

SISTEMAS DE COMUNICACIÓN POR FIBRA ÓPTICA DE ALTA CAPACIDAD

por Diego F. Grosz

Departamento de Física y Matemática, Instituto Tecnológico de Buenos Aires (ITBA),
Eduardo Madero 399, C1106AD, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.
Teléfono: 4314-7778 Ext:570, e-mail: dgrosz@itba.edu.ar

Resumen

En este trabajo el autor hace una revisión de los conceptos básicos necesarios para entender el funcionamiento de los sistemas de comunicación óptica de alta capacidad que han posibilitado la gran difusión de las comunicaciones a escala planetaria, tanto desde el punto de vista del diseño del sistema como de sus componentes.

Se muestran, también, diferentes técnicas de amplificación óptica y el enorme impacto que éstas han tenido en el incremento de la capacidad de transporte de información de los modernos sistemas de comunicación. Por último, se discuten las perspectivas y desafíos futuros en el área.

Palabras clave: Fibras ópticas, Sistemas de comunicación, WDM, Amplificación óptica.

Abstract

Communication systems by optic fibers of high capacity. In this paper the author presents the basic concepts of fiber-optic communication systems, both from a system and component perspective. These systems are the main infrastructure supporting the rapid global development of communications.

Different schemes of optical amplification and their impact on the development of current high-capacity optical systems are presented. Finally, future challenges in the area are discussed.

Key words: Optic-fibers, Communication systems, WDM, Optical amplification.

1. Introducción

La era moderna de las comunicaciones comienza en 1830 con la invención del telégrafo [1]. Los hitos importantes en la evolución de los sistemas de comunicación están resumidos en la Fig. 1, donde se muestra el incremento de la capacidad de los sistemas de comunicación en los

últimos 170 años. La capacidad está definida usando la "figura de mérito" de *tasa \times distancia*, expresada ésta en bits transmitidos por segundo (bits/s) y kilómetros (km). Esta figura de mérito captura adecuadamente el concepto de que no es importante solamente cuánta información es transmitida por unidad de tiempo, sino que tan lejos. Hitos históricos señalados en la Fig. 1 incluyen la invención del teléfono [2], la introducción de sistemas operando sobre cables coaxiales (1940) y enlaces de microondas (1948).

En 1980 se introduce el primer sistema óptico comercial operando a una tasa de 45 Mb/s,

Trabajo presentado con motivo de la entrega del premio "Ernesto E. Galloni" –instituido por la Sra. Nélide Pedretti de Galloni e hijos– en Física, el 21 de noviembre de 2003

poniendo fin a un período de aproximadamente 100 años dominado por los sistemas de comunicación eléctricos y analógicos.

Ya en la segunda mitad del siglo XX se advirtió que utilizar luz como medio de transporte de información podía incrementar significativamente la capacidad de los sistemas de comunicación. Sin embargo, hubo que esperar a la demostración del primer laser en 1960 para contar con una fuente de luz coherente e intensa [3].

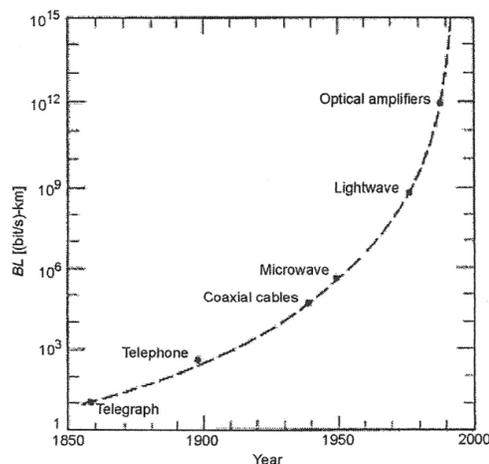


Fig. 1. Evolución de la capacidad de los sistemas de comunicación. Es interesante notar que, durante un período de aproximadamente 100 años, los sistemas transmitían señales eléctricas analógicas (tomado de la Ref. [8]).

El siguiente problema lo constituyó la ausencia de un medio de transmisión adecuado que confinara a la luz transmitida. En los años 60 muchas ideas fueron consideradas, notablemente la de utilizar *lentes gaseosas*. En 1966 se sugirió que las fibras ópticas podían representar la mejor alternativa para superar este problema. Sin embargo, las fibras ópticas disponibles en la época presentaban una atenuación de la señal excepcionalmente alta, del orden de un decibel / m (en unidades lineales, esto representa una atenuación de aproximadamente 20% por cada metro recorrido), tornándolas imprácticas para aplicaciones reales. En 1970 se fabricaron las primeras fibras ópticas de “baja atenuación”: 20 dB/km en la región de longitudes de onda de 1 μm [4]. Al mismo tiempo, el desarrollo de láseres de semiconductor capaces de operar a temperatura ambiente permitió contar con fuentes ópticas compactas.

La disponibilidad de fibras ópticas de baja atenuación y de fuentes ópticas adecuadas dio un gran impulso al desarrollo de sistemas de comunicación óptica de alta capacidad.

2. “Ventanas” de comunicación y generaciones de sistemas de comunicación óptica

La evolución de la capacidad de los sistemas de comunicación óptica, y de las correspondientes “ventanas” de transmisión y generaciones, se muestra esquemáticamente en la Fig. 2. En esta figura se detallan las longitudes de onda que caracterizan a las respectivas “ventanas” de transmisión: 0.8, 1.3 y 1.5 μm . Para sistemas que operan en longitudes de onda de 1.5 μm se deta-

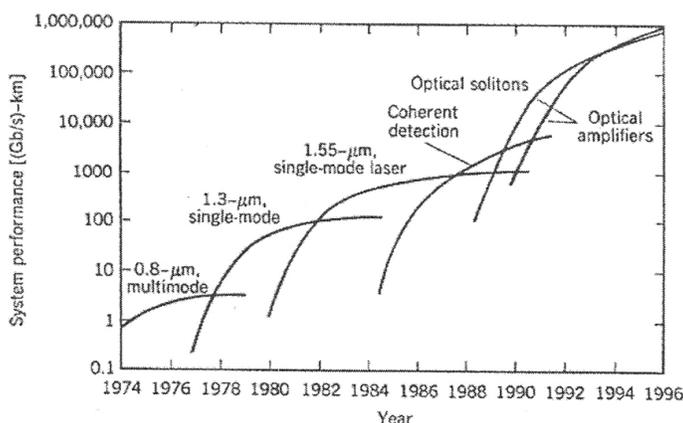


Fig. 2. Evolución de los sistemas de comunicación óptica (tomado de la ref. [8]).

lla, también, la aparición de nuevas "generaciones" que, empleando diferentes técnicas, permitieron incrementar ampliamente la capacidad de transmisión de estos sistemas.

La primera generación de sistemas de comunicación óptica, introducida comercialmente en 1980, operaba en longitudes de onda de $0.8 \mu\text{m}$, i.e. la llamada "primera ventana de las comunicaciones ópticas". Estos sistemas operaban a una tasa de 45 Mbits/s con una distancia entre repetidores (puntos de regeneración de la señal) de 10 km . La máxima distancia posible entre repetidores estaba dada por la atenuación de las fibras ópticas que limitaban la *relación señal-ruido* entregada por el sistema.

Quedaba claro en la época que era deseable transmitir información en longitudes de onda más largas, aprovechando la menor atenuación de las fibras, y así consiguiendo aumentar la distancia entre repetidores. Esto impulsó el desarrollo de láseres de semiconductor que emitirían luz en longitudes de onda de $1.3 \mu\text{m}$, donde la atenuación de la fibra es menor a 1 dB/km . Esta nueva generación operando en la "segunda ventana" fue introducida en la primera mitad de los 80s y, como explicaremos más adelante, estos sistemas estaban limitados a una capacidad menor a 100 Mbits/s debido a la *dispersión* modal propia de las *fibras multimodo*. Este último problema fue solucionado mediante el uso de *fibras*

monomodo y, en 1987, ya existían sistemas comerciales con capacidades de 1.7 Gbits/s y repetidores separados por 50 km .

