

Efectos no lineales y su relación con los parámetros de transmisión de una red WDM

Nonlinear Effects and their Relationship to a WDM Network Transmission's Parameters

Fecha de recepción: 8 de agosto de 2011
Fecha de aprobación: 3 de octubre de 2011

José Giovanni López Perafán*, Alejandro Toledo Tovar*, Henry Ordóñez**, Juan Pablo Agredo**

Resumen

Se analizan las degradaciones ópticas en una red de Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM –Wavelength Division Multiplexing–) y se estudia el impacto de los parámetros de transmisión en los efectos no lineales; además, se determinan las variaciones que se deben llevar a cabo en dichos parámetros, con la finalidad de minimizar este tipo de degradaciones y optimizar el desempeño de la red.

Palabras clave: Efectos no lineales, WDM, OPM, Formatos de modulación, SPM, XPM, FWM, SRS, SBS.

Abstract

It analyzes the optical degradations on a Wavelength Division Multiplexing (WDM) network and studies the transmission parameters' impact in nonlinear effects. In addition, it determines the variations to be carried out in these parameters in order to minimize these types of degradations, and to optimize the network performance.

Key words: Nonlinear effects, WDM, OPM, modulation formats, SPM, XPM, FWM, SRS, SBS.

* Doctorado en Ciencias de la Electrónica (c), Magister En Telemática, Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca. glopez@unicauca.edu.co

** Maestría en Ingeniería: Área Electrónica y Telecomunicaciones (c), Especialista en Redes y Servicios Telemáticos, Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca. atoledo@unicauca.edu.co

*** Estudiantes de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán – Colombia. {henryjesus, jpagredo}@unicauca.edu.co.

I. INTRODUCCIÓN

WDM es un modelo de multiplexación que combina dos o más señales ópticas mediante portadoras de diferentes longitudes de onda en una fibra óptica, explotando de esta manera el gran ancho de banda de la fibra. Para llevar a cabo la comunicación desde el transmisor, a través de la fibra y hasta el receptor, el sistema óptico utiliza diferentes elementos: moduladores, codificadores, divisores de canal, regeneradores, amplificadores, decodificadores y fotorreceptores, como se muestra en la Fig. 1, donde se presenta el esquema de una red WDM.

El incremento exponencial en los últimos años del ancho de banda requerido por las redes ha generado una búsqueda continua del aumento de la capacidad de los sistemas de comunicación óptica a través de técnicas de multiplexación más eficientes, como WDM [1, 2]. Estos sistemas han demostrado ser muy eficientes en la transmisión de grandes cantidades de información, pero al sobrepasar velocidades de transmisión de 10 Gb/s y trabajar con altas potencias, el canal de comunicación ya no puede ser considerado un medio lineal, y es ahí donde comienzan a aparecer efectos no lineales, cuya interacción con los efectos lineales dificulta encontrar una solución analítica general. Este tipo de efectos ha suscitado que en la actualidad se realicen estudios acerca de este tipo de degradaciones en las redes de comunicaciones ópticas; sin embargo, los estudios y análisis realizados son limitados y no muestran una clara relación entre la variación de los parámetros de transmisión y su impacto en los efectos no lineales [3, 4].

Uno de los principales factores para mejorar el desempeño de una red WDM es identificar los parámetros de transmisión que impactan en los

efectos no lineales, y, dependiendo de su variación, minimizar los efectos negativos que este tipo de degradaciones generan en el desempeño de la red.

El presente artículo analiza los efectos no lineales presentes en las redes ópticas y busca determinar los principales parámetros de transmisión que impactan en cada uno de los efectos no lineales y la incidencia de estas degradaciones en el desempeño de una red WDM [5-15].

