

RECOMENDACIÓN UIT-R SA.1805

Características técnicas y operativas de los sistemas de telecomunicaciones espacio-espacio que funcionan en torno a 354 THz* y 366 THz**

(Cuestión UIT-R 235/7)

(2007)

Cometido

Esta Recomendación especifica los parámetros técnicos (frecuencias, sentido de los enlaces, características de señales y datos, parámetros de antena, etc.) y las características operativas de los sistemas de telecomunicaciones espacio-espacio que funcionan en torno a 354 THz y 366 THz que han de utilizarse en los estudios de compartición.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que se está planificando la utilización de enlaces de telecomunicaciones en algunos sistemas de satélite para telecomunicaciones entre órbitas en frecuencias próximas a 354 THz y 366 THz;
- b) que utilizando los desarrollos tecnológicos recientes, los astrónomos están realizando una labor concertada para construir telescopios y efectuar observaciones en este tramo del espectro;
- c) que este tramo del espectro se está también utilizando para otros servicios terrenales y espaciales;
- d) que este tramo del espectro se está utilizando también para fines científicos e industriales distintos de los de radiocomunicación,

recomienda

1 que en los estudios de compartición en los que se consideren los satélites de investigación espacial que funcionan en el sentido espacio-espacio en torno a 354 THz y 366 THz, se tengan en cuenta los parámetros técnicos y operativos presentados en el Anexo 1.

Anexo 1**1 Introducción**

Al aumentar la necesidad de la utilización del espectro electromagnético y con el avance de la tecnología, se está prestando más atención a la utilización de frecuencias por encima de 3 000 GHz para las telecomunicaciones en el espacio libre. La telecomunicación en el espacio libre en frecuencias por encima de 3 000 GHz ofrece la posibilidad de incluir velocidades de datos superiores con menos masa que la de los sistemas tradicionales de radiofrecuencia, así como de cumplir ciertos requisitos de ganancia y directividad con los haces utilizados para las aplicaciones espacio-espacio.

* 1 THz = 1 000 GHz.

** La presente Recomendación se señala a la atención de la Comisión de Estudio 1 de Radiocomunicaciones.

1.1 Consideraciones sobre la frecuencia

Actualmente, el mayor interés en los enlaces de radiocomunicaciones de espacio libre por encima de 3 000 GHz se centra en frecuencias próximas a 200, 283, 311 y 353 THz, cuyas longitudes de onda correspondientes son 1,5, 1,06, 0,965 y 0,850 μm . Estas frecuencias son las mismas que las que se utilizan ampliamente para las telecomunicaciones por fibra óptica. Para las telecomunicaciones entre órbitas, la atención se ha centrado en la utilización de láseres semiconductores de elevada potencia que funcionan en torno a 0,850 μm o de un haz láser semiconductor amplificado por un amplificador de fibra óptica estimulada por erbio (EDFA) a la longitud de onda de 1,5 μm . El sistema con láseres semiconductores que funciona en torno a 0,85 μm es superior al del EDFA en fiabilidad y consumo de potencia con respecto a aplicaciones con velocidades de datos relativamente bajas que no exigen una elevada potencia del transmisor.

1.2 Parámetros de misión genérica

Los parámetros técnicos adecuados para los análisis de interferencia deben basarse en enlaces de telecomunicaciones entre órbitas genéricos próximos a la Tierra. Por consiguiente, la distancia del enlace variará entre algunos y varios centenares de miles de km. En el Cuadro 1 se ofrece un resumen de los parámetros técnicos fundamentales de un enlace de telecomunicaciones entre órbitas próximo a la Tierra que funciona en torno a 354 THz y 366 THz.

