

RECOMENDACIÓN UIT-R S.1325-1

METODOLOGÍAS DE SIMULACIÓN PARA DETERMINAR ESTADÍSTICAS DE INTERFERENCIA A CORTO PLAZO ENTRE REDES DE SATÉLITES NO GEOESTACIONARIOS DEL SERVICIO FIJO POR SATÉLITE (SFS NO OSG) CODIRECCIONALES DE LA MISMA FRECUENCIA Y OTRAS REDES DEL SFS NO OSG U OSG

(Cuestiones UIT-R 206/4 y UIT-R 231/4)

(1997-2000)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que las emisiones procedentes de las estaciones terrenas así como de estaciones espaciales de una red de satélites (SFS OSG; SFS no OSG y enlaces de conexión del servicio móvil por satélite (SMS) no OSG) del SFS pueden provocar interferencia a otra red de satélites cuando ambas redes funcionan en las mismas bandas;
- b) que es conveniente establecer una metodología de simulación común para evaluar la interferencia entre sistemas con enlaces de conexión con la misma frecuencia y codireccionales cuando uno de los sistemas es no OSG;
- c) que es posible introducir algunas hipótesis simplificadoras para estos sistemas;
- d) que las simplificaciones introducidas en el *considerando* c) no deben afectar negativamente los resultados;
- e) que sería conveniente contar con un conjunto común de parámetros de entrada para cada uno de los dos sistemas de comunicaciones;
- f) que es preciso que la metodología considere el tipo de compensación del desvanecimiento para contrarrestar el desvanecimiento de la señal, tal como el control adaptativo de potencia;
- g) que la metodología debe poder calcular con precisión la dependencia en el tiempo de un solo fenómeno de interferencia para evaluar con mayor exactitud la influencia sobre el sistema interferido;
- h) que la gran mayoría de las redes del SFS no OSG están en órbitas circulares;
- j) que en las fases de notificación y registro de redes de satélites en la UIT no se dispone normalmente de información sobre el número de estaciones terrenas ni sobre su ubicación precisa,

recomienda

- 1** que la metodología indicada en el Anexo 1 se utilice para obtener los valores estadísticos de la probabilidad acumulativa a fin de evaluar la interferencia a corto plazo entre sistemas con enlaces codireccionales y a la misma frecuencia con sistemas que utilizan enlaces de conexión del SMS no OSG o una red del SFS no OSG;
- 2** que los resultados se evalúen comparándolos con un conjunto común de valores estadísticos previamente acordados;
- 3** que la metodología indicada en el Anexo 2 se puede utilizar para calcular la interferencia combinada total producida por una red de satélites no OSG en una red de satélites OSG y se puede utilizar para calcular la función de densidad acumulativa de la densidad de flujo de potencia equivalente ($dfpe$) para un determinado diámetro de antena de la estación terrena OSG o la $dfpe$ de la red no OSG en el sentido del enlace ascendente;
- 4** que las Notas siguientes se consideren parte de la presente Recomendación:

NOTA 1 – La interferencia a corto plazo se refiere a la distribución de probabilidad acumulativa en las proporciones de bits erróneos (o valores de la relación C/N) calculados para el 1% del tiempo o menos.

NOTA 2 – La metodología del Anexo 1 también puede utilizarse para evaluar si la interferencia durante un solo fenómeno casi en línea depende del tiempo.

NOTA 3 – El Anexo 2 indica una metodología para calcular la $dfpe_{\uparrow}$ y la $dfpe_{\downarrow}$ de una red no OSG. El Anexo 3 indica los planteamientos para relacionar la metodología del Anexo 1 para calcular la $dfpe_{\uparrow}$ y la $dfpe_{\downarrow}$ de una red no OSG.

NOTA 4 – Debe suponerse que el ruido es de naturaleza térmica y se expresa con referencia a la potencia de ruido total del sistema, incluido el ruido térmico de la antena a la entrada del demodulador.

NOTA 5 – Es necesario elaborar una metodología para caracterizar y calcular la interferencia a largo plazo entre redes del SFS no OSG y redes del SFS OSG.

NOTA 6 – En el Anexo 3 figura una descripción y un ejemplo de la metodología de cálculo.

NOTA 7 – El Anexo 4 proporciona una lista de temas para continuar los trabajos sobre esta Recomendación.

ANEXO 1

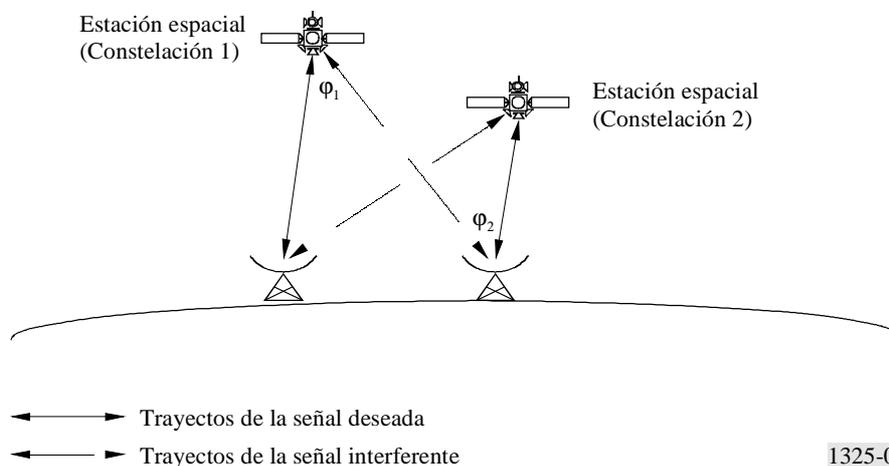
Metodología para determinar estadísticas de interferencia a corto plazo entre redes del SFS no OSG codireccionales de la misma frecuencia y otras redes del SFS no OSG u OSG

1 Descripción del método y del enfoque de simulación

El objeto de esta metodología es establecer un modelo de sistemas de satélites en sus órbitas y permitir a cada estación espacial y estación terrena realizar un seguimiento de sus orientaciones respectivas teniendo en cuenta a la vez la rotación de la Tierra. A lo largo de un periodo de tiempo se toman muestras de los resultados de la simulación a un ritmo relativamente elevado. Para cada muestra se calcula el producto de las ganancias en función de la distancia. Los datos sin procesar constituyen una historia temporal del nivel de interferencia en función del tiempo. Puede demostrarse que si no se utiliza control de potencia en los sistemas, el producto de las ganancias en función de la distancia (definido en la ecuación (2)) puede relacionarse directamente con el nivel de interferencia. Los datos sin procesar pueden evaluarse para calcular el porcentaje de tiempo por encima del cual el valor de dicho producto para todos los trayectos de interferencia se encuentra por encima de un cierto nivel. En la Fig. 1 se representa la geometría de la interferencia. Los trayectos de interferencia considerados son los siguientes:

| | Estación espacial (Constelación 1) | Estación terrena (Constelación 1) |
|---------------------------------------|--|--|
| Estación espacial (Constelación 2) | Ninguna | Enlace ascendente ₁ → Enlace ascendente ₂ Enlace descendente ₂ → Enlace descendente ₁ |
| Estación terrena (Constelación 2) | Enlace descendente ₁ → Enlace descendente ₂ Enlace ascendente ₂ → Enlace ascendente ₁ | Ninguna |

FIGURA 1
Geometría de la interferencia



Para determinar la relación interferencia/ruido, I_0/N_0 , puede utilizarse la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \frac{I_0}{N_0} &= \frac{P_t}{BW_{tx}} G_t(\varphi_1) G_r(\varphi_2) \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \frac{1}{k T} \frac{1}{L_p} \\ &= \frac{P_t}{BW_{tx}} \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{1}{k T} \frac{1}{L_p} \frac{G_t(\varphi_1) G_r(\varphi_2)}{4\pi R^2} \end{aligned} \quad (1)$$

siendo:

- P_t : potencia de transmisión disponible (W)
- BW_{tx} : anchura de banda de transmisión (Hz)
- $G_t(\varphi_1)$: ganancia de transmisión (intensidad relativa)
- $G_r(\varphi_2)$: ganancia del receptor (intensidad relativa)
- φ_1 : ángulo con respecto al eje de puntería del transmisor en dirección del receptor
- φ_2 : ángulo con respecto al eje de puntería del receptor en dirección del transmisor
- λ : longitud de onda del transmisor (m)
- R : distancia (m)
- k : constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)
- T : temperatura de ruido (K)
- L_p : factor de aislamiento por polarización.

Si no se utiliza control de potencia con compensación de distancia en los enlaces entre la estación espacial y la estación terrena, los únicos elementos de la ecuación (1) que son variables dependientes para la simulación variable en el tiempo son el ángulo de ganancia del receptor, el ángulo de ganancia del transmisor y la distancia entre el transmisor y el receptor. Para calcular I_0/N_0 puede multiplicarse el producto de las ganancias en función de la distancia por la constante:

$$\frac{P_t}{BW_{tx}} \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{1}{k T} \frac{1}{L_p}$$

Por ejemplo, el producto de las ganancias en función de la distancia para el enlace descendente de la estación espacial 1 al enlace descendente de la estación terrena 2 (Fig. 1) se determina de la forma siguiente:

$$\frac{G_t(\varphi_1) G_r(\varphi_2)}{4\pi R^2} \quad (2)$$

Para la evaluación de interferencias provenientes de redes de satélites con múltiples terminales terrenos, la interferencia proveniente de todos los terminales terrenos debe combinarse para determinar la interferencia total. Los datos de interferencia se pueden combinar en cada intervalo de tiempo durante la simulación, o combinando los datos a partir de un conjunto de simulaciones individuales. En ambos casos se debe considerar la discriminación de la antena del satélite OSG en cada terminal terreno, cuando se calcula la interferencia total del enlace ascendente, $dfpe_{\uparrow}$.

Para los cálculos de interferencia, es necesario tener en cuenta la discriminación de la antena receptora del satélite OSG para representar con mayor precisión la interferencia vista desde el receptor del satélite. La definición de $dfpe_{\uparrow}$ será:

$$dfpe_{\uparrow} = 10 \log \left(\sum_i 10^{P_i/10} \frac{G_t(\varphi_{1i}) G_r(\varphi_{2i})}{4\pi R_i} \frac{1}{G_{r_{m\acute{a}x}}} \right) \quad (2a)$$

donde:

- $G_t(\varphi_{1i})$: ganancia de la antena transmisora de la estación terrena en la dirección del satélite interferido
- $G_r(\varphi_{2i})$: ganancia de la antena receptora del satélite en la dirección de la fuente de interferencia
- $G_{r_{m\acute{a}x}}$: ganancia máxima de la antena receptora del satélite.

En términos de relación I_0/N_0 , la $dfpe_{\uparrow}$ se puede expresar como:

$$10^{dfpe_{\uparrow}/10} = \sum_i P_i \frac{G_t(\Phi_{1i})}{4\pi R_i^2} \frac{G_r(\Phi_{2i})}{G_{r_{max}}} \quad dfpe_{\uparrow} (\text{dB(W/(m}^2 \cdot \text{MHz)})), \quad P_i (\text{W/MHz}) \quad (2b)$$

$$10^{dfpe_{\uparrow}/10} = \sum_i \frac{P_{t_i}}{BW_{tx}} \frac{G_t(\Phi_{1i})}{4\pi R_i^2} \frac{G_r(\Phi_{2i})}{G_{r_{max}}} \quad dfpe_{\uparrow} (\text{dB(W/(m}^2 \cdot \text{Hz)})), \quad P_{t_i} (\text{W}) \quad (2c)$$

$$= \sum_i \frac{P_{t_i}}{BW_{tx}} \frac{G_t(\Phi_{1i})}{4\pi R_i^2} \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{1}{kT} \frac{1}{L_p} \right) \frac{G_r(\Phi_{2i})}{G_{r_{max}}} \left/ \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{1}{kT} \frac{1}{L_p} \right) \right. \quad (2d)$$

donde $dfpe_{\uparrow}$ se expresa en $\text{dB(W/(m}^2 \cdot \text{Hz))}$, P_{t_i} en W, y BW_{tx} es la anchura de banda de transmisión en Hz.

Introduciendo I_0/N_0 (ecuación (1)):

$$10^{dfpe_{\uparrow}/10} = \sum_i \frac{I_{0i}}{N_0} \left/ \left(G_{r_{max}} \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{1}{kT} \frac{1}{L_p} \right) \right. \quad (2e)$$

sea:

$$dfpe_{\uparrow} = 10 \log \left[\sum_i \frac{I_{0i}}{N_0} \left/ \left(G_{r_{max}} \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{1}{kT} \frac{1}{L_p} \right) \right. \right] \quad (2f)$$

$$dfpe_{\uparrow} = 10 \log \left(\sum_i \frac{I_{0i}}{N_0} \right) - \frac{G_{r_{max}}}{T} - 10 \log \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \right) - 228,6 + 10 \log (L_p) \quad \text{dB(W/(m}^2 \cdot \text{Hz))} \quad (2g)$$

2 Hipótesis de simulación

2.1 Modelo orbital

El modelo orbital para simular las estaciones espaciales en sus órbitas es aplicable a órbitas circulares donde se tiene en cuenta únicamente la precesión de la línea de nodos en el plano ecuatorial debida a la no esfericidad de la Tierra.

2.1.1 Discusión

El modelo orbital representa el movimiento de un satélite en un sistema geocéntrico inercial de coordenadas, como el representado en la Fig. 2. El origen de este sistema inercial se encuentra en el centro de la Tierra. El eje x apunta al primer punto de la constelación Aries (es decir, al equinoccio de primavera), el eje z es el eje de rotación medio de la Tierra y el eje y se determina como el producto cruzado de los vectores unitarios en dirección z y x; es decir, $\vec{y} = \vec{z} \times \vec{x}$.

