

RECOMENDACIÓN UIT-R SA.1742

**Características técnicas y operativas de los sistemas interplanetarios
y de espacio lejano que funcionan en el sentido
espacio-Tierra en torno a 283 THz**

(Cuestión UIT-R 235/7)

(2006)

Cometido

Esta Recomendación especifica los parámetros técnicos (frecuencias, enlaces, características de señales y datos, parámetros de antena, etc.) y las características operativas de los sistemas interplanetarios y de espacio lejano que funcionan en el sentido espacio-Tierra en torno a 283 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 comunicaciones de espacio lejano e interplanetarias en frecuencias próximas a 283 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;
- e) que los mecanismos de interferencia entre satélites que funcionan en el espacio lejano y los sistemas pasivos tales como los de astronomía que funcionan por encima de 20 THz pueden diferir de los del tramo de radiofrecuencia del espectro,

reconociendo

- 1 que el número 78 del artículo 12 de la Constitución de la UIT precisa una función del Sector de Radiocomunicaciones en el sentido de «... realizando estudios sin limitación de gamas de frecuencias y adoptando Recomendaciones ...»;
- 2 que, según la Nota 2 del número 1005 del Anexo al Convenio de la UIT, las Comisiones de Estudio pueden considerar que la «radiocomunicación» incluye el espectro electromagnético por encima de 3 000 GHz propagado por el espacio sin guía artificial, al realizar sus estudios y en la creación de los proyectos de nuevas Recomendaciones;
- 3 que la utilización y compartición de este tramo del espectro no se ha estudiado detalladamente en el UIT-R,

recomienda

1 que en los estudios de compartición en los que se consideren los satélites de investigación espacial que funcionan en el sentido espacio-Tierra en torno a 238 THz en el espacio lejano, se tengan en cuenta los parámetros técnicos y operativos presentados en los Anexos 1 y 2.

Anexo 1

1 Introducción

Al aumentar la necesidad de la utilización del espectro radioeléctrico 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 radiocomunicaciones en el espacio libre. Los enlaces de radiocomunicación en las bandas de frecuencias por encima de 3 000 GHz se han convertido en realidad como resultado de múltiples desarrollos tecnológicos recientes en materia de telecomunicación por fibra óptica, especialmente en el área de la tecnología de láseres, modulación y receptores. La radiocomunicación 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 de espacio lejano.

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 THz¹, 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 la radiocomunicación interplanetaria y de espacio lejano en el sentido espacio-Tierra, la atención se ha centrado en la utilización del amplificador de fibra óptica dopado con yterbio (Yb) en 1,06 μm en una configuración de amplificador de potencia/oscilador máster (MOPA, *master oscillator-power amplifier*) con conmutación Q y láseres neodimio (granate de aluminio itrio (Nd:YAG)) o neodimio (vanadato de ytrio (Nd:YVO₄)) que funcionan en torno a 283 THz (1,06 μm), aunque, dependiendo de los requisitos de la misión, son posibles otras frecuencias. La utilización de los amplificadores Yb, Nd:YAG y Nd:YVO₄ es la principal debido a su disponibilidad y fiabilidad.

1.2 Parámetros de misión genérica

Los parámetros técnicos adecuados para los análisis de interferencia deben basarse en misiones interplanetarias genéricas a Marte y Júpiter. Para minimizar el peso y el consumo de potencia, los enlaces deben atender a los requisitos de radiocomunicación poco después del lanzamiento y continuar a lo largo de la duración de la misión, subrayando con ello la necesidad de sistemas adicionales de radiocomunicación. De esta manera, las distancias del enlace variarán entre algunos miles de km y varias unidades astronómicas (UA)². Las distancias entre la Tierra y Marte o Júpiter varían entre 0,5 y 6,2 UA. En el Cuadro 1 se ofrece un resumen de los parámetros técnicos

¹ 1 THz = 1 000 GHz.

² 1 UA \approx 149 597 870 km.

fundamentales de un enlace de espacio lejano en 283 THz con funcionamiento en el sentido espacio-Tierra.

CUADRO 1

Parámetros técnicos de dos misiones de espacio lejano de referencia con funcionamiento en 283 THz, en el sentido espacio-Tierra

Parámetro	Marte	Júpiter
Potencia del transmisor	5 W (promedio)	
Apertura del transmisor	30 cm	
Frecuencia del transmisor (longitud de onda)	283 THz (1,06 μm)	
Modulación	Modulación por posición del impulso (PPM) ($M = 64$ a 256) con codificación concatenada	
Precisión de puntería	0,35 μrad	
Alcance	0,5 a 2,5 UA	4,2 a 6,2 UA
Velocidad de datos (durante el día en el terminal terreno) ⁽¹⁾	3 a 30 Mbit/s (terminal terreno de 4,2 m)	1,5 a 3 Mbit/s (terminal de 10 m)
Apertura del receptor	4,2 a 10 m de tamaño equivalente	
Tipo de detector	Sistema de fotodiodos de avalancha InGaAsP/InP en modo Geiger	
Margen requerido del enlace	2 a 3 dB	

⁽¹⁾ Las velocidades de datos durante la noche en Tierra son aproximadamente 30% (1,13 dB) superiores.