CUADRO 1

Parámetros técnicos de un sistema de telecomunicaciones entre órbitas de referencia con funcionamiento en torno a 354 THz y 366 THz, en el sentido espacio-espacio

Parámetro	Enlace de ida	Enlace de retorno
Potencia del transmisor (mW)	10	40
Apertura del transmisor (cm)	25	26
Frecuencia del transmisor (longitud de onda) (THz)	Comm: 366 (0,819 μm) Radiofaro: 374 (0,801 μm)	354 (0,847 μm)
Modulación	2PPM	NRZ
Precisión de puntería (μrad)	$\pm 2,6 (3\sigma)$	
Alcance en el espacio libre (km)	hasta 40 000	
Velocidad de datos (Mbit/s)	2,048	49,3724
Apertura del receptor (cm)	26	25
Tipo de detector	Detector APD	Detector APD

APD: plidodiodos de avalancha

NRZ: sin retorno a cero

PPM: partes por millón

2 Consideraciones sobre el enlace

Se establecen enlaces entre órbitas entre un satélite de la órbita de satélites geoestacionarios (GEO) y un satélite de la órbita terrestre baja (LEO) en el sentido espacio-espacio, que funcionan en torno a 366 THz en el enlace de ida y a 354 THz en el enlace de retorno. Se emite una señal de radiofaro a 374 THz para facilitar la puntería y el seguimiento del telescopio.

2.1 Calidad del enlace

Al igual que un sistema de comunicación espacio-espacio que funcione en el espectro de radiofrecuencias tradicional, la calidad de un enlace que funcione en 354 THz y 366 THz se mide en términos de la velocidad de datos y de la proporción de bits erróneos (BER). La calidad se calcula en función de la potencia, la calidad del telescopio, las consideraciones de propagación, el ruido y la sensibilidad del receptor. Cada uno de estos parámetros es función de otras variables.

2.1.1 BER

Las tramas de datos deben tener una BER inferior a 10^{-6} tras la corrección de errores, a fin de poder mantenerlas. Un enlace debe retener el 99% de las tramas de datos.

2.1.2 Requisito de margen

El requisito de margen típico de un enlace entre satélites que funcione en 354 THz y 366 THz es del orden de 1 a 3 dB.

2.2 Modulación

Los enlaces de retorno que funcionan en torno a 354 THz utilizarán la NRZ. Los enlaces de ida que funcionan en torno a 366 THz utilizarán la 2PPM. Esta técnica de modulación permite la detección directa en el receptor, sin tener que implementar receptores coherentes.

2.3 Señal recibida

El método general para calcular el nivel de la señal recibida en 354 THz y 366 THz por la estación espacio-espacio es el mismo que el utilizado para los sistemas de radiofrecuencia tradicionales.

$$P_S = P_t + G_t + G_r + L_t + L_r + L_p + L_S \quad \text{dBW} \quad (1)$$

donde:

- P_S : potencia de la señal del receptor (dBW)
- P_t : potencia media de salida del láser (dBW)
- G_t : ganancia de la antena del transmisor (dBi)
- G_r : ganancia de la antena de recepción (dBi)
- L_t : pérdidas del transmisor (dB)
- L_r : pérdidas del receptor (dB)
- L_p : pérdidas de puntería (dB)
- L_S : pérdidas en el espacio libre (dB).

2.4 Pérdidas del enlace

- L_t incluye los efectos de las pérdidas de absorción, de dispersión y de reflexión en el sistema óptico del transmisor;
- L_r incluye los efectos de las pérdidas de absorción, de dispersión y de reflexión en el tren óptico del receptor;
- L_p incluye los efectos de fluctuaciones en la antena o en el satélite y de pérdida de puntería de la antena transmisora;
- L_s debidas a la separación física entre el transmisor y el receptor.

Los valores de cada fuente de pérdidas variarán según el diseño del equipo, la edad de éste, los requisitos de la misión y la fase de la misión. El Cuadro 2 ofrece valores habituales de las pérdidas que se han de utilizar en los análisis genéricos de interferencia.