Desde el punto de vista de la atenuación de la fibra, es claro que es deseable trabajar en torno del mínimo en la región de $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ (ver Figura 3), donde la atenuación es $\alpha = 0.2 \text{ B/km}$. Esta región es llamada "tercera ventana". Sin embargo, las llamadas *fibras monomodo standard* (SSMF) presentan un valor de dispersión cromática elevado en la tercera ventana.

La dispersión cromática, cómo mostraremos en la próxima sección, es consecuencia de la dependencia del índice de refracción de la fibra con la longitud de onda; es decir, diferentes componentes de frecuencia de los pulsos transmitidos viajan a diferentes velocidades, produciendo un ensanchamiento temporal de los pulsos transmitidos. Este efecto puede originar la superposición de diferentes pulsos, aumentando la probabilidad de ocurrencia de errores de detección (ver Apéndices).

La búsqueda de una fibra óptica que presentara un mínimo de dispersión cromática en tercera ventana llevó al desarrollo, y posterior introducción comercial a comienzos de los años 90, de las llamadas *fibras DSF* (de *dispersion-shifted fibers*). Estas fibras tienen una dispersión cromática aproximadamente 10 veces inferior al de las *fibras monomodo standard*.

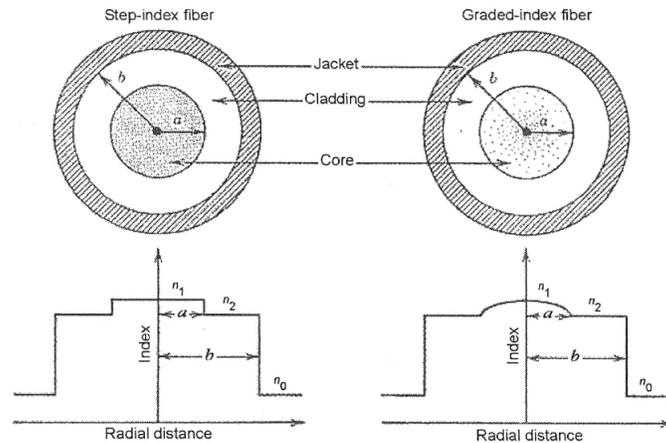


Fig. 3.1. Corte transversal de una fibra óptica y la respectiva variación de índice de refracción en función de la coordenada radial, para fibras "step-index" (usadas en sistemas de alta capacidad) y "graded-index" (usadas en sistemas de baja capacidad, como redes locales).

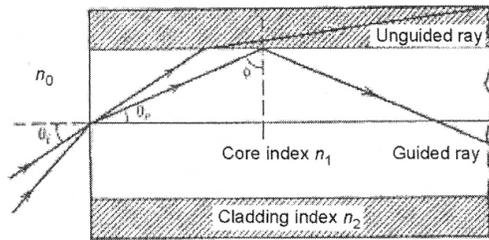


Fig. 3.2. "Principio de funcionamiento" de una fibra óptica (corte longitudinal): el fenómeno de "reflexión total" confina la luz (es decir, la "guía") para rayos que ingresen con un ángulo menos que θ_c .

Posteriormente, y por motivos que explicaremos más adelante, la introducción de las fibras DSF llevó a la producción de nuevos tipos de fibras ópticas con valores de dispersión en la tercera ventana mayores a las DSF pero menores a las fibras standard. Estas fibras son llamadas NZ-DSF (Non-zero dispersion shifted fibers).

Finalmente, la introducción comercial a comienzos de los años 90 de los amplificadores ópticos y de esquemas de *Wavelength Division Multiplexing* (WDM), en los cuales se transmiten varios "canales" a diferentes longitudes de onda por la misma fibra óptica, produjo un enorme incremento de la capacidad de transmisión de los sistemas de transporte óptico.

3. Conceptos básicos de fibras ópticas

En su forma más simple, una fibra óptica está formada por un núcleo de vidrio con índice de refracción n_1 rodeada por una capa de índice de refracción n_2 , siendo n_2 ligeramente menor a n_1 de modo de aprovechar el fenómeno de reflexión total en la interfaz entre los dos medios. Estas fibras se denominan "step-index" para diferenciarlas de las llamadas "graded-index" en las cuales el índice de refracción decrece de forma gradual desde el centro del núcleo hacia la interfaz (ver Fig. 3). Dos parámetros importantes que caracterizan a las fibras ópticas son la diferencia relativa de índices de refracción núcleo-capa, Δ , dada por:

$$\Delta = (n_1 - n_2) / n_1,$$

y el llamado "parámetro V", dado por:

$$V = k_0 a \sqrt{n_1^2 - n_2^2},$$

donde $k_0 = 2\pi/\lambda$, λ es la longitud de onda y a es el radio del núcleo de la fibra. Este parámetro

indica el número de modos que se pueden propagar en la fibra y se puede demostrar que una fibra "step-index" permite propagar un sólo modo si $V < 2.405$. Las fibras que satisfacen esta condición se llaman "fibras monomodo"; de lo contrario, se llaman "fibras multimodo".

La diferencia geométrica más relevante entre las fibras monomodo y las multimodo viene dada por el tamaño del núcleo. Para estas últimas, el radio a es típicamente 25-30 μm , mientras que las fibras monomodo, con diferencias relativas de índice de refracción $\Delta \sim 0.003$, tienen radios típicamente menores a 5 μm . Además, las fibras multimodo sufren del fenómeno de "dispersión modal" por el cual diferentes modos "viajan" a diferentes velocidades, conduciendo al ensanchamiento temporal de los pulsos de forma mucho más severa que en el caso de la dispersión cromática. Es por este motivo que no se usan fibras multimodo para sistemas de alta capacidad, restringiéndose su uso a sistemas "cortos" (algunas decenas de kilómetros de alcance).

El radio de la capa de índice de refracción n_2 , b , es mucho menos crítico siempre y cuando sea lo suficientemente grande como para confinar completamente al modo. Un valor típico es $b = 62.5 \mu\text{m}$ y es el mismo tanto para fibras monomodo como para fibras multimodo.

Otro parámetro importante a tener en cuenta es el que caracteriza a la pérdida de potencia que experimenta una señal que viaja por una fibra óptica. Llamemos P_0 a la potencia óptica al comienzo de la fibra. Después de recorrer una longitud L , la potencia transmitida, P_T , es:

$$P_T = P_0 \exp(-\alpha L),$$

donde el coeficiente de atenuación, α , da una medida de todas las pérdidas de la fibra óptica.

Es común expresar a α en unidades de dB/km. La conversión entre las unidades lineales y de decibels viene dada por:

$$\alpha_{\text{dB}} = -(10 / L) * \log (P_T / P_0) = 4.343 \alpha.$$

Como es de esperar, el coeficiente de atenuación depende de la longitud de onda (ver Fig.4) y, como discutimos en la sección anterior, adquiere su valor mínimo $\alpha = 0.2 \text{ dB / km}$ en la tercera ventana ($\lambda = 1.5 \mu\text{m}$). En el rango de longitudes de onda de interés, el coeficiente de atenuación muestra una dependencia con la longitud de onda dada, esencialmente, por el "scattering de Rayleigh" (el mismo fenómeno por el cual el cielo es azul) [5]. Sin embargo, en la región de 1.4 μm existe una resonancia de la absorción material correspondiente a una armónica de la frecuencia vibracional del ion OH (impureza pre-

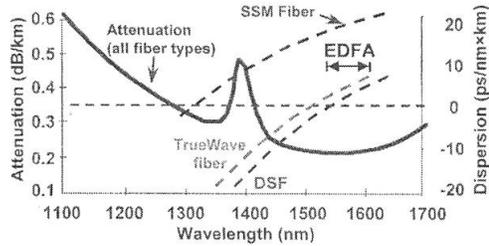


Fig. 4. Curvas de atenuación y dispersión para diferentes tipos de fibras ópticas.

sente en el vidrio de silicio del núcleo de la fibra) que ocurre en $\lambda = 2.73 \mu\text{m}$. Existen, desde el año 2000, fibras ópticas disponibles comercialmente en las cuales esta resonancia no está presente y que, por lo tanto, tienen pérdidas uniformes y muy bajas en toda la región espectral de $1.3 - 1.6 \mu\text{m}$ (segunda y tercera ventana).