II. FORMATOS DE MODULACIÓN

En las comunicaciones ópticas se buscan formatos de modulación más eficientes que permitan transmitir mayor cantidad de información y que sean más robustos frente a las limitaciones por dispersión y efectos no lineales [16-18]. Los formatos de modulación más comúnmente utilizados en las comunicaciones ópticas, entre otros, se pueden resumir en: No Retorno a Cero (NRZ –Non Return to Zero–) [16-21], RZ Retorno a Cero (RZ –Return to Zero–) [17,19], Portadora Suprimida Retorno a Cero (CS-RZ –Carrier Suppressed Return to Zero–) [22, 23], Modulación por Desplazamiento de Fase (PSK –Phase-shift Keying–) [16, 24], Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase (DPSK –Differential Phase Shift Keying–) [16], Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura (QPSK –Quadrature Phase-Shift Keying–) [25, 26], Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase en Cuadratura (DQPSK –Differential Quadrature Phase-Shift Keying–) [16, 20] y (PSBT –Phase Shaped Binary Transmission–) [22, 27].

En la Tabla 1 se presenta una recopilación de las principales características de los formatos de modulación más utilizados para trabajar a altas velocidades de transmisión, y su robustez frente a los efectos no lineales [28, 29].

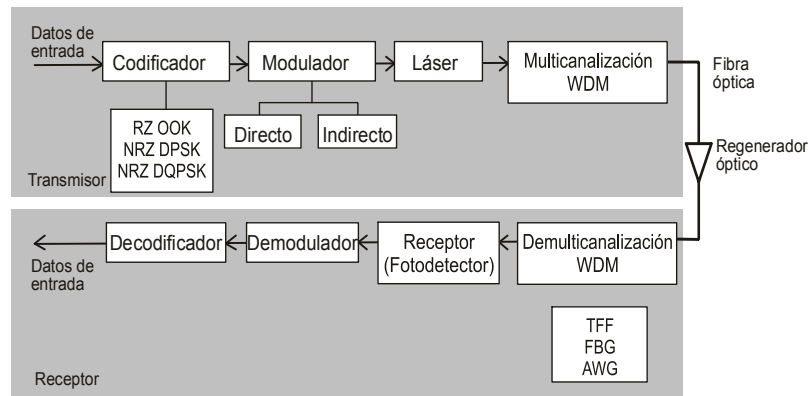


Fig. 1. Sistema de comunicaciones óptico para WDM [2]

TABLA 1
CARACTERÍSTICAS DE FORMATOS DE MODULACIÓN A 10 Gb/s

FORMATOS DE MODULACIÓN A 10 Gb/s					
Formato de modulación	Back to Back ¹ OSNR	Tolerancia a la DC ² , penalidad de OSNR a 1dB	Alcance de transmisión Espaciamiento de 50 GHz	Tolerancia a las no linealidades	Complejidad de los costos
Coherencia dual-pol QPSK	-5 dB	Varios miles de ps/nm	2000 Km	Muy buena	Altos
Coherencia 2l dual-pol BPSK	-5 dB	Varios miles de ps/nm	4000 Km	Regular	Muy altos
FORMATOS DE MODULACIÓN A 40 Gb/s					
NRZ	Ref.	90 ps/nm	NA ³	NA	Muy bajos
CSRZ	-2 dB	75 ps/nm	NA	NA	Bajos
PSTB	+2 dB	325 ps/nm	800 Km	Pobre	Muy bajos
Parcial-DPSK	-1.5 dB	160 ps/nm	1200 Km	Regular	Medios

¹ Back to Back: Comunicación directa entre el transmisor y el receptor.

² Dispersión Cromática (Chromatic Dispersion).

³ No aplica.

