

Unión Internacional de Telecomunicaciones

UIT-T

SECTOR DE NORMALIZACIÓN
DE LAS TELECOMUNICACIONES
DE LA UIT

G.640

(03/2006)

SERIE G: SISTEMAS Y MEDIOS DE TRANSMISIÓN,
SISTEMAS Y REDES DIGITALES

Características de los medios de transmisión – Cables
submarinos

**Interfaces compatibles coubicadas
longitudinalmente para sistemas ópticos
en el espacio libre**

Recomendación UIT-T G.640

RECOMENDACIONES UIT-T DE LA SERIE G
SISTEMAS Y MEDIOS DE TRANSMISIÓN, SISTEMAS Y REDES DIGITALES

CONEXIONES Y CIRCUITOS TELEFÓNICOS INTERNACIONALES	G.100–G.199
CARACTERÍSTICAS GENERALES COMUNES A TODOS LOS SISTEMAS ANALÓGICOS DE PORTADORAS	G.200–G.299
CARACTERÍSTICAS INDIVIDUALES DE LOS SISTEMAS TELEFÓNICOS INTERNACIONALES DE PORTADORAS EN LÍNEAS METÁLICAS	G.300–G.399
CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS SISTEMAS TELEFÓNICOS INTERNACIONALES EN RADIOENLACES O POR SATELITE E INTERCONEXIÓN CON LOS SISTEMAS EN LÍNEAS METÁLICAS	G.400–G.449
COORDINACIÓN DE LA RADIOTELEFONÍA Y LA TELEFONÍA EN LÍNEA	G.450–G.499
CARACTERÍSTICAS DE LOS MEDIOS DE TRANSMISIÓN	G.600–G.699
Generalidades	G.600–G.609
Cables de pares simétricos	G.610–G.619
Cables terrestres de pares coaxiales	G.620–G.629
Cables submarinos	G.630–G.649
Cables de fibra óptica	G.650–G.659
Características de los componentes y los subsistemas ópticos	G.660–G.699
EQUIPOS TERMINALES DIGITALES	G.700–G.799
REDES DIGITALES	G.800–G.899
SECCIONES DIGITALES Y SISTEMAS DIGITALES DE LÍNEA	G.900–G.999
CALIDAD DE SERVICIO Y DE TRANSMISIÓN – ASPECTOS GENÉRICOS Y ASPECTOS RELACIONADOS AL USUARIO	G.1000–G.1999
CARACTERÍSTICAS DE LOS MEDIOS DE TRANSMISIÓN	G.6000–G.6999
DATOS SOBRE CAPA DE TRANSPORTE – ASPECTOS GENÉRICOS	G.7000–G.7999
ASPECTOS RELATIVOS A LOS PROTOCOLOS EN MODO PAQUETE SOBRE LA CAPA DE TRANSPORTE	G.8000–G.8999
REDES DE ACCESO	G.9000–G.9999

Para más información, véase la Lista de Recomendaciones del UIT-T.

Recomendación UIT-T G.640

Interfaces compatibles coubicadas longitudinalmente para sistemas ópticos en el espacio libre

Resumen

En esta Recomendación se proporciona un procedimiento para que dos sistemas de transmisión óptica en el espacio libre (FSO) coubicados no interfieran entre sí, incluyéndose asimismo los cálculos de las condiciones que han de cumplirse para evitar interferencias en determinados ejemplos de sistemas FSO coubicados.

Orígenes

La Recomendación UIT-T G.640 fue aprobada el 29 de marzo de 2006 por la Comisión de Estudio 15 (2005-2008) del UIT-T por el procedimiento de la Recomendación UIT-T A.8.

PREFACIO

La UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) es el organismo especializado de las Naciones Unidas en el campo de las telecomunicaciones. El UIT-T (Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la UIT) es un órgano permanente de la UIT. Este órgano estudia los aspectos técnicos, de explotación y tarifarios y publica Recomendaciones sobre los mismos, con miras a la normalización de las telecomunicaciones en el plano mundial.

La Asamblea Mundial de Normalización de las Telecomunicaciones (AMNT), que se celebra cada cuatro años, establece los temas que han de estudiar las Comisiones de Estudio del UIT-T, que a su vez producen Recomendaciones sobre dichos temas.

La aprobación de Recomendaciones por los Miembros del UIT-T es el objeto del procedimiento establecido en la Resolución 1 de la AMNT.

En ciertos sectores de la tecnología de la información que corresponden a la esfera de competencia del UIT-T, se preparan las normas necesarias en colaboración con la ISO y la CEI.

NOTA

En esta Recomendación, la expresión "Administración" se utiliza para designar, en forma abreviada, tanto una administración de telecomunicaciones como una empresa de explotación reconocida de telecomunicaciones.

La observancia de esta Recomendación es voluntaria. Ahora bien, la Recomendación puede contener ciertas disposiciones obligatorias (para asegurar, por ejemplo, la aplicabilidad o la interoperabilidad), por lo que la observancia se consigue con el cumplimiento exacto y puntual de todas las disposiciones obligatorias. La obligatoriedad de un elemento preceptivo o requisito se expresa mediante las frases "tener que, haber de, hay que + infinitivo" o el verbo principal en tiempo futuro simple de mandato, en modo afirmativo o negativo. El hecho de que se utilice esta formulación no entraña que la observancia se imponga a ninguna de las partes.

PROPIEDAD INTELECTUAL

La UIT señala a la atención la posibilidad de que la utilización o aplicación de la presente Recomendación suponga el empleo de un derecho de propiedad intelectual reivindicado. La UIT no adopta ninguna posición en cuanto a la demostración, validez o aplicabilidad de los derechos de propiedad intelectual reivindicados, ya sea por los miembros de la UIT o por terceros ajenos al proceso de elaboración de Recomendaciones.

En la fecha de aprobación de la presente Recomendación, la UIT no ha recibido notificación de propiedad intelectual, protegida por patente, que puede ser necesaria para aplicar esta Recomendación. Sin embargo, debe señalarse a los usuarios que puede que esta información no se encuentre totalmente actualizada al respecto, por lo que se les insta encarecidamente a consultar la base de datos sobre patentes de la TSB en la dirección <http://www.itu.int/ITU-T/ipr/>.

© UIT 2007

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse por ningún procedimiento sin previa autorización escrita por parte de la UIT.

ÍNDICE

	Página
1 Alcance	1
2 Referencias	1
2.1 Referencias normativas	1
2.2 Referencias informativas	1
3 Términos y definiciones	1
3.1 Definiciones.....	1
3.2 Términos definidos en otras Recomendaciones	2
4 Abreviaturas.....	2
5 Puntos de referencia.....	3
6 Compatibilidad de coubicación longitudinal.....	3
6.1 Relación de diafonía entre dos sistemas FSO.....	4
6.2 Efecto del clima en la relación de diafonía	9
6.3 Caso A – interferencia entre dos sistemas que pueden tener la misma longitud de onda	10
6.4 Caso B – interferencia entre dos sistemas que no pueden tener la misma longitud de onda	11
6.5 Procedimiento para determinar si se cumplen las condiciones de compatibilidad de coubicación longitudinal.....	12
7 Consideraciones sobre seguridad óptica.....	13
Apéndice I – Ejemplos de cálculos de diafonía	14
I.1 Ejemplo 1.....	14
I.2 Ejemplo 2.....	15
I.3 Ejemplo 3.....	17

Recomendación UIT-T G.640

Interfaces compatibles coubicadas longitudinalmente para sistemas ópticos en el espacio libre

1 Alcance

En esta Recomendación se definen las interfaces ópticas para sistemas de transmisión óptica en el espacio libre "compatibles coubicados longitudinalmente", por medio de los cuales se permite en una ubicación determinada la coexistencia libre de interferencias de más de un sistema óptico en el espacio libre de un punto a otro.

También se incluye la definición de los parámetros relevantes para la caracterización de los sistemas ópticos en el espacio libre.

Los sistemas ópticos en el espacio libre se denominan comúnmente sistemas "FSO".

2 Referencias

2.1 Referencias normativas

Las siguientes Recomendaciones del UIT-T y otras referencias contienen disposiciones que, mediante su referencia en este texto, constituyen disposiciones de la presente Recomendación. Al efectuar esta publicación, estaban en vigor las ediciones indicadas. Todas las Recomendaciones y otras referencias son objeto de revisiones por lo que se preconiza que los usuarios de esta Recomendación investiguen la posibilidad de aplicar las ediciones más recientes de las Recomendaciones y otras referencias citadas a continuación. Se publica periódicamente una lista de las Recomendaciones UIT-T actualmente vigentes. En esta Recomendación, la referencia a un documento, en tanto que autónomo, no le otorga el rango de una Recomendación.

