

PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS FIBRAS ÓPTICAS (V)

Quinta entrega de la serie de artículos que la revista dedica a la historia, características y aplicación de la fibra óptica.

Por Ing. Jorge Bocalandro Rivero
Especialista en Planta Exterior, Centro de Formación Nacional,
ETECSA
boca@etecsa.cu

En el artículo anterior “Propiedades físicas de las fibras ópticas” —Revista *Tono*, No.3 (2005): 51-57—, se abordó la dispersión modal causada por la cantidad de modos que se propagan, como uno de los fenómenos lineales que afectan las señales en los sistemas ópticos, que emplean como medio de transmisión fibras ópticas multimodos, fundamentalmente en redes LAN. Sin embargo, todas las redes de transporte de telecomunicaciones —submarinas y terrestres—; así como el acceso por fibra, implementan otra variedad de esta, denominada fibras ópticas monomodos que, como están diseñadas para que se propague un solo modo llamado modo fundamental (LP_{01}), las causas que provocan los efectos de dispersión van a tener otro origen y, por lo tanto, otra denominación como son la dispersión cromática y la dispersión por el modo de polarización PMD.

Dispersión intramodal o cromática (σ_c)

Todo material, debido a su constitución, presenta propiedades que dependen de la longitud de onda de la radiación que pasa por él. De la misma forma, el índice de refracción tiene valores diferentes, según sea el valor de frecuencia de la onda electromagnética que la atraviese, es decir, el índice de refracción no es constante, sino que es función de la longitud de onda.

$$n = n(\lambda)$$

Esta dependencia del índice de refracción de la sílice en la región de las comunicaciones ópticas se muestra en la figura 1.

Para ver la variación del índice de refracción n con λ es necesario analizar el comportamiento de la velocidad de grupo, es decir, el valor de la velocidad con la que se transmite la información que pueda estar

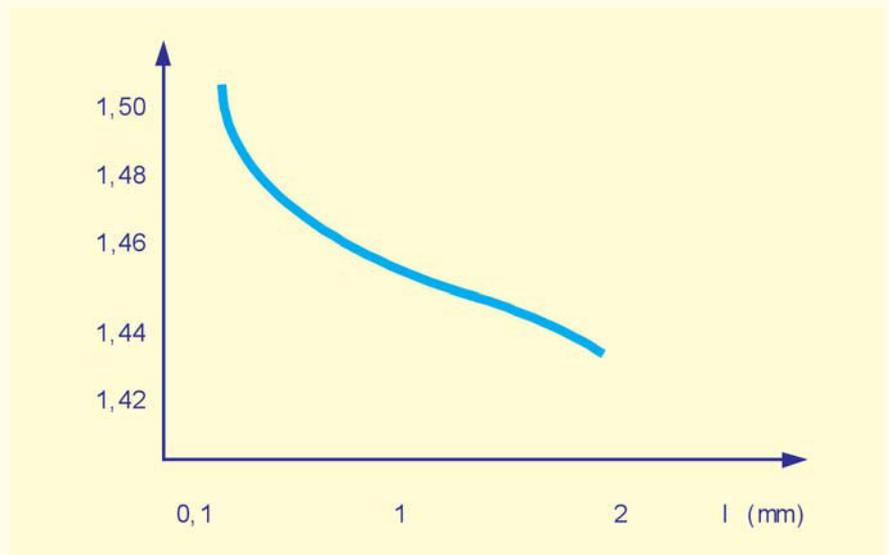


Figura 1 Variación del índice de refracción de la sílice con la longitud de onda

contenida en la señal transmitida. Definir el retardo de grupo por unidad de longitud y un índice de fase que coincide con el índice de refracción, son aspectos que conllevan al desarrollo de un análisis matemático largo y complejo, difícil de abordar en tan poco espacio.

