

RECOMENDACIÓN UIT-R S.1590

Características técnicas y operacionales de los satélites que funcionan en la gama 20-375 THz

(Cuestión UIT-R 264/4)

(2002)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que algunos sistemas de satélite están utilizando y planificando enlaces de telecomunicación para las comunicaciones entre satélites a frecuencias en la gama de 20-375 THz;
- b) que está investigándose la viabilidad de los sistemas de telecomunicación del servicio fijo por satélite que funcionan en la banda de 20-375 THz del espectro utilizando enlaces Tierra-espacio y enlaces espacio-Tierra;
- c) que los astrónomos están haciendo observaciones en esta parte del espectro;
- d) que esta parte del espectro también se está utilizando para otros servicios científicos;
- e) que esta parte del espectro también está utilizándose para fines científicos e industriales diferentes de la comunicación;
- f) que los mecanismos de la interferencia entre los satélites y sistemas pasivos, tales como el de astronomía por encima de los 20 THz pueden ser diferentes de los de la parte de radiofrecuencia del espectro,

reconociendo

- a) que el número 78 del Artículo 12 de la Constitución de la UIT estipula que entre las funciones del Sector de Radiocomunicaciones están «... realizando estudios sin limitación de gamas de frecuencias y adoptando Recomendaciones ...»;
- b) que, de conformidad con la Nota 2 del punto 1005 del Anexo al Convenio de la UIT, las Comisiones de Estudio pueden considerar, durante la elaboración de sus estudios y en la creación de proyectos de nuevas Recomendaciones, que la palabra «radiocomunicación» comprende las ondas electromagnéticas cuya frecuencia sea superior a los 3 000 GHz y que se propagan en el espacio sin guía artificial;
- c) que, al final de 2001, la utilización y compartición de esta parte del espectro no se ha estudiado a fondo en el marco del UIT-R,

recomienda

- 1** que en los estudios de compartición entre satélites que funcionan en la banda de frecuencias de 20-375 THz se tengan en cuenta los parámetros técnicos y operativos presentados en el Anexo 1.

ANEXO 1

1 Introducción

El Reglamento de Radiocomunicaciones (RR) define el término «ondas radioeléctricas» como las «Ondas electromagnéticas, cuya frecuencia se fija convencionalmente por debajo de 3 000 GHz, que se propagan en el espacio sin guía artificial». Con el interés creciente en la utilización del espectro radioeléctrico y el progreso de la tecnología, está prestándose mayor atención al empleo de frecuencias superiores a los 3 000 GHz para las telecomunicaciones en el espacio libre. Los enlaces de telecomunicación son ya una realidad en las bandas de frecuencia superiores a los 3 000 GHz a raíz de los múltiples adelantos tecnológicos producidos recientemente en los dispositivos de comunicación óptica, tales como la fibra óptica, los láseres de estado sólido (GaAs, InP)¹, los moduladores (moduladores optoelectrónicos) y los detectores (fotodiodos). Las telecomunicaciones en el espacio libre en frecuencias superiores a los 3 000 GHz tienen capacidad para velocidades de datos de decenas de Gbit/s y para satisfacer los requisitos de ganancia y directividad de los haces que se utilizan en las aplicaciones de espacio lejano.

En las telecomunicaciones, la atención está centrándose en las frecuencias de la banda 20-375 THz (15-0,8 μm). Si bien ya se han realizado algunos enlaces, gran parte de la tecnología para estos enlaces todavía está desarrollándose, aunque evoluciona rápidamente. Tales enlaces pueden cursar señales de telecomunicación en trayectos Tierra-espacio, espacio-Tierra y espacio-espacio, así como los trayectos terrestres. Se está examinando su utilización para los satélites en órbita geoestacionaria (OSG) y para los de órbita no geoestacionaria (no OSG), por ejemplo, los de órbita terrestre baja.

Para los futuros estudios de compartición se han de determinar las características técnicas y operacionales de los enlaces de telecomunicación en el espacio libre que funcionan en estas bandas del espectro. En los puntos siguientes se describen las especificaciones y el funcionamiento de algunos sistemas en esta gama. La finalidad de esta Recomendación es determinar los parámetros del sistema necesarios para realizar los análisis de interferencia en las aplicaciones espaciales.

2 Consideraciones en cuanto a la frecuencia

No todas las frecuencias son igualmente adecuadas para las telecomunicaciones en el espacio libre, ya que la transparencia de la atmósfera varía considerablemente con la frecuencia. Los enlaces Tierra-espacio y espacio-Tierra deberán funcionar en una región de poca absorción mientras los enlaces espacio-espacio pueden optar por una región de gran absorción a fin de lograr el aislamiento contra interferencias de la Tierra y de reducir la probabilidad de causar interferencia a las observaciones astronómicas.

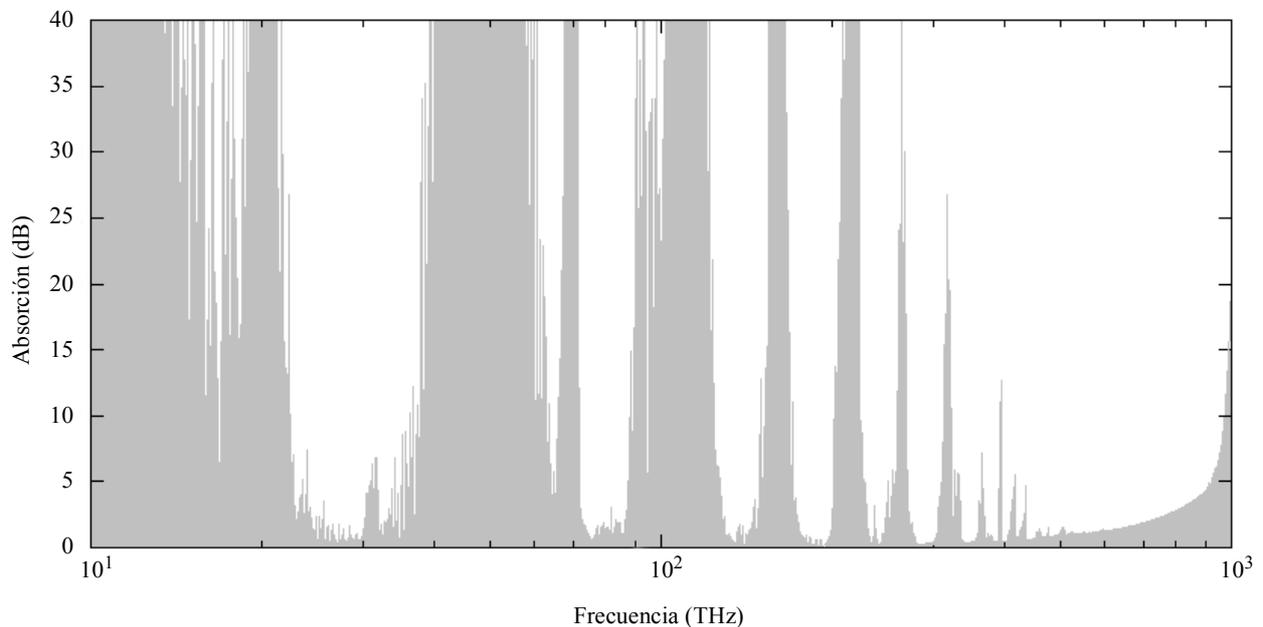
La utilización de láseres de infrarrojo cercano (0,850 μm) es más eficaz en términos de la relación señal ruido. Los detectores de infrarrojo medio, próximo a los 15 μm , necesitan una gran refrigeración para reducir el ruido térmico.

