

Departamento de Servicios Terrenales

CÁLCULO DE LA PROBABILIDAD DE QUE APAREZCA INTERFERENCIA PERJUDICIAL ENTRE REDES ESPACIALES (RELACIONES C/I)

1 Introducción

Las administraciones que no puedan completar con éxito la coordinación, pueden solicitar a la Oficina que examine la probabilidad de que surja interferencia perjudicial con arreglo a la disposición del número **11.32A**. En los casos en que no puede completarse satisfactoriamente la coordinación en virtud del número **9.7**, la Oficina utiliza el método de la relación portadora/interferencia procedente de una sola fuente (C/I)¹ descrito en la Sección B3 de la Parte B de las Reglas de Procedimiento para calcular la probabilidad de interferencia perjudicial.

En este método, el cálculo de C/I se realiza siguiendo las consideraciones geométricas de la Recomendación UIT-R S. 740 y utiliza un factor de ajuste que tiene en cuenta la cantidad de potencia interferente que debe utilizarse en el cálculo. A continuación, el valor de C/I ajustado se compara con el valor de C/I requerido para evaluar la probabilidad de que aparezca interferencia perjudicial. El valor de C/I requerido se obtiene a partir un valor C/I objetivo y un valor de K que generalmente es 12,2 dB para las portadoras digitales (o 14 dB en otros casos) lo que corresponde a una máxima interferencia admisible del 6% (o del 4%) de la potencia de ruido total, respectivamente.

El método de cálculo de C/I procedente de una sola fuente también es ampliamente utilizado por las administraciones para evaluar la interferencia en la coordinación de las redes de satélites.

2 Relación portadora/ruido (C/N)

El balance del enlace tiene en cuenta las ganancias y pérdidas que sufre una señal al desplazarse de un extremo a otro del enlace. Se emplea en el diseño de los enlaces de comunicaciones teniendo presente los objetivos del enlace tales como el tipo de servicios, las zonas de servicio que se quieren cubrir, las velocidades de transmisión, la disponibilidad del enlace y los requisitos del tamaño de antena entre otros factores. Por tanto, cuando se presenta a la Oficina una notificación de satélite, los datos de las notificaciones deben obtenerse de los balances del enlace con los objetivos del enlace deseados que satisfacen la relación portadora/ruido (C/N) deseada, que representa una medida de la calidad del enlace.

¹ La CMR-15 adoptó la Resolución **762** en la que los criterios de densidad de flujo de potencia son sustituidos por el método C/I para algunos casos que se mencionan en la Resolución.

2.1 Cálculo de C/N

El diagrama que aparece a continuación muestra un enlace de comunicaciones por satélite típico que consta de un enlace ascendente y un enlace descendente, así como los parámetros necesarios para calcular la relación C/N.

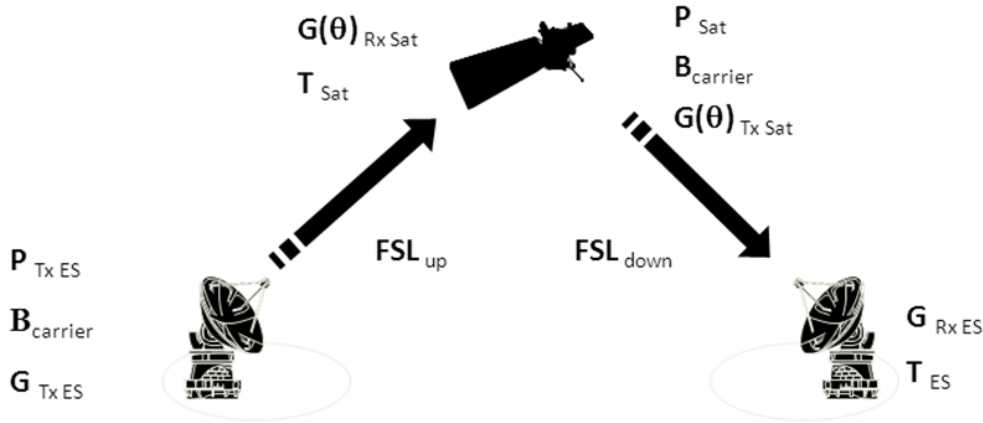


Fig. 1. Enlace de comunicaciones por satélite

La ecuación de la relación portadora/ruido (C/N) se expresa como sigue:

