

RECOMENDACIÓN UIT-R S.1593

Metodología para la compartición de frecuencias entre ciertos tipos de sistemas homogéneos del servicio fijo por satélite no geoestacionario en órbitas elípticas muy inclinadas en las bandas de frecuencias 4/6 GHz y 11/14 GHz

(Cuestión UIT-R 231/4)

(2002)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que según el Reglamento de Radiocomunicaciones muchas bandas de frecuencias del servicio fijo por satélite (SFS) pueden utilizarse tanto en las redes de satélites geoestacionarios (OSG) como no OSG;
- b) que está apareciendo la tecnología necesaria para que puedan ponerse en funcionamiento sistemas redes de satélites del SFS no OSG capaces de prestar servicios regionales o mundiales a pequeñas estaciones terrenas de manera rentable;
- c) que algunos sistemas del SFS no OSG no están diseñados para emplear la técnica de reducción de la interferencia de diversidad de satélites;
- d) que los estudios han revelado que sin la utilización de técnicas de reducción de la interferencia la compartición de las mismas bandas de frecuencias por muchos sistemas del SFS no OSG no será factible cuando el diseño de estos sistemas varía de manera importante;
- e) que los estudios han revelado que múltiples sistemas del SFS no OSG con un diseño homogéneo pueden compartir entre sí las mismas bandas de frecuencias con sólo utilizar una técnica de reducción de la interferencia;
- f) que para los sistemas del SFS no OSG con un diseño de órbitas muy elípticas, la implementación de la diversidad de satélites implica un diseño costoso y complejo, lo que puede hacer difícil la compartición de frecuencias entre tales sistemas y otros tipos de sistemas del SFS no OSG;
- g) que múltiples sistemas del SFS no OSG que funcionan en las bandas 11/14 GHz y 4/6 GHz y utilizan un diseño orbital muy elíptico (por ejemplo el USAKUS2 descrito en la Recomendación UIT-R S.1328) pueden emplear técnicas geométricas de reducción de la interferencia para compartir entre sí las frecuencias mediante varios métodos de separación de satélites, incluido el entrelazado de satélites dentro de los planos orbitales,

recomienda

1 que en las bandas 4/6 GHz y 11/14 GHz se utilice la metodología presentada en el Anexo 1 para analizar la compartición de frecuencias entre sistemas de satélites del SFS no OSG con la misma dirección y frecuencias y con diseño de órbitas homogéneas muy elípticas y subgeoestacionarias; es decir, órbitas en las que los apogeos, los perigeos y los ángulos de inclinación de los sistemas son idénticos.

NOTA 1 – La metodología que se describe en el Anexo 1 también puede aplicarse a otros tipos de sistemas del SFS no OSG. Se requiere un estudio adicional para determinar si las perspectivas de compartición son diferentes entre múltiples sistemas homogéneos del SFS no OSG del tipo considerado en el Anexo 1 y sistemas no homogéneos del SFS no OSG.

ANEXO 1

Metodología para la compartición de frecuencias entre ciertos tipos de sistemas homogéneos del SFS no OSG en órbitas elípticas muy inclinadas en las bandas de frecuencias 4/6 GHz y 11/14 GHz

1 Introducción

La metodología presentada en este Anexo trata sobre la compartición entre ciertos tipos de sistemas homogéneos del SFS no OSG en las bandas de frecuencias 4/6 GHz y 11/14 GHz. Este método se aplica a los sistemas con órbitas homogéneas; es decir, sistemas que tienen idénticos apogeos, perigeos y ángulos de inclinación. Los sistemas deben tener exactamente la misma traza orbital del satélite en las partes activas de sus órbitas. La diferencia estará en la fase de los satélites en la traza orbital. La metodología se aplica a los sistemas diseñados de manera que no se crucen las partes de la órbita en la que los satélites transmiten o reciben (arcos activos). El método incluye el entrelazado de los satélites dentro de la misma traza orbital cuando existe compartición entre múltiples sistemas del SFS no OSG. Por lo general es aplicable a los sistemas no OSG que emplean órbitas muy elípticas en las que los satélites sólo transmiten o reciben en una cierta parte de la órbita. No obstante, también puede aplicarse a otros sistemas no OSG siempre que las partes activas de la órbita no se crucen. Este método elimina la interferencia en línea ya que los arcos activos no se cruzan, lo cual significa que no habrá ninguna necesidad de utilizar estrategias de conmutación complicadas para evitar los sucesos de interferencia en línea ni será necesario conocer las posiciones exactas de los satélites en otras constelaciones ya que estarán escalonados de tal manera que siempre habrá una separación mínima entre dos satélites en los sistemas adyacentes. El Apéndice 1 a este Anexo contiene un ejemplo de aplicación de esta metodología.

2 Descripción de la metodología

La aplicación de esta metodología consta de los siguientes Pasos:

Paso 1: Seleccionar un mínimo ángulo de separación de la anomalía verdadera entre los satélites en constelaciones adyacentes.

Se trata del ángulo de separación que forman dos satélites adyacentes en dos constelaciones cerca del apogeo, cuando los satélites en las constelaciones adyacentes están a la menor distancia. En las demás posiciones del arco activo (o en cualquier otra parte de la órbita) los satélites en los sistemas adyacentes están separados por una distancia mayor. El método que aquí se sigue consiste en seleccionar un mínimo ángulo de separación de la anomalía verdadera entre dos satélites que están en constelaciones adyacentes alrededor del apogeo. Como el apogeo es el punto en que los satélites se desplazan a la velocidad más lenta, si los satélites en las constelaciones adyacentes están ubicados simétricamente alrededor del apogeo ésta será la situación en la que los satélites estarán más cercanos unos de otros. Por lo tanto, se elegirá el apogeo como el centro de anomalía verdadera y las anomalías verdaderas de los satélites en las dos constelaciones serán igual a la anomalía verdadera en el apogeo más la mitad del mínimo ángulo de separación de las anomalías verdaderas y a la anomalía verdadera en el apogeo menos la mitad del mínimo ángulo de separación de la anomalía verdadera. Las anomalías verdaderas resultantes (E) para los dos satélites se dan en las ecuaciones (1) y (2):

$$E_1 = E(\text{apogeo}) + \frac{\text{Ángulo de separación}}{2} \quad \text{grados} \quad (1)$$

$$E_2 = E(\text{apogeo}) - \frac{\text{Ángulo de separación}}{2} \quad \text{grados} \quad (2)$$

Paso 2: Determinar las posiciones orbitales (latitud, longitud y altitud) de los satélites que están situados a la mínima separación de la anomalía verdadera.