¹ Los láseres que se utilizan en telecomunicaciones se fabrican con compuestos semiconductores III-V. Los materiales que se utilizan son aleaciones de arseniuro de galio (GaAs) y de fosfuro de indio (InP). Las longitudes de onda de estos láseres son, respectivamente, 0,85 μm y 1,5 μm .

La Fig. 1 muestra la dependencia con la frecuencia de la absorción atmosférica de una señal óptica a lo largo de un trayecto vertical. En la Fig. se supone que el trayecto empieza a nivel del mar, y la línea de visibilidad continúa en el espacio atravesando una atmósfera estándar. Por debajo de unos 15 THz ($20\ \mu\text{m}$), el cielo es completamente opaco. Según va aumentando la frecuencia hacia la banda visible, 400-750 THz ($0,75\text{-}0,40\ \mu\text{m}$), empiezan a haber muchas bandas de distinta transparencia y anchura, debido a la presencia de componentes gaseosos en la atmósfera. Estos gases no están necesariamente mezclados uniformemente y las proporciones pueden variar en función de la altitud. La intensidad de las rayas de absorción también depende por lo general de la presión y la temperatura. A unos 300 THz ($1\ \mu\text{m}$), la envolvente de la absorción empieza a aumentar, debido principalmente al O_2 y al O_3 . La absorción aumenta a lo largo de la banda visible, hasta unos 1 000 THz ($0,3\ \mu\text{m}$) donde la atmósfera vuelve a ser completamente opaca debido a la absorción molecular.

Actualmente, el interés principal para los enlaces de telecomunicaciones se centra alrededor de las frecuencias 200, 283, 311 y 353 THz, cuyas longitudes de onda correspondientes son aproximadamente 1,5, 1,06, 0,965 y 0,850 μm . Estas frecuencias son las mismas que generalmente se utilizan para las comunicaciones por fibra óptica.

FIGURA 1
Absorción (zona sombreada) por encima de los 10 THz de una atmósfera estándar a lo largo de un trayecto vertical



1590-01

El Cuadro 1 muestra algunas características para láseres típicos utilizados en las comunicaciones ópticas terrestres.

CUADRO 1

Características típicas de los láseres de estado sólido en la gama de 0,75 μm a 1,6 μm

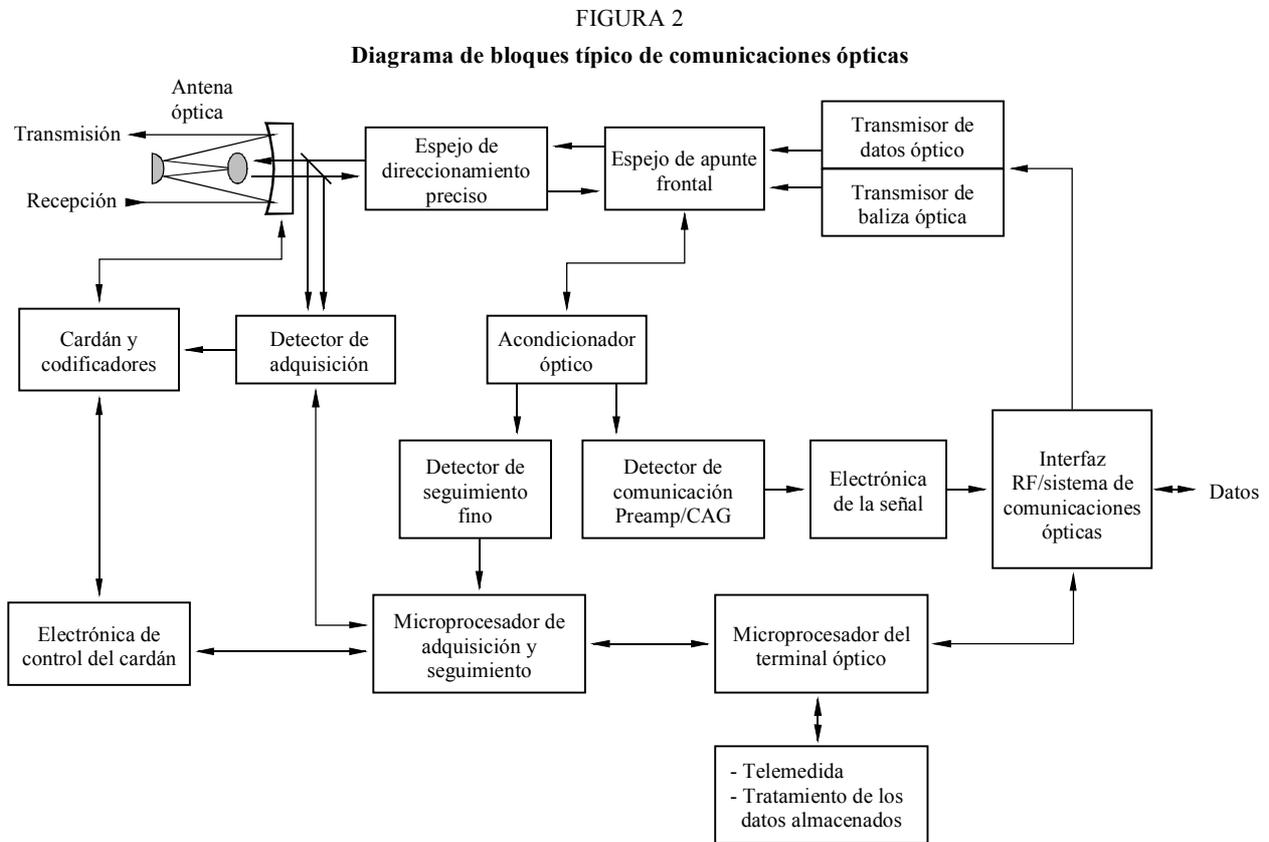
Tipo de láser	Longitud de onda de transición	Potencia máxima de salida típica (W)	Onda continua o pulso	Monomodo (S) Multimodo (M)	Anchura de la raya espectral de transición
Semiconductores $In_{1-x}Ga_{1-y}P_y^{(1)}$	1,1 μm a 1,6 μm	1	Onda continua	S/M	Desde algunos GHz a 10 THz
Cristal $Nd^{3+}:YAG^{(2)}$	1,064 μm	10	Onda continua	S/M	120 GHz
Semiconductores In_xGa_xAs	0,965 μm	1	Onda continua	S/M	Desde algunos GHz a 10 THz
Semiconductores Al_xGa_xAs	0,75 a 0,87 μm	10	Onda continua	S/M	Desde algunos GHz a 10 THz

(1) $0 < y < 1$ y $0 < x < 1$

(2) YAG: itrio aluminio granate.

