

RECOMENDACIÓN UIT-R S.1325

METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN PARA EVALUAR LA 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)

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 de 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 § b) 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,

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 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 – 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 4 – 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 5 – En el Anexo 2 figura una descripción y un ejemplo de la metodología de cálculo.

NOTA 6 – El Anexo 3 proporciona una lista de temas para continuar los trabajos sobre esta Recomendación.

Metodología para evaluar la 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 punterías 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 la ganancia de alcance. 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 ganancia de 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

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

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

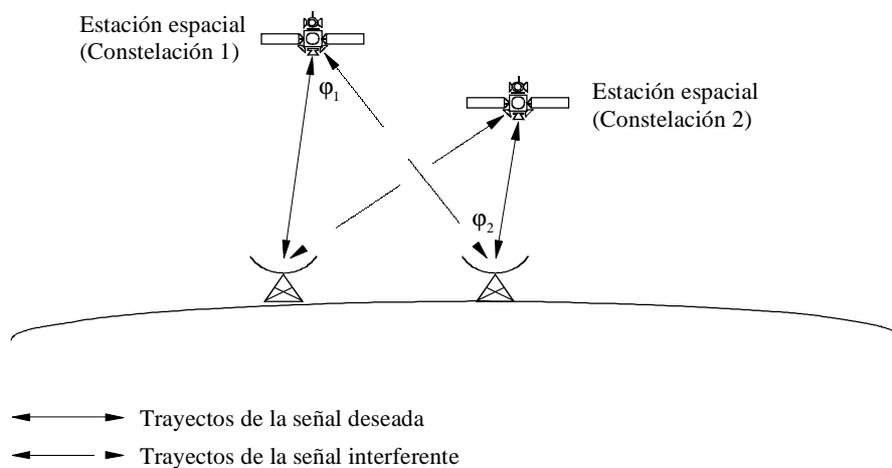
siendo:

- 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 : Alcance (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 ganancia de alcance por la constante:

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

FIGURA 1
Geometría de la interferencia



1325-01

Por ejemplo, el producto de ganancia de alcance 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,

$$\frac{G_t(\phi_1) G_r(\phi_2)}{4\pi R^2} \tag{2}$$

2 Hipótesis de simulación

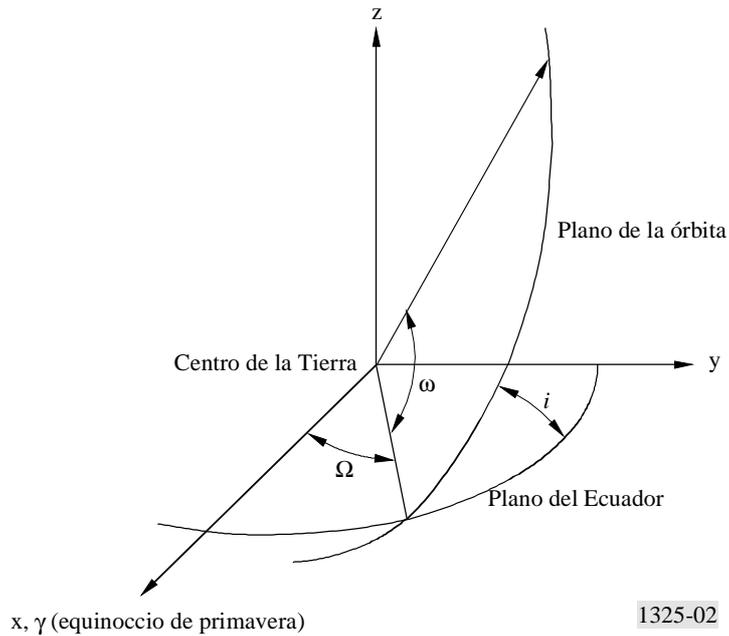
2.1 Modelo de órbita

El modelo de órbita 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 plan ecuatorial debida a la esfericidad de la Tierra.

