

RECOMENDACIÓN UIT-R P.1814*

Métodos de predicción necesarios para diseñar enlaces ópticos terrenales en espacio libre

(Cuestión UIT-R 228/3)

(2007)

Cometido

En esta Recomendación se describen métodos de predicción de la propagación adecuados para la planificación de sistemas ópticos terrenales en espacio libre. Se incluyen métodos para calcular la atenuación en aire despejado, niebla y con precipitaciones de lluvia o nieve. Abarca además centelleo y degradaciones producidos por la luz solar.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que se dispone del espectro óptico visible y del espectro infrarrojo para las radiocomunicaciones en los entornos terrestres;
- b) que para la adecuada planificación de los sistemas de radiocomunicaciones ópticas en el espacio libre (FSO, *free-space optical*) que funcionan en el espectro óptico visible y el espectro infrarrojo, es indispensable disponer de los datos de propagación pertinentes;
- c) que se han elaborado métodos de cálculo de los parámetros de propagación más importantes necesarios para la planificación de los sistemas ópticos en el espacio libre que funcionan en el espectro óptico visible y el espectro infrarrojo;
- d) que estos métodos se han contrastado con datos disponibles y han demostrado tener una precisión compatible con la variabilidad natural de los fenómenos de propagación, y adecuada para la mayoría de las aplicaciones actuales en la planificación de los sistemas que funcionan en el espectro óptico visible y el espectro infrarrojo,

reconociendo

- a) que en el número 78 del artículo 12 de la Constitución de la UIT se establece que una de las funciones del Sector de Radiocomunicaciones incluye, «... realizar estudios sin limitación de gamas de frecuencias y adoptar Recomendaciones ...»,

recomienda

- 1 que en la planificación de los sistemas ópticos en el espacio libre se utilicen los métodos de predicción de los parámetros de propagación que figuran en el Anexo 1, de acuerdo con los correspondientes límites de validez allí indicados.

NOTA 1 – En la Recomendación UIT-R P.1817 – Datos de propagación necesarios para diseñar enlaces ópticos terrenales en espacio libre, figura información complementaria sobre los métodos de predicción de la propagación en el espectro óptico visible y el espectro infrarrojo.

* Esta Recomendación debe señalarse a la atención de las Comisiones de Estudio 1 y 9 de Radiocomunicaciones.

Anexo 1

1 Introducción

Durante el diseño de los enlaces FSO es indispensable considerar diversos efectos, entre otros, las pérdidas provocadas por absorción atmosférica, la dispersión y la turbulencia, el medio ambiente en los microclimas y los efectos locales, la distancia y el desalineamiento del enlace. Además, se debe tener en cuenta la selección de la longitud de onda, la velocidad de transmisión de los datos, las cuestiones relativas a la seguridad de los ojos y la radiación solar ambiente.

El funcionamiento del sistema FSO exige la condición de visibilidad directa (LoS, *line-of-sight*). Cuando se realizan pruebas de LoS, como los sistemas FSO utilizan expansión de haz y un haz de rayos paralelos luminosos, el despejamiento necesario entre el centro del haz y cualquier obstáculo es esencialmente igual al radio del haz. En el caso de los sistemas de radiofrecuencia (RF) la situación es diferente, ya que se requiere el despejamiento de la zona de Fresnel.

El inconveniente principal de los sistemas FSO es su vulnerabilidad a los efectos atmosféricos, tales como la atenuación y el centelleo, que pueden reducir la disponibilidad del enlace. La utilización de un haz estrecho hace que el alineamiento del terminal de comunicaciones láser sea una etapa más crítica de lo que es habitual en los sistemas de RF.

La consideración del balance de potencia supone un parámetro esencial para diseñar los enlaces FSO. El margen del enlace, M_{enlace} (dB), que representa la potencia disponible por encima de la sensibilidad del receptor, está dado por la ecuación (1):

$$M_{enlace} = P_e - S_r - A_{geo} - A_{atmo} - A_{centelleo} - A_{sistema} \quad (1)$$

siendo:

- P_e (dBm): potencia total del transmisor
- S_r (dBm): sensibilidad del receptor que depende también de la anchura de banda (velocidad de transmisión de datos)
- A_{geo} (dB): atenuación geométrica del enlace provocada por la dispersión del haz de transmisión que se produce al aumentar el alcance
- A_{atmo} (dB): atenuación atmosférica debida a la absorción y la dispersión
- $A_{centelleo}$ (dB): atenuación provocada por las turbulencias atmosféricas
- $A_{sistema}$ (dB): representa las demás pérdidas dependientes del sistema, entre otras, el desalineamiento de la dirección del haz, las pérdidas ópticas del receptor, las pérdidas por fluctuación lenta del haz, la reducción de la sensibilidad debida a la luz ambiente (radiación solar), etc.