3 Diagrama de bloques genérico

La Fig. 2 muestra un diagrama de bloques genérico de un sistema de telecomunicaciones ópticas típico.



CAG: control automático de ganancia

Se ha observado que para casi todos los enlaces ópticos hay un enlace de retorno que sirve de realimentación para corregir el haz óptico. Es decir, los dos enlaces funcionan como una red de control de bucle cerrado a fin de mantener la alineación óptica.

Conviene examinar los parámetros de que dispone el diseñador del terminal óptico. Obviamente, no todos los terminales ópticos de satélite son iguales. Más bien su utilización o aplicaciones específicas determinan el diseño. En este punto se describen los componentes básicos de los terminales ópticos y se tratan los detalles de las características específicas de diseño que son propias de determinadas aplicaciones.

3.1 Transmisor

El transmisor de datos, un láser, se muestra en el ángulo superior derecho de la Fig. 2. La energía típica de los láseres actuales preparados para funcionar en el espacio es de cerca de 1 W. El empleo de unidades de potencia mayor está limitado por problemas de vida útil y fiabilidad, aunque la tecnología no deja de evolucionar. Para velocidades de datos de decenas de Gbit/s el diseñador deberá limitar la selección a la clase de láseres sintonizables y a la utilización más probable de componentes basados en el múltiplex por división en longitud de onda. Para los sistemas de telecomunicación heterodinos y homodinos, se necesitan láseres que tengan poco ancho de raya y ruido de fase mínimo. Además los láseres tienen que ser de frecuencia estable y sumamente sintonizables para evitar el problema del efecto Doppler óptico. En el caso de un enlace entre una órbita OSG y una no OSG, para evitar el problema del efecto Doppler se podría llegar a necesitar ajustes de ± 10 GHz.

3.2 Receptor

El receptor aparece en el bloque de en medio de la Fig. 2 con el nombre «Detector de comunicación: Preamp/CAG». La mayoría de los receptores actuales utilizan fotodiodos de avalancha (APD) o diodos *Pin*. Para las aplicaciones donde la energía óptica incidente en el detector es débil, como en un receptor de detección directa, es mejor utilizar APD dada su ganancia interna. Con un APD puede lograrse una sensibilidad de detección del orden de 100 fotones recibidos por bit. El APD sirve para velocidades de datos del enlace de hasta 40 Gbit/s. Aunque se ha alcanzado el límite de ancho de banda para los APD, se está mejorando su sensibilidad con el desarrollo de amplificadores de fibra óptica. Los diodos *Pin* son más sencillos de utilizar y más fáciles de fabricar que los APD pero tienen menor ganancia. Estos diodos se utilizan normalmente en los sistemas de detección heterodinos u homodinos.

3.3 Detección

La detección en los sistemas ópticos funciona de manera más o menos similar a la de los sistemas de radiofrecuencia. Las tres técnicas son: la detección directa, la detección heterodina y la detección homodina. Hasta ahora la mayoría de los sistemas han utilizado la detección directa, que se realiza convirtiendo la energía por fotón (intensidad óptica) en portadores de carga o corriente eléctrica. La señal se demodula directamente en el receptor convirtiéndose en la señal transmitida en la banda de base. El receptor heterodino detecta la amplitud y la fase de la señal, mezclando primero la señal óptica recibida con la salida potente de un oscilador local, y detectando después la señal óptica combinada. La detección homodina es un caso especial de detección heterodina donde la frecuencia y la fase del oscilador local coinciden con las de la señal de entrada.

3.4 Adquisición

La adquisición es un proceso complejo controlado por el bloque «Microprocesador de adquisición y seguimiento» y por los bloques que representan las funciones de cardán en la parte izquierda de la Fig. 2. Para establecer un enlace óptico, las unidades pasan por una fase de adquisición a fin de alinear la óptica y engancharse con cualquiera de las portadoras. Durante esta fase, generalmente se utiliza como señal una baliza y se utiliza una barra de fotodetectores de acoplamiento de cargas (CCD) para detectar todo fallo de alineación. Esta tecnología ha alcanzado un nivel alto de madurez. Probablemente los CCD seguirán siendo la principal tecnología utilizada para este aspecto de las comunicaciones ópticas.

3.5 Transmisor de la baliza

El transmisor de la baliza está junto al transmisor de datos en el ángulo superior derecho de la Fig. 2. Durante la fase de adquisición cada terminal emite una señal de baliza luminosa con un haz bastante más ancho que el de comunicaciones para poder realizar la alineación inicial de la óptica. La tecnología de baliza láser es bien conocida, y el diseñador del terminal dispone de diversas soluciones, basadas todas ellas en tecnologías asentadas.

3.6 Seguimiento/servomecanismo

El seguimiento y servocontrol son las operaciones de precisión de puntería realizadas por el «Espejo de direccionamiento preciso» y el «Espejo de apunte frontal» que se representan en la Fig. 2. Estas operaciones se consideran a la vez porque sus funciones están totalmente relacionadas. Es sumamente difícil cumplir los requisitos de puntería y seguimiento del enlace óptico cuando el vehículo espacial experimenta oscilaciones y movimientos. Si no se efectúa correctamente esta función, se produce una ráfaga de errores que podría causar una pérdida de datos más importante.

3.7 Electrónica

Aunque la electrónica es probablemente la tecnología más consolidada de apoyo a las telecomunicaciones ópticas, el diseñador del terminal tiene que ser consciente de que los enlaces para telecomunicaciones digitales a decenas de Gbit/s requieren anchos de la raya espectral de unos 10 ps y tiempos de subida y caída de 2 ps o menos. Este requisito de calidad de funcionamiento plantea un problema tecnológico.

4 Enlaces de satélite

En este punto se tratan los parámetros del enlace óptico que se utilizan en diversas aplicaciones típicas y se dan los valores representativos de dichos parámetros. Estos enlaces representan tanto las fuentes como los receptores potenciales de interferencia. Las características técnicas de los transmisores y receptores utilizados en los enlaces Tierra-espacio y en los enlaces entre satélites que funcionan en frecuencias superiores a 20 THz varían según los requisitos de datos y los parámetros orbitales.

4.1 Enlaces entre satélites

Los enlaces OSG/OSG son relativamente estables cuando los dos satélites se mueven lentamente uno respecto al otro en distancia y acimut. Esto se debe al hecho básico de que siguen siendo relativamente estacionarios sobre una ubicación en la superficie de la Tierra y de que tienen ángulos de puntería en acimut y de elevación pequeños para la comunicación. Los requisitos de adquisición

y de seguimiento siguen siendo los mismos que los de los enlaces OSG/no OSG porque la incertidumbre de la puntería previa a la adquisición se fija principalmente mediante el conocimiento de la actitud del vehículo espacial en balanceo, cabeceo y guiñada.