4. Conceptos básicos de sistemas de comunicación por fibra óptica

Casi todos los sistemas ópticos de alta capacidad transmiten información *digital* (bits "0" y "1") modulando la amplitud (y, por lo tanto, la intensidad) de una onda "portadora". De esta forma, los bits "0" y "1" quedan representados por la presencia o no de luz en el instante de detección. El tiempo asignado para un bit determinado ("bit slot"), T , está relacionado con la tasa del sistema, B , por $B = 1 / T$. Un bit "1" será representado por un pulso en el intervalo de tiempo asignado; el bit "0" estará representado por la ausencia de pulsos en el intervalo.

En general, la "velocidad de transmisión" de un sistema se especifica por su tasa B y se expresa, en sistemas de alta capacidad, en Gb/s (10^9 bits transmitidos por segundo). Los modernos sistemas de comunicación operan a tasas $B > 10^{12}$ bit/s (1 Tb/s).

Como mencionamos al comienzo de esta sección, los sistemas ópticos transmiten información por modulación de amplitud. Sin embargo, en los últimos años, han ganado popularidad los formatos de modulación de "fase"; estos formatos, en los cuales la información se transmite modulando la fase de una onda portadora, y que han sido empleados en sistemas de comunicación electrónicos y de radio desde hace muchos años permiten, en sistemas ópticos, ampliar la distancia transmitida y, tal vez, ofrecer mayor resistencia a degradaciones "no-lineales" de la información [6].

Los bloques fundamentales de un sistema de comunicación son:

- *Transmisor*: toma la información (secuencia de bits) que es una señal eléctrica (por ejemplo, una o varias llamadas telefónicas) y la transforma en una secuencia de bits "óptica" en algún formato determinado. Este paso se llama "codificación".

En general, en sistemas ópticos de alta capacidad, el transmisor está formado por un láser continuo (CW, en la jerga) que opera en una longitud de onda en tercera ventana $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, seguido por un modulador externo. El modulador se comporta como una "llave" óptica que es controlada por la secuencia eléctrica de pulsos (bits) que se quiere transmitir; un bit "1" corresponderá a un estado de baja pérdida óptica del modulador (deja pasar la luz del láser) y un bit "0" a un estado de alta pérdida (bloquea la luz). El "contraste" entre la potencia del bit "1" y la del bit "0" se denomina *grado de extinción* y es un parámetro importante en el diseño de un sistema óptico: cuanto mejor es el grado de extinción menor será la relación señal-ruido requerida para obtener un nivel de desempeño determinado.

- *Canal de comunicación*: el medio físico que permite que los bits lleguen del transmisor al receptor. En nuestro caso este medio es la fibra óptica. El canal de comunicación, en general, "corrompe" a la información transmitida mediante la adición de ruido y distorsiones "lineales" (que *no dependen* de la potencia de la señal transmitida) y "no-lineales" (que *dependen* de la potencia de la señal transmitida). La elección del formato de codificación está generalmente basada en su "resistencia" a las distorsiones lineales y no-lineales y, posiblemente, a sus características espectrales.

- *Receptor*: recibe la secuencia de bits ópticos, la transforma en una secuencia de bits "eléctricos" (este paso se denomina "fotodetección"), recupera la "sincronización" (se dice que "recupera el reloj") y toma una decisión sobre el valor del bit recibido mediante la comparación con un valor de umbral generalmente fijo¹: si la potencia recibida en el intervalo de tiempo supera al valor de umbral el detector decidirá "1", caso contrario decidirá "0".

¹Recientemente se han introducido detectores con umbral de detección variable o "dinámico" en sistemas de comunicación de alta capacidad.

Un error de detección se produce cuando un bit "1" transmitido es detectado como un bit "0" y viceversa. Los sistemas de comunicación modernos de alta capacidad trabajan con "tasas de error" inferiores a una detección errónea cada 10^{16} bits transmitidos (un sólo error cada diez mil billones de bits!). Para cumplir con este estricto criterio a lo largo de toda la vida útil del sistema (típicamente 20 años) se utilizan técnicas electrónicas de corrección de errores (Forward Error Correction), implementadas en el receptor, que permiten mantener una adecuada tasa de error aún en presencia de degradaciones de relación señal-ruido, lineales y no-lineales [7]. El costo que se paga es el de transmitir la información a una tasa que puede ser entre 7% y 20% mayor. Esto se denomina "overhead" y requiere la utilización de componentes electrónicos de mayor ancho de banda (y costo, sobre todo para sistemas que operan a tasas de 40 Gb/s).

5. Efectos lineales: dispersión cromática

El índice de refracción del núcleo de una fibra óptica depende de la longitud de onda de la luz que se propaga en ella. Este fenómeno se conoce como "dispersión material" y hace que los pulsos aumenten su duración temporal a medida que se propagan en la fibra. Este mecanismo, cómo se muestra en la Fig.5, puede producir errores de detección originados en la presencia de potencia óptica en los bits "0". Una forma aproximada del "factor de ensanchamiento temporal" de un pulso de forma "gaussiana" está dada por [8]:

$$\frac{T_1}{T_0} = \sqrt{1 + \left(\frac{\beta_2 L}{T_0^2}\right)^2},$$

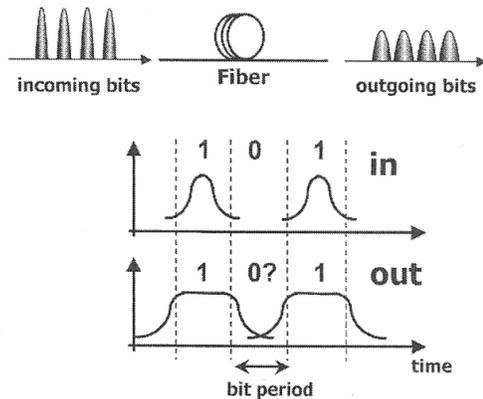


Fig. 5. Efecto de la dispersión cromática sobre la tasa de error en un sistema digital.

donde T_1 es la duración del pulso a la salida de la fibra de longitud L . T_0 es la duración inicial del pulso y β_2 es el llamado "parámetro de dispersión de la velocidad de grupo" (parámetro de GVD); este parámetro nos dice como varía la velocidad del pulso con la frecuencia y es consecuencia de la dispersión material del núcleo de la fibra óptica.

Una forma de estimar el impacto de la dispersión cromática en un sistema se obtiene al pedir que los pulsos transmitidos conserven la mayor parte de su energía en el intervalo temporal que tienen asignado (i.e., en el respectivo bit slot), lo cual impone una cota superior al cociente T_1 / T_0 . Esto se traduce en la condición [8]:

$$B\sqrt{|\beta_2|L} \leq 1/4,$$

donde B es la tasa del sistema². Es decir, un sistema limitado por efectos de dispersión cromática podrá transportar información a una tasa máxima de 10 Gb/s a lo largo de, aproximadamente, 30 km de fibra SSMF, con un parámetro $\beta_2 = -20$ ps²/km.

En la práctica, los sistemas de alta capacidad emplean *módulos compensadores de dispersión* (DCMs, según la sigla en inglés) que permiten cancelar el efecto de la dispersión cromática acumulada. Estos DCMs son, generalmente, fibras ópticas con parámetro $\beta_2 > 0$ aunque, recientemente, se han introducido módulos que se basan en otros principios y no requieren fibras ópticas (como, por ejemplo, DCMs basados en interferómetros de Gires-Tournois [9]).