2 Consideraciones sobre el enlace

Los enlaces de espacio lejano que funcionan en 283 THz en el sentido espacio-Tierra pueden utilizar láseres Yb, Nd:YAG o Nd:YVO₄. El haz se transmite desde un telescopio de 30 cm a bordo de un vehículo espacial y se recibe en un telescopio situado en Tierra con un diámetro efectivo de 4,2 m a 10 m.³

2.1 Calidad del enlace

Al igual que un sistema de espacio lejano que funcione en el espectro de radiofrecuencias tradicional, la calidad de un enlace que funcione en 283 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.

³ A los efectos de la telecomunicación por el espacio libre a unos 283 THz, un telescopio es de hecho una antena.

2.1.1 Velocidad de datos

A diferencia de un sistema de espacio lejano que funcione en el espectro tradicional de radiofrecuencias, cuando todos los demás parámetros se mantienen constantes, la velocidad de datos no es exactamente inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de propagación; no obstante, es una aproximación muy buena para enlaces que funcionan desde las proximidades de Marte y Júpiter y por tanto constituye una buena regla práctica. Las velocidades de datos desde Marte variarán dependiendo de múltiples parámetros, que incluyen la distancia y la geometría del enlace en relación con el Sol. Las velocidades de datos desde Marte serán generalmente de un orden de magnitud superior a las velocidades desde Júpiter.

2.1.2 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.

2.1.3 Requisito de margen

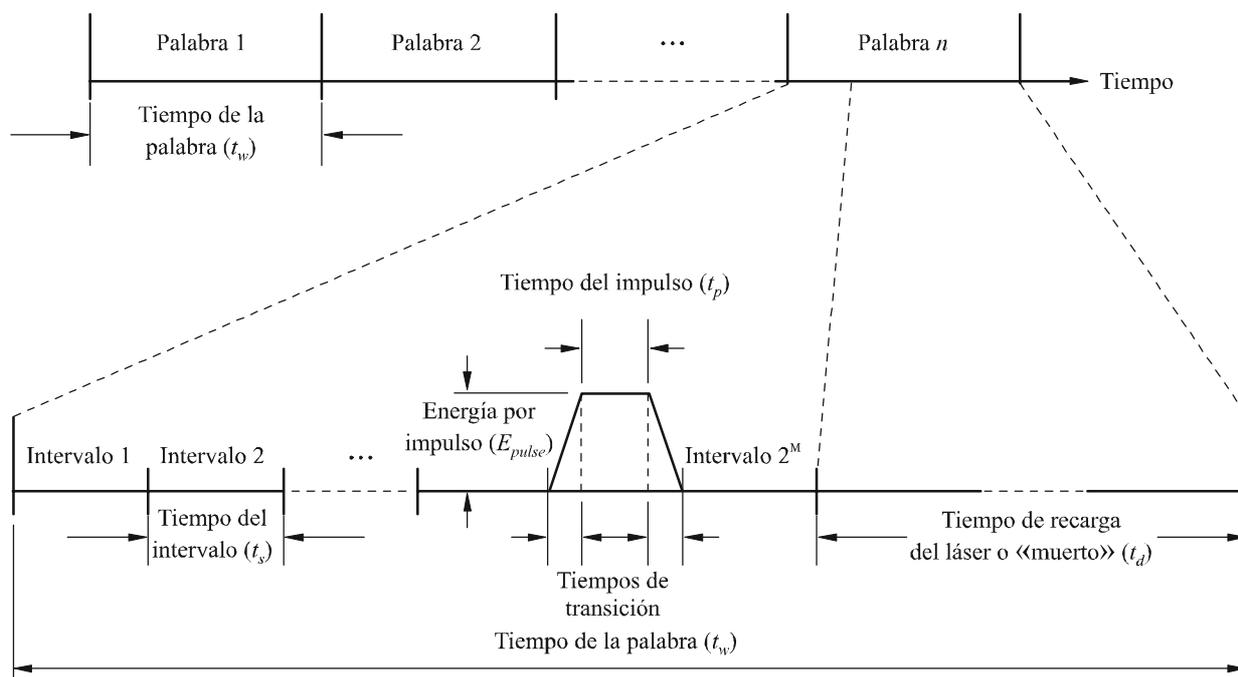
El requisito de margen típico de un enlace de espacio lejano o interplanetario que funcione en 283 THz en el sentido espacio-Tierra es del orden de 2 a 3 dB. Las condiciones dependen de factores que incluyen entre otros la meteorología, la hora del día y el ángulo de elevación.

2.2 Modulación

Los enlaces de espacio lejano e interplanetarios que funcionan en torno a 283 THz utilizarán la PPM. Esta técnica de modulación permite la detección directa (específicamente, la de cómputo de fotones) en el receptor, sin tener que implementar receptores coherentes. La señal PPM se codifica con un código concatenado.

La PPM utiliza un único impulso de energía en el intervalo de una palabra. Pueden transmitirse M bits de datos en un único impulso de energía, situado temporalmente dentro de los 2^M intervalos de tiempo de una palabra. Una parte del tiempo total de la palabra se utiliza para recargar el láser y nunca contendrá un impulso. Este tiempo de recarga o «muerto» suele suponer la mayor parte del tiempo de la palabra en velocidades de datos reducidas, pero es un factor menor en velocidades de datos superiores. En la Fig. 1 se ilustran las características temporales de una señal PPM y sus mediciones pertinentes.