A partir de los valores de las anomalías verdaderas y los demás parámetros orbitales del sistema, es posible calcular la anomalía de excentricidad (E_e), la anomalía media (E_m) y el tiempo (t) (en relación con el tiempo del nodo ascendente). Con estos valores se puede calcular la latitud, la longitud y la altitud orbital de los dos satélites. Las ecuaciones pertinentes para estos cálculos son las siguientes:

$$E_e = 2 \cdot \text{tg}^{-1} \left(\text{tg} \left(\frac{E}{2} \right) \sqrt{\frac{1-e}{1+e}} \right) \quad \text{grados} \quad (3)$$

donde e es la excentricidad de la órbita.

$$E_m = E_e - e \text{ sen } E_e \quad \text{grados}^* \quad (4)$$

$$t = \frac{T}{360} \cdot (E_m - E_{ma}) + t_a \quad \text{s} \quad (5)$$

donde:

T : periodo de la órbita

E_{ma} : anomalía media al tiempo del nodo ascendente, t_a .

$$\text{long} = \text{tg}^{-1}(\cos(i) \cdot \text{tg}(\theta_p + E)) + \Lambda - \omega_e \cdot (t - t_a) \quad \text{grados} \quad (6)$$

donde:

i : ángulo de inclinación de la órbita (grados)

θ_p : argumento del perigeo de la órbita (grados)

Λ : longitud del nodo ascendente de la órbita (grados)

ω_e : velocidad de rotación de la Tierra (grados/s)

$$\text{lat}_{\text{geocéntrica}} = \text{sen}^{-1}[\text{sen}(i) \cdot \text{sen}(\omega_p + E)] \quad \text{grados} \quad (7)$$

La latitud calculada en la ecuación (7) es la latitud geocéntrica. La latitud geográfica puede obtenerse de la latitud geocéntrica utilizando la ecuación (8):

$$\text{lat}_{\text{geográfica}} = \text{tg}^{-1} \left(\frac{1}{(1-J_\alpha)^2} \cdot \text{tg}(\text{lat}_{\text{geocéntrica}}) \right) \quad \text{grados} \quad (8)$$

donde J_α es el factor de achatamiento en los polos.

* La solución a esta ecuación se ha obtenido utilizando un desarrollo en serie trigonométrica de Lagrange.

$$Altitud = \alpha(1 - e \cdot \cos(E_e)) - R_e \quad \text{km} \quad (9)$$

donde:

α : semieje mayor de la órbita (km)

R_e : radio de la Tierra (km).

Paso 3: Determinar las posiciones de los otros sistemas de satélites que están dentro del mismo arco activo sobre la base de la mínima separación de las anomalías verdaderas y los parámetros orbitales del sistema.

La diferencia de la anomalía media entre los dos satélites que están más cercanos al punto de su apogeo permite el cálculo de los intervalos de tiempo que tardan en pasar los satélites sobre cualquier punto de la traza del satélite. Por ejemplo, si la diferencia de la anomalía media entre dos satélites es de 15° y el periodo orbital de ambos satélites es 8 h, transcurrirán $(E_m / 360) \times T = (15/360) \times 8 = 1/3 \text{ h} = 20 \text{ min}$ entre el paso de los dos satélites por cualquier punto de la órbita. Como los satélites en las distintas constelaciones siguen las mismas trazas, este dato permite calcular la posición de los satélites en las otras constelaciones en el preciso instante en que los dos primeros satélites están lo más cerca del punto de su apogeo (distanciados por la anomalía verdadera) con sólo sumar o restar la diferencia de tiempo entre los dos primeros satélites. En este ejemplo, si un satélite se adelanta 20 min en la misma traza orbital, el siguiente satélite (que está en otra constelación) pasará por ese punto de la órbita cuando el primero esté a la mitad de la separación de anomalía verdadera después de haber pasado el apogeo. Utilizando la diferencia de tiempo entre los dos primeros satélites (diferencia que se calcula en el Paso 1), puede calcularse el tiempo relativo al tiempo del nodo ascendente para cada uno de los otros satélites en los otros sistemas con sólo sumar la diferencia de tiempo al tiempo del satélite que ha pasado por el apogeo o restar la diferencia de tiempo al tiempo del satélite que está antes del apogeo. Dado el tiempo (relativo al tiempo del nodo ascendente) del satélite en el siguiente sistema, pueden calcularse la anomalía media, la anomalía de excentricidad, la anomalía verdadera, la latitud, la longitud y la altitud de ese satélite mediante las siguientes ecuaciones:

A partir del nuevo tiempo, puede calcularse la anomalía media:

$$E_m = \frac{360}{T} \cdot (t - t_a) + E_{ma} \quad \text{grados} \quad (10)$$

La anomalía de excentricidad se calcula aplicando un método iterativo a la ecuación (4). La anomalía verdadera se calcula posteriormente mediante la ecuación:

$$E = 2 \cdot \text{tg}^{-1} \left(\text{tg} \left(\frac{E_e}{2} \right) \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \right) \quad \text{grados} \quad (11)$$

La latitud, la longitud y la altitud del satélite en ese instante pueden calcularse utilizando las ecuaciones (6) a (9). El intervalo de tiempo se suma o resta a cada nuevo satélite hasta que el satélite ya no se encuentre en el arco activo. Con este procedimiento se obtienen las posiciones de todos los satélites en el arco activo.

Paso 4: Determinar el número de satélites y, por lo tanto, de sistemas que están en el arco activo.