III. DEGRADACIONES ÓPTICAS

En la fibra óptica se presentan efectos que perjudican la transmisión de las señales, ya que degradan la calidad de la señal óptica, limitando el desempeño de las redes. Estos efectos se clasifican, de forma general, como lineales o no lineales [30]; entre los efectos lineales se tienen: Atenuación, Ruido, Dispersión Cromática (CD) y Dispersión por Modo de Polarización (PMD –Polarization Mode Dispersion–) [31], y entre los efectos no lineales: Modulación de Fase Inducida (SPM –Self Phase

Modulation–), Modulación de Fase Cruzada (CPM –Cross Phase Modulation–), Mezcla de Cuarta Onda (FWM –Four Wave Mixing–), Dispersión Estimulada de Raman (SRS –Stimulated Raman Scattering–) y Dispersión Estimulada de Brillouin (SBS –Stimulated Brillouin Scattering–).

Existe una dependencia marcada de la dispersión cromática de algunos efectos no lineales, por lo cual se hace necesario considerarla. La *Dispersión Cromática*, de una fibra monomodo, causa un ensanchamiento del pulso debido a la dependencia

de la longitud de onda del índice de refracción de la fibra, lo que causa que el pulso aumente su duración temporal a medida que se propaga por la fibra, resultando en una *Interferencia Intersimbólica* (ISI –Intersymbol Interference–, distorsión de la señal que se manifiesta mediante el ensanchamiento temporal, y el consecuente solapamiento de los pulsos). Esta restricción limita el alcance de la distancia de transmisión sin necesidad de regeneración o de compensación de la dispersión. Dependiendo del tipo de fibra que se utilice y la ventana de operación, el valor de la dispersión puede variar desde 0.5 ps/nm/km hasta 20 ps/nm/km. Los tipos de fibra más utilizados son: Fibra Monomodo Estándar (SSMF –Standard Single Mode Fiber–, REC-G.652), Fibra de Dispersión Desplazada No-Cero (NZ-DSF –Non Zero Dispersion Shifted Fibers–, REC-G.655) y Fibra de Dispersión Desplazada (DSF –Dispersion Shifted Fiber–, REC-G.653) [7, 11, 13, 32, 33].

En el caso de sistemas WDM, las no linealidades pueden limitar la potencia y la tasa de transmisión, por lo que son un factor determinante para la eficiencia de un sistema de alta tasa de transmisión. Existen dos parámetros por considerar en los efectos no lineales: *área efectiva* y *longitud efectiva*, dados por (1) y (2) [6, 8, 9, 11, 34, 35]:

$$L_{ef} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha} \quad (1)$$

$$A_{ef} = w_0^2 \quad (2)$$

Donde α es la atenuación; L , la longitud del enlace, y , w_0 el Diámetro del Campo Modal (MFD –Mode Field Diameter–).

Los efectos no lineales, a diferencia de los lineales, dependen de la intensidad de la señal. La presencia de los efectos no lineales en la fibra óptica tiene dos causas principales:

- Dependencia del índice de refracción con la intensidad del campo aplicado (Efecto Kerr); los efectos a través de los cuales se manifiesta son: SPM, XPM y FWM [35].

- Para altos niveles de potencia, el fenómeno de dispersión inelástica puede inducir efectos estimulados, como SBS y SRS. La dispersión de la intensidad de la luz crece exponencialmente si la potencia incidente excede un cierto valor umbral [35].

En la Fig. 2 se muestran los principales efectos no lineales y su clasificación dependiendo de su causa.

A continuación se analizan los efectos no lineales:

Modulación de Fase Inducida (SPM): Se presenta debido a que el índice de refracción de la fibra tiene un componente que depende de la intensidad de la señal; este índice de refracción no lineal induce un desplazamiento de fase que es proporcional a la intensidad del pulso. Es por esto que las diferentes partes del pulso se ven sometidas a diferentes cambios de fase, lo que da lugar a que se produzca un “chirp⁴” en el pulso, lo que también modificará los efectos de la dispersión cromática [13, 33, 36, 37]. Este efecto es proporcional a la intensidad de la señal de transmisión; es por esto que los efectos del SPM son más pronunciados en los sistemas que utilizan altas potencias de transmisión; el ensanchamiento del pulso generado por SPM, como consecuencia del efecto Kerr, está dado por (3).