CUADRO 2

Pérdidas del enlace en un sistema de telecomunicación entre órbitas de referencia con funcionamiento en torno a 354 THz y 366 THz, en el sentido espacio-espacio

Mecanismos de pérdida	Valor típico
Pérdidas del transmisor, L_t	0,63 (= -2 dB)
Pérdidas del receptor, L_r	0,5 (= -3 dB)
Pérdidas de puntería, L_p	0,5 (= -3 dB)

Las pérdidas en el espacio libre, L_s , se calculan en torno a 354 THz y 366 THz de la misma manera que en los sistemas de radiofrecuencia tradicionales:

$$L_s = \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 = \left(\frac{c}{4\pi f R} \right)^2 \quad (2)$$

siendo:

- R : distancia entre el transmisor y el receptor (m)
- λ : longitud de onda (m)
- f : frecuencia óptica (Hz)
- c : velocidad de la luz (m/s).

2.5 Parámetros del telescopio de transmisión/recepción

Los enlaces de telecomunicación con funcionamiento en torno a 354 THz y 366 THz utilizan telescopios como antenas de transmisión y de recepción. Los diagramas de la antena del transmisor y del receptor son también distintos, pues la óptica del transmisor suele alimentarse mediante un haz de distribución gaussiana, mientras que la óptica del receptor tiene un detector plano. En el Anexo 2 de la Recomendación UIT-R SA.1742 se describe una envolvente de diagramas de ganancia de antena de transmisión y de recepción con funcionamiento en torno a 354 THz y 366 THz. En la Recomendación UIT-R SA.1742 también se describe un diagrama de ganancia de antena para sistemas ópticos espacio-Tierra que funcionan en torno a 283 THz. Este diagrama se aplica además a los sistemas espacio-espacio que funcionan en torno a 354 THz y 366 THz.

2.5.1 Diámetro

A los efectos de los análisis de interferencia, debe suponerse que el diámetro de la antena óptica será de 26/25 cm. La apertura no tendrá obstrucciones o una obstrucción de 5 cm.

2.5.2 Diagrama de ganancia de transmisión

El transmisor utiliza un telescopio alimentado por un láser. Dichos láseres funcionan normalmente sólo en el modo de cavidad inferior, TEM₀₀, que se traduce en un haz con una distribución de energía gaussiana, la cual presenta un máximo de intensidad a lo largo de su eje de transmisión. El diagrama del haz se conforma de manera que la intensidad del haz decaiga en amplitud con la separación angular respecto al eje de transmisión y no se desperdicie más de un pequeño porcentaje de la potencia del haz. Dos puntos de referencia son los ángulos en los que la amplitud del haz decae el 37% o el 13% de la amplitud en el eje. Estos puntos se denominan puntos 1/e y 1/e², respectivamente, y se hace referencia a ellos frecuentemente en la caracterización de los diagramas de energía emitida por el láser.

La apertura total del haz en el punto 1/e² es aproximadamente de:

$$\theta_{1/e^2} = \frac{4\lambda}{\pi D} \quad \text{rad} \quad (3)$$

siendo:

θ_{1/e^2} : anchura angular del haz en el punto 1/e² (rad)

D : diámetro de la apertura (m).

En el caso de un haz gaussiano en 354 THz transmitido desde una apertura de 26 cm, la apertura del haz del punto 1/e² es aproximadamente de $4,1 \times 10^{-6}$ rad.

En el terminal de transmisión, pueden utilizarse las ecuaciones siguientes para calcular el diagrama de radiación de campo lejano de un láser con una onda plana de amplitud gaussiana que alimenta un telescopio. En la utilización de estas ecuaciones se formulan las hipótesis básicas siguientes:

- la fuente láser se caracteriza como emisión gaussiana monomodo;
- los diagramas de ganancia de antena se miden en el campo lejano;
- la apertura es circular.

El diagrama de ganancia de un telescopio transmisor de radio a , alimentado con una onda plana de amplitud gaussiana y con un radio de contorno, ω , donde ω es la distancia desde el eje central del sistema óptico al punto de intensidad 1/e², y con una obstrucción central de radio b , se calcula mediante la ecuación (4). El término, G_0 , es el límite superior de la ganancia de antena que se obtiene para una apertura circular uniformemente iluminada y sin obstrucciones. El segundo término, $g_t(\alpha, \gamma, X)$, es un término de eficiencia de la ganancia que tiene en cuenta los efectos de obstrucción, truncamiento, intensidad fuera del eje y desenfoque.