$$(C/N)_{asc.} = EIRP_{Tx ET} - FSL_{asc.} + (G(\theta)/T)_{RxSat} - B_{portadora} - k \text{ (dB)} \quad [1]$$

$$(C/N)_{asc.} = P_{Tx ET} + G_{Tx ET} - FSL_{asc.} + G(\theta)_{RxSat} - (T_{Sat} + B_{portadora} + k) \text{ (dB)} \quad [2]$$

siendo:

$$C_{asc.} = P_{Tx ET} + G_{Tx ET} - FSL_{asc.} + G(\theta)_{RxSat} \text{ (dBW)} \quad [3]$$

$P_{Tx ET}$ = Potencia de la estación terrena transmisora (dBW)

$G_{Tx ET}$ = Ganancia de la estación terrena transmisora (dBi)

FSL_{asc} = Pérdidas del enlace ascendente en espacio libre (dB)

$G(\theta)_{RxSat}$ = Ganancia del satélite receptor en dirección de la estación terrena transmisora (dBi)

T_{Sat} = Temperatura de ruido del sistema receptor del satélite (dBK)

$B_{portadora}$ = Anchura de banda de la portadora (dBHz)

k = Constante de Boltzmann = -228,6(dBJ/K)

$$(C/N)_{desc.} = PIRE_{sat} - FSL_{desc.} + (G/T)_{RxET} - B_{portadora} - k \text{ (dBW)} \quad [4]$$

$$(C/N)_{desc.} = P_{Sat} + G(\theta)_{TxSat} - FSL_{desc.} + G_{RxET} - (T_{ET} + B_{portadora} + k) \text{ (dBW)} \quad [5]$$

siendo:

$$C_{desc.} = P_{Sat} + G(\theta)_{TxSat} - FSL_{desc.} + G_{RxET} \quad [6]$$

P_{Sat} = Potencia del satélite transmisor (dBW)

$G(\theta)_{TxSat}$ = Ganancia del satélite transmisor en dirección de la estación terrena receptora (dBi)

$FSL_{desc.}$ = Pérdidas del enlace descendente en espacio libre (dB) (véase la ecuación [7])

G_{RxET} = Ganancia de recepción de la estación terrena (dBi)

T_{ET} = Temperatura de ruido del sistema de la estación terrena receptora (dBK)
 $B_{portadora}$ = Anchura de banda de la portadora (dBHz)
 k = Constante de Boltzmann = $-228,6$ (dBJ/K)

2.2 Pérdidas de transmisión en espacio libre

Las pérdidas de transmisión en espacio libre (FSL) son las pérdidas de potencia resultantes de la dispersión de la señal en el espacio y pueden obtenerse como sigue:

$$FSL = 20(\log f + \log d) + 32.45 \text{ (dB)} \quad [7]$$

donde:

f : frecuencia (MHz)

d : distancia (km)

La distancia d entre una estación terrena y un satélite geoestacionario viene dada por la ecuación:

$$d = 42\,644 \sqrt{1 - 0.2954 \cos \psi} \quad \text{km} \quad [8]$$

donde:

$$\cos \psi = \cos \zeta \times \cos \beta \quad [9]$$

donde:

ζ : latitud de la estación terrena

β : diferencia de longitud entre el satélite y la estación terrena.

NOTA – Si $\cos \psi < 0,151$, el satélite se encuentra por debajo del plano horizontal.