$$\Delta\omega = \gamma L_{ef} \frac{dP(t)}{dt} \quad (3)$$

Donde γ es el parámetro de no linealidad; $P(t)$, la potencia del pulso, y L_{ef} , la longitud efectiva. El parámetro de no linealidad combina el índice de refracción no lineal y el área efectiva en un solo coeficiente, y está dado por (4) [9]:

$$\gamma = \frac{2\pi\eta_2}{\lambda L_{ef}} \quad (4)$$

Donde η_2 es el índice de refracción no lineal, y λ , la Longitud de onda.

El índice de refracción no lineal η_2 varía entre valores de $2.0 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ a $3.5 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ [9, 11, 38].

⁴ Fenómeno en el láser donde la longitud de onda de la luz emitida cambia durante la modulación.

SPM modifica los efectos de la dispersión cromática, por lo tanto, es importante considerarlo para sistemas con alta tasa de transmisión de bits (sistemas operando a 10 Gb/s o más, o sistemas operando a velocidades más bajas, pero con potencias de transmisión elevadas), ya que estos tienen unas limitaciones significativas debido a la dispersión cromática. “Un aspecto positivo de la aparición de

la SPM es que el ‘chirp’ que introduce es de signo opuesto al que se genera por la dispersión cromática, por lo que se puede pensar en compensar dicha dispersión a partir de una cierta no linealidad” [10]. Al propagarse un pulso en la fibra es sometido a una compresión y expansión debido a SPM; por ejemplo, una señal a 10Gb/s se propaga en una fibra monomodo, como se muestra en la Fig. 3 [9].

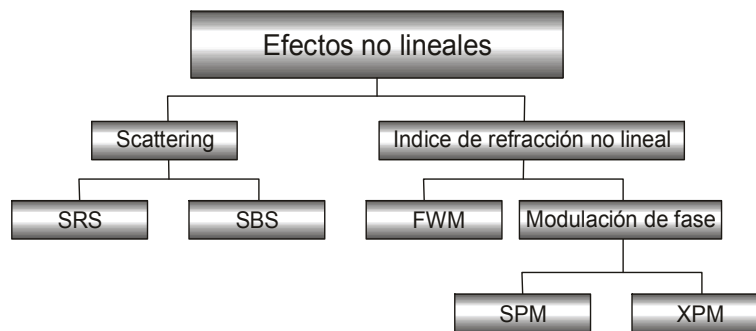


Fig. 2. Clasificación de los efectos no lineales presentes en las fibras ópticas

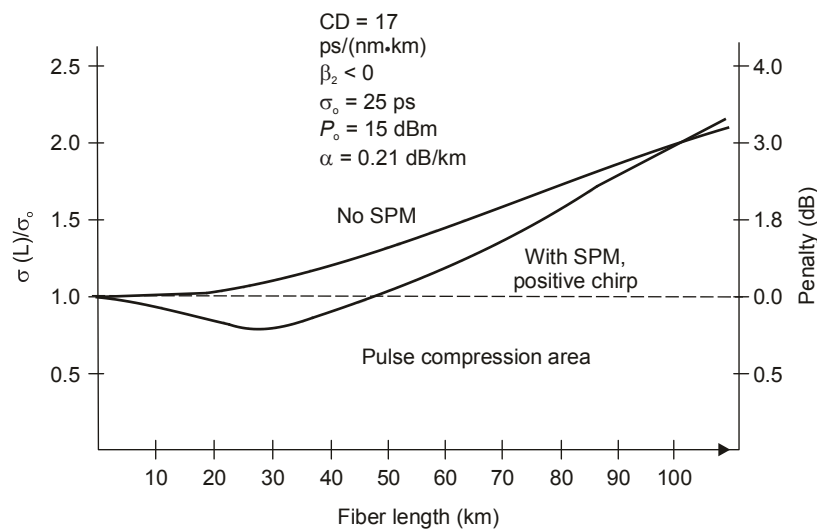


Fig. 3. Ejemplo de la ampliación de un pulso debido a SPM [9]