FIGURA 1
Características de una señal PPM



1742-01

2.3 Potencia disponible

El transmisor Yb, con conmutación Q, Nd:YAG o Nd:YVO₄, producirá generalmente 5 W de potencia media. La potencia de cresta variará con la velocidad de datos, pero puede ser del orden de 30 a 40 dBW. Mediante el procedimiento indicado a continuación se calcula la potencia de cresta, P_{peak} , de un transmisor PPM. Se necesitan los parámetros siguientes:

- M : índice de modulación
- P_{ave} : potencia media del transmisor (W)
- t_d : tiempo muerto (s)
- t_p : tiempo del pulso del transmisor (s)
- t_s : tiempo del intervalo (s).

Paso 1: Se calcula el tiempo de la palabra, t_w :

$$t_w = M \cdot t_s + t_d \quad \text{s} \quad (1)$$

Paso 2: Se calcula la energía por palabra E_{word} :

$$E_{word} = P_{ave} \cdot t_w \quad \text{J} \quad (2)$$

NOTA 1 – Como sólo se produce un pulso durante cada tiempo de la palabra, la energía por pulso es equivalente a la energía por palabra (es decir, $E_{pulse} = E_{word}$).

Paso 3: Se calcula la potencia de cresta del transmisor, P_{peak} :

$$P_{peak} = \frac{E_{pulse}}{t_p} \quad \text{W} \quad (3)$$

2.4 Señal recibida

El método general para calcular el nivel de la señal recibida en 283 THz por la estación terrena es el mismo que el utilizado para los sistemas de radiofrecuencia tradicionales.

$$P_S = P_t + G_t + G_r + L_t + L_r + L_p + L_a + L_s \quad \text{dBW} \quad (4)$$

donde:

- P_S : potencia de la señal del receptor
- P_t : potencia media de salida del láser (el valor típico está comprendido entre 4,7 y 7,0 dBW)
- G_t : ganancia de la antena del transmisor (el valor típico es 119 dB) que se analiza con detalle en el § 2.6.2
- G_r : ganancia de la antena de recepción (el valor típico está comprendido entre 129 y 149 dB) que se analiza con detalle en el § 2.6.3
- L_t : pérdidas del transmisor
- L_r : pérdidas del receptor
- L_p : pérdidas de puntería
- L_a : pérdidas atmosféricas a lo largo del enlace espacio-Tierra
- L_s : pérdidas en el espacio libre.

2.5 Pérdidas del enlace

Hay cinco fuentes principales de pérdidas del enlace:

- pérdidas internas del transmisor, L_t , que incluyen los efectos de las pérdidas de absorción, de dispersión y de reflexión en el tren óptico del transmisor;
- pérdidas internas del receptor, L_r , que incluyen los efectos de las pérdidas de absorción, de dispersión y de reflexión en el tren óptico del receptor;
- pérdidas de puntería, L_p , que incluyen los efectos de fluctuaciones en la antena del vehículo espacial y de pérdida de puntería de la antena transmisora;
- pérdidas atmosféricas, L_a , que incluyen los efectos de la dispersión y la turbulencia atmosférica;
- pérdidas en el espacio libre, 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. La propagación atmosférica en esta gama del espectro se ha tratado detalladamente en la Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones mediante las Recomendaciones UIT-R P.1621 y UIT-R P.1622.

CUADRO 2

Parámetros técnicos de dos misiones de espacio lejano de referencia con funcionamiento en 283 THz, en el sentido espacio-Tierra

Mecanismos de pérdida	Valor típico
Perdidas del transmisor, L_t	0,63 (= -2 dB)
Pérdidas del receptor, L_r	0,63 (= -2 dB)
Pérdidas de puntería, L_p	0,63 (= -2 dB)
Pérdidas atmosféricas, L_a	0,89 (= -0,5 dB) a 90° 0,56 (= -2,5 dB) a 30°

Las pérdidas en el espacio libre, L_s , se calculan en 283 THz de la misma manera que en los sistemas de radiofrecuencia tradicionales:

$$L_s = \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 = \left(\frac{c}{4\pi f R} \right)^2 \quad (5a)$$

que, en 283 THz, se reduce a:

$$L_s = \frac{7,169 \times 10^{-15}}{R^2} \quad (5b)$$

siendo:

R : distancia entre el transmisor y el receptor (m).

2.6 Parámetros del telescopio de transmisión/recepción

Los enlaces de radiocomunicación de espacio lejano e interplanetario con funcionamiento en torno a 283 THz utilizarán telescopios como antenas de transmisión y de recepción. Los parámetros típicos de los telescopios de transmisión y de recepción diferirán considerablemente entre sí. Estas diferencias determinarán el diagrama de ganancia de los respectivos telescopios. 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 se describe una envolvente de diagramas de ganancia de antena de transmisión y de recepción con funcionamiento en torno a 283 THz.

2.6.1 Diámetro

A los efectos de los análisis de interferencia, debe suponerse que el diámetro de la antena de transmisión será de 30 cm. La apertura de transmisión no tendrá obstrucciones o una obstrucción de 3 cm.

El diámetro efectivo de la antena de recepción puede variar entre 1 y 10 m pero en la mayoría de las aplicaciones será al menos de 4,2 m. A los efectos de los análisis de interferencia, deben considerarse antenas de 1, 4,2 y 10 m. La apertura de recepción primaria tendrá una obstrucción secundaria de diámetro no superior al 20% del diámetro de la apertura ordinaria.

