

B.8. Dispositivos para sistemas de comunicaciones ópticas

B.8.1. Introducción

Hemos visto en los capítulos anteriores todas las familias de dispositivos que conforman los componentes optoelectrónicos. La pregunta es si todos ellos son capaces de aportar una mejora sustancial a la era de las comunicaciones. Aunque los ordenadores ópticos que realizan los cálculos a velocidad de la luz no son realidad todavía, sí que existen muchas aplicaciones donde los componentes fotónicos han sobrepasado a los componentes electrónicos. Un ejemplo claro son las comunicaciones ópticas. Las redes de comunicaciones ópticas han sobrepasado a las redes electrónicas y se han establecido como redes de alto rendimiento.

Aunque el uso de la luz para transmitir información comenzó probablemente con el descubrimiento del fuego, en la edad moderna las comunicaciones ópticas nacieron con el LED y el LD y la aparición de fibras ópticas de bajas pérdidas. Siendo las fibras ópticas elementos imprescindibles en las comunicaciones ópticas se exige que los dispositivos que hacen uso de estas fibras sean completamente compatibles con ellas. Uno de los desarrollos más grandes se está dando en los componentes ópticos para aplicaciones de comunicaciones ópticas vía fibra óptica. Es en estas aplicaciones donde las exigencias a los componentes es más grande.

Después de ver las características de LEDs, LDs y detectores ópticos la pregunta clara es si de verdad se necesitan LDs de sólo 3Å de ancho de espectro y no es suficiente con un LED con un ancho de espectro de 200Å a una longitud de onda de 8800Å y con 100μW para un sistema de transmisión a 1Gbps. Para responder a esta pregunta hay que conocer los fundamentos de los sistemas de comunicación en general y de los sistemas de comunicaciones basados en fibra óptica en particular.

B.8.2. El sistema de comunicación óptica

Las comunicaciones ópticas es el área que más está evolucionando en los últimos tiempos y esto a pesar de que aún no existen los componentes ópticos que nos permitan explotar al máximo todas las posibilidades que nos ofrecen estas comunicaciones. En la actualidad sólo se utiliza una pequeña parte de la capacidad del sistema lo que sugiere que aún nos queda un gran desarrollo por delante.

Las principales ventajas de las comunicaciones ópticas vienen de la fibra óptica y sus propiedades. La información se transmite a través de una fibra óptica. Para ello se codifica la señal electrónica y se convierte en señal óptica, se inyecta en la fibra, se transmite, tal vez a cierta distancia se conmuta y/o se amplifica y finalmente se detecta y se demodula.

En sistemas reales la señal óptica se atenúa y es pues necesaria su amplificación (repetidores). Los circuitos para conmutar las señales y así dirigirlos de un canal a otro son

dispositivos bastante complejos que incluyen detectores, LDs y electrónica digital para tomar decisiones. Estos dispositivos ya los hemos visto en el tema anterior.

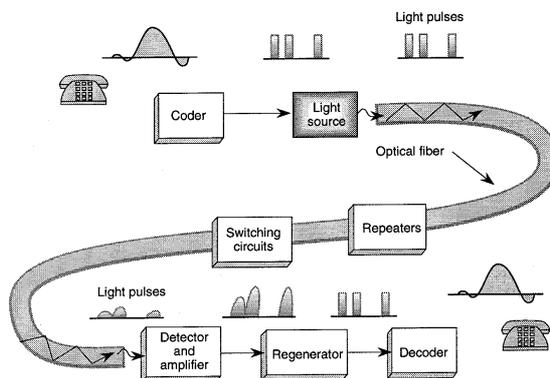


Fig. B.8.1: Componentes de un sistema de comunicación óptica.

El sistema óptico de comunicaciones es muy similar al electrónico (microondas). Las diferencias están en la longitud de onda y el uso de fibra óptica en vez de cables metálicos. El uso de fibras tiene cuatro ventajas principales que son: i) menor necesidad de repetidores, ya que la atenuación de una fibra es mucho menor que la de un cable; ii) se tiene una mucho mayor capacidad de información debido al uso de frecuencias ópticas; iii) el sistema es de bajo coste y bajo peso y iv) los efectos de interferencias electromagnéticas son mínimas. En la actualidad debido a las limitaciones de los componentes no se aprovecha todo el ancho de banda de la fibra óptica.

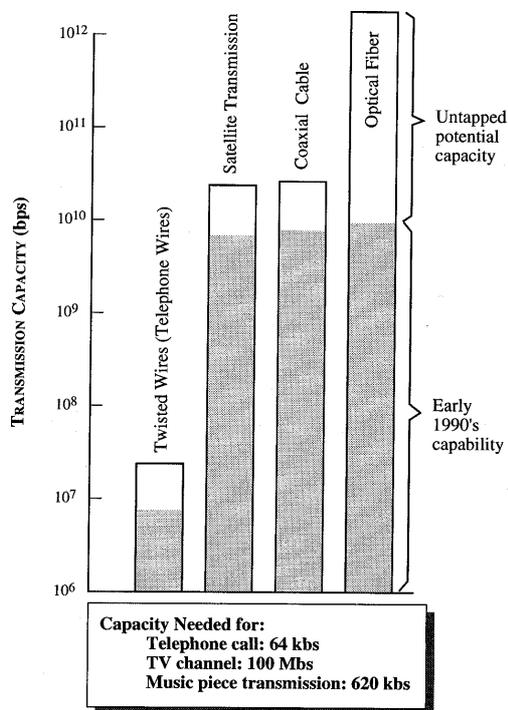


Fig. B.8.2: Comparación de las capacidades de transmisión de los medios más usados. Se muestran las capacidades aprovechadas y las disponibles. También se muestran las velocidades de transmisión necesarias para algunos tipos de información. Además la compresión de datos puede reducir mucho el ancho de banda necesario.

B.8.3. Contenido de información y capacidad de canal

En los sistemas de comunicación óptica modernos, la información a enviar se codifica de forma digital. Es decir el pulso pasa de un estado alto a uno bajo. Una vez acabada la transmisión, se debe poder convertir la señal óptica para recuperar la señal original. La pregunta en este caso es: si una señal analógica tiene un contenido máximo de frecuencia f_m , ¿a qué frecuencia se debe muestrear para que la señal se reciba completamente a la salida? Según el teorema del muestreo la señal debe muestrearse a una frecuencia el doble que la máxima frecuencia a transmitir para poder recuperar toda la señal original. Por tanto la frecuencia de transmisión depende de la frecuencia de la información a enviar. Una conversación telefónica necesita una frecuencia de transmisión de 64kbps, mientras que una señal musical de alta fidelidad requiere 620kbps. Para un canal de televisión necesitamos ~75Mbps.

La capacidad usual de un sistema de fibra óptica está por encima de los terabits (~10% de la frecuencia óptica), de forma que para mejorar el uso del sistema se multiplexan señales de múltiples fuentes antes de enviarse.

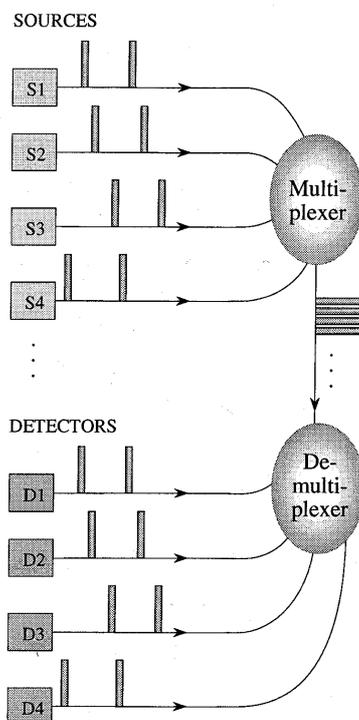


Fig. B.8.3: Multiplexación realizada para aprovechar la gran capacidad de un canal de transmisión de información. En la actualidad no se puede realizar una multiplexación en frecuencia o longitud de onda en sistemas ópticos, por lo que no se aprovecha todo el potencial de la fibra óptica. La multiplexación se hace en serie.

