

Efectos no lineales en las fibras ópticas (III)

Tercera entrega de la serie de artículos que la revista dedicará 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@tel.etecsa.cu

En todos los sistemas de fibra óptica están presentes los efectos no lineales en la transmisión. Sin embargo, en aquellos que operan a velocidades iguales o inferiores a 2,5 Gbit/s y con potencias que no exceden algunos milivatios para la transmisión de información, la influencia de los mismos es bastante reducida por lo que no son considerables. A medida que se incrementa la velocidad de transmisión —a partir de 10 Gbit/s—, la longitud de los enlaces y la potencia de los transmisores; los efectos no lineales en la fibra comienzan a ser importantes y deben ser considerados de forma ineludible porque alteran significativamente las características de las señales transmitidas, con la degradación de la calidad del sistema y la limitación de la capacidad de información de los mismos.

Estos efectos no lineales, aunque inciden de diferentes formas sobre la transmisión, se basan en la interacción de la radiación transmitida con el material por donde se propaga la radiación y responde a dos mecanismos básicos, el primero es la variación del índice de refracción del material —en este caso la sílice— cuando la intensidad de la radiación óptica sobrepasa una determinada poten-

cia, $n = n(P)$. Esta variación provoca diferentes fenómenos como la automodulación de fase —*Self-Phase Modulation* (SPM)—, la modulación de fase cruzada —*Cross-Phase Modulation* (XPM ó CPM)—, la mezcla de cuatro ondas —*Four Wave Mixing* (FWM)—, también designada por algunos autores como mezcla de cuatro fotones —*Four Photon Mixing* (FPM)—. El segundo mecanismo es la interacción de los fotones incidentes con algunos modos de vibración del material que se conocen como fonones, de esta interacción resultan dos tipos de dispersiones: la Dispersión Estimulada de Raman —*Stimulated Raman Scattering* (SRS)— y la Dispersión Estimulada de Brillouin —*Stimulated Brillouin Scattering* (SBS)—.

Los efectos no lineales no son independientes de las características geométricas de la fibra y el perfil de la radiación no es rectangular, sino tiene una forma derivada del modo de propagación, esto da lugar a una intensidad inconstante que afecta de manera diferente a una y otras zonas de la sección de la fibra. La intensidad de la señal disminuye a medida que se propaga, al ser los efectos no lineales dependientes de dicha intensidad, entonces la

incidencia de estos sobre la transmisión varía con la distancia. Para este análisis se definen dos parámetros característicos: la longitud y el área efectiva.

Longitud efectiva

Para determinar la longitud efectiva, se considera que la potencia es constante a lo largo de la longitud del enlace L_{eff} y cuya definición viene dada por la expresión:

$$P_o L = \int_{Z=0}^L P(z) dz$$

Si se tiene en cuenta que la variación de la potencia óptica por la fibra decrece según la ley

$$P(z) = P_o e^{-\alpha z}$$

donde α es el coeficiente de atenuación de la fibra, se obtiene para una L_{eff} :

$$L_{eff} = \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha}$$

Para valores de distancias largas, la expresión anterior puede aproximarse a:

$$L_{eff} = 1 / \alpha$$

La longitud efectiva adquiere valores de 15 a 25 km para distancias largas y, valores del

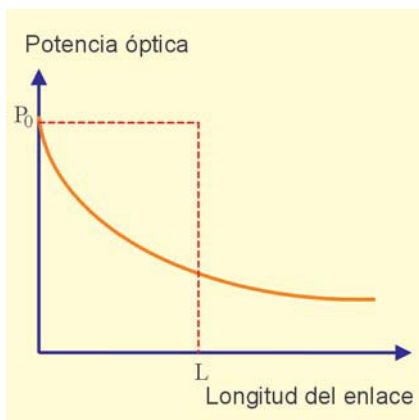


Figura 1 Determinación de la longitud efectiva de una fibra

coeficiente de atenuación de la fibra a entre 0,15 y 0,25 dB/km.

Área efectiva (A_{eff})

El área efectiva es un parámetro estrechamente relacionado con las no linealidades de la fibra óptica que afectarán la calidad de transmisión de los sistemas de fibra óptica, especialmente en los sistemas de larga distancia con amplificación óptica.