La clase de terminales ópticos OSG/no OSG se trata aquí debido a su semejanza a los terminales OSG/OSG. Ambas clases de terminales son similares en cuanto a tamaño de la antena óptica, que es el elemento principal que efectúa a la masa de terminal óptico y ambos tienen distancias similares de enlace ($\geq 40\,000$ km). La diferencia principal entre los enlaces OSG/OSG y los OSG/no OSG radica en los requisitos en cuanto a velocidad angular del cardán de la antena. Los enlaces OSG/no OSG no sólo tienen una mayor gama angular con la que ha de funcionar el cardán, sino que ello lleva aparejado un aumento de la velocidad angular y la aceleración. El Cuadro 2 ofrece un ejemplo de los parámetros de sistemas típicos OSG/OSG y OSG/no OSG. El sistema OSG/no OSG está basado en el enlace entre el vehículo espacial SPOT4 y el ARTEMIS.

CUADRO 2

Enlaces OSG/OSG y OSG/no OSG

Parámetros		OSG/OSG	OSG/no OSG
Distancia (km)		40 000-80 000	
Frecuencia (THz)		200, 283, 311, 353	
Longitud de onda (μm)		{1,50, 1,060, 0,965, 0,850}	
Terminal N.º 1	Energía (mW)	500-1 500	
	Abertura (cm)	20-30	
	Gama angular del cardán ⁽¹⁾ (grados)	± 2 de azimut; 0 a -60 de elevación	± 20 de azimut; ± 20 de elevación
	Velocidad angular ⁽²⁾ ($\mu\text{rad/s}$)	No aplicable	200 de azimut; 200 de elevación
	Campo ciego ⁽³⁾ (mrad)	$8,0 \times 8,0$	
	Divergencia – Adquisición (μrad)	130	
	Divergencia – Comunicación (μrad)	10	
Terminal N.º 2	Abertura (cm)	20-30	10-15
	Gama angular del cardán (grados)	± 2 de azimut; 0 a -60 de elevación	± 175 de azimut; ± 140 de elevación
	Campo ciego (mrad)	$8,0 \times 8,0$	
	Divergencia – Adquisición (μrad)	130	
	Divergencia – Comunicación (μrad)	10	

(1) Gama angular del cardán: Ángulos en los que se puede mover la antena óptica.

(2) Velocidad angular: Velocidad máxima de cambio de la puntería de la antena óptica.

(3) Campo ciego: Región angular de incertidumbre del nodo opuesto al inicio de la adquisición.

Existen diversos terminales comerciales para enlaces OSG/OSG y OSG/no OSG. Hasta la fecha, se han construido terminales para las demostraciones de las tecnologías de telecomunicación ópticas espaciales existentes.

En el Cuadro 3 se dan valores genéricos para un enlace de telecomunicación óptica clásico no OSG/no OSG entre dos satélites situados en órbitas circulares adyacentes.

CUADRO 3

Enlaces no OSG/no OSG

Parámetros		no OSG/no OSG
Distancia (km)		1 000-7 000
Frecuencia (THz)		200, 283, 311, 353
Longitud de onda (μm)		{1,50, 1,060, 0,965, 0,850}
Terminal N.º 1	Energía (mW)	1 000
	Abertura (cm)	4-15
	Gama angular del cardán (grados)	± 90 de azimut; ± 5 de elevación
	Campo ciego (mrad)	$5,5 \times 5,5$
	Divergencia – Adquisición (μrad)	160
	Divergencia – Comunicación (μrad)	16
Terminal N.º 2	Abertura (cm)	4-15
	Gama angular del cardán (grados)	± 90 de azimut; ± 5 de elevación
	Campo ciego (mrad)	$5,5 \times 5,5$
	Divergencia – Adquisición (μrad)	700
	Divergencia – Comunicación (μrad)	16

4.2 Enlaces Tierra-espacio

Los enlaces OSG/terreno son relativamente estables cuando el satélite y la estación terrena se mueven lentamente uno respecto al otro en distancia y acimut. El satélite sigue siendo relativamente estacionario sobre una ubicación en la superficie de la Tierra y para un enlace determinado tiene una gama pequeña de ángulos de puntería en acimut y en elevación. Los requisitos de adquisición y de seguimiento siguen siendo los mismos que los de los enlaces OSG/OSG porque la incertidumbre de la puntería previa a la adquisición se fija principalmente mediante el conocimiento de la actitud del vehículo espacial en balanceo, cabeceo y guiñada.

No tiene mucho interés utilizar enlaces ópticos para comunicaciones no OSG/terreno con las actuales configuraciones de los sistemas espaciales. Es difícil mantener un enlace de comunicaciones ópticas con una estación terrena que funcione con un ángulo de elevación menor de 40° E debido a los efectos atmosféricos que aparecen con ángulos menores. Por lo tanto, el arco orbital y tiempo durante el cual el satélite está visible desde una estación terrena están fuertemente limitados.

CUADRO 4

Enlaces OSG/terreno

Parámetros		OSG/terreno
Distancia (km)		35 000-40 000
Frecuencia (THz)		200, 283, 311, 353
Longitud de onda (μm)		{1,50, 1,060, 0,965, 0,850}
Terminal N.º 1	Energía (mW)	500-1 500
	Abertura (cm)	20-30
	Gama angular giroscópica de la estación terrena (grados)	±90 de azimut; 40 a 90 de elevación
	Gama angular giroscópica de la estación de satélite (grados)	±180 de azimut; -80 a -90 de elevación
	Campo ciego (mrad)	8 × 8
	Divergencia – Adquisición (μrad)	130
	Divergencia – Comunicación (μrad)	10

5 Relación señal/ruido (SNR)

Al igual que en la mayoría de los enlaces de telecomunicación, la calidad de funcionamiento de los enlaces ópticos depende en gran medida de que la relación SNR en el receptor sea grande. En general:

$$SNR = \frac{P_r}{N_t} \tag{1}$$

donde:

P_r : potencia del receptor (W)

N_t : potencia de ruido procedente de todas las fuentes (W).

Las ecuaciones básicas que describen el comportamiento de un enlace óptico o de un enlace a través de la atmósfera puede simplificarse mediante las siguientes hipótesis básicas:

- Las antenas de transmisión y recepción óptica no tienen ninguna obstrucción central.
- Las formas de onda transmitidas son gaussianas y están truncadas en los puntos $1/e^2$.
- Las ondas recibidas son ondas planas.
- Los discos Airy están truncados al primer valor nulo del modelo de discos Airy.