La distancia d_S entre dos satélites geoestacionarios se determina como sigue (es importante para el cálculo de la FSL del desplazamiento de una señal de un satélite geoestacionario a otro):

$$d_S = 84\,332 \sin \frac{\theta_g}{2} \quad \text{km} \quad [10]$$

donde:

θ_g : separación angular geocéntrica

3 Cálculo de la relación portadora/interferencia (C/I)

3.1 C/I del enlace ascendente

El siguiente diagrama muestra una hipótesis de interferencia en el enlace ascendente en la que una estación terrena en comunicación con un satélite provoca interferencia a un satélite adyacente.

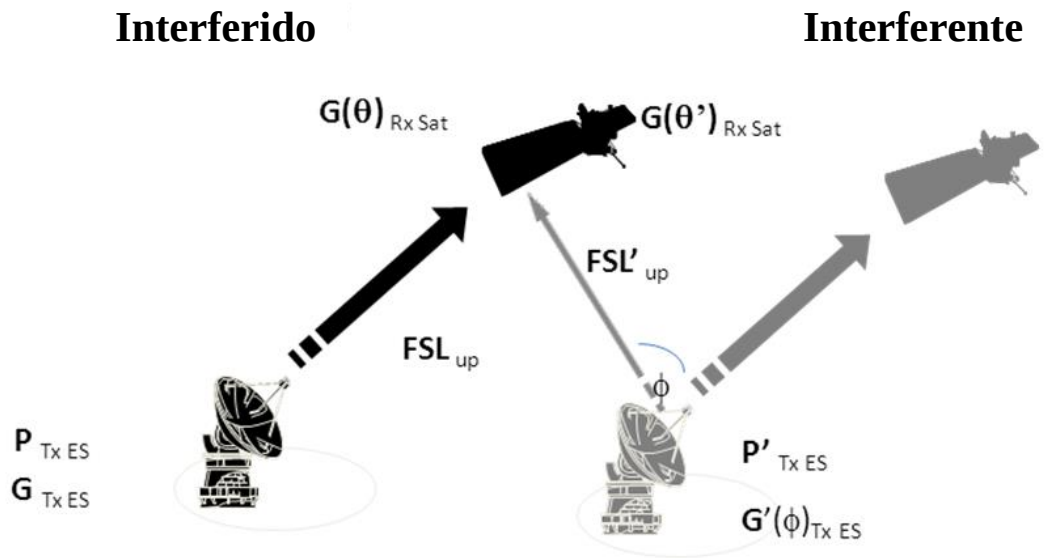


Fig. 2. Hipótesis de interferencia en el enlace ascendente

La relación portadora/interferencia (C/I) en el enlace ascendente se obtiene como sigue:

De la ecuación [3]

$$\begin{aligned} C_{asc} &= P_{Tx ET} + G_{Tx ET} - FSL_{asc.} + G(\theta)_{RxSat} \\ I_{asc.} &= P'_{Tx ET} + G'(\phi)_{Tx ET} - FSL'_{asc.} + G(\theta')_{RxSat} \end{aligned} \quad [11]$$

siendo:

$P'_{Tx ET}$ = Potencia de la estación terrena transmisora interferente

$G'(\phi)_{Tx ET}$ = Ganancia del lóbulo lateral de la estación terrena transmisora interferente en dirección de la estación espacial interferida

y

ϕ = Separación angular topocéntrica entre los satélites interferido e interferente en la estación terrena transmisora interferente

$FSL'_{asc.}$ = Pérdidas en espacio libre de la estación terrena transmisora interferente

$G(\theta')_{RxSat}$ = Ganancia de recepción de la estación espacial interferida en dirección de la estación terrena interferente

por tanto:

$$(C/I)_{asc} = (P_{Tx ET} + G_{Tx ET} - FSL_{asc.} + G(\theta)_{RxSat}) - (P'_{Tx ET} + G'(\phi)_{Tx ET} - FSL'_{asc.} + G(\theta')_{RxSat}) \quad [12]$$

3.2 C/I del enlace descendente

El siguiente diagrama muestra una hipótesis de interferencia en el enlace descendente en la que un satélite que se comunica con una estación terrena causa interferencia a la estación terrena receptora del satélite adyacente.