El modelo orbital se basa en la ecuación del movimiento de Newton para un satélite que gira en una órbita circular en torno a una tierra perfectamente esférica. La característica principal de este movimiento que facilita su representación mediante un modelo es que el radio orbital y la velocidad del satélite son constantes. Estos parámetros están relacionados por la segunda ley de Newton. La ecuación del movimiento es:

$$\frac{m_{sv} v^2}{r} = \frac{G M_E m_{sv}}{r^2} \quad (3)$$

siendo:

m_{sv} : masa de la estación espacial

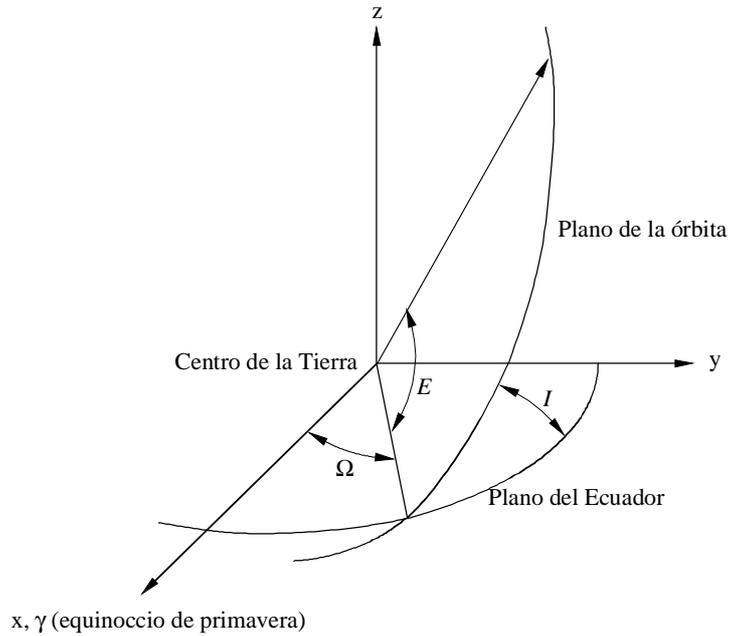
v : velocidad constante de la estación espacial

G : constante gravitacional de Newton ($6,673 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$)

r : radio de la órbita

M_E : masa de la Tierra ($5,974 \times 10^{24} \text{ kg}$).

FIGURA 2
 Representación de los elementos orbitales keplerianos



1325-02

La ecuación (3) puede describirse de la forma:

$$v^2 = \frac{G M_E}{r} = \frac{G M_E}{R_E^2} \frac{R_E^2}{r} \quad (4)$$

siendo R_E el radio de una Tierra perfectamente esférica (6 378 km). Como en la superficie de la Tierra:

$$mg = \frac{G M_E m}{R_E^2} \quad (5)$$

donde g es la aceleración debida a la gravedad en la superficie de la Tierra expresada por la ecuación:

$$g = \frac{G M_E}{R_E^2} = 9,806 \text{ m/s}^2 \quad (6)$$

la ecuación (4) puede describirse:

$$v^2 = g \frac{R_E^2}{r} \quad (7)$$

o:

$$v = R_E \sqrt{\frac{g}{r}} \quad (8)$$

El periodo de la órbita, T , viene dado por la expresión:

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi}{R_E} \sqrt{\frac{r^3}{g}} \quad (9)$$

Estas ecuaciones describen completamente la dinámica de un movimiento en órbita circular en torno a una Tierra perfectamente esférica.

La descripción de este movimiento en el sistema de coordenadas geocéntrico representado en la Fig. 2 se basa en la especificación de la posición del satélite utilizando los parámetros orbitales keplerianos. Estas variables se definen de la forma siguiente:

- Ω : ascensión recta del nodo ascendente (RAAN) de la órbita. Es el ángulo medido a partir del eje x en el plano ecuatorial (plano x-y).
- I : inclinación de la órbita. Es el ángulo medido desde el plano ecuatorial al plano orbital de la estación espacial.
- E : argumento de latitud (anomalía verdadera). Es el ángulo medido desde la línea de nodos al vector radio en la posición del vehículo espacial.

Cabe señalar que la anomalía verdadera es función de la posición angular de la estación espacial en el instante t_0 y de la velocidad angular de la estación espacial. Puede expresarse como:

$$E = E_0 + \omega t \quad (10)$$

donde:

- E_0 : posición angular de la estación espacial en el instante t_0 (rad)
- ω : velocidad angular de la estación espacial (rad/s)
- = v/r .

Para tener en cuenta la precesión orbital, la RAAN de la órbita también es función de la RAAN en el instante t_0 y de la velocidad de precesión orbital. Puede expresarse como:

$$\Omega = \Omega_0 + \Omega_r t \quad (11)$$

donde:

- Ω_0 : RAAN de la estación espacial en el instante t_0 (rad)
- Ω_r : velocidad de precesión orbital de la estación espacial (rad/s).

$$\Omega_r = -\frac{3}{2} J_2 \cos(I) R_E^2 \frac{\sqrt{r\mu}}{r^4} \quad (12)$$

donde:

- μ : constante de atracción de la Tierra ($3,986 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{s}^2$)
- J_2 : segundo armónico de la constante potencial de la Tierra ($1\,082,6 \times 10^{-6}$).

La representación de la posición de la estación espacial en términos del sistema geocéntrico de coordenadas inerciales es la siguiente:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} \cos \Omega \cos E - \sin \Omega \cos I \sin E \\ \sin \Omega \cos E + \cos \Omega \cos I \sin E \\ \sin I \sin E \end{bmatrix} \quad (13)$$

La representación de la velocidad de la estación espacial en el sistema de coordenadas inercial geocéntrico, ignorando la variación relativamente lenta en Ω es:

$$\begin{bmatrix} dx/dt \\ dy/dt \\ dz/dt \end{bmatrix} = r\omega \begin{bmatrix} \cos \Omega \sin E - \sin \Omega \cos I \cos E \\ \sin \Omega \sin E + \cos \Omega \cos I \cos E \\ \sin I \cos E \end{bmatrix} \quad (14)$$

2.2 Consideraciones sobre el aislamiento por polarización

El factor de aislamiento por polarización, L_p , es la cantidad de aislamiento por polarización que puede suponerse entre el transmisor y el receptor (véase el Anexo 4).

2.3 Hipótesis de explotación

2.3.1 Ubicación de las estaciones terrenas no OSG

La simulación precisa tener en cuenta la cantidad de estaciones terrenas no OSG, su ubicación geográfica sobre la superficie de la Tierra y la cantidad de estaciones terrenas que podrían funcionar en la misma frecuencia que las estaciones terrenas de la red no OSG. En algunos casos puede que no se disponga de información sobre el número de estaciones terrenas no OSG ni de su emplazamiento exacto. Por lo tanto, la simulación se vería afectada en los términos siguientes:

- Se desconoce el número de estaciones terrenas no OSG (estaciones típicas) y sus coordenadas,
- Se conoce el número de estaciones terrenas no OSG y sus coordenadas.

En el caso a), se podrían estimar las estadísticas de interferencia suponiendo que, a largo plazo, el tráfico medio (carga) de todas las estaciones terrenas en una red no OSG es similar. Para cada intervalo de simulación se podría especificar la posición de las estaciones terrenas no OSG en relación con un número previsto de estaciones terrenas situadas en una zona unitaria de la Tierra, en una región geográfica específica, disponiendo como mucho de un haz de antena a bordo y de una estación espacial en conjunto. La obtención de estimaciones válidas implica la hipótesis de que en cada paso de simulación cualquier estación espacial no OSG establece una comunicación con el número máximo posible de estaciones terrenas y que uno de los haces de antena de a bordo funciona con tráfico máximo en la dirección de emisión más desfavorable desde el punto de vista de la interferencia.

En el caso b), la simulación se llevará a cabo mediante un algoritmo que establece un canal radioeléctrico entre una estación espacial y una estación terrena en la red no OSG.

2.3.2 Selección de la estación espacial no OSG

Existen varias estrategias diferentes de selección de satélites para su utilización por operadores de sistemas no OSG. Algunos estudios han mostrado que la elección de la estrategia de selección afecta a los niveles de interferencia a medio o largo plazo. Los operadores de sistemas no OSG pueden utilizar diferentes estrategias de selección para reducir la interferencia en otros sistemas. En los puntos siguientes se enumeran algunas estrategias de selección.

2.3.2.1 Selección de la estación espacial basada en el mayor periodo de tiempo de permanencia

El proceso de selección de la estación espacial considerado en este párrafo se basa en el establecimiento de un enlace al satélite visto por la estación terrena no OSG durante el mayor periodo de tiempo. Este proceso minimizará el número de interrupciones del flujo de datos. Si un sistema de satélites ha sido diseñado para que aparezcan múltiples satélites a la vista de la estación terrena durante un ampli

o periodo de tiempo, debe imponerse una limitación adicional para optimizar la evitación de interferencia o la diversidad.

Se supone que la estación terrena, asociada con una constelación, realiza el seguimiento de la correspondiente estación espacial una vez establecido el enlace de comunicaciones. Cuando dicha estación espacial no entra dentro del ángulo de elevación mínimo, se supone que se puede entrar en contacto con la siguiente estación espacial antes del próximo paso temporal de la simulación. Si se puede contactar más de una estación espacial en el siguiente paso temporal, el algoritmo para seleccionar la siguiente estación espacial se basa en el vector entre la estación terrena y la posible estación espacial, \vec{r} , y el vector unitario en el sentido de la velocidad de las estaciones espaciales \vec{v} . El criterio de selección consiste en minimizar el producto escalar entre \vec{r} y \vec{v} :

$$\begin{aligned} & \text{mín} & & \vec{r} \cdot \vec{v} \\ & \text{Todos los satélites por encima} & & \\ & \text{del ángulo de elevación mínimo} & & \end{aligned} \quad (15)$$

Este procedimiento de selección se representa en la Fig. 3. La vista en planta muestra el vector velocidad de la estación espacial, señalado por \vec{v}_1 dirigido hacia la estación terrena. El producto escalar es negativo y se selecciona la estación espacial número 1 en lugar de la otra estación espacial (véase el Anexo 4).

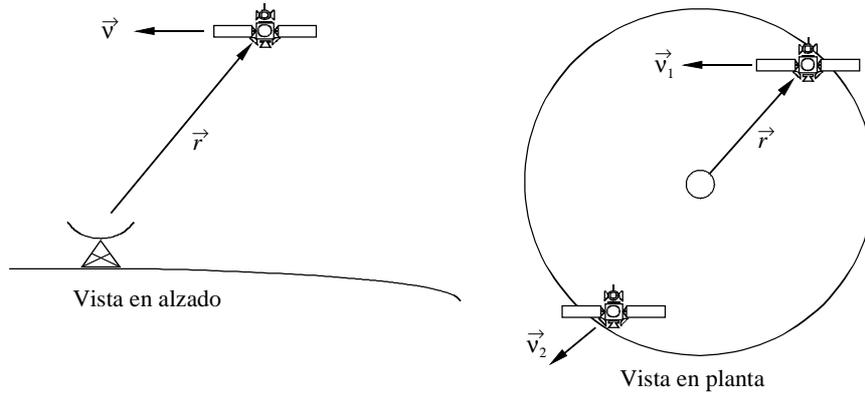
2.3.2.2 Selección de la estación espacial basada en el ángulo de elevación mayor

Esta estrategia de selección necesitará un número mayor de haces que el del mayor periodo de tiempo de permanencia pero se puede utilizar para mejorar las características del enlace para el sistema no OSG. Se seleccionan los satélites activos que tengan los ángulos de elevación mayores vistos desde una estación terrena no OSG y un transpondedor disponible. Existen dos posibles técnicas de tratamiento para el ángulo de elevación mayor:

- Se selecciona como satélite activo el satélite con el ángulo de elevación mayor.
- Se selecciona el satélite con el ángulo de elevación mayor una vez que el satélite activo cae por debajo de un ángulo de elevación mínimo.

FIGURA 3

Criterio de selección de la siguiente estación espacial desde la estación terrena para establecer un enlace de comunicaciones



1325-03

2.3.2.3 Elección de la estación espacial basada en el mayor ángulo de separación respecto del arco de la OSG

Los sistemas no OSG pueden elegir satélites considerando el ángulo de separación mayor entre el ángulo de visión y el arco de la OSG. Esto reduce el nivel de interferencia generado por los satélites no OSG en una estación terrena OSG pero tiene algunos inconvenientes. Puede resultar en unas características de enlace inferiores a la óptima y necesitar una gran cantidad de haces.

2.3.3 Control de potencia según distancia

El control de potencia en una estación espacial no OSG tiene por objeto compensar las diferencias en la distancia (entre la estación terrena y la estación espacial). En este punto se describe un algoritmo para llevar a cabo el control de potencia según distancia. La finalidad de dicho control es que la estación transmisora disminuya o aumente su potencia de transmisión a medida que el receptor se aproxima o se aleja del transmisor; es decir, la potencia recibida debe mantenerse constante. El parámetro de entrada necesario para la simulación es la densidad de potencia del receptor deseada a la entrada de la antena deseada, P_r (dB(W/Hz)). Esta potencia del receptor puede expresarse de la forma siguiente:

$$P_r = \frac{P_t(R)}{BW_{tx}} G_t(0) \left(\frac{\lambda}{4\pi R_w} \right)^2 \quad (16)$$

siendo R_w la longitud del trayecto de la señal deseada (es decir, la distancia entre la estación terrena y la estación espacial de la Constelación 1) y $P_t(R)$ la potencia de transmisión necesaria para establecer el enlace P_r puede relacionarse con el nivel portadora/ruido en el receptor deseado mediante la siguiente expresión:

$$C_0/N_0 = \frac{P_r(R) G_{rw}(0)}{k T_w} = \frac{P_t(R)}{BW_{tx}} \frac{G_t(0) G_{rw}(0)}{k T_w} \left(\frac{\lambda}{4\pi R_w} \right)^2 \quad (17)$$

siendo:

$G_{rw}(0)$: máxima ganancia de recepción deseada del satélite

T_w : temperatura de ruido del receptor deseada.

Cuando se considera el control de potencia según distancia, la ecuación para calcular el nivel de interferencia puede escribirse de la forma siguiente:

$$\begin{aligned} I_0/N_0 &= \frac{P_t(R)}{BW_{tx}} G_t(\varphi_1) G_r(\varphi_2) \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \frac{1}{k T} \frac{1}{L_p} \\ &= P_r \frac{G_t(\varphi_1) G_r(\varphi_2)}{G_t(0)} \left(\frac{R_w}{R} \right)^2 \frac{1}{k T} \frac{1}{L_p} \end{aligned} \quad (18)$$

2.4 Parámetros de antena

2.4.1 Parámetros de antena de la estación terrena y de la estación espacial no OSG

El diagrama de la antena de la estación terrena es un parámetro de entrada para la simulación. Los diagramas sugeridos incluyen pero no están limitados a los siguientes:

- Diagramas de antena medidos.
- Apéndice S8 del RR.
- Recomendación UIT-R S.465.
- Recomendación UIT-R S.672.
- Recomendación UIT-R S.1428.

2.4.2 Diagramas de antena de la estación espacial OSG

Los parámetros que se requieren son la ganancia de transmisión o de recepción de la estación espacial OSG en la dirección de la estación terrena no OSG. Esto se debe a que la ubicación de una estación terrena no OSG es constante en relación con la estación espacial OSG, por lo tanto, la ganancia de recepción o de transmisión de la estación espacial OSG es constante en la dirección de la estación terrena no OSG.

Cuando se desconoce el emplazamiento de las estaciones terrenas no OSG, el diagrama de la estación espacial OSG se mostrará como la ganancia en función del ángulo a partir del eje de la antena.