La dispersión intramodal o cromática —como mayormente se aborda en la bibliografía— tiene su origen en dos causas de ensanchamiento de los pulsos. La primera es la dispersión por el material y, la segunda, por guía de onda y puede expresarse de la siguiente forma:

$$\sigma_c = \sigma_{Mat} + \sigma_{go} \quad (1)$$

donde: σ_{Mat} — dispersión cromática por el material
 σ_{go} — dispersión cromática por guía de onda

Dispersión por el material

La luz emitida por la fuente —emisores ópticos— no es monocromática, sino con un determinado ancho espectral ($\Delta\lambda$), es decir, la luz que se propaga por la fibra está compuesta por diferentes longitudes de onda.

Por otro lado, el vidrio es un material dispersivo que cambia su índice de refracción en función de la longitud de onda; por lo tanto, cada longitud de onda viajará a una velocidad de propagación determinada que provocará el ensanchamiento del pulso por el material (Figura 2); dicho de otra manera, la dispersión cromática por el material es el ensanchamiento del pulso asociado al ancho espectral de la fuente.

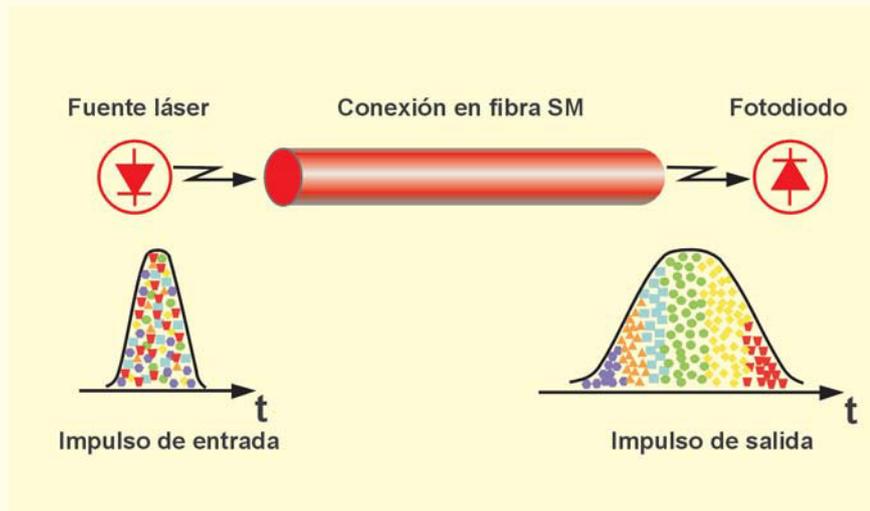


Figura 2 Ensanchamiento del pulso por efecto de la dispersión cromática por el material

La dispersión del material se expresa por:

$$\sigma_{Mat} [ps] = \frac{L \cdot \Delta\lambda \cdot M(\lambda)}{2,35} \quad (2)$$

donde:

L – longitud del enlace

$\Delta\lambda$ – anchura espectral de la fuente

$M(\lambda)$ – coeficiente de dispersión por el material (ps/nmkm)

$$M(\lambda) = \frac{\lambda}{C} \left| \frac{d^2 n_g}{d\lambda^2} \right|$$

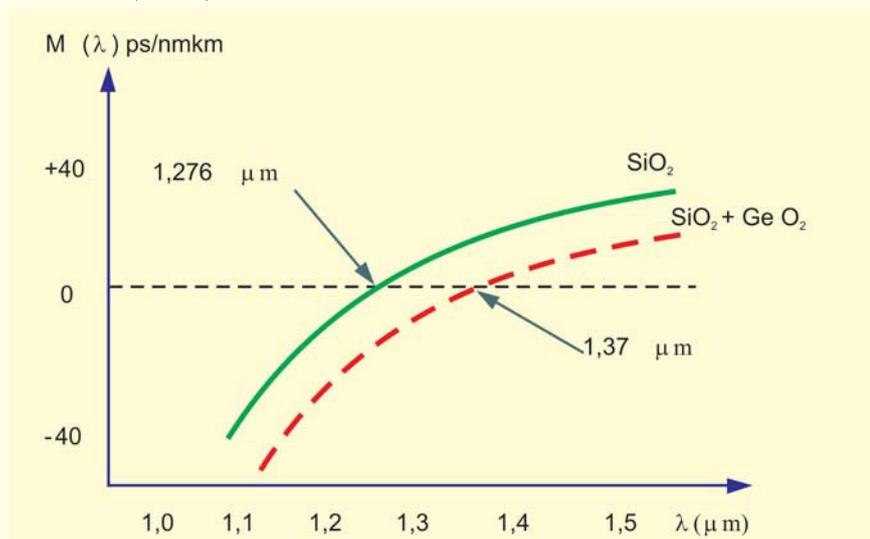


Figura 3 Variación del coeficiente de dispersión por el material, en función de la longitud de onda para fibras de sílice pura SiO_2 y dopada con GeO_2