Se trata de un procedimiento sencillo que consiste únicamente en sumar el número de satélites determinados en el Paso 3 que se encuentran dentro del arco activo sobre la base de la mínima separación de la anomalía verdadera. Puede suceder que el satélite que entra en el arco activo y el que sale del arco activo pertenezcan al mismo sistema. En estos casos, el número total de sistemas que se encuentran en el arco activo será el número total de satélites menos uno.

Paso 5: Seleccionar un satélite que esté en el sistema de satélites deseado, calcular la interferencia causada por cada uno de los otros sistemas de satélites en el sistema deseado tanto para el enlace ascendente como para el descendente y determinar la interferencia combinada que todos los sistemas interferentes producen en el sistema deseado.

Después de elegir el satélite deseado se selecciona la ubicación de la estación terrena para el sistema deseado. Esta selección puede hacerse de manera aleatoria o puede utilizarse una ubicación de la estación terrena de caso más desfavorable. En el enlace ascendente, se calcula el ángulo fuera del eje para la antena de la estación terrena interferente (es el ángulo que forma la dirección del satélite con el que está comunicando la estación terrena y la dirección del satélite deseado). En el enlace descendente, se calcula el ángulo fuera del eje para la antena de la estación terrena deseada (es el ángulo que forma la dirección del satélite deseado y la dirección del satélite en el sistema interferente). Las contribuciones de interferencia de cada uno de los sistemas interferentes sobre el sistema deseado se calculan utilizando la ecuación (12) para el enlace ascendente y la ecuación (13) para el descendente.

$$I_{\uparrow} = P_{ET} + G_{ET,t}(\theta_i) - (32,45 + 20 \log(f_{\uparrow} \cdot d_{\uparrow})) + G_{s,r} \quad \text{dBW} \quad (12)$$

$$I_{\downarrow} = P_s + G_{s,t} - (32,45 + 20 \log(f_{\downarrow} \cdot d_{\downarrow})) + G_{ET,r}(\theta_w) \quad \text{dBW} \quad (13)$$

donde:

P_{ET} : potencia transmitida por la estación terrena interferente (dBW)

θ_i : ángulo fuera del eje de la estación terrena interferente (grados)

$G_{ET,t}(\theta_i)$: ganancia de la antena de la estación terrena interferente en la dirección del satélite deseado (dBi)

f_{\uparrow} : frecuencia del enlace ascendente (MHz)

d_{\uparrow} : distancia entre la estación terrena interferente y el satélite deseado (km)

$G_{s,r}$: ganancia de la antena receptora del satélite deseado (dBi)

P_s : potencia transmitida del satélite interferente (dBW)

$G_{s,t}$: ganancia de la antena transmisora del satélite interferente (dBi)

f_{\downarrow} : frecuencia del enlace descendente (MHz)

d_{\downarrow} : distancia entre el satélite interferente y la estación terrena deseada (km)

θ_w : ángulo fuera del eje de la estación terrena deseada (grados)

$G_{ET,r}(\theta_w)$: ganancia de la antena de la estación terrena deseada en la dirección del satélite interferente (dBi).

La interferencia combinada se calcula mediante la ecuación (14).

$$I_{combinada} = 10 \log \sum_1^n 10^{\frac{I_n}{10}} \quad \text{dBW} \quad (14)$$

donde:

n : número de sistemas de satélites interferentes

I_n : contribución a la interferencia del n -ésimo sistema.

Paso 6: Calcular el valor resultante de $C/(I+N)$ debido a la interferencia combinada causada por estos sistemas interferentes para el enlace ascendente y para el enlace descendente en el balance del enlace del sistema deseado y calcular el valor de $C/(I+N)$ del enlace total. Determinar si el sistema satisface los criterios de calidad de funcionamiento necesarios. Cabe señalar que, en lugar de $C/(I+N)$, puede utilizarse otra metodología de evaluación de interferencias, como I/N o $\Delta T/T$.

La resultante $C/(I+N)$ para el enlace ascendente y el descendente se calculan mediante las ecuaciones (15) y (16).

$$I + N = 10 \log \left(10^{\frac{I_{combinada}}{10}} + 10^{\frac{N}{10}} \right) \quad \text{dBW} \quad (15)$$

$$\frac{C}{I + N} = C - (I + N) \quad \text{dB} \quad (16)$$

donde:

N : densidad de potencia de ruido y es igual a $k T B$

donde:

k : constante de Boltzmann

T : temperatura de ruido del receptor del satélite deseado o de la estación terrena deseada (K)

B : anchura de banda (Hz).

El valor $C/(I+N)$ para todo el enlace se calcula utilizando la ecuación (17).

$$\left(\frac{C}{I + N} \right)_{total} = -10 \log \left(\sum 10^{-\left(\frac{C}{I + N} \right)_{\uparrow} / 10} + 10^{-\left(\frac{C}{I + N} \right)_{\downarrow} / 10} + 10^{-\left(\frac{C}{I + N} \right)_{otras} / 10} \right) \quad \text{dB} \quad (17)$$

donde:

$C/(I+N)_{total}$: valor de $C/(I+N)$ del enlace total

$C/(I+N)_{otras}$: valor de $C/(I+N)$ del enlace debido a otras fuentes de interferencia, como la intermodulación, la polarización cruzada y haces múltiples.

Paso 7: Repetir los Pasos 5 y 6 para cada satélite como si fueran el sistema deseado.

Paso 8: Si no se satisfacen los requisitos de calidad de funcionamiento del balance del enlace, seleccionar otro mínimo ángulo de separación y volver al Paso 2.

APÉNDICE 1

AL ANEXO 1

Ejemplo de aplicación de la metodología

1 Introducción

En este Apéndice se da un ejemplo de aplicación de la metodología descrita en la presente Recomendación. Para ello se utilizará el sistema USAKU-H2.

