un enlace ascendente o descendente entre una estación terrena y un satélite la relación es la siguiente:

$$P_T + G_T - 20 \log((4\pi df)/(3 \times 10^8)) - F + G_R - 10 \log(BT) - (-228,6) = C/N \text{ dB} \quad (1)$$

siendo:

P_T : potencia de entrada a la antena transmisora (dBW)

G_T : ganancia de la antena transmisora (dBi)

d : longitud del trayecto entre la estación terrena y el satélite (m)

f : frecuencia (Hz)

F : margen (dB) para compensar los desvanecimientos durante el porcentaje de tiempo necesario

G_R : ganancia de la antena receptora (dBi)

B : anchura de banda de la portadora (Hz)

T : temperatura de ruido del enlace (K)

C/N (dB): relación en el receptor para alcanzar el umbral de disponibilidad BER.

Para tener en cuenta la degradación debida al ruido térmico en el enlace entre el satélite y la estación central, la reutilización de frecuencias multihaz, la interferencia contrapolar, la intermodulación en el satélite y la interferencia causada por fuentes externas, es preciso que la relación portadora-ruido térmico en los enlaces ascendente y descendente entre el satélite y el terminal de usuario sea al menos de 8,5 dB. Obsérvese que la relación C/I de todas esas degradaciones que daría lugar a una relación total $C/(N+I)$ de 7,5 dB (que corresponde al umbral de disponibilidad) es 14,4 dB y que probablemente la suma resultante de la reutilización de frecuencia y la interferencia contrapolar ($C/I > 16,5$ dB), la intermodulación ($C/I > 23$ dBi), el ruido del enlace con la estación de base ($C/I > 24$ dB) y la interferencia externa ($C/I > 23$ dB) no sea mayor que esa cifra (es decir, $> 14,39$ dB).

Por consiguiente:

Enlace ascendente desde la estación terrena de usuario en la banda 30 GHz del SFS

Igual que la ecuación (1), siendo:

$P_T = 11,3$ dBW (13,5 W) (y unos 3 dBW en cielo despejado con control del enlace ascendente)

$G_T = 49,19$ dBi (antena de 1,2 m a 28,45 GHz)

$d \leq 39\,853\,746$ m (mínima elevación de 17°)

$f = 28\,450\,000\,000$ Hz

$F = 11$ dB (desvanecimiento $< 1\%$ del tiempo)

$G_R = 37,7$ dBi (extremo de potencia mitad del haz de satélite de 2°)

$B = 2\,400\,000$ Hz

$T = 1\,000$ K, y por consiguiente

$C/N = 8,5$ dB.

Enlace ascendente desde la estación terrena de usuario en la banda 14 GHz del SFS

Igual que la ecuación (1), siendo:

$$\begin{aligned}
 P_T &= 3,95 \text{ dBW (2,5 W) (y unos 2 dBW en cielo despejado con control del enlace ascendente)} \\
 G_T &= 43,19 \text{ dBi (antena de 1,2 m a 14,25 GHz)} \\
 d &\leq 40\,583\,982 \text{ m (mínima elevación de } 10^\circ) \\
 f &= 14\,250\,000\,000 \text{ Hz} \\
 F &= 4,5 \text{ dB (desvanecimiento } < 1\% \text{ del tiempo)} \\
 G_R &= 37,7 \text{ dBi (extremo de potencia mitad del haz de satélite de } 2^\circ) \\
 B &= 2\,400\,000 \text{ Hz} \\
 T &= 800 \text{ K, y por consiguiente} \\
 C/N &= 8,5 \text{ dB.}
 \end{aligned}$$

Enlace descendente hacia la estación terrena de usuario en la banda 20 GHz del SFS

Igual que la ecuación (1), siendo:

$$\begin{aligned}
 P_T &= 2,1 \text{ dBW (1,62 W)} \\
 G_T &= 37,7 \text{ dBi (extremo de potencia mitad del haz de satélite de } 2^\circ) \\
 d &= 39\,853\,746 \text{ m (mínima elevación de } 17^\circ) \\
 f &= 19\,700\,000\,000 \text{ Hz} \\
 F &= 7 \text{ dB (desvanecimiento } < 1\% \text{ del tiempo)} \\
 G_R &= 46,0 \text{ dBi (antena de 1,2 m a 19,7 GHz)} \\
 B &= 2\,400\,000 \text{ Hz} \\
 T &= 300 \text{ K, y por consiguiente} \\
 C/N &= 8,5 \text{ dB.}
 \end{aligned}$$

Enlace descendente hacia la estación terrena de usuario en la banda 11 GHz del SFS

Igual que la ecuación (1), siendo:

$$\begin{aligned}
 P_T &= 2,1 \text{ dBW (1,62 W)} \\
 G_T &= 37,7 \text{ dBi (extremo de potencia mitad del haz de satélite de } 2^\circ) \\
 d &= 40\,583\,982 \text{ m (mínima elevación de } 10^\circ) \\
 f &= 10\,950\,000\,000 \text{ Hz} \\
 F &= 3,5 \text{ dB (desvanecimiento } < 1\% \text{ del tiempo)} \\
 G_R &= 40,9 \text{ dBi (antena de 1,2 m a 10,95 GHz)} \\
 B &= 2\,400\,000 \text{ Hz} \\
 T &= 200 \text{ K, y por consiguiente} \\
 C/N &= 13,6 \text{ dB.}
 \end{aligned}$$

El más importante de estos enlaces es el descendente a 19,7 GHz, para el cual la potencia de salida del satélite por portadora (P_T) debe ser de 1,62 W. Dado que la potencia total de salida multiportadora de un transpondedor de 40 W en el nivel de saturación de una sola portadora es de unos 16 W (es decir, con una reducción 4 dB a la salida para limitar la intermodulación), el número de portadoras de 2 Mbit/s por transpondedor será **10** (es decir, $\cong 16/1,62$), como se indica en la Fig. 10.

En el sistema de 11/14 GHz, el margen de desvanecimiento inferior genera como resultado una relación C/N amplia de 10 portadoras por transpondedor a 1,62 W por portadora. Una configuración más adecuada sería 11 portadoras por transpondedor, lo que implicaría reducir las bandas de guarda entre portadoras un 7,6% aproximadamente y la potencia del satélite por portadora a $16/11 = 1,45$ W.