2.6.2 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:

$$\theta_{1/e^2} = \frac{4\lambda}{\pi D} \quad \text{rad} \quad (6)$$

siendo:

$$\begin{aligned} \theta_{1/e^2} &: \text{apertura del haz (rad)} \\ \lambda &: \text{longitud de onda (m)} \\ D &: \text{diámetro de la apertura (m)}. \end{aligned}$$

En el caso de un haz gaussiano en 283 THz transmitido desde una apertura de 30 cm, la apertura del haz del punto 1/e² es aproximadamente de $4,5 \times 10^{-6}$ 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 (7). 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.

$$G_t(\alpha, \gamma, X) = G_0 \cdot g_t(\alpha, \gamma, X) \quad \text{dBi} \quad (7)$$

siendo:

$$G_0 = \frac{4\pi A}{\lambda^2} = \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \right)^2 \quad \text{dBi} \quad (8)$$

$$g_t(\alpha, \gamma, X) = 2\alpha^2 \left| \int_{\gamma^2}^1 J_0(X\sqrt{u}) e^{-\alpha^2 u} du \right|^2 \quad (9)$$

$$\gamma = \frac{b}{a} \quad (10)$$

- A : superficie de la apertura del telescopio (m²)
- a : radio de la apertura primaria (m)
- b : radio de la obstrucción (m)
- J_0 : función de Bessel de orden cero de primera clase
- α : relación, α/ω , entre el radio de la apertura del transmisor, a , y el radio del haz de alimentación gaussiana, ω , en el punto $1/e^2$
- 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 (9) se hace:

$$g_t(\alpha, \gamma, 0) = \left[\frac{2}{\alpha^2} \left[e^{-\alpha^2} - e^{-\gamma^2 \alpha^2} \right]^2 \right] \quad (11)$$

La ganancia máxima en el eje del haz principal de la ecuación (7) se hace entonces:

$$G_t(\alpha, \gamma, 0) = \frac{4\pi A}{\lambda^2} \left[\frac{2}{\alpha^2} \left[e^{-\alpha^2} - e^{-\gamma^2 \alpha^2} \right]^2 \right] \quad \text{dBi} \quad (12)$$

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

2.6.3 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:

$$\varphi = \frac{d}{F} \quad (13)$$

siendo:

- φ : campo de visión (rad)
- d : diámetro del detector (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:

$$G_R = 10 \log \left(\frac{4\pi A}{\lambda^2} \right) + 10 \log (1 - \gamma^2) + \delta \quad \text{dBi} \quad (14)$$

siendo:

A : superficie de la apertura de recepción (m^2)

λ : longitud de onda de la señal de llegada (m)

y

$$\gamma = \frac{b}{a} \quad (15)$$

siendo:

a : radio del espejo primario (m)

b : radio del espejo secundario (m).

La ganancia calculada en la ecuación (14) 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 (14) 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 (15) se hace cero y el segundo término de la ecuación (14) puede despreciarse.

El tercer término, δ , de la ecuación (14) 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.

2.7 Puntería y seguimiento

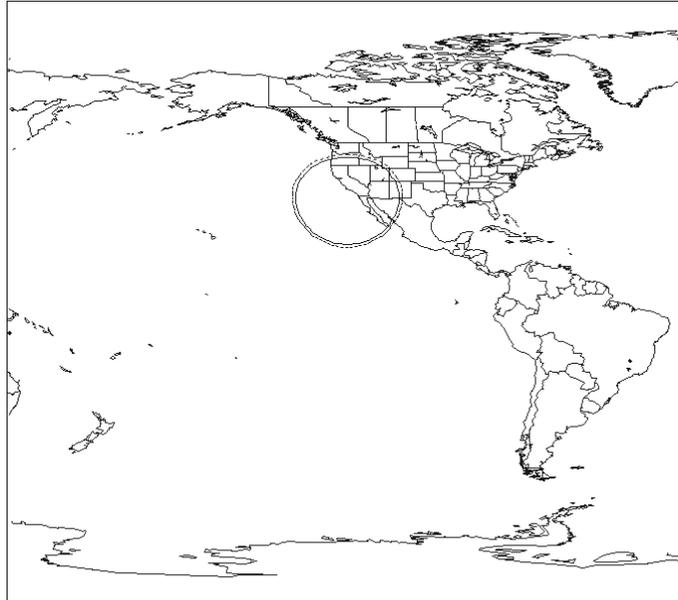
La estrechez de la apertura del haz y la gran distancia de los enlaces de espacio lejano o interplanetarios, con funcionamiento en torno a 283 THz imponen requisitos estrictos al sistema en cuanto a puntería y seguimiento. Los requisitos típicos de puntería exigen una precisión en puntería de aproximadamente $1/10^0$ de la apertura del haz. Para el sistema de referencia descrito en el Cuadro 1, esto es igual a $0,35 \mu\text{rad}$ y unas pérdidas de puntería no superiores a 2 dB.

Las Figs. 2 y 3 representan respectivamente la huella del contorno de $1/e^2$ de un enlace de longitud de 2 y 6 UA. En las Figuras se supone que el vehículo espacial transmitía a lo largo del plano ecuatorial de la Tierra y apuntaba a las instalaciones experimentales de la NASA de enlace descendente óptico situadas en Wrightwood, California, Estados Unidos de América. El contorno sólido interior de cada Figura representa la huella en el suelo, suponiendo una puntería perfecta. En

el contorno exterior de trazos se supone un error de puntería aleatorio en éste de $0,35 \mu\text{rad}$. Las distancias de 2 y 6 UA equivalen a las distancias entre la Tierra y Marte y entre la Tierra y Júpiter, respectivamente.