2 Parámetros del sistema USAKU-H2 que se utilizan en el análisis

El sistema USAKU-H2 propone usar las órbitas elípticas inclinadas subgeosíncronas para garantizar una gran separación angular de los satélites activos con respecto a la OSG. A continuación se describen los parámetros para el sistema que se utilizan en este análisis y que figuran en el Cuadro 1. Puede encontrarse información más detallada sobre este sistema en la Recomendación UIT-R S.1328. Los satélites en este sistema sólo son activos en ciertas partes de las órbitas, y esta característica es la que da lugar a unos ángulos de separación del satélite activo con respecto al arco OSG de al menos 40°.

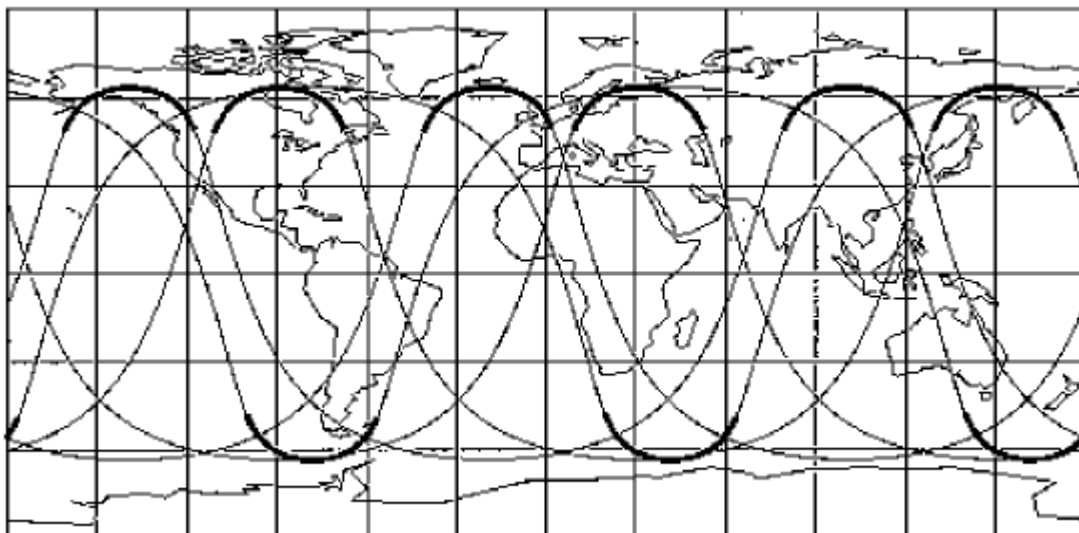
El sistema USAKU-H2 está compuesto de tres subconstelaciones de cinco satélites -dos para el funcionamiento operación en el Hemisferio Norte y una para el funcionamiento en el Hemisferio Sur. Los arcos activos de los satélites USAKU-H2 en cada subconstelación se producen únicamente cuando los puntos subsatelitales de los satélites se encuentran en latitudes superiores a 45° N o inferiores a 45° S, respectivamente. En estas posiciones, los satélites presentan ángulos de elevación muy altos sobre gran parte de sus zonas de servicio en los Hemisferios Norte y Sur. De esta forma el sistema USAKU-H2 logra una combinación de ángulos de elevación muy altos de los satélites activos en la zona de servicio, bajos retardos de propagación de la señal en comparación con la que se produce en el caso de satélites geoestacionarios, número limitado de transferencias entre satélites y elevada separación angular con respecto a la OSG. También proporciona una distribución no uniforme de la capacidad en los Hemisferios Norte y sur de manera proporcional a la demanda. En la Fig. 1 se muestra la traza del punto subsatelital del sistema USAKU-H2, con los arcos de servicio activos indicados por las líneas en negritas.

CUADRO 1

Parámetros del sistema USAKU-H2 que se utilizan en el análisis

Número de satélites	15
Número de planos	15
Número de satélites por plano	1
Inclinación orbital (grados)	63,435
Periodo orbital (min)	480
Altitud del apogeo (km)	27 288,3
Altitud del perigeo (km)	517,4
Excentricidad	0,66

FIGURA 1

Traza del punto subsatelital del sistema USAKU-H2

El sistema USAKU-H2 utiliza la banda de frecuencias 14,0-14,5 GHz para los enlaces ascendentes de las estaciones de usuarios y las bandas de frecuencias 12,75-13,25 GHz, 13,8-14,0 GHz y 5 925-6 725 GHz para los enlaces ascendentes de las estaciones de pasarela. El sistema utiliza la banda de frecuencias 11,2-12,7 GHz para los enlaces descendentes de las estaciones de usuarios y las bandas de frecuencias 10,7-11,2 GHz y 3,7-4,2 GHz para los enlaces descendentes de las estaciones de pasarela.

3 Criterios de compartición que se utilizan en el análisis

En el pasado, la mayoría de los estudios han utilizado el criterio de I/N o de $\Delta T/T$ como base para la compartición entre múltiples sistemas no OSG. Este criterio es adecuado cuando se realizan estudios en los que se desconocen varios parámetros de los sistemas implicados. Sin embargo, cuando se analiza el potencial real de interferencia causada por sistemas del SFS no OSG en el sistema del SFS no OSG deseado, el factor determinante es el balance total del enlace del sistema deseado. La medición real para determinar la capacidad de compartición de múltiples sistemas del SFS no OSG es si cada uno de los sistemas implicados satisface todos los requisitos del balance del enlace en presencia de interferencia de otros sistemas.

Para este análisis, se supone que todos los sistemas del SFS no OSG tienen las mismas características orbitales que el sistema USAKU-H2 excepto que la fase de los satélites en las trazas diferirá una cierta cantidad (es decir, órbitas y trazas de los satélites homogéneas). Esto garantiza que los satélites de un sistema determinado están siempre a una mínima separación orbital dada de los satélites de los sistemas adyacentes. También se supone que los parámetros de transmisión para cada uno de los sistemas del SFS no OSG son iguales (es decir, balance de enlace). Por lo tanto, en este análisis se investigan la combinación de dos de las técnicas de reducción de interferencias descritas en la Recomendación UIT-R S.1431: las órbitas homogéneas y el balance del enlace.