2.1.1 Discusión

El modelo de órbita representa el movimiento de un satélite en un sistema geocéntrico de coordenadas inerciales, 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 (γ , 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, $\vec{y} = \vec{z} \cdot \vec{x}$.

FIGURA 2
Representación de los elementos orbitales keplerianos



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 ($5,974 \times 10^{24} \text{ kg}$).

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:

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

donde g es la relación 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.
- a : 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:

$$a = a_0 + at \quad (10)$$

donde:

- a_0 : posición angular de la estación espacial en el instante t_0
- a : 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:

$$\Omega = \Omega_0 + bt \quad (11)$$

donde:

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

$$b = 2,018 e - 6 \left(\frac{r}{R_E} \right)^{-3,5} \cos i \quad (12)$$

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

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

2.2 Parámetros de la antena

2.2.1 Parámetros de la antena de la estación terrena y de la estación espacial no geoestacionaria

Los diagramas de antena de la estación terrena constituyen un parámetro de entrada para la simulación. Entre los diagramas sugeridos pueden citarse, entre otros, los siguientes:

- Diagramas de antena medidos
- Apéndice 29 [S8] del Reglamento de Radiocomunicaciones (RR)
- Recomendación UIT-R S.465
- Recomendación UIT-R S.672.

2.2.2 Diagramas de antena de la estación espacial OSG

Si bien la estación espacial OSG puede utilizar diagramas de antena con haces conformados, el diagrama de antena para la estación espacial OSG no es necesario para la simulación. Los parámetros requeridos son la ganancia de recepción/transmisión de la estación espacial OSG en dirección a la estación terrena no OSG. Ello se debe a que el emplazamiento de la estación terrena no OSG es constante con respecto a la estación espacial OSG; por consiguiente, la ganancia de recepción/transmisión de la estación espacial OSG es constante en dirección de la estación terrena no OSG.

2.3 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 3.)

2.4 Hipótesis de explotación

2.4.1 Selección de la estación espacial no OSG

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 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 amplio 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 es el siguiente:

$$\begin{array}{l} \text{mín} \quad \vec{r} \cdot \vec{v} \\ \text{Todos los satélites por encima} \\ \text{del ángulo de elevación mínimo} \end{array} \quad (14)$$

Este procedimiento de selección se representa en la Fig. 3. La vista en planta muestra la estación espacial, señalada por \vec{v}_1 desplazándose hacia la estación terrena, por consiguiente el producto escalar es negativo y se selecciona la otra estación espacial. (Véase el Anexo 3.)

2.4.2 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 párrafo 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/aumente su potencia de transmisión a medida que el receptor se aproxima/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:

$$P_r = \frac{P_t(R)}{BW_{tx}} G_t(0) \left(\frac{\lambda}{4\pi R_w} \right)^2 \quad (15)$$

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:

$$C_0/N_0 = \frac{P_r(R) G_{rw}(0)}{k T_w} = \frac{P_t(R)}{BW_{tx}} \frac{G_t(0) G_{rw}(0)}{k T_w} \left(\frac{\lambda}{4\pi R_w} \right)^2 \quad (16)$$

siendo:

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

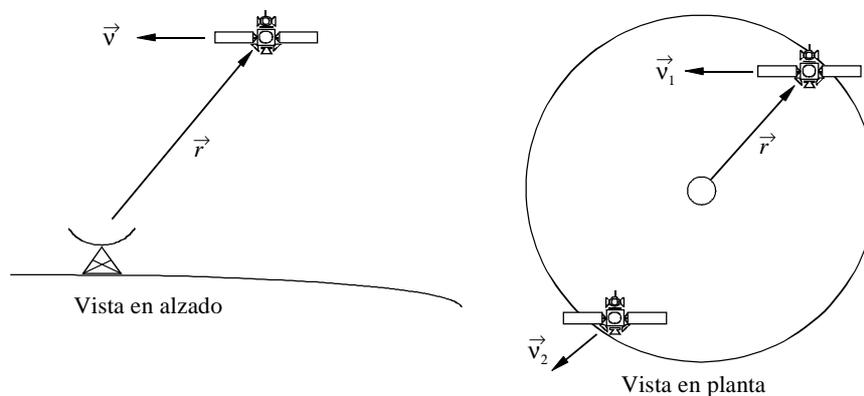
T_w : temperatura de ruido del receptor deseada.