2.5 Datos de entrada

Los parámetros de entrada necesarios para cada uno de los dos sistemas de comunicación son los siguientes:

2.5.1 Parámetros de la órbita

- Número de estaciones espaciales.
- Número de planos.
- Para cada plano orbital:
 - Altitud de la órbita.
 - Inclinación del plano.
 - RAAN.
 - Argumento de la latitud para cada estación espacial en el plano orbital.

2.5.2 Parámetros de antena

- Estación espacial
 - Sistema no OSG:
 - Diagrama de antena.
 - Máxima ganancia de transmisión (dBi).
 - Máxima ganancia de recepción (dBi).
 - Número máximo de haces de antena en la misma frecuencia y su orientación espacial.
 - Sistema OSG:
 - Ganancia de transmisión (dBi) en dirección de la estación terrena no OSG.
 - Ganancia de recepción (dBi) en dirección de la estación terrena no OSG.
 - Diagrama de antena.
- Estación terrena
 - Diagrama de antena.
 - Máxima ganancia de transmisión (dBi).
 - Máxima ganancia de recepción (dBi).
 - Emplazamiento (latitud, longitud).

2.5.3 Parámetros de explotación y de cálculo

- Ángulo de elevación mínimo para las comunicaciones.
- Inicio del tiempo de simulación.
- Finalización del tiempo de simulación (véase el § 2.7).
- Incremento del tiempo de simulación (véase el § 2.7).
- Precesión (véase el § 2.7).
- Si el sistema es no OSG y se utiliza control de potencia según distancia: densidad de potencia del receptor deseada a la entrada de la antena deseada (dB(W/Hz)).
- Densidad prevista de estaciones terrenas no OSG ubicadas en diferentes regiones geográficas de la zona de servicio de la red no OSG.
- Número máximo de estaciones terrenas no OSG que pueden funcionar con una estación espacial no OSG en la misma frecuencia.

2.5.4 Frecuencia que debe utilizarse para la evaluación de la interferencia

La interferencia en la red deseada se evaluará en la frecuencia más baja compartida entre las redes interferente y deseada, siempre que los diagramas de antena se definan mediante una envolvente.

2.6 Datos de salida

Los datos de salida sin procesar para la simulación constituyen una historia temporal del valor de la relación de interferencia/ruido I_0/N_0 , en función del tiempo. Estos datos pueden analizarse para obtener la siguiente información:

- un gráfico de la relación interferencia/ruido, I_0/N_0 (dB), en función del porcentaje de tiempo durante el cual se rebasa este nivel (en una escala logarítmica);
- una historia temporal del suceso de interferencia de cresta, (I_0/N_0 , en función del tiempo);
- el número de sucesos y duración de los mismos para las que la relación de interferencia/ruido se encuentra por encima de un nivel previamente definido. Por ejemplo, si dicho nivel es -1 dB, en este caso el suceso comienza cuando el nivel de interferencia es superior a -1 dB y finaliza cuando cae por debajo de -1 dB; el tiempo en que el suceso está por encima del nivel de -1 dB es la duración del mismo. Este método proporciona una indicación del periodo total en que el nivel de interferencia se encontrará por encima de un valor determinado.

2.7 Cálculo del tiempo total de simulación, del incremento del tiempo de simulación y de la precesión

2.7.1 Introducción

El método de cálculo descrito en este párrafo puede utilizarse para simular la interferencia causada por un satélite no OSG a una estación terrena del SFS OSG o por una estación terrena no OSG a un satélite del SFS OSG. Los métodos de cálculo para otros casos de interferencia y para órbitas elípticas deben ser objeto de estudios ulteriores (véase el Anexo 4).

2.7.2 Incremento del tiempo de simulación

Para obtener resultados precisos, el incremento del tiempo de simulación debe ser lo más breve posible pero por otro lado el tiempo total de la simulación debe ser razonable. Para obtener precisiones comparables en distintas simulaciones los incrementos de tiempo pueden relacionarse con la anchura de haz de la antena de los sistemas interferidos.

La velocidad del satélite con respecto a unas coordenadas fijas en Tierra depende de la latitud del punto subsatelital pero la variación puede despreciarse a tal efecto y en el cálculo puede emplearse la mayor velocidad en el Ecuador. La velocidad angular del satélite, vista desde un punto de la Tierra, alcanza su valor más elevado cuando el satélite se desplaza directamente hacia ese punto o se aleja directamente de él. Dicha velocidad angular puede calcularse mediante las siguientes ecuaciones:

$$a = \sqrt{(\omega \cos I - \Omega_e)^2 + (\omega \sin I)^2}$$

$$\theta_\varepsilon = \arccos \left(\frac{R}{R+h} \cos \varepsilon \right) - \varepsilon$$

$$\Delta t = \frac{\Phi_{3 \text{ dB}}}{N_{\text{impactos}} a} \frac{\sin \theta_\varepsilon}{\cos \varepsilon}$$

siendo:

- a : velocidad angular del satélite en las coordenadas fijadas en Tierra (sistema de coordenadas de referencia geosíncrono geocéntrico)
- Ω_e : velocidad angular de rotación de la Tierra en el Ecuador, $\cong 7,29 \times 10^{-5}$ rad/s
- ω : velocidad angular del satélite en coordenadas fijadas en el espacio (sistemas de coordenadas de referencia heliosíncrono geocéntrico)
- I : inclinación de la órbita del satélite
- θ_e : ángulo geocéntrico entre la estación terrena interferida y el punto subsatelital cuando se encuentra en el eje del haz principal de la estación terrena
- R_e : radio de la Tierra (6 378 km)
- h : altitud del satélite
- ε : ángulo de elevación de la estación terrena
- $\Phi_{3\text{ dB}}$: anchura de haz a 3 dB de la estación terrena
- N_{impactos} : número de impactos en la anchura de haz de 3 dB de la estación interferida ($N_{\text{impactos}} = 5$)
- Δt : incremento del tiempo de simulación.

2.7.3 Precesión y tiempo total de simulación

Un satélite de una constelación no OSG en una órbita circular sigue un trayecto sobre la superficie de la Tierra. Tras un cierto tiempo, específico al sistema, ese satélite u otro satélite de la constelación vuelve al mismo punto, o prácticamente al mismo punto. El tiempo transcurrido entre esos dos casos es el periodo de repetición de la constelación. Los periodos de distintas constelaciones oscilan entre unos pocos días y varios meses.

Con órbitas similares en la red no OSG, el periodo de recurrencia orbital de la constelación podría obtenerse utilizando la metodología siguiente:

Paso 1: Se define una separación angular entre puntos subsatelitales para $t = t_0$ y $t = t_0 + T$ sin tener en cuenta la diferencia a lo largo de la longitud del nodo ascendente, siendo T el periodo orbital del satélite:

$$\Delta\lambda_0 = 2\pi - 2\pi \frac{T}{T_E}$$

donde T_E es el periodo de rotación de la Tierra.

Paso 2: Se define la separación angular entre los puntos subsatelitales para $t = t_0$ y $t = t_0 + T_j$, siendo j el número de órbitas alrededor de la Tierra:

$$\Delta\lambda_j = j\Delta\lambda_0 + j T \Omega_r$$

Paso 3: Se define el número entero j más próximo para el que se cumple la siguiente condición:

$$(\Delta\lambda_j) \bmod(2\pi) \leq \Delta\lambda_{T_p}$$

donde $\Delta\lambda_{T_p}$ es la precisión requerida para el periodo orbital recurrente de la constelación (rad).

Paso 4: Se define el periodo de la recurrencia orbital de la constelación:

$$T_{NOB} = J_{\text{mín}} T$$

siendo $J_{\text{mín}}$ el último número entero j más próximo para el que se cumple la condición del Paso 3.

El tiempo total de simulación y la precesión deben ser tales que la distribución de los trayectos del satélite a lo largo de una línea de latitud sea uniforme y haya suficientes trayectos que pasan a través de la anchura de haz de la estación interferida. Para llegar a un compromiso entre la precisión y el tiempo de ejecución del programa de simulación, el número de pases a través de la zona debe ser el mismo que el número de impactos durante un pase (véase el incremento de tiempo de simulación).

Si el periodo de repetición es tan breve que no se produce el número necesario de pases a través de la zona, se ejecuta el programa para varios valores de la ascensión recta inicial del nodo. El ángulo entre las ascensiones iniciales del nodo debe corresponder a la separación requerida entre los pases a través de la zona y el número de ejecuciones del programa debe ser tal que las ascensiones rectas iniciales de un plano deben alcanzar el correspondiente punto inicial del siguiente plano.

Si el periodo de repetición es tan dilatado que el número de pases a través de una zona es innecesariamente elevado, puede utilizarse una precesión artificial que dé lugar a un periodo de repetición más breve. En este caso la p.i.r.e. del satélite no debe ser dependiente del tiempo.

El efecto de la relación fraccionaria entre un ciclo de tiempo que depende de la variación de la p.i.r.e. del satélite y los pases del satélite a través de la zona debe ser objeto de más estudios.

2.7.4 Tamaños de intervalo de tiempo doble

Puede ser conveniente utilizar dos tamaños de intervalo de tiempo para disminuir el tiempo de ejecución de la simulación. El § 2.7.2 trata del cálculo del incremento del tiempo de simulación. El incremento del tiempo puede variar órdenes de magnitud entre antenas de estación terrena receptoras grandes y pequeñas, siendo muy pequeño para haces estrechos, debido al requisito del número de impactos en el haz principal ($N_{\text{impactos}} = 5$). Este requisito es necesario, pero aumenta el tiempo de ejecución de forma significativa. Para evitar este problema, se puede utilizar un intervalo de tiempo doble que reduce la varianza y la duración del tiempo de ejecución de la simulación para todos los tamaños de antena de estación terrena, en particular para aquellas estaciones terrenas con haces estrechos.

Para este algoritmo de intervalo doble, se utilizará el tamaño de intervalo de tiempo que se define en el § 2.7.2 para todas las simulaciones y que se indica aquí como el tamaño de intervalo fino. Este tamaño de intervalo depende de la anchura de haz de la antena y se utilizará únicamente durante las partes de la simulación en las que el satélite no OSG se encuentre cerca de las zonas de dfpe máxima, cerca del haz principal o en el borde de la zona de exclusión. El porcentaje de tiempo durante el cual los satélites se encuentran en las zonas alejadas del eje del haz principal, pasado el primer lóbulo lateral, es mucho mayor que el porcentaje de tiempo durante el que los satélites se encuentran dentro del haz principal. Debido a esto y al hecho de que pasado el primer lóbulo lateral los valores de dfpe no varían tan rápidamente con la posición del vehículo espacial, se puede utilizar un tamaño de tiempo constante para zonas alejadas del haz principal. Este tamaño de intervalo aproximado se define como un ángulo topocéntrico:

$$\varphi_{\text{aprox.}} = 1,5^\circ$$

Este tamaño de intervalo se puede utilizar para todos los tamaños de antena.

Existen dos regiones posibles de intervalo fino debido a las dos ubicaciones posibles más desfavorables de un satélite no OSG:

- Cuando un satélite no OSG está cerca del haz principal, la región de intervalo fino (FSR, *fine step region*) se define como un ángulo topocéntrico fijo a partir del eje del haz de la estación terrena OSG:
 - Si $D/\lambda > 100$, se fija el borde de la zona del primer lóbulo lateral del diagrama de la estación terrena OSG en φ_r :

$$\varphi_1 = \varphi_r = 15,85(D/\lambda)^{-0,6}$$

- Si $D/\lambda < 100$, se fija el borde de la zona del primer lóbulo lateral al que se ha definido en el diagrama de la estación terrena OSG:

$$\varphi_1 = 95 \lambda/D$$

El ángulo a partir del eje para la zona de intervalo fino se define como el valor mayor de $3,5^\circ$ o φ_1 :

$$\varphi_{\text{FSR}_1} = \text{máx}(3,5^\circ, \varphi_1)$$

- Cuando un satélite no OSG se encuentra cerca de la zona de exclusión, la zona de intervalo fino medida a partir del borde de la zona de exclusión se define como:

$$\Phi_{FSR_2} = \Phi_{aprox.}$$

El tamaño del intervalo aproximado debe ser un múltiplo entero de intervalos finos para fines estadísticos. Puesto que el tamaño del intervalo aproximado es constante, la relación entre los intervalos aproximados y los intervalos finos depende únicamente de la anchura del haz de la estación terrena OSG (Φ_3 dB). Esta relación viene definida como:

$$N_{aprox.} = \text{entero} ((N_{impactos} \times \Phi_{aprox.}) / \Phi_3 \text{ dB})$$

donde «entero» es una función que suprime la parte decimal de la relación y extrae la parte entera de la relación. Así se obtiene una relación conservadora entre intervalos finos e intervalos aproximados para asegurar que un intervalo aproximado nunca es mayor que el tamaño topocéntrico objetivo de $1,5^\circ$. Puesto que esta relación sólo depende de la anchura del haz de la antena de la estación terrena OSG, Φ_3 dB, el ahorro de tiempo aumenta al disminuir la anchura del haz. Esto es lo que se desea puesto que las simulaciones con haces estrechos necesitan un tiempo de ejecución mucho mayor.

Si un satélite no OSG está en Φ_{FSR_1} del haz principal o en Φ_{FSR_2} de la zona de exclusión, se utilizará para la simulación el tamaño de intervalo fino. Para las demás zonas espaciales, cuando un satélite no OSG no se encuentre cerca de las zonas mencionadas anteriormente, se calcula entonces el intervalo de tiempo aproximado multiplicando $N_{aprox.}$ por el tamaño del intervalo fino.

ANEXO 2

Metodología para determinar estadísticas de niveles de interferencia codireccionales en la misma frecuencia entre redes del SFS en órbitas no OSG y redes del SFS OSG, en bandas de frecuencias por debajo de 30 GHz

1 Introducción

El presente Anexo proporciona los algoritmos para calcular la interferencia combinada total producida por una red de satélites no OSG en una red de satélites OSG.

Estos algoritmos se pueden utilizar para calcular la función de densidad acumulativa de la $dfpe$ para un diámetro de antena dado de una estación terrena OSG o la $dfpe_{\uparrow}$ de la red no OSG. Se estudian los siguientes casos de interferencia:

- interferencia en el enlace ascendente proveniente de estaciones terrenas transmisoras de la red no OSG en una estación espacial de la red OSG;
- interferencia en el enlace descendente proveniente de estaciones espaciales transmisoras de una red no OSG en la estación terrena receptora de la red OSG.

Esta metodología permite también el cálculo de la función de densidad de probabilidad y de la función de densidad acumulativa de la relación C/I , en función de las características de ambas redes.