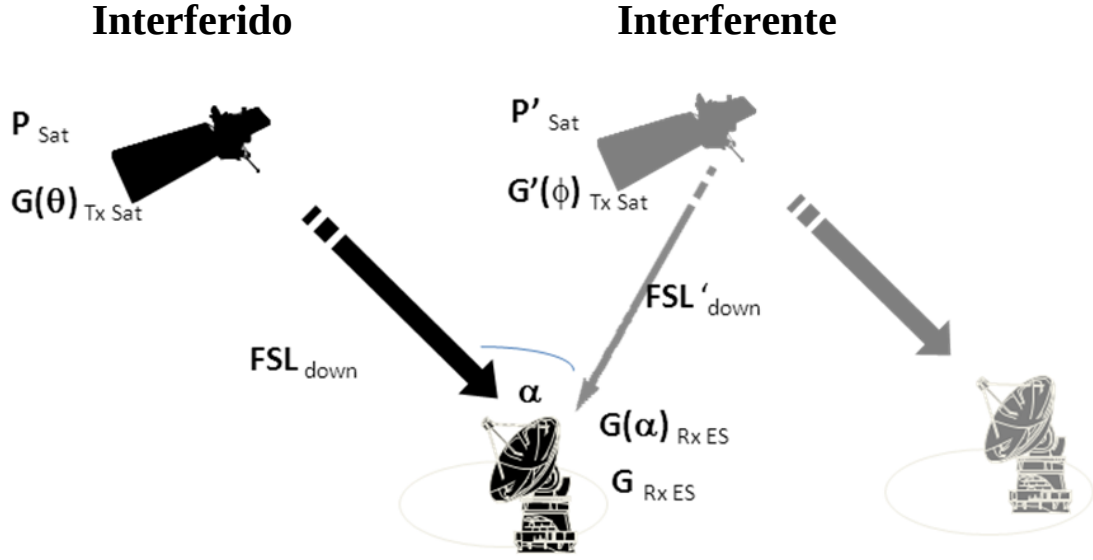


Fig. 3. Hipótesis de interferencia en el enlace descendente

La relación portadora/interferencia (C/I) en el enlace descendente se determina como sigue:

De la ecuación [6]

$$\begin{aligned} C_{\text{desc}} &= P_{\text{Sat}} + G(\theta)_{\text{Tx Sat}} - FSL_{\text{desc.}} + G_{\text{RxET}} \\ I_{\text{desc}} &= P'_{\text{Sat}} + G'(\phi)_{\text{Tx Sat}} - FSL'_{\text{desc.}} + G(\alpha)_{\text{RxET}} \end{aligned} \quad [13]$$

siendo:

- P'_{Sat} = Potencia del satélite transmisor interferente
- $G'(\phi)_{\text{Tx Sat}}$ = Ganancia de antena del satélite transmisor interferente en dirección de la estación terrena interferida
- $FSL'_{\text{desc.}}$ = Pérdidas en espacio libre del satélite transmisor interferente
- $G(\alpha)_{\text{RxET}}$ = Ganancia del lóbulo lateral de la estación terrena interferida en dirección del satélite interferente

siendo:

α = Separación angular topocéntrica entre los satélites interferido e interferente en la estación terrena receptora interferida

por tanto:

$$(C/I)_{\text{desc.}} = (P_{\text{Sat}} + G(\theta)_{\text{Tx Sat}} - FSL_{\text{desc.}} + G_{\text{RxET}}) - (P'_{\text{Sat}} + G'(\phi)_{\text{Tx Sat}} - FSL'_{\text{desc.}} + G(\alpha)_{\text{RxET}}) \quad [14]$$

3.3 Separación angular topocéntrica

La separación angular subtendida por dos satélites geoestacionarios en una estación terrena se denomina separación angular topocéntrica. Esta separación angular topocéntrica θ_t puede determinarse utilizando la ecuación:

$$\theta_t = \arccos \left(\frac{d_1^2 + d_2^2 - \left(84\,332 \, \text{sen} \frac{\theta_g}{2} \right)^2}{2d_1 \cdot d_2} \right) \quad [15]$$

donde:

d_1 y d_2 = son las distancias (km), desde la estación terrena hasta cada uno de los dos satélites, respectivamente (véase la ecuación 8)