En la actualidad no existen circuitos ópticos prácticos que utilicen multiplexación por división de frecuencia (FDM) en la cual se usan unos cuantos canales de frecuencia como frecuencias portadoras y se codifica la información sobre estas frecuencias. Este sería el sistema óptimo pero en la actualidad es difícil desarrollar sistemas de detección que realicen una detección "coherente" para que se decodifique de forma selectiva la información sobre las frecuencias portadoras. Las investigaciones se dirigen hacia fuentes de láseres con estrechos y estables anchos de banda con el deseo de obtener sistemas ópticos coherentes, sistemas que permitan detectar la fase o la frecuencia de una señal.

Otra posible multiplexación es la multiplexación de división de longitud de onda (WDM) donde las fuentes emiten la información codificada en diferentes "colores" o "longitudes de onda" luminosas. Estos colores pueden viajar por la fibra óptica sin interferirse. En la actualidad este esquema está investigándose, habiendo muchos retos en lo que se refiere a fuentes ópticas sintonizables de confianza que sean capaces de emitir a diferentes longitudes de onda próximas en el espectro.

Debido a la falta de dispositivos que puedan emplearse en los esquemas FDM o WDM, las posibilidades de la fibra óptica de transmitir señales en paralelo no se aprovechan completamente. Por ello en la actualidad la información capaz de ser transmitida por las fibras ópticas no supera a la de las microondas. Las ventajas son sólo debido a coste, fiabilidad y reducción de tamaño.

En la actualidad se utiliza la multiplexación por división temporal (TDM) donde la información se manda en serie durante diferentes intervalos de tiempo. Esta multiplexación no aprovecha completamente la capacidad de la fibra óptica.

Volvemos por tanto al problema de que las exigencias planteadas sobre los componentes fotónicos vienen de la capacidad de las fibras ópticas.

B.8.4. Técnicas de modulación y detección

Los detectores optoelectrónicos se utilizan para múltiples aplicaciones, siendo una de las más importantes dentro del área de las comunicaciones. Ya hemos dicho que la información que va a ser transmitida, se codifica en el haz de luz portador (un haz óptico para comunicaciones), el cual luego es transmitido por un medio apropiado. El sistema detector es el responsable de la decodificación de la información enviada y su diseño y funcionamiento está íntimamente ligado al sistema de codificación empleado. Debido a las limitaciones de los componentes semiconductores en la actualidad no se pueden utilizar todos los sistemas de codificación existentes. Vamos a analizar los sistemas de codificación más importantes ya que tarde o temprano se utilizarán todos ellos para la transmisión de información.

El rayo de luz que "lleva" la información se caracteriza por su amplitud, frecuencia o longitud de onda y fase así como su intensidad (que viene determinada por su amplitud). Podemos modular todas estas magnitudes para codificar la información.

B.8.4.1. Modulación de amplitud

La modulación de la amplitud (AM) es una de las técnicas más utilizadas para transmitir información vía microondas. El campo de la onda portadora es representado por

$$F_c = F_{co} \sin \omega_c t \quad (\text{B.8.1})$$

y el de la señal moduladora

$$F_m = F_{mo} \sin \omega_m t \quad (\text{B.8.2})$$

En la modulación de amplitud, la amplitud máxima F_{co} de la onda portadora es proporcional al campo modulador instantáneo $F_{mo} \sin\omega_m t$. Se define el índice de modulación como,

$$m = \frac{F_{mo}}{F_{co}} \quad (B.8.3)$$

La amplitud modulada de la señal portadora será,

$$\begin{aligned} A &= F_{co} + F_m = F_{co} + F_{mo} \sin\omega_m t \\ &= F_{co} + mF_{co} \sin\omega_m t \\ &= F_{co}(1 + m \sin\omega_m t) \end{aligned} \quad (B.8.4)$$

El campo asociado a la portadora modulada es entonces,

$$\begin{aligned} F &= A \sin\omega_c t = F_{co}(1 + m \sin\omega_m t) \sin\omega_c t \\ &= F_{co} \sin\omega_c t + \frac{mF_{co}}{2} \cos(\omega_c - \omega_m)t - \frac{mF_{co}}{2} \cos(\omega_c + \omega_m)t \end{aligned} \quad (B.8.5)$$

La portadora de amplitud modulada contiene tres términos: i) el término correspondiente a la portadora no modulada; ii) la banda lateral superior (USB) con frecuencia $\omega_c + \omega_m$; iii) la banda lateral inferior (LSB) con frecuencia $\omega_c - \omega_m$.

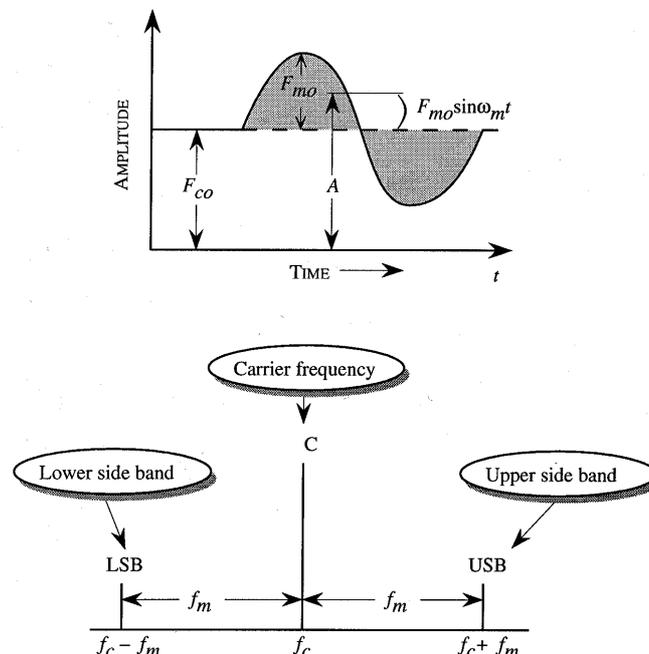


Fig. B.8.4: Amplitud de una onda portadora modulada en amplitud y sus componentes frecuenciales.

Hay que tener en cuenta que las frecuencias portadoras ópticas están en el rango de 10^{14} Hz y 10^{15} Hz mientras que las frecuencias moduladoras son del orden de 10^{10} Hz debido a que están limitadas por la electrónica y los transmisores ópticos (láseres). Para decodificar esta información debemos ser capaces de construir un sistema de detección que pueda aislar

las bandas laterales (USB o LSB). Esto no es fácil en el régimen de señales luminosas aunque se haga continuamente con señales de radio.

B.8.4.2. Modulación de frecuencia

Otra técnica de modulación muy utilizada en transmisión de señales es la modulación de frecuencia (FM). Como su nombre indica en este procedimiento se modula la frecuencia de la señal portadora. De nuevo, el campo de la portadora no modulada puede escribirse como,

$$F_c = F_{co} \sin(\omega_c t + \phi) \quad (\text{B.8.6})$$

Donde el desfase es para tener un caso más general. Si la señal moduladora es,

$$F_m = F_{mo} \cos \omega_m t \quad (\text{B.8.7})$$

donde hemos elegido un término coseno por simplicidad, la frecuencia de la señal modulada será,

$$f = f_c (1 + k F_{mo} \sin \omega_m t) \quad (\text{B.8.8})$$

donde k es la constante de proporcionalidad, que depende de cómo se realiza la modulación. Las frecuencias extremas son,

$$f = f_c (1 \pm k F_{mo}) \quad (\text{B.8.9})$$

Como resultado, la señal no solo tiene la frecuencia de la portadora ω_c si no también otros términos de frecuencia. La señal de FM requiere una mayor anchura de espectro para la transmisión. Esta necesidad de un mayor ancho de banda se compensa con un menor ruido posible en sistemas de detección de FM.

La modulación de fase o PM está íntimamente relacionada con la modulación FM, salvo que ahora la señal moduladora modula la fase de la señal portadora.

Hasta ahora hemos visto técnicas de modulación pero de señales analógicas. En la actualidad se utilizan cada vez más codificaciones digitales. En estos casos las magnitudes amplitud, frecuencia o fase se modulan no de forma continua si entre dos estados que se corresponden con el bit 0 y 1. Estas modulaciones se llaman entonces ASK, FSK y PSK ("amplitud-, frequency-, phase shift keying").