6 Capacidad por satélite (C_S)

La capacidad de un satélite con la configuración de carga útil de la Fig. 10 sería:

$$(2 \text{ Mbit/s por portadora}) \times (10 \text{ portadoras por transpondedor}) \times (2 \text{ conjuntos de 4 transpondedores por haz}) \times (8 \text{ haces}) = \mathbf{1\ 280 \text{ Mbit/s}}$$

Suponiendo una eficacia de potencia del 35% para cada transpondedor y que la carga útil representa el 75% de la demanda de potencia del satélite, la potencia total necesaria para un satélite de estas características sería $(40 \text{ W} \times 2 \times 4 \times 8)/(0,35 \times 0,75) = 9\ 752 \text{ W}$, es decir, **10 kW**.

En el caso 11/14 GHz, con 11 portadoras por transpondedor la capacidad sería 1 408 Mbit/s.

7 Capacidad total posible (C_T)

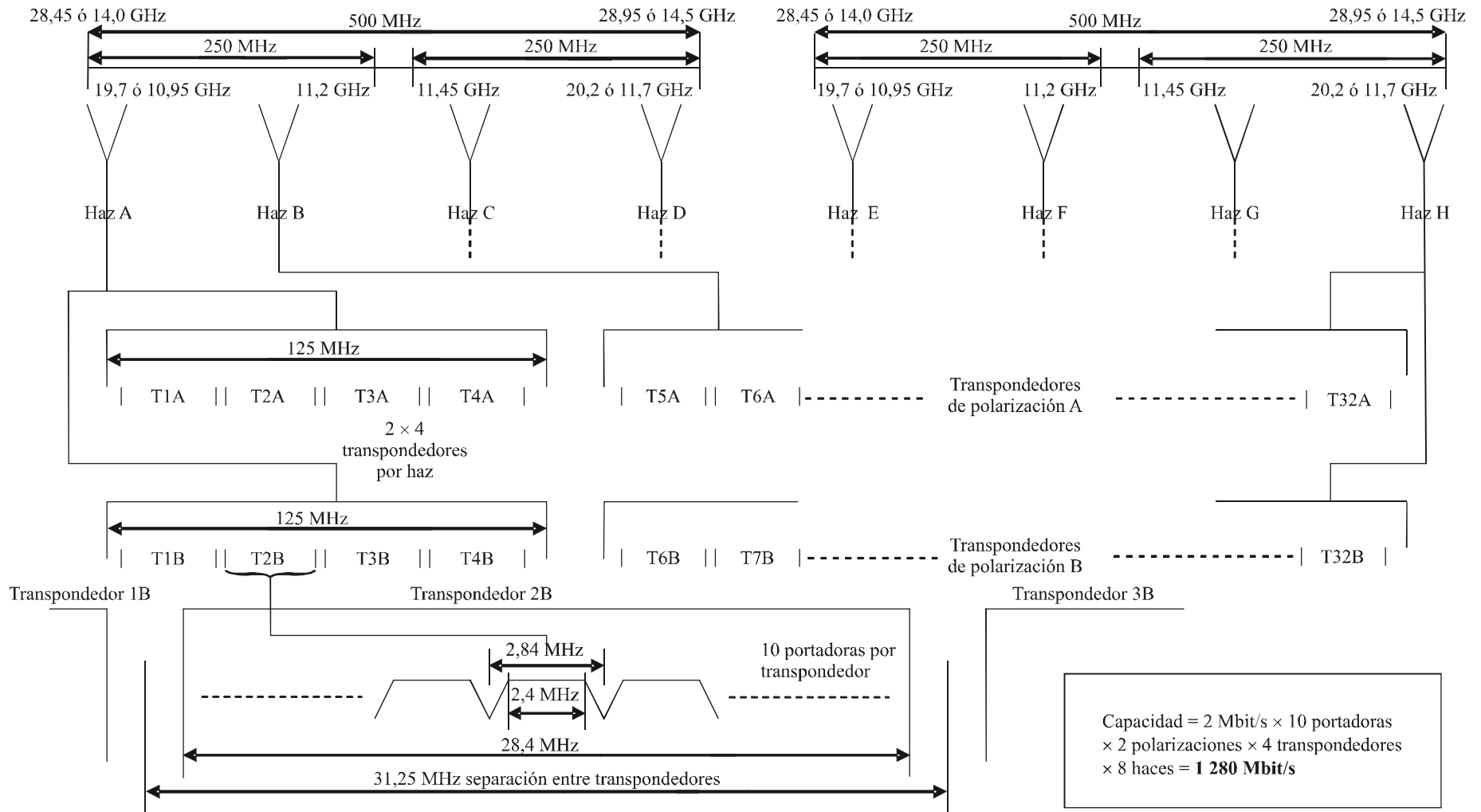
En § 3 del Anexo 1 se muestra que la órbita geoestacionaria puede verse con un ángulo de elevación de 17° como mínimo, desde cualquier punto de la zona de referencia de 10 millones de km^2 , a lo largo de una gama de longitudes de $97,7^\circ$. Asimismo, se muestra que para un mínimo ángulo de elevación de 10° , la gama de longitudes es $111,1^\circ$. Utilizando el método descrito en ese punto, se obtiene que si las estaciones terrenas de usuario tienen antenas de 1,2 m, la mínima separación entre satélites podría ser en teoría inferior a 2° para los dos ejemplos a 20/30 GHz y a 11/14 GHz. Sin embargo, para minimizar el riesgo de interferencia debida a factores tales como el control imperfecto de la posición del satélite, normalmente en la reglamentación se estipula una mínima separación de 2° , por lo que se ha utilizado este valor en los cálculos. Así pues, el número de satélites con la misma frecuencia del tipo descrito en este Anexo que podrían dar servicio simultáneamente a la zona de referencia es 48 en el caso 20/30 GHz y 55 en el caso 11/14 GHz. Por consiguiente, la capacidad total que podría obtenerse con satélites de este tipo para el acceso a Internet en banda ancha por los usuarios dentro de la zona de referencia es:

- para el ejemplo de 20/30 GHz – $48 \times 1\ 280 = \mathbf{61,44 \text{ Gbit/s}}$,
- para el ejemplo de 11/14 GHz – $55 \times 1\ 408 = \mathbf{77,44 \text{ Gbit/s}}$.