θ_g = es la separación angular topocéntrica en grados entre los dos satélites teniendo en cuenta las tolerancias longitudinales del mantenimiento en posición de la estación

3.4 Diagramas de antena

La radiación del lóbulo lateral de las antenas aun siendo indeseable no puede eliminarse. La radiación de antena se caracteriza por el lóbulo principal, los lóbulos laterales y algunas regiones transitorias entre ambos. Existen varias curvas de referencia de la envolvente de radiación que definen el contorno del diagrama de radiación de la antena. A título de ejemplo se muestra a continuación el diagrama de referencia del Apéndice 8 del Reglamento de Radiocomunicaciones:

a) para valores de $\frac{D}{\lambda} \geq 100$ (ganancia máxima de ≥ 48 dB aproximadamente):

$$\begin{aligned} G(\varphi) &= G_{max} - 2,5 \times 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda} \varphi \right)^2 & \text{para } 0 < \varphi < \varphi_m \\ G(\varphi) &= G_1 & \text{para } \varphi_m \leq \varphi < \varphi_r \\ G(\varphi) &= 32 - 25 \log \varphi & \text{para } \varphi_r \leq \varphi < 48^\circ \\ G(\varphi) &= -10 & \text{para } 48^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ \end{aligned}$$

siendo:

D : diámetro de la antena
 λ : longitud de onda } expresados en la misma unidad

φ : ángulo con relación al eje de la antena en grados

G_1 : ganancia del primer lóbulo lateral = $2 + 15 \log \frac{D}{\lambda}$

(En los casos en que no se indica el valor de $\frac{D}{\lambda}$ puede estimarse a partir de la expresión $20 \log \frac{D}{\lambda} \approx G_{max} - 7.7$, siendo G_{max} la ganancia del lóbulo principal de la antena (dB))

$$\varphi_m = \frac{20 \lambda}{D} \sqrt{G_{max} - G_1} \text{ grados}$$

$$\varphi_r = 15,85 \left(\frac{D}{\lambda} \right)^{-0,6} \text{ grados}$$

b) para valores $\frac{D}{\lambda} < 100^4$ (ganancia máxima < 48 dB aproximadamente):

$$\begin{aligned} G(\varphi) &= G_{max} - 2,5 \times 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda} \varphi \right)^2 & \text{para } 0 < \varphi < \varphi_m \\ G(\varphi) &= G_1 & \text{para } \varphi_m \leq \varphi < 100 \frac{\lambda}{D} \\ G(\varphi) &= 52 - 10 \log \frac{D}{\lambda} - 25 \log \varphi & \text{para } 100 \frac{\lambda}{D} \leq \varphi < 48^\circ \\ G(\varphi) &= 10 - 10 \log \frac{D}{\lambda} & \text{para } 48^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ \end{aligned}$$

En los siguientes textos figuran otros diagramas de antena de referencia

- Anexo 3 al Apéndice 7 del RR
- Recomendación UIT-R S.465-6
- Recomendación UIT-R S.580-6
- Recomendación UIT-R S.1855-0
- Recomendación UIT-R M.694-1
- Recomendación UIT-R BO.1213-1
- Recomendación UIT-R BO.1295
- Recomendación UIT-R BO.1900
- Recomendación UIT-R BO.2063-0.

4 Factor de ajuste

El valor de la potencia de la portadora interferente que debe considerarse en la portadora deseada puede obtenerse determinando la relación entre la anchura de banda de la portadora deseada y la anchura de banda de la portadora interferente. Esto se conoce como factor de ajuste. Como sugiere el propio término, los cálculos de C/I mediante las ecuaciones [12] y [14] se ajustan mediante el factor de ajuste para tener en cuenta el valor de la potencia de la portadora interferente que debe considerarse.