Para utilizar estas técnicas los transmisores ópticos deben ser muy estables en amplitud, frecuencia y fase. Además de existir estas premisas para la fuente el detector también debe ser muy preciso. El término detección "coherente" es empleado para señales codificadas AM o FM debido a la necesidad de tener fuentes y sistemas de detección de frecuencia (fase) estables. Estas técnicas parecen muy prometedoras por el bajo ruido introducido y por la posibilidad de poder multiplexar por división de frecuencia y obtener un gran ancho de banda. De todos modos estas técnicas coherentes de modulación no son muy utilizadas por su alto coste debido principalmente a no disponer de componentes fotónicos con calidad necesaria. Se compara a veces el estado de estos sistemas con el de la radio antes de 1930.

B.8.4.3. Modulación de intensidad

Como ya hemos visto los dispositivos existentes en la actualidad no están todavía preparados para las técnicas de modulación que acabamos de describir. Por ello la técnica más utilizada es la modulación de intensidad (IM). En esta técnica se modula la potencia óptica de una fuente para enviar una señal. La señal se detecta entonces directamente. Pero existen dos desventajas en la modulación de intensidad que son los niveles de ruido que se producen y el desaprovechamiento del ancho de banda disponible del sistema.

B.8.5. Propiedades de las fibras ópticas

La motivación de las comunicaciones ópticas viene de las grandes ventajas existentes en el uso de fibra óptica frente a cables metálicos. Las fuentes de luz más utilizadas son LDs y LEDs teniéndose que acoplar su luz a la fibra óptica en la mayoría de las aplicaciones.

En un tema anterior ya vimos algunas de las características más importantes de la fibra óptica como el ángulo de entrada, la apertura numérica, los modos, etc. A continuación vamos a ver otras características muy importantes de las fibras.

B.8.5.1. Pérdidas de la fibra

En una fibra ideal, las ondas ópticas se propagan por el núcleo de la fibra cubierto por el recubrimiento sin pérdidas. Pero en fibras reales existen pérdidas de varios orígenes.

- i) *Pérdidas por absorción:* La luz puede excitar ciertas transiciones en el material que compone la fibra. Las pérdidas de absorción son $e^{-\alpha L}$ donde α es el coeficiente de absorción y L es el camino óptico. El valor de α suele ser de $0,02\text{km}^{-1}$. Las pérdidas de absorción son muy importantes ya que determinan qué distancia puede recorrer la señal óptica antes de que deba ser regenerada por un repetidor. En la siguiente figura se muestra la dependencia de las pérdidas con la longitud de onda en fibras de silicio.

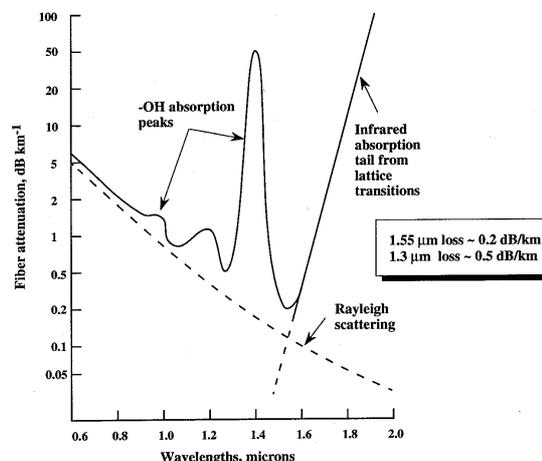


Fig. B.8.5: Atenuación en fibras ópticas en función de la longitud de onda. Las longitudes de onda más apropiadas son $1,3\mu\text{m}$ y $1,55\mu\text{m}$. Las pérdidas se reducen cada vez más con el avance de la técnica.

- ii) *Pérdidas por dispersión (scattering):* Estas pérdidas son debidas principalmente a irregularidades en la fibra que se producen durante el proceso de fabricación. La mejora de las técnicas reduce tales pérdidas.
- iii) *Pérdidas por doblamiento:* Si se dobla la fibra demasiado (circunferencias de radio de varios milímetros), la luz no puede seguir el camino marcado por el interior de la fibra y parte no se reflejará si no que se refractará, perdiéndose esa luz.

Más adelante analizaremos las consecuencias de estas atenuaciones.

B.8.5.2. Dispersión multi-camino o modal

La dispersión multi-camino (modal) en fibras ópticas es muy importante, especialmente en fibras de núcleo ancho. Este problema es debido al hecho de que un haz óptico tiene varios caminos para recorrer una determinada distancia L por el interior de la fibra. Supongamos que inciden en una fibra señales luminosas con ángulos entre $\theta = 0^\circ$ (rayo axial) y $\theta = \theta_A$ (rayo extremo). Los dos caminos están definidos por el rayo axial y el rayo oblicuo que entra con un ángulo ϕ_{1c} .

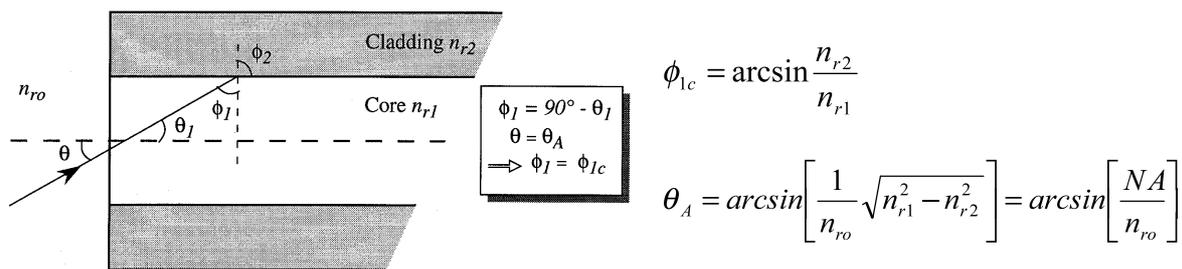


Fig. B.8.6: Esquema empleado para la explicación de la dispersión modal en una fibra óptica.

Los rayos viajan a una velocidad v igual a,

$$v = \frac{c}{n_{r1}} \tag{B.8.10}$$

y por tanto el rayo axial tarda un tiempo t_a en realizar su recorrido a través de la fibra óptica de longitud L,

$$t_{axial} = \frac{L}{v} = \frac{n_{r1} \cdot L}{c} \tag{B.8.11}$$

El rayo extremo, sin embargo, debe recorrer una distancia mayor que viene dada por $L/\sin\phi_{1c}$. El tiempo que tarda es,

$$t_{extremo} = \frac{n_{r1} \cdot L}{c \cdot \sin\phi_{1c}} = \frac{n_{r1}^2 \cdot L}{n_{r2} \cdot c} \tag{B.8.12}$$

Por tanto si una fuente inyecta ambos rayos existirá una diferencia temporal hasta que aparezca el rayo extremo comparado con el rayo axial.

$$\Delta t_{\text{modal}} = t_{\text{extremo}} - t_{\text{axial}} = \frac{n_{r1} \cdot L}{c} \cdot \left[\frac{n_{r1}}{n_{r2}} - 1 \right] = \frac{n_{r1} \cdot L \cdot \Delta n_r}{n_{r2} \cdot c} \quad (\text{B.8.13})$$

donde $\Delta n_r = (n_{r1} - n_{r2})$. La dispersión multi-camino o modal se suele dar en función de la dispersión temporal por unidad de longitud,

$$\frac{\Delta t_{\text{modal}}}{L} = \frac{n_{r1} \cdot \Delta n_r}{n_{r2} \cdot c} \quad (\text{B.8.14})$$

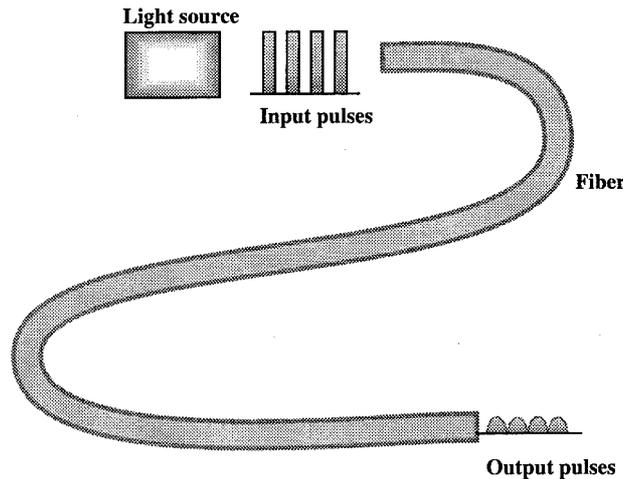


Fig. B.8.7: Dispersión de un pulso debido a los retrasos multi-camino en una fibra óptica. Esta dispersión limita el máximo ancho de banda para la transmisión en serie para una distancia determinada.