5.1 Señal

La potencia de la señal recibida está relacionada con la potencia de salida del láser transmisor y con los demás parámetros del enlace por la siguiente ecuación de alcance, la cual es muy similar a la ecuación de microondas convencional.

$$P_S = P_t G_t G_r T_t T_r T_a L_S \tag{2}$$

donde:

P_S : potencia de la señal en el receptor (W)

P_t : potencia media a la salida del láser (el valor típico es 1 W)

G_t : ganancia de la antena del transmisor (el valor típico es 10^{11})

G_r : ganancia de la antena del receptor (el valor típico es 10^{11})

T_t : pérdidas en el transmisor (el valor típico es 0,5) que comprende los efectos de absorción, dispersión, o pérdidas por reflexión en los trenes ópticos del transmisor

T_r : pérdidas en el receptor (el valor típico es 0,5) que comprende los efectos de absorción, dispersión, o pérdidas por reflexión en los trenes ópticos del receptor

T_a : pérdidas atmosféricas (el valor típico es de hasta 0,03) en los enlaces espacio-terreno o terreno-espacio. Para un enlace espacio-espacio T_a se supone igual a 0 dB. El cálculo de T_a se explica más adelante en el § 8

L_S : pérdidas en el espacio libre.

Las formas clásicas de las ecuaciones de la ganancia de la antena del transmisor y del receptor son:

$$G = \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 = \left(\frac{\pi D f}{c} \right)^2 \quad (3)$$

donde:

D : diámetro no obstruido de la apertura primaria de la antena (m)

λ : longitud de onda (m)

f : frecuencia (Hz)

c : velocidad de la luz (m/s).

Las pérdidas en el espacio libre o pérdidas por canal, L_S , vienen dadas por la expresión:

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

donde:

R : distancia entre los terminales (m).

En los Cuadros 5 y 6, se presentan tres enlaces diferentes y se dan los valores representativos para los parámetros del enlace. Los Cuadros se obtuvieron utilizando la ecuación simplificada del enlace descrita anteriormente en este Anexo.

CUADRO 5

Parámetros típicos de balances de enlaces no OSG/no OSG y OSG/OSG

Parámetros del enlace	no OSG/no OSG		OSG/OSG	
	P_t	1,0 W media 2,29 W cresta	33,6 dBm	1,0 W media 2,29 W cresta
G_t	10 cm (diámetro)	110 dB	30 cm (diámetro)	119,5 dB
G_r	10 cm (diámetro)	110 dB	30 cm (diámetro)	119,5 dB
T_t	0,5	-3,0 dB	0,5	-3,0 dB
T_r	0,5	-3,0 dB	0,5	-3,0 dB
T_a	No aplicable	0,0 dB	No aplicable	0,0 dB
L_s	7 000 km	-278 dB	40 000 km	-294 dB
P_s	0,912 μ W $4,6 \times 10^{12}$ P/s	-30,4 dBm	1,81 μ W $9,1 \times 10^{12}$ P/s	-27,4 dBm

Frecuencia = 283 THz

(Longitud de onda = 1,06 μ m)

P/s: fotones por segundo

CUADRO 6

Parámetros típicos de balances de enlaces OSG/terreno y OSG/no OSG

Parámetros del enlace	OSG/terreno		OSG/no OSG	
	P_t	1,0 W media 2,29 W cresta	33,6 dBm	1,0 W media 2,29 W cresta
G_t	10 cm (diámetro)	110 dB	30 cm (diámetro)	119,5 dB
G_r	100 cm (diámetro)	130 dB	30 cm (diámetro)	119,5 dB
T_t	0,5	-3,0 dB	0,5	-3,0 dB
T_r	0,5	-3,0 dB	0,5	-3,0 dB
T_a	0,03 (peor caso)	-15 dB	No aplicable	0,0 dB
L_s	36 300 km	-293 dB	40 000 km	-294 dB
P_s	0,091 μ W $4,6 \times 10^{11}$ P/s	-40,4 dBm	1,81 μ W $9,1 \times 10^{12}$ P/s	-27,4 dBm

Frecuencia = 283 THz

(Longitud de onda = 1,06 μ m)

Con los grandes adelantos en estrellas de guía artificial láser y en tecnología de óptica adaptable, se puede suponer casi con seguridad que las pérdidas atmosféricas en el ejemplo de enlace espacio-terreno del Cuadro 6 podrían mejorarse en al menos 10 dB.

5.2 Ruido

La calidad de funcionamiento de los enlaces de telecomunicación óptica depende directamente del logro de una buena relación SNR en el receptor. Cuanto mayor sea la SNR, menor será la proporción de bits erróneos. Los detectores primarios preferidos para las comunicaciones ópticas son los dispositivos de estado sólido, tales como los APD y los diodos *Pin*. La mayoría de las aplicaciones actuales utilizan un receptor de detección directa con un APD que tiene ganancia interna. Algunas de las aplicaciones más recientes utilizan diodos *Pin*, que son más fáciles de utilizar y de fabricar que los APD, aunque tienen poca ganancia. Estos diodos se utilizan generalmente en los sistemas de detección heterodinos y homodinos.

A continuación se desarrolla la relación SNR para el APD que se utiliza corrientemente en la detección directa. Se aplica al caso donde hay la señal suficiente limitada en cuanto al ruido de fotones y que puede hacerse caso omiso de las demás fuentes de ruido, tales como el ruido del amplificador y las iluminaciones de fondo. Para un detector seguido de un filtro pasabajo con un ancho de banda B , la corriente total a la salida del detector viene dada por la expresión:

$$i = i_S + i_N \quad (5)$$

La corriente de la señal, i_S , se define como:

$$i_S = \frac{\eta e P_S}{h f} \quad (6)$$

e i_N la corriente de ruido de granalla cuya media es cero y cuyo valor cuadrático medio es:

$$\sigma_N^2 = \langle i_N^2 \rangle = 2e B i_S = \frac{2\eta e^2 B P_S}{h f} \quad (7)$$

siendo:

η : eficiencia cuántica del detector (típicamente de 0,7 a 1)

e : carga del electrón ($1,602 \times 10^{-19}$ C)

h : constante de Planck ($6,63 \times 10^{-34}$ J/s)

f : frecuencia óptica (Hz)

P_S : potencia de la señal recibida (W)

B : anchura de banda del filtro (Hz).

Obsérvese que la potencia de ruido varía directamente con la potencia de la señal, P_S .