No obstante, como es preciso compartir frecuencias con los sistemas del SFS existentes, probablemente no se podrá obtener esta capacidad en el futuro previsible, especialmente en las bandas de frecuencia más baja.

FIGURA 10

Configuración del transpondedor y de haces de un satélite del SFS a 20/30 GHz u 11/14 GHz para el acceso a Internet a alta velocidad



Anexo 3

Ejemplo de acceso mundial a Internet en banda ancha mediante un sistema del SFS diseñado para antenas de una estación terrena «comunitaria» y distribución terrenal local

1 Consideraciones generales

El objetivo del Anexo 1 era ofrecer acceso directo a las estaciones terrenas de usuario con antenas de 30 cm, lo cual determinaba la naturaleza del sector espacial, es decir, satélites con múltiples haces lo más puntuales posibles y, por consiguiente, caracterizaba el tipo de arquitectura de sistema necesario. Ahora bien, en el presente Anexo los usuarios acceden a través de redes de radiocomunicaciones locales a unos relativamente pocos emplazamientos en los que hay estaciones terrenas «comunitarias», por lo que el tamaño de la antena utilizada por dichas estaciones terrenas es menos crítico y pueden utilizarse diversas arquitecturas de sistema. Existen varias alternativas (incluso bandas de frecuencia) para realizar las redes de radiocomunicaciones terrenales locales que conectan los usuarios con las estaciones terrenas «comunitarias». El presente Anexo contiene sólo un ejemplo de arquitectura de sistema que podría emplearse para facilitar acceso a Internet en banda ancha a través de redes de radiocomunicaciones locales basadas en estaciones terrenas comunitarias. Este ejemplo consiste en utilizar AMDF en las redes de radiocomunicaciones terrenales que unen el usuario con la central local, junto con MDP-4 convencional y FEC con relación 3/4, en la banda de 4 GHz del SF. Estas opciones inciden en el diseño de los enlaces de satélite que unen las estaciones terrenas locales con la estación terrena central conectada a Internet, aunque la incidencia es pequeña y permite posibilidades distintas a las de este ejemplo.

Aunque en el ejemplo del presente Anexo se utiliza la banda 4 GHz del SF para la distribución terrenal local, existen diversas formas de realizar esta parte de la red de acceso en cuanto al tipo de servicio (por ejemplo SF o SM) y la banda de frecuencias. Las opciones se elegirán en función de varios factores, tales como la velocidad de datos y la potencia, la gama de servicios necesaria desde la estación terrena comunitaria, la compartición y coordinación de frecuencias con otros servicios y las restricciones reglamentarias. Dado que cada red terrenal local conectada a Internet por el mismo satélite será autónoma, será posible utilizar diferentes atribuciones de frecuencia del SF y/o del SM para zonas distintas, lo que puede resultar conveniente en los casos en que, por ejemplo, la zona de servicio del satélite abarca más de un país.

2 Consideraciones generales sobre las bandas de frecuencia

En lo que respecta a la determinación de las bandas de frecuencia del SFS adecuadas para esta aplicación, el primer párrafo del § 1.1 del Anexo 1 es igualmente aplicable en este caso, y además al utilizar las bandas 4/6 GHz y 11/14 GHz del SFS no existe la restricción de que las antenas de las estaciones terrenas sean muy pequeñas. En principio, las estaciones terrenas comunitarias podrían emplear antenas de cualquier tamaño, aunque sería poco rentable utilizar antenas muy grandes.

Según la encuesta sobre la utilización de las bandas de satélite mencionada en el § 1.2 del Anexo 1, las atribuciones de 20/30 GHz del SFS están mucho menos explotadas que a frecuencias inferiores y las atribuciones de 40/50 GHz del SFS se han utilizado muy poco hasta ahora.

Habida cuenta de lo anterior, en este Anexo se describe un ejemplo de un sistema basado en una estación terrena comunitaria y se indican los parámetros para su realización en las bandas 20/30 GHz y 11/14 GHz. Ahora bien, cabe destacar que la realización a escala mundial a corto

plazo probablemente entrañaría menos problemas de compartición de frecuencias en la banda superior que en la inferior.

3 Posibles características técnicas

3.1 Arquitectura del sistema

En la Fig. 11 se muestra la arquitectura de este sistema de ejemplo, en la que cuatro haces bidireccionales de satélite con polarización doble utilizan una anchura de banda de 500 MHz en el enlace ascendente más 500 MHz en el descendente (es decir, 125 MHz en sentido ascendente y 125 MHz en el descendente por haz). Cada haz dará servicio a cuatro estaciones terrenas comunitarias con un tipo de polarización más otras cuatro con la polarización ortogonal, las cuales unen por satélite las ocho estaciones terrenas con una estación terrena central para la conexión a Internet. Así pues, el satélite ofrecerá acceso a Internet a 32 comunidades locales.