- Recomendación UIT-T G.957 (2006), *Interfaces ópticas para equipos y sistemas relacionados con la jerarquía digital síncrona*.
- CEI 60825-1 (2001), *Safety of laser products – Part 1: Equipment classification, requirements and user's guide*.
- CEI 60825-2 (2005), *Safety of laser products – Part 2: Safety of optical fibre communication systems (OFCS)*.
- CEI 60825-12 (2005), *Safety of laser products – Part 12: Safety of free space optical communication systems used for transmission of information*.

2.2 Referencias informativas

- Recomendaciones UIT-T de la serie G – Suplemento 39 (2006), *Consideraciones sobre diseño e ingeniería de sistemas ópticos*.

3 Términos y definiciones

3.1 Definiciones

En esta Recomendación se definen los términos siguientes.

3.1.1 ángulo de admisión: El ángulo de admisión (de un receptor FSO) es el ángulo entre las líneas en el cual la potencia detectada por el receptor se atenúa hasta el valor de $1/e^2$. Este parámetro se conoce también como campo visual (FOV) de un receptor FSO, definiéndose así normalmente cuando la densidad de potencia se atenúa hasta alcanzar los valores $1/e^2$, $1/e$ ó 50%.

3.1.2 divergencia del haz: La divergencia del haz es el ángulo entre las líneas en que la densidad de potencia de un haz FSO se atenúa hasta alcanzar el valor $1/e^2$.

NOTA 1 – Este parámetro también se define normalmente para valores de la densidad de potencia atenuados hasta alcanzar el valor de $1/e$ ó 50%.

NOTA 2 – La divergencia del haz debe medirse a una distancia al menos cinco veces superior a la distancia de Rayleigh a partir de la lente (véase 3.1.8), con objeto de garantizar que la medición se efectúa en condiciones de campo lejano.

3.1.3 diafonía entre canales: Relación entre la potencia óptica perturbadora y la potencia óptica deseada detectada por el receptor. Las señales deseadas y perturbadoras poseen longitudes de onda diferentes.

3.1.4 penalización por diafonía entre canales: Penalización asignada en el balance del sistema para tener en cuenta la diafonía entre canales.

3.1.5 diafonía interferométrica: Relación entre la potencia óptica perturbadora y la potencia óptica deseada detectada por el receptor. Las señales deseadas y perturbadoras pueden tener la misma longitud de onda.

3.1.6 penalización por diafonía interferométrica: Penalización asignada en el balance del sistema para tener en cuenta la diafonía interferométrica.

3.1.7 error de fijación del transmisor (o receptor): Máximo ángulo entre el eje del transmisor (o receptor) y una línea recta que une el transmisor con el receptor.

3.1.8 distancia de Rayleigh: Se define como:

$$\text{distancia de Rayleigh} = \frac{2D^2}{\lambda}$$

donde:

D es el diámetro de la lente del transmisor

λ es la longitud de onda

3.2 Términos definidos en otras Recomendaciones

En esta Recomendación se usa el siguiente término definido en la Rec. UIT-T G.957:

– tasa de extinción.

4 Abreviaturas, siglas o acrónimos

En esta Recomendación se utilizan las siguientes abreviaturas, siglas o acrónimos.

FOV Campo visual (*field of view*)

FSO Sistema óptico en el espacio libre (*free space optical*)

R_{fso} Plano de referencia situado inmediatamente antes de la lente de entrada del receptor óptico (*reference plane just before the optical receiver input lens*)

Rx Receptor

S_{fso} Plano de referencia situado inmediatamente después de la lente de salida del transmisor óptico (*reference plane just after the optical transmitter output lens*)

Tx Transmisor

5 Puntos de referencia

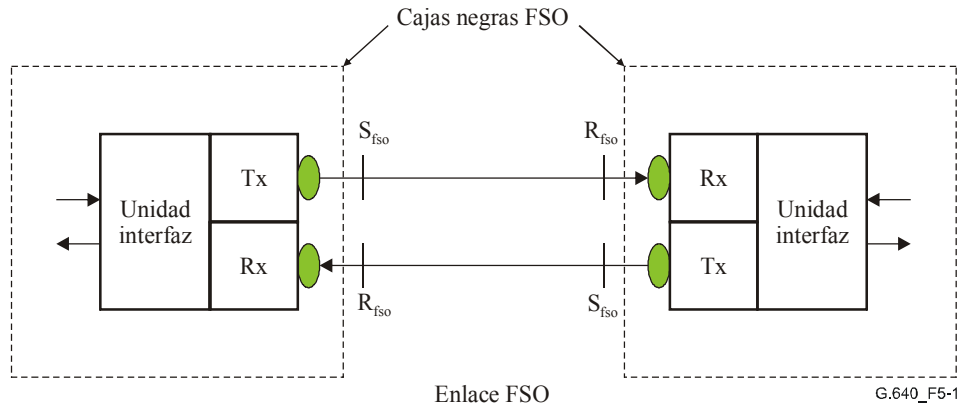


Figura 5-1/G.640 – Diagrama de referencia de un enlace óptico en el espacio libre

Los planos de referencia de la figura 5-1 se definen de la manera siguiente:

- S_{fso} es un plano de referencia situado inmediatamente después de la lente de salida del receptor óptico;
- R_{fso} es un plano de referencia situado inmediatamente antes de la lente de entrada del receptor óptico.

6 Compatibilidad de coubicación longitudinal

El espacio libre entre los planos de referencia S_{fso} y R_{fso} en un sistema FSO es un medio compartido entre otros muchos usuarios con propósitos diferentes. A fin de establecer los criterios para la coubicación de los sistemas FSO, se describe en 6.1 la relación de diafonía C generada por un sistema que interfiere con otro, considerándose en 6.2 el efecto que tiene el clima sobre la citada relación de diafonía. La penalización por potencia óptica causada por dicha diafonía se define por tanto para dos casos:

- Caso A – los dos sistemas pueden tener la misma longitud de onda (véase 6.3).
- Caso B – los dos sistemas **no** pueden tener la misma longitud de onda (véase 6.4).

En la figura 6-1 se ilustra la diferencia entre estos dos casos.

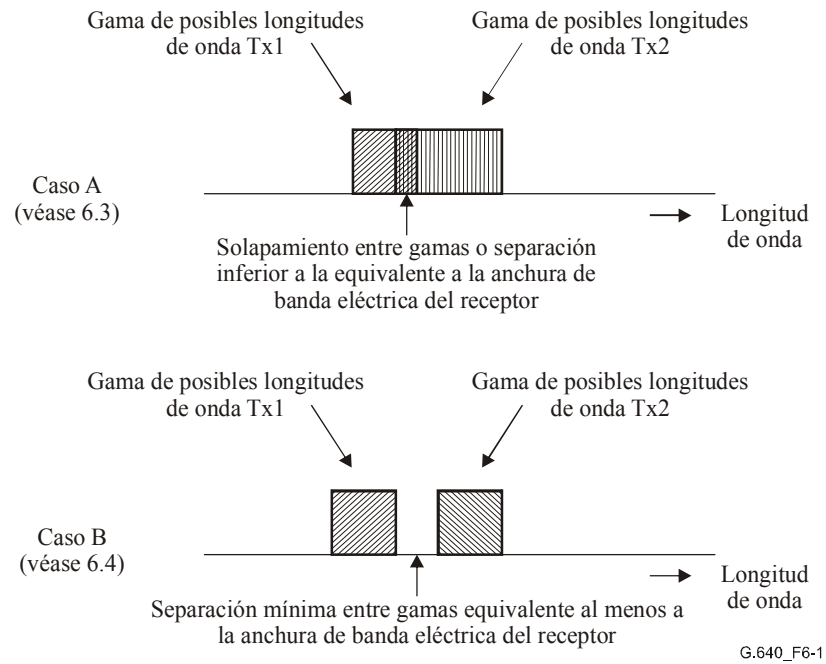


Figura 6-1/G.640 – Ilustración de la diferencia entre los casos considerados en las cláusulas 6.3 y 6.4

Para los sistemas bidireccionales, las dos direcciones deben considerarse separadamente.

NOTA 1 – Para ciertos sistemas FSO, la coherencia de la fuente es tan baja (especialmente en el caso de los sistemas basados en LED) que incluso cuando las longitudes de onda sean iguales, no se observa la diafonía interferométrica. Para estos sistemas FSO cubricados, siempre se aplica el caso B.