6. Efectos no-lineales: automodulación de fase (SPM)

El origen de los efectos no-lineales está en la dependencia del índice de refracción del núcleo de la fibra óptica con la intensidad de los pulsos transmitidos. Este fenómeno se conoce como "efecto Kerr óptico". El índice de refracción queda expresado como [10]:

$$n(I, \omega) = n_0(\omega) + n_2 I,$$

donde n_0 es el índice de refracción a baja intensidad (y cuya dependencia con la frecuencia, ω , es el origen de la dispersión cromática), n_2 es el índice de refracción "no-lineal" y, para fibras ópticas de silicio, tiene un valor aproximado de 3×10^{-20} Watts/m²; I es la intensidad de los pulsos transmitidos (i.e., potencia por unidad de

² Para formas de pulsos típicamente usados en sistemas de comunicación esta condición es equivalente a pedir que el 95% de la energía del pulso permanezca en el intervalo asignado.

área). Como consecuencia del efecto Kerr óptico, un pulso con potencia $P(t)$ que se propaga a través de una fibra óptica de longitud L ensancha su espectro una cantidad $\Delta\omega$ dada por (despreciando la atenuación de la fibra óptica) [5]:

$$\Delta\omega = \gamma L \frac{dP(t)}{dt},$$

donde γ es el llamado “parámetro no-lineal” expresado como; $\gamma = \frac{n_2\omega_0}{A_{\text{eff}}c}$; ω_0 es la frecuencia central del pulso, A_{eff} es el “área efectiva del modo” (que vale, aproximadamente, $A_{\text{eff}} = \pi r^2$, donde r es el radio del núcleo de la fibra) y c es la velocidad de la luz en el vacío. En fibras ópticas usadas en sistemas de comunicación γ varía, típicamente, entre 1.2 y 2 $\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$.

El efecto de la SPM es, por lo tanto, el de aumentar el ancho espectral de los pulsos transmitidos. En la práctica, este efecto por sí sólo no afecta el desempeño del sistema de transmisión. Sin embargo, la combinación de efectos de dispersión cromática con efectos de SPM puede conducir a la degradación de los pulsos transmitidos o, en algunos casos muy particulares, a una mejora del rendimiento del sistema.

Es importante notar que los efectos no-lineales dependen de la potencia de la señal transmitida; recordando que ésta decrece como consecuencia de la atenuación, α , de la fibra óptica, eventualmente se vuelven muy pequeños comparados con los efectos lineales. Si no despreciamos la atenuación de la fibra, la ecuación anterior se modifica:

$$\Delta\omega = \gamma L_{\text{eff}} \frac{dP(t)}{dt},$$

donde la “longitud efectiva” y $L_{\text{eff}} \sim 1/\alpha$. Para una fibra óptica típica, $L_{\text{eff}} \sim 20$ km. El concepto de longitud efectiva es muy útil: una señal que viaja por una fibra de longitud $L \gg L_{\text{eff}}$ experimentará efectos no-lineales en los primeros 20 km, aproximadamente; es decir, mientras la potencia de la señal es grande. Si $L \ll L_{\text{eff}}$, los efectos no-lineales serán importantes a lo largo de toda la longitud de la fibra. Más adelante definiremos una longitud efectiva para los fenómenos no-lineales más precisa.

7. Efectos no-lineales en sistemas WDM: modulación de fase cruzada (XPM) y mezcla de cuatro ondas (FWM)

Como mencionamos más arriba, los sistemas WDM son sistemas en los cuales varias

longitudes de onda, cada una transportando diferente información, son “multiplexadas” y transmitidas por una misma fibra óptica. Este esquema ha permitido aumentar enormemente la capacidad de transmisión de los sistemas de comunicación óptica.

En sistemas WDM, y como consecuencia del índice de refracción no-lineal, las diferentes longitudes de onda, o “canales”, interactúan dando origen a los fenómenos de “modulación de fase cruzada” (XPM, según la sigla en inglés) y de “mezcla de cuatro ondas” (FWM).

La modulación de fase cruzada actúa de modo semejante a la auto-modulación de fase; sin embargo, en el caso de la XPM, el ensachamiento espectral que sufre un canal con potencia $P_1(t)$ en presencia de un canal con potencia $P_2(t)$ está dado por [5]:

$$\Delta\omega = \gamma L \left(\frac{dP_1(t)}{dt} + 2 \frac{dP_2(t)}{dt} \right).$$

donde el primer término es la SPM y el segundo término es la XPM. Observamos que el efecto de la XPM es el de producir una interacción entre diferentes canales. En presencia de dispersión, este efecto conduce a la distorsión de los pulsos transmitidos y representa un factor limitante en el desempeño de los sistemas WDM de alta capacidad.

El fenómeno de FWM consiste en la creación de nuevas frecuencias a partir de las frecuencias de los canales transmitidos en un sistema WDM. Si tres canales con frecuencias f_j , f_i , f_k se propagan por la misma fibra, la interacción de FWM producirá una nueva componente de frecuencia (ver Fig. 6):

$$f_{ijk} = f_i + f_j - f_k$$

La eficiencia de este proceso depende fuertemente de la dispersión de la fibra, como podemos ver en la Fig.6. En casos donde la dispersión de la fibra es muy baja (fibra DSF) puede la generación de “tonos” de FWM es muy alta e, incluso, puede producirse una resonancia en la interacción de FWM para determinados espaciamientos de frecuencia entre canales WDM [11]. La generación de nuevas frecuencias a través del mecanismo de FWM afecta al desempeño de un sistema de comunicación de dos formas diferentes:

- la frecuencia generada f_{ijk} crece a expensas de la potencia de las frecuencias transmitidas $f_{i,j,k}$.
- f_{ijk} puede coincidir con la frecuencia de un cuarto canal transmitido, interfiriendo con

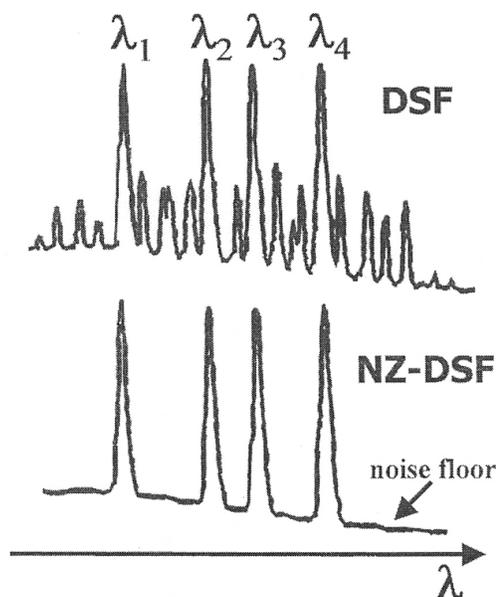


Fig. 6. Efecto de FWM y su dependencia con la dispersión de la fibra: un pequeño valor de dispersión cromática (fibras NZ-DSF) es suficiente para impedir la generación de tonos de FWM.

éste y degradando la calidad de los pulsos transmitidos al momento de la recepción.

Para combatir los efectos de FWM se utilizan fibras NZ-DSF³ que tienen dispersión cromática acotada en el rango de longitudes de onda de interés y, posiblemente, un espaciado en frecuencia no-uniforme a lo largo de la banda de transmisión, de modo de evitar la interferencia entre las frecuencias generadas y las transmitidas. Esta última opción, sin embargo, no suele utilizarse en la práctica y el uso de una fibra NZ-DSF adecuada suele ser suficiente para evitar los efectos de FWM. En general, para sistemas de muy alta capacidad (varios canales de 10 Gb/s), los efectos de XPM son mucho más importantes que los de FWM y son el factor determinante del desempeño del sistema.