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

$$\begin{aligned} I_0/N_0 &= \frac{P_t(R)}{BW_{tx}} G_t(\varphi_1) G_r(\varphi_2) \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \frac{1}{k T} \frac{1}{L_p} \\ &= P_r \frac{G_t(\varphi_1) G_r(\varphi_2)}{G_t(0)} \left(\frac{R_w}{R} \right)^2 \frac{1}{k T} \frac{1}{L_p} \end{aligned} \quad (17)$$

FIGURA 3

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



1325-03

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
 - Altitud de la órbita
 - Inclinación del plano
 - Ascensión recta del nodo ascendente
 - Anomalía de la primera estación espacial en cada plano (el resto de estaciones espaciales en el plano se encuentran equidistantes).

2.5.2 Parámetros de antena

– Estación espacial

Sistema no OSG:

- Diagrama de antena
- Máxima ganancia de transmisión (dBi)
- Máxima ganancia de recepción (dBi)

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

– 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)).

2.6 Datos de entrada

Los datos de entrada 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 en 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 dato proporciona una indicación del periodo total en que el nivel de interferencia se encontrará por encima de un nivel 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 3).

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:

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

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

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

siendo:

- a : velocidad angular del satélite en las coordenadas fijadas en Tierra (sistema de coordenadas de referencia geosíncrono geocéntrico)
- a_e : velocidad angular de rotación de la Tierra en el ecuador
- a_s : 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_ε : 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 : radio de la Tierra
- 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 a 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.

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.