Esto se traduce que un pulso de entrada se deforma debido a esta dispersión y emerge con una anchura Δt_{modal} . Esta dispersión está muy relacionada con el ancho de banda de la fibra para una distancia determinada. Una buena aproximación de la limitación del ancho de banda (BW_{modal}) para la dispersión multi-camino o modal es,

$$BW_{\text{modal}} \cong \frac{BR_{\text{modal}}}{2} = \frac{1}{4 \cdot \Delta t_{\text{modal}}} = \frac{n_{r2} \cdot c}{4 \cdot n_{r1} \cdot L \cdot \Delta n_r} \quad (\text{B.8.15})$$

El producto de ancho de banda - distancia vale entonces,

$$BW_{\text{modal}} \cdot L = \frac{n_{r2} \cdot c}{4 \cdot n_{r1} \cdot \Delta n_r} \quad (\text{B.8.16})$$

Para un alto producto ancho de banda - distancia, el valor de Δn_r debe ser pequeño. Como la apertura numérica es proporcional a Δn_r , esto significa que para la transmisión a altas frecuencias, la apertura numérica debe ser pequeña. Pero no hay que olvidar que si reducimos Δt_{modal} reduciendo la apertura numérica esto puede tener efectos negativos en el acoplamiento del rayo de luz a la fibra, especialmente si el rayo de luz no está muy colimado (caso de un LED). Por tanto, para recoger suficiente luz necesitamos una fibra óptica con una apertura numérica grande, pero esto reduce el producto ancho de banda - distancia. Con fuentes láser podemos generar rayos muy colimados y utilizar así fibras con un gran producto ancho de banda - distancia.

Para mejorar el producto ancho de banda - distancia de una fibra se pueden tomar algunas medidas especiales. La primera es el empleo de fibras con un cambio de índice de refracción gradual. Esta graduación permite obtener productos ancho de banda - distancia mucho mayores comparados con las fibras de índices con cambio escalón.

Una fibra que está tomando cada vez más importancia es la fibra monomodo. Cuando el diámetro de la fibra empieza a ser comparable a la longitud de onda de la luz, ya no podemos aplicar la óptica geométrica para estudiar estas fibras y hay que recurrir a las ecuaciones de Maxwell. Cuando las dimensiones de la fibra se reducen lo suficiente llegará un momento en el que sólo se podrá propagar un modo por la fibra óptica. Las fibras que tienen estas características se llaman fibras monomodo. La condición para una fibra con un cambio de índice escalón y un radio de núcleo a sea una fibra monomodo es,

$$V = \frac{2 \cdot \pi \cdot a \cdot \sqrt{n_{r1}^2 - n_{r2}^2}}{\lambda} \leq 2,405 \quad (\text{B.8.17})$$

Si se elige un núcleo con el diámetro lo suficientemente pequeño podemos fabricar una fibra monomodo. El diámetro del recubrimiento se sigue manteniendo entre 60µm y 100µm para preservar la rigidez de la fibra. Como sólo viajará un modo por la fibra no existirá dispersión multi-camino.

B.8.5.3. Dispersión por el material

A parte del problema que acabamos de describir existe otra limitación en la capacidad de la fibra debido a la dispersión del propio material de la fibra. Esta dispersión surge de la variación del índice de refracción de la fibra óptica con la longitud de onda. Debido a esta variación, radiaciones de diferente longitud de onda recorren diferentes caminos ópticos y por tanto aparecen retrasos. Obviamente esta dispersión no aparecerá si tenemos una sola longitud de onda. Pero aún las fuentes de luz más puras tienen un espectro de emisión.

En un material donde el índice de refracción depende de la longitud de onda podemos definir la velocidad de fase, v_p , que define el cambio de fase de una señal y la velocidad de grupo, v_g , que define la velocidad de transferencia de energía por parte de la señal. Ambas valen,

$$v_p = \frac{\omega}{k} \quad (\text{B.8.18})$$

y

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} \quad (\text{B.8.19})$$

Si el material no tiene dispersión, la velocidad de grupo y la de fase son la misma. También se definen el índice de refracción ordinario, n_r , para la velocidad de fase y el índice de refracción de grupo, n_g . Se relacionan con las velocidades respectivas de la forma,

$$n_r = \frac{c}{v_p} \quad (\text{B.8.20})$$

y

$$n_g = \frac{c}{v_g} \quad (\text{B.8.21})$$

En general n_r y n_g son función de la longitud de onda λ . Podemos escribir,

$$n_g = \frac{c}{v_g} = c \cdot \frac{dk}{d\omega} = c \cdot \frac{d}{d\omega} \left(\frac{\omega \cdot n_r}{c} \right) = n_r + \omega \cdot \frac{dn_r}{d\omega} \quad (\text{B.8.22})$$

También tenemos que

$$\frac{dn_r}{d\omega} = \frac{dn_r}{d\lambda} \frac{d\lambda}{d\omega}$$

Como, para una longitud de onda λ en el espacio libre

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot c}{\lambda} \Rightarrow \frac{d\omega}{d\lambda} = -\frac{2 \cdot \pi \cdot c}{\lambda^2} \quad (\text{B.8.23})$$

podemos obtener a partir de las ecuaciones anteriores,

$$n_g = n_r - \frac{2 \cdot \pi \cdot c}{\lambda} \cdot \frac{dn_r}{d\lambda} \left(\frac{\lambda^2}{2 \cdot \pi \cdot c} \right) = n_r - \lambda \cdot \frac{dn_r}{d\lambda} \quad (\text{B.8.24})$$

lo que da una velocidad de grupo igual a,

$$v_g = \frac{c}{n_g} = \frac{c}{n_r + \omega \cdot \frac{dn_r}{d\omega}} = \frac{c}{n_r - \lambda \cdot \frac{dn_r}{d\lambda}} \quad (\text{B.8.25})$$

Un impulso de luz a una λ fija recorre una distancia L de la fibra durante un tiempo,

$$t = \frac{L}{v_g} = \left[n_r - \lambda \cdot \frac{dn_r}{d\lambda} \right] \cdot \frac{L}{c} \quad (\text{B.8.26})$$

Si la señal óptica del impulso luminoso tiene un espectro finito de longitudes de onda aparecerá un ensanchamiento temporal debido a los diferentes intervalos de tiempo que necesitan las diferentes longitudes de onda para atravesar la fibra. Si $\Delta\lambda$ es el espectro de longitudes de onda, el ensanchamiento temporal será (haciendo la derivada),

$$\frac{\Delta t}{\Delta\lambda} = -\frac{L}{c} \cdot \lambda \cdot \frac{d^2 n_r}{d\lambda^2} \quad (\text{B.8.27})$$

Una característica importante de una señal óptica es la anchura espectral de longitudes de onda $\Delta\lambda$ en la que se encuentra el 50% o más de la potencia de la señal luminosa. Se define la anchura espectral relativa de la fuente como,

$$\gamma = \left| \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right| = \left| \frac{\Delta\omega}{\omega} \right| \quad (\text{B.8.28})$$

Un impulso, después de viajar una distancia L a través de la fibra tendrá una dispersión temporal de potencia mitad ($\Delta t_{\text{material}}$) igual a,

$$\Delta t_{\text{material}} = -\frac{L}{c} \cdot \lambda \cdot \Delta\lambda \cdot \frac{d^2 n_r}{d\lambda^2} = -\frac{L}{c} \cdot \gamma \cdot \lambda^2 \cdot \left(\frac{d^2 n_r}{d\lambda^2} \right) \quad (\text{B.8.29})$$