En las portadoras digitales con interferencia similar al ruido, si la anchura de banda de la portadora deseada es menor que la anchura de banda de la portadora interferente, en el cálculo de C/I sólo se considera una porción de la potencia de la portadora interferente. Alternativamente, si la anchura de banda de la portadora deseada es mayor que la anchura de banda de la portadora interferente, se considera el efecto de múltiples portadoras interferentes que afectan a la portadora deseada.

En el caso de portadoras analógicas interferentes, si no se conoce el espectro de la potencia de interferencia, el cálculo de la interferencia puede hacerse utilizando la aproximación de que la densidad espectral de potencia de la portadora interferente es constante a lo largo de toda la anchura de banda de la portadora deseada. Entonces, la anchura de banda equivalente (BW_{equ}) puede calcularse como sigue:

$$BW_{equ} = \text{Potencia total de cresta} / \text{Máxima densidad de potencia}$$

En una situación de interferencia no cofrecuencia causada por una portadora de TV-FM a otra portadora de TV-FM, se utilizan los contornos de relación de protección definidos en las Reglas de Procedimiento relativas al § 3.5.1 y al § 3.8 del Anexo 5 al Apéndice 30.

Los tres métodos para determinar la potencia de interferencia pueden resumirse en el cuadro que aparece a continuación:

CUADRO 1

Casos del factor de ajuste

Deseada Interferente	Digital	Analógica (Distinta de la TV/FM)	Otra	TV/FM
Digital	MÉTODO 1: Anchura de banda deseada a anchura de banda interferente Ajuste de la relación de superposición			
TV/FM	MÉTODO 2: Anchura de banda deseada a anchura de banda equivalente interferente Ajuste de la relación de superposición			MÉTODO 1: Cofrecuencia
Analógica (Distinta de la TV/FM)				MÉTODO 3: No cofrecuencia. (Relación de protección relativa)
Otra				MÉTODO 2

5 Cálculo del requisito de C/I

El criterio de protección contra la interferencia procedente de una sola fuente para portadoras digitales y analógicas distintas a las de TV se representa mediante un objetivo de C/N con un valor k de 12,2 ó 14 dB que puede resumirse como sigue:

Tipo de portadora deseada \ Tipo de portadora interferente	Digital	Analógica (distinta de la TV-FM)
Analógica (TV-FM)	$C/N + 14$ (dB)	
Digital	$C/N + 12,2$ (dB)	
Analógica (distinta de la TV-FM)	$C/N + 12,2$ (dB)	
Otra	$C/N + 14$ (dB)	

En el caso de un tipo de portadora interferente analógica de TV-FM o un tipo de portadora distinta de la digital y no TV-FM, el criterio de protección puede resumirse como sigue:

Tipo de portadora interferente Tipo de portadora deseada	Analógica (TV-FM) u otra
Analógica (TV-FM)	$C/N + 14$ (dB)
Digital	Si $BW_w \leq BW_{equ}$ entonces $C/N + 5,5 + 3,5 \cdot \log(BW_w)$ (dB)
	Si $BW_w > BW_{equ}$ entonces $C/N + 12,2$ (dB)
Analógica (distinta de la TV-FM)	$11,4 + 2 \cdot \log(BW_w)$ (dB)
Otra	$11,4 + 2 \cdot \log(BW_w)$ (dB)

donde:

BW_w : Anchura de banda necesaria de la portadora deseada (MHz)

BW_{equ} : Anchura de banda equivalente de la portadora interferente (MHz)

C/N : Relación portadora/ruido (dB)

En la Sección B3 de la Parte B de las Reglas de Procedimiento, los tipos de portadora se clasifican según la clase de emisión (Anexo 2 punto C.7.a del Apéndice 4):

- Analógica (TV-FM):
Cuando la clase de emisión (punto C.7.a del Anexo 2 al Apéndice 4) se define con una «F» en el primer carácter y con «F» o una «W» en el tercer carácter.
- Analógica (distinta de la TV-FM):
Cuando el primer carácter de la clase de emisión es «F» y el tercer carácter es cualquier otro distinto de «F» o «W».
- Digital:
Cuando el primer carácter de la Clase de emisión es «G».
- Otras:
Cuando el primer carácter de la Clase de emisión es cualquiera distinto de «F» o «G».