Para determinar el caso más desfavorable de interferencia, se propone un planteamiento en dos pasos. El primer paso conduce a la definición del caso más desfavorable. El segundo paso determina la $dfpe_{\downarrow}$ y la $dfpe_{\uparrow}$ en el emplazamiento más desfavorable identificado.

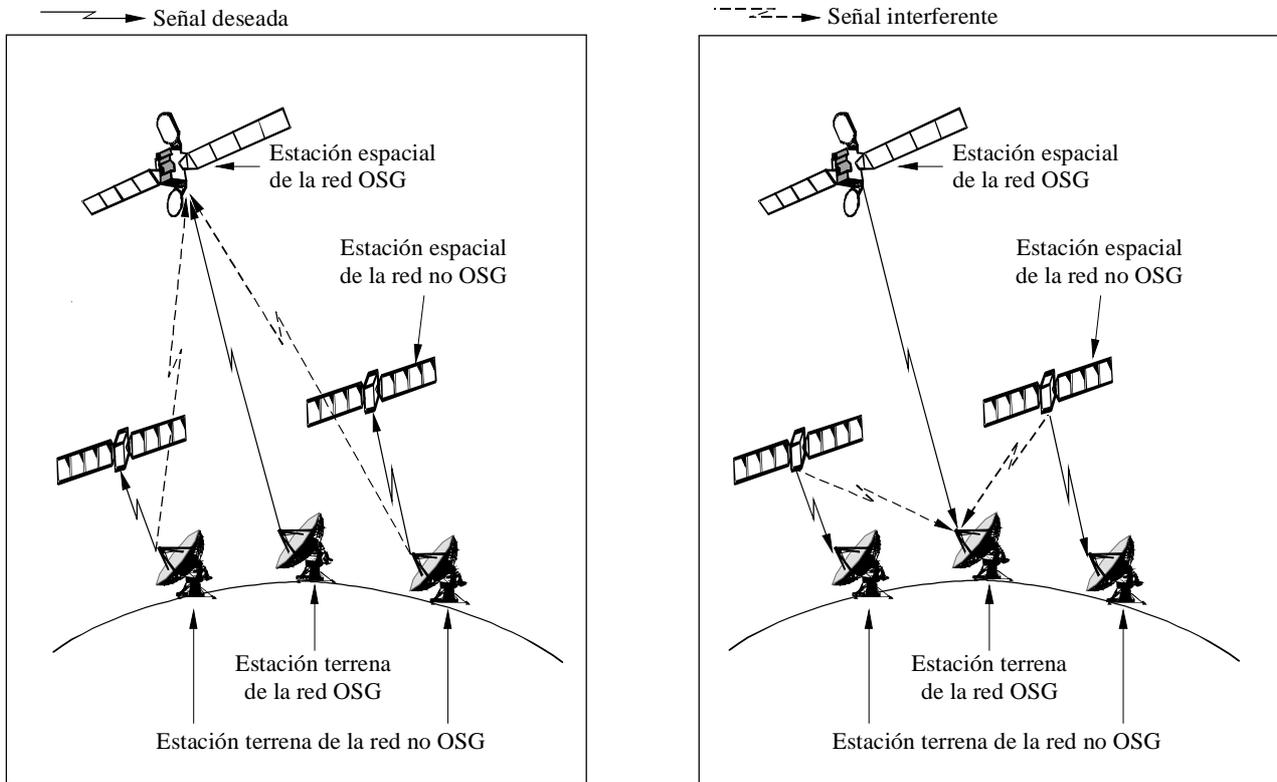
2 Escenario de interferencia

La red no OSG es la red interferente. La Fig. 4 siguiente describe este escenario de interferencia:

FIGURA 4

Escenario de interferencia

Interferencia proveniente de la red no OSG en una red OSG



a) Interferencia en el enlace ascendente

b) Interferencia en el enlace descendente

1325-04

3 Terminología

3.1 Constantes relativas a la Tierra

Para la Tierra las constantes son:

R_e : radio de la Tierra (6 378 km)

O: centro de la Tierra

μ : constante de atracción de la Tierra ($3,986 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{s}^2$)

J_2 : constante potencial de la Tierra de segundo armónico ($1\,082,6 \times 10^{-6}$);

T_e : periodo de rotación de la Tierra (23 h 56' 04" = 86 164 s)

Ω_e : velocidad angular de la Tierra

$$= 2\pi/T_e \cong 7,29 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$$

t : tiempo transcurrido (s).

3.2 Constantes relativas a la estación espacial de la red de satélites no OSG

Para las estaciones espaciales de la red de satélites no OSG (véase la Fig. 5), las constantes son las siguientes:

N : número de estaciones espaciales de la red de satélites no OSG

i : índice para cada uno de los satélites no OSG ($0 \leq i < N$)

h : altitud del satélite sobre la Tierra (km)

r : semieje mayor del satélite (km)

$$= h + R_e$$

I : ángulo de inclinación del plano orbital sobre el Ecuador (rad)

$\Omega_{i,0}$: RAAN para cada uno de los satélites no OSG en el instante inicial (rad)

$E_{i,0}$: argumento de latitud para cada uno de los satélites no OSG en el instante inicial (rad)

T : periodo orbital del satélite (s)

$$= 2\pi (r^3/\mu)^{1/2}$$

ω : velocidad angular media del satélite (rad/s)

$$= 2\pi/T$$

$E_{i,t}$: argumento de latitud del satélite en el instante de cálculo (rad)

$$= E_{i,0} + \omega t$$

Ω_{ri} : regresión nodal del nodo ascendente (rad/s)

$$= -\frac{3}{2} J_2 \cos(I) R_E^2 \frac{\sqrt{r\mu}}{r^4}$$

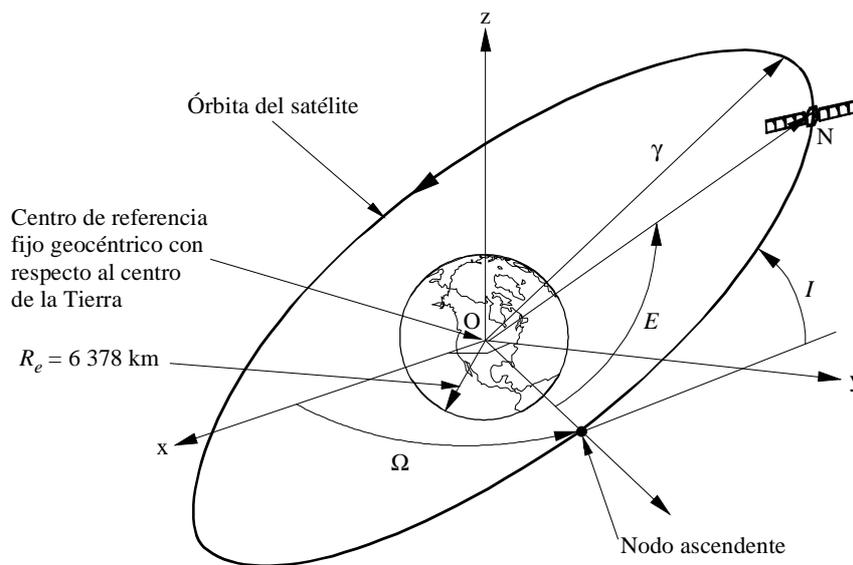
$\Omega_{i,t}$: RAAN del satélite en el instante de cálculo (rad)

$$= \Omega_{i,0} + \Omega_{ri} t$$

\vec{ON}_i : vector de coordenadas de un satélite no OSG en el sistema de referencia fijo centrado en la Tierra:

$$\vec{ON}_i = \begin{cases} x_i = a (\cos E_{i,t} \cos \Omega_{i,t} - \cos I \sin E_{i,t} \sin \Omega_{i,t}) \\ y_i = a (\cos E_{i,t} \sin \Omega_{i,t} + \cos I \sin E_{i,t} \cos \Omega_{i,t}) \\ z_i = a \sin E_{i,t} \sin I \end{cases}$$

FIGURA 5
Geometría del satélite



γ : semieje mayor
 E : argumento de latitud
 I : ángulo de inclinación
 Ω : RAAN

3.3 Constantes relativas a la estación espacial de la red de satélites OSG

Para los satélites geoestacionarios, los parámetros son los siguientes:

h : altitud del satélite sobre la Tierra (35 786 km)

r : semieje mayor de la órbita del satélite

$$= h + R_e = 42\,164 \text{ km}$$

I : ángulo de inclinación del plano orbital sobre el Ecuador (generalmente 0° , pero puede variar entre $+5^\circ$ y -5°)

Ω_0 : RAAN de cada uno de los satélites no OSG en el instante inicial (rad). Puede también considerarse como su longitud, si este es el caso para el instante inicial

T : periodo orbital del satélite

$$= 2\pi (r^3/\mu)^{1/2} \cong 86\,164 \text{ s}$$

ω : velocidad angular media del satélite

$$= 2\pi/T \cong 7,29 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$$

E_0 : argumento de latitud en el instante inicial (rad)

E_t : argumento de latitud del satélite en el instante de cálculo (rad)

$$= E_0 + \omega t$$

Ω_{ri} : regresión nodal del RAAN

$$= -\frac{3}{2} J_2 \cos(I) R_E^2 \frac{\sqrt{r\mu}}{r^4} = -2,71 \times 10^{-9} \text{ rad/s } (I = 0)$$

Ω_t : RAAN del satélite en el instante de cálculo (rad)

$$= \Omega_0 + \Omega_{ri} t$$

\rightarrow

OG : vector de coordenadas del satélite OSG en el centro de referencia fijo centrado en la Tierra:

$$= \begin{cases} x = a (\cos E_t \cos \Omega_t - \cos I \sin E_t \sin \Omega_t) \\ y = a (\cos E_t \sin \Omega_t + \cos I \sin E_t \sin \Omega_t) \\ z = a \sin E_t \sin I \end{cases}$$

3.4 Constantes relativas a la estación terrena

a) Si se conoce el emplazamiento de las estaciones terrenas de la red no OSG; una estación terrena viene definida por:

Lat: latitud de la estación terrena (rad)

Lon: longitud de la estación terrena (rad)

\rightarrow

OM : coordenadas de la estación terrena relativas al centro de referencia fijo geocéntrico:

$$= \begin{cases} X = R_e \cos \text{Lat} \cos(\text{Lon} + \Omega_e t) \\ Y = R_e \cos \text{Lat} \sin(\text{Lon} + \Omega_e t) \\ Z = R_e \sin \text{Lat} \end{cases}$$

b) Si no se conoce el emplazamiento de las estaciones terrenas de la red no OSG:

δ_i : densidad predicha de los emplazamientos de estaciones terrenas no OSG en la zona geográfica i -ésima de la zona de servicio no OSG.

4 Cálculo de las interferencias

4.1 Paso 1: Identificación del caso más desfavorable

Es preciso identificar el caso más desfavorable. En la metodología propuesta, la búsqueda del caso más desfavorable se basa en un análisis geométrico. Los estudios del Grupo de Trabajo 4A de Radiocomunicaciones han mostrado que, cuando se consideran situaciones de interferencia entre redes no OSG y OSG, el caso más desfavorable se encuentra

siempre que aparece un suceso en línea o cuasi en línea. Las estadísticas de aparición y de tiempos de los sucesos en línea dependen únicamente de la configuración geométrica de los dos sistemas no OSG y OSG.

Para evaluar la configuración geométrica más desfavorable, que conduce al caso de interferencia más desfavorable, se calcularán las interacciones no OSG/OSG para estaciones terrenas OSG situadas en una cobertura OSG representativa. Se propone utilizar estaciones terrenas situadas cada grado entre 0° y 70° de latitud. Los satélites OSG se distribuyen de grado en grado a lo largo de un arco de 180° en longitud. La Fig. 5 describe la configuración geométrica.

Para cada pareja (estación terrena OSG, satélite OSG), se debe considerar la constelación OSG durante un periodo de la constelación. Las estadísticas angulares se calculan para los sucesos en línea o cuasi en línea: se calcula para cada pareja el tiempo combinado cuando un satélite no OSG entra en un cono de 2° de anchura en la dirección del satélite OSG.

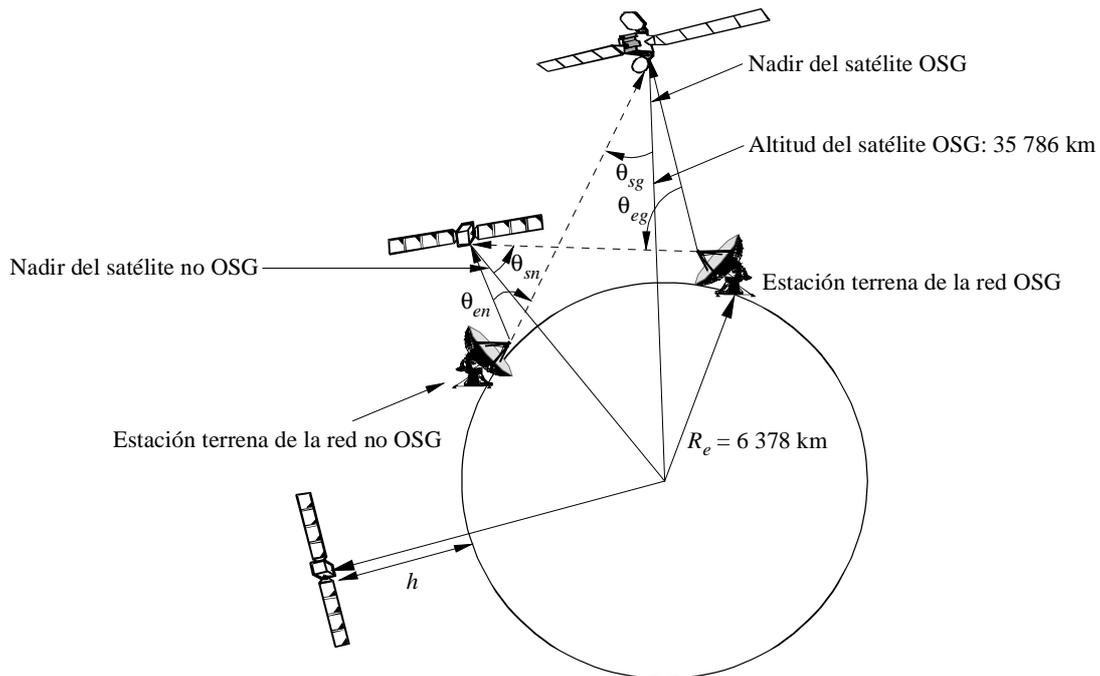
La estadística angular para el suceso en línea o cuasi en línea puede calcularse utilizando la Recomendación UIT-R S.1257.

La pareja más desfavorable (la que tiene la estadística combinada más importante) se selecciona en el punto de prueba más desfavorable para proceder al Paso 2 del programa de simulación.