$$G_t(\alpha, \gamma, X) = G_0 g_t(\alpha, \gamma, X) \quad (4)$$

siendo:

$$G_0 = \frac{4\pi A}{\lambda^2} = \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \right)^2 \quad (5)$$

$$g_t(\alpha, \gamma, X) = 2\alpha^2 \left| \int_{\gamma^2}^1 J_0(X\sqrt{u}) e^{-\alpha^2 u} du \right|^2 \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{b}{a} \quad (7)$$

- A : superficie de la apertura del telescopio (m^2)
 a : radio del espejo del telescopio (m)
 b : radio del espejo secundario (m)
 g_t : eficacia de la ganancia
 J_0 : función de Bessel de orden cero de primera clase
 α : relación, α/ω
 γ : relación de obstrucción
 u : variable de la integración
 X : $\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \cdot a \cdot \text{sen}(\theta)$
 θ : ángulo respecto al eje óptico (rad).

Para el eje directo, $X = 0$ y el término de eficacia de la ganancia de la ecuación (6) se hace:

$$g_t(\alpha, \gamma, 0) = \left[\frac{2}{\alpha^2} \left[e^{-\alpha^2} - e^{-\gamma^2 \alpha^2} \right]^2 \right] \quad (8)$$

La ganancia máxima en el eje del haz principal de la ecuación (4) se hace entonces:

$$G_t(\alpha, \gamma, 0) = \frac{4\pi A}{\lambda^2} \left[\frac{2}{\alpha^2} \left[e^{-\alpha^2} - e^{-\gamma^2 \alpha^2} \right]^2 \right] \quad (9)$$

Toda obstrucción (b) reducirá la ganancia del haz principal, llenará los nulos y hará aumentar los lóbulos laterales.

2.5.3 Diagrama de la ganancia de recepción

El tamaño del campo de visión está relacionado con el tamaño físico del detector y con la longitud focal del telescopio. Puede determinarse por la ecuación:

$$\varphi = \frac{d}{F} \quad (10)$$

siendo:

- φ : campo de visión del detector (rad)
 d : diámetro del detector (m) (típicamente comprendido entre 10^{-4} y 10^{-3} m)
 F : longitud focal del telescopio (m).

El diagrama de la antena de recepción se suele ajustar al detector. El detector se aísla de la energía no deseada utilizando barreras de campo y exponiéndolo únicamente a la parte del haz principal interior a ϕ radianes respecto al eje del haz principal. Por tanto, la energía no deseada recibida en los lóbulos laterales del diagrama de la antena de recepción no llega al detector y puede despreciarse en los análisis de interferencia.

Suponiendo que la apertura de recepción está en el campo lejano de la antena transmisora, la energía recibida se trata normalmente como si fuese una onda plana. El sistema de recepción puede utilizar una apertura común o separada del sistema de transmisión. La anchura del haz de la apertura de recepción también se mide generalmente en términos de su punto $1/e^2$.

La ganancia máxima en el eje de una antena de recepción, G_R , viene dada por:

$$G_R = 10 \log \left(\frac{4\pi A}{\lambda^2} \right) + 10 \log (1 - \gamma^2) + \delta \quad \text{dBi} \quad (11)$$

siendo:

A : superficie de la apertura del telescopio (m^2)

λ : longitud de onda (m)

δ : pérdidas debidas al desbordamiento de energía por el borde del detector (dB)

y

$$\gamma = \frac{b}{a} \quad (12)$$

siendo:

a : radio del espejo del telescopio (m)

b : radio del espejo secundario (m).

La ganancia calculada en la ecuación (11) representa la cantidad de energía incidente al detector. El término G_R supone que la antena de recepción está situada en el campo lejano del transmisor y que la apertura y el detector son redondos. El primer término de la ecuación (11) es la ganancia de la antena clásica obtenida mediante una antena no obstruida de superficie A . El segundo término comprende las pérdidas debidas a la obstrucción que introduce el espejo secundario de un sistema Cassegrain. En el caso de sistemas sin espejos secundarios, el valor de b de la ecuación (12) se hace cero y el segundo término de la ecuación (11) puede despreciarse.