En la figura 3 se muestra el comportamiento del coeficiente de dispersión por el material. Como puede apreciarse, el valor de dispersión nula cruza entre 1,2 y 1,3 micras para la sílice pura, y es interesante el trabajo en la longitud de onda de 1,3 micras, es decir, en el mínimo de la segunda ventana de absorción. Por lo tanto, debe desplazarse el punto cero hacia esa ventana, —el desplazamiento provocado por el dopaje con GeO_2 no es recomendable y aumenta los valores de atenuación al aumentar el índice de refracción, entonces, la búsqueda del punto cero de dispersión por el material no debe ser sólo por el dopaje, sino también por otras soluciones—.

Dispersión cromática por guía de onda

En una fibra monomodo, la cantidad de energía que se propaga por el núcleo se aproxima al 80 % del total de toda la energía. El resto —aproximadamente el 20 %— se propaga a través del revestimiento y, como este tiene menor índice de refracción que el núcleo, la velocidad de propagación será mayor. Como resultado, desde el punto de vista físico, aparece una nueva dispersión derivada no de la variación del índice de refracción, sino de la guía; de ahí el nombre **dispersión por guía de onda**.

El efecto de guía se manifiesta en el hecho de que la constante de propagación de la fase (β) de una onda que se propaga en la fibra depende no sólo de la longitud de onda λ , sino también del diámetro y del perfil del índice del núcleo.

El valor de la dispersión por efecto de guía de ondas se representa por:

$$\sigma_{Go} [ps] = \frac{L \cdot \Delta\lambda \cdot G(\lambda)}{2,35} \quad (3)$$

donde:

$G(\lambda)$ – coeficiente de dispersión cromática por guía de onda (ps/nmkm) y se expresa por:

$$G(\lambda) = \frac{\lambda}{4\pi^2 a^2 n_1 C} \quad (4)$$

Es importante señalar que $G(\lambda)$ depende de la longitud de onda de trabajo, del perfil del índice de la fibra y del diámetro de su núcleo.

El signo **menos** de la expresión de la dispersión por guía de ondas indica que el retardo relativo, debido a la dispersión por guía de ondas, tiene sentido contrario al retardo relativo provocado por la dispersión del material.

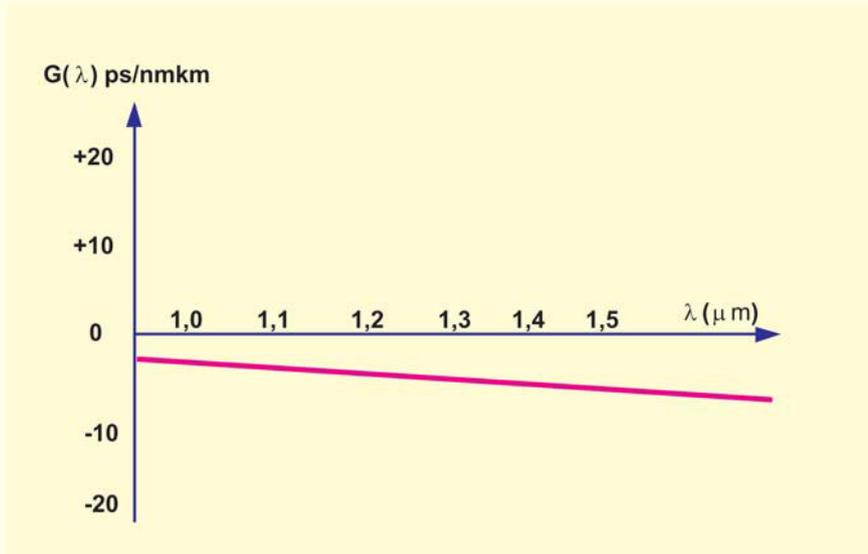


Figura 4 Comportamiento del coeficiente de dispersión por guía de onda con relación a la longitud de onda