En los siguientes puntos se expone la definición y el cálculo de estos términos, así como las consideraciones iniciales para planificar un enlace FSO.

2 Consideraciones iniciales en el diseño de un enlace FSO

La elección de un emplazamiento adecuado para el enlace supone una cuestión importante a la hora de lograr el funcionamiento satisfactorio de un sistema FSO. En la instalación de enlaces FSO es necesario tener en cuenta las condiciones meteorológicas predominantes, los obstáculos físicos y los

tipos de superficie en el trayecto, así como las disposiciones de montaje del transceptor a fin de asegurar una calidad de funcionamiento óptima del enlace.

2.1 Condiciones meteorológicas

- Las condiciones meteorológicas, y en particular el clima local, en las proximidades inmediatas del trayecto del enlace seleccionado influirán en las repercusiones de la nieve, la lluvia, la niebla y la llovizna, la neblina, los aerosoles, el polvo y la arena que propiciarán la absorción y dispersión de la señal transmitida.

2.2 Características del trayecto

- Es evidente que se deben evitar los obstáculos físicos en el trayecto entre transmisor y receptor. Cabe señalar que los árboles maduros pueden aumentar su altura entre 0,5 y 1 m por año y variar la densidad de su follaje en función de la temporada.
- En el caso de enlaces entre edificios deben tenerse en cuenta los vientos ascendentes o térmicos que producen aire caliente a lo largo del trayecto. La turbulencia resultante puede provocar un centelleo significativo en el receptor.
- La topografía y el tipo de superficie por debajo del trayecto de visibilidad directa del FSO pueden repercutir considerablemente en la calidad de funcionamiento del enlace. Los enlaces FSO que atraviesan valles fluviales o zonas de mar abierto, se ven expuestos a menudo al fenómeno de la niebla. Las estructuras de los edificios por debajo del enlace pueden causar actividad térmica adicional en el aire que se encuentra por encima de ellas, lo que puede provocar un aumento del centelleo en la señal recibida.

2.3 Montaje del transceptor

- La mayoría de los sistemas FSO emplean anchos de haz estrechos, y, en consecuencia, el alineamiento preciso entre transmisor y receptor se vuelve crítico; cualquier desalineamiento puede conducir a una pérdida significativa de la señal. El montaje del telescopio debe mantenerse estable, y para lograr una calidad de funcionamiento fiable durante un determinado período de tiempo se considera esencial realizar un montaje directo en un muro sólido o en la parte superior de una columna. Debe minimizarse el movimiento resultante de un aumento térmico diferencial o de las sacudidas provocadas por el viento.

3 Atenuación geométrica

Aun en condiciones de tiempo despejado, el haz diverge y, por consiguiente, el detector recibe menos potencia de la señal. La atenuación provocada por la dispersión del haz de transmisión cuando aumenta el alcance se denomina atenuación geométrica y se expresa mediante la ecuación (2):

$$A_{geo}(\text{dB}) = 10 \log_{10} \left(\frac{S_d}{S_{captura}} \right) \quad (2)$$

siendo:

$S_{captura}$: superficie de captura del receptor (m^2)

S_d : superficie del haz de transmisión a la distancia d , que se aproxima mediante:

$$S_d = \frac{\pi}{4} (d \cdot \theta)^2$$

siendo:

θ : divergencia del haz (mrad)

d : distancia entre transmisor y receptor (km).

En los enlaces cortos puede suceder que la zona de captura sea mayor que la zona del haz. En estos casos, el valor de A_{geo} debe fijarse a cero ya que se recoge toda la energía del haz.

4 Atenuación atmosférica específica γ_{atmo} debida a la absorción y la dispersión

La atenuación atmosférica específica γ_{atmo} (dB/km) puede expresarse como una suma de dos términos:

$$\gamma_{atmo} = \gamma_{tiempo_despejado} + \gamma_{exceso} \quad (3)$$

siendo:

$\gamma_{tiempo_despejado}$: atenuación específica en condiciones de tiempo despejado (debida a la presencia de moléculas gaseosas)

γ_{exceso} : atenuación provocada por la presencia ocasional de niebla, bruma, neblina, llovizna, lluvia, nieve, granizo, etc.