NOTA 2 – Incluso para algunos sistemas FSO basados en láser, la suposición de diafonía interferométrica puede resultar pesimista porque la atmósfera podría destruir en gran medida la coherencia del láser a determinadas longitudes de onda.

6.1 Relación de diafonía entre dos sistemas FSO

Suponiéndose que el haz generado por un transmisor FSO se pueda aproximar por un haz gaussiano, la figura 6-2 muestra un diagrama de referencia para un transmisor FSO general.

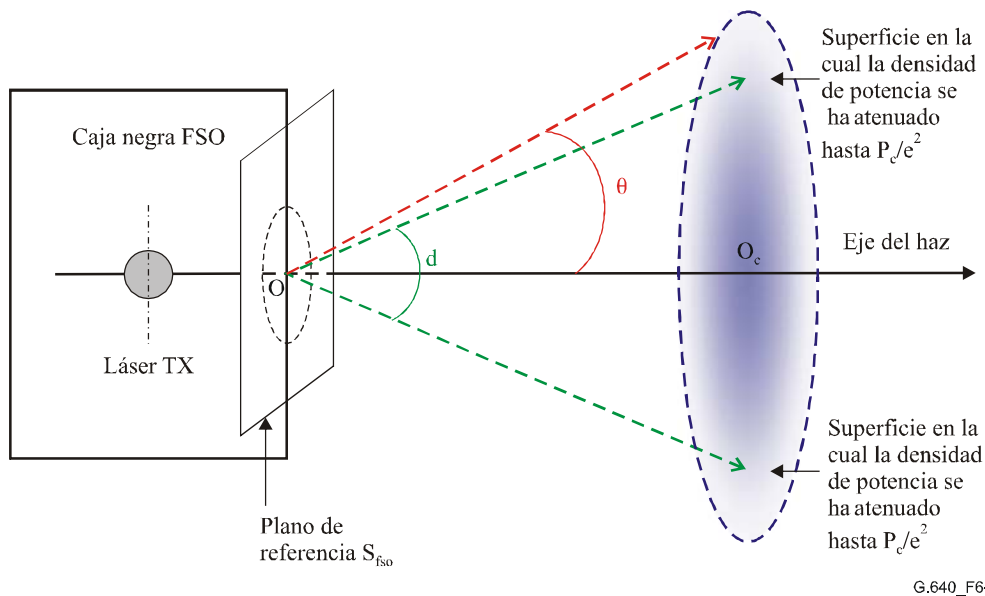


Figura 6-2/G.640 – Diagrama de referencia de un haz gaussiano para un transmisor FSO

La densidad de potencia óptica de este haz en un ángulo θ con relación al eje del haz se expresa mediante:

$$O = O_c e^{-\frac{8\theta^2}{d^2}} \quad (6-1)$$

donde:

- O_c es la densidad de potencia óptica en el centro del haz
- d es la divergencia del haz (ángulo entre las líneas en el cual la densidad de potencia se atenúa hasta el valor de $1/e^2$)
- θ es el ángulo entre el eje del haz y el punto de medición

Si se conoce la curva de la densidad de potencia óptica en función del ángulo para un sistema FSO concreto, deben usarse los valores de la curva en lugar de la aproximación de la ecuación 6-1. La figura 6-3 muestra un ejemplo del cálculo de la curva.

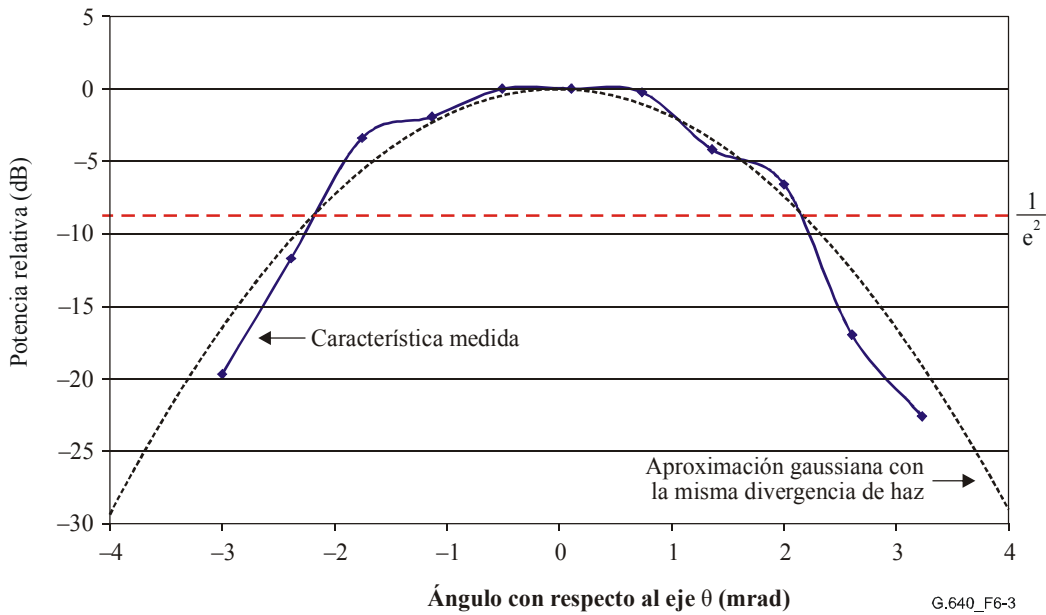


Figura 6-3/G.640 – Ejemplo del cálculo de la curva de densidad de potencia en función del ángulo

El diagrama de referencia correspondiente para el receptor FSO aparece en la figura 6-4.

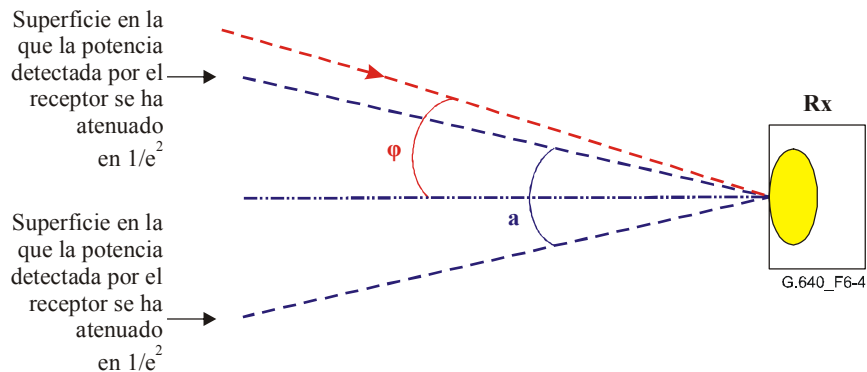


Figura 6-4/G.640 – Diagrama de referencia para un receptor FSO

La característica de la potencia detectada en función del ángulo para un receptor FSO depende de varios parámetros, incluyendo la distancia focal y la calidad de la lente, así como el diámetro del detector.

Si el diámetro del punto formado por la lente es menor que el diámetro del detector, la característica es aproximadamente rectangular. Sin embargo, si el diámetro de ese punto es aproximadamente el mismo que el diámetro del detector, la característica es aproximadamente una curva gaussiana, en la que la potencia óptica (incidente con un ángulo φ con respecto al eje del receptor) detectada por el receptor se expresa mediante:

$$R = R_d e^{\frac{-8\varphi^2}{a^2}} \quad (6-2)$$

donde:

R_a es la potencia óptica detectada por el receptor cuando la luz incide a lo largo del eje del receptor

α es el ángulo de admisión (ángulo entre las líneas en que la potencia detectada por el receptor se atenúa hasta alcanzar el valor $1/e^2$)

ϕ es el ángulo entre la luz incidente y el eje del receptor

Los dos casos definidos anteriormente se ilustran en las figuras 6-5 y 6-6.