Escalas típicas de los fenómenos lineales y no-lineales

Los efectos de atenuación, dispersión cromática y no-lineales tienen asociadas escalas

³Las fibras NZ-DSF son las que suelen utilizarse en tendidos nuevos, aunque las fibras ópticas SSMF son, en abrumadora mayoría, la más utilizadas a escala global.

de longitud características. En el caso de la atenuación, vimos que esta escala estaba dada por una longitud efectiva $L_{\text{eff}} \sim 1/\alpha$. Las restantes longitudes características están dadas por:

$$\begin{aligned} \text{Longitud de Dispersión: } L_D &= T_0^2 / |\beta_2| \\ \text{Longitud No-Lineal: } L_{NL} &= 1 / \gamma * P_0 \end{aligned}$$

donde T_0 y P_0 son la duración y potencia inicial del pulso transmitido, respectivamente. Estas longitudes características nos permiten prever que efecto será relevante en un sistema dado. Por ejemplo, un sistema que opere a 10 Gb/s ($T_0 = 100$ ps), sobre fibra SSMF ($\beta_2 = -20$ ps²/km) con una potencia inicial $P_0 = 2$ mW tiene $L_D = 500$ km y $L_{NL} \sim 410$ km. Si la longitud de fibra es tal que $L \ll L_D$, L_{NL} , entonces los efectos dispersivos y no-lineales serán pequeños. Es decir, para un segmento de $L = 50$ km sólo deberemos tener en cuenta la atenuación de la fibra. En cambio, si la potencia inicial es de $P_0 = 20$ mW, entonces $L_{NL} \sim 40$ km, comparable con la longitud del enlace; en este caso, los efectos no-lineales serán más importantes que los dispersivos y no podrán desprejarse. En un sistema de última generación, operando a una tasa $B = 40$ Gb/s, la longitud de dispersión para fibra SSMF es de $L_D \sim 30$ km, de modo que los efectos dispersivos se vuelven muy importantes en enlaces cortos.

Es importante recalcar que las longitudes características introducidas en esta sección son útiles para estimar la importancia relativa de los diferentes efectos, pero será necesario recurrir a la simulación numérica y experimental para conocer exactamente que impacto tendrán en un sistema en particular.

Solitones Ópticos

En las secciones anteriores discutimos los efectos de dispersión cromática y auto-modulación de fase; estos efectos tienen asociadas longitudes características que nos permiten prever, para un sistema determinado, cual dominará las características de la propagación. En particular, los casos en los cuales uno de los efectos es dominante son muy interesantes porque admiten soluciones analíticas. En el caso más general, la evolución de la señal transmitida puede ser complicada y se requerirá de simulaciones numéricas y/o experimentales para determinar la evolución de los pulsos. Existe, sin embargo, un interesante caso en el cual estos efectos tienen una magnitud similar y, aún así, es posible obtener una solución analítica para la evolución de los pulsos transmitidos.

Físicamente, el efecto de la dispersión cromática es el de "reacomodar" las componentes de frecuencia del pulso debido a la diferen-

cia de velocidad que experimentan. En el llamado “régimen de dispersión normal”, caracterizado por un parámetro de GVD $\beta_2 > 0$, las componentes “rojas” (baja frecuencia) viajan más rápido que las componentes “azules” (alta frecuencia). En el “régimen de dispersión anómala” ($\beta_2 < 0$) ocurre lo opuesto. En particular, en la 3era ventana, la mayor parte de las fibras ópticas que se emplean en sistemas de comunicación tiene un parámetro de GVD $\beta_2 < 0$.

En cuanto al efecto de auto-modulación de fase, como discutimos anteriormente, es responsable de crear nuevas frecuencias a medida que el pulso se propaga.

Ambos fenómenos, dispersión cromática y SPM, tienen como resultado la aparición de *chirp* en los pulsos transmitidos, es decir, los pulsos adquieren un *exceso de ancho espectral*⁴. Es posible mostrar que, en el régimen anómalo (y despreciando la atenuación de la fibra), los efectos de GVD y SPM pueden cancelarse exactamente para un pulso cuya forma inicial es de la forma secante hiperbólica ($\text{sech}(T/T_0)$) y cuando la relación entre los parámetros iniciales satisface:

$$\gamma P_0 = |\beta_2| / T_0^2,$$

es decir, $L_D = L_{NL}$. Un pulso que tenga una forma del tipo *sech* y duración y potencia iniciales que satisfagan esta última condición se propagará sin cambios en su perfil temporal/espectral⁵. Este pulso, llamado *soliton*, no sufre distorsiones no importa cuán lejos se propague, lo cual lo transforma en un candidato ideal para sistemas de comunicación.

En la práctica, sin embargo, podemos notar que el balance entre los efectos dispersivos y no-lineales no puede mantenerse indefinidamente debido a la pérdida de potencia del pulso por la atenuación de la fibra óptica por lo que, estrictamente, en un sistema de comunicación convencional no es posible propagar solitones a menos que se logre eliminar la atenuación de la fibra o se utilicen las llamadas “dispersion-decreasing fibers” (DDF) que presentan una atenuación que disminuye con la distancia de forma exponencial, es decir, “siguiendo” la pérdida

⁴Específicamente, los pulsos que estaban “limitados por transformada”, para los cuales el producto del ancho espectral por el ancho temporal es el mínimo posible, dejan de estarlo.

⁵La primera demostración de la existencia de solitones en el contexto de las fibras ópticas data de 1973 [12]. La primera observación experimental fue hecha en 1980 [13].

de potencia y, de ese modo, manteniendo punto a punto el balance entre la dispersión cromática y la auto-modulación de fase. Sin embargo, estas fibras sólo se usan en experimentos de laboratorio y no en sistemas comerciales.

Sistemas WDM de alta capacidad

Un sistema WDM de alta capacidad consiste de un transmisor WDM, una serie de segmentos de fibra óptica y un receptor WDM. El sistema se muestra esquemáticamente en la Fig. 7. El transmisor WDM está formado por N -transmisores con láseres de longitudes de onda $\lambda_1 \dots \lambda_N$ que son “multiplexados” (por un dispositivo Array-Waveguide Router, AWG, ver Apéndices), amplificados por un Amplificador a Fibra Óptica Dopada con Erblio (EDFA, ver Apéndices) y transmitidos por el enlace. Este enlace está formado por una secuencia de segmentos (*spans*, en la jerga) de fibra óptica seguidos por EDFAs. Típicamente, cada segmento mide 80-120 km, dependiendo del tipo/atenuación de la fibra óptica utilizada; en sistemas submarinos, estos segmentos miden entre 40-50 km (lo que ayuda a mantener una elevada relación señal-ruido).

Los amplificadores EDFAs colocados al final de cada segmento de fibra compensan la pérdida del segmento precedente, volviendo la potencia de la señal al nivel que tenía al comienzo del sistema. La atenuación de 100 km de fibra óptica es de, típicamente, 22 dB (corresponde a un factor de atenuación de la señal de, aproximadamente, 160 veces); por lo tanto, estos amplificadores exhiben ganancias de 17 a 24 dB (factores de 150 a 250 en unidades lineales). Es importante notar que el EDFA no sólo amplifica la señal sino que, como todo amplificador, introduce ruido. De esta forma, la relación señal-ruido se degrada en la cadena de amplificadores; esta degradación de la relación señal-ruido, sumada a las distorsiones lineales (dispersión cromática) y no-lineales (SPM, XPM, FWM), determinan la distancia máxima que la señal transmitida puede recorrer aún pudiendo ser detectada con una adecuada tasa de error.

Por último, el receptor consiste en un “demultiplexor” (también un dispositivo AWG) que separa los canales; los canales individuales son detectados por sendos receptores.

Actualmente, sistemas WDM disponibles comercialmente son capaces de transmitir 160 canales a una tasa de 10 Gb/s cada uno, es decir, un total de 1.6 Tb/s cubriendo distancias de ~500 km.