4.2 Paso 2: Cálculos de interferencia en el caso más desfavorable

La Fig. 6 describe los casos mencionados anteriormente en una configuración de referencia:

FIGURA 6
Configuración de referencia



h : altitud del satélite no OSG

1325-06

4.2.1 Cálculo de la interferencia en el enlace ascendente

Se utilizan los parámetros siguientes para calcular los balances de enlace de interferencia en la portadora deseada del enlace ascendente de la red OSG:

- θ_{en} : ángulo medido a partir de la estación terrena de la red no OSG, entre la estación espacial de la red OSG y la estación espacial de la red no OSG hacia la que apunta la estación terrena de la red no OSG (rad)
- θ_{sg} : ángulo medido a partir de la estación espacial de la red OSG, entre el eje de puntería de la antena receptora de la estación espacial de la red OSG y la estación terrena de la red no OSG interferente (rad)

| | |
|----------------------------|--|
| $d_{en,sg}$: | distancia entre la estación terrena de la red no OSG interferente y la estación espacial de la red OSG (km) |
| $G_{rx,sg}(\theta_{sg})$: | ganancia de la antena receptora del satélite OSG en la dirección de la estación terrena interferente de la red no OSG (dBi) |
| $G_{tx,en}(\theta_{en})$: | ganancia de la antena transmisora de la estación terrena interferente de la red no OSG en la dirección de la estación espacial de la red OSG (dBi) |
| $P_{tx,en}$: | densidad de potencia en la antena transmisora de la estación terrena de la red no OSG (dB(W/Hz)) |
| Δf : | anchura de banda de referencia (Hz) |
| f : | frecuencia de la portadora en la que se realizan los cálculos (GHz) |
| c : | velocidad de la luz (0,3 m/ns) |
| λ : | longitud de onda de la portadora (m) |
| = | c/f |

La densidad de flujo de potencia interferente (dB(W/(m² · Hz))), en la anchura de banda de referencia, producida en el enlace ascendente por una única estación terrena de la red no OSG en la portadora deseada de una red OSG, recibida por la estación espacial geostacionaria es:

$$dfp_{i,\uparrow} = P_{tx,en} + 10 \log(\Delta f) + G_{tx,en}(\theta_{en}) - 10 \log(4\pi d_{en,sg}^2) - 60 \quad (\text{véase la Nota 1})$$

La densidad de flujo de potencia interferente total, designada como $dfpe_{\uparrow}$ es la suma de las dfp de todas las estaciones terrenas no OSG, visibles en la cobertura de la estación espacial OSG, ponderadas por la discriminación de la antena receptora del satélite OSG. La ecuación resultante es:

$$dfpe_{\uparrow} = 10 \log_{10} \left(\sum 10^{dfp_{i,\uparrow}/10} G_{rx,sg}(\theta_{sg}) / G_{m\acute{a}x} \right)$$

donde:

$G_{rx,sg}(\theta_{sg})/G_{m\acute{a}x}$ es la ganancia lineal normalizada de la antena receptora OSG.

NOTA 1 – Otra manera de proceder consiste en sumar la densidad de potencia de ruido interferente a la salida de la antena receptora de la estación espacial de la red OSG.

Para una única estación terrena de la red no OSG interferente, la densidad de potencia de ruido interferente se puede escribir como:

$$I_{0\uparrow} = dfp_{i,\uparrow} - 10 \log(4\pi/\lambda^2) + G_{rx,sg}(\theta_{sg})$$

La densidad de potencia de ruido interferente total en la portadora de la red OSG deseada en el enlace ascendente puede por lo tanto escribirse como:

$$I_{0\uparrow,T} = 10 \log \left(\sum_k 10^{\frac{I_{0\uparrow,k}}{10}} \right)$$

donde k es el índice de cada estación terrena interferente de la red no OSG visible desde la estación espacial de la red OSG y cuya portadora está interfiriendo a la portadora deseada.

La potencia de ruido interferente total se puede calcular integrando la densidad de potencia de ruido interferente en la anchura de banda de recepción de la portadora de satélite.

4.2.2 Cálculo de la interferencia en el enlace descendente

Se utilizan las siguientes expresiones para calcular los balances de enlace de interferencia en la portadora deseada del enlace descendente de la red OSG:

| | |
|----------------------------|--|
| θ_{sn} : | ángulo medido a partir de la estación espacial de la red no OSG, entre la estación terrena de la red no OSG hacia la que apunta la estación espacial de la red no OSG y la estación terrena de la red OSG considerada (rad) |
| θ_{eg} : | ángulo medido a partir de la estación terrena de la red OSG, entre la estación espacial de la red OSG hacia la que apunta la estación terrena de la red OSG y la estación espacial de la red no OSG interferente considerada (rad) |
| $G_{rx,eg}(\theta_{eg})$: | ganancia de la antena receptora de la estación terrena de la red OSG en la dirección de la estación espacial de la red no OSG interferente (dBi) |

- $G_{tx,sn}(\theta_{sn})$: ganancia de la antena transmisora de la estación espacial de la red no OSG en la dirección de la estación terrena de la red OSG (dBi)
- $P_{tx,sn}$: densidad de potencia en la antena transmisora de la estación espacial de la red no OSG (dB(W/Hz))
- Δf : anchura de banda de referencia (Hz)
- $d_{eg,sn}$: distancia entre la estación espacial de la red OSG y la estación terrena de la red no OSG interferente (km).

La densidad de flujo de potencia interferente (dB(W/(m² · Hz))), en la anchura de banda de referencia, producida en el enlace descendente por una única estación espacial de la red no OSG en la portadora deseada, recibida por una estación terrena de la red OSG, es:

$$dfp_{i,\downarrow} = P_{tx,sn} + 10 \log(\Delta f) + G_{tx,sn}(\theta_{sn}) - 10 \log(4\pi d_{eg,sn}^2) - 60$$

La dfpe se puede calcular sumando todas las dfp individuales. La ecuación resultante es:

$$dfpe_{\downarrow} = 10 \log_{10} \left(\sum 10^{dfp_i/10} \cdot G_{rx,eg}(\theta_{eg_i}) / G_{m\acute{a}x} \right) \quad (\text{véase la Nota 2})$$

NOTA 2 – Para una única estación espacial de la red no OSG interferente, la densidad de potencia de ruido interferente puede expresarse como:

$$I_{0\downarrow} = dfp_{i,\downarrow} - 10 \log(4\pi/\lambda^2) + G_{rx,eg}(\theta_{eg})$$

La densidad de potencia de ruido interferente total en la portadora de la red no OSG deseada, en el enlace descendente, se puede expresar por lo tanto como:

$$I_{0\downarrow,T} = 10 \log \left(\sum_{\ell} 10^{\frac{I_{0\downarrow,\ell}}{10}} \right)$$

donde ℓ es el índice de cada estación espacial interferente de la red no OSG, visible desde la estación terrena de la red OSG y cuya portadora está interfiriendo a la portadora deseada.

5 Método para calcular la potencia de ruido interferente combinada

La red no OSG presenta por su naturaleza parámetros geométricos y de transmisión no estacionarios, por lo tanto, es necesario identificar la distribución de la potencia de interferencia en las diversas configuraciones posibles. Se necesitan simulaciones para lograr este objetivo. Este punto describe los diferentes pasos que deben aplicarse en cada instante para calcular la dfpe o la dfpc y la potencia de ruido interferente en el caso más desfavorable identificado en el Paso 1.

5.1 Método de cálculo de la interferencia en el enlace ascendente

Para cada uno de los intervalos de tiempo considerados, se aplican los siguientes pasos:

Paso 1: Se calcula la posición de las estaciones espaciales de la red no OSG.

Paso 2: Se calcula la posición de la estación espacial de la red OSG.

Paso 3: Si se conoce el emplazamiento de las estaciones terrenas de la red no OSG, se calcula la posición de las estaciones terrenas de la red no OSG visibles desde la estación espacial de la red OSG, que funcionan en la frecuencia asignada a la portadora deseada.

Si se desconoce el emplazamiento de las estaciones terrenas de la red no OSG, se seleccionan las estaciones espaciales no OSG con zonas de servicio que se superponen parcial o totalmente con una zona de visibilidad de la estación espacial OSG.

Paso 4: Si se conoce el emplazamiento de las estaciones terrenas de la red no OSG, se identifican los haces y satélites utilizados en la red no OSG para cada una de las estaciones terrenas de la red no OSG interferentes.

Si se desconoce el emplazamiento de las estaciones terrenas de la red no OSG, se asignan posiciones a las estaciones terrenas no OSG sobre la base de su valor probabilístico de disposición en las zonas de servicio de las estaciones espaciales no OSG seleccionadas en el Paso 3 y se seleccionan las estaciones terrenas no OSG que se encuentran en la zona de visibilidad de la estación espacial OSG.

Paso 5: Se calcula la densidad de potencia transmitida de cada estación terrena de la red no OSG.

Paso 6: Se calcula el ángulo a partir del eje de cada estación terrena de la red no OSG entre su estación espacial de la red no OSG asignada y la estación espacial de la red OSG.

Paso 7: Se calcula la ganancia en transmisión de cada una de las estaciones terrenas de la red no OSG en la dirección de la estación espacial de la red OSG.

Paso 8: Se calcula la distancia entre cada una de las estaciones terrenas de la red no OSG y la estación espacial de la red OSG.

Paso 9: Se calcula la ganancia de la antena en recepción de la estación espacial de la red OSG en la dirección de cada una de las estaciones terrenas de la red no OSG (véase la Nota 1).

NOTA 1 – En este método, se considera la ganancia de la antena de recepción del satélite OSG, para que la metodología sea general. Si se aplica a la $dfpe$ descrita en el RR y en su Resolución 130 (CMR-97), esta ganancia se fijará en 1 en todos los casos, puesto que la propia definición no tiene en cuenta la ganancia de recepción del satélite.

Paso 10: Se calcula la dfp interferente recibida desde cada una de las estaciones terrenas de la red no OSG en la estación de la red OSG.

Paso 11: Se calcula la $dfpc$.

Paso 12: Se suma la potencia de ruido interferente recibida, si es necesario.

5.2 Método de cálculo de la interferencia en el enlace descendente

El método es similar al método propuesto en el § 5.1 anterior y depende del diámetro de antena OSG elegido para el estudio. Se repetirá el estudio para cada tipo de tamaño de antena analizado:

Para cada intervalo de tiempo considerado se aplican los pasos siguientes:

Paso 1: Se calcula la posición de las estaciones espaciales de la red no OSG.

Paso 2: Se calcula la posición de la estación terrena de la red OSG.

Paso 3: Se seleccionan las estaciones espaciales de la red no OSG visibles desde la estación terrena de la red OSG y que funcionan en la frecuencia asignada a la portadora deseada.

Paso 4: *Si se conoce el emplazamiento de las estaciones terrenas de la red no OSG, se identifican los haces y satélites utilizados en la red no OSG para cada una de las estaciones terrenas de la red no OSG interferentes.*

Si se desconoce el emplazamiento de las estaciones terrenas de la red no OSG, se asignan posiciones de las estaciones terrenas no OSG sobre la base de su valor probabilístico de disposición en las zonas de servicio de las estaciones espaciales no OSG seleccionadas en el Paso 3.

Paso 5: Se calcula la densidad de potencia transmitida de cada estación espacial de la red no OSG.

Paso 6: Se calcula el ángulo a partir del eje de cada una de las estaciones espaciales de la red no OSG entre su estación terrena de la red no OSG asignada y la estación terrena de la red OSG.

Paso 7: Se calcula la ganancia en transmisión de cada una de las estaciones espaciales de la red no OSG en la dirección de la estación terrena de la red OSG.

Paso 8: Se calcula la distancia entre cada una de las estaciones espaciales de la red no OSG y la estación terrena de la red OSG.

Paso 9: Para la antena elegida, se calcula la ganancia de antena en recepción de la estación terrena de la red OSG en la dirección de cada una de las estaciones espaciales de la red no OSG.

Paso 10: Se calcula la dfp interferente recibida por la estación terrena de la red OSG proveniente de cada una de las estaciones espaciales de la red no OSG.

Paso 11: Se calcula la $dfpe$ para el diámetro de antena elegido.

Paso 12: Se suman las potencias de ruido interferentes recibidas, si es necesario.

ANEXO 3

Descripción y ejemplo de la metodología de cálculo descrita en el Anexo 1

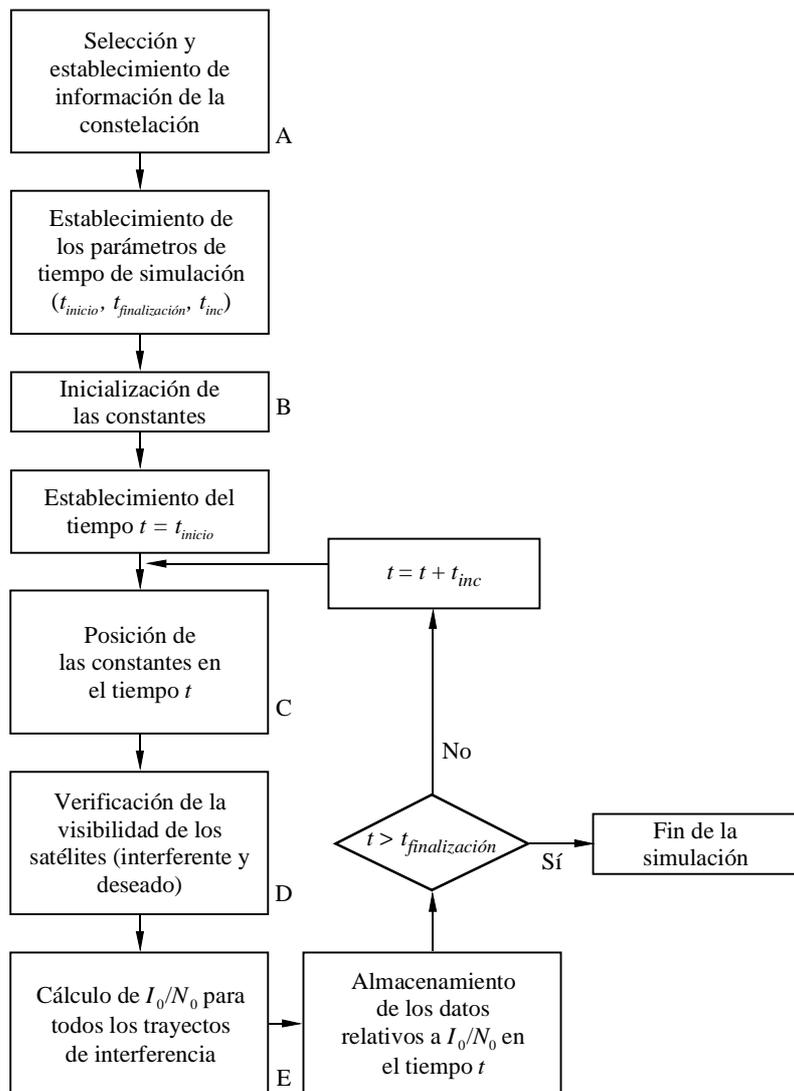
1 Introducción

La metodología descrita en el Anexo 1 debe aplicarse mediante un programa informático. En este Anexo se describe esta aplicación así como una demostración de un ejemplo de los resultados obtenidos utilizando el análisis geométrico definido en el Anexo 1 para estudiar la interferencia entre un sistema no OSG y un sistema de satélites OSG.