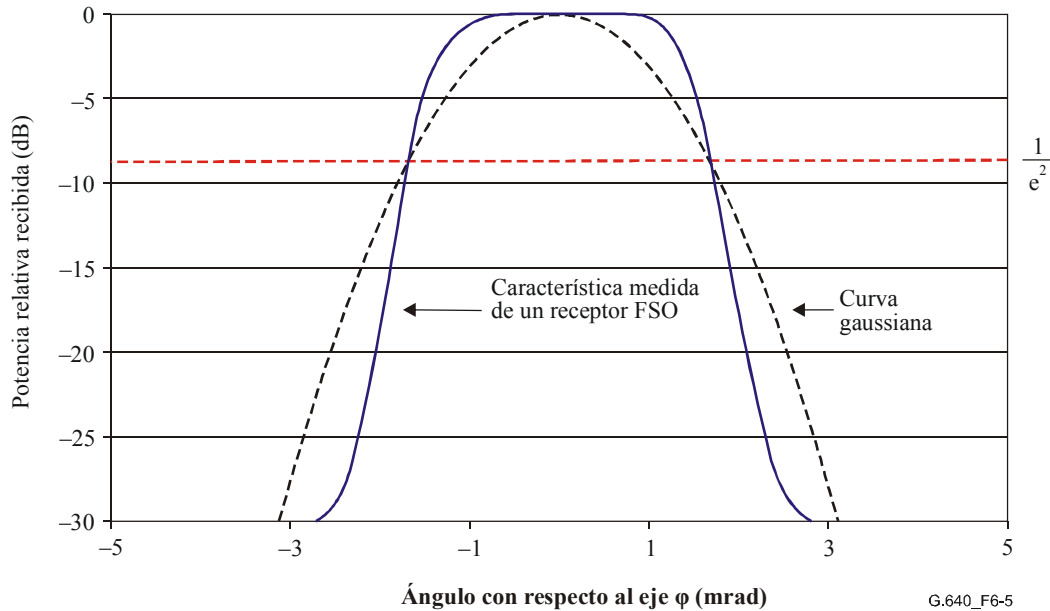


Figura 6-5/G.640 – Ejemplo de la curva calculada de la potencia recibida en función del ángulo, con forma rectangular

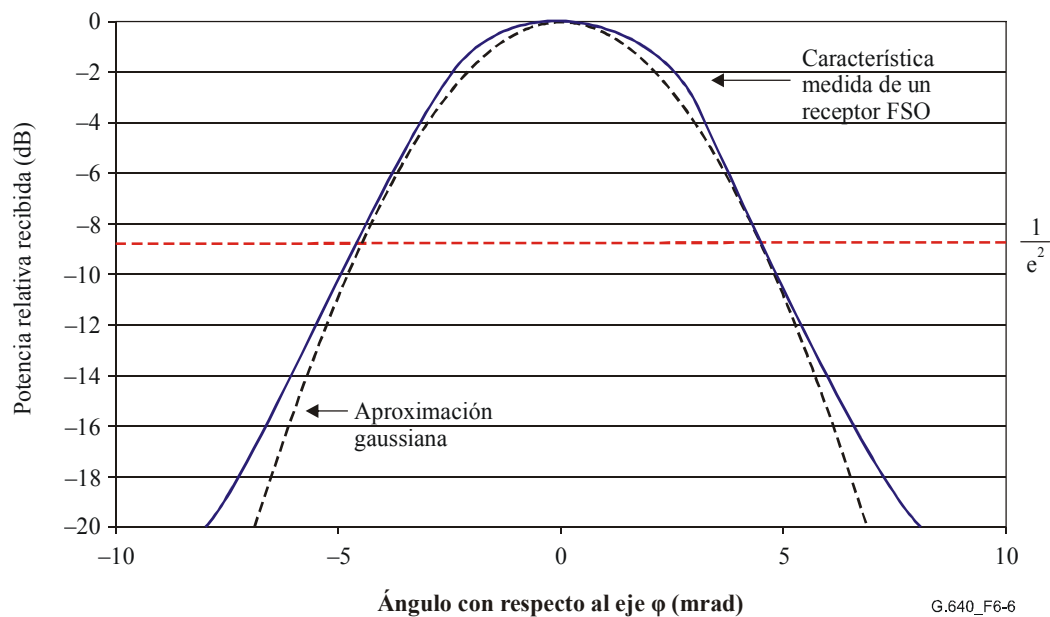
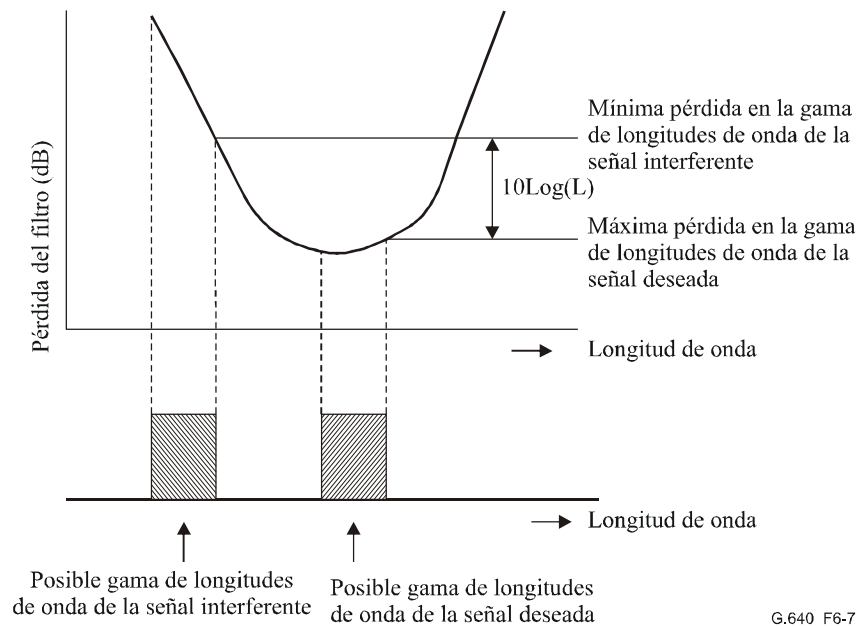


Figura 6-6/G.640 – Ejemplo de la curva calculada de la potencia recibida en función del ángulo, con forma gaussiana

Como puede apreciarse en la figura 6-5, la característica medida y la curva gaussiana no se ajustan demasiado bien en el caso rectangular.

Por consiguiente, si se conoce la curva de potencia óptica detectada por el receptor en función del ángulo para un sistema FSO determinado, deben usarse los valores de la curva en lugar de la aproximación de la ecuación 6-2.

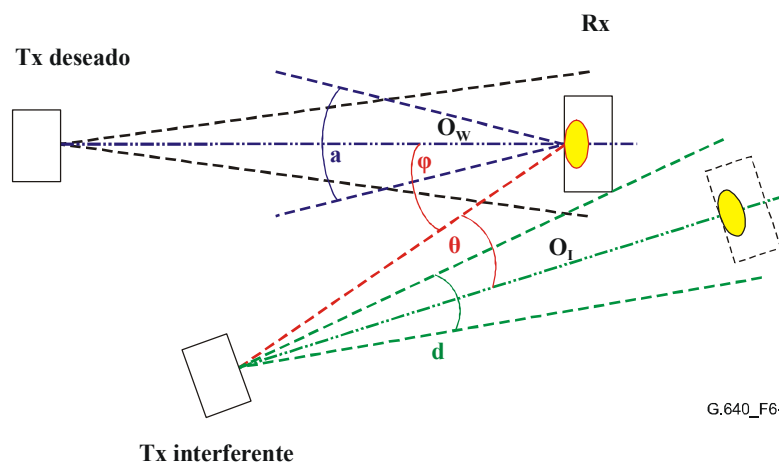
Para el caso en que los dos sistemas no puedan tener la misma longitud de onda, el filtrado óptico en el receptor podría reducir aún más la cantidad de potencia interferente detectada con respecto a la potencia deseada. Dicho efecto se ilustra en la figura 6-7.



G.640_F6-7

Figura 6-7/G.640 – Ilustración de la reducción de potencia interferente debido al filtrado óptico

En la figura 6-8 se muestra el diagrama correspondiente al caso general de un sistema FSO interfiriendo con otro.



G.640_F6-8

Figura 6-8/G.640 – Diagrama de referencia de la diafonía de un sistema FSO

Se obtiene la siguiente ecuación para la relación de diafonía C:

$$C = L \frac{O_I}{O_W} e^{-\frac{8\theta^2}{d^2}} e^{-\frac{8\varphi^2}{a^2}} \quad (6-3)$$

donde:

- L es la relación de atenuación del filtro óptico entre las gamas de longitudes de onda de las señales deseada e interferente, como se ilustra en la figura 6-7 (igual a 1 si las gamas se solapan (Caso A), o si ambas gamas están dentro de una región plana de la característica del filtro)
- O_W es la mínima densidad de potencia en el centro del haz deseado
- O_I es la máxima densidad de potencia en el centro del haz interferente a idéntica distancia del transmisor interferente que del receptor
- θ es el ángulo entre el eje del haz interferente y una línea entre el transmisor interferente y el receptor
- d es la divergencia del haz (ángulo entre las líneas en el cual la densidad de potencia se atenúa hasta el valor $1/e^2$) del transmisor interferente
- φ es el ángulo entre el eje del receptor y una línea entre el transmisor interferente y el receptor
- a es el ángulo de admisión del receptor (ángulo entre las líneas en el cual la potencia detectada por el receptor se atenúa hasta el valor de $1/e^2$)

Si se conoce la curva de la densidad de potencia óptica en función del ángulo para el transmisor interferente, el término $e^{-\frac{8\theta^2}{d^2}}$ de la ecuación 6-3 debe sustituirse por el valor (lineal) de la curva.