FIGURA 2

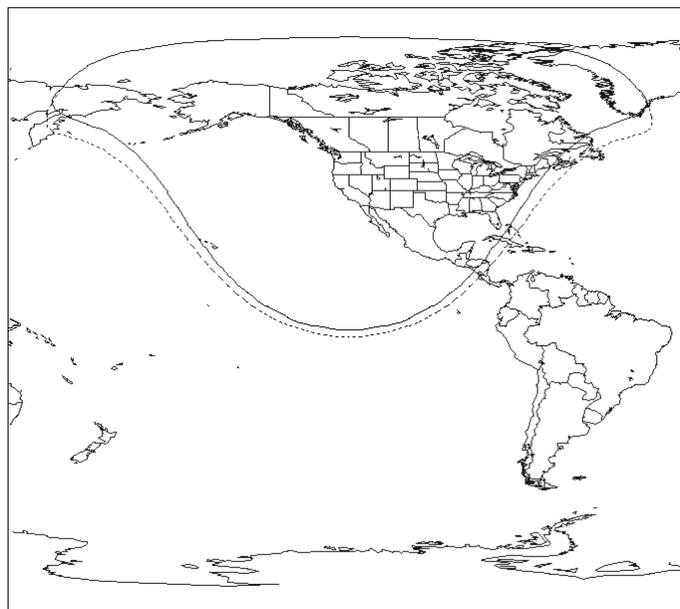
Huella de un haz de $8 \mu\text{rad}$ de 2 UA



1742-02

FIGURA 3

Huella de un haz de $8 \mu\text{rad}$ de 6 UA



1742-03

3 Relación señal/ruido (SNR)

La calidad de los enlaces de telecomunicación de espacio lejano e interplanetarios que funcionan en torno a 283 THz depende directamente de la obtención en el receptor de una relación señal/ruido (SNR) elevada. Cuanto más alta sea la SNR menor será la BER. En general:

$$SNR = \frac{P_s}{N_t} \quad (16)$$

siendo:

P_s : potencia de la señal recibida que viene dada en la ecuación (4)

N_t : potencia de ruido procedente de todas las fuentes.

El ruido procede de dos fuentes independientes, el ruido del receptor y la señal de fondo. Esta señal de fondo, examinada en el § 3.1, es debida a la energía externa procedente del cielo que llega al detector. El ruido del detector, examinado en el § 3.2, es debido al ruido inherente interno del receptor.

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

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

3.1 Señal de fondo

Durante las operaciones diurnas o cuando el objeto iluminado aparece en el campo de visión del detector, la señal de fondo será la fuente predominante de ruido. La potencia de la señal de fondo, P_{back} , incidente en el detector puede proceder de la energía difusa del cielo, los planetas o las estrellas. El ruido del cielo es mayor durante las horas diurnas y varía con las condiciones meteorológicas locales, aunque siempre está presente con un cierto nivel finito. El ruido procedente de los planetas o las estrellas será un factor a tener en cuenta cuando dichos cuerpos estén en el campo de visión del receptor. El ruido procedente de cada fuente puede sumarse para calcular la señal de fondo total.

Debe utilizarse el procedimiento indicado a continuación para calcular los niveles de la señal de fondo en el detector de la estación terrena. Se requieren los parámetros siguientes:

D : diámetro de la apertura del receptor (m)

γ : relación de obstrucción del telescopio de la estación terrena

φ : campo de visión del detector (rad)

B : anchura de banda del receptor (μm).

Paso 1: Se calcula el área del receptor, A_{rec} , mediante la expresión:

$$A_{rec} = (1 - \gamma^2) \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \quad \text{m}^2 \quad (17)$$

Paso 2: Se calcula el ángulo sólido del campo de vista del detector de recepción, φ' , mediante:

$$\varphi' = 2\pi \left(1 - \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \right) \quad \text{Sr} \quad (18a)$$

que para ángulos pequeños es aproximadamente:

$$\varphi'_{det} = \frac{\pi\varphi^2}{4} \quad \text{Sr} \quad (18b)$$

Paso 3: Se determina el valor de la radiación del cielo, H_{sky} , en 283 THz. Si no se dispone de valores medidos, se escogen valores del Cuadro 3.

CUADRO 3

Luminancia en 283 THz para condiciones arbitrarias de brillo del cielo, H_{sky} ($\text{W}/\text{m}^2/\mu\text{m}/\text{Sr}$)

Fuente	Radiancia
Sol diurno brillante	54,45
Periodo diurno normal	25,32
Periodo diurno nuboso	17,99
Noche	$1,000 \times 10^{-5}$

Paso 4: Se calcula la potencia en el detector procedente del cielo, P_{sky} , mediante:

$$P_{sky} = H_{sky} \cdot A_{rec} \cdot \varphi' \cdot B \quad \text{W} \quad (19)$$

Paso 5: Se determina el valor de radiación, N_{star} , en 283 THz de la estrella, de haberla, que aparece en el campo de visión de la estación terrena. Si no se dispone de valores medidos, se escogen valores del Cuadro 4. Si no hay ninguna estrella en el campo de visión, se hace $P_{star} = 0$ y se sigue con el Paso 7.