Descripción y ejemplo de la metodología de cálculo

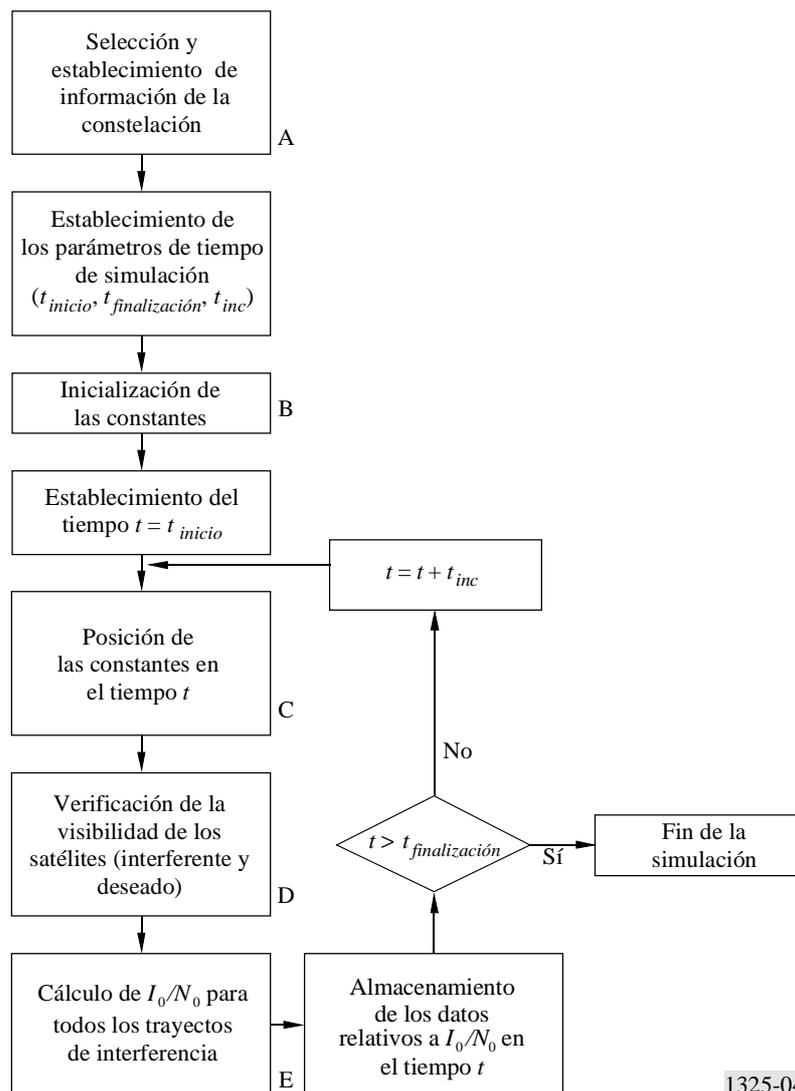
1 Introducción

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. 4 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 (Anexo 1, § 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 4
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. 4, 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 Anexo 1, § 2.1, 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	$C_{12d} = \frac{P_{t1d}}{BW_{tx1d}} \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{1}{k T_{2d}} \frac{1}{L_{p12d}}$
enlace ascendente Const_1 → enlace ascendente Const_2	$C_{12u} = \frac{P_{t1u}}{BW_{tx1u}} \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{1}{k T_{2u}} \frac{1}{L_{p12u}}$
enlace descendente Const_2 → enlace descendente Const_1	$C_{21d} = \frac{P_{t2d}}{BW_{tx2d}} \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{1}{k T_{1d}} \frac{1}{L_{p21d}}$
enlace ascendente Const_2 → enlace ascendente Const_1	$C_{21u} = \frac{P_{t2u}}{BW_{tx2u}} \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{1}{k T_{1u}} \frac{1}{L_{p21u}}$

En este Cuadro, el subíndice 1d corresponde al enlace descendente de la constelación 1, 2d corresponde al enlace descendente de la constelación 2, 1u corresponde al enlace ascendente de la constelación 1 y 2u al enlace ascendente de la constelación 2. El factor de aislamiento por polarización corresponde a la combinación transmisión/recepción; es decir, 12d 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	$I_0/N_0 = C_{12d} \frac{G_{t1d}(\varphi_1) G_{r2d}(\varphi_2)}{4\pi (R_{12d})^2}$
enlace ascendente Const_1 → enlace ascendente Const_2	$I_0/N_0 = C_{12u} \frac{G_{t1u}(\varphi_1) G_{r2u}(\varphi_2)}{4\pi (R_{12u})^2}$
enlace descendente Const_2 → enlace descendente Const_1	$I_0/N_0 = C_{21d} \frac{G_{t2d}(\varphi_1) G_{r1d}(\varphi_2)}{4\pi (R_{21d})^2}$
enlace ascendente Const_2 → enlace ascendente Const_1	$I_0/N_0 = C_{21u} \frac{G_{t2u}(\varphi_1) G_{r1u}(\varphi_2)}{4\pi (R_{21u})^2}$

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

$G_{t1d}(\varphi_1)$: ganancia de transmisión de la antena transmisora del enlace descendente de Const_1 (intensidad relativa)

$G_{r2d}(\varphi_2)$: ganancia de recepción de la antena receptora del enlace descendente de Const_2 (intensidad relativa)

R_{12d} : 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 Anexo 1, § 2.1. 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 Anexo 1, § 2.4.1, 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 el Anexo 1, 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 (Anexo 2, Cuadro 2). Los niveles de interferencia se almacenan para un posterior análisis.

3 Ejemplo de metodología de la interferencia no OSG y OSG

Este párrafo 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 29 [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 29 [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} .

Los resultados mostrados en las Figs. 5 a 10 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.