Como la dispersión cromática es la suma de la dispersión del material y la de la guía de ondas, entonces:

$$\sigma_c = \frac{L \Delta\lambda (M-G)}{2,35} \quad (5)$$

$$\sigma_c = \frac{L \Delta\lambda D}{2,35} \quad (6)$$

Donde D representa el coeficiente de dispersión cromática de la fibra. Este parámetro puede ser cero a una determinada longitud de onda, si se compensa el coeficiente de dispersión del material con el coeficiente de dispersión por guía de ondas.

Para pequeñas longitudes de ondas, la mayor parte de la energía queda confinada en el núcleo, mientras que para valores mayores de λ , comienza a difundirse por el revestimiento un mayor por ciento de la energía.

Al analizar las figuras 4 y 5 puede llegarse a la conclusión de que, para longitudes de ondas pequeñas, predomina la dispersión por el material; mientras que, para mayores longitudes de ondas, comienza a influir con más fuerza la dispersión por la guía. La dispersión total que se tendrá en una fibra será la resultante de ambas, como se muestra en la figura 5.

La curva de dispersión por el material pasa de valores negativos a positivos y atraviesa por un punto de cero dispersión a una longitud de onda determinada; mientras que la dispersión por guía de onda es siempre negativa al sumarse ambas. La curva resultante se desplaza a la derecha, es decir, hacia mayores longitudes de ondas.

La relación (6) arriba a la conclusión de que la dispersión cromática (σ_c) es directamente proporcional a la longitud de la fibra (L), al ancho espectral de la fuente emisora ($\Delta\lambda$) y al coeficiente de dispersión cromática de la fibra (D) —el valor 2,35 es el resultado de la función transferencial de la fibra—.

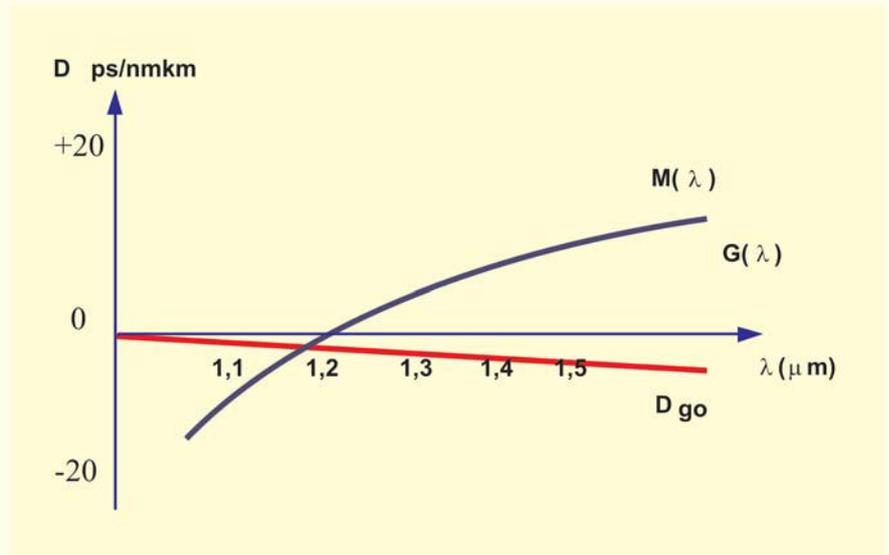


Figura 5 Dispersión por el material, guía de onda y total de fibra

Dispersión por polarización modal (PMD)

El proceso de fabricación de la fibra provoca modificaciones en las propiedades de la sílice; debido al proceso de estiramiento sufre tensiones mecánicas y térmicas y no se puede alcanzar simetría perfecta del núcleo y del revestimiento. Como consecuencia, las fibras dejan de ser totalmente isótropas y presentan birrefringencia. Esto significa que se propaga por ellas una radiación óptica, en cada uno de los campos se observan índices de refracción diferentes y, por lo tanto, se propagan con diferente velocidad de grupo y, a cierta distancia, los dos componentes se han separado y llegado al otro extremo de la fibra en distintos instantes. El pulso detectado en el receptor será la suma de las dos polarizaciones recibidas en momentos diferentes y, por consiguiente, estará ensanchado con respecto a la señal de entrada. Este fenómeno se conoce como Dispersión por Polarización Modal o *Polarization Mode Dispersion* (PMD). La figura 6 muestra el efecto de dicha dispersión.