Un parámetro muy importante es la dispersión temporal por unidad de longitud,

$$\frac{\Delta t_{\text{material}}}{L} = \frac{\gamma}{c} \cdot |Y_m| \quad (\text{B.8.30})$$

donde Y_m es la dispersión del material

$$Y_m = \lambda^2 \frac{d^2 n_r}{d\lambda^2} \quad (\text{B.8.31})$$

Podemos definir aproximadamente por $1/4 \cdot \Delta t_{\text{material}}$ el ancho de banda de la señal que puede transmitir un sistema de fibra a lo largo de una distancia L . La relación exacta depende del perfil espectral de la luz de salida. En ese caso tenemos,

$$BW_{\text{material}} \cong \frac{1}{4 \cdot \Delta t_{\text{material}}} = \frac{c}{4 \cdot L \cdot \gamma \cdot |Y_m|}$$

$$BW_{\text{material}} \cdot L = \frac{L}{4 \cdot \Delta t_{\text{material}}} = \frac{c}{4 \cdot \gamma \cdot |Y_m|} \quad (\text{B.8.32})$$

Esta relación destaca la importancia de la calidad de la fuente óptica γ y la dispersión en la fibra en la determinación de la capacidad del canal y la distancia hasta donde la señal se puede transmitir. Una pequeña dispersión en el espectro de la fuente óptica es crítica y es la razón del uso de LDs en vez de LEDs en sistemas de comunicaciones ópticas de alta calidad. Los valores típicos para este tipo de dispersión en fibras de silicio se muestran en la siguiente figura (los valores mostrados en la figura no son para Y_m , para ello se habrá de multiplicar el valor obtenido por $\lambda \cdot c$)

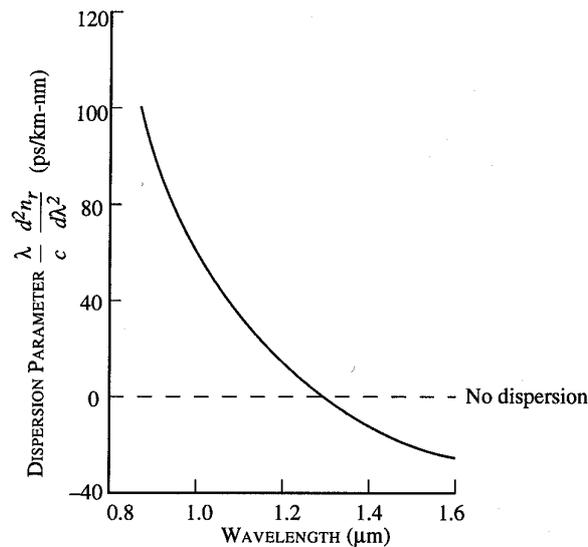


Fig. B.8.8: Curva de dispersión típica para una fibra de silicio. La dispersión se anula en $1,3\mu\text{m}$. Recordar que según Fig. B.8.5 la atenuación más baja en la fibra de silicio es para $1,55\mu\text{m}$, aunque no es demasiado alta en $1,3\mu\text{m}$.

Es interesante comparar la capacidad de un sistema fibra-fuente a una longitud de onda sin dispersión frente al caso de la longitud de onda de mínima atenuación (es decir, $1,3\mu\text{m}$ frente a $1,55\mu\text{m}$). La señal se puede enviar más lejos a $1,55\mu\text{m}$, pero el ancho de banda de transmisión no es tan grande como a $1,3\mu\text{m}$. El sistema óptimo debe considerar además las propiedades del detector y la dispersión modal de la fibra.

En esta sección y en la anterior hemos examinado dos importantes limitaciones para la capacidad de transmisión de la fibra, que son la dispersión modal y la dispersión del material. En general, ambas limitaciones estarán presentes en una fibra. Se define entonces un factor de ensanchamiento Δt_{tot} que, aunque para su correcta definición necesita tener en cuenta el perfil del pulso óptico, se puede aproximar por,

$$\Delta t_{\text{tot}} = \sqrt{\Delta t_{\text{in}}^2 + \Delta t_{\text{modal}}^2 + \Delta t_{\text{material}}^2} \quad (\text{B.8.33})$$

donde Δt_{tot} es la anchura total del pulso, Δt_{in} la anchura inicial antes de entrar en la fibra, Δt_{modal} la anchura debida a la dispersión multi-camino o modal y $\Delta t_{\text{material}}$ la anchura debida a la dispersión del material. En fibras monomodo, $\Delta t_{\text{modal}} = 0$.

B.8.5.4. Atenuación de la señal y requisitos del detector

Una consideración muy importante es la atenuación que sufre la luz al viajar por la fibra. La primera propuesta de utilizar fibras como guías de onda se debe a Kao y Hockham que calcularon que, para que la fibra fuese competitiva, la atenuación debía ser menor de 20dB/km. La atenuación en dB/km viene dada por,

$$\text{atenuación} = \frac{10 \cdot \log_{10} \frac{P_i}{P_f}}{L} \left[\frac{\text{dB}}{\text{km}} \right] \quad (\text{B.8.34})$$

donde P_i es la potencia óptica inicial y P_f la potencia emergente después de viajar una distancia L (en km). Obsérvese que el coeficiente de absorción α también define la relación entre la potencia de entrada y la de salida,

$$\frac{P_f}{P_i} = e^{-\alpha L} \quad (\text{B.8.35})$$

Así, una atenuación de 20dB/km se corresponde a un coeficiente de absorción de $4,6\text{km}^{-1}$. Las fibras ópticas modernas tienen una atenuación menor de 0,2dB/km a ciertas longitudes de onda. Algunas fibras de atenuaciones mayores se siguen utilizando en aplicaciones especiales debido a que pueden emplearse en medios hostiles, como por ejemplo bajo altas dosis de radiación. Bajo altas radiaciones algunas fibras se degradan más que otras.

La atenuación en la fibra se debe a varios procesos de dispersión de la luz al viajar por la fibra. Las mejoras de las fibras han venido con una mejor comprensión del proceso de absorción. Todas las fibras tienen mínimos en sus curvas de atenuación a longitudes de onda determinadas. La selección de la fuente óptica y el sistema de detección se verá muy influida por estas longitudes de onda. Las fibras más conocidas, las de silicio, tienen un mínimo en $1,55\mu\text{m}$ y otro relativo en $1,3\mu\text{m}$. La selección de la longitud de onda está condicionada por la dispersión de la fibra, atenuación, pureza espectral de la fuente así como los requisitos impuestos al sistema. Así para un sistema de red de área local (LAN), se puede escoger una fuente de GaAs ($\lambda \approx 0,88\mu\text{m}$) gracias a los avanzados componentes existentes de este material. Pero para largas distancias, la dispersión y la atenuación son mucho más importantes.

B.8.5.5. Amplificadores de fibra

Hemos visto como una señal óptica se degrada al viajar por una fibra óptica. Sería deseable, pues que existiese una fibra óptica con ganancia positiva que amplificase la luz conforme viaja por ella. Estas fibras se llaman amplificadores de fibra, siendo el más importante el amplificador de fibra dopado de erbio. La física de los amplificadores de fibra es similar a la de los láseres de semiconductor. En el amplificador de fibra dopado de erbio (EDFA), se insertan iones de erbio en el núcleo de la fibra durante el proceso de fabricación. Estos iones tienen asociados niveles energéticos a diferentes longitudes de onda. Los niveles que se aprovechan son el $4I_{15/2}$ y el $4I_{13/2}$. Los portadores se excitan mediante un láser semiconductor de $1,48\mu\text{m}$ por medio de bombeo óptico (inyección de fotones). Los portadores que se relajan pueden producir emisión y ganancia en un amplio espectro que va desde $1,5\mu\text{m}$ a $1,56\mu\text{m}$. El uso de iones de otras tierras raras puede dar lugar a amplificadores para otras regiones espectrales.

El desarrollo de EDFAs ha revolucionado los sistemas de comunicación óptica. Las pérdidas de la señal óptica cuando esta viaja pueden ser compensadas mediante estos

amplificadores de fibra, eliminando por tanto la necesidad de convertir a señales eléctricas y luego reconvertir a señales ópticas.