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

En las Figs. 5 y 6 se representa la relación I_0/N_0 en función del porcentaje de tiempo durante el que aparece dicho nivel. La Fig. 5 se refiere a la interferencia causada por una red no OSG a una red OSG y la Fig. 6, a la interferencia provocada por una red OSG a una red no OSG.

En las Figs. 7 y 8 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. 7 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. 8 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. 9 y 10 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 la citada relación I_0/N_0 alcanza su valor máximo. La Fig. 9 abarca un intervalo temporal de 1 h y las marcas en el eje de tiempo aparecen cada 15 min. La Fig. 10 considera con detalle el suceso de interferencia de cresta mostrado en la Fig. 9.

FIGURA 5

Interferencia causada por una red no OSG a una red OSG

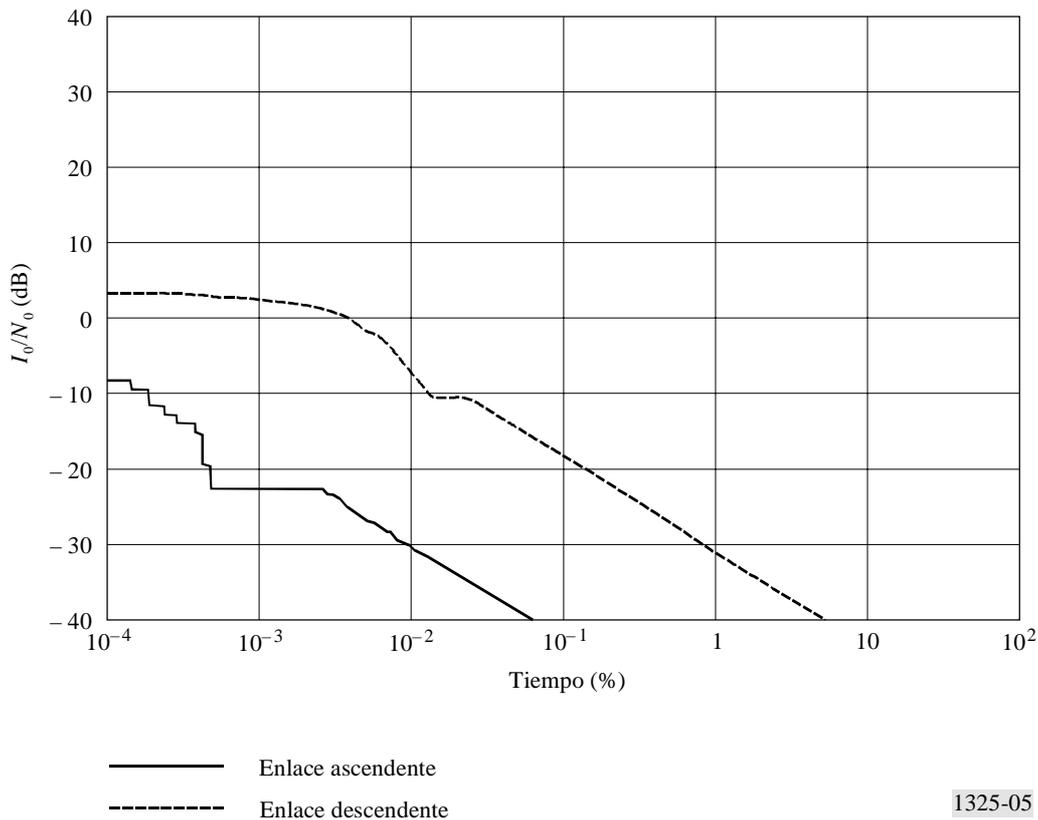
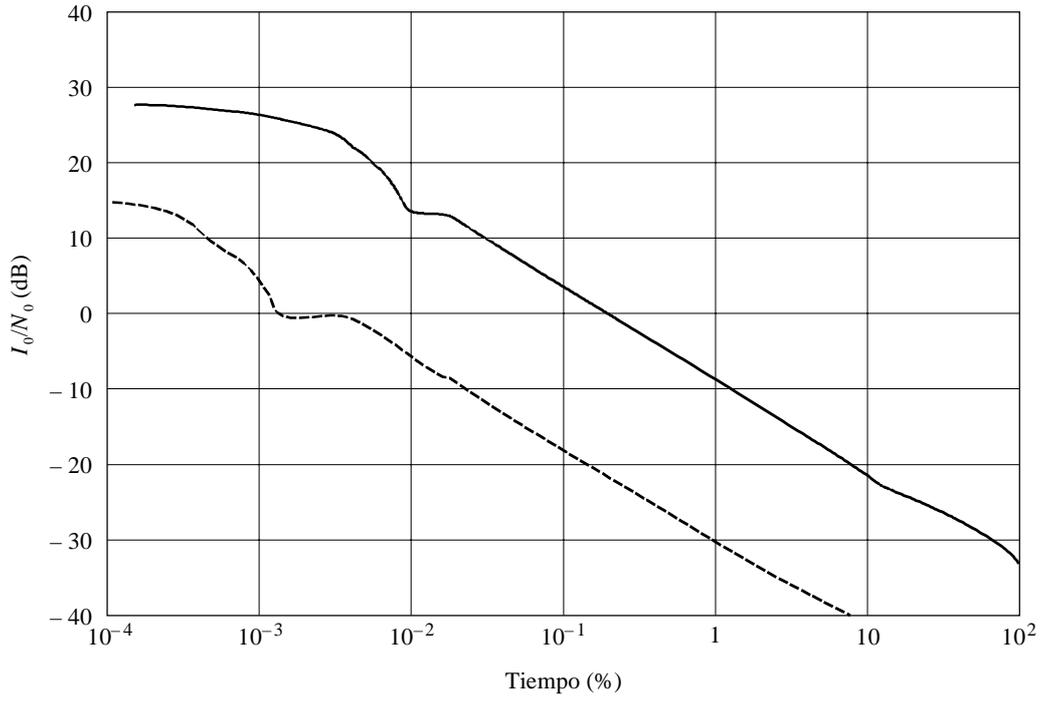