CUADRO 4

Iluminación en 283 THz para determinadas estrellas, N_{star} ($\text{W}/\text{m}^2/\mu\text{m}$)

Fuente	Iluminación	Fuente	Iluminación
Achamar	$1,94462 \times 10^{-9}$	Capella	$1,67642 \times 10^{-8}$
Aldebaran	$2,87647 \times 10^{-8}$	Pollux	$1,61359 \times 10^{-8}$
Altair	$2,68864 \times 10^{-9}$	Procyon	$1,22510 \times 10^{-8}$
Arcturus	$3,22719 \times 10^{-8}$	Rigel	$4,76926 \times 10^{-9}$
Betelgeuse	$3,99278 \times 10^{-8}$	Rigil Kent	$1,67642 \times 10^{-8}$
Canopus	$2,09429 \times 10^{-8}$	Sirius	$2,09013 \times 10^{-8}$

Paso 6: Se calcula la potencia en el detector procedente de la estrella, P_{star} , por:

$$P_{star} = N_{star} \cdot A_{rec} \cdot B \quad \text{W} \quad (20)$$

Paso 7: Se determina el diámetro, D_{planet} , la corona de albedo, χ_{planet} , y la densidad espectral de potencia, ψ_{planet} , del planeta situado en el campo de visión del receptor, a partir de los valores del Cuadro 5. Si no hay ningún planeta en el campo de visión del receptor, se hace $P_{planet} = 0$ y se sigue con el Paso 10.

CUADRO 5

Diámetros, albedo y densidad espectral de los planetas

Planeta	Diámetro (m)	Albedo del planeta	Densidad espectral incidente del planeta (W/μm)
Mercurio	4 866 070	0,119	$8,336 \times 10^{16}$
Venus	12 108 756	0,75	$1,469 \times 10^{17}$
Marte	6 778 400	0,25	$1,043 \times 10^{16}$
Júpiter	142 989 171	0,343	$3,950 \times 10^{17}$
Saturno	120 582 610	0,342	$8,228 \times 10^{16}$
Urano	51 204 220	0,3	$3,891 \times 10^{15}$
Neptuno	49 508 383	0,29	$1,373 \times 10^{15}$
Plutón	2 308 404	0,145	$1,803 \times 10^{12}$

Paso 8: Se calcula el ángulo que subtende el planeta visto desde el receptor, θ_{planet} , mediante:

$$\theta_{planet} = \frac{D_{planet}}{R_{planet}} \quad \text{rad} \quad (21)$$

siendo:

R_{planet} : distancia desde la Tierra al planeta (m).

Paso 9: Si $\theta_{planet} < \varphi$, se calcula la potencia en el detector procedente del planeta, P_{planet} , mediante:

$$P_{planet} = \left(\frac{\Psi_{planet} \cdot \chi_{planet}}{R_{planet}^2} \right) \cdot A_{rec} \cdot B \quad \text{W} \quad (22a)$$

de no ser así:

$$P_{planet} = \left(\frac{\Psi_{planet} \cdot \chi_{planet}}{R_{planet}^2} \right) \cdot A_{rec} \cdot B \cdot \left(\frac{\varphi'}{\theta'_{planet}} \right) \quad \text{W} \quad (22b)$$

donde θ'_{planet} es el ángulo sólido del planeta que subtende el detector y que viene dado por:

$$\theta'_{planet} = 2\pi \left(1 - \cos \left(\frac{\theta_{planet}}{2} \right) \right) \approx \frac{\pi \theta_{planet}^2}{4} \quad \text{S/r} \quad (23)$$

Paso 10: Se calcula la potencia total de la señal de fondo, P_{back} , incidente en el detector:

$$P_{back} = P_{sky} + P_{star} + P_{planet} \quad \text{W} \quad (24)$$

3.2 Ruido del detector

La mayoría de las aplicaciones planificadas para radiocomunicaciones de espacio lejano e interplanetarias utilizarán un receptor de detección directa con un fotodiodo de avalancha (APD). Los detectores APD funcionarán normalmente en una de dos regiones de detección con limitación de ruido. Los detectores que reciben niveles de potencia de entrada elevados estarán generalmente limitados mediante el ruido de impacto de fotones. No obstante, los detectores que reciben niveles de potencia de entrada reducidos, tales como los asociados a enlaces de espacio lejano e interplanetario, estarán limitados en el ruido del detector. A continuación se desarrolla la SNR 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:

$$N_E = Gk + \left(2 - \frac{1}{G}\right)(1-k) \quad (25)$$

siendo:

- G : ganancia
 k : tasa de ionización electrones/huecos.

La SNR puede calcularse entonces mediante la fórmula:

$$SNR = \frac{G^2 R_D^2 P_S^2}{2eG^2 B(N_E)(R_D P_S + i_B) + 2ei_S + 4N_A B_F \left(\frac{k_B T}{R_L}\right)} \quad (26)$$

siendo:

- e : carga del electrón ($1,6 \times 10^{-19}$ culombios)
 P_S : potencia media 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 del detector (A)
 i_B : corriente oscura del cuerpo del detector (A)
 R_L : resistencia del amplificador de transimpedancia (Ω)
 N_A : factor de ruido del amplificador
 B_F : anchura de banda del receptor (Hz).