2 Descripción de la metodología de cálculo

En la Fig. 7 se describe de forma general esta aplicación; los bloques A, B, C, D, E se considerarán posteriormente con más detalle. Para maximizar la eficacia, esta aplicación calcula la interferencia en los cuatro casos posibles considerados (§ 1 del Anexo 1) al mismo tiempo. Mediante un proceso de evaluación de datos se determina el valor de la relación I_0/N_0 en función del tiempo para cada uno de los cuatro casos; este proceso de evaluación no se considera en el presente Anexo.

FIGURA 7
Aplicación de la metodología



2.1 Bloque A – Selección y establecimiento de la constelación

La información sobre las constelaciones que van a simularse se definen en esta parte del programa, véase la Fig. 7, bloque A. Para esta aplicación, los datos pertinentes necesarios indicados en el § 2.5 del Anexo 1 se almacenan en una base de datos y se recuperan a fin de efectuar la simulación para cada una de las dos constelaciones que van a simularse. Esta parte del programa admite igualmente variaciones del conjunto de parámetros normalizado tales como distintos diagramas de antena, modificación del emplazamiento de la estación terrena asociada con cada constelación o las ganancias de antena de cresta asociadas con cada antena. En este examen se denominan a las dos constelaciones que van a simularse Const_1 y Const_2.

Esta parte del programa asigna e inicializa la memoria necesaria para simular la constelación. Esta memoria está formada por estructuras de datos que contienen información sobre la posición de la constelación, la velocidad de la misma y los vectores de puntería de cada satélite de la constelación (información sobre el eje de puntería de la antena). En el § 2.1 del Anexo 1, figura la información inicial pertinente que debe configurarse para un modelo de órbita sencillo.

Los datos requeridos para cada estación terrena también se almacenan en memoria y se inicializan para cada estación asociada con las constelaciones. La estructura de datos de la estación terrena mantiene actualizada la información relativa al satélite de la constelación deseada con el que está en ese instante comunicándose la estación terrena, a los emplazamientos de los posibles satélites interferentes y al mínimo ángulo de elevación necesario con el que la estación puede establecer comunicaciones (que está relacionado con la máxima distancia hasta un satélite para que pueda establecerse la comunicación; este dato también se almacena en la estructura de datos). El satélite inicial con el que se está comunicando la estación terrena también se inicializa en esta parte del programa.

2.2 Bloque B – Inicialización de las constantes del programa

Para promover una utilización eficaz de los recursos, las constantes de la simulación se descomponen en los factores de la ecuación utilizada para calcular I_0/N_0 . Por ejemplo, considerando la ecuación (1), las variables de esta ecuación que no cambian con respecto al tiempo (suponiendo que no se utilice el control de potencia según distancia, § 2.4.2 del Anexo 1) son:

- P_t : potencia de transmisión disponible (W)
- BW_{tx} : anchura de banda de transmisión (Hz)
- λ : longitud de onda del transmisor (m)
- k : constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)
- T : temperatura de ruido (K)
- L_p : factor de aislamiento por polarización.

Por consiguiente, para cada trayecto de interferencia deben calcularse las cuatro constantes siguientes antes de que la simulación inicie el cómputo de los incrementos de tiempo:

CUADRO 1

Constantes del enlace para la simulación

| Trayecto de interferencia | Constante |
|---|---|
| Enlace descendente Const_1 → Enlace descendente Const_2 | $C_{12\downarrow} = \frac{P_{t1\downarrow}}{BW_{tx1\downarrow}} \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{1}{k T_{2\downarrow}} \frac{1}{L_{p12\downarrow}}$ |
| Enlace ascendente Const_1 → Enlace ascendente Const_2 | $C_{12\uparrow} = \frac{P_{t1\uparrow}}{BW_{tx1\uparrow}} \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{1}{k T_{2\uparrow}} \frac{1}{L_{p12\uparrow}}$ |
| Enlace descendente Const_2 → Enlace descendente Const_1 | $C_{21\downarrow} = \frac{P_{t2\downarrow}}{BW_{tx2\downarrow}} \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{1}{k T_{1\downarrow}} \frac{1}{L_{p21\downarrow}}$ |
| Enlace ascendente Const_2 → Enlace ascendente Const_1 | $C_{21\uparrow} = \frac{P_{t2\uparrow}}{BW_{tx2\uparrow}} \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{1}{k T_{1\uparrow}} \frac{1}{L_{p21\uparrow}}$ |

En el Cuadro 1, el subíndice 1↓ corresponde al enlace descendente de la Constelación 1, 2↓ corresponde al enlace descendente de la Constelación 2, 1↑ corresponde al enlace ascendente de la Constelación 1 y 2↑ al enlace ascendente de la Constelación 2. El factor de aislamiento por polarización corresponde a la combinación transmisión/recepción; es decir, 12↓ indica el aislamiento por polarización entre el transmisor del enlace descendente de la Constelación 1 y el transmisor del enlace descendente de la Constelación 2.

Una vez calculados estos factores constantes, para mejorar la eficacia del programa se emplean las siguientes ecuaciones a fin de determinar el valor de la relación I_0/N_0 en cada incremento de tiempo (bloque E).

CUADRO 2

Cálculo de I_0/N_0 utilizando las constantes del enlace

| Trayecto de interferencia | Nivel de interferencia |
|---|--|
| Enlace descendente Const_1 → Enlace descendente Const_2 | $I_0/N_0 = C_{12\downarrow} \frac{G_{t1\downarrow}(\varphi_1) G_{r2\downarrow}(\varphi_2)}{4\pi (R_{12\downarrow})^2}$ |
| Enlace ascendente Const_1 → Enlace ascendente Const_2 | $I_0/N_0 = C_{12\uparrow} \frac{G_{t1\uparrow}(\varphi_1) G_{r2\uparrow}(\varphi_2)}{4\pi (R_{12\uparrow})^2}$ |
| Enlace descendente Const_2 → Enlace descendente Const_1 | $I_0/N_0 = C_{21\downarrow} \frac{G_{t2\downarrow}(\varphi_1) G_{r1\downarrow}(\varphi_2)}{4\pi (R_{21\downarrow})^2}$ |
| Enlace ascendente Const_2 → Enlace ascendente Const_1 | $I_0/N_0 = C_{21\uparrow} \frac{G_{t2\uparrow}(\varphi_1) G_{r1\uparrow}(\varphi_2)}{4\pi (R_{21\uparrow})^2}$ |

En el Cuadro 2, por ejemplo, en el trayecto enlace descendente Const_1 → enlace descendente Const_2 las variables son:

$G_{t1\downarrow}(\varphi_1)$: ganancia de transmisión de la antenna transmisora del enlace descendente de Const_1 (intensidad relativa)

$G_{r2\downarrow}(\varphi_2)$: ganancia de recepción de la antenna receptora del enlace descendente de Const_2 (intensidad relativa)

$R_{12\downarrow}$: distancia entre el transmisor de Const_1 (enlace descendente) y el receptor de Const_2 (enlace descendente) (m).

Este punto exige modificación cuando una o las dos de las constelaciones en estudio llevan a cabo control de potencia según distancia.

2.3 Bloque C – Posición de la constelación en el tiempo, t

Para cada paso de tiempo antes de realizar ningún cálculo sobre los niveles de interferencia, es necesario determinar la posición de la constelación. En este ejemplo se utiliza el modelo de órbita descrito en el § 2.1 del Anexo 1. Se determinan el vector velocidad y el vector posición de cada satélite y se almacenan en la estructura de datos definida en el bloque A de la simulación. En este paso también se calcula la distancia entre la estación terrena y los satélites de la constelación con los que está intentando comunicarse.

2.4 Bloque D – Verificación de la visibilidad de los satélites (interferente y deseado)

En esta etapa se determina qué satélite se está comunicando con la estación terrena. En primer lugar, se comprueba si el satélite con el que la estación terrena se estaba comunicando en el intervalo de tiempo precedente para comprobar si la estación terrena puede continuar la comunicación (es decir, se compara la distancia existente entre la estación terrena y el satélite con la máxima distancia posible a la que puede encontrarse un satélite para que continúen las comunicaciones; de

ser mayor, las comunicaciones deben establecerse a través de un nuevo satélite). Si es preciso establecer una comunicación con un nuevo satélite, se emplea el algoritmo indicado en el § 2.4.1 del Anexo 1, para seleccionar el nuevo satélite que se comunique con la estación terrena.

Una vez que cada estación terrena ha determinado con qué satélite se está comunicando, pueden calcularse los parámetros asociados con la interferencia entre los sistemas de satélites. Ello exige determinar la distancia de los cuatro trayectos de interferencia y los ángulos con respecto al eje asociados con los trayectos de interferencia (véase la Fig. 1).

2.5 Bloque E – Cálculo de I_0/N_0 para todos los trayectos de interferencia

A estas alturas ya es posible calcular los niveles de interferencia puesto que se ha obtenido toda la información correspondiente en los pasos anteriores. En esta etapa se determina el nivel de interferencia para los cuatro trayectos de interferencia de las dos constelaciones (véase el Cuadro 2). Los niveles de interferencia se almacenan para un posterior análisis.

2.6 Consideración de la influencia combinada de múltiples estaciones terrenas/satélites en los niveles de interferencia

La suma de las interferencias provenientes de múltiples estaciones terrenas/satélites puede calcularse de dos maneras diferentes:

Caso 1: Realizando múltiples simulaciones para cada estación terrena.

Caso 2: Realizando una simulación que tiene en cuenta todos los enlaces posibles.

La diferencia fundamental radica en cuándo se realiza la suma de todas las estaciones terrenas/satélites, en el Caso 1 se realiza después de completar la simulación y en el Caso 2 se realiza durante la simulación.

2.6.1 Interferencia combinada basada en múltiples simulaciones

Este método para calcular la interferencia combinada a partir de múltiples fuentes de interferencia tiene la ventaja de que se puede estimar y evaluar la contribución proveniente de cada fuente de interferencia para determinar qué fuente tiene la influencia mayor en la interferencia. El inconveniente radica en que la simulación debe realizarse múltiples veces para cada posible fuente de interferencia, lo que puede llevar mucho tiempo. La cantidad de datos que deben almacenarse es relativamente grande para simulaciones que tienen un gran número de puntos de toma de datos y puede surgir un error de operador en los resultados combinados.

Para calcular la interferencia combinada basada en múltiples simulaciones la o las constelaciones no OSG tienen que fijarse de forma que tengan los mismos instantes de comienzo y de finalización iniciales y el nivel de interferencia I_0/N_0 se almacena para su posterior análisis. Tras calcular todas las fuentes de interferencia, se pueden sumar los niveles de interferencia en función del tiempo para llegar a un nivel de interferencia combinada.

Como ejemplo de interferencia combinada basada en múltiples simulaciones se considera el que se muestra en el § 3 del Anexo 3 y se supone que se desea evaluar la influencia combinada de dos estaciones terrenas OSG en los enlaces ascendente y descendente no OSG. Ambas estaciones terrenas OSG se describen mediante los parámetros de los Cuadros 3 y 4, una de las estaciones terrenas OSG (ET1 OSG) está ubicada, como se indica en el Cuadro 2, en 33:26:54 N, 112:04:24 W y la segunda estación terrena OSG (ET2 OSG) está situada en 40:26:54 N, 112:04:24 W y se supone que comunica mediante un haz de satélite diferente del de la ET1 OSG. Se supone que ambas estaciones terrenas OSG funcionan en la misma frecuencia que la estación no OSG.

El paso siguiente consiste en ejecutar la simulación dos veces, una para cada estación terrena OSG, y almacenar los resultados para cada intervalo de tiempo. Por ejemplo, supóngase que los conjuntos de datos siguientes se definen como:

$I_0/N_0 1(t)$: intervalos de tiempo de la relación I_0/N_0 de enlace ascendente en el receptor no OSG para las dos estaciones terrenas en el mismo emplazamiento (no OSG y ET1 OSG).

$I_0/N_0 2(t)$: intervalos de tiempo de la relación I_0/N_0 de enlace ascendente en el receptor no OSG para las dos estaciones terrenas separadas (no OSG y ET2 OSG).

$I_0/N_0 A(t)$: intervalos de tiempo de la relación I_0/N_0 combinada en el receptor no OSG para todas las estaciones terrenas OSG.

Después de crear los dos conjuntos de datos se puede calcular la relación combinada sumando los resultados. La interferencia combinada de enlace ascendente al satélite no OSG, $I_0/N_0 A(t)$, se calcula mediante:

$$I_0/N_0 A(t_i) = I_0/N_0 1(t_i) + I_0/N_0 2(t_i)$$

donde t_i es el intervalo de tiempo en el cual se calcula la interferencia. Hay que destacar que un requisito para este planteamiento es que la constelación no OSG se inicialice en el mismo instante y tenga el mismo intervalo de tiempo para ambas simulaciones, es decir, que la posición inicial y todas las posiciones subsiguientes de la constelación en el espacio sea la misma para ambas simulaciones, si no se hace esto los resultados serán incorrectos.

2.6.2 Interferencia combinada basada en una simulación

Este método de cálculo de la interferencia combinada proveniente de múltiples fuentes de interferencia tiene la ventaja de que sólo se realiza una simulación para todas las posibles fuentes de interferencia y que, por lo tanto, se ahorra tiempo al realizar sólo una simulación. Un inconveniente es que los datos no se pueden revisar en detalle para evaluar qué fuente de interferencia puede ser la que más contribuye a los resultados combinados. Se puede evitar este inconveniente permitiendo al usuario que tenga la opción de guardar cada contribución individual en función del tiempo.

De nuevo, como ejemplo de interferencia combinada basada en múltiples simulaciones se considera el ejemplo descrito en el § 2.6.1 para calcular la interferencia proveniente de dos estaciones terrenas OSG. En este caso, el programa de análisis fija ambas estaciones terrenas y calcula la interferencia combinada para cada intervalo de tiempo.