El análisis considera la situación del caso más desfavorable donde los haces de antena de todos los satélites se concentran en la misma posición sobre la Tierra y el receptor o transmisor de las estaciones terrenas para cada uno de los sistemas están situados en esa posición. El análisis supone que todas las operaciones codireccionales se realizan a la misma frecuencia y con la misma polarización.

El análisis se basa en los balances del enlace típicos para el sistema USAKU-H2. Este sistema utiliza enlaces que unen el terminal de usuario con el satélite y éste con una estación pasarela o unen una estación pasarela con el satélite y éste con los terminales de usuario. En el análisis se observan los enlaces generales y se determina la interferencia combinada aceptable causada por los otros sistemas del SFS no OSG. Los balances del enlace típicos en condiciones de cielo despejado que se utilizan en este análisis se muestran en los Cuadros 2 y 3. En estos balances del enlace se supone que las estaciones terrenas pasarela emplean antenas de 5 m de diámetro y que las antenas de los terminales de usuario son de 0,45 m de diámetro. En los balances del enlace se supone además que el satélite está situado a la máxima distancia de la estación terrena, lo que da lugar a unos márgenes del enlace mínimos. Cabe destacar que el sistema utiliza control de potencia para que la señal recibida en la estación terrena o el satélite sea la misma independientemente de la altitud orbital del satélite. Se supone que todas las estaciones terrenas utilizadas en el análisis tienen el diagrama de ganancia de antena $36 - 25 \log(\theta)$.

CUADRO 2

Balances del enlace entre la estación pasarela y los usuarios (enlaces ascendentes de pasarela en las bandas de 5 925-6 725 MHz y 14,0-14,5 GHz, enlaces descendentes de terminales de usuarios en la banda 11,2-12,7 GHz)

Parámetros	Enlace ascendente de 6 GHz	Enlace ascendente de 14 GHz
Máxima distancia (km)	31 150	31 150
Frecuencia portadora del enlace ascendente (MHz)	6 325	14 250
Potencia de transmisión entregada a la antena de la estación terrena (W)	38,9	12,8
Ganancia de la antena de transmisión de la estación terrena (dBi)	48,2	55,1
p.i.r.e. de transmisión de la estación terrena (dBW)	64,1	66,2
Pérdidas atmosféricas y otras pérdidas (dB)	0,3	0,5
Pérdidas en el espacio libre (dB)	198,3	205,4
Ganancia de la antena de recepción del satélite (dBi)	33,0	38,0
Potencia de la señal recibida (dBW)	-101,5	-101,7
Temperatura de ruido de recepción del satélite (K)	600	600
Anchura de banda de ruido de la portadora (kHz)	45 000	45 000
Potencia de ruido del satélite (dBW)	-124,3	-124,3
C/N del enlace ascendente (dB)	22,7	22,6
Ganancia del canal del satélite (dB)	120	120
Potencia del transmisor del satélite (W)	70,1	67,1
Ganancia del transmisor del satélite (dBi) – en el borde de la zona de cobertura	35,0	35,0
p.i.r.e. del transmisor del satélite (dBW) – en el borde de la zona de cobertura	53,5	53,3
Frecuencia portadora del enlace descendente (MHz)	11 950	11 950
Pérdidas atmosféricas y otras pérdidas (dB)	0,5	0,5
Pérdidas en el espacio libre (dB)	203,9	203,9
Ganancia de la antena de recepción de la estación terrena (dBi)	32,8	32,8
Potencia de la señal recibida (dBW)	-118,1	-118,3
Temperatura de ruido del sistema de recepción (K)	110	110
Potencia de ruido del sistema de recepción (dBW)	-131,6	-131,6
C/N del enlace descendente (dB)	13,5	13,4
Velocidad binaria de la información (kbit/s)	36 000	36 000
C/I – Intermodulación (dB)	22	22
C/I – Polarización cruzada (dB)	25	25
C/I – Multihaz (dB)	18	18
C/(I + N) total (dB)	11,2	11,1
C/(I + N) total necesaria (dB)	3,0	3,0

CUADRO 3

Balances del enlace entre el usuario y la estación pasarela (enlaces ascendentes de usuarios en la banda 13,8-14,0 GHz, enlaces descendentes de pasarela en las bandas 3 700-4 200 MHz y 10,7-11,2 GHz)

Parámetros	Enlace descendente de 4 GHz	Enlace descendente de 11 GHz
Máxima distancia (km)	31 150	31 150
Frecuencia portadora del enlace ascendente (MHz)	13 900	13 900
Potencia de transmisión entregada a la antena de la estación terrena (W)	6,4	6,4
Ganancia de la antena de transmisión de la estación terrena (dBi)	34,3	34,3
p.i.r.e. de transmisión de la estación terrena (dBW)	42,4	42,4
Pérdidas atmosféricas y otras pérdidas (dB)	0,5	0,5
Pérdidas en el espacio libre (dB)	205,2	205,2
Ganancia de la antena de recepción del satélite (dBi) – con el borde de la zona de cobertura	35,0	35,0
Potencia de la señal recibida (dBW)	-128,3	-128,3
Temperatura de ruido de recepción del satélite (K)	600	600
Anchura de banda de ruido de la portadora (kHz)	2 500	2 500
Potencia de ruido del satélite (dBW)	-136,8	-136,8
C/N del enlace ascendente (dB)	8,5	8,5
Ganancia del canal del satélite (dB)	120	120
Potencia del transmisor del satélite (W)	0,15	0,15
Ganancia del transmisor del satélite (dBi)	33,0	38,0
p.i.r.e. del transmisor del satélite (dBW)	24,7	29,7
Frecuencia portadora del enlace descendente (MHz)	3 950	10 950
Pérdidas atmosféricas y otras pérdidas (dB)	0,2	0,5
Pérdidas en el espacio libre (dB)	194,3	203,1
Ganancia de la antena de recepción de la estación terrena (dBi)	44,1	53,7
Potencia de la señal recibida (dBW)	-125,7	-120,2
Temperatura de ruido del sistema de recepción (K)	80	110
Potencia de ruido del sistema de recepción (dBW)	-145,6	-144,2
C/N del enlace descendente (dB)	19,9	23,9
Velocidad binaria de la información (kbit/s)	2 000	2 000
C/I – Intermodulación (dB)	22	22
C/I – Polarización cruzada (dB)	25	25
C/I – Multihaz (dB)	18	18
C/(I + N) total (dB)	7,5	7,7
C/(I + N) total necesaria (dB)	3,0	3,0