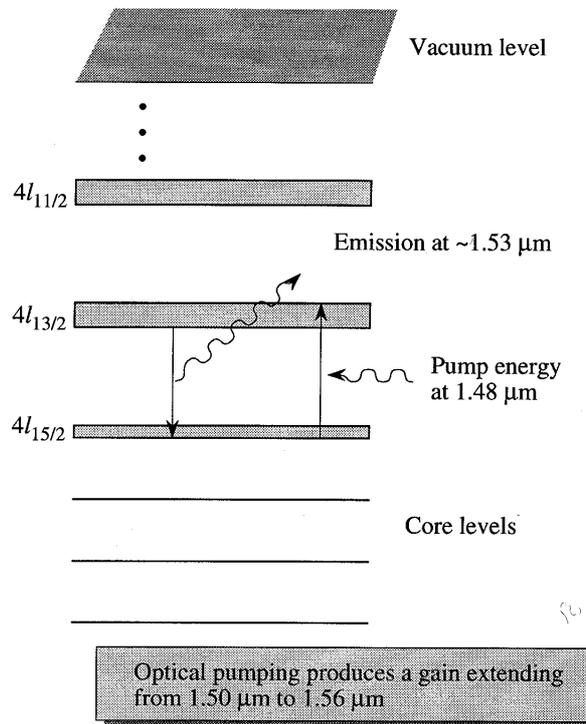


Fig. B.8.9: El diagrama de energía de los iones de erbio en fibras de silicio. La ganancia se consigue por bombeo óptico de forma que electrones del nivel $4I_{15/2}$ pasan al $4I_{13/2}$.

B.8.6. Resumen de los requisitos de los dispositivos

Las comunicaciones ópticas presentan una serie de requisitos sobre los componentes fotónicos, tales como fuentes de luz, detectores, conmutadores, etc. Acabamos de ver alguno de estos requisitos y aunque muchos ya son cumplidos en parte por los componentes existentes en la actualidad aún quedan muchos requisitos por cumplirse.

Fuentes de luz: Las fuentes ópticas todavía no están lo suficientemente desarrolladas como para que su fase y frecuencia sean lo suficientemente estables, para ser utilizadas en detección coherente. La detección coherente se basa en el mantenimiento de la fase de una señal a lo largo de un periodo de tiempo. Debido a esta falta de coherencia de fase (y frecuencia) las señales ópticas no pueden aprovechar el tremendo potencial existente de mandar billones de señales ópticas en paralelo por una única fibra.

El siguiente requisito sobre las fuentes es la emisión estable a una longitud de onda con una muy pequeña anchura espectral. Este requisito, aún no necesitando de gran coherencia es difícil de cumplir por los láseres modernos. La anchura espectral de los láseres es relativamente grande y su estabilidad no es muy satisfactoria. Por supuesto, se están realizando avances en este tema y en la actualidad ya se pueden enviar hasta 20 señales ópticas ("colores") en paralelo por una fibra.

Las fuentes ópticas de la actualidad se utilizan comercialmente para aplicaciones donde sólo se envía una señal por la fibra. Para este tipo de aplicaciones, la pureza espectral

del LED ya es suficiente únicamente para una LAN. Para comunicaciones a gran distancia, ya se necesitan diodos láser y preferentemente diodos láser de DFB.

Hasta ahora no se ha aprovechado la posibilidad de transmisión en paralelo de las fibras ópticas. La transmisión de datos se puede acelerar sólo por medio de fuentes más rápidas. Las velocidades de modulación del LED en la actualidad son menores de 5GHz (con pocas posibilidades de mayores mejoras) mientras que los diodos láser operan por debajo de los 30GHz. No es de esperar que los diodos láser alcancen los tiempos de respuesta que ya es posible alcanzar en dispositivos electrónicos (más de 300GHz). Por tanto, está claro que el futuro de las comunicaciones ópticas está íntimamente ligado a fuentes de láseres muy estables y sintonizables que puedan ser utilizadas en aplicaciones WDM y FDM.

Detectores: Los detectores actuales no son capaces de detectar longitud de onda o frecuencia de forma selectiva. Por tanto, aún si tuviésemos fuentes que pudiesen emitir a diferentes longitudes de ondas muy próximas, los detectores no serían capaces de distinguir estas señales. Sin embargo, los detectores son bastante adecuados y están muy bien desarrollados para las aplicaciones de transmisión de una única señal. Mediante el empleo de heteroestructuras y aleaciones, es posible cubrir bastante bien todas las longitudes de onda importantes en detección, los 0,88 μ m de las LAN, los 1,3 μ m y 1,55 μ m para aplicaciones de larga distancia.

Componentes fotónicos inteligentes: Los repetidores, conmutadores y guidores ocupan un lugar muy importante en las comunicaciones ópticas. Los repetidores se forman de dispositivos capaces de regenerar la señal cuando ésta se degrada cayendo a un valor bajo. La mayoría de los repetidores convierten la señal óptica en electrónica, la amplifican y la utilizan para excitar diodos láser volviéndola por tanto a convertir en luz. Un avance muy importante se está haciendo con los "amplificadores ópticos", de forma especial en los ya comentados con anterioridad amplificadores de fibra.

Los conmutadores y guidores son elementos críticos en un sistema de comunicación. La mayoría de ellos utilizan o componentes electrónicos o materiales de LiNbO₃. Aunque se están haciendo avances con el empleo como conmutadores de dispositivos basados en pozos cuánticos.

Vemos pues que aún queda un gran camino por recorrer por los componentes fotónicos lo que convierte esta área en un área en pleno desarrollo.

B.8.7. Dispositivos avanzados: circuito integrados optoelectrónicos (OEICs)

La gran ventaja de integrar muchos componentes electrónicos en un mismo chip hace buscar la misma integración para componentes fotónicos incluyendo incluso componentes electrónicos. Los OEICs no parecen ser algo fácil de conseguir. La integración de transistores, resistencias y capacidades no era difícil debido a la compatibilidad en el proceso de fabricación. Sin embargo, la integración del láser con su circuito de excitación (con un transistor FET o bipolar) o de un fotodetector con un amplificador tiene el problema de las incompatibilidades inherentes en estos dispositivos. Para el ejemplo del diodo láser, éste requiere una estructura p-i-n muy diferente de la estructura de cualquier transistor. Esta incompatibilidad necesita que si además se debe mantener un perfil bajo (estructura planar),

se deben hacer profundos atacados con ácido y repetir crecimientos. La técnica de crecimiento está todavía en su infancia por lo que no está muy desarrollada. Además, cuando un material es atacado con ácido, quedan defectos sobre la superficie de forma, después del recrecimiento, se tienen estados energéticos en la banda prohibida que pueden "atrapar" electrones. Se está realizando un gran esfuerzo en tecnología OEIC para obtener atacados menos dañinos y mejorar las técnicas de recrecimiento.

Si se quiere evitar el empleo de las técnicas de recrecimiento, se pueden integrar los dispositivos a diferentes niveles (es decir, a diferentes alturas respecto de la oblea). Esto, aunque sin embargo no es óptimo por el tamaño considerablemente mayor, proporciona circuitos con los que se puede trabajar. Casi todos los dispositivos tanto electrónicos como fotónicos han sido integrados, y resultados recientes indican niveles de funcionamiento que se aproximan a los de las tecnologías híbridas. Por supuesto, se espera que este progreso continúe, que los OEICs alcancen mejores prestaciones y ciertamente una mejor fiabilidad que los circuitos híbridos. Los avances en tecnología OEIC son fundamentales para el avance de la optoelectrónica.

B.8.8. Ejemplo de un sistema de transmisión de datos por fibra óptica

Vamos a diseñar un sistema de transmisión de datos digitales muy sencillo para mostrar los principios a tener en cuenta. Existen otras consideraciones tales como métodos de modulación, métodos de detección, y consideraciones de ruido que sin embargo no vamos a tener en cuenta y que sí deberán serlo en diseños más avanzados.

Hay que tener en cuenta tres factores: el ancho de banda, los niveles de potencia, y el error permitido. Desafortunadamente, los parámetros que influyen en uno de estos factores también influyen en los demás. Al estar interrelacionados los parámetros una solución óptima para uno de ellos puede no serlo para otro. Hay que buscar un compromiso.