La atmósfera es un medio de transmisión que varía en el tiempo y, en consecuencia, γ_{atmo} es un proceso estocástico. No obstante, con arreglo a la ecuación (1), cuando se establecen límites para la disponibilidad del sistema y sus efectos, éstos se tratan, por lo general, estadísticamente. El margen del enlace, M_{enlace} , representa la cantidad de atenuación que puede tolerar un sistema a una distancia determinada.

4.1 Atenuación específica en tiempo despejado $\gamma_{tiempo_despejado}$

La atenuación en condiciones de tiempo despejado es esencialmente la atenuación debida a la absorción provocada por moléculas gaseosas. La interacción entre los fotones y los átomos o las moléculas (N_2 , O_2 , H_2 , H_2O , CO_2 , O_3 , etc.) genera absorción atmosférica a longitudes de onda ópticas específicas, que da lugar a la absorción del fotón incidente y a una elevación de la temperatura. El coeficiente de absorción depende:

- del tipo de moléculas de gas; y
- de su concentración.

La absorción molecular es un fenómeno selectivo en cuanto a longitud de onda que ofrece ventanas de transmisión atmosférica y regiones de absorción atmosférica. Las moléculas atmosféricas importantes que se caracterizan por una gran absorción en la banda del infrarrojo (IR) son, entre otras, el agua, el CO_2 , el O_3 y el O_2 .

Como el tamaño de las moléculas gaseosas es mucho más pequeño que la longitud de onda, la atenuación por dispersión provocada por dichas moléculas es despreciable.

Normalmente, las longitudes de onda del láser se seleccionan de modo que caigan dentro de las ventanas de transmisión atmosférica, a fin de que el valor de $\gamma_{tiempo_despejado}$ sea despreciable. Por lo general, las longitudes de onda que se emplean en los sistemas FSO están próximas a 690, 780, 850 y 1 550 nm. No obstante, en comparación con emplazamientos suburbanos con escasa contaminación, las aplicaciones en zonas urbanas densas con alto contenido de aerosol podrían tener más ventajas con una longitud de onda diferente.

4.2 Atenuación en exceso específica

Se trata de la atenuación causada por la presencia ocasional de partículas de niebla, bruma, neblina, llovizna, lluvia y nieve. La aparición de estas partículas provoca una redistribución angular del flujo

incidente, conocida como dispersión, y reduce la propagación de flujo en el sentido original. Sin embargo, no hay pérdida de energía similar al caso de la absorción. El tamaño físico de las fuentes de dispersión con respecto a la longitud de onda del láser de transmisión permite determinar el tipo de dispersión. En el Cuadro 1 figuran los tres diferentes regímenes de dispersión que dependen del tamaño de la fuente de dispersión y de la relación aproximada entre la longitud de onda y el coeficiente de atenuación de la fuente de dispersión (sección transversal efectiva). El cuadro muestra, además, el tipo de fuentes de dispersión de cada régimen correspondiente a las longitudes de onda en el espectro visible e infrarrojo.

CUADRO 1

Regímenes de dispersión en función del tamaño de la fuente de dispersión r con relación a la longitud de onda del láser de transmisión λ . Además, se muestra la relación aproximada entre la longitud de onda y el coeficiente de atenuación de dicha fuente $Q(\lambda)$

	Dispersión de Rayleigh	Dispersión de Mie	Dispersión no selectiva o geométrica
	$r \ll \lambda$ $Q(\lambda) \sim \lambda^{-4}$	$r \approx \lambda$ $Q(\lambda) \sim \lambda^{-1.6}$ a $Q(\lambda) \sim \lambda^0$	$r \gg \lambda$ $Q(\lambda) \sim \lambda^0$
Tipo de fuente de dispersión	Moléculas de aire Neblina	Neblina Niebla Aerosol	Niebla Lluvia Nieve Granizo

Debido a la relación $Q(\lambda) \sim \lambda^{-4}$ del régimen de Rayleigh la contribución de la dispersión por moléculas de aire al coeficiente de atenuación total se puede considerar despreciable.