4 Aplicación de la metodología

4.1 *Paso 1:* Seleccionar un mínimo ángulo de separación de la anomalía verdadera entre satélites en constelaciones adyacentes

Para este análisis se selecciona un mínimo ángulo de separación de anomalía verdadera igual a $6,7^\circ$. Como la anomalía verdadera en el apogeo es 180° , las anomalías verdaderas para los dos satélites más cercanos en constelaciones adyacentes son: $E_1 = 183,35^\circ$ y $E_2 = 176,65^\circ$.

4.2 *Paso 2:* Determinar las posiciones orbitales (latitud, longitud y altitud) de los satélites que están situados a la mínima separación de la anomalía verdadera

En el Cuadro 4 figuran los valores (calculados mediante las ecuaciones (3) a (9) de la anomalía de excentricidad (E_e), anomalía media (E_m), tiempo (t), latitud, longitud y altitud de los dos satélites que están cerca del apogeo.

CUADRO 4

Parámetros	Satélite N.º 1	Satélite N.º 2
Anomalía de excentricidad, E_e (grados)	187,39	172,61
Anomalía media, E_m (grados)	192,26	167,74
Tiempo, t (s)	12 460,4	10 502,5
Longitud (grados)	344,44	337,71
Latitud ($^\circ$ N)	63,39	63,39
Altitud (km)	27 176,99	27 176,99

4.3 *Paso 3:* Determinar las posiciones de los otros sistemas de satélites que están dentro del mismo arco activo sobre la base de la mínima separación de las anomalías verdaderas y los parámetros orbitales del sistema

A partir de la diferencia de la anomalía media dada en el Cuadro 4 se calcula el intervalo de tiempo entre pasadas del satélite sobre cualquier punto de la traza del satélite. El valor que se obtiene para el intervalo es de 1 957,9 s. La latitud, la longitud y la altitud de todos los satélites dentro del arco activo sobre la base de este intervalo se calculan mediante las ecuaciones (10), (11), y (6) a (9) y los resultados se muestran en el Cuadro 5.

CUADRO 5

Satélite N.º	Latitud ($^\circ$ N)	Longitud (grados)	Altitud (km)
3	61,83	331,37	27 177,0
4	61,83	350,79	27 177,0
5	58,60	325,98	26 279,9
6	58,60	356,17	26 279,9
7	53,39	321,66	24 448,7
8	53,39	0,50	24 448,7
9	45,27	317,98	17 593,3
10	45,27	4,18	17 593,3

- 4.4** *Paso 4:* Determinar el número de satélites, y por lo tanto de sistemas, que están en el arco activo

Según se muestra en el Cuadro 5, hay 10 satélites dentro del arco activo sobre la base de esta mínima separación de anomalía verdadera. Para el sistema USAKU-H2, el satélite que entra en el arco activo está en el mismo sistema en el que sale del arco activo, por lo tanto hay nueve sistemas de satélites.

- 4.5** *Paso 5:* Seleccionar un satélite que esté en el sistema de satélites deseado y calcular la interferencia causada por cada uno de los otros sistemas de satélites en el sistema deseado, tanto para el enlace ascendente como para el descendente y calcular la interferencia combinada causada por todos los sistemas interferentes en el sistema deseado

Se selecciona el satélite N.º 1 como el sistema deseado. Para este análisis las estaciones terrenas estaban situadas a la misma longitud que el satélite deseado y a la misma latitud que el satélite deseado menos 30°.

4.5.1 Interferencia causada al enlace de 6 GHz entre la estación pasarela y el usuario

4.5.1.1 Interferencia causada al enlace ascendente de pasarela de 6 GHz

El sistema USAKU-H2 está diseñado para utilizar control de potencia de manera que la potencia de la señal recibida (tanto en el enlace ascendente como en el descendente) permanezca constante en todos los arcos activos de los satélites. Basándose en los balances del enlace dados en el § 3 de este Apéndice, la potencia de transmisión de la estación terrena para lograr la potencia de la señal recibida necesaria en el enlace ascendente de pasarela se calcula del siguiente modo:

$$P_{ET} = C_{\uparrow} - G_{ET} + L_{\uparrow} + [32,45 + 20 \log(f_{\uparrow} \cdot d_{\uparrow})] - G_s \quad \text{dBW} \quad (18)$$

donde:

P_{ET} : potencia transmitida por la estación terrena deseada (dBW)

C_{\uparrow} : potencia de portadora recibida necesaria en el enlace ascendente (como figura en los balances del enlace) (dBW)

G_{ET} : ganancia de la antena de la estación terrena deseada en dirección del satélite deseado (dBi)

L_{\uparrow} : pérdidas de transmisión en el espacio libre y otras pérdidas, incluidas las atmosféricas, en el enlace ascendente (dB)

f_{\uparrow} : frecuencia del enlace ascendente (MHz)

d_{\uparrow} : distancia entre la estación terrena interferente y el satélite deseado (km)

G_s : ganancia de la antena receptora del satélite deseado (dBi).

El resultado de este cálculo para el enlace deseado es $P_{ET} = 15,08$ dBW. Todos los sistemas son homogéneos en los parámetros de la órbita y en los parámetros de transmisión, de manera que la potencia transmitida de cada una de las estaciones terrenas interferentes ha de ajustarse a fin de que cada enlace ascendente satisfaga la potencia de la señal receptora necesaria para su enlace ascendente de pasarela. Los otros parámetros de transmisión para cada uno de los demás sistemas son los indicados anteriormente. La contribución de interferencia de cada satélite se calcula utilizando la ecuación (12) y los resultados se muestran en el Cuadro 6. Para este análisis se ha utilizado un diagrama de ganancia de antena de la estación terrena de $36 - 25 \log(\theta)$.