De modo análogo, si se conoce la curva de la potencia óptica detectada por el receptor en función del ángulo, el término $e^{-\frac{8\varphi^2}{a^2}}$ de la ecuación 6-3 debe sustituirse por el valor (lineal) de la curva.

6.2 Efecto del clima en la relación de diafonía

Los sistemas FSO normalmente se diseñan en la práctica de manera que sean capaces de soportar una gran variedad de condiciones climáticas. Los dos efectos climáticos principales a tenerse en cuenta en el cálculo de la relación de diafonía son la atenuación y la divergencia del haz.

6.2.1 Cambio de atenuación

Al aplicar la ecuación 6-3 para calcular la relación de diafonía, debe prestarse una atención especial a la evaluación del factor $\frac{O_I}{O_W}$ con objeto de garantizar que el valor utilizado es el de caso más

desfavorable que podría darse en cualquier condición climática que deba tolerar el enlace deseado. En concreto, si el transmisor interferente está más cerca del receptor que el transmisor deseado, la relación de caso más desfavorable entre la densidad de potencia interferente y la densidad de potencia deseada en el centro de sus haces respectivos aparecerá cuando la atenuación del enlace deseado alcance su valor máximo (es decir, en las peores condiciones climáticas que deba tolerar el enlace). En el Ejemplo 3 del apéndice I se proporciona un ejemplo de ello.

6.2.2 Cambio de divergencia del haz

Un segundo efecto climático sobre los enlaces FSO es el posible aumento de la divergencia efectiva del haz ante determinadas condiciones climáticas adversas. Este efecto debe tenerse en cuenta al fijar el valor de d empleado en la ecuación 6-3 para calcular la relación de diafonía.

Si los dos enlaces coubicados funcionan con diferentes longitudes de onda, la atenuación de los enlaces deseado e interferente debida al efecto del clima puede ser distinta. Sin embargo, la diferencia de atenuación dependerá de varios parámetros, como el tamaño de la gota de agua.

6.3 Caso A – interferencia entre dos sistemas que pueden tener la misma longitud de onda

Cuando las longitudes de onda de dos sistemas FSO coubicados pueden ser iguales, cada uno de dichos sistemas requerirá espacio físico adicional con objeto de evitar las perturbaciones mutuas. Dicho espacio dependerá del nivel de diafonía interferométrica generada por la fuente de interferencia.

La penalización por diafonía interferométrica correspondiente a la serie G de las Recomendaciones UIT-T – Suplemento 39 (incluyendo el efecto de la tasa de extinción imperfecta), será:

$$P_I = 10 \log_{10} \left(\frac{\frac{r-1}{r+1}}{\frac{r-1}{r+1} + 10^{\frac{C_I}{10}} - 4 \sqrt{\frac{r}{r+1}} 10^{\frac{C_I}{10}}} \right) \quad [\text{dB}] \quad (6-4)$$

para un umbral de decisión de potencia medio, y

$$P_I = -10 \log_{10} \left(1 - 2 \left(\frac{(1 + \sqrt{r}) \sqrt{10^{\frac{C_I}{10}} (r+1)}}{r-1} \right) \right) \quad [\text{dB}] \quad (6-5)$$

para un umbral de decisión optimizado.

donde:

P_I es la penalización por diafonía interferométrica (dB)

$C_I = \log_{10}(C)$ es la diafonía interferométrica (dB); es decir, la relación entre la potencia perturbadora y la potencia deseada detectada por el receptor

r es la tasa de extinción lineal de la señal deseada

En la figura 6-9 se representa la penalización por diafonía interferométrica para una señal deseada ideal y una con tasa de extinción de 6 dB.

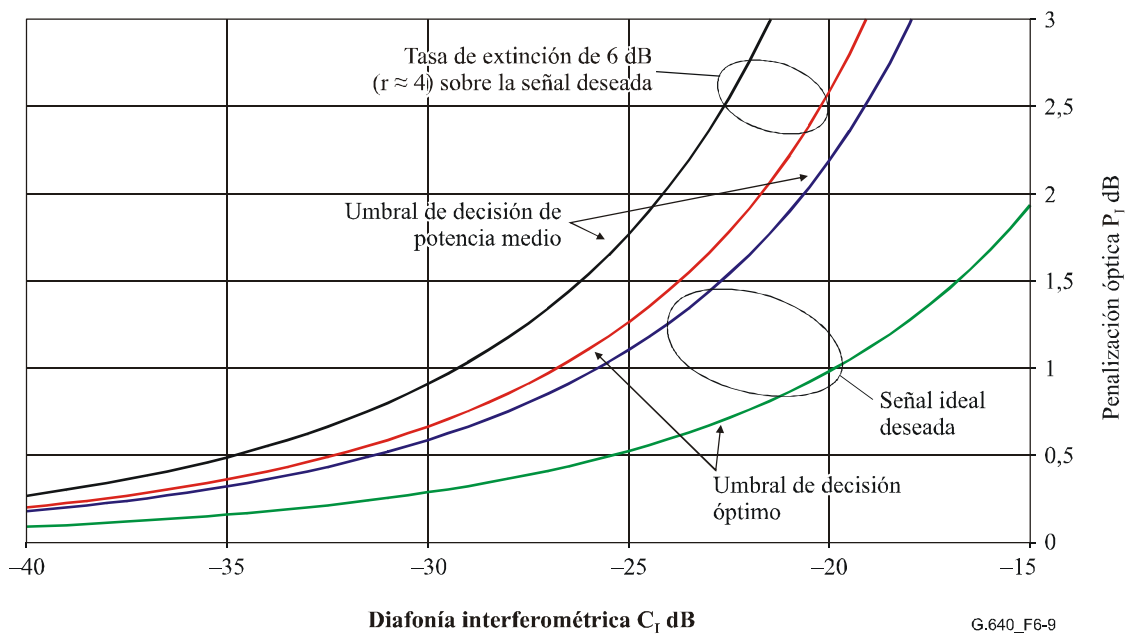


Figura 6-9/G.640 – Curvas de penalización óptica en función de la diafonía interferométrica para una sola fuente de interferencia (modelo limitado)

6.4 Caso B – interferencia entre dos sistemas que no pueden tener la misma longitud de onda

Cuando las longitudes de onda de dos sistemas FSO coubicados **no pueden** ser iguales (como se ilustra en la figura 6-1, Caso B), diafonía generada por la fuente interferente será diafonía entre canales.

La penalización por diafonía entre canales correspondiente a la serie G de las Recomendaciones UIT-T – Suplemento 39 (incluyendo el efecto de la tasa de extinción imperfecta), será:

$$P_C = 10 \log_{10} \left(1 - 10^{\frac{C_C}{10}} \frac{r+1}{r-1} \right) \quad [\text{dB}] \quad (6-6)$$

donde:

P_C es la penalización por diafonía entre canales (dB)

$C_C = \log_{10}(C)$ es la diafonía entre canales (dB); es decir, la relación entre la potencia perturbadora y la potencia deseada detectada por el receptor

r es la tasa de extinción lineal de la señal deseada

La figura 6-10 muestra la penalización por diafonía entre canales para una señal deseada ideal y una con tasa de extinción de 6 dB.