Para sistemas que operan a tasas de 10 Gb/s o mayores, como vimos anteriormente, la dispersión cromática de la fibra puede represen-

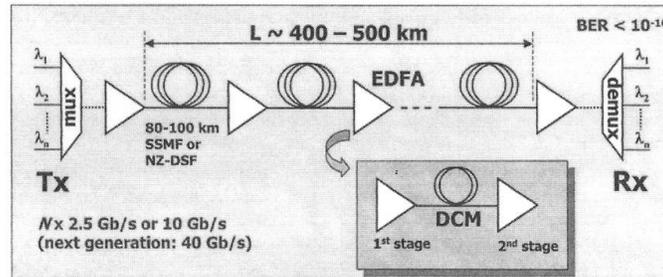


Fig. 7. Diagrama esquemático de un sistema WDM. Un dispositivo "multiplexor" (generalmente un dispositivo AWG [ver Ref. 8]) combina a los diferentes canales. Éstos se transmiten por una cadena de segmentos de fibra (SSMF o NZ-DSF, generalmente) seguidos por amplificadores ópticos EDFAs. En el detalle se muestra la estructura de un EDFA: dos etapas amplificadoras y un módulo de compensación de la dispersión (DCM). Los puntos de amplificación de la señal se llaman "repetidores". Los canales son finalmente de-multiplexados y enviados a sendos receptores. La tasa de error debe ser mejor a 10^{-16} en sistemas de última generación. Tx y Rx: transmisores y receptores, respectivamente. BER: bit-error-rate (tasa de error). N: número de canales WDM.

tar un severo problema. Por este motivo, en cada segmento no sólo se amplifica la señal recibida sino que, también, se compensa la dispersión del segmento de fibra precedente utilizando DCMs. Como estos DCMs atenúan a los canales transmitidos, suelen colocarse entre etapas las etapas amplificadoras de un EDFA (ver Apéndices). De esta forma, es posible cubrir grandes distancias sin necesidad de "regenerar" a los pulsos. La posibilidad de utilizar DCMs que no compensen exactamente la dispersión del segmento anterior añade un grado mayor de flexibilidad en el diseño del sistema. De esta forma, se introduce el concepto de *mapas de dispersión*: mediante la elección de diferentes DCMs es posible, no sólo reducir las distorsiones no-lineales⁶, sino también ajustar la magnitud de la dispersión cromática acumulada que tienen los pulsos a lo

⁶La relación entre los mapas de dispersión y la distorsión no-lineal que sufren los pulsos es no trivial y descubrirla requiere de intensas simulaciones numéricas y/o experimentales. En particular, sistemas que operan a diferentes tasas y que, por lo tanto, pueden estar limitados por diferentes interacciones no-lineales, requerirán distintos mapas de dispersión; éste es un tema de particular interés en sistemas de "tráfico híbrido" en los cuales se transmiten canales WDM con diferentes tasas simultáneamente [17].

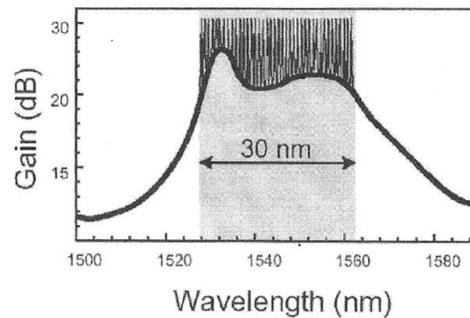


Fig. 8.1. Espectro de ganancia de un EDFA ("C-band").

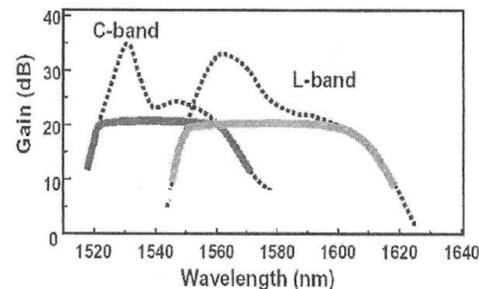


Fig. 8.2. Espectro de ganancia de un EDFA en C-band y L-band.

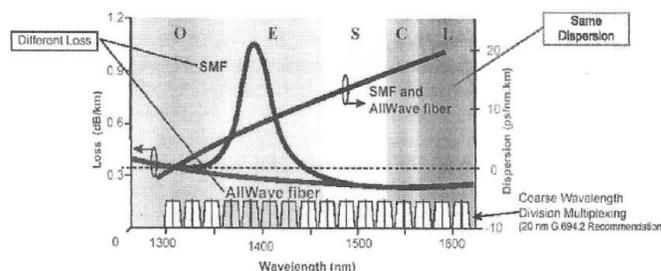


Fig. 8.3. Bandas de transmisión WDM y atenuación de una fibra "AllWave" que no presenta una resonancia en $\lambda = 1.4 \mu\text{m}$, permitiendo utilizar esta banda para la transmisión de canales.

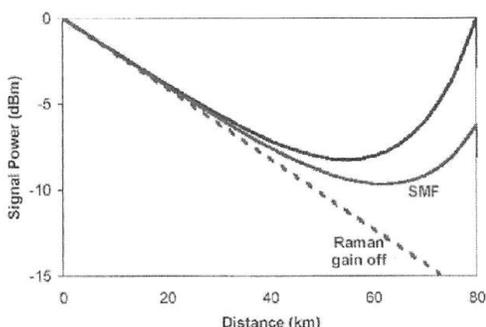


Fig. 8.4. Evolución de la potencia de la señal con y sin bombeo Raman. El efecto de la amplificación distribuida es el de mejorar la relación señal-ruido del segmento de fibra.

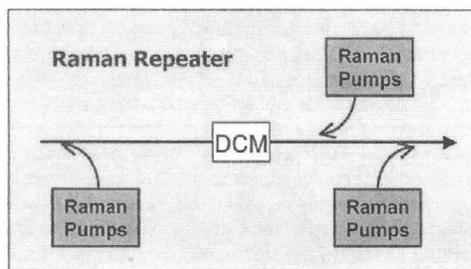


Fig. 8.6. Repetidor óptico "Raman".

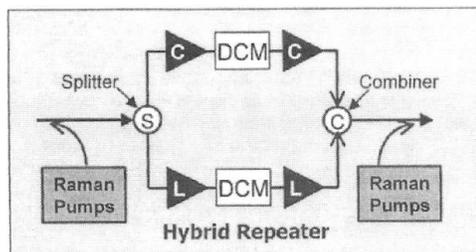


Fig. 8.5. Repetidor óptico "híbrido".

largo del sistema; este es un punto particularmente importante en sistemas de largo alcance, en los cuales se implementan puntos de acceso a lo largo del recorrido [14].

A fines de los años 90 emergieron dos tendencias en el campo de los sistemas de trans-

porte óptico de alta capacidad. Por un lado, la de intentar cubrir distancias "continentales" sin necesidad de regenerar la información transmitida en puntos intermedios y, por el otro, la introducción de la siguiente generación de sistemas ópticos, operando a tasas de 40 Gb/s por canal.

Los llamados sistemas de *Ultra-Long-Haul* (ULH) capaces de cubrir distancias del orden de 4000 km utilizan una serie de nuevas tecnologías tales como formatos de modulación resistentes a distorsiones lineales y no-lineales, módulos de compensación de la dispersión cromática de "banda ancha", ecualización dinámica de los canales WDM y amplificación Raman distribuida (ver Apéndices y Ref. [15]).

La introducción comercial de sistemas de 40 Gb/s por canal, ocurrida a comienzos de 2002 [16], requirió de grandes avances en electrónica de alta velocidad, con componentes de anchos de banda superiores a los 40 GHz, y del desarrollo de dispositivos de compensación de la dispersión dinámicos (TDCs). Desde el punto de vista "físico", los sistemas de ultra-long-haul de

10 Gb/s están, en general, limitados por fenómenos de XPM (es decir, “inter-canal”) mientras que los sistemas de 40 Gb/s están limitados por fenómenos de SPM (“intra-canal”). En particular, en 1998, cobró gran importancia el estudio de los fenómenos no-lineales en sistemas de alta velocidad con la introducción de los conceptos de XPM y FWM intra-canal (IXPM e IFWM) [18], abriendo un nuevo campo de estudio de fenómenos no-lineales en sistemas de comunicación óptica.