3.2 Sistemas locales de radiocomunicación terrenal

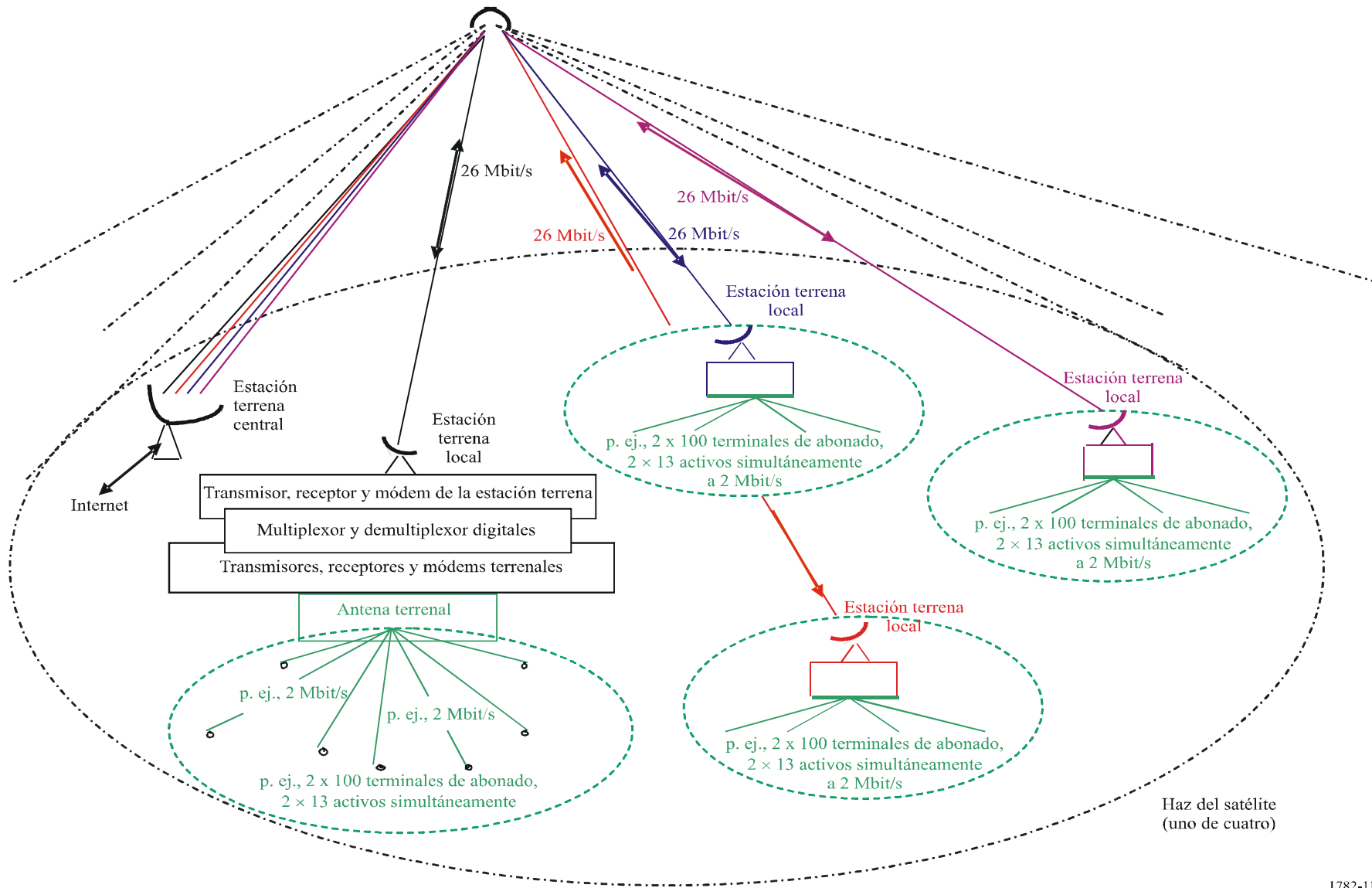
Cada estación terrena local dispondrá de un sistema de radiocomunicación terrenal equipado para dar servicio a un determinado número de abonados en un radio de unos 3 km. El número de usuarios que podrá atender en cualquier instante dependerá de las velocidades binarias que utilicen y los factores de actividad de sus conexiones. En el caso de usuarios de Internet particulares, el factor de actividad es de 30:1 y en aplicaciones comerciales de 10:1. La anchura de banda empleada varía sobremanera en función de la aplicación, que abarca desde mensajes cortos hasta la videoconferencia. Por servicio «Internet de banda ancha» se entiende velocidades comprendidas entre 256 kbit/s y varios Mbit/s, aunque el límite inferior aumenta cada pocos meses a medida que los clientes aumentan sus expectativas. Por ejemplo, suponiendo que 100 usuarios comerciales conectados simultáneamente desean obtener una velocidad de 2 Mbit/s el 10% del tiempo, sería necesario 20 Mbit/s para dar servicio y la disponibilidad de otros 6 Mbit/s podría compartirse entre, por ejemplo, 30×23 (usuarios a 256 kbit/s en 6 Mbit/s) $\cong 700$. Por consiguiente, la capacidad sería de 100 usuarios comerciales más 700 usuarios particulares simultáneamente o, atendiendo a consideraciones de índole comercial, 150 + 1 000, por ejemplo. Ahora bien, si uno de los usuarios desea ejecutar aplicaciones que requieren mucha anchura de banda, por ejemplo, TV en tiempo real, dicho usuario podría abarcar una proporción considerable de la capacidad disponible a no ser que el operador de red impusiera algún procedimiento de compartición. Esta cuestión de gestión de red queda fuera del alcance del presente estudio.

En el presente Anexo se toma como ejemplo 200 abonados que utilizan cada red local con un factor de actividad media de 13 por ciento, 13 de los cuales podrán transmitir simultáneamente a una velocidad de datos de 2 Mbit/s y otros 13 podrán recibir simultáneamente a 2 Mbit/s, en la banda de 4 GHz del SF. En caso necesario, sería posible permitir que algunos de los abonados transmitan y reciban simultáneamente a 2 Mbit/s, o incluso a velocidad más alta, en cuyo caso el número posible de abonados activos al mismo tiempo sería bastante inferior a 26. En cambio, si algunos abonados utilizaran a velocidad inferior a 2 Mbit/s, el número posible de abonados activos simultáneamente será bastante mayor que 26.

En este ejemplo se parte del supuesto de que los enlaces de abonado en las redes terrenales locales (que serán redes punto a multipunto) consistirán en enlaces AMDF con MDP-4 y FEC de relación 3/4. En cada terminal comunitario (es decir, estación central terrenal más la estación terrena local) las señales salientes (por ejemplo, trece a 2 Mbit/s) se multiplexan en forma digital en una sola señal de 26 Mbit/s en el sentido de transmisión hacia el satélite, y las señales entrantes (por ejemplo, trece a 2 Mbit/s) se demultiplexan a partir de la señal de 26 Mbit/s recibida del satélite.

FIGURA 11

Ejemplo de arquitectura para el acceso a Internet en banda ancha mediante redes terrenales locales y un satélite



3.3 Enlaces de satélite

Las portadoras de los enlaces ascendente y descendente que unen cada estación terrena comunitaria y el satélite también emplean MDP-4 con FEC de relación 3/4, y en el satélite se realiza la conversión a MAQ-16 y viceversa para los enlaces entre el satélite y la estación terrena central. Dado que habrá una sola estación terrena central por haz (o posiblemente una por satélite ubicado donde se superponen los cuatro haces), ésta incorporará una antena de tamaño suficiente para obtener las relaciones C/N necesarias en los enlaces ascendente y descendente con portadoras MAQ-16. En la estación terrena central, los trenes binarios de 26 Mbit/s se convierten a los formatos convenientes para la transmisión por Internet y viceversa.