Si las partículas son mucho más grandes que la longitud de onda, la dispersión puede describirse mediante la óptica geométrica, es decir, de modo independiente de la longitud de onda del láser. Las gotas de lluvia, la nieve, el granizo, las gotitas que forman las nubes y la niebla intensa dispersarán geométricamente la luz del láser.

En el caso de partículas con un tamaño comparable a la longitud de onda del láser, podrá aplicarse la teoría de la dispersión de Mie. Las partículas de niebla y aerosol son los principales contribuyentes al proceso de dispersión de Mie.

Puede utilizarse un método analítico que permite efectuar las predicciones de la atenuación específica basándose en las secciones transversales efectivas de las partículas atmosféricas, obtenidas teóricamente, con distribuciones hipotéticas del tamaño de las partículas. No obstante, es difícil modelar y medir las distribuciones del tamaño de las partículas del aerosol o la niebla, que es un parámetro esencial para determinar sus propiedades físicas y ópticas.

4.2.1 Cálculo de la atenuación específica provocada por la niebla γ_{niebla} (dispersión de Mie)

Como a menudo no es práctico aplicar el método analítico para calcular la atenuación provocada por la dispersión de Mie, la comunidad FSO ha adoptado métodos empíricos, en los cuales el coeficiente de atenuación debida a la dispersión de Mie está relacionado con la visibilidad.

La definición técnica de *visibilidad* o gama visual es la distancia a la que la luz disminuye al 2% de la potencia original o, cualitativamente, la visibilidad es la distancia a la que es apenas posible distinguir un objeto oscuro contra el horizonte. El parámetro visibilidad puede medirse y almacenarse fácilmente en las bases de datos de las estaciones meteorológicas o los aeropuertos,

posibilitando una evaluación de la calidad de funcionamiento geo-local de estos sistemas de telecomunicaciones mediante la distribución de este parámetro. Sin embargo, puede que los datos de visibilidad recogidos en los aeropuertos no representen necesariamente las condiciones típicas que aparecen en entornos urbanos o rurales, que pueden diferir considerablemente en términos de topografía y proximidad al agua.

A continuación se presenta una fórmula empírica simplificada que ha estado siendo utilizada por la comunidad FSO para calcular la atenuación específica provocada por la niebla, $\gamma_{niebla}(\lambda)$ (dB/km):

$$\gamma_{niebla}(\lambda) = \frac{3,91}{V} \left(\frac{\lambda}{550 \text{ nm}} \right)^{-q} \quad (4)$$

siendo:

V : visibilidad (km)

λ : longitud de onda (nm)

q : coeficiente que depende de la distribución del tamaño de las partículas de la dispersión. Se determinó a partir de datos experimentales y se expresa mediante:

$$\begin{aligned} q &= 1,6 & V > 50 \text{ km} \\ &= 1,3 & 6 \text{ km} < V < 50 \text{ km} \\ &= 0,585V^{1/3} & V < 6 \text{ km} \end{aligned} \quad (5)$$

Para obtener el valor de la atenuación rebasada durante un porcentaje de tiempo determinado p (es decir, para una probabilidad dada), en la ecuación (4) se requiere el valor de la visibilidad no rebasado durante dicho porcentaje p .

4.2.2 Atenuación específica debida a la lluvia γ_{lluvia}

La atenuación por lluvia específica γ_{lluvia} (dB/km) viene dada mediante la relación:

$$\gamma_{lluvia} = k \cdot R^\alpha \quad (6)$$

En la Recomendación UIT-R P.837 figura la intensidad de lluvia $R(p)$ (mm/h) rebasada durante cualquier porcentaje del año medio, p , y en cualquier emplazamiento, y la ecuación (6) proporciona la atenuación específica rebasada durante el porcentaje de tiempo p .

Los parámetros k y α dependen de las características de la lluvia, y en el Cuadro 2 se presentan algunos valores determinados a partir de mediciones. En las Figs. 1 y 2 se representa la relación entre γ_{lluvia} y la intensidad de lluvia, R , utilizando los parámetros del Cuadro 2 para Japón.