Por tanto, en ausencia de efectos atmosféricos, la SNR de salida es:

$$SNR = \frac{i_S}{\sigma_N} = \sqrt{\frac{\eta P_S}{2h f B}} \quad (8a)$$

o en forma de potencia:

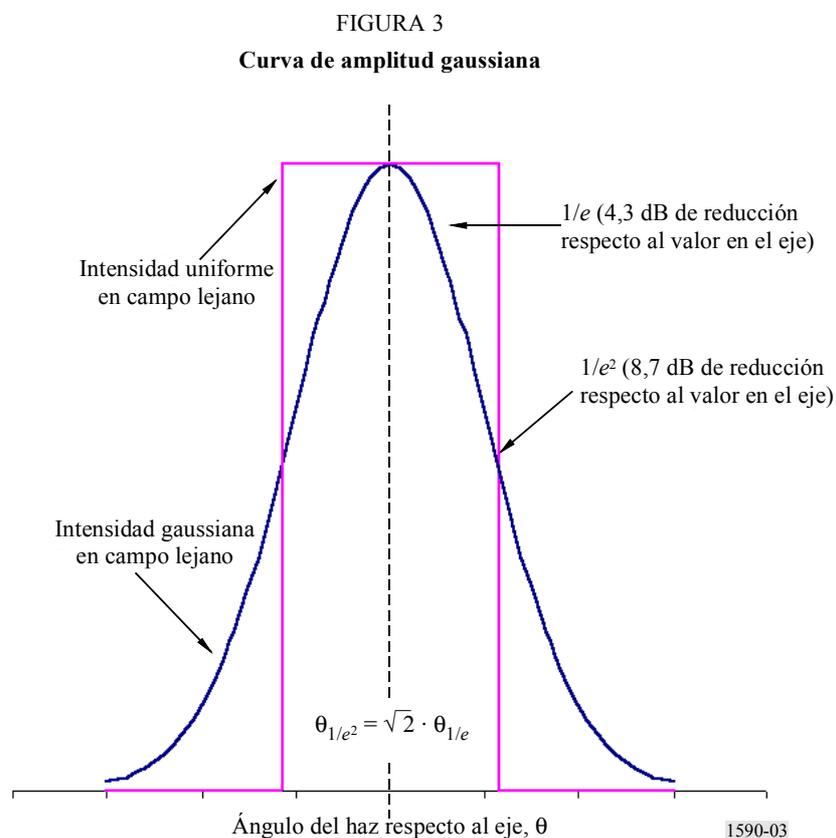
$$SNR = \frac{\eta P_S}{2h f B} \quad (8b)$$

6 Consideraciones sobre las antenas

Los sistemas de telecomunicación láser en el espacio libre utilizan los telescopios convencionales como antenas transmisoras y receptoras. Normalmente estos telescopios son del tipo Cassegrain clásico, pero con el advenimiento de la tecnología moderna de fabricación de telescopios y el enorme aumento de la potencia óptica disponible, los diseños actuales utilizan principalmente elementos reflectantes o diseños de telescopio desplazado respecto al eje para eliminar los enmascaramientos y la reducción resultante de la ganancia en el eje. Los diagramas de antena transmisora y receptora son distintos, ya que la óptica del transmisor se alimenta generalmente con un láser de haz gaussiano mientras que la óptica del receptor tiene un detector plano.

6.1 Antenas del transmisor

El transmisor utiliza un telescopio alimentado por un láser. Este tipo de láseres funciona normalmente sólo en el modo más bajo de cavidad, TEM₀₀, el cual da lugar a un haz que tiene una distribución gaussiana de la energía con una intensidad máxima a lo largo de sus ejes de transmisión. El modelo del haz se configura de tal manera que, como la amplitud de la intensidad del haz cae con la separación angular respecto al eje de transmisión, sólo se desperdicia un pequeño porcentaje del haz de energía. Dos puntos de la referencia son los puntos en los cuales la amplitud del haz cae a un 37% o un 13% de la amplitud en los ejes. Estos puntos se denominan respectivamente $1/e$ y $1/e^2$, a los que frecuentemente se hace referencia en la caracterización de los diagramas de emisión de energía láser. La Fig. 3 muestra un ejemplo de este diagrama de haz.



El ancho del haz en el punto $1/e^2$ viene dado por la expresión:

$$\theta_{1/e^2} = \frac{2,44 \lambda}{D} \quad (9)$$

donde:

θ_{1/e^2} : ancho del haz (radianes).

Los anchos de haz típicos son del orden de 1×10^{-5} rad o $5,7 \times 10^{-4}$ grados.

Para el terminal de transmisión, pueden utilizarse las siguientes ecuaciones en el cálculo del diagrama de radiación en campo lejano de un rayo láser con onda plana de amplitud gaussiana que alimenta un telescopio con las siguientes hipótesis básicas:

- la fuente láser se caracteriza por una emisión gaussiana monomodo; y
- los diagramas de ganancia de la antena se miden en el campo lejano.

La ganancia de un telescopio de radio « a » alimentado con una onda plana de amplitud gaussiana que tiene un radio de sección « ω », donde « ω » es la distancia respecto al eje central del sistema óptico al punto de intensidad $1/e^2$, y que tiene un enmascaramiento central de radio « b », viene dada por la ecuación (10). El término, G_0 , es el límite superior en la ganancia de la antena que se obtiene para una apertura circular sin enmascaramiento uniformemente iluminada. El segundo término, $g_t(\alpha, \gamma, X)$, es un término de eficacia de la ganancia que representa el enmascaramiento, el truncamiento, la intensidad fuera del eje y los efectos de desenfoque.

$$g_t(\alpha, \gamma, X) = G_0 \cdot g_t(\alpha, \gamma, X) \quad (10)$$

donde:

$$G_0 = \frac{4\pi A}{\lambda^2} = \left(\frac{2\pi a}{\lambda}\right)^2 \quad (11)$$

$$g_t(\alpha, \gamma, X) = 2 \alpha^2 \left| \int_{\gamma^2}^1 J_0(X\sqrt{u}) e^{-\alpha^2 u} du \right|^2 \quad (12)$$

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

a : radio de la apertura del telescopio (m)

λ : longitud de onda (m)

J_0 : función Bessel de primera clase de orden cero

α : relación, a/ω , entre el radio de la apertura del transmisor, a , y el radio de la sección del haz de alimentación gaussiano, ω , en el punto $1/e^2$

γ : relación, b/a , entre el radio del enmascaramiento central, b , y el radio de la apertura del transmisor, a

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).

Sobre el eje, $X = 0$ y el término de eficacia de la ganancia en la ecuación (12) se convierte en:

$$g_t(\alpha, \gamma, 0) = \left[\frac{2}{\alpha^2} \left[e^{-\alpha^2} - e^{-\gamma^2 \alpha^2} \right]^2 \right] \quad (13)$$

Por tanto, de la ecuación (10), la ganancia máxima del haz principal en el eje resulta:

$$G_t(\alpha, \gamma, 0) = \frac{4\pi A}{\lambda^2} \cdot \left[\frac{2}{\alpha^2} \left[e^{-\alpha^2} - e^{-\gamma^2 \alpha^2} \right]^2 \right] \quad (14)$$

Todo enmascaramiento reducirá la ganancia del haz principal, rellenará los nulos, ensanchará el ancho del haz y aumentará los lóbulos laterales.