Tanto para sistemas ULH de 10 Gb/s como para sistemas de 40 Gb/s, donde los requerimientos de relación señal-ruido para mantener una tasa de error son más sensibles, se han introducido técnicas de amplificación óptica de mejor desempeño de ruido, como la amplificación Raman, formatos de modulación de mayor sensibilidad⁷ y mejor desempeño no-lineal.

Recientemente se ha anunciado el interés en desarrollar componentes para la próxima generación de sistemas ópticos operando a tasas de 160 Gb/s por canal [19].

Por último, cabe preguntarse, para qué es necesario desarrollar tecnologías para canales cada vez más veloces en vez de incrementar la capacidad de los sistemas WDM simplemente agregando nuevos canales? La respuesta a esta pregunta tiene que ver con el problema de la *eficiencia espectral*, es decir, con que tan próximos en frecuencia pueden colocarse canales modulados a una determinada tasa B y, en definitiva, de cómo aprovechar al máximo el ancho de banda de los amplificadores disponibles y, eventualmente, el del canal de comunicación que es la fibra óptica.

Es posible mostrar que, para una capacidad total dada, es conveniente usar menos canales, pero más rápidos. Esto se debe a las distorsiones no-lineales, que pasan de ser inter-canal a intra-canal. Sin embargo, este no es un tema cerrado y debemos esperar nuevos desarrollos en un campo que ha sido tremendamente dinámico en los últimos 20 años.

Conclusiones y perspectivas futuras

En este trabajo discutimos los conceptos básicos necesarios para entender el funcionamiento de los sistemas de comunicación por fi-

⁷La “sensibilidad” de un sistema transmisor-receptor nos da una idea de que relación señal-ruido se necesita para mantener una determinada tasa de error. Un formato “más sensible” requerirá de una menor relación señal ruido para un tasa de error dada.

bra óptica de alta capacidad. Vimos como la introducción de los amplificadores ópticos y de técnicas de WDM permitieron un enorme aumento de la capacidad de estos sistemas.

Los sistemas actuales son capaces de transportar caudales de información de 1.28 Tb/s (1.28 billones de bits por segundo) a través de distancias continentales (4000 km) sin necesidad de regeneración de los pulsos transmitidos.

La nueva generación de sistemas WDM operando a tasas de 40 Gb/s por canal es capaz de transportar 2.56 Tb/s a través de distancias superiores a 1000 km e, incluso, ya se ha demostrado cómo duplicar esta capacidad con tecnologías disponibles hoy en día.

La capacidad de una fibra óptica es de, aproximadamente, 20 THz (es decir, 20 Tb/s) alrededor del mínimo de atenuación en $\lambda = 1.5$ μm . Vemos que, por lo tanto, aún se está muy lejos de utilizar totalmente el ancho de banda provisto por una fibra óptica monomodo.

Nuevas tecnologías y conceptos tales como: formatos de modulación resistentes a distorsiones lineales y no-lineales, amplificación óptica Raman, módulos de compensación de la dispersión cromática fijos y sintonizables, códigos de corrección de errores, entre otros, permitirán, en el futuro próximo, ampliar la capacidad de transmisión de los sistemas ópticos de modo que continúen siendo la infraestructura sobre la cual se sustenta el rápido crecimiento de las comunicaciones a escala planetaria.

Agradecimientos

El autor agradece gentilmente a M. L. Cancillieri y a R. Perazzo por su apoyo y entusiasmo.

Referencias

- [1] A. Jones, Historical Sketch of the Electrical Telegraph, Putnam, New York, (1852).
- [2] A. G. Bell, U.S. Patent No. 174,465 (1876)
- [3] T. H. Mainman, *Nature* 187, p.493 (1960).
- [4] F. P. Kapron, D. B. Keck, and R. D. Maurer, *Appl. Phys. Lett.* 17, p.423 (1970).
- [5] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics 3rd Ed.*, Academic Press (2001).
- [6] A. H. Gnauck et al., “2.5 Tb/s (64 × 42.7 Gb/s) Transmission Over 40x100-km NZDSF Spans Using RZ-DPSK Format and All-Raman Amplification”, *Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference (OFC)*, post-deadline paper FC2-1, California, US (2002).
- [7] S. A. Vanstone, P. C. Van Oorschot, *An Introduction to Error Correcting Codes with Applications 1st Ed.*, Kluwer Academic Publishers (1989).

- [8] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems 2nd Ed.*, John Wiley & Sons (1997).
- [9] X. Shu et al., "Tunable Dispersion Compensator Based on Distributed Gires-Tournois Etalons", *IEEE Photon. Techn. Lett.*, 15, 8, p.1111 (2003).
- [10] R. W. Boyd, *Nonlinear Optics 2nd Ed.*, Elsevier (2003).
- [11] D. F. Grosz, C. Mazzali, S. Celaschi, A. Paradisi, H. L. Fragnito, "Modulation Instability Induced Resonant Four-Wave Mixing in WDM Systems", *IEEE Photon. Techn. Lett.*, 11, 3, p.379 (1999).
- [12] A. Hasegawa and F. Tappert, "Transmission of stationary nonlinear optical pulses in dispersive dielectric fibers. I. Anomalous dispersion", *Appl. Phys. Lett.*, 23, p.142 (1973)
- [13] L. F. Mollenauer, R. H. Stolen, and J. P. Gordon, "Experimental observation of picosecond pulse narrowing and solitons in optical fibers", *Phys. Rev. Lett.*, 45, p.1095 (1980).
- [14] D. F. Grosz, A. Agarwal, S. Banerjee, D. N. Maywar, and A. P. Kung, "All-Raman Single-Wideband DWDM Transmission Systems for Ultra-Long-Haul and Ultra-High-Capacity," *J. of Lightwave Techn.*, 22, 2, p.423 (2004).
- [15] A. Kung, A. Agarwal, S. Banerjee, D. F. Grosz, D. N. Maywar, M. Movassaghi and T. H. Wood, "10Gb/s and 40Gb/s ultra-long haul transmission on a common all-Raman single-wideband platform", *European Conference on Optical Communication ECOC*, invited paper 1.1.1, Copenhagen, Denmark (2002).
- [16] http://www.lucnet.com/solutions/core_optical.html
- [17] A. Agarwal, S. Banerjee, D. F. Grosz, A. P. Kung, D. N. Maywar, T. H. Wood, "Ultra-long-haul transmission of 40 Gb/s RZ-DPSK in a 10/40G hybrid system over 2500 km of NZ-DSF", *IEEE Photon. Techn. Lett.*, 15, 12, p.1779 (2003).
- [18] R.-J. Essiambre, B. Mikkelsen, and G. Raybon, "Intra-channel cross-phase modulation and four-wave mixing in high-speed TDM systems", *Electron. Lett.*, 35, 18, p.1576, (1999)
- [19] S. Matsumoto, M. Takabayashi, K. Yoshiara, T. Sugihara, T. Miyazak, F. Kubota, "Divided Thin-Film Heater for 160-Gb/s RZ Transmissions", *IEEE Photon. Techn. Lett.*, 16, 4, p.1095 (2003).

Algunos libros útiles de referencia en el área son

- B. E. A. Saleh and M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics 1st Ed.*, John Wiley & Sons (1991).
- I. P. Kaminow and T. Li, Eds., *Optical Fiber Telecommunications IVA: Components 4th Ed.*, Academic Press (2002).
- I. P. Kaminow and T. Li Editors, *Optical Fiber Telecommunications IVB: Systems and Impairments 4th Ed.*, Academic Press (2002).

Manuscrito recibido y aceptado en mayo de 2004.