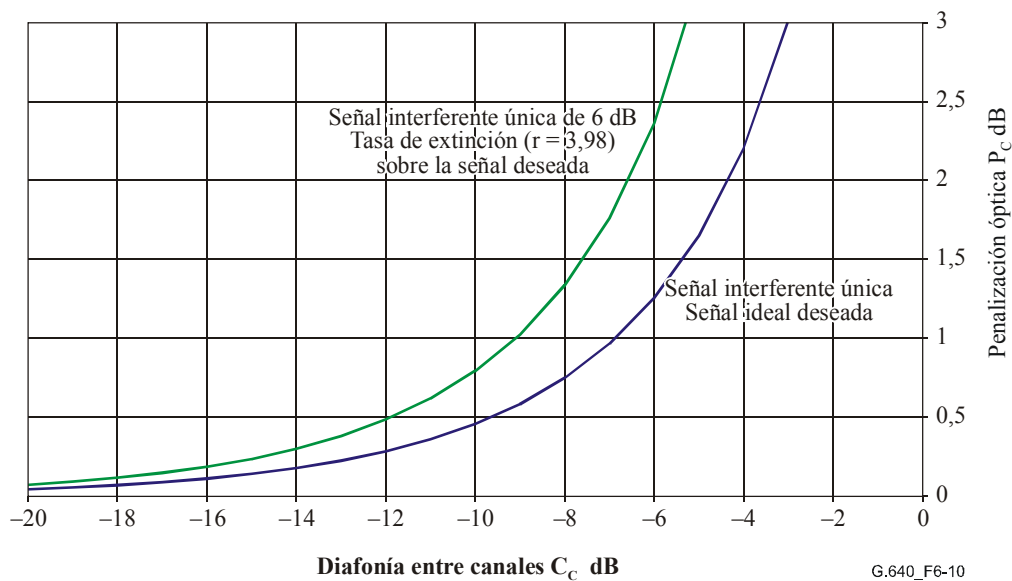


Figura 6-10/G.640 – Curvas de penalización óptica en función de la diafonía entre canales para una sola fuente de interferencia

6.5 Procedimiento para determinar si se cumplen las condiciones de compatibilidad de coubicación longitudinal

El siguiente procedimiento permite saber si se producirán interferencias mutuas inaceptables entre dos sistemas FSO próximos entre sí. Dicho procedimiento debe llevarse a cabo dos veces para cada par de sistemas FSO, la primera con un sistema actuando como deseado y la segunda como interferente, repitiendo de nuevo el proceso una segunda vez pero invirtiendo los papeles.

- 1) Se define la penalización óptica debida a la diafonía que se permite en el balance de potencia del sistema deseado; por ejemplo 0,5 dB.
- 2) Se determina qué caso de los dos presentados en la figura 6-1 es aplicable. Si existe una diferencia entre las gamas de longitud de onda posibles de los dos transmisores equivalente al menos a la anchura de banda eléctrica del receptor, entonces se aplicará el caso B y la diafonía será entre canales; de no ser así, se aplicará el caso A, y la diafonía será interferométrica.
- 3) Se calcula la relación de diafonía, dependiendo del resultado del paso 2.
 - a) Caso A. Para la diafonía interferométrica, se utiliza la ecuación 6-4 ó 6-5 (en función de si el punto de decisión del receptor está o no optimizado) a fin de calcular qué valor de diafonía produciría la máxima penalización correspondiente al paso 1. Por ejemplo, un transmisor deseado con tasa de extinción de 6 dB y un receptor con un umbral de decisión de potencia medio tendrá una penalización de 0,5 dB para una C_I de aproximadamente -35 dB (véase la figura 6-9).
 - b) Caso B. Para la diafonía entre canales, se utiliza la ecuación 6-6 a fin de calcular qué valor de diafonía produciría la máxima penalización correspondiente al paso 1. Por ejemplo, un transmisor deseado con una tasa de extinción de 6 dB tendrá una penalización de 0,5 dB para una C_C de aproximadamente -12 dB (véase la figura 6-10).
- 4) Mediante la ecuación 6-3 y los valores de los parámetros físicos de los dos sistemas FSO, se determina si las ubicaciones físicas propuestas para los dos sistemas permitirán satisfacer en todas las condiciones el máximo nivel de diafonía correspondiente al paso 3. Debe

tenerse en cuenta la información proporcionada en 6.2 para asegurar que los parámetros utilizados corresponden al caso más desfavorable para cualquier condición meteorológica, en la que se espera que el sistema deseado funcione correctamente.

En el apéndice I se proporcionan diversos ejemplos de uso práctico del citado procedimiento para sistemas FSO.

7 Consideraciones sobre seguridad óptica

En CEI 60825-1, CEI 60825-2 y CEI 60825-12 se proporciona información sobre diversas consideraciones de seguridad óptica relevantes para los sistemas FSO.

En concreto, en CEI 60825-12, *Safety of free space optical communication systems used for transmission of information*, se facilita información detallada sobre la clasificación de las ubicaciones en que pueden funcionar los sistemas FSO, especificando los requisitos de los equipos usados en cada uno de ellos.

Apéndice I

Ejemplos de cálculos de diafonía

I.1 Ejemplo 1

Es necesario instalar dos sistemas FSO de idéntico diseño entre el mismo par de edificios, resultando dos enlaces paralelos en el espacio libre. Las características de cada uno de los sistemas son:

- Distancia entre el transmisor y el receptor: 400 m.
- Máxima potencia total transmitida 8 mW y mínima 5 mW.
- Máxima divergencia del haz del transmisor en las condiciones climáticas más desfavorables (d) 4 mrad.
- Mínima tasa de extinción del transmisor 8,2 dB.
- Máximo ángulo de admisión del receptor (a) 5 mrad.
- El receptor posee un umbral de decisión de potencia medio.
- Precisión de ajuste del transmisor y del receptor 1 mrad.
- Máxima penalización por diafonía 0,5 dB.

¿Cuál es la separación mínima de los dos sistemas? En la figura I.1 se muestra un diagrama de referencia para este ejemplo.

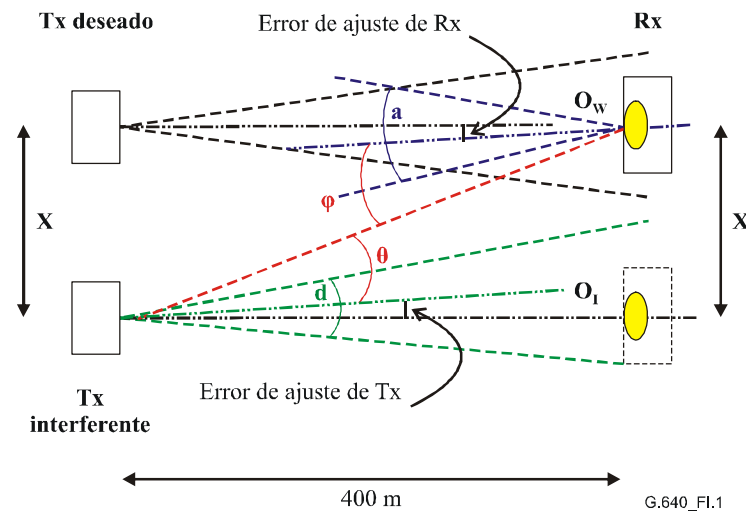


Figura I.1/G.640 – Diagrama de referencia de diafonía del Ejemplo 1

Aplicando el procedimiento indicado en 6.5, se obtienen los siguientes resultados:

- 1) La máxima penalización óptica debida a diafonía es de 0,5 dB.
- 2) Como los dos sistemas poseen el mismo diseño, las longitudes de onda pueden ser iguales, por tanto se trata del caso A – diafonía interferométrica.
- 3) Cálculo de la relación de diafonía para el caso A.
 - a) Caso A. Para la diafonía interferométrica con umbral de decisión de potencia medio se usa la ecuación 6-4 para calcular que $C_1 = -33,3$ dB produciría una penalización de 0,5 dB con una tasa de extinción de 8,2 dB. En términos lineales, $C_1 = 0,000463$.

- 4) Como en este ejemplo los enlaces son paralelos y los errores de ajuste para el transmisor y el receptor son iguales, los ángulos θ y φ son los mismos para todos los valores de la separación X . Dado que los dos enlaces poseen la misma longitud, la relación entre O_I y O_W es la misma que la existente entre la máxima y mínima potencia transmitida (puesto que el transmisor interferente podría emitir a la máxima potencia y el deseado a la mínima). Además, como las longitudes de onda son idénticas $L = 1$, por consiguiente, la ecuación 6-3 se transforma en:

$$0,000463 = \frac{8}{5} e^{\frac{-8\theta^2}{4^2}} e^{\frac{-8\theta^2}{5^2}}$$

Esta ecuación se cumple para θ (y por tanto φ) igual a 3,06 mrad.

A partir de la geometría de los enlaces se deduce:

$$\tan\left(\frac{1 + 3,06}{1000}\right) = \frac{X}{200}$$

cumpléndose para una separación $X = 1,6$ m.

I.2 Ejemplo 2

Este ejemplo es idéntico al ejemplo 1, salvo que se sabe que las características del haz del transmisor de caso más desfavorable quedan dentro de la curva en la figura I.2, y que los valores de la potencia óptica de caso más desfavorable detectada por el receptor en función del ángulo quedan dentro de la curva en la figura I.3.