2.7 Expresiones de la interferencia en términos de $dfpe_{\uparrow}$ y de $dfpe_{\downarrow}$

En la Resolución 130 (CMR-97) se indican límites provisionales de $dfpe_{\uparrow}$ y de $dfpe_{\downarrow}$ para proteger las operaciones OSG de interferencias cocanal no OSG. Este punto describe cómo relacionar el nivel de interferencia calculado mediante la relación I_0/N_0 con los valores de la $dfpe_{\uparrow}$ y los valores de la $dfpe_{\downarrow}$ del enlace descendente.

2.7.1 $dfpe_{\downarrow}$ del enlace descendente

La $dfpe_{\downarrow}$ del enlace descendente ($W/(m^2 \cdot MHz)$) se calcula mediante:

$$dfpe_{\downarrow} = \sum_i 10^{dfp_i/10} \frac{G_r(\theta_i)}{G_{m\acute{a}x}} \quad (19)$$

donde:

i : índice de la fuente de interferencia

dfp_i : dfp proveniente de la fuente de interferencia i -ésima ($dB(W/(m^2 \cdot Hz))$)

$G_r(\theta_i)$: ganancia de la antena receptora del receptor interferido en la dirección de la fuente de interferencia i -ésima (dBi)

$G_{m\acute{a}x}$: ganancia máxima en recepción del receptor interferido (dBi).

La relación de interferencia I_0/N_0 se calcula mediante:

$$\begin{aligned} \frac{I_0}{N_0} &= \frac{P_t}{BW_{tx}} G_t(\varphi_1) G_r(\varphi_2) \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \frac{1}{kT} \frac{1}{L_p} \\ &= \frac{P_t}{BW_{tx}} \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{G_t(\varphi_1)}{4\pi R^2} \frac{1}{L_p} \frac{1}{kT} G_r(\varphi_2) \end{aligned} \quad (20)$$

donde:

P_t : potencia de transmisión disponible (W)

BW_{tx} : anchura de banda de transmisión (Hz)

$G_t(\varphi_1)$: ganancia de transmisión (intensidad relativa)

$G_r(\varphi_2)$: ganancia del receptor (intensidad relativa)

φ_1 : ángulo a partir del eje del transmisor en la dirección del receptor

φ_2 : ángulo a partir del eje del receptor en la dirección del transmisor

λ : longitud de onda del transmisor (m)

R : distancia (m)

k : constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)

T : temperatura de ruido (K)

L_p : factor de aislamiento de polarización.

La dfpe ($W/(m^2 \cdot Hz)$) proveniente de la fuente i -ésima, teniendo en cuenta la discriminación de la antena en recepción y normalizando respecto de la ganancia de antena máxima del receptor se puede expresar como:

$$dfpe_i = \frac{P_{t_i}}{BW_{tx_i}} \frac{G_{t_i}(\phi_1)}{4\pi R_i^2} \frac{1}{L_p} \frac{G_r(\phi_2)}{G_{máx}} \quad (21)$$

Por lo tanto, teniendo en cuenta las ecuaciones (20) y (21), la dfpe ($W/(m^2 \cdot Hz)$) proveniente de la fuente i -ésima se puede expresar en términos de la relación I_{0_i}/N_0 proveniente de la fuente i -ésima como:

$$dfpe_i = \frac{I_{0_i}}{N_0} \frac{4\pi \times 10^6}{\lambda^2} \frac{k T}{G_{máx}} \quad (22)$$

Hay que destacar que el factor $\frac{4\pi \times 10^6}{\lambda^2} \frac{k T}{G_{máx}}$ es una constante para la simulación y se puede aplicar a los resultados de la simulación. También hay que destacar que, si la relación I_0/N_0 utilizada es la combinación de múltiples fuentes, todavía se puede aplicar el factor de conversión a la relación I_0/N_0 combinada para llegar a los resultados de dfpe combinada que se muestran en la ecuación (19).

2.7.2 dfpe del enlace ascendente

La dfpe del enlace ascendente ($W/(m^2 \cdot Hz)$) se calcula mediante:

$$dfpe_{\uparrow} = \sum_i 10^{p_i/10} \frac{G_t(\phi_i)}{4\pi R_i^2} \frac{G_r(\theta_i)}{G_{máx}} \quad (23)$$

donde:

$G_r(\theta_i)$: ganancia de la antena receptora del receptor interferido en la dirección de la fuente de interferencia i -ésima.

Modificando la ecuación (23) la dfpe del enlace ascendente ($W/(m^2 \cdot Hz)$) proveniente de la fuente i -ésima se puede expresar como:

$$dfpe_{\uparrow_i} = \frac{P_{t_i}}{BW_{tx_i}} \frac{G_{t_i}(\phi_1)}{4\pi R_i^2} \frac{1}{L_p} \frac{G_r(\phi_2)}{G_{máx}} \quad (24)$$

en la cual se supone que $p_i = 10 \log\left(\frac{P_t}{BW_{tx}}\right)$.

Por lo tanto, considerando de nuevo las ecuaciones (20) y (24), la dfpe del enlace ascendente ($W/(m^2 \cdot Hz)$) proveniente de la fuente i -ésima se puede expresar en términos de I_{0_i}/N_0 como:

$$dfpe_{\uparrow_i} = \frac{I_{0_i}}{N_0} \frac{4\pi \times 10^6}{\lambda^2} \frac{k T}{G_{máx}} \quad (25)$$

Hay que destacar que el factor $\frac{4\pi \times 10^6}{\lambda^2} \frac{k T}{G_{máx}}$ es una constante para la simulación y se puede aplicar a los resultados de la simulación. Cabe destacar que si la relación I_0/N_0 utilizada es la interferencia combinada proveniente de múltiples fuentes, todavía se puede aplicar el factor de conversión para la relación I_0/N_0 combinada y llegar a los resultados de dfpe del enlace ascendente que se muestran en la ecuación (23).

3 Ejemplo de metodología de la interferencia no OSG y OSG

Este punto presenta un ejemplo de los resultados obtenidos utilizando el análisis geométrico definido por esta metodología para realizar el análisis de interferencia entre un sistema no OSG y un sistema de satélites OSG. El ejemplo presentado en este Anexo se refiere a un sistema LEO-A y a un sistema OSG. Los parámetros de partida para las constelaciones figuran en el Cuadro 3.

CUADRO 3

Parámetros de partida para la simulación no OSG y OSG

| Parámetro de entrada | No OSG | OSG |
|---|-------------------------------------|---------------------|
| Número de estaciones espaciales | 66 | 1 |
| Número de planos | 6 | 1 |
| Altitud de la órbita (km) | 780,6 | 35 785,4 |
| Inclinación (grados) | 84,6 | 0 |
| Ascensión recta del nodo ascendente (grados) | 0,0, 31,6, 63,2, 94,8, 126,4, 158,0 | 261 |
| Anomalía de la primera estación espacial en cada plano (grados) | 0,0, 16,35, 2,6, 18,95, 5,2, 21,55 | 0 |
| Mínima elevación (grados) | 5 | – |
| Diagrama de antena de la estación espacial | Apéndice S8 del RR | – |
| Máxima ganancia de transmisión de la estación espacial (dBi) | 26,9 | 41,5 ⁽¹⁾ |
| Máxima ganancia de recepción de la estación espacial (dBi) | 30,1 | 41,5 ⁽²⁾ |
| Latitud septentrional de la estación terrena (grados:min:s) | 33:26:54 | |
| Longitud occidental de la estación terrena (grados:min:s) | 112:04:24 | |
| Diagrama de antena de la estación terrena | Apéndice S8 del RR | |
| Máxima ganancia de transmisión de la estación terrena (dBi) | 56,3 | 44,5 |
| Máxima ganancia de recepción de la estación terrena (dBi) | 53,2 | 43,0 |

- (1) Ganancia de transmisión de la estación espacial hacia la estación terrena no OSG; 41,5 dBi es la ganancia en el borde de la zona de cobertura para un haz puntual estrecho.
- (2) Ganancia de recepción de la estación espacial hacia la estación terrena no OSG; 41,5 dBi es la ganancia en el borde de la zona de cobertura para un haz puntual estrecho.

En el Cuadro 4 aparecen los parámetros de radiofrecuencia para los enlaces no OSG y OSG. Los espacios en blanco del cuadro representan información no necesaria para la simulación. El sistema OSG no utiliza control de potencia según distancia y, por consiguiente, no es necesaria la fila relativa a P_r ; de forma similar, para el sistema no OSG que utiliza control de potencia según distancia no son necesarias las filas de datos relativas a P_t , BW_{tx} y P_t/BW_{tx} .

CUADRO 4

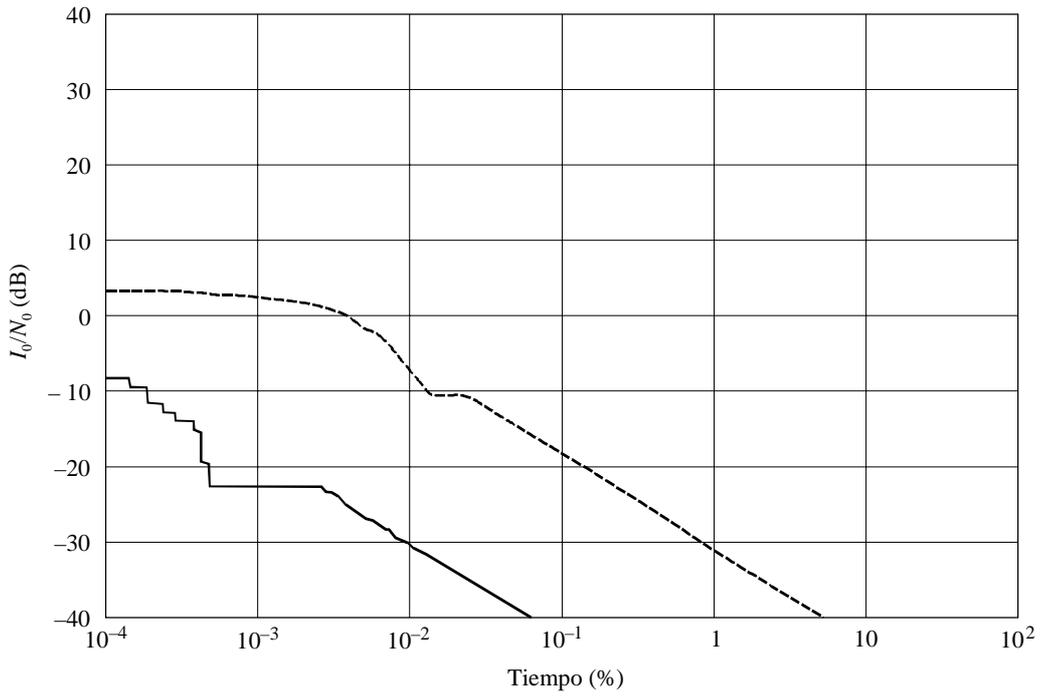
Parámetros de radiofrecuencia del sistema

| Parámetro | Estación espacial no OSG | Estación terrena no OSG | Estación espacial OSG | Estación terrena OSG |
|------------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|
| P_t (dBW) | – | – | 12,5 | –5,2 |
| BW_{tx} (MHz) | – | – | 125 | 0,5 |
| P_t/BW_{tx} (dB(W/Hz)) | – | – | –68,5 | –62,2 |
| P_r (dB(W/Hz)) | –216,1 | –243,6 | – | – |
| L_p | 1 | 1 | 1 | 1 |
| λ de transmisión (m) | 0,0154 | 0,0103 | 0,0154 | 0,0103 |
| T (K) | 1 295,4 | 731,4 | 575 | 275 |

Los resultados mostrados en las Figs. 8 a 13 se refieren a una simulación de 49 días de duración y un muestreo cada 2 s, lo que dio lugar a más de 2,1 millones de puntos de muestra.

En las Figs. 8 y 9 se representa la relación I_0/N_0 en función del porcentaje de tiempo durante el que aparece dicho nivel. La Fig. 8 se refiere a la interferencia causada por una red no OSG a una red OSG y la Fig. 9, a la interferencia provocada por una red OSG a una red no OSG.

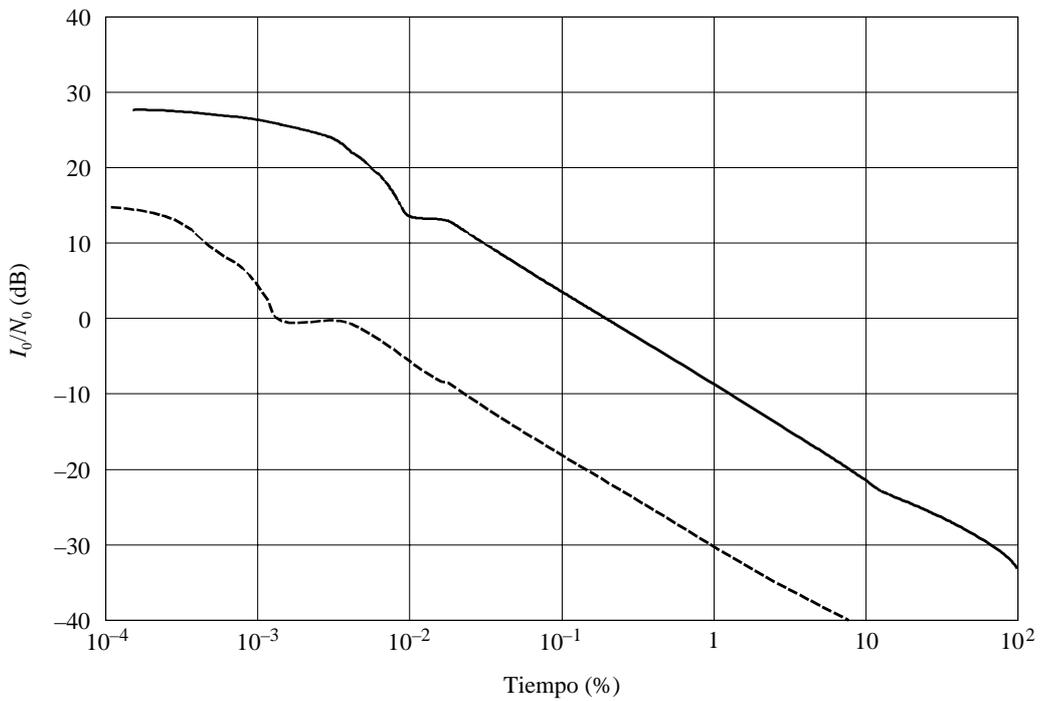
FIGURA 8
Interferencia causada por una red no OSG a una red OSG



— Enlace ascendente
- - - Enlace descendente

1325-08

FIGURA 9
Interferencia causada por una red OSG a una red no OSG



— Enlace ascendente
- - - Enlace descendente

1325-09

En las Figs. 10 y 11 aparecen el número y la duración de los sucesos en los cuales la relación I_0/N_0 es superior a un nivel previamente especificado. La Fig. 10 se refiere a los efectos de una red no OSG en una red OSG cuando se considera la aparición de un suceso si el valor de I_0/N_0 es superior a -16 dB y la Fig. 11 representa los efectos de una red OSG en una red no OSG cuando se considera la aparición de un suceso si I_0/N_0 es superior a -1 dB.