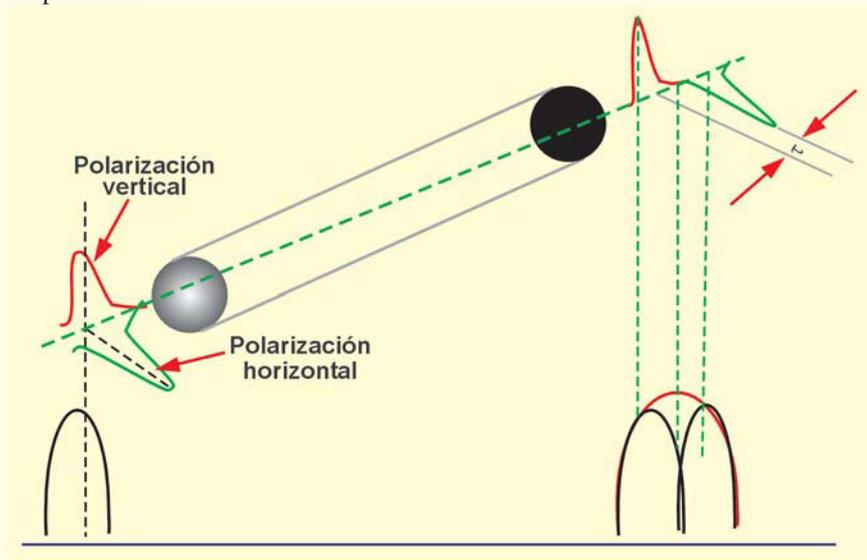


Figura 6 Efecto de la dispersión por polarización modal durante la propagación de un pulso por una fibra óptica

A velocidades hasta 2,5 Gb/s los valores de esta dispersión alcanzaban una magnitud incomparable con las otras dispersiones; sin embargo, para velocidades de retransmisión de 10 Gb/s, se convierte en un problema y hay que tenerlo en cuenta. Este fenómeno se hace más crítico porque cada tramo de fibra posee un valor diferente de birrefringencia y, además, el valor que tenga en un momento determinado puede cambiar con el tiempo. Se ha demostrado que la fibra de un fabricante instalada en condiciones variadas presenta distintos valores de PMD e, incluso, varían en dependencia de la hora en que se realice la medición. Por lo tanto, las mediciones de los valores de PMD deben realizarse en el lugar para ver el valor real de un tramo determinado. Los valores de los fabricantes son indicativos.

La PMD no es un efecto acumulativo de forma lineal. Debido a sus fluctuaciones aleatorias, los efectos en un tramo pueden sumarse o restarse con los del tramo siguiente. Esto conduce a una dependencia con la raíz cuadrada de la longitud del enlace.

En función de esto se plantea una expresión aplicable a enlaces superiores a 100 km:

$$\Delta\tau \approx D_{PMD} \sqrt{L}$$

donde:

D_{PMD} – parámetro de PMD medido en ps/km y cuyos valores se encuentran entre 0,1 y 1,0 ps/km.

Según se plantea en la Recomendación de UIT-T G.663, el principal efecto que provoca la PMD es la interferencia entre símbolos, por lo tanto, se requiere que el retardo de tiempo entre ambos estados ortogonales de polarización sea menor que una décima parte de la duración de un Bit. Se ha propuesto una especificación estadística de 0,5 ps/km para enlaces concatenados de cable de fibra óptica.