Modulación de Fase Cruzada (XPM): Se genera cuando dos o más canales ópticos son transmitidos simultáneamente a través de la fibra óptica, usando la técnica de WDM, debido a que el índice de refracción efectivo, para una onda incidente, no solo depende de la intensidad de esa onda, sino también de la intensidad de cualquier otra onda que se

copropague a través del canal, debido a la interacción entre ellas. Cuando dos o más señales se propagan simultáneamente, el impacto de XPM es similar a SPM [8, 33, 34, 36, 37, 39, 40]. La ecuación (5) muestra el ensanchamiento que sufre el canal, despreciando la dispersión cromática, donde γ es el coeficiente de no linealidad dado por (4), L es la

longitud del enlace y $P_1(t)$ y $P_2(t)$ son potencias del canal 1 y 2, respectivamente.

$$\Delta\omega = \gamma L \frac{dP_1(t)}{dt} + 2\gamma L \frac{dP_2(t)}{dt} \quad (5)$$

Mezcla de Cuarta Onda (FWM): Cuando dos o más señales ópticas de frecuencias centrales diferentes (diferentes Canales WDM) se propagan en una fibra, se puede dar una mezcla de señales que puede generar nuevos componentes de interferencia de la señal óptica; esto debido a la dependencia del índice de refracción de la fibra con la potencia de la señal, lo que causa un medio no lineal de propagación y crea

las condiciones para la mezcla de la señal. Para que el fenómeno de la FWM ocurra es necesaria la condición de *phase-matching*⁵, donde el efecto de la FWM depende de la potencia de la señal, dispersión y del espaciamiento de los canales WDM [10]. La Fig. 4 muestra el efecto de FWM para tres canales de comunicación.

A medida que se incrementa el número de canales en un sistema WDM, las componentes ópticas generadas por FWM se incrementan de forma casi exponencial [9]. En la Tabla 2 se muestra el número de componentes de interferencia que se generan cuando se incrementa el número de canales.

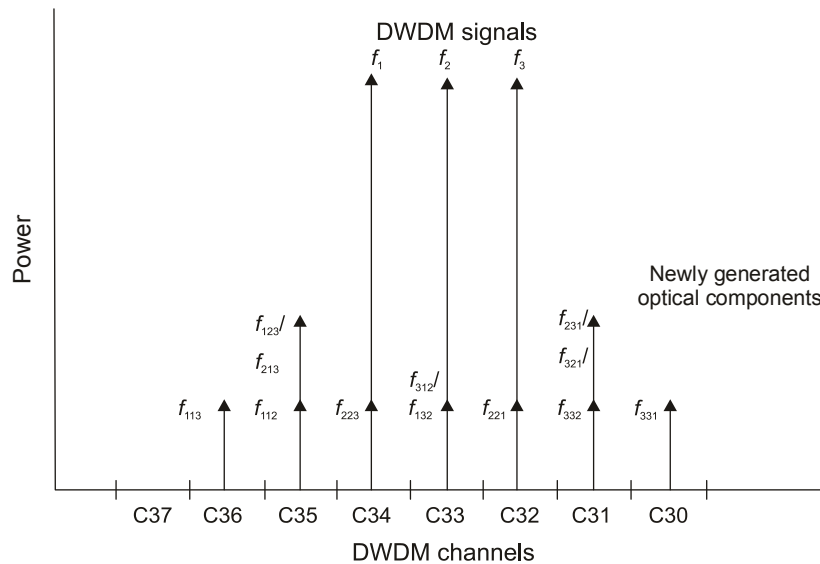


Fig. 4. Efecto de FWM en tres señales equidistantes [9]

TABLA 2
NÚMERO MÁXIMO DE COMPONENTES FWM PARA SISTEMAS WDM DE DIFERENTES TAMAÑOS [9]

Número de señales	Número total posible de las componentes generadas por FWM
2	2
3	9
8	224
16	1920

⁵ Coincidencia de Fase.