CUADRO 2

Parámetros utilizados para calcular la atenuación específica debida a la lluvia

Emplazamiento	k	α
Japón	1,58	0,63
Francia	1,076	0,67

FIGURA 1

Atenuación atmosférica debida a la lluvia

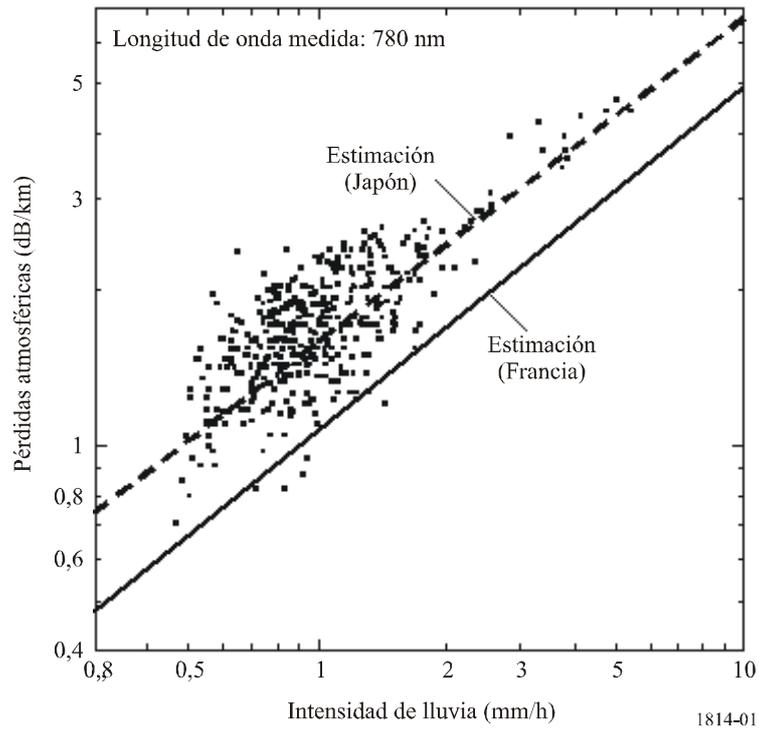
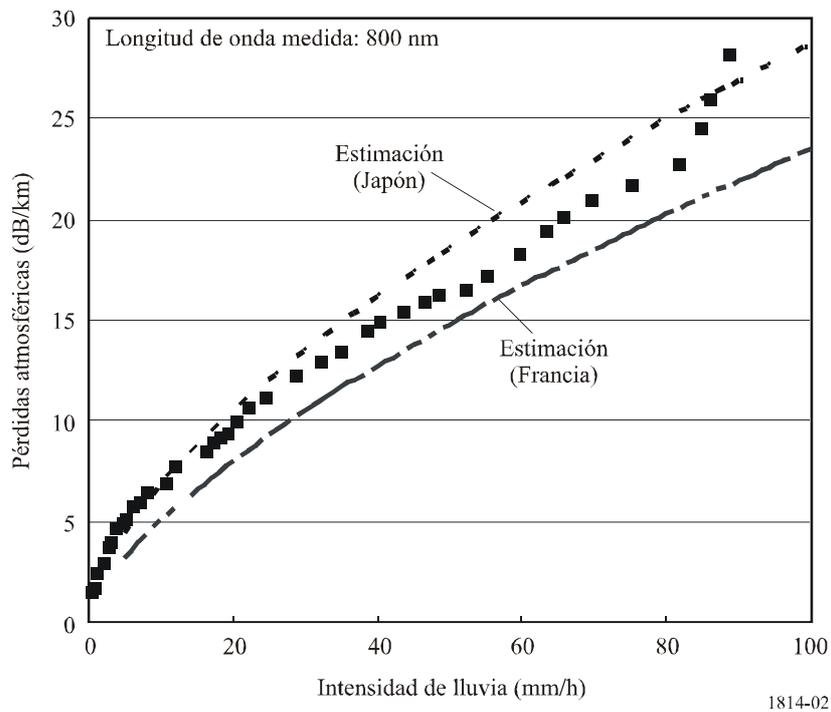


FIGURA 2

Atenuación atmosférica debida a la lluvia



4.2.3 Atenuación específica debida a la nieve γ_{nieve}

La atenuación en función de la intensidad de la nevada está dada por la ecuación (7):

$$\gamma_{nieve} = \alpha \cdot S^b \quad (7)$$

siendo:

γ_{nieve} : atenuación específica debida a la nieve (dB/km)

S : intensidad de la nevada (mm/h)

α y b : funciones de la longitud de onda, λ (nm). En el Cuadro 3 se presentan los valores calculados para la nieve seca y húmeda.