Función transferencial de la fibra óptica

La característica de transferencia de una fibra óptica puede modelarse por una función gaussiana. Es decir, ante un pulso ideal de entrada, la respuesta impulsiva $h(t)$ de la fibra a la salida presenta una conformación gaussiana que obedece a la expresión:

$$h(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) \quad (7)$$

Donde:

σ – desviación típica, representa la dispersión total.

La respuesta en frecuencia $H(\omega)$, es la transformada de Fourier de la respuesta al impulso:

$$H(\omega) = F\{h(t)\} \quad (8)$$

$$H(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{\omega^2 \sigma^2}{2}\right) \quad (9)$$

donde: $\omega = 2\pi f$

El ancho de banda de la fibra óptica se define como el valor de la frecuencia transmitida para la cual la potencia óptica recibida cae a la mitad del valor que tiene para $\omega = 0$. De aquí resulta:

$$H(\omega_{0,5}) = \frac{1}{2} \cdot H(0) \quad (10)$$

donde $\omega_{0,5} = 2\pi f_{0,5}$ y $f_{0,5}$ es la frecuencia de corte hasta donde la fibra es capaz de transmitir; por lo tanto, representa el ancho de banda B que caracteriza dicha fibra:

$$B = f_{0,5} \quad (11)$$

Si se sustituye en (9) para $\omega = 0$ se tiene:

$$H(0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \quad (12)$$

Al sustituir (12) en (10) se llega a la siguiente expresión:

$$H(\omega_{0,5}) = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \quad (13)$$

Por otra parte, si se evalúa (9) para $\omega = \omega_{0,5}$:

$$H(\omega_{0,5}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{\omega_{0,5}^2 \sigma^2}{2}\right) \quad (14)$$

Al igualar (13) y (14) y teniendo cuenta (11):

$$B = \frac{\sqrt{1n2/\pi}}{\sigma} = \frac{0,187}{\sigma} \quad (15)$$

El ancho de banda de la fibra óptica comúnmente se expresa en GHz, entonces:

$$B(\text{GHz}) = \frac{0,187}{\sigma(\text{ns})} \quad (16)$$

Por otra parte, el ancho del pulso de salida t , se toma como el intervalo de tiempo donde la señal es mayor o igual que el 50 % de su valor máximo. Se considera a $t_{0,5}$ como el tiempo transcurrido desde que la señal alcanza su valor máximo y el 50 % de este, es decir:

$$t_{0,5} = \frac{\tau}{2} \quad (17)$$

$$h(t_{0,5}) = \frac{1}{2} \cdot h(0) \quad (18)$$

Es válido entonces buscar la relación que existe entre la dispersión total s y el ancho del pulso al 50 %, t .

Al sustituir en (7) para $t = 0$, se obtiene:

$$h(0) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \quad (19)$$

Sustituyendo en (7) para $t = t_{0,5}$ y tomando en cuenta (17):

$$h(t_{0,5}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{8} \left(\frac{\tau}{\sigma}\right)^2\right] \quad (20)$$

Al igualar (18) y (20), considerando (19) y despejando la relación $\frac{\tau}{\sigma}$, se obtiene:

$$\frac{\tau}{\sigma} = \sqrt{81n2} = 2,35 \quad (21)$$

Conclusiones

Las fibras monomodos están sujetas a varios tipos de dispersiones, la cromática y la PMD. La primera es la causa de dispersión absoluta para sistemas que operen a velocidades hasta 2,5 Gb/s y su valor dependerá del tipo de fibra y de la longitud de onda de trabajo del sistema.

En relación con la dispersión por polarización del modo, puede afirmarse que comienza a ser apreciable a velocidades de 10 Gb/s, es más crítico con el aumento de la velocidad de transmisión y, por sus características, es un fenómeno estadístico. 

Bibliografía

- Izquierdo Bedmar, Juan. *Telecomunicaciones a través de fibras ópticas*. Madrid, España: Ediciones AHCET, 1996.
- Martín Pereda, José Antonio. *Sistemas y Redes Ópticas de Comunicaciones*. Madrid, España: Pearson Prentice Hall, 2004.
- Rec. UIT-T G.663. Aspectos relacionados con la aplicación de los dispositivos y subsistemas de amplificadores ópticos, 2000.