CUADRO 6

Satélite N.º	P_{ET} (dBW)	θ_i (grados)	$G_{ET,t}(\theta_i)$ (dBi)	L_{\uparrow} (dB)	d_{\uparrow} (km)	f_{\uparrow} (MHz)	Pérdidas en el espacio libre (dB)	$G_{s,r}$ (dB)	I_{\uparrow} (dBW)
2	15,08	3,58	22,14	0,3	28 212,3	6 325	197,5	33	-127,55
3	14,77	3,87	21,29	0,3	28 212,3	6 325	197,5	33	-128,71
4	14,79	7,39	14,28	0,3	28 212,3	6 325	197,5	33	-135,71
5	14,12	8,63	12,61	0,3	28 212,3	6 325	197,5	33	-138,05
6	14,16	12,04	8,99	0,3	28 212,3	6 325	197,5	33	-141,60
7	13,02	15,15	6,49	0,3	28 212,3	6 325	197,5	33	-145,27
8	13,08	18,46	4,34	0,3	28 212,3	6 325	197,5	33	-147,36
9	11,21	25,41	0,88	0,3	28 212,3	6 325	197,5	33	-152,69
10	11,32	28,66	-0,43	0,3	28 212,3	6 325	197,5	33	-153,89

La potencia total de la señal interferente es $-124,37$ dBW. La potencia de ruido del satélite (obtenida a partir de los balances del enlace dados en el § 3 de este Apéndice) es $-124,3$ dBW. El valor de la relación $C/(I + N)$ resultante en el enlace ascendente es $19,83$ dB.

4.5.1.2 Interferencia causada al enlace ascendente de usuario de 11 GHz

Basándose en los balances del enlace dados en el § 3 de este Apéndice, la potencia de transmisión de la estación terrena necesaria para lograr la potencia de señal recibida requerida en el enlace ascendente de la estación de pasarela se calcula del siguiente modo:

$$P_s = C_{\downarrow} - G_s + L_{\downarrow} + [32,45 + 20 \log(f_{\downarrow} \cdot d_{\downarrow})] - G_{ET} \quad \text{dBW} \quad (19)$$

donde:

- P_s : potencia transmitida por el satélite deseado (dBW)
- C_{\downarrow} : potencia de portadora recibida necesaria en el enlace descendente (como figura en los balances del enlace) (dBW)
- G_s : ganancia de la antena transmisora del satélite deseado (dBi)
- L_{\downarrow} : pérdidas de transmisión en el espacio libre y otras pérdidas, incluidas las atmosféricas, en el enlace descendente (dB)
- f_{\downarrow} : frecuencia del enlace descendente (MHz)
- d_{\downarrow} : distancia entre el satélite interferente y la estación terrena deseada (km)
- G_{ET} : ganancia de antena de la estación terrena deseada en la dirección del satélite deseado (dBi).

El resultado de este cálculo para el enlace deseado es $P_{ET} = 17,61$ dBW. Todos los sistemas son homogéneos en los parámetros de la órbita y en los parámetros de transmisión, de manera que la potencia transmitida de cada una de las estaciones terrenas interferentes ha de ajustarse a fin de que cada enlace ascendente satisfaga la potencia de la señal receptora necesaria para su enlace ascendente de pasarela. Los otros parámetros de transmisión para cada uno de los demás sistemas son los indicados anteriormente. La contribución de interferencia de cada satélite se calcula utilizando la ecuación (12) y los resultados se muestran en el Cuadro 7. Para este análisis se ha utilizado un diagrama de ganancia de antena de la estación terrena de $36 - 25 \log(\theta)$.

CUADRO 7

Satélite N.º	P_s (dBW)	$G_{s,t}$ (dBi)	L_{\downarrow} (dB)	d_{\downarrow} (km)	f_{\downarrow} (MHz)	Pérdidas en el espacio libre (dB)	θ_w (grados)	$G_{ET,r}(\theta_w)$ (dBi)	I_{\downarrow} (dBW)
2	17,61	35	0,5	28 231,9	11,950	203,0	3,58	22,14	-128,76
3	17,30	35	0,5	27 237,6	11,950	202,7	3,87	21,29	-129,61
4	17,32	35	0,5	27 297,3	11,950	202,7	7,39	14,28	-136,62
5	16,65	35	0,5	25 273,5	11,950	202,1	8,62	12,61	-138,29
6	16,69	35	0,5	25 276,8	11,950	202,1	12,04	8,99	-141,91
7	15,54	35	0,5	22 250,1	11,950	200,9	15,15	6,49	-144,41
8	15,60	35	0,5	22 405,6	11,950	201,0	18,46	4,34	-146,56
9	13,74	35	0,5	18 072,6	11,950	199,1	25,41	0,88	-150,02
10	13,85	35	0,5	18 300,2	11,950	199,2	28,66	-0,43	-151,33

La potencia total de la señal interferente es $-125,33$ dBW. La potencia de ruido del satélite (obtenida a partir de los balances del enlace dados en el § 3 de este Apéndice) es $-131,6$ dBW. El valor de la relación $C/(I + N)$ resultante en el enlace ascendente es $6,31$ dB.

4.5.2 Interferencia causada al enlace de 14 GHz entre la estación pasarela y el usuario

Se realizan los mismos cálculos que en el § 4.5.1 para los otros cuatro enlaces considerando al Satélite N.º 1 como el sistema deseado. Los resultados se muestran en el Cuadro 8.

4.5.3 Interferencia causada al enlace de 4 GHz entre el usuario y la pasarela

Se realizan los mismos cálculos que en el § 4.5.1 para los otros cuatro enlaces considerando al Satélite N.º 1 como el sistema deseado. Los resultados se muestran en el Cuadro 8.