El área efectiva A_{eff} se define como:

$$A_{eff} = \frac{2\pi \int_0^\infty I(r) r dr}{\int_0^\infty I(r)^2 r dr}$$

donde $I(r)$ es la distribución de intensidad de campo del modo fundamental de la fibra para el radio r . La integración de la ecuación anterior se efectúa en toda la superficie transversal de la fibra. Por ejemplo, si se hace una aproximación gaussiana tal que:

$$I(r) = \exp(-2r^2/W^2)$$

donde $2w$ es el diámetro del campo modal (MFD), la ecuación (II-1)

puede integrarse analíticamente dando:

$$A_{eff} = \pi w^2$$

El área efectiva no puede estimarse con exactitud a partir de la ecuación anterior, debe tenerse en cuenta el factor de corrección k , que depende de la longitud de onda y los parámetros de la fibra como los perfiles de índice de refracción, MFD —*Mode Field Diameter* / Diámetro del Campo Modal— y la longitud de onda de dispersión nula.

$$A_{eff} = k \pi w^2$$

Los valores típicos de área efectiva oscilan entre 90 y 50 μm^2 .

A continuación se abordan las principales características de los fenómenos no lineales.

Efectos no lineales por la variación del índice de refracción de la sílice con relación a la potencia óptica

Las fibras ópticas tienen un comportamiento no lineal caracterizado por la dependencia del índice de refracción con la intensidad del campo óptico. Esta dependencia es conocida como efecto Kerr y se expresa como:

$$n = n_0 + n_{nl} \left(\frac{P}{A_{eff}} \right)$$

donde:

n_0 : índice de refracción del núcleo de la fibra para bajos niveles de potencia óptica.

n_{nl} : coeficiente del índice de refracción no lineal — $2,35 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ para el silicio—.

P : potencia óptica, expresada en Watt.

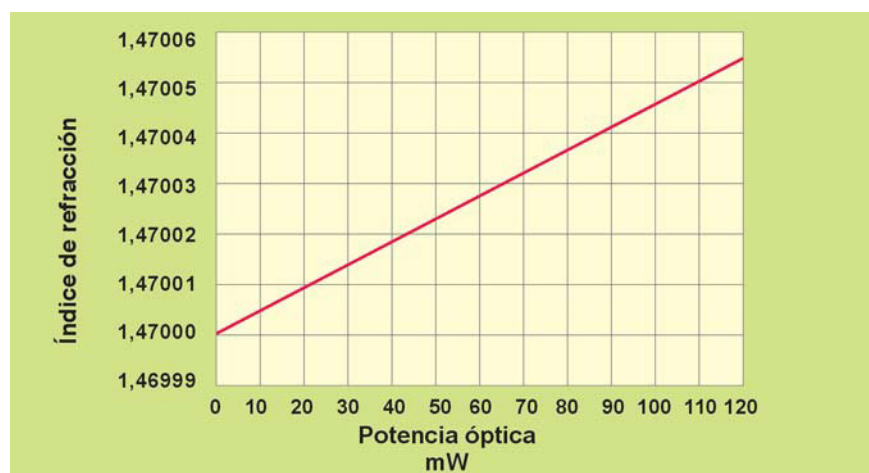


Figura 2 Dependencia del índice de refracción con relación a la potencia óptica transmitida por la fibra

A_{eff} : área efectiva del núcleo, expresada en metros cuadrados.

La figura 2 muestra la relación entre el índice de refracción del silicio y la potencia óptica. La dependencia del índice de refracción con la potencia es relativamente pequeña, pero cobra importancia en los sistemas ópticos de comunicaciones de cientos de kilómetros de longitud.

SPM: Self-Phase Modulation —Automodulación de Fase—

Es el caso más simple dentro de los fenómenos no lineales, pues es la intensidad del pulso óptico, la cual posee valores diferentes en las regiones de subida o bajada que en su máximo. Esta variación provoca un desplazamiento inducido de fase que es diverso en cada zona del mismo. El pulso sufrirá una modulación gradual de frecuencia, lo cual hará que cada parte del pulso tenga una frecuencia distinta; a este fenómeno se conoce con la terminología inglesa *Chirping*. Tal efecto puede degradar aquellos sistemas ópticos de una sola longitud de onda que empleen esquemas de modulación de fase.