CUADRO 3

Parámetros utilizados para calcular la atenuación específica debida a la nieve

	α	b
Nieve húmeda	$0,000102\lambda + 3,79$	0,72
Nieve seca	$0,0000542\lambda + 5,50$	1,38

5 Efectos del centelleo

El centelleo atmosférico inducido por turbulencia constituye el segundo proceso atmosférico en importancia que afecta la calidad de funcionamiento de los sistemas de comunicación por láser. Se trata de un fenómeno que provoca fuertes fluctuaciones de la potencia de la señal recibida.

La turbulencia atmosférica produce bolsas de aire temporales con temperaturas ligeramente diferentes, densidades diferentes e índices de refracción diferentes. La fluctuación lenta del haz y el centelleo pueden originar pérdida de datos ya que el haz del láser se deforma cuando se propaga a través de estas inhomogeneidades en el índice de refracción. La trascendencia de cada efecto depende del tamaño de estas células de turbulencia con relación al diámetro del haz del láser.

Si el tamaño de las células de turbulencia es mayor que el diámetro del haz, el haz del láser se curva aleatoriamente y genera pérdida de señal si el haz fluctúa lentamente alejándose de la apertura del receptor. Las longitudes de onda más largas sufrirán una menor fluctuación lenta del haz, que las longitudes de onda más cortas, aunque la dependencia de la longitud de onda es débil.

Comúnmente, si el tamaño de las células de turbulencia es más pequeño que el diámetro del haz del láser, la difracción y la curvatura del rayo provocan distorsiones en el frente de onda del haz del láser. Esto origina en el receptor fluctuaciones temporales de la intensidad del haz del láser, conocidas como centelleo, con un espectro de frecuencias de 0,01 Hz a 200 Hz.

Los efectos del centelleo troposférico se estudian por lo general a partir del logaritmo de la amplitud χ (dB) de la señal que se observa («log-amplitude») (amplitud logarítmica), que se define como la relación en decibelios entre su amplitud instantánea y su valor medio. La intensidad y la velocidad de la fluctuación (frecuencia del centelleo) aumentan con la longitud de onda. En el caso de una onda plana y turbulencia débil, la varianza del centelleo σ_χ^2 (dB²) puede expresarse mediante la ecuación (8):

$$\sigma_\chi^2 = 23,17 \cdot k^{7/6} \cdot C_n^2 \cdot L^{11/6} \quad (8)$$

siendo:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} : \text{ número de la onda (m}^{-1}\text{)}$$

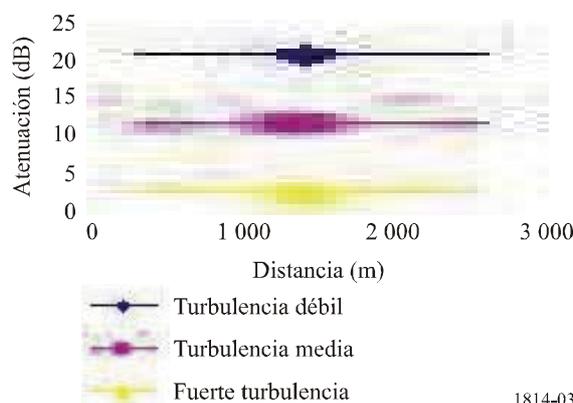
L : longitud del enlace (m)

C_n^2 : parámetro de la estructura del índice de refracción ($\text{m}^{-2/3}$).

El centelleo tiene una amplitud de cresta de $4\sigma_\chi$ y la atenuación que provoca es $2\sigma_\chi$. En el caso de una fuerte turbulencia se observa una saturación de la varianza dada por la ecuación (8). El parámetro C_n^2 tiene un valor diferente con longitudes de onda ópticas que con longitudes de onda milimétricas. Cuando se emplean longitudes de onda milimétricas el centelleo se debe principalmente a las fluctuaciones de humedad, mientras que con longitudes de onda ópticas el centelleo es primordialmente una función de la temperatura. Con longitudes de onda milimétricas, C_n^2 es aproximadamente igual a $10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ (en general, con longitudes de onda milimétricas C_n^2 se encuentra entre 10^{-14} y $10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$) y con longitudes de onda ópticas el valor es de aproximadamente $2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, en el caso de turbulencia débil (en general, con longitudes de onda ópticas C_n^2 oscila entre 10^{-16} y $10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$).