IXPM e IFWM: IXPM e IFWM se produce principalmente en enlaces con fibra de alta dispersión, SSF, y es particularmente importante para tasas de transmisión de 40 Gb/s o superiores. Este efecto es el más evidente para señales de amplitud modulada creando un pulso fantasma en el *time-slot*, donde un 0 es transmitido [11, 19].

Dispersión Estimulada de Raman (SRS): La dispersión estimulada de Raman genera transferencia

de energía de los canales de mayor frecuencia a los canales de menor frecuencia; este efecto se observa en la Fig. 5 [6]. El coeficiente de ganancia de Raman (g_R) es el parámetro más importante para describir la dispersión estimulada de Raman. El límite de potencia debido a SRS es el nivel crítico en el cual la potencia incidente y la potencia dispersada son iguales, y está dado por (6) [6, 15, 30, 42, 43].

$$P_{\text{limite}} \approx \frac{16A_{\sigma}}{g_R L_{\sigma}} \quad (6)$$

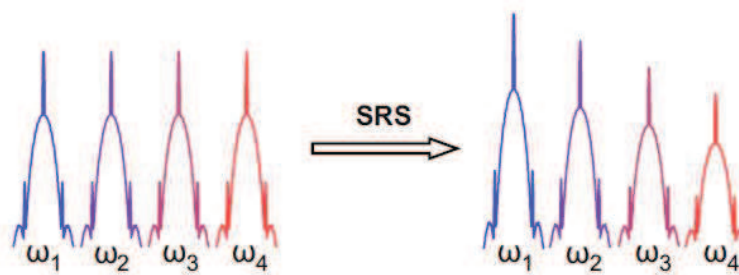


Fig. 5. Principio de la Dispersión Estimulada de Raman [6]

Dispersión Estimulada de Brillouin (SBS): La dispersión estimulada de Brillouin puede ocurrir a menores niveles de potencia de entrada que los necesarios para que se presente la dispersión estimulada de Raman. Ese efecto no lineal, al igual que la SRS, se presenta por la generación de una onda llamada onda de Stokes, que se propaga en dirección opuesta a la dirección de propagación de la onda incidente y tiene una frecuencia menor a la de la luz incidente. Debido a la SBS se presenta un cambio en frecuencia de la onda de Stokes de 11 GHz, aproximadamente, el cual es más pequeño por tres órdenes de magnitud, comparado con el cambio en frecuencia que genera SRS, que es, aproximadamente, 13 THz [44, 45].

Un importante parámetro de este efecto no lineal es la potencia límite debida a SBS, la cual se define como el nivel de potencia crítica en el cual la potencia incidente y la potencia dispersada son iguales; el valor de la potencia límite puede ser calculado por (7) [34].

$$P_{\text{limite}(SBS)} \approx \frac{21A_{\sigma}}{g_B L_{\sigma}} \quad (7)$$

Donde g_B es la ganancia de Brillouin.

El valor de la potencia límite debido a SBS limita la potencia incidente por canal en un sistema WDM y es independiente del número de canales que se esté empleando. La Fig. 6 muestra una señal a una longitud de onda $\lambda = 1550\text{nm}$, y la onda dispersada que se genera debido a SBS. El espectro de ganancia de la onda dispersada tiene un ancho de 20 Mhz [6].

En la Fig. 7 se muestran los efectos no lineales que más afectan el canal de transmisión, dependiendo de la velocidad a la que se trabaja, con los formatos de modulación NRZ-OOK y RZ-OOK para diferentes valores de dispersión.

Para sistemas TDM de alta velocidad, superior a 10 Gb/s por canal, las interacciones no lineales dominantes son las no linealidades intracanal [19].