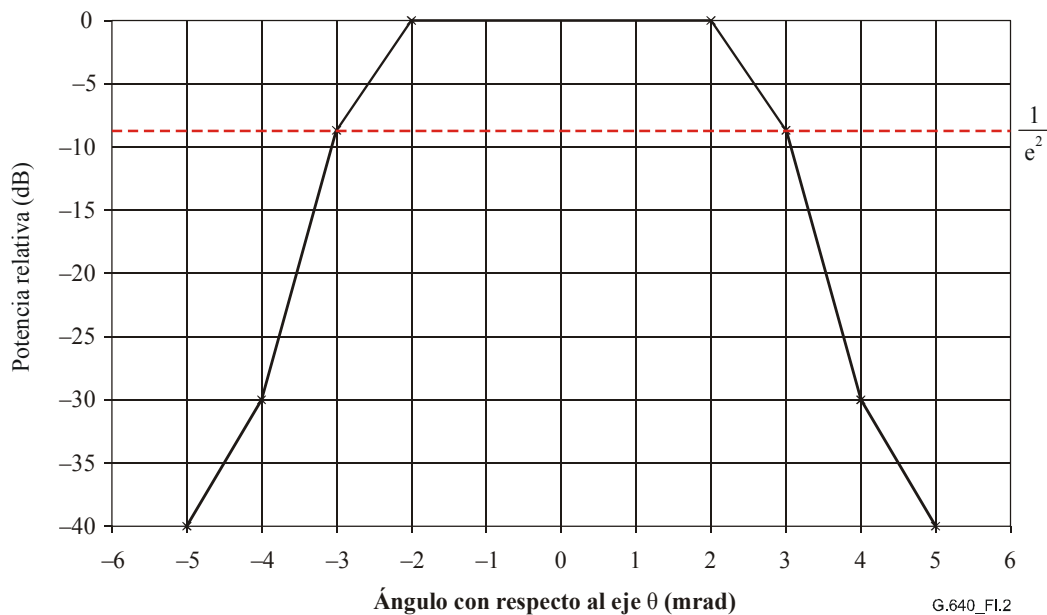


Figura I.2/G.640 – Curva de la densidad de potencia de caso más desfavorable en función del ángulo para los transmisores

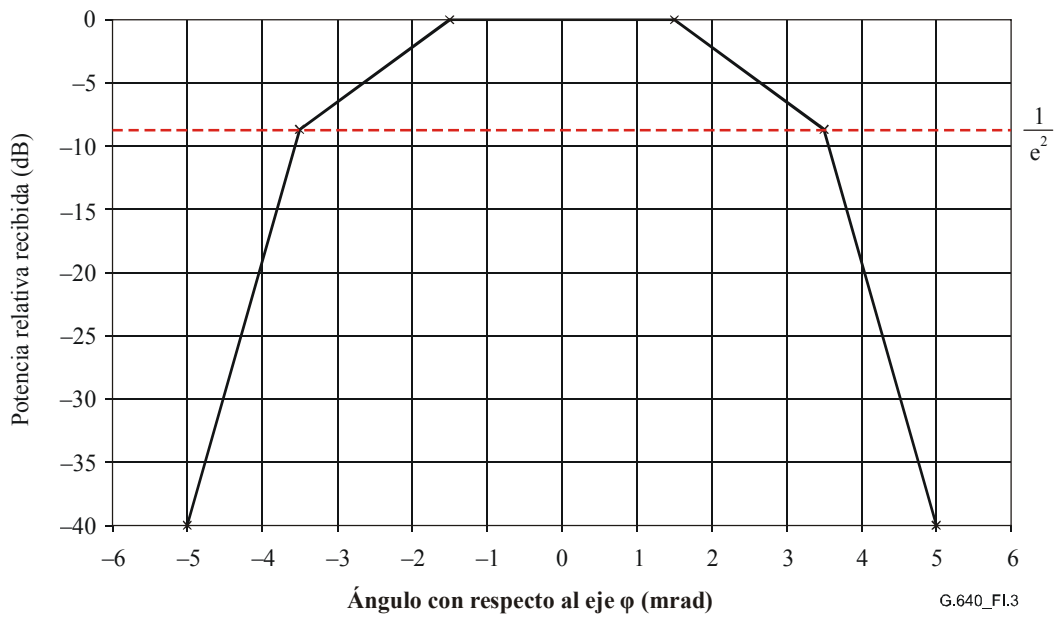


Figura I.3/G.640 – Curva de potencia óptica de caso más desfavorable detectada por el receptor en función del ángulo

El procedimiento para este ejemplo es idéntico al del ejemplo 1 hasta el paso 4. Ahora la ecuación 6-3 se transforma en:

$$0,000463 = \frac{8}{5} \quad (\text{valor de la figura I.2} \times \text{valor de la figura I.3})$$

Esta ecuación se cumple cuando θ (y por tanto φ) es 3,82 mrad.

A partir de la geometría de los enlaces se deduce:

$$\tan\left(\frac{1 + 3,82}{1000}\right) = \frac{X}{200}$$

cumpléndose para una separación $X = 1,9$ m.

I.3 Ejemplo 3

Hay que instalar dos sistemas FSO de igual diseño dispuestos como se indica en la figura I.4.

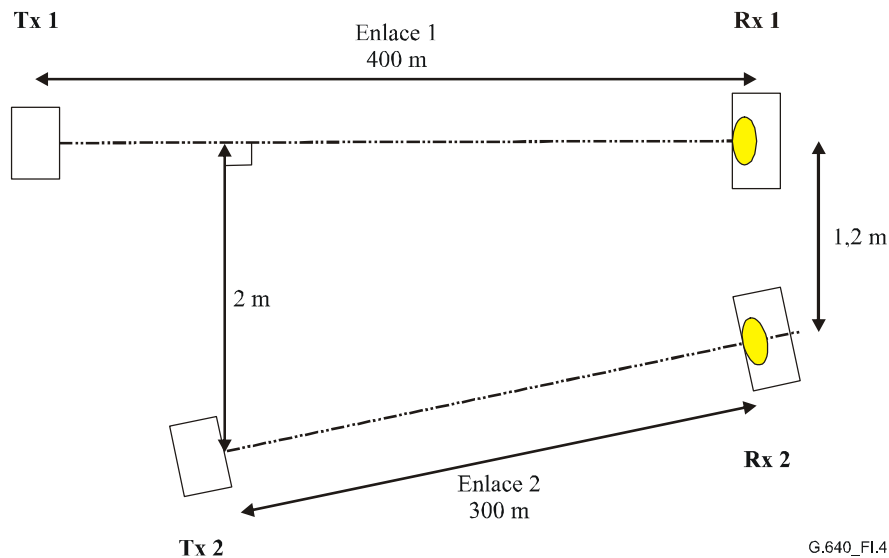


Figura I.4/G.640 – Configuración del Ejemplo 3

Las características de los dos sistemas son:

- Máxima potencia total transmitida 8 mW y mínima 5 mW.
- Máxima divergencia del haz del transmisor en las condiciones climáticas más desfavorables (d) 4 mrad.
- Mínima tasa de extinción del transmisor 10 dB.
- Máximo ángulo de admisión del receptor (a) 6 mrad.
- El receptor posee un umbral de decisión de potencia medio.
- Precisión de ajuste del transmisor y del receptor 1 mrad.
- Máxima penalización por diafonía 0,5 dB.
- En el enlace 1, la distancia entre el transmisor y el receptor es de 400 m.
- En el balance del enlace 1 se asigna a la atenuación atmosférica un valor de 25 dB.
- En el enlace 2, la distancia entre el transmisor y el receptor es de 300 m.

¿Será aceptable para ambos sistemas la penalización por diafonía?

En la figura I.5 se muestra un diagrama de referencia con el enlace 1 como el sistema deseado.