En la Fig. 3 se representa la variación de la atenuación de un haz óptico con longitud de onda de 1 550 nm en los casos de turbulencia débil, media y fuerte a distancias de hasta 2 000 m. Es evidente que la atenuación aumenta con la turbulencia. En el Cuadro 4 se puede observar el efecto que produce la turbulencia en la propagación de ondas ópticas y radioeléctricas. El centelleo es más intenso con las longitudes de onda ópticas que son más largas.

FIGURA 3
Variación con la distancia de la atenuación debida al centelleo para diversos tipos de turbulencia y para una longitud de onda de 1 550 nm



1814-03

Puede reducirse el centelleo mediante la utilización de múltiples haces de transmisión o mayores aperturas del receptor. Asimismo, para minimizar los efectos del centelleo en el trayecto de transmisión se recomienda que los sistemas FSO no se instalen cerca de superficies calientes. Como el centelleo disminuye conforme aumenta la altitud, es conveniente que los sistemas FSO se instalen a una altura ligeramente por encima del techo (>1 m) y alejados de muros laterales si la instalación se lleva a cabo en entornos con clima similar al desértico.

Los márgenes atribuidos para compensar la atenuación debida a la niebla o la lluvia permiten compensar también los efectos del centelleo.

CUADRO 4

Cuadro de intensidades del desvanecimiento debido al centelleo previstas para una longitud de trayecto de 1 km

	Turbulencia		
	Baja	Moderada	Alta
C_n^2 de las ondas ópticas ($m^{-2/3}$)	10^{-16}	10^{-14}	10^{-13}
Atenuación (0,98 μm) (dB)	0,51	5,06	16,00
Atenuación (1,55 μm) (dB)	0,39	3,87	12,25
C_n^2 de las ondas milimétricas ($m^{-2/3}$)	10^{-15}	10^{-13}	10^{-12}
Atenuación (40 GHz) (dB)	0,03	0,09	0,27
Atenuación (60 GHz) (dB)	0,03	0,11	0,35

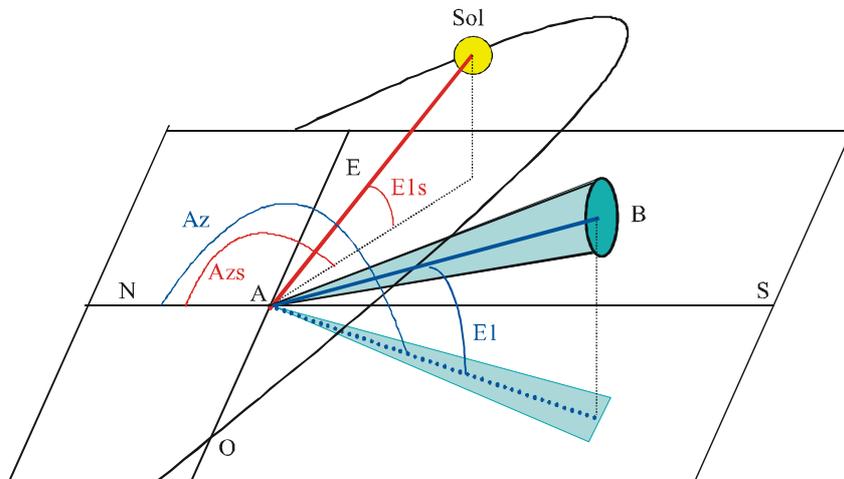
6 Efecto de la luz ambiente

Se produce conjunción solar cuando el Sol o una imagen reflejada del mismo incide en el campo de visión instantáneo (IFOV, *instantaneous field of view*) de un receptor óptico, o cerca de él. Generalmente, el IFOV de recepción es al menos tan grande como la divergencia de transmisión. El problema se agrava cuando la posición del Sol es paralela al enlace óptico y la potencia solar que penetra en el receptor es mayor que la potencia que se recibe del transmisor.

Normalmente se puede reducir la interferencia solar posicionando el receptor de manera tal que el Sol se encuentre siempre fuera del eje.

En la Fig. 4 se representa la geometría del trayecto solar en el cielo con respecto a un enlace óptico en espacio libre (A es el receptor y B el transmisor).

FIGURA 4
Diagrama del trayecto del Sol con respecto a un enlace óptico en espacio libre



1814-04

La potencia radiada por el Sol, $P_{radiada}$, (W/m²) se define mediante la ecuación (9):

$$P_{radiada} = 1200 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - E_{ls}\right) \quad (9)$$

siendo E_{ls} la altura del Sol (rad).