Vamos a conectar dos ordenadores a una distancia de 10km. La velocidad de transmisión en baudios (Bd), que es el mayor número de unos o ceros que el sistema puede transmitir en un segundo, es de 30Mb/s. El error permitido (bit error rate, BER) es de 10^{-12} . Este último término será explicado más adelante. Debemos elegir la fibra, la fuente y el detector y calcular los niveles de potencia y los errores que se esperan.

Lo primero es elegir los componentes y a continuación considerar los tiempos de subida y los consumos de potencia de todos ellos para poder evaluar la calidad de la conexión.

La especificación de ancho de banda depende del método empleado para la modulación de pulsos. En todos los métodos la transmisión digital de información es gobernada por la señal de reloj, observar la siguiente figura (a). El método más sencillo (b) de representación es el formato NRZ (non-return-to-zero) en que un nivel lógico "1" es un impulso de una determinada amplitud A y duración τ y el nivel lógico "0" es representado por 0V durante un intervalo de tiempo de la misma duración τ . Este código tan sencillo parece muy natural y conveniente pero tiene una pobre capacidad de transmisión y, además, presenta una componente dc que no contiene información y que hace que tanto el emisor como el receptor consuman más potencia eléctrica que la que deberían consumir.

Otro código empleado es el código Manchester (c). En éste un nivel lógico "1" es representado por la transición de una señal eléctrica desde un nivel positivo $A/2$ a uno negativo $-A/2$ y el nivel lógico "0" es representado por la transición opuesta. Este código no presenta componente dc, pero tiene el inconveniente de que necesita dos veces el ancho de banda que requiere el NRZ para la transmisión.

Otro código es el RZ (return-to-zero) en que un nivel lógico "1" es un impulso de amplitud A y duración $\tau/2$ mientras que el nivel lógico "0" es representado por una señal cero. Los sistemas de comunicaciones basados en fibra óptica emplean principalmente el código NRZ.

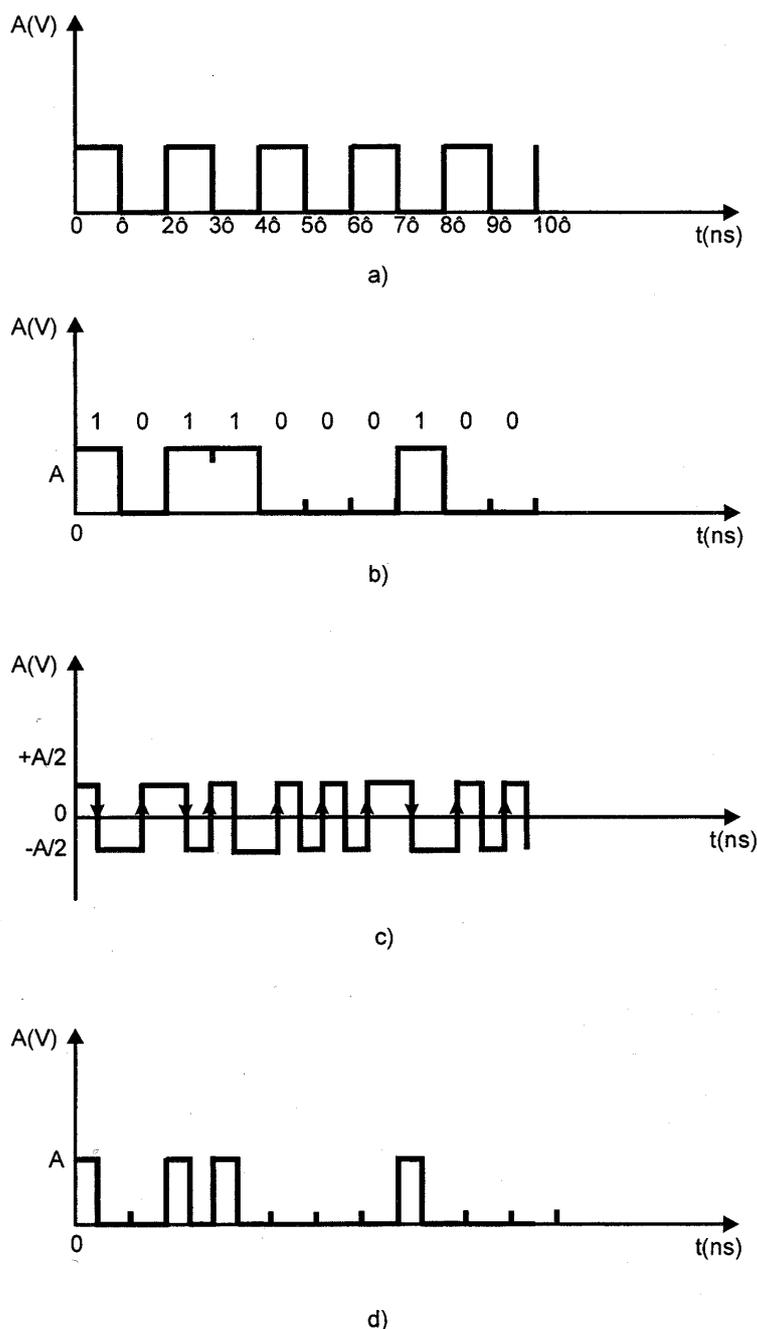


Fig. B.8.10: Códigos empleados para la transmisión de datos: (a) Señal de reloj. (b) Código NRZ. (c) Código Manchester. (d) Código RZ.

Si suponemos por tanto que el código empleado es el NRZ, entonces la duración del pulso y el periodo de repetición será: $T = 1/(\text{frecuencia de pulsos})$; en nuestro caso $1/30 \times 10^{-6} = 33,3\text{ns}$. Para detectar este pulso el tiempo de subida debe ser como máximo el 70% de la anchura del pulso, por tanto $33,3 \times 0,7 = 23,3\text{ns}$, por lo que el tiempo total de subida debe ser $\tau_s < 23,2\text{ns}$ y es la suma de,

$$\tau_s^2 = \tau_{\text{fuente}}^2 + \tau_{\text{fibra}}^2 + \tau_{\text{detector}}^2 \quad (\text{B.8.36})$$

Los componentes serán:

Fuente: Emisor LED 820nm de GaAsAl; acopla $12\mu\text{W}$ o -19dBm a una fibra de $50\mu\text{m}$ de diámetro de núcleo. Los tiempos de subida y bajada son 1ns .

Fibra: Cambio de índice escalón con un diámetro del núcleo de $50\mu\text{m}$ de fibra de vidrio; $\text{NA} = 0,24$; atenuación de $5,0\text{dB/km}$; dispersión $1,0\text{ns/km}$

Detector: Fotodiodo PIN, $\text{RE} = 0,38\text{A/W}$; $\text{NA} = 0,40$; capacidad de difusión $C_D = 1,5\text{pF}$; tiempo de subida $t_R = 3,5\text{ns}$, corriente de oscuridad $i_{\text{DD}} = 10\text{pA}$.