La SPM convierte las fluctuaciones de la potencia óptica de la señal contenida en un canal en fluctuaciones de fase de la señal. La variación de la fase debido a la no linealidad del índice de refracción está dada por:

$$\sigma_{\phi} = 0,035 \cdot \sigma_p$$

donde:

σ_{ϕ} es la fluctuación rms de la fase en radianes y, σ_p es la fluctuación rms de la potencia en mW. En sistemas monocanales prácticos,

el ruido de fase resultante es menor que 0,04 radianes.

La dispersión de la fibra influye notablemente en la magnitud de la SPM —mientras mayor sea la dispersión cromática de la fibra, mayor será la SPM—. Por otra parte, el diseño de las fibras contribuye a evitar la SPM, las fibras diseñadas con un área efectiva amplia tienen un umbral alto de SPM.

XPM: Cross-Phase Modulation —Modulación de Fase Cruzada—

Mientras que el efecto no lineal era posible aun cuando el sistema era monocanal en el caso anterior, el efecto de modulación de fase cruzada es posible cuando hay superposición en un mismo medio de dos canales.

La modulación de la fase cruzada es similar a la SPM, con la excepción de que esta involucra más de un pulso de luz. En este caso, el efecto del cambio de índice de refracción se ve reforzado por la existencia de otro canal.

En la XPM, el efecto mutuo de la interacción de todos los pulsos que viajan por el interior de la fibra sobre su índice de refracción, provoca que los pulsos se distorsionen en relación con su interacción.

En un sistema de N canales la fluctuación de fase rms en un canal particular, debido a las fluctuaciones de la potencia en otros canales, está representada por:

$$\sigma_{\phi} = 0,07 \sqrt{N} \sigma_p$$

A diferencia de la SPM, la dispersión de la fibra tiene un impacto pequeño en la XPM. Con el aumento del área efectiva de la fibra se reduce el XPM y el resto de las no linealidades de la fibra.

Este fenómeno adquiere importancia en los sistemas con elevados números de canales y que están próximos en longitud de onda. La manera más fácil de evitar la modulación de fase cruzada es espaciando los canales del sistema a 100 GHz, lo cual es posible porque con este intervalo de frecuencias las constantes de propagación son suficientemente diferentes como para desplazarse a velocidades diferentes y el solapamiento que pueda existir entre los pulsos desaparezca a una corta distancia, desapareciendo así la XPM entre dichos pulsos. Esto es posible cuando la diferencia entre la dispersión cromática de los canales sea alrededor de 2 ps/nm.km, que ocurre con el espaciado de 100 GHz, siempre que dichos canales no se encuentren cerca del valor de dispersión nula para fibras monomodos estándar. El fenómeno XPM es un problema grave para las fibras de dispersión desplazada a 1550 nm cuando se trabaja a velocidades por encima de 10 Gbit/s.

FPM: Four-Photon Mixing —Mezcla de Cuatro Fotones—

La mezcla de cuatro fotones (FPM) ocurre sólo en los sistemas de transmisión que portan simultáneamente muchas longitudes de ondas, como es el caso de los sistemas DWDM; la origina la dependencia del índice de refracción de la fibra con la intensidad de la luz. Este efecto es

muy similar al producto de intermodulación de los sistemas eléctricos y se clasifica como un fenómeno de distorsión de tercer orden.

Por ejemplo, dos ondas que se propagan a frecuencias f_1 y f_2 se mezclan y producen dos nuevas frecuencias $2f_1 - f_2$ y $2f_2 - f_1$. Similarmente tres ondas que se propagan, generan nueve nuevas ondas a las frecuencias $f_{ijk} = f_i + f_j - f_k$ donde i, j, k pueden ser 1, 2 ó 3 y cumplen que: i^1k, j^1k .