4.5.4 Interferencia causada al enlace de 11 GHz entre el usuario y la pasarela

Se realizan los mismos cálculos que en el § 4.5.1 para los otros cuatro enlaces considerando al Satélite N.º 1 como el sistema deseado. Los resultados se muestran en el Cuadro 8.

- 4.6** *Paso 6:* Calcular el valor resultante de $C/(I+N)$ debido a la interferencia combinada causada por estos múltiples sistemas interferentes para el enlace ascendente y para el enlace descendente en el balance del enlace del sistema deseado y calcular el valor de $C/(I+N)$ del enlace total. Determinar si el sistema satisface los criterios de calidad de funcionamiento necesarios

Mediante la ecuación (17) e incluyendo las contribuciones de la relación portadora/ruido (C/N) debidas a la intermodulación, la polarización cruzada y al multihaz, se determina un valor de $C/(I+N)$ del enlace total de 5,69 dB. El valor de $C/(I+N)$ del enlace necesario es 3,0 dB. El margen total del enlace es, por consiguiente, 2,69 dB.

- 4.7** *Paso 7:* Repetir los Pasos 5 y 6 para cada satélite como si fueran el sistema deseado

En el Cuadro 8 se muestran los resultados para todos los satélites en todos los enlaces.

CUADRO 8

Satélite deseado N.º	$C/(I+N)$ total en el enlace de 6 GHz entre la estación pasarela y el usuario (dB)	Margen del enlace total resultante en el enlace de 6 GHz entre la pasarela y el usuario (dB)	$C/(I+N)$ total en el enlace de 14 GHz entre la pasarela y el usuario (dB)	Margen del enlace total resultante en el enlace de 14 GHz entre la pasarela y el usuario (dB)	$C/(I+N)$ total en el enlace de 4 GHz entre el usuario y la pasarela (dB)	Margen del enlace total resultante en el enlace de 4 GHz entre el usuario y la pasarela (dB)	$C/(I+N)$ total en el enlace de 11 GHz entre el usuario y la pasarela (dB)	Margen del enlace total resultante en el enlace de 11 GHz entre el usuario y la pasarela (dB)
1	5,69	2,69	5,72	2,72	4,96	1,96	5,24	2,24
2	5,69	2,69	5,72	2,72	4,96	1,96	5,24	2,24
3	6,47	3,47	6,49	3,49	5,36	2,36	5,62	2,62
4	6,47	3,47	6,49	3,49	5,36	2,36	5,62	2,62
5	7,76	4,76	7,75	4,75	5,97	2,97	6,20	3,20
6	7,76	4,76	7,75	4,75	5,97	2,97	6,20	3,20
7	9,14	6,14	9,10	6,10	6,54	3,54	6,74	3,74
8	9,14	6,14	9,10	6,10	6,54	3,54	6,74	3,74
9	10,29	7,29	10,21	7,21	6,94	3,94	7,12	4,12
10	10,29	7,29	10,21	7,21	6,94	3,94	7,12	4,12

- 4.8** *Paso 8:* Si no se satisfacen los requisitos de calidad de funcionamiento del balance del enlace, seleccionar otro mínimo ángulo de separación y volver al Paso 2

Para la situación examinada en los puntos anteriores se satisfacen los requisitos de calidad de funcionamiento del balance del enlace.

5 Segunda aplicación de la metodología

La metodología descrita en esta Recomendación se aplicó al sistema USAKU-H2 utilizando un diagrama de ganancia de antena de la estación terrena de $32 - 25 \log(\theta)$. En el Cuadro 9 se muestran los resultados para cada satélite y cada enlace.

CUADRO 9

Satélite interferido N.º	$C/(I+N)$ total en el enlace de 6 GHz entre la pasarela y el usuario (dB)	Margen del enlace total resultante en el enlace de 6 GHz entre la pasarela y el usuario (dB)	$C/(I+N)$ total en el enlace de 14 GHz entre la pasarela y el usuario (dB)	Margen del enlace total resultante en el enlace de 14 GHz entre la pasarela y el usuario (dB)	$C/(I+N)$ total en el enlace de 4 GHz entre el usuario y la pasarela (dB)	Margen del enlace total resultante en el enlace de 4 GHz entre el usuario y la pasarela (dB)	$C/(I+N)$ total en el enlace de 11 GHz entre el usuario y la pasarela (dB)	Margen del enlace total resultante en el enlace de 11 GHz entre el usuario y la pasarela (dB)
1	5.37	2.37	5.41	2.41	4.72	1.72	5.00	2.00
2	5.37	2.37	5.41	2.41	4.72	1.72	5.00	2.00
3	5.81	2.81	5.84	2.84	4.98	1.98	5.25	2.25
4	5.81	2.81	5.84	2.84	4.98	1.98	5.25	2.25
5	6.60	3.60	6.62	3.62	5.41	2.41	5.67	2.67
6	6.60	3.60	6.62	3.62	5.41	2.41	5.67	2.67
7	7.59	4.59	7.59	4.59	5.91	2.91	6.15	3.15
8	7.59	4.59	7.59	4.59	5.91	2.91	6.15	3.15
9	8.63	5.63	8.60	5.60	6.38	3.38	6.60	3.60
10	8.63	5.63	8.60	5.60	6.38	3.38	6.60	3.60
11	9.57	6.57	9.51	6.51	6.76	3.76	6.96	3.96
12	9.57	6.57	9.51	6.51	6.76	3.76	6.96	3.96
13	10.42	7.42	10.33	7.33	7.05	4.05	7.24	4.24
14	10.42	7.42	10.33	7.33	7.05	4.05	7.24	4.24

6 Resumen y conclusiones

En este Apéndice aparece un ejemplo de aplicación de la metodología descrita en la presente Recomendación para múltiples sistemas del tipo USAKU-H2 que comparten frecuencias entre sí. En los resultados se pone de manifiesto que al menos nueve de dichos sistemas podrían compartir frecuencias suponiendo un diagrama de ganancia de antena fuera del eje de la estación terrena de $36 - 25 \log(\theta)$, y al menos 13 sistemas suponiendo que este diagrama sea $32 - 25 \log(\theta)$.