6.1.1 Ejemplo

Por ejemplo, la calidad de funcionamiento de una antena óptica con un diámetro de apertura de 15 cm, funcionando a una frecuencia de 282,8 THz (longitud de onda de 1,06 μm) y sin enmascaramiento central es:

$$\lambda = 1,06 \mu\text{m}$$

$$a = 0,075 \text{ m}$$

$$b = 0$$

luego:

$$\gamma = \frac{b}{a} = 0$$

El término de eficacia de la ganancia para el caso del eje se convierte por tanto en:

$$g_t(\alpha, 0, 0) = \left[\frac{2}{\alpha^2} \left[e^{-\alpha^2} - 1 \right]^2 \right] \quad (15)$$

Se ha demostrado que para una calidad de funcionamiento óptimo cuando hay enmascaramiento, la relación entre el haz de alimentación, α , y γ debe guardar la relación de la ecuación (16), que para $\gamma \leq 0,4$ es, con una precisión de $\pm 1\%$:

$$\alpha = 1,12 - 1,30 \gamma^2 + 2,12 \gamma^4 \quad (16)$$

Para el presente caso, sin enmascaramiento, $\gamma = 0$, la ecuación se reduce a $\alpha = 1,12$. Por tanto el término de eficacia de la ganancia se convierte en:

$$g_t(1,12, 0, 0) = 0,8145 \quad (17)$$

El límite superior de la ganancia en el eje para esta apertura circular sin enmascaramiento, uniformemente iluminada, de radio 15 cm es:

$$G_0 = \frac{4\pi A}{\lambda^2} = \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \right)^2 = 1,976 \times 10^{11} \quad (18)$$

La ganancia máxima en el eje es, utilizando la ecuación (10):

$$G_t(1,12, 0, 0) = 1,61 \times 10^{11} \quad (19)$$

El diagrama de radiación en el eje (dB) para este caso se convierte, usando la ecuación (10), en:

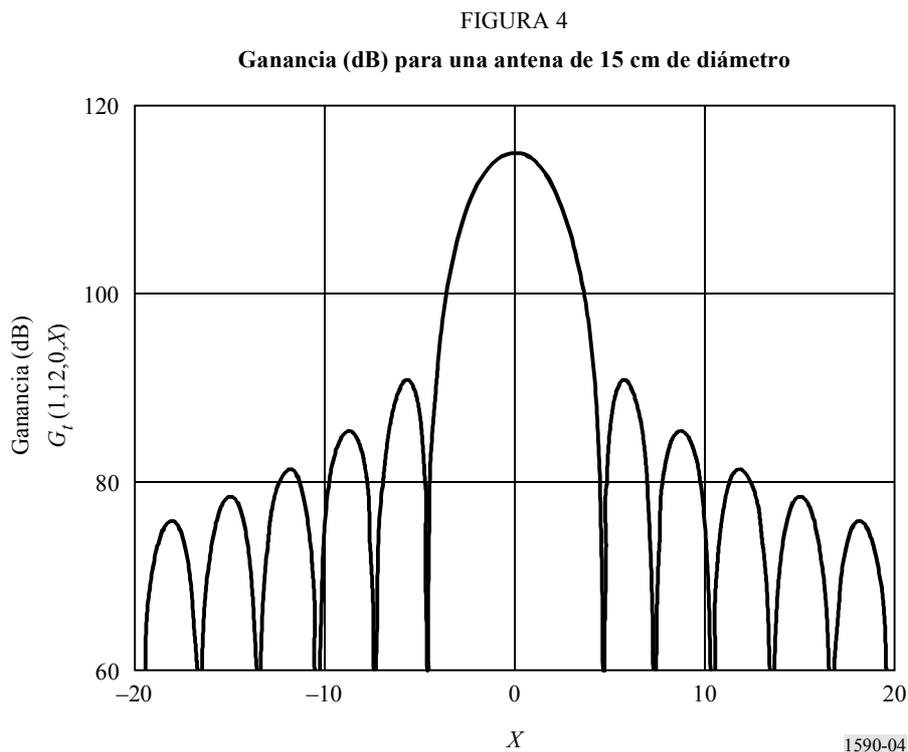
$$G_t(1,12,0,X) = 10 \log [G_0 \cdot g_t(1,12,0,X)] \quad (20)$$

donde:

$$g_t(1,12,0,X) = 2\alpha^2 \cdot \left| \int_0^1 J_0(X\sqrt{u}) \cdot e^{-\alpha^2 u} du \right|^2 \quad (21)$$

con:

$$X = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \cdot a \cdot \text{sen}(\theta) \quad (22)$$



Para el caso anterior, el primer nulo ocurre alrededor de $X = 4,7$ donde $\theta = 10,6 \mu\text{rad}$ o $0,0006^\circ$. El primer lóbulo lateral ocurre alrededor de $X = 5,6$ donde $\theta = 12,6 \mu\text{rad}$ o $0,0007^\circ$ y está a unos 27 dB por debajo de la ganancia del haz principal.

6.2 Antena del receptor

Suponiendo que la apertura del receptor está en el campo lejano de la antena transmisora, se puede considerar que normalmente la energía recibida es la de una onda plana. En el sistema de recepción se puede utilizar una apertura común o separada del sistema de transmisión. El ancho del haz de la apertura receptora también se mide normalmente en términos del punto $1/e^2$.

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

$$G_R = 10 \log \left(\frac{4\pi A}{\lambda^2} \right) + 10 \log (1 - \gamma^2) + \delta \quad (24)$$

donde:

A : área del espejo primario (m^2)

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

y

$$\gamma = \frac{b}{a} \quad (25)$$

donde:

a : radio del espejo primario (m)

b : radio del espejo secundario (m).

La ganancia calculada en la ecuación (24) representa la cantidad de energía que incide en el detector. En la expresión de G_R se supone que la antena de recepción está ubicada en el campo lejano del transmisor y que la apertura y el detector son redondos. El primer término de la ecuación (24) es la ganancia clásica de una antena ideal no enmascarada de área A . El segundo término representa las pérdidas debidas al enmascaramiento introducido por el espejo secundario de un sistema Cassegrain. En los sistemas sin espejos secundarios, el valor de b en la ecuación (25) es igual a cero y se puede hacer caso omiso del segundo término de la ecuación (24). El tercer término, δ , de esta misma ecuación (24) representa las pérdidas (dB) debidas al desbordamiento de la energía de la señal más allá del borde del detector.