4 Listas de variables

- a : radio del espejo del telescopio (m)
 A : superficie de la apertura del telescopio (m^2)
 A_{rec} : superficie de la apertura del telescopio receptor (m^2)
 α : relación, a/ω
 b : radio del espejo secundario (m)
 B : anchura de banda del filtro (μm)
 B_F : anchura de banda del filtro (Hz)

c :	velocidad de la luz (m/s)
χ_{planet} :	reflexión albedo de un planeta
d :	diámetro del detector (m)
D :	diámetro de la apertura (m)
D_{planet} :	diámetro del planeta (m)
δ :	pérdidas debidas al desbordamiento de energía por el borde del detector (dB)
e :	carga del electrón (culombio)
E_{pulse} :	energía por impulso (J)
f :	frecuencia óptica (Hz)
F :	longitud focal del telescopio (m)
φ :	campo de visión del detector (rad)
φ' :	ángulo sólido del campo de visión del detector (srad)
G_0 :	ganancia máxima de la antena en el eje (dBi)
G_r :	ganancia de la antena de recepción (dBi)
g_i :	eficacia de la ganancia
G_t :	ganancia de la antena del transmisor (dBi)
γ :	relación de obstrucción
H_{sky} :	luminancia del cielo ($W/m^2/\mu m/Sr$)
i_b :	corriente oscura del cuerpo del detector (A)
i_s :	corriente oscura de la superficie del receptor (A)
k :	tasa de ionización electrones/huecos
k_B :	constante de Boltzman
L_t :	pérdidas del transmisor
L_r :	pérdidas del receptor
L_p :	pérdidas de puntería
L_a :	pérdidas atmosféricas a lo largo del enlace espacio-suelo
L_s :	pérdidas en el espacio libre
λ :	longitud de onda (m)
M :	índice de modulación
N_A :	factor de ruido del amplificador
N_E :	exceso del factor de ruido
N_{star} :	iluminación de una estrella ($W/m^2/\mu m$)
N_t :	potencia de ruido procedente de todas las fuentes
P_{ave} :	potencia media del transmisor (W)
P_{back} :	potencia de fondo total recibida (W)
P_{peak} :	potencia de cresta (W)
P_{planet} :	potencia recibida de un planeta iluminado (W)
P_S :	potencia de la señal recibida (W)
P_{sky} :	potencia recibida del cielo (W)

- P_{star} : potencia recibida de una estrella (W)
 P_t : potencia media de salida del láser (W)
 θ : ángulo respecto al eje óptico (rad)
 θ_{planet} : ángulo subtendido por un planeta (rad)
 θ_{1/e^2} : anchura angular del haz en el punto $1/e^2$ (rad)
 θ'_{planet} : ángulo sólido subtendido por un planeta (rad)
 R : distancia entre el transmisor y el receptor (m)
 R_D : sensibilidad del APD
 R_L : resistencia del amplificador de transimpedancia
 R_{planet} : distancia entre el planeta y el receptor (m)
 t_d : tiempo de reposo del transmisor (s)
 t_p : tiempo del impulso del transmisor (s)
 t_s : intervalo de tiempo del transmisor (s)
 t_w : tiempo de la palabra del transmisor (s)
 T : temperatura (K)
 ω : tamaño de la sección transversal del haz en el punto $1/e^2$
 Ψ_{planet} : densidad espectral de potencia de una luna o un planeta (W/ μ m).

Anexo 2

1 Diagrama de antena para aperturas de transmisión circulares no obstruidas

La envolvente del diagrama de ganancia de antena de una apertura de transmisión circular no obstruida que funcione en torno a 238 THz viene dada aproximadamente por:

$$G_t(\varphi) = G_{m\acute{a}x} - 0,9 - (4,5 \times 10^{-4}) \left(\frac{D}{\lambda} \cdot \varphi \right)^{2,5} \quad \text{dBi} \quad \text{para } 0 \leq \varphi \leq \varphi_m$$

$$G_t(\varphi) = G_1 \quad \text{dBi} \quad \text{para } \varphi_m < \varphi \leq \varphi_r$$

$$G_t(\varphi) = G_{m\acute{a}x} + 35 - 30 \log \left(\frac{D}{\lambda} \right) - 30 \log(\varphi) \quad \text{dBi} \quad \text{para } \varphi_r < \varphi \leq \varphi_1$$

$$G_t(\varphi) = -10 \quad \text{dBi} \quad \text{para } \varphi_1 < \varphi \leq 180^\circ$$

siendo:

$$G_{m\acute{a}x} = 20 \log \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right): \quad \text{ganancia del haz principal (dBi)}$$

$$G_1 = G_{m\acute{a}x} - 25,8: \quad \text{ganancia del primer lóbulo lateral (dBi)}$$

$$D: \quad \text{diámetro de la apertura (m)}$$

λ : longitud de onda (m)

φ : ángulo respecto al eje (grados)

$\varphi_r = 5,83 \left(\frac{180\lambda}{\pi^2 D} \right)$: ángulo del primer lóbulo lateral (grados)

$\varphi_m = 0,75\varphi_r$: ángulo en que la ganancia del lóbulo principal iguala a la ganancia del primer lóbulo lateral (grados)

φ_1 : campo de visión limitado por barreras ópticas (grados).