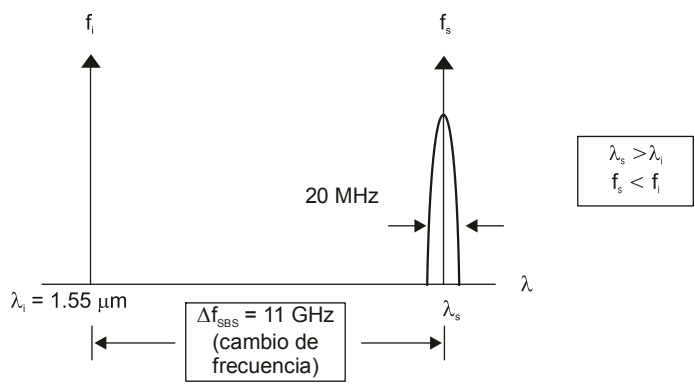


Fig. 6. Señal a una longitud de onda $\lambda = 1550\text{nm}$, y onda dispersada que se genera debido a SBS [6]

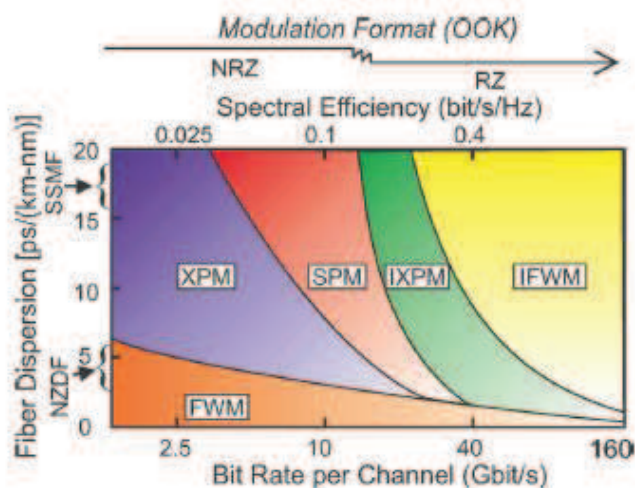


Fig. 7. Importancia de los impedimentos no lineales intracanal e intercanal en los sistemas WDM de las diferentes tasas de bits por canal

IV. MONITOREO DE REDES ÓPTICAS

El monitoreo de las redes ópticas es una herramienta indispensable en el campo de las comunicaciones, dado que facilita su administración a través de pruebas y documentación precisa, logrando así un óptimo nivel de utilización y mejoras notables en la calidad de los servicios ofrecidos. Se toman las herramientas que brinda el modelo de referencia de Monitoreo de Desempeño Óptico (OPM –Optical Performance Monitoring–), ya que cuenta con una serie de técnicas de medida con las cuales se puede visualizar el

comportamiento de la red, para determinar el impacto de los efectos no lineales a medida que se realizan variaciones en los parámetros de transmisión.

A continuación se citan las principales características del modelo de referencia OPM [46-48], que consta de tres niveles, Fig. 8.

- Nivel de monitoreo de transporte: Registro de longitud de onda, Medidas en tiempo real de la presencia del canal, Niveles de potencia, OSNR⁶ espectral [49].

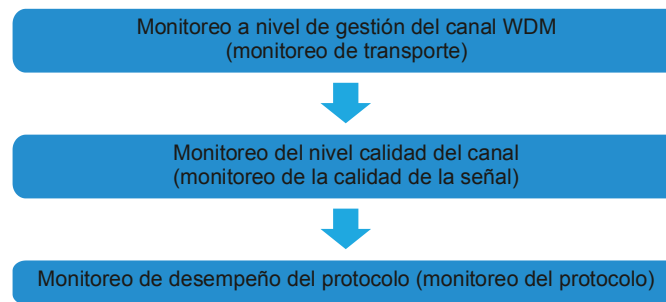


Fig. 8. Niveles del modelo de referencia OPM [46]

- Nivel de monitoreo de la calidad de la señal: Factor Q [50], Estadísticas del Diagrama del ojo [51, 52], ESNR⁷, BER⁸.
- El nivel de monitoreo del protocolo no se tiene en cuenta, debido a que en esta investigación no se involucra información o impacto de estos en el desempeño de una red WDM.