En general, para un sistema de N canales el número de productos de mezcla generados está dado por $M = 1/2(N^3 - N^2)$.

Si se asume que las longitudes de ondas de entrada de un sistema de tres canales son:

$I_1 = 1551,72 \text{ nm}$	$I_2 = 1552,52 \text{ nm}$	$I_3 = 1553,32 \text{ nm}$
----------------------------	----------------------------	----------------------------

Entonces, las nueve frecuencias nuevas generadas por el sistema son:

$I_1 + I_2 - I_3 = 1550,92 \text{ nm}$	$I_1 - I_2 + I_3 = 1552,52 \text{ nm}$	$I_3 + I_2 - I_1 = 1554,12 \text{ nm}$
$2 I_2 - I_3 = 1551,72 \text{ nm}$	$2 I_3 - I_2 = 1554,12 \text{ nm}$	$2 I_2 - I_1 = 1553,32 \text{ nm}$
$2 I_1 - I_3 = 1550,12 \text{ nm}$	$2 I_1 - I_2 = 1550,92 \text{ nm}$	$2 I_3 - I_1 = 1554,92 \text{ nm}$

Seis de los productos de la intermodulación no coinciden con las longitudes de ondas de entrada y pueden ser eliminados mediante filtros ópticos; los tres restantes coinciden exactamente con las frecuencias originales, entonces no hay forma alguna de eliminarlos una vez que se forman, por lo tanto, hay que prevenir su formación.

La magnitud de la FPM depende del espaciamiento entre canales, la dispersión de la fibra y el esquema de detección. Se incrementa dramáticamente a medida que el espaciamiento entre canales se estrecha. Por otra parte, la FPM es inversamente proporcional a la dispersión de la fibra, es más fuerte su influencia en el punto de cero dispersión. Los esquemas de detección FSK heterodinos son más sensibles a las degradaciones del BER que los esquemas FSK directos. Algunos autores denominan este efecto Mezcla de Cuatro Fotones, pues es realmente ese el proceso físico que tiene lugar.

Efectos no lineales causados por la interacción de los fotones incidentes con algunos de los modos de vibración del material

SRS: *Stimulated Raman Scattering* —Dispersión Estimulada de Raman—

Este efecto consiste en la interacción entre los fotones que inciden sobre el material y las vibraciones que tienen las moléculas o los átomos de este y, reciben el nombre de fonones ópticos. La onda luminosa incidente dispersada por las moléculas sufre un desplazamiento en frecuencia, y da lugar al surgimiento de dos frecuencias: una de menor valor que la frecuencia de la radiación óptica, denominada frecuencia de Stokes y, otra de mayor frecuencia denominada anti-Stokes.

La importancia de este efecto en los sistemas WDM radica en que la frecuencia de Stokes puede encontrarse dentro del margen que

corresponde a algunos de los canales del sistema. En este caso ocurrirá un efecto estimulado y resultará la frecuencia ampliificada.

Si dos ondas ópticas separadas por la frecuencia de Stokes se inyectan en la fibra, la de menor frecuencia —mayor longitud de onda— se amplifica a expensas de la de mayor frecuencia —menor longitud de onda—, es decir, los canales de longitud de onda inferior bombearán energía a los de longitud de onda superior. Este proceso de amplificación se conoce como SRS —*Stimulated Raman Scattering*— y ocasiona la diafonía, degradando el sistema, sobre todo si se tiene en cuenta la dirección de estas señales en dirección a la de recepción.

En un sistema de transmisión óptico simple (monocanal) el umbral de potencia para la ocurrencia del efecto SRS es aproximadamente de 1 W (+30 dBm), por lo tanto, en los sistemas de canal simple el SRS no es un problema.

El intervalo de frecuencia más significativo en el que puede generarse la frecuencia de Stokes es de 13 THz, que corresponde a 125 nm.

Si por una misma fibra se transmiten diferentes longitudes de ondas y entre ellas existe una separación que coincide con el margen de ganancia Raman, entonces habrá transferencia de potencia de cada canal al siguiente. Al ser este fenómeno acumulativo, el canal de mayor longitud de onda habrá recibido señales de todos los anteriores y su intensidad será mayor a la del resto, pero recibirá mayor interferencia.