El tiempo de subida total será por tanto:

tiempo total de subida (τ_s)	23,3ns
tiempo de subida de la fuente (τ_{fuente})	11,0ns
tiempo de subida de la fibra (τ_{fibra})	$10 \times 1 = 10\text{ns}$
tiempo restante para el detector	

$$\tau_{\text{detector}} = \sqrt{\tau_s^2 - \tau_{\text{fuente}}^2 - \tau_{\text{fibra}}^2} = 17,9\text{ns}$$

Ahora podemos calcular la resistencia de carga del fotodiodo y para ello debemos conocer la constante de tiempo, $\tau_c = R_L C_D$,

$$\tau_c = \sqrt{\tau_{\text{detector}}^2 - t_R^2} = \sqrt{17,9^2 - 3,5^2} = 17,5\text{ns}$$

y de aquí,

$$R_L = \frac{\tau_c}{2,19 \cdot 10^{-12} C_D [\text{pF}]} = 5,32\text{k}\Omega$$

El consumo de potencia tiene en cuenta la potencia de la fuente y las pérdidas en la transmisión de datos. Supongamos que tenemos cuatro conectores con 1dB de pérdidas por conector,

Potencia inyectada en la fibra	-19dBm
Pérdidas del sistema:	
Atenuación en la fibra:	$5,0\text{dB/km} \times 10\text{km} = 50,0\text{dB}$
4 conectores a 1dB :	$4 \times 1\text{dB} = 4\text{dB}$
Total:	54dB
Potencia disponible en el detector:	-73dBm

La potencia luminosa disponible para el detector es,

$$P_s = 1,00\text{mW} \times 10^{-7,3} = 50,1\text{pW}$$

y con la capacidad de respuesta, RE, del fotodiodo PIN obtenemos,

$$i_D = P_s R_E = 0,38 \times 50,1 \times 10^{-12} = 19,0\text{pA}$$

y la tensión de salida del fotodiodo será,

$$V_L = i_D R_L = 19,0 \times 10^{-12} \times 5,32 \times 10^3 = 101,1\text{nV}$$

y la potencia de salida será,

$$P_L = i_D V_L = 19,0 \times 10^{-12} \times 101,1 \times 10^{-9} = 1,93 \times 10^{-18}\text{W} = 0,002\text{fW}$$

Para determinar la calidad del sistema tenemos que realizar el análisis de fallos donde se compara la salida del detector con el ruido del sistema. Siempre habrá ruido presente a la salida del detector y debemos ser capaces de discernir la señal que nos interesa del ruido. En sistemas digitales tendremos un nivel de decisión por encima del cual diremos que hay estado alto y por debajo estado bajo. El ruido no solo es aleatorio si no que además puede generar picos que pueden llevar al sistema a confundir un estado alto con una bajo y a la inversa. Si conocemos la amplitud del ruido y la de la señal podemos calcular la probabilidad de la ocurrencia de errores. El resultado es la repetición de bits erróneos (BER) y es siempre una fracción. Un BER = 0,01 significa que de cada 100 bits transmitidos hay uno erróneo. Cuanto menor sea el BER, mejor. Un BER de 10^{-9} es aceptable para un sistema de telecomunicaciones y 10^{-12} para transmisión de datos entre ordenadores.

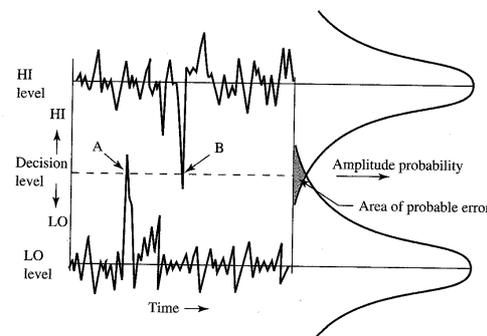


Fig. B.8.11: Error de un bit producido por el ruido aleatorio.

En nuestro caso transmitimos 30×10^6 bits por segundo, por lo que los errores probables ocurrirán cada $10^9/30 \times 10^6 = 33,3\text{s}$ para un BER de 10^{-9} . Esto es un tiempo corto pero no significa que sólo se puedan mandar mensajes de duración menor de 33,3s. Todos los sistemas digitales tienen métodos de chequeo de errores (chequeo de paridad por ejemplo) que detectan los errores y retransmiten la señal. Un sistema con un alto BER será por tanto menos eficiente.

Las principales fuentes de ruido en sistemas de fibra óptica son el ruido térmico y el ruido "shot". Las ecuaciones que nos permiten cuantificarlos son las siguientes:

$$i_{Trms} = \sqrt{\frac{4 \cdot k_B \cdot T \cdot \Delta f}{R_L}} \quad (\text{B.8.37})$$

$$i_{Srms} = \sqrt{2 \cdot e \cdot (i_D + i_{DD}) \cdot \Delta f} \quad (\text{B.8.38})$$

donde i_{Trms} es el valor RMS de la corriente de ruido térmico, i_{Srms} es el valor RMS de la corriente de ruido "shot", k_B es la constante de Boltzmann, T la temperatura absoluta, R_L la resistencia de carga, Δf el ancho de banda del sistema, e la carga del electrón, i_D la corriente de señal por el diodo, i_{DD} la corriente de oscuridad.

En nuestro caso, $T = 300\text{K}$, $\Delta f = 0,35/t_s = 0,35/23,3\text{ns} = 15\text{MHz}$:

$$i_{Trms} = 6,83\text{nA}$$

y la potencia de ruido térmico vale,

$$P_{Tn} = i_{Trms}^2 R_L = 0,248\text{pW}$$

La corriente de ruido "shot" vale,

$$i_{Srms} = 373\text{pA}$$

y la potencia de ruido "shot"

$$P_{Sn} = i_{Srms}^2 R_L = 0,74\text{fW}$$

En nuestro caso $P_{Tn} \gg P_{Sn}$ y por tanto el sistema está limitado por el ruido térmico. Esto es lo normal para sistemas de baja potencia. Para sistemas de potencia el sistema es limitado por el ruido "shot" (o limitado cuánticamente). El método empleado para calcular el BER es diferente para cada uno de los tipos de ruido, siendo el cálculo mucho más complejo para el caso de un sistema limitado cuánticamente. Como regla general, el ruido en un sistema limitado por el ruido "shot" proporciona un mejor BER que en un sistema limitado por el ruido térmico, pero su cálculo es mucho más complejo.

Nosotros vamos a calcular el BER de un sistema limitado por el ruido térmico y para ello determinamos la relación señal ruido (SNR),

$$SNR = 10 \cdot \log \frac{P_S}{P_N} \quad [\text{dB}] \quad (\text{B.8.39})$$

$$SNR = 10 \cdot \log \frac{50,1\text{pW}}{0,248\text{pW}} = 23,1\text{dB}$$

El valor de BER para la relación señal-ruido (SNR) hay que leerlo de la gráfica mostrada en la siguiente figura. Esta gráfica muestra como hasta un SNR de 15dB, el BER mejora muy poco, por encima de 15dB la pendiente de la representación cambia y una pequeña mejora del SNR da lugar a una mejora considerable del BER. Para un $\text{BER} = 10^{-12}$, es necesario un SNR de 23dB. Nuestro sistema llega justo a alcanzar este valor. En un buen diseño se han de tener en cuenta los efectos de temperatura y envejecimiento, así como las tolerancias de los componentes.

Los sencillos cálculos mostrados aquí pretenden dar una idea de las etapas a seguir en el diseño. Para sistemas con técnicas de modulación más elaboradas y redes de fibra óptica se requiere un análisis mucho más detallado.

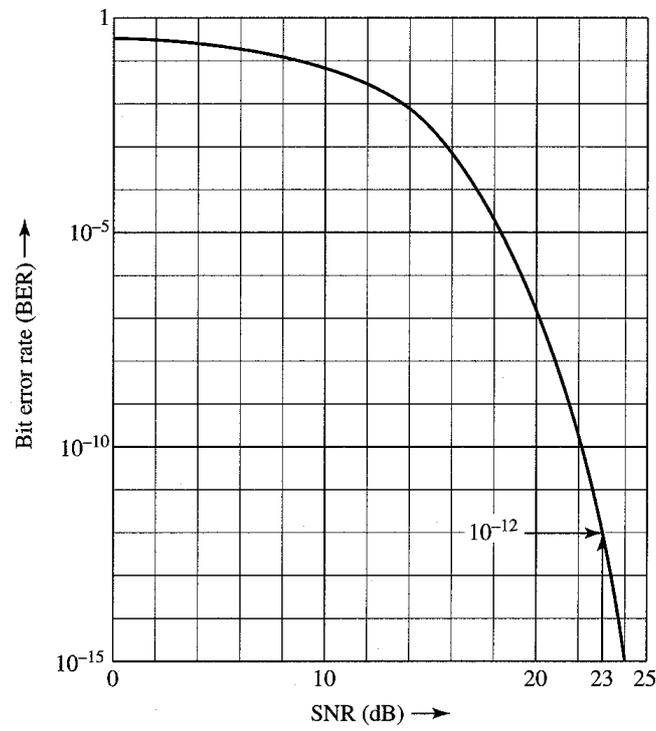


Fig. B.8.12: Relación señal ruido en sistemas limitados por ruido térmico en función de la probabilidad de error (BER).