En los sistemas de detección directa, el valor de δ se reduce al aumentar 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. En los sistemas heterodinos y homodinos, δ es función de la distribución de la energía del oscilador local a través del detector. El detector puede recibir iluminación gaussiana o uniforme. En la iluminación gaussiana y uniforme, el valor de δ , puede expresarse muy aproximadamente mediante las ecuaciones (26a) y (26b), respectivamente:

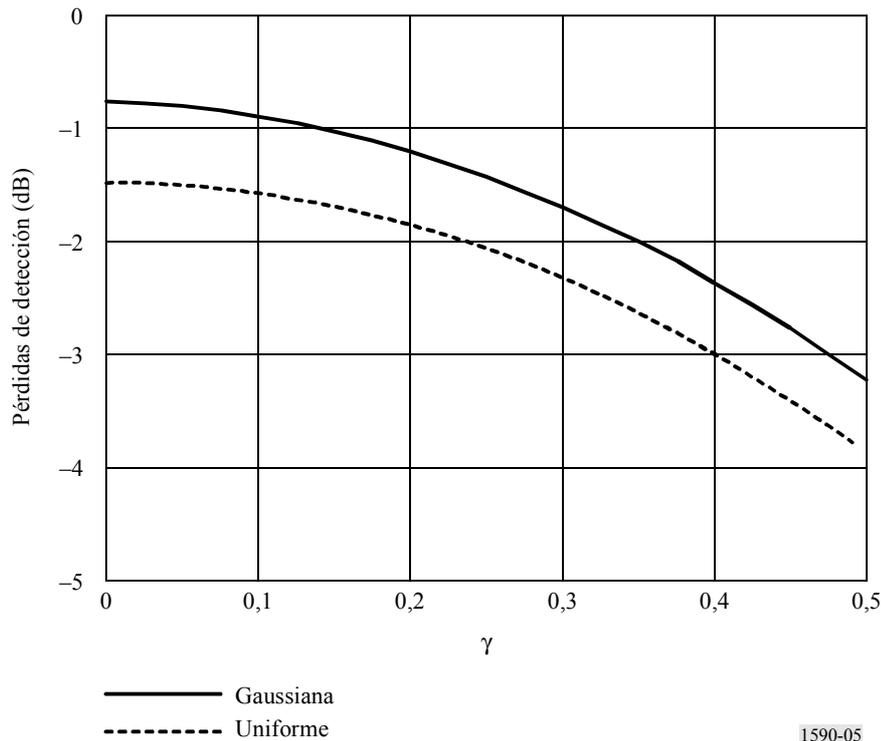
$$\delta = -8,9114\gamma^2 - 0,452\gamma - 0,7621 \quad (26a)$$

$$\delta = -9,5836\gamma^2 + 0,1113\gamma - 1,4937 \quad (26b)$$

La iluminación gaussiana da lugar a pérdidas en los detectores algo más pequeñas. Para el caso de la iluminación uniforme, el valor de δ es algo mayor, normalmente de $\sim 0,6-0,7$ dB. La Fig. 5 representa los efectos de pérdidas por detección, según las ecuaciones (26a) y (26b).

FIGURA 5

Pérdidas de detección heterodinas y homodinas en función de la relación de enmascaramiento, γ



6.2.1 Campo de visión

El tamaño del campo de visión está relacionado con el tamaño físico del detector y con la longitud focal del telescopio. Se puede calcular mediante la ecuación:

$$\varphi = \frac{d}{F} \quad (27)$$

donde:

φ : campo de visión (rad)

d : diámetro del detector (m)

F : longitud focal del telescopio (m).

El valor de φ dado en (27) se refiere al ancho angular del punto $1/e$.

6.2.2 Consideraciones de la situación fuera del eje

El diagrama de la antena de recepción se adapta normalmente al detector. El detector se aísla de la energía no deseada mediante la utilización de pantallas de campo y se expone sólo a la parte del haz principal comprendida dentro de un ángulo φ respecto a los ejes del haz principal. Por consiguiente, la energía no deseada recibida en los lóbulos laterales del diagrama de la antena de recepción no llega al detector y no es necesario tenerla en cuenta en los análisis de interferencia.

6.2.3 Ejemplos

Supóngase una estación terrena que funciona con un detector heterodino uniformemente iluminado y con las siguientes características físicas:

$$f = 353 \text{ THz}$$

$$\lambda = 0,85 \text{ } \mu\text{m}$$

$$a = 0,50 \text{ m}$$

$$b = 0,15 \text{ m}$$

luego:

$$A = \pi(0,5^2) = 0,7854 \quad \text{m}^2$$

$$\gamma = \frac{0,15}{0,50} = 0,3$$

$$\delta = -9,5836(0,3^2) + 0,1113(0,3) - 1,4937 = -2,3$$

$$G_R = 10 \log \left(4\pi \frac{0,7854}{(0,85 \times 10^{-6})^2} \right) + 10 \log (1 - 0,3^2) + (-2,3) = 131,4 - 0,4 - 2,3 = 128,7 \quad \text{dB}$$

Para una antena receptora embarcable a bordo de una nave que utiliza un sistema de detección directa con las siguientes características físicas:

$$a: \quad 0,075 \text{ m, y}$$

$$b: \quad 0,0 \text{ m (sin espejo secundario)}$$

luego:

$$A = 0,018 \text{ m}^2$$

$$\gamma = 0, \text{ y}$$

$$\delta = -0,5 \text{ dB}$$

para

$$f: \quad 200, 283, 311, \text{ y } 353 \text{ THz}$$

$$G_R = 109,5, 112,5, 113,4 \text{ y } 114,5 \text{ dB respectivamente.}$$

7 Índice de reflexión

Cada satélite que utiliza un enlace óptico para las telecomunicaciones se ilumina con un haz láser y refleja una parte de la energía incidente. En casi todos los enlaces ópticos hay un enlace de retorno que facilita la realimentación necesaria para corregir la puntería óptica. Es decir, los dos enlaces funcionan como una red de control en bucle cerrado para mantener la alineación óptica. Por lo tanto, cada transmisor óptico se ilumina con un haz de retorno, lo que puede traducirse en fuertes reflejos. Se sabe que las placas solares grandes son muy reflectantes y que pueden causar fuertes reflejos durante periodos excepcionales y breves, cuando haya la alineación adecuada con un observador. Además, muchos de los satélites están cubiertos con una envoltura térmica reflectante. Estas cubiertas se arrugan generalmente y tienen muchas facetas pequeñas con índice de reflexión significativo. Ello puede causar reflejos intensos, aunque concentrados en un haz muy estrecho.

A continuación se muestran los valores típicos del índice de reflexión de algunos de los materiales utilizados actualmente para las cubiertas térmicas. Estos valores dependen de la frecuencia, especialmente para los semiconductores y los metales.

Kapton negro	6% (-12 dB)
Mylar aluminizado	86% (-0,7 dB)
Germanio	50% (-3 dB)
Kapton «de oro»	62% (-2,1 dB)

8 Propagación

La Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones está estudiando la propagación atmosférica en esta región del espectro mediante la Cuestión 228/3 – Datos de propagación requeridos para la planificación de los sistemas de radiocomunicaciones espaciales y sistemas del servicio científico espacial que funcionan por encima de 275 GHz.

9 Ubicación de la estación terrena

La atmósfera influye considerablemente en la calidad de funcionamiento de las estaciones terrenas que funcionan en frecuencias superiores a los 30 THz, tanto por su atenuación como por su turbulencia. Las ubicaciones óptimas para la estación terrena son normalmente las de grandes altitudes, generalmente de al menos 2 km sobre el nivel del mar. La gran altitud es esencial para evitar gran parte de la turbulencia asociada con el nivel del límite atmosférico. Además, se recomiendan ubicaciones no muy húmedas, ya que la humedad puede dar lugar a fenómenos significativos de absorción y dispersión atmosféricas.