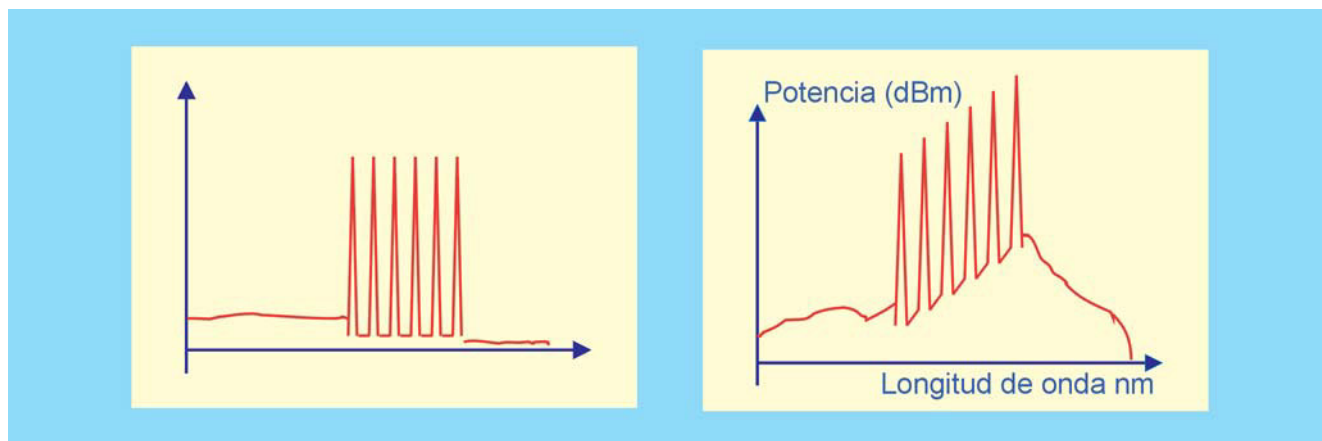


Figura 3 Influencia del efecto SRS en sistemas con amplificadores ópticos

Para minimizar las degradaciones debidas al SRS en los sistemas WDM debe cumplirse que el producto ancho de banda total por potencia óptica total debe ser menor que 500 GHz W:

$$NP [(N - 1)\Delta f] < 500 \text{ GHz W}$$

donde:

N es el número de canales, P la potencia óptica de cada canal y Δf el espaciamiento en frecuencia entre cada canal.

Los inconvenientes expuestos se reducen cuando la dispersión cromática acumulativa es apreciable, debido a que las señales de los canales viajan a diferentes velocidades y disminuyen la posibilidad de solapamiento entre dichas señales.

En los sistemas ópticos que emplean amplificadores, el efecto del SRS puede ser un problema, incluso en sistemas de canal simple. Los sistemas de amplificación prácticos actuales emplean EDFA cuya señal de salida es alrededor de 200 mW (23 dBm) e incluso superiores, por lo tanto, el empleo en cascada de los mismos puede sobrepasar el umbral del SRS. En tales sistemas, el umbral

real para el SRS disminuye en un factor igual al número de amplificadores del enlace.

La figura 3 muestra lo que podría suceder en un sistema WDM de 6 longitudes de ondas que emplea varios amplificadores ópticos en cascada.

Como puede observarse, todas las portadoras inicialmente tienen el mismo nivel de potencia; pero a la entrada del receptor la amplitud de las portadoras no es igual. Los niveles de potencia óptica recibidos crecen desde la portadora de menor longitud de onda hasta la portadora de longitud de onda más larga. Las fibras diseñadas con un área efectiva amplia tienen un umbral alto de SRS.

SBS: Stimulated Brillouin Scattering —Dispersión Estimulada de Brillouin—

La interacción del campo eléctrico de la luz que se propaga a lo largo del material le induce pequeñas vibraciones en su estructura, denominadas vibraciones acústicas y constituyen los fotones acústicos. Este fenómeno ocurre con potencias tan reducidas como

algunos milivatios y propician alteraciones en la densidad del material, es decir, provoca variaciones en el índice de refracción del material, y la luz incidente se esparce en sentido contrario a la de propagación. Por lo tanto, la intensidad de la radiación incidente disminuirá en la misma proporción en que vaya aumentando la que se dispersa. Este efecto impone un límite a la inyección de potencia óptica en la fibra.