3.4 Cobertura

La Fig. 12 muestra que si los cuatro haces de satélite (bidireccionales y con polarización dual) se diseñan para una anchura de haz a potencia mitad de unos 3° , y se orientan de manera que sus huellas coinciden en un mismo punto sobre el Ecuador, abarcarán en conjunto una superficie total similar a la de 10 000 000 km² utilizada en los cálculos de la capacidad del Anexo 1 (véase la Fig. 6 en dicho Anexo). En la Fig. 12 se indican las gamas de frecuencia de cada uno de los cuatro haces si el sistema se diseña en las bandas 20/30 GHz u 11/14 GHz. Según lo descrito en el Anexo 1, las antenas del satélite se diseñarán de modo que las huellas del haz sean circulares y con el mismo diámetro (1 884,6 km sobre la superficie de la Tierra) en cualquier dirección de puntería hacia la superficie de la Tierra con un mínimo ángulo de elevación de 17° para 20/30 GHz o 10° para 11/14 GHz.

3.5 Configuración de la carga útil del satélite

En la Fig. 13 se muestra la configuración prevista de la carga útil del satélite, en la que el número de transpondedores necesario para utilizar exhaustivamente la anchura de banda de 500 MHz en los enlaces ascendente y descendente con dos polarizaciones es de 64. Obsérvese también que gracias a los equipos para convertir los trenes de 26 Mbit/s salientes de MDP-4 a MAQ-16, y viceversa para los trenes entrantes, la utilización de la anchura de banda es más eficiente que si se utilizaran transpondedores que no demodulan la señal. En el caso de MDP-4 con FEC de relación 3/4, la anchura de banda de transmisión de una portadora de 2 Mbit/s es aproximadamente $2 \times 1/2 \times 4/3 \times 1,2 = 1,6$ MHz, y la anchura de banda de la portadora 26 Mbit/s es de unos $26 \times 1/2 \times 4/3 \times 1,2$ MHz = 20,8 MHz. Si se define el umbral de disponibilidad como el punto en el que la BER es igual a 1×10^{-6} , la relación C/N total necesaria para estas portadoras en condiciones de desvanecimiento es de 8,5 dB aproximadamente, por lo que previendo un margen para el ruido generado en otras partes del enlace y la interferencia externa, es necesario diseñar cada canal para lograr una relación C/N en condiciones de desvanecimiento de al menos 9,5 dB. Esto se aplica al enlace más importante de la cadena, es decir, el enlace del terminal de abonado al terminal comunitario para el sentido saliente y el enlace descendente del satélite hacia la estación terrena local para el sentido entrante. Los otros enlaces deben diseñarse de modo que los umbrales C/N sean más elevados a fin de limitar su incidencia en la calidad de funcionamiento de extremo a extremo.

En el caso de la MAQ-16 la anchura de banda de una portadora de 26 Mbit/s es aproximadamente igual a $26 \times 1/4 \times 1,2 = 7,8$ MHz. Así pues, con una anchura de banda de 125 MHz por haz es posible obtener, para cada polarización, cuatro portadoras de 20,8 MHz más cuatro portadoras de 7,8 MHz con bandas de guarda entre portadoras de 8,5% aproximadamente. Ahora bien, dado que la modulación de cada portadora de 7,8 MHz es MAQ-16, ésta debe diseñarse de modo que el umbral de disponibilidad de C/N sea de unos 25 dB (para una BER = 1×10^{-6}) en condiciones de desvanecimiento.

FIGURA 12

Ejemplo de configuración de haces de satélite para el acceso a Internet por satélite en banda ancha más una red local de radiocomunicaciones terrenales