2 Diagrama de antena para aperturas de transmisión circular obstruidas

La envolvente del diagrama de ganancia de antena de una apertura de transmisión circular obstruida que funcione en torno a 238 THz viene dada por:

$$G_t(\varphi) = G_{m\acute{a}x} - 0,9 + 32 \log(1 - \gamma^2) - \left(4 \times 10^{-4} + \frac{\gamma}{2000} \right) \left(\frac{D}{\lambda} \cdot \varphi \right)^{2,5} \text{ dBi} \quad \text{para } 0 \leq \varphi \leq \varphi_m$$

$$G_t(\varphi) = G_1 \quad \text{dBi} \quad \text{para } \varphi_m < \varphi \leq \varphi_r$$

$$G_t(\varphi) = G_{m\acute{a}x} + 40 + 15\gamma - 30 \log\left(\frac{D}{\lambda}\right) - 30 \log(\varphi) \quad \text{dBi} \quad \text{para } \varphi_r < \varphi \leq \varphi_1$$

$$G_t(\varphi) = -10 \quad \text{dBi} \quad \text{para } \varphi_1 < \varphi \leq 180^\circ$$

siendo:

$$G_{m\acute{a}x} = 20 \log\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right): \text{ ganancia del haz principal (dBi)}$$

$$G_1 = G_{m\acute{a}x} + 2,17 + 15\gamma - 30 \log(5,77 - 2,9\gamma^2): \text{ ganancia del primer lóbulo lateral (dBi)}$$

D : diámetro de la apertura (m)

λ : longitud de onda (m)

φ : ángulo respecto al eje (grados)

$$\varphi_r = (5,77 - 2,9\gamma^2) \left(\frac{180\lambda}{\pi^2 D} \right): \text{ ángulo del primer lóbulo lateral (grados)}$$

$\varphi_m = (0,71 - 0,5\gamma) \cdot \varphi_r$: ángulo en que la ganancia del lóbulo principal iguala a la ganancia del primer lóbulo lateral (grados)

φ_1 : campo de visión limitado por barreras ópticas (grados)

$$\gamma = \frac{b}{a}: \text{ relación de obstrucción}$$

a : radio de la apertura primaria (m)

b : radio de la apertura secundaria (m).

3 Diagrama de antena para aperturas de recepción circulares no obstruidas

La envolvente del diagrama de ganancia de antena de una apertura de recepción circular no obstruida que funcione en torno a 238 THz viene dada aproximadamente por:

$$G_t(\varphi) = G_{m\acute{a}x} - (6 \times 10^{-4}) \left(\frac{D}{\lambda} \cdot \varphi \right)^{2,5} \quad \text{dBi} \quad \text{para } 0 \leq \varphi \leq \varphi_m$$

$$G_t(\varphi) = G_1 \quad \text{dBi} \quad \text{para } \varphi_m < \varphi \leq \varphi_r$$

$$G_t(\varphi) = G_{m\acute{a}x} + 42 - 30 \log \left(\frac{D}{\lambda} \right) - 30 \log(\varphi) \quad \text{dBi} \quad \text{para } \varphi_r < \varphi \leq \varphi_1$$

$$G_t(\varphi) = -10 \quad \text{dBi} \quad \text{para } \varphi_1 < \varphi \leq 180^\circ$$

siendo:

$$G_{m\acute{a}x} = 20 \log \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right): \quad \text{ganancia del haz principal (dBi)}$$

$$G_1 = G_{m\acute{a}x} - 17,5: \quad \text{ganancia del primer lóbulo lateral (dBi)}$$

D : diámetro de la apertura (m)

λ : longitud de onda (m)

φ : ángulo respecto al eje (grados)

$$\varphi_r = 5,14 \left(\frac{180\lambda}{\pi^2 D} \right): \quad \text{ángulo del primer lóbulo lateral (grados)}$$

$\varphi_m = 0,65\varphi_r$: ángulo en que la ganancia del lóbulo principal iguala a la ganancia del primer lóbulo lateral (grados)

φ_1 : campo de visión limitado por barreras ópticas (grados).

4 Diagrama de antena para aperturas de recepción circulares obstruidas

La envolvente del diagrama de ganancia de antena de una apertura de recepción circular no obstruida que funcione en torno a 283 THz viene dada aproximadamente por:

$$G_t(\varphi) = G_{m\acute{a}x} + 20 \log(1 - \gamma^2) - \left(6 \times 10^{-4} + \frac{\gamma}{3000} \right) \left(\frac{D}{\lambda} \cdot \varphi \right)^{2,5} \quad \text{dBi} \quad \text{para } 0 \leq \varphi \leq \varphi_m$$

$$G_t(\varphi) = G_1 \quad \text{dBi} \quad \text{para } \varphi_m < \varphi \leq \varphi_r$$

$$G_t(\varphi) = G_{m\acute{a}x} + 44 + 8\gamma - 30 \log \left(\frac{D}{\lambda} \right) - 30 \log(\varphi) \quad \text{dBi} \quad \text{para } \varphi_r < \varphi \leq \varphi_1$$

$$G_t(\varphi) = -10 \quad \text{dBi} \quad \text{para } \varphi_1 < \varphi \leq 180^\circ$$

siendo:

$$G_{m\acute{a}x} = 20 \log \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right): \quad \text{ganancia del haz principal (dBi)}$$

$$G_1 = G_{m\acute{a}x} - 15,15 + 8\gamma: \quad \text{ganancia del primer lóbulo lateral (dBi)}$$

D : diámetro de la apertura (m)

λ : longitud de onda (m)

φ : ángulo respecto al eje (grados)

$\varphi_r = 5,14 \left(\frac{180\lambda}{\pi^2 D} \right)$: ángulo del primer lóbulo lateral (grados)

$\varphi_m = (0,62 - 0,3\gamma) \cdot \varphi_r$: ángulo en que la ganancia del lóbulo principal iguala a la ganancia del primer lóbulo lateral (grados)

φ_1 : campo de visión limitado por barreras ópticas (grados)

$\gamma = \frac{b}{a}$: relación de obstrucción

a : radio de la apertura primaria (m)

b : radio de la apertura secundaria (m).