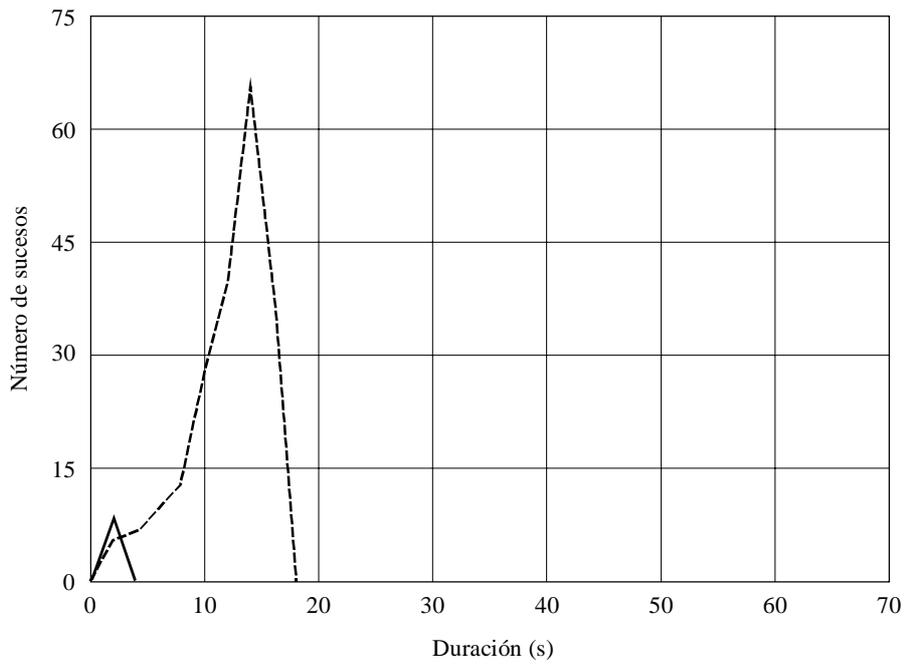
FIGURA 6
Interferencia causada por una red OSG a una red no OSG