La potencia recibida se expresa mediante:

$$P_{solar} = F_{solar} \cdot P_{radiada} \cdot S_{captura} \cdot W_{receptor}/100 \quad (10)$$

siendo:

- F_{solar} : potencia espectral solar en función de la longitud de onda
- $S_{captura}$: superficie de captura del receptor (m²)
- $W_{receptor}$: anchura de banda del receptor (nm)
- F_{solar} : se modela mediante el siguiente ajuste de la curva:

$$F_{solar} = 8,97 \times 10^{-13}\lambda^5 - 4,65 \times 10^{-9}\lambda^4 + 9,37 \times 10^{-6}\lambda^3 - 9,067 \times 10^{-3}\lambda^2 + 4,05\lambda - 5,70 \quad (11)$$

siendo:

λ : longitud de onda (nm).

7 Cálculo del margen del enlace

El margen de desvanecimiento del enlace de un sistema FSO con un receptor a una distancia d (km) del transmisor puede calcularse como sigue:

Paso 1: La atenuación geométrica A_{geo} se obtiene de la ecuación (1).

Paso 2: Por lo general las longitudes de onda del láser se seleccionan de tal manera que caigan dentro de las ventanas de transmisión atmosférica para que $\gamma_{tiempo_despejado}$ pueda considerarse despreciable. No obstante, la Recomendación UIT-R P.1817 contiene los cálculos de la atenuación específica con tiempo despejado.

Paso 3: La atenuación específica debida a la niebla γ_{niebla} puede obtenerse a partir de las ecuaciones (4) y (5). Si no se dispone de los valores típicos de datos locales relativos a la visibilidad, pueden obtenerse de la Recomendación UIT-R P.1817.

Paso 4: La atenuación específica debida a la lluvia γ_{lluvia} puede calcularse a partir de la ecuación (6) y el Cuadro 2.

Paso 5: La atenuación específica debida a la nieve γ_{nieve} puede calcularse a partir de la ecuación (7) y el Cuadro 3.

Paso 6: El margen de desvanecimiento M_{enlace} (dB) se expresa mediante:

$$M_{enlace} = P_e - S_r - A_{sistema} - A_{geo} - \gamma_{tiempo_despejado} \cdot d - \gamma_{niebla} \cdot d - \gamma_{lluvia} \cdot d - \gamma_{nieve} \cdot d$$

siendo:

- P_e (dBm): potencia total del transmisor
- S_r (dBm): sensibilidad del receptor
- $A_{sistema}$ (dB): representa las demás pérdidas que dependen del sistema, entre otras, la pérdida debida al desalineamiento del enlace, las pérdidas ópticas del receptor, las pérdidas por fluctuación lenta del haz, la atenuación provocada por la luz ambiente (radiación solar), etc.

8 Factores diversos

Durante el diseño de un sistema FSO es necesario considerar otros factores, a saber:

La reglamentación de seguridad internacional limita estrictamente la máxima potencia de salida de los sistemas ópticos. Los organismos de reglamentación autorizan aproximadamente 100 veces más de potencia para la longitud de onda de 1 550 nm, que para longitudes de onda más cortas «inofensivas para los ojos». El inconveniente de este tipo de láser es esencialmente su coste en comparación con los de longitud de onda más corta que funcionan en torno a 850 nm.

Los transceptores de FSO pueden instalarse detrás de ventanas. El ángulo entre el haz y la ventana es crítico, ya que debe ser tan perpendicular como sea posible, no obstante, se debe conservar un ángulo ligero (5°) para reducir la recuperación del haz en su receptor. Además, algunas ventanas contienen vidrio o una capa sobre el vidrio que reduce el resplandor. Como este tipo de ventanas se fabrican a menudo específicamente para rechazar el infrarrojo, las capas de protección pueden reducir la señal en un 60% o más.

La baja visibilidad contribuye a disminuir la eficacia y disponibilidad de los sistemas FSO. Esta situación puede presentarse durante un período de tiempo específico dentro de un año o de un día. Asimismo, la baja visibilidad puede tratarse de un fenómeno local (niebla en la costa). Para solucionar la repercusión negativa de la baja visibilidad se puede acortar la distancia entre los terminales, lo que proporciona un margen del enlace mayor que permite contrarrestar las condiciones meteorológicas adversas.