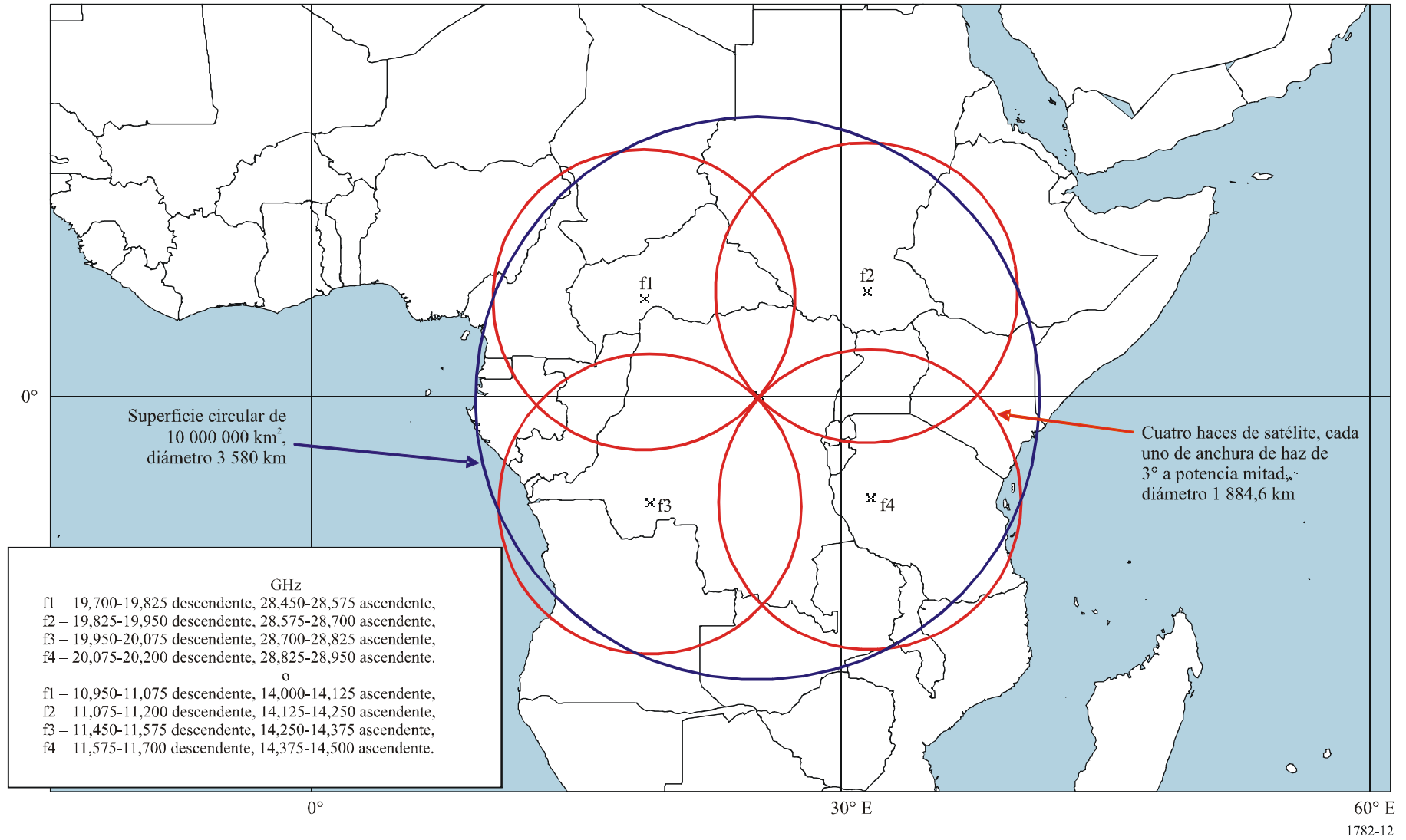
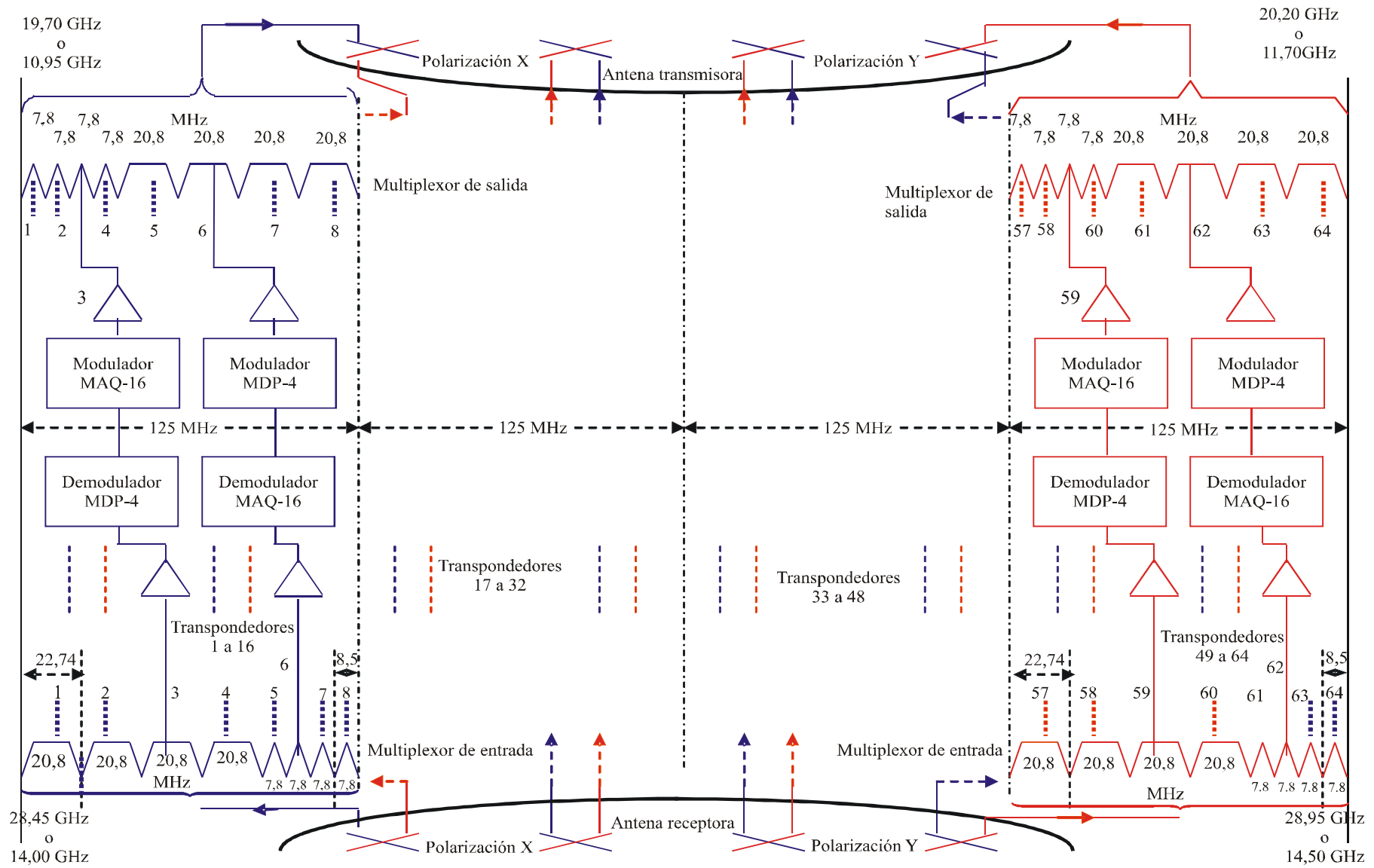


FIGURA 13

Ejemplo de configuración de la carga útil de satélite para el acceso a Internet por satélite en banda ancha más una red local de radiocomunicaciones terrenales



La conversión entre MDP-4 + FEC y MAQ-16 en cada transpondedor añade complejidad a la carga útil del satélite, aunque no tanto como si se realizara todo el procesamiento a bordo. Una carga útil similar basada en transpondedores «transparentes» («guías de onda acodadas») tendría sólo dos tercios de la capacidad.