Al mismo tiempo, el valor de la frecuencia de la luz esparcida, respecto a la de la luz incidente, se encuentra desplazado hacia una frecuencia menor —mayor longitud de onda— en una cantidad que depende del valor de la propagación de la onda acústica en el material. Este desplazamiento de frecuencia se conoce como desplazamiento Doppler y se expresa:

$$f_B = 2nV_s / \lambda$$

donde:

n es el índice de refracción del núcleo y, V_s es la velocidad del sonido, para el sílice = 5,700 m/s.

Para la fibra óptica, una fibra de silicio que trabaje a 1550 nm, el desplazamiento de frecuencia es $f_B=10\text{-}12\text{ GHz}$, equivalente a 0,09 nm.

La ganancia de Brillouin aparece en un margen de 20 MHz; entonces, si no hay canales tan próximos, no habrá interferencia entre ellos.

El umbral del SBS es independiente del número de canales del sistema, es decir, este efecto queda restringido a cada canal individual, no se traduce en efectos de diafonía y apenas tiene influencia en los sistemas WDM. También introduce un ruido significativo en el sistema, que degrada la BER del mismo.

El control del SBS es importante en los sistemas de transmisión de elevada velocidad que emplean moduladores externos y fuentes láser de onda continua (CW), así como en la transmisión de señales de CATV a 1550 nm.

El umbral del SBS depende de parámetros del sistema como la longitud de onda de trabajo —es más bajo a 1550nm que a 1310 nm—; el ancho espectral de la fuente emisora —mientras más monocromática sea la fuente óptica, más bajo será el umbral para el SBS—; el tipo de fibra —depende del área efec-

tiva del núcleo de las fibras, mientras mayor sea el área efectiva, mayor será el umbral—. Las fibras de dispersión desplazada tienen la menor área efectiva, por lo tanto, tienen el umbral más bajo. Esta característica las hace muy sensibles al SBS cuando se trabaja a 1550nm; el esquema de modulación empleado —en la práctica, el umbral de potencia depende del formato de modulación—. En el caso de los sistemas de modulación ASK y FSK, la ganancia del SBS decrece en un factor de 4 con el incremento de la velocidad de transmisión. Similarmente para los sistemas PSK de alta velocidad, la ganancia del SBS decrece linealmente con la velocidad de transmisión; y del número de etapas amplificadoras —el otro factor a considerar es la disminución del umbral de SBS a medida que aumenta el número de EDFAs en el enlace—. El umbral de SBS para un sistema que contiene N amplificadores es el umbral sin los amplificadores en mW dividido por N , por lo tanto, en los sistemas con amplificadores el umbral de SBS podría ser muy bajo, y afectaría seriamente al sistema.

Conclusiones

Los efectos no lineales de una u otra forma pueden alterar las señales transmitidas y degradar la calidad de los sistemas. Para minimizar el efecto no lineal del índice de refracción puede disminuirse (P/A_{eff}) , reduciendo la potencia (P) de la señal inyectada en la fibra o con el aumento del área efectiva (A_{eff}), opción que actualmente buscan los más recientes diseños de fibras ópticas. ■

Bibliografía

- Gautheron, O. "Redes submarinas ópticas en el umbral de los Tbit/s por capacidad de fibra". *Revista de Telecomunicaciones de Alcatel* (3^{er} trimestre de 2000): 171-179.
- Kartalopoulos, Stamatios V. *Introduction to DWDM Technology*. USA: IEEE Wiley Interscience, 2000.
- Martín Pereda, José Antonio. *Sistemas y redes ópticas de comunicaciones*. Madrid: Pearson/Prentice Hall, 2004.
- Recomendación UIT-T G.650.2 (Junio, 2000), Definiciones y métodos de prueba de los atributos conexos de las características estadísticas y no lineales de fibras y cables monomodos.