Apéndice 1: Evolución de la capacidad de los sistemas de comunicación óptica

En la Figura 2 se muestran la 1^{era} ventana ($\lambda = 0.85 \mu\text{m}$, 2^{da} ventana ($\lambda = 1.3 \mu\text{m}$) y 3^{era} ventana ($\lambda = 1.5 \mu\text{m}$) de las comunicaciones ópticas. La introducción comercial del amplificador óptico permitió un enorme incremento de la capacidad de transmisión a partir de la introducción comercial de sistemas empleando técnicas de Wavelength Division Multiplexing (WDM). En la figura se señalan, además, las diferentes "generaciones" de sistemas de comunicación en la 3^{era} ventana. Sistemas de próxima generación, introducidos comercialmente en 2002, hacen uso de la propagación de "solitones"¹ (pulsos que mantienen su forma mediante la cancelación de los efectos de dispersión a través de efectos no-lineales) para alcanzar enormes capacidades (más de 1 Tb/s) transmitidas por distancias de miles de kilómetros.

¹Estrictamente hablando, y como discutimos anteriormente, los pulsos transmitidos no son solitones, sino pulsos "aproximadamente" solitónicos. Los sistemas operan en el régimen de *dispersión-managed soliton*.

Apéndice 2: Atenuación y dispersión de fibras ópticas

En la Figura 4 se muestran la atenuación y dispersión de fibras monomodo standard (SSMF), de dispersión dislocada (DSF) y de dispersión dislocada no-nula (NZ-DSF). Se muestra también el ancho de banda de 20 THz de las fibras ópticas (o, de forma equivalente, 20 Terabits/s) y la región en la que operan los amplificadores ópticos (EDFAs). La llamada "primera ventana" de las comunicaciones ópticas corresponde a una longitud de onda de $0.85 \mu\text{m}$. La "segunda ventana" opera en $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$, aprovechando una menor atenuación (del orden de 0.35 dB/km) y el mínimo de dispersión cromática de las fibras SSMF. La "tercera ventana" opera en el mínimo de atenuación en $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$. Las fibras DSF fueron introducidas (a comienzos de los 90s) para hacer coincidir el mínimo de dispersión cromática con el mínimo de atenuación. La introducción comercial de transmisores de mayor potencia hizo que los efectos no-lineales, debidos a la dependencia del índice de refracción de la fibra con la intensidad de los pulsos transmitidos, se volviera el factor limitante del desempeño de los sistemas de comunicación óptica en la tercera

ventana. En el "régimen no-lineal" es deseable que la fibra presente una cantidad limitada, pero no-nula, de dispersión cromática; esto motivó el diseño e introducción comercial de las fibras NZ-DSF en la segunda mitad de los 90s.

Apéndice 3: Efecto de la dispersión cromática

En la Figura 5 vemos como pulsos cortos (representando la transmisión de un bit "1") sufren ensanchamiento temporal provocado por la dependencia del índice de refracción del núcleo de la fibra óptica con la longitud de onda. En términos coloquiales: *diferentes colores viajan a diferentes velocidades dentro de la fibra*. La consecuencia de este efecto es la superposición de pulsos (bits), que se pone de manifiesto especialmente cuando se transmiten secuencias binarias "101": en la figura, el detector tendrá problemas para decidir si la secuencia transmitida es "101" o "111". Como es de esperarse, el efecto de la dispersión cromática se vuelve más importante conforme el sistema opera a tasas mayores (dado que los pulsos transmitidos tienen duración proporcionalmente más corta). La forma en que se combate este efecto es mediante el uso de "módulos de compensación de la dispersión" (DCMs, según la sigla en inglés) que se insertan en cada repetidor. Estos módulos pueden tener elevadas pérdidas, por lo que se hace necesario introducir amplificadores ópticos de dos etapas (ver apéndice 5).

Apéndice 4: Mezcla de Cuatro Ondas

En la Figura 6 se muestra el efecto de transmitir cuatro canales WDM separados por 1 a 1.5 nm en una fibra DSF de 25 km de longitud y en una fibra NZ-DSF de 50 km de longitud; los canales son transmitidos con potencias encontradas típicamente en sistemas WDM de alta capacidad. El efecto es notable: en el caso de la fibra DSF hay una enorme generación de "tonos" o "bandas laterales" a expensas de la potencia de los canales transmitidos. Sin embargo, el efecto más grave para el sistema proviene de la interferencia de estos tonos con los canales de información, llevando a un substancial aumento de la cantidad de errores detectados. El uso de una fibra NZ-DSF, con una pequeña dispersión en la banda de transmisión, anula prácticamente este efecto.

Apéndice 5: Efecto de la dispersión cromática

En la Figura 8.1 se muestra el espectro de ganancia de un amplificador óptico (EDFA) en

la "C-band", comprendida en el rango de longitudes de onda entre 1530-1560 nm. La disponibilidad de un mecanismo de amplificación óptica en la tercera ventana fue la clave de la introducción de técnicas de WDM, incrementando enormemente la capacidad transmitida por fibra y posibilitando alcanzar distancias transmitidas "totalmente ópticas" muchos mayores.

En la Figura 8.2 se muestra el espectro de ganancia de EDFAs en las "C-band" y en la banda extendida "L-band". La necesidad de actualizar sistemas de un sólo canal a un esquema WDM en fibras DSF llevó al desarrollo de componentes ópticos en la "L-band", en la región de 1575 a 1607 nm. El ancho de banda total utilizable es de, aproximadamente, 64 nm. Con los actuales sistemas de WDM "denso" (DWDM), es posible "acomodar" 160 longitudes de onda de 10 Gbps cada una en las bandas "C+L".

En la Figura 8.3 se muestran en detalle las bandas de transmisión para sistemas WDM "densos" (DWDM) o "de baja granularidad", Coarse-WDM (CWDM). Estos últimos sistemas utilizan canales separados por 20 nm (en comparación con los 0.4 a 0.8 nm encontrados en sistemas DWDM) y son atractivos para tendidos urbanos donde se busca aumentar la capacidad transmitida, pero no maximizarla. En estos casos se vuelve necesario contar con una fibra óptica que no presente una resonancia de atenuación en torno de $\lambda = 1.4 \mu\text{m}$. Estas fibras fueron introducidas comercialmente a fines de los 90s. En la figura se compara la atenuación de una fibra *AllWave* de OFS, Furukawa Electric con la de una fibra monomodo standard. Se muestran también las bandas C, L y S. Esta última ganó fuerza con la introducción comercial de amplificadores de Raman discretos. Sin embargo, actualmente no existen sistemas comerciales de alta capacidad que operen en esta banda.

Otro mecanismo de amplificación óptica se basa en la *amplificación Raman*, o amplificación distribuida: potentes láseres "bombean" a la fibra óptica en dirección opuesta (en general y, en algunos casos en ambas direcciones) a la propagación de los canales WDM. Estos láseres, en longitudes de onda ~ 100 nm menores a las de la banda que se desea amplificar, proveen amplificación a las señales transmitidas, disminuyendo la atenuación del segmento de fibra y, por lo tanto, mejorando la relación señal-ruido. La amplificación Raman es un efecto no-lineal, es decir, es más intenso cuanto menor es el área del núcleo de la fibra; esto llevó a que, recientemente, se introdujeran nuevas generaciones de fibras ópticas optimizadas para operar en

sistemas que hagan uso de técnicas de amplificación distribuida. La evolución de la potencia de la señal transmitida en presencia de amplificación Raman se muestra en la Figura 8.4.

En la Figura 8.5 se muestra el esquema de un "repetidor" óptico operando en las bandas C y L. Son necesarios filtros para separar (splitter) y combinar (combiner) las respectivas bandas; esto se debe a que son amplificadas por diferentes EDFAs. Esto lleva a la duplicación de componentes de ópticos. El repetidor descrito es,

además, un repetidor "híbrido": combina amplificación mediante EDFAs con amplificación Raman distribuida.

En la figura 8.6 se muestra el esquema de un repetidor Raman. En este caso se puede operar el sistema en una banda de longitudes de onda "continua". Este tipo de repetidor fue introducido comercialmente en 2002 y, entre otras ventajas, presenta un mejor desempeño de ruido, tamaño reducido y flexibilidad de operación para sistemas DWDM de altísima capacidad.