3.6 Balances de enlace

Basándose en los puntos precedentes, los parámetros esenciales para los enlaces de radiocomunicaciones terrenales locales de 4 GHz y para los enlaces de satélite en las bandas posibles, a saber, 20/30 GHz y 11/14 GHz, los balances de enlace son los siguientes:

3.6.1 Enlaces terrenales locales

Enlace entre el terminal de abonado y la estación terrena local en la banda de 4 GHz

$$P_T + G_T - 20 \log((4\pi df)/(3 \times 10^8)) - F + G_R - 10 \log(BT) - (-228,6) = C/N \text{ dB} \quad (2)$$

siendo:

$$\begin{aligned} P_T &= 3 \text{ dBW (2 W)} \\ G_T &= 0 \text{ dBi (baja directividad)} \\ d &\leq 3\,000 \text{ m} \\ f &= 4\,000\,000\,000 \text{ Hz} \\ F &= 20 \text{ dB (desvanecimiento y bloqueo)} \\ G_R &= 10 \text{ dBi (en todos los acimuts)} \\ B &= 1\,600\,000 \text{ Hz} \\ T &= 4\,000 \text{ K, y por tanto} \\ C/N &= 9,5 \text{ dB.} \end{aligned}$$

Enlace entre la estación terrena local y el terminal de abonado en la banda de 4 GHz

Igual que la ecuación (2):

siendo:

$$\begin{aligned} P_T &= 5,4 \text{ dBW (3,5 W)} \\ G_T &= 10 \text{ dBi (todos los acimuts)} \\ d &\leq 3\,000 \text{ m} \\ f &= 3\,750\,000\,000 \text{ Hz} \\ F &= 20 \text{ dB (desvanecimiento y bloqueo)} \\ G_R &= 0 \text{ dBi (baja directividad)} \\ B &= 1\,600\,000 \text{ Hz} \\ T &= 4\,000 \text{ K, y por consiguiente} \\ C/N &= 12,5 \text{ dB.} \end{aligned}$$

3.6.2 Enlaces entre la estación terrena local y el satélite

Enlace ascendente desde la estación terrena local en la banda de 30 GHz del SFS

Igual que la ecuación (2):

siendo:

$$\begin{aligned}
 P_T &= 24 \text{ dBW (251 W)} \\
 G_T &= 53,63 \text{ dBi (antena de 2 m a 28,45 GHz)} \\
 d &\leq 39\,853\,746 \text{ m (mínima elevación de } 17^\circ) \\
 f &= 28\,450\,000\,000 \text{ Hz} \\
 F &= 11 \text{ dB (desvanecimiento } < 1\% \text{ del tiempo)} \\
 G_R &= 34 \text{ dBi (extremo de potencia mitad del haz de satélite de } 3^\circ) \\
 B &= 20\,800\,000 \text{ Hz} \\
 T &= 1\,000 \text{ K, y por consiguiente} \\
 C/N &= 12,5 \text{ dB.}
 \end{aligned}$$

Enlace ascendente desde la estación terrena local en la banda de 14 GHz del SFS

Igual que la ecuación (2):

siendo:

$$\begin{aligned}
 P_T &= 16,7 \text{ dBW (47 W)} \\
 G_T &= 47,63 \text{ dBi (antena de 2 m a 14,25 GHz)} \\
 d &\leq 40\,583\,982 \text{ m (mínima elevación de } 10^\circ) \\
 f &= 14\,250\,000\,000 \text{ Hz} \\
 F &= 4,5 \text{ dB (desvanecimiento } < 1\% \text{ del tiempo)} \\
 G_R &= 34 \text{ dBi (extremo de potencia mitad del haz de satélite de } 3^\circ) \\
 B &= 20\,800\,000 \text{ Hz} \\
 T &= 800 \text{ K, y por lo tanto} \\
 C/N &= 12,5 \text{ dB.}
 \end{aligned}$$

Enlace descendente hacia la estación terrena local en la banda de 20 GHz del SFS

Igual que la ecuación (2):

siendo:

$$\begin{aligned}
 P_T &= 13 \text{ dBW (20 W)} \\
 G_T &= 34 \text{ dBi (extremo del haz del satélite de } 3^\circ) \\
 d &= 39\,853\,746 \text{ m (mínima elevación de } 17^\circ) \\
 f &= 19\,700\,000\,000 \text{ Hz} \\
 F &= 7 \text{ dB (desvanecimiento } < 1\% \text{ del tiempo)} \\
 G_R &= 50,44 \text{ (antena de 2 m a 19,7 GHz)} \\
 B &= 20\,800\,000 \text{ Hz} \\
 T &= 300 \text{ K, y por consiguiente} \\
 C/N &= 10,7 \text{ dB.}
 \end{aligned}$$

Enlace descendente hacia la estación terrena local en la banda de 11 GHz del SFS

Igual que la ecuación (2):

siendo:

$$\begin{aligned}
 P_T &= 7,8 \text{ dBW (6 W)} \\
 G_T &= 34 \text{ dBi (extremo del haz del satélite de } 3^\circ) \\
 d &= 40\,583\,982 \text{ m (mínima elevación de } 10^\circ) \\
 f &= 10\,950\,000\,000 \text{ Hz} \\
 F &= 3,5 \text{ dB (desvanecimiento } < 1\% \text{ del tiempo)} \\
 G_R &= 45,34 \text{ (antena de 2 m a 10,95 GHz)} \\
 B &= 20\,800\,000 \text{ Hz} \\
 T &= 200 \text{ K, y por consiguiente} \\
 C/N &= 10,7 \text{ dB.}
 \end{aligned}$$

3.6.3 Enlaces entre la estación terrena central y el satélite

Enlace ascendente entre la estación terrena central y el satélite en la banda de 30 GHz del SFS

Igual que la ecuación (2):

siendo:

$$\begin{aligned}
 P_T &= 24,7 \text{ dBW (295 W)} \\
 G_T &= 63,88 \text{ dBi (antena de 6,5 m a 28,45 GHz)} \\
 d &= 38\,377\,622 \text{ m (elevación de } 32,7^\circ) \\
 f &= 28\,450\,000\,000 \text{ Hz} \\
 F &= 16 \text{ dB (desvanecimiento } < 0,1\% \text{ del tiempo)} \\
 G_R &= 36 \text{ dBi (en } 1^\circ \text{ respecto al eje del haz del satélite)} \\
 B &= 7\,800\,000 \text{ Hz} \\
 T &= 1\,000 \text{ K, y por consiguiente} \\
 C/N &= 25,0 \text{ dB.}
 \end{aligned}$$