— Enlace ascendente
- - - Enlace descendente

1325-06

FIGURA 7
Duración de los sucesos de interferencia causada por una red no OSG a una red OSG



— Enlace ascendente
- - - Enlace descendente

1325-07

FIGURA 8

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

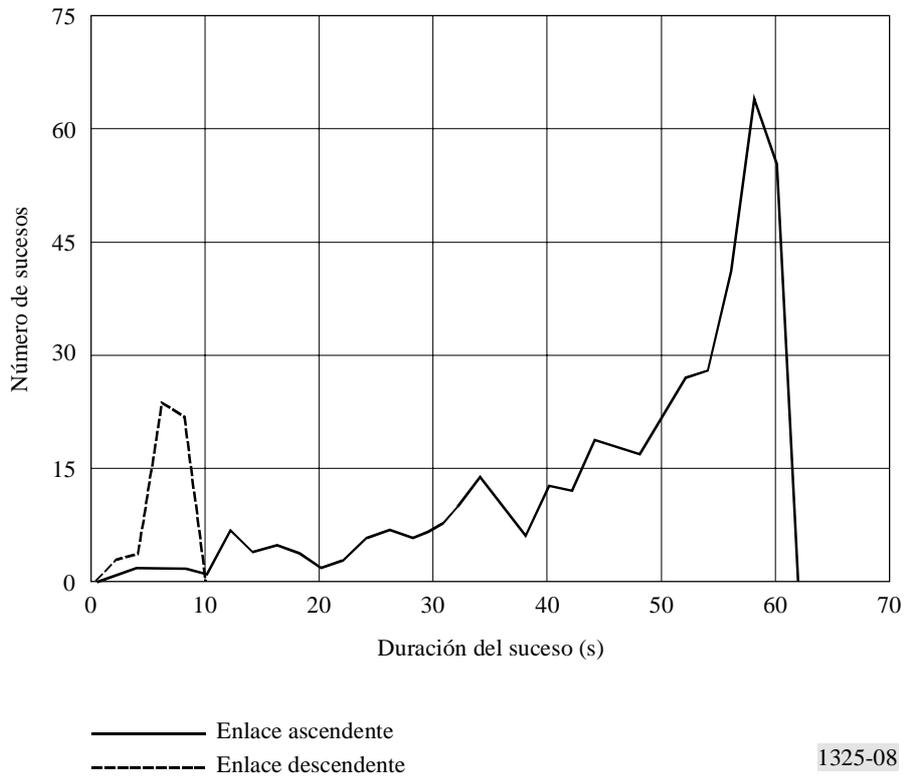


FIGURA 9

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

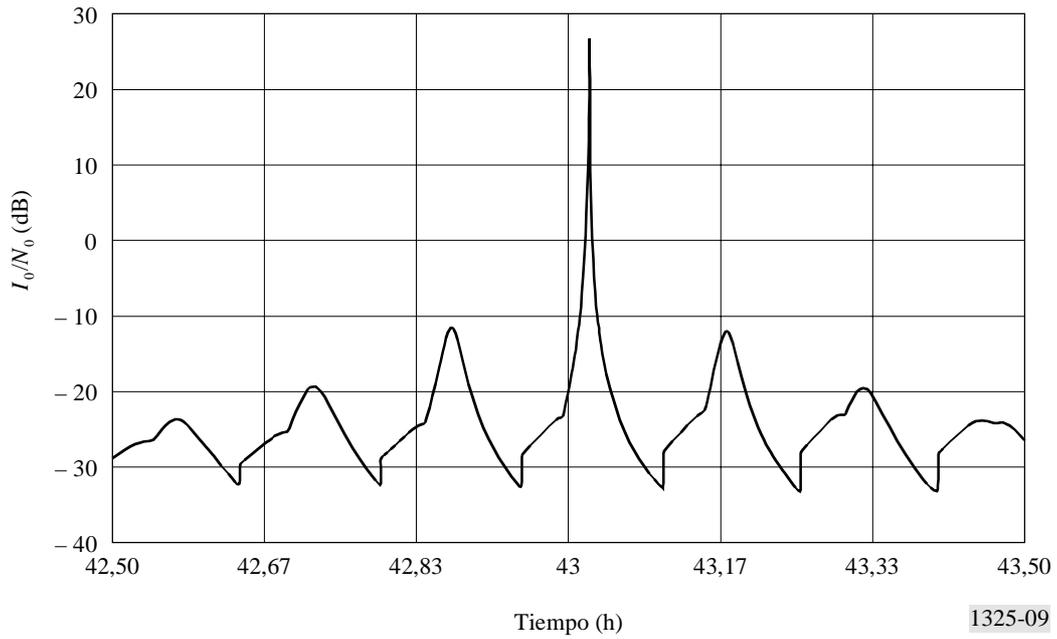
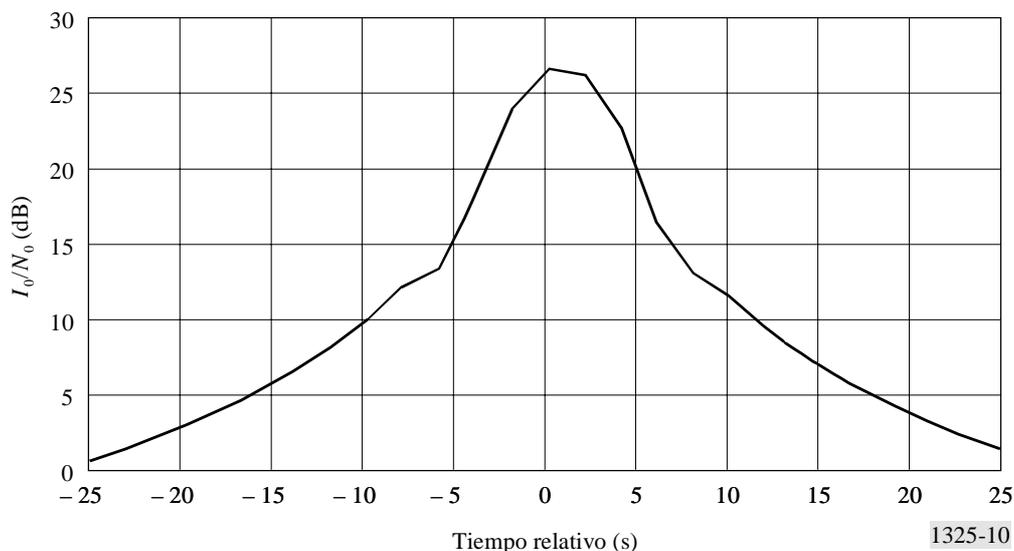


FIGURA 10

Detalle de la cresta que aparece en la Fig. 9 centrada en el instante $t = 43 \text{ h } 74 \text{ s}$



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. 5 y 6 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. 5 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_r (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. 6 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 3

Programa para la continuación de los trabajos

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

- 1) Se ajusta el tiempo de pasada de forma que sea el de la primera repetición de la pista sobre la superficie trazada por el subsatélite no OSG cuando la otra red es OSG y/o se discuten las condiciones iniciales y el tiempo de pasada adecuado para varias constelaciones a fin de asegurar un resultado estadístico sin sesgo.
- 2) Debe realizarse un debate sobre la selección del incremento de tiempo adecuado para varias constelaciones. 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 del aislamiento que puede suponerse 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) Utilización de 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.