Las Figs. 12 y 13 muestran la historia temporal de la relación I_0/N_0 en el caso de interferencia causada por el enlace ascendente OSG en el enlace ascendente no OSG. Los gráficos se han representado durante un periodo de tiempo en el cual el nivel de interferencia I_0/N_0 alcanza su valor máximo. La Fig. 12 abarca un intervalo temporal de 1 h y las marcas en el eje de tiempo aparecen cada 15 min. La Fig. 13 considera con detalle el suceso de interferencia de cresta mostrado en la Fig. 12.

FIGURA 10
Duración de los sucesos de interferencia causada por una red no OSG a una red OSG

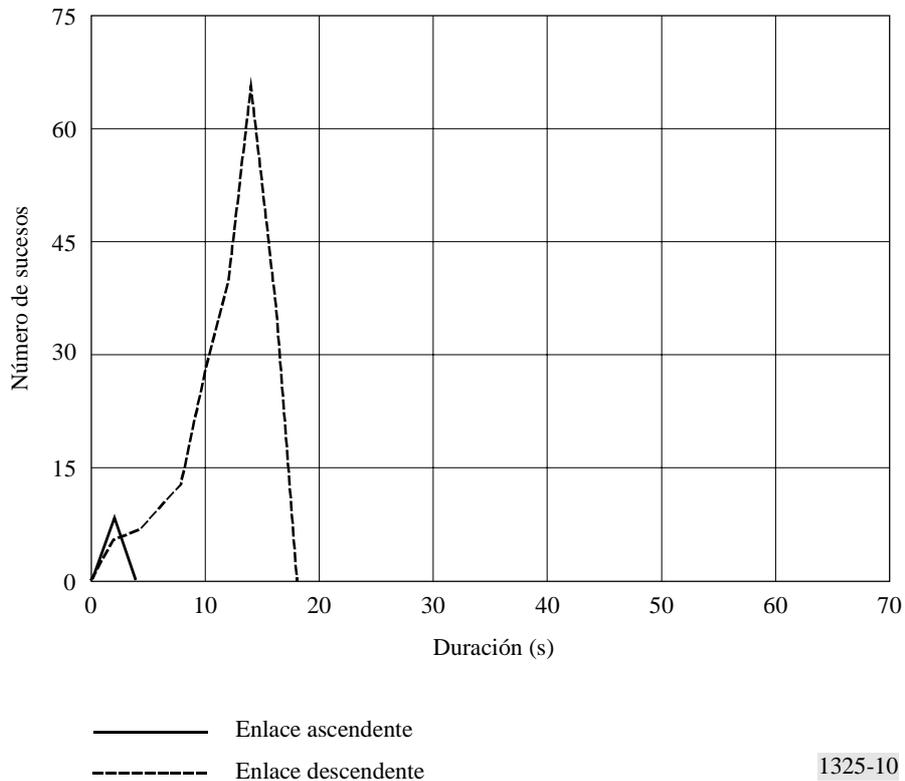


FIGURA 11

Duración de los sucesos de interferencia causada por una red OSG a una red no OSG

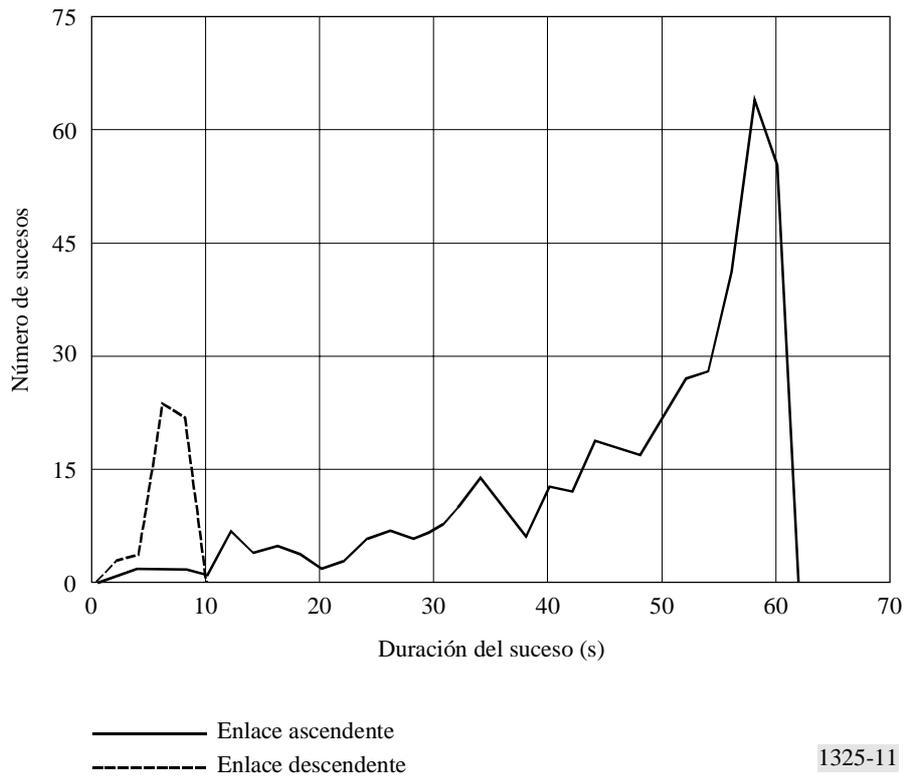


FIGURA 12

Representación temporal de la interferencia causada por una red OSG en el enlace ascendente de una red no OSG

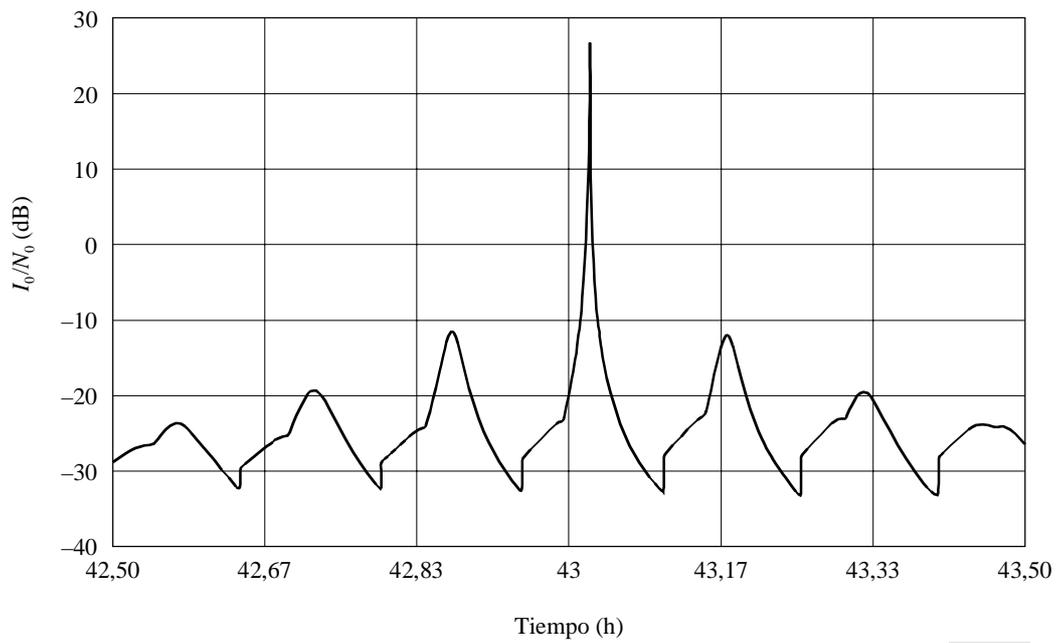
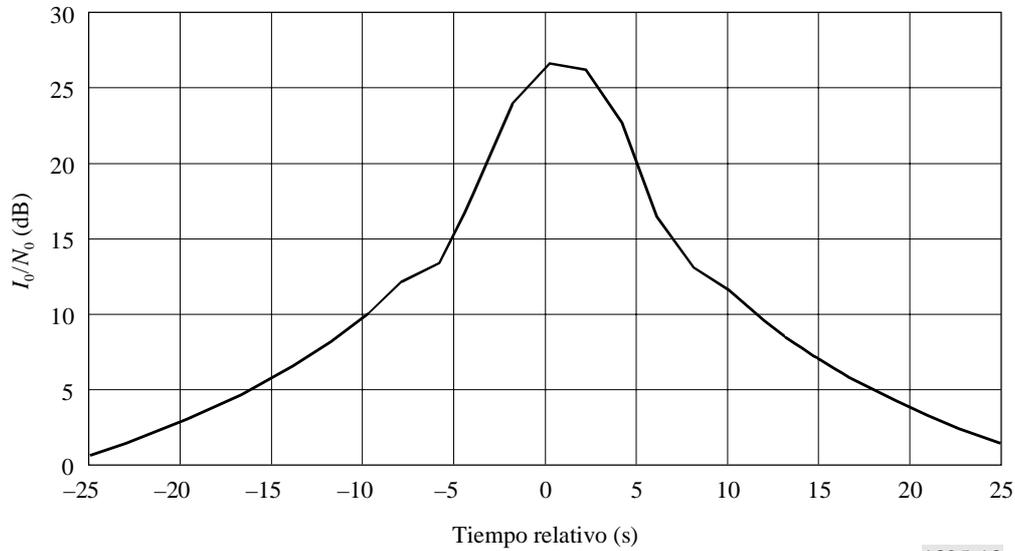


FIGURA 13
Detalle de la cresta que aparece en la Fig. 12 centrada en el instante $t = 43 \text{ h } 74 \text{ s}$



1325-13

3.1 Validación de los resultados de la interferencia

Para confirmar que los niveles de interferencia calculados en el § 3 se encuentran dentro de los valores que cabe esperar, es conveniente realizar una comparación con un punto de referencia conocido. Para ello, pueden compararse los niveles de interferencia máximos mostrados en las Figs. 8 y 9 con el nivel de interferencia calculado cuando el satélite no OSG se encuentra directamente alineado con el trayecto entre la estación terrena OSG y el satélite OSG. En el Cuadro 5 aparece el cálculo de interferencia para el caso de una red no OSG interfiriendo a una red OSG. Los valores de cresta de la Fig. 8 y el valor de interferencia calculado en el Cuadro 5 son los mismos.

CUADRO 5

Cálculo del nivel de interferencia en línea causada por una red OSG a una red no OSG

| | Enlace ascendente no OSG al enlace ascendente OSG | Enlace descendente no OSG al enlace descendente OSG |
|---|---|---|
| P_f (dB(W/Hz)) | -216,1 | -243,6 |
| Longitud del trayecto deseado (km) | 998,7 | 998,7 |
| Pérdidas en el trayecto deseado (dB) | -181,7 | -178,4 |
| Ganancia de transmisión deseada (dBi) | 56,3 | 26,9 |
| P_t/BW_{tx} (dB(W/Hz)) | -90,7 | -92,4 |
| Ganancia de transmisión deseada (dBi) | 56,3 | 26,9 |
| Longitud del trayecto de interferencia (km) | 37 165,8 | 998,7 |
| Pérdidas en el trayecto de interferencia (dB) | -213,1 | -178,4 |
| L_p | 1 | 1 |
| Ganancia de recepción (dBi) | 41,5 | 43,0 |
| I_0 (dB(W/Hz)) | -206,0 | -200,6 |
| Ruido en el receptor, T (K) | 575 | 275 |
| N_0 (dB(W/Hz)) | -201,0 | -204,2 |
| I_0/N_0 (dB) | -5,0 | 3,6 |

En el Cuadro 6 aparece el cálculo de la interferencia causada por una red OSG a una red no OSG. Los valores de cresta de la Fig. 9 y el valor de interferencia calculado en el Cuadro 6 son los mismos.

CUADRO 6

Cálculo del nivel de interferencia en línea causada por una red OSG a una red no OSG

| | Enlace ascendente OSG al enlace ascendente no OSG | Enlace descendente OSG al enlace descendente no OSG |
|---|---|---|
| P_t/BW_{tx} (dB(W/Hz)) | -62,2 | -68,5 |
| Ganancia de transmisión (dBi) | 44,5 | 41,5 |
| Longitud del trayecto de interferencia (km) | 998,7 | 37 165,8 |
| Pérdidas en el trayecto de interferencia (dB) | -181,7 | -209,6 |
| L_p | 1 | 1 |
| Ganancia de recepción (dBi) | 30,1 | 53,2 |
| I_0 (dB(W/Hz)) | -169,3 | -183,4 |
| Ruido del receptor, T (K) | 1 295,4 | 731,4 |
| N_0 (dB(W/Hz)) | -197,5 | -200,0 |
| I_0/N_0 (dB) | 28,2 | 16,6 |

ANEXO 4

Programa para la continuación de los trabajos

A continuación figura un plan esquemático para continuar los trabajos sobre esta Recomendación.

- 1 Ajustar el tiempo de ejecución de forma que sea el de la primera repetición de la huella sobre la superficie trazada por el punto subsatélite no OSG cuando la otra red es OSG y/o tratar las condiciones iniciales y el tiempo de ejecución adecuado para varias constelaciones a fin de asegurar un resultado estadístico sin sesgo.
- 2 Incluir en el § 2.7 del Anexo 1 un debate sobre la selección del intervalo de tiempo adecuado para varias constelaciones, es decir, para constelaciones que tienen órbitas elípticas. Ello será función de la altitud o altitudes de la constelación y del tamaño de antena (anchura de haz).
- 3 Se necesitan más estudios para definir el valor de aislamiento que puede aceptarse entre el transmisor y el receptor debido a la distinta polarización. En estos estudios deben tenerse en cuenta temas tales como los efectos atmosféricos y los sistemas que emplean métodos de comparación de fase para las antenas de seguimiento.
- 4 Utilizar técnicas de selección de la estación espacial cuando una estación terrena observa múltiples satélites. Deben examinarse otras técnicas consideradas por diversos operadores relativas a la evitación de la interferencia o a la diversidad.
- 5 Tener en cuenta en el § 2.2 del Anexo 3 los sistemas que utilizan control de potencia basado en la distancia entre el terminal terreno no OSG y un satélite no OSG.
- 6 Considerar si es oportuno incluir en la Recomendación un ejemplo de las metodologías.
- 7 Estudiar si es deseable incluir en la Recomendación detalles de implantación, como las constantes de optimización que figuran en el § 2.2 del Anexo 3. También se debe considerar hasta qué punto algunos parámetros se pueden suponer constantes, dados factores tales como antenas de ganancia de cresta adaptativa, control de potencia y órbitas elípticas.