Enlace ascendente entre la estación terrena central y el satélite en la banda de 14 GHz del SFS

Igual que la ecuación (2):

siendo:

$$\begin{aligned}
 P_T &= 14,3 \text{ dBW (26,9 W)} \\
 G_T &= 57,86 \text{ dBi (antena de 6,5 m a 14,25 GHz)} \\
 d &= 38\,656\,773 \text{ m (elevación de } 29,5^\circ) \\
 f &= 14\,250\,000\,000 \text{ Hz} \\
 F &= 6,5 \text{ (desvanecimiento } < 0,1\% \text{ del tiempo)} \\
 G_R &= 36 \text{ dBi (en } 1^\circ \text{ respecto al eje del haz del satélite)} \\
 B &= 7\,800\,000 \text{ Hz} \\
 T &= 800 \text{ K, y por consiguiente} \\
 C/N &= 25,0 \text{ dB.}
 \end{aligned}$$

Enlace descendente hacia la estación terrena central en la banda de 20 GHz del SFS

Igual que la ecuación (2):

siendo:

$$\begin{aligned}
 P_T &= 15,4 \text{ dBW (35 W)} \\
 G_T &= 36 \text{ dBi (en } 1^\circ \text{ respecto al eje del haz del satélite)} \\
 d &= 38\,377\,622 \text{ m (elevación de } 32,7^\circ) \\
 f &= 19\,700\,000\,000 \text{ Hz} \\
 F &= 12 \text{ dB (desvanecimiento } < 0,1\% \text{ del tiempo)} \\
 G_R &= 60,68 \text{ dBi (antena de 6,5 m a 19,7 GHz)} \\
 B &= 7\,800\,000 \text{ Hz} \\
 T &= 300 \text{ K, y por consiguiente} \\
 C/N &= 25,0 \text{ dB.}
 \end{aligned}$$

Enlace descendente hacia la estación terrena central en la banda de 11 GHz del SFS

Igual que la ecuación (2):

siendo:

$$\begin{aligned}
 P_T &= 9,7 \text{ dBW (9,3 W)} \\
 G_T &= 36 \text{ dBi (en } 1^\circ \text{ respecto al eje del haz del satélite)} \\
 d &= 38\,656\,773 \text{ m (elevación de } 29,5^\circ) \\
 f &= 10\,950\,000\,000 \text{ Hz} \\
 F &= 8 \text{ dB (desvanecimiento } < 0,1\% \text{ del tiempo)} \\
 G_R &= 55,58 \text{ dBi (antena de 6,5 m a 10,95 GHz)} \\
 B &= 7\,800\,000 \text{ Hz} \\
 T &= 200 \text{ K, y por consiguiente} \\
 C/N &= 25,0 \text{ dB.}
 \end{aligned}$$

4 Capacidad por satélite (C_S)

Como puede deducirse de las Figs. 11 y 13, cada uno de los 64 transpondedores en este ejemplo funcionará en modo una sola portadora y transmitirá una portadora a 26 Mbit/s. Por consiguiente, la capacidad total por satélite será $C_S = 64 \times 26 = 1\,664$ Mbit/s.

En el modo de una sola portadora por transpondedor no se requiere una reducción, por lo que de los balances de enlace precedentes se desprende que para los sistemas a 20/30 GHz bastaría con transpondedores capaces de generar 35 W en el nivel de saturación y para los sistemas a 11/14 GHz bastaría con transpondedores capaces de generar 9,3 W en el nivel de saturación. Los requisitos de potencia en las etapas anteriores a la de salida son relativamente pequeños. Suponiendo una eficiencia de conversión de potencia del 33% de la potencia primaria total necesaria, para alimentar la carga útil se precisarán unos $(64 \times 35)/0,33 = 6,8$ kW para los satélites a 20/30 GHz o $(64 \times 9,3)/0,33 = 1,8$ kW para los satélites a 11/14 GHz.

La introducción de abundantes sistemas de multiplexación y almacenamiento temporal en cada estación terrena comunitaria potenciaría el número de usuarios a los que la red podrá dar servicio simultáneamente.

5 Capacidad total posible (C_T)

De acuerdo con los cálculos del § 3 del Anexo 1, los mínimos ángulos de elevación seleccionados (17° en el caso de 20/30 GHz y 10° para 11/14 GHz), dan lugar a los siguientes intervalos de longitud para los satélites que dan servicio a la zona de referencia circular de $10\,000\,000\text{ km}^2$, que se muestran en la Fig. 12:

- para 20/30 GHz, de $23,4^\circ$ W a $74,3^\circ$ E, un intervalo de longitud de $97,7^\circ$;
- para 11/14 GHz, de $30,1^\circ$ W a $81,0^\circ$ E, un intervalo de longitud de $111,1^\circ$.

Utilizando el método descrito en la Fig. 7 y el texto que le acompaña, la separación mínima de longitud entre satélites del tipo descrito en el presente Anexo para que la interferencia entre satélites adyacentes sea lo suficientemente pequeña puede ser, desde el punto de vista técnico, inferior a 1° en ambos casos. Ahora bien, habida cuenta de otros factores, como los de orden práctico en el control de satélites, las autoridades que conceden licencias estipulan por regla general una separación mínima de 2° entre satélites adyacentes que utilizan la misma frecuencia y con la misma cobertura, valor que se ha considerado también adecuado para estos cálculos. Por ello, el número total de sistemas del tipo descrito en el presente Anexo que podrían dar servicio simultáneamente a la zona de referencia es de 48 para la banda 20/30 GHz y de 55 para la banda 11/14 GHz.

En resumidas cuentas, la capacidad total que probablemente podrían proporcionar estos sistemas en una zona ecuatorial de $10\,000\,000\text{ km}^2$ con una anchura de banda de 500 MHz en el enlace ascendente y de 500 MHz en el descendente, es igual a $48 \times 1\,664\text{ Mbit/s} = 79,872\text{ Gbit/s}$ para el caso de 20/30 GHz y $55 \times 1\,664\text{ Mbit/s} = 91,52\text{ Gbit/s}$ para el caso de 11/14 GHz. No obstante, como es preciso compartir frecuencias con los sistemas del SFS existentes, probablemente no se podrá obtener esta capacidad en el futuro previsible, especialmente en las bandas de frecuencia más bajas.