El tercer término, δ , de la ecuación (11) comprende las pérdidas (dB), debidas al desbordamiento de la energía de la señal por el extremo del detector. Para los sistemas de detección directa tales como los PPM, δ se reduce a medida que aumenta la relación entre el tamaño del detector y la longitud focal del telescopio. Para la mayoría de los valores prácticos, δ no será superior a $-0,5$ dB.

2.6 Puntería y seguimiento

La estrechez de la apertura del haz y la gran distancia de los enlaces espacio-espacio, con funcionamiento en torno a 354 THz y 366 THz imponen requisitos estrictos al sistema en cuanto a puntería y seguimiento. Los requisitos típicos de puntería están determinados por la divergencia del haz de telecomunicación. Para el sistema de referencia descrito en el Cuadro 1, esto es igual a $2,6 \mu\text{rad}$ y unas pérdidas de puntería no superiores a 3 dB.

3 Relación señal/ruido (S/R)

La calidad de los enlaces de telecomunicación espacio-espacio que funcionan en torno a 354 THz y 366 THz depende directamente de la obtención en el receptor de una relación señal/ruido (S/R) elevada. Cuanto más alta sea la S/R menor será la BER.

En general:

$$S/R = \frac{P_s}{N_t} \quad (13)$$

siendo:

P_s : potencia de la señal recibida que viene dada en la ecuación (1)

N_t : potencia de ruido procedente de todas las fuentes.

El ruido procede de dos fuentes independientes, el ruido del detector y la señal de fondo. Esta señal de fondo es debida a la energía externa procedente del albedo y de la luz del sol, los planetas y las estrellas que llega al detector. El ruido del detector, examinado en el § 3.1, es debido al ruido inherente interno del detector.

Las ecuaciones básicas que describen la calidad de un enlace óptico láser pueden simplificarse mediante las hipótesis básicas siguientes:

- Las antenas de transmisión y de recepción óptica no tienen obstrucciones centrales.
- Las formas de ondas transmitidas son gaussianas y están truncadas en los puntos $1/e^2$.
- Las ondas recibidas son ondas planas.
- Los discos aéreos están truncados en el primer nulo del diagrama del disco aéreo.

3.1 Ruido del detector

Los sistemas de telecomunicaciones que funcionan en frecuencias próximas a 354 THz y 366 THz utilizan un receptor de detección directa con un fotodiodo de avalancha (APD). Los detectores APD funcionan normalmente en una de dos regiones de detección con limitación de ruido. Los detectores que reciben niveles de potencia de entrada elevados están generalmente limitados mediante el ruido de impacto de fotones. No obstante, los detectores que reciben niveles de potencia de entrada reducidos están limitados en el ruido del detector. A continuación se desarrolla la S/R para el APD utilizado generalmente al que sigue un amplificador en un sistema de detección directa.

Se calcula el factor de exceso de ruido, N_E , mediante:

$$N_E = Gk + \left(2 - \frac{1}{G}\right)(1-k) \quad (14)$$

siendo:

N_E : factor de exceso de ruido

G : ganancia

k : tasa de ionización electrones/huecos.

La S/R puede calcularse entonces mediante la fórmula:

$$S/R = \frac{G^2 R_D^2 P_S^2}{2eG^2 B(N_E)(R_D P_S + i_B) + 2ei_S + 4N_A B_F \left(\frac{k_B T}{R_L} \right)} \quad (15)$$

siendo:

- e : carga del electrón ($1,6 \times 10^{-19}$ culombios)
 - P_S : potencia de la señal recibida (W)
 - R_D : sensibilidad del APD
 - k_B : constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)
 - T : temperatura (K)
 - i_S : corriente oscura de la superficie en el detector (A)
 - i_B : corriente oscura del cuerpo en el detector (A)
 - R_L : resistencia del amplificador de transimpedancia (Ω)
 - N_A : factor de ruido del amplificador
 - B : anchura de banda del filtro (μm)
 - B_F : anchura de banda del filtro (Hz).
-