6 Margen adicional

El Cuadro 2 de la Recomendación UIT-R S. 741-2 define « C/N » como la relación (dB) entre la potencia de la portadora y la del ruido total que incluye todo el ruido interno del sistema y la interferencia procedente de otros sistemas.

Por tanto, en el método de cálculo de C/I se añadirá un margen adicional de 0,46 dB en los casos en los que estén implicadas emisiones de TV analógica deseadas, y de 1,87 dB para otras comisiones deseadas, sumándolo a los márgenes calculados sobre la base de los valores de ruido interno facilitados por las administraciones salvo cuando el valor objetivo de relación C/N presentado ya incluye un margen relativo a la interferencia entre sistemas. Estos márgenes se calculan en el Adjunto 2 de la Sección B3 de las Reglas de Procedimiento.

7 Elección del emplazamiento de caso más desfavorable

Para obtener el caso más desfavorable de C/I , los emplazamientos de la estación terrena deben seleccionarse como sigue:

Enlace ascendente

La estación terrena deseada está situada en el borde de la zona de servicio del haz receptor deseado. La estación terrena interferente está situada dentro de la zona de servicio del haz receptor interferente y en el punto en el que se obtiene el mayor valor de la ganancia del haz receptor deseado.

Enlace descendente

La estación terrena deseada está situada en el borde de la zona de servicio del haz transmisor deseado y en el punto en el que se obtiene el mayor valor de la ganancia del haz transmisor interferente.

8 Hipótesis para simplificar los cálculos

Como la diferencia de los valores del ángulo topocéntrico y el ángulo geocéntrico es pequeña, puede obtenerse un valor de C/I bastante ajustado utilizando en los cálculos los ángulos geocéntricos en vez de los ángulos topocéntricos. Además, la diferencia en las pérdidas en espacio libre de las señales que se desplazan a lo largo de diferentes trayectos pero comparten las mismas bandas de frecuencia es pequeña. Con estas hipótesis, el cálculo de C/I mediante las ecuaciones [12] y [14] puede simplificarse como sigue:

De la ecuación [12]

$$(C/I)_{asc.} = (P_{Tx ET} + G_{Tx ET} - FSL_{asc.} + G(\theta)_{RxSat}) - (P'_{Tx ET} + G'(\phi)_{Tx ET} - FSL'_{asc.} + G(\theta')_{RxSat})$$

Sustituyendo ϕ por ϕ_g y suponiendo $FSL_{asc.} = FSL'_{asc.}$

$$(C/I)_{asc.} = (P_{Tx ET} + G_{Tx ET} - FSL_{asc.} + G(\theta)_{RxSat}) - (P'_{Tx ET} + G'(\phi_g)_{Tx ET} - FSL'_{asc.} + G(\theta')_{RxSat})$$

$$(C/I)_{asc.} = (P_{Tx ET} + G_{Tx ET} + G(\theta)_{RxSat}) - (P'_{Tx ET} + G'(\phi_g)_{Tx ET} + G(\theta')_{RxSat})$$

siendo:

ϕ_g = separación angular geocéntrica entre los satélites interferido e interferente en la estación terrena transmisora interferente

De forma similar, en el enlace descendente puede calcularse C/I con bastante precisión mediante la siguiente ecuación

$$(C/I)_{desc.} = (P_{Sat} + G(\theta)_{TxSat} + G_{RxET}) - (P'_{Sat} + G'(\phi)_{TxSat} + G(\alpha_g)_{RxET}) \quad [14]$$

siendo:

α_g = separación angular geocéntrica entre los satélites interferido e interferente en la estación terrena receptora interferida