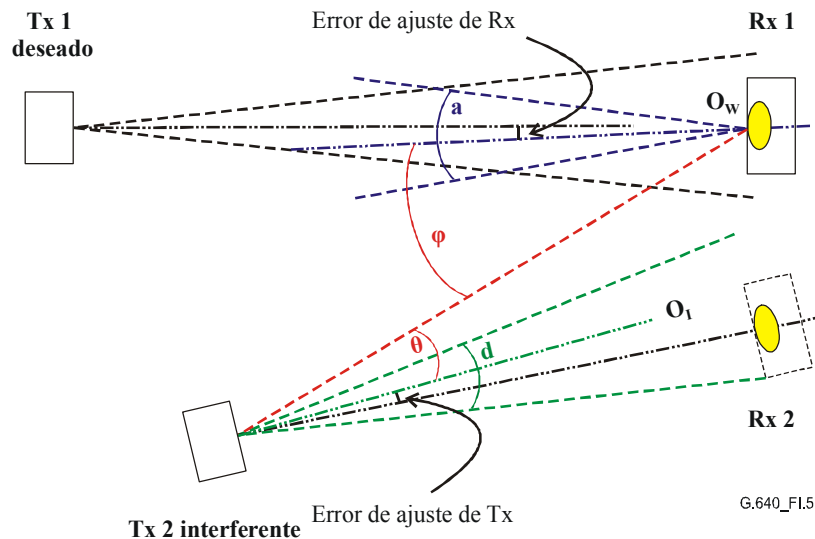


Figura I.5/G.640 – Diagrama de referencia de la diafonía el Ejemplo 3 para el enlace 1

Aplicando el procedimiento indicado en 6.5 con Tx 1 como transmisor deseado y Tx 2 como transmisor interferente, se obtienen los siguientes resultados:

- 1) La máxima penalización óptica debida a diafonía es de 0,5 dB.
- 2) Como los dos sistemas poseen el mismo diseño, las longitudes de onda pueden ser iguales, por tanto se trata del caso A – diafonía interferométrica.
- 3) Cálculo de la relación de diafonía para el caso A.
 - a) Caso A. Para la diafonía interferométrica con umbral de decisión de potencia medio se usa la ecuación 6-4 para calcular que $C_I = -32,6$ dB produciría una penalización de 0,5 dB con una tasa de extinción de 10 dB. En términos lineales, $C_I = 0,000545$.
- 4) A partir de la geometría definida en la figura I.4 el ángulo $\varphi \approx 1000 \times \arctan(2/300) - 1$ mrad que es 5,67 mrad, y el ángulo $\theta \approx 1000 \times \arctan(1,2/300) - 1$ mrad que es 3,0 mrad. Como el enlace 2 es más corto que el enlace 1, la relación entre O_I y O_W depende del cuadrado de las distancias del enlace, de las condiciones meteorológicas y de la relación entre la máxima y mínima potencia transmitida (puesto que el transmisor interferente podría emitir a la máxima potencia y el deseado a la mínima). Dicha relación será por tanto:

$$\frac{O_I}{O_W} = \frac{8 \cdot 400^2}{5 \cdot 300^2} 10^{\frac{\left(25 - 25 \frac{300}{400}\right)}{10}} = 12$$

en la que el último término tiene en cuenta la atenuación atmosférica en el enlace 2 en las condiciones en que existe una atenuación de 25 dB en el enlace 1. Como las longitudes de onda pueden ser idénticas e iguales a $L = 1$, la ecuación 6-3 se transforma en:

$$C = 12 e^{-\frac{8 \times 3,0^2}{4^2}} e^{-\frac{8 \times 5,67^2}{6^2}} = 0,0000106 = -39,7 \text{ dB}$$

Dado que este valor de diafonía es inferior a $-32,6$ dB, que es el máximo que puede tolerar el receptor, la geometría de los enlaces propuesta es aceptable para el enlace 1.

En la figura I.6 se muestra un diagrama de referencia con el enlace 2 como el sistema deseado.

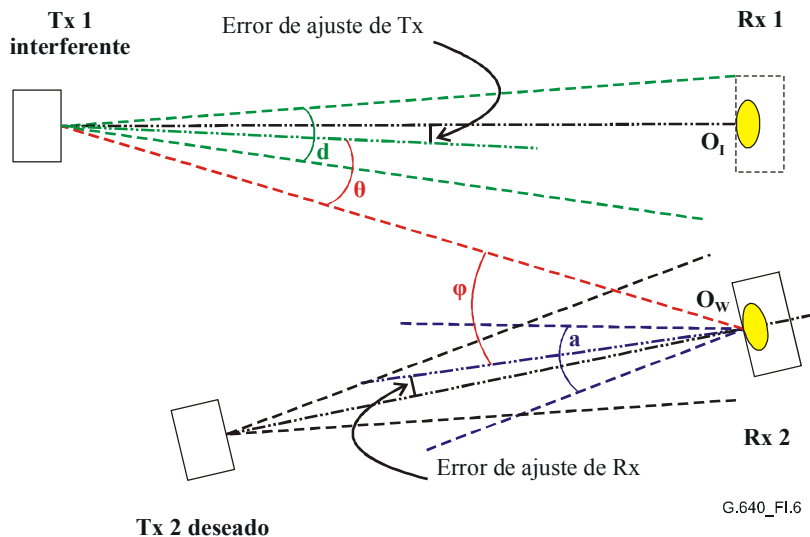


Figura I.6/G.640 – Diagrama de referencia de la diafonía del Ejemplo 3 para el enlace 2

Aplicando el procedimiento indicado en 6.5 para Tx 2 como transmisor deseado y Tx 1 como transmisor interferente, se obtienen los siguientes resultados:

- 1) La máxima penalización óptica debida a diafonía es de 0,5 dB.
- 2) Como los dos sistemas poseen el mismo diseño, las longitudes de onda pueden ser iguales, por tanto se trata del caso A – diafonía interferométrica.
- 3) Cálculo de la relación de diafonía para el caso A.
 - a) Caso A. Para la diafonía interferométrica con umbral de decisión de potencia medio se usa la ecuación 6-4 para calcular que $C_I = -32,6$ dB produciría una penalización de 0,5 dB con una tasa de extinción de 10 dB. En términos lineales, $C_I = 0,000545$.
- 4) A partir de la geometría definida en la figura I.4, el ángulo $\phi \approx 1000 \times (\arctan(0,8/300) + \arctan(1,2/400)) - 1$ mrad, que es 4,67 mrad, y el ángulo $\theta \approx 1000 \times \arctan(1,2/400) - 1$ mrad que es 2,0 mrad.

Como el enlace 2 es más corto que el enlace 1, la relación entre P_I y P_W depende del cuadrado de las distancias del enlace, de las condiciones meteorológicas y de la relación entre la máxima y mínima potencia transmitida (puesto que el transmisor interferente podría emitir a la máxima potencia y el deseado a la mínima). La diafonía será peor para condiciones de cielo despejado, siendo por tanto la relación de caso más desfavorable:

$$\frac{P_I}{P_W} = \frac{8 \ 300^2}{5 \ 400^2} = 0,9$$

Puesto que las longitudes de onda pueden ser idénticas e iguales a $L = 1$, la ecuación 6-3 se transforma en:

$$C = 0,9 e^{\frac{-8 \times 2,0^2}{4^2}} e^{\frac{-8 \times 4,67^2}{6^2}} = 0,000964 = -30,2 \text{ dB}$$

Como este valor de diafonía es superior a $-32,6$ dB, que es el máximo que puede tolerar el receptor, debe modificarse la geometría de los enlaces propuesta con objeto de evitar que el enlace 1 rebase su penalización de diafonía máxima. Ello puede lograrse aumentando la separación de los receptores hasta al menos 1,4 m.

SERIES DE RECOMENDACIONES DEL UIT-T

Serie A	Organización del trabajo del UIT-T
Serie D	Principios generales de tarificación
Serie E	Explotación general de la red, servicio telefónico, explotación del servicio y factores humanos
Serie F	Servicios de telecomunicación no telefónicos
Serie G	Sistemas y medios de transmisión, sistemas y redes digitales
Serie H	Sistemas audiovisuales y multimedios
Serie I	Red digital de servicios integrados
Serie J	Redes de cable y transmisión de programas radiofónicos y televisivos, y de otras señales multimedios
Serie K	Protección contra las interferencias
Serie L	Construcción, instalación y protección de los cables y otros elementos de planta exterior
Serie M	Gestión de las telecomunicaciones, incluida la RGT y el mantenimiento de redes
Serie N	Mantenimiento: circuitos internacionales para transmisiones radiofónicas y de televisión
Serie O	Especificaciones de los aparatos de medida
Serie P	Calidad de transmisión telefónica, instalaciones telefónicas y redes locales
Serie Q	Conmutación y señalización
Serie R	Transmisión telegráfica
Serie S	Equipos terminales para servicios de telegrafía
Serie T	Terminales para servicios de telemática
Serie U	Conmutación telegráfica
Serie V	Comunicación de datos por la red telefónica
Serie X	Redes de datos, comunicaciones de sistemas abiertos y seguridad
Serie Y	Infraestructura mundial de la información, aspectos del protocolo Internet y Redes de la próxima generación
Serie Z	Lenguajes y aspectos generales de soporte lógico para sistemas de telecomunicación