V. RESULTADOS

Para determinar los principales parámetros de transmisión de una red WDM que impactan los efectos no lineales fue necesario analizar detalladamente cada efecto no lineal; observar su comportamiento y las ecuaciones que los rigen; precisar las causas de su aparición, el tipo de degradación que generan; identificar los parámetros de transmisión que los impactan y la forma de visualizar las degradaciones causadas por estos, basados en las medidas y características del modelo de referencia OPM; y cómo lograr la minimización de su impacto variando los diferentes parámetros de transmisión inicialmente definidos. El estudio realizado se consolida a través de la Tabla 3, en la cual se muestran los principales efectos no lineales presentes en las comunicaciones ópticas y su relación con los diferentes parámetros de una red WDM; esta permite comprender los efectos no lineales de forma rápida, corta y concisa.

⁶ Relación Señal a Ruido Óptica (Optical Signal to Noise Ratio).

⁷ Relación Señal a Ruido Eléctrica (Electrical Signal to Noise Ratio).

⁸ Tasa de Error de Bit (Bit Error Rate).

VI. CONCLUSIONES

Se puede concluir inicialmente que la mayoría de los efectos no lineales dependen en mayor medida de las características de la fibra óptica. Los efectos no lineales que más afectan las comunicaciones ópticas son SPM, XPM y FWM, ya que generan mayores degradaciones en las señales ópticas, en comparación con SBS y SRS. Por otra parte, la incidencia de algunos de los efectos no lineales depende no solo de los parámetros de transmisión, sino también de los efectos lineales, como la dispersión cromática.

La magnitud de la potencia óptica es uno de los parámetros de transmisión más relevantes en la aparición de los efectos no lineales en sistemas WDM; a menor potencia de transmisión, es menor el impacto de los efectos no lineales. La minimización del impacto de los efectos no lineales se puede lograr con técnicas como utilizar formatos avanzados de modulación, mayor separación entre canales o disminuyendo la velocidad de transmisión, de donde nace el reto de encontrar el equilibrio entre estos parámetros para obtener un enlace óptico con un buen desempeño.

Finalmente, el trabajo futuro consiste en evaluar los parámetros de transmisión clasificados en este

artículo con velocidades de transmisión superiores a 40 Gb/s, así como el comportamiento de la red frente a los efectos no lineales con diferentes formatos de modulación, a través de herramientas de simulación.

AGRADECIMIENTOS

Para culminar el presente artículo de la mejor manera, los autores expresan sus agradecimientos a la Universidad del Cauca.

TABLA 3
EFECTOS NO LINEALES Y SU RELACIÓN CON LOS PARÁMETROS DE TRANSMISIÓN

EFEECTO NO LINEAL	CAUSA	DEPENDENCIA	IMPACTO	MEDIDA	MINIMIZACIÓN DEL IMPACTO
SPM	Efecto Kerr: índice de refracción dependiente de la intensidad	<ul style="list-style-type: none"> Longitud de onda de la señal. Velocidad de transmisión. Tipo de fibra (área efectiva, dispersión, coeficiente de índice no lineal). 	<ul style="list-style-type: none"> Ensanchamiento del pulso. Dispersión de amplitud. Interferencia entre símbolos. 	<ul style="list-style-type: none"> Diagrama del ojo. BER. 	<ul style="list-style-type: none"> Aumentando la longitud de onda de la señal. Disminuyendo la tasa de transmisión. Aumentando el área efectiva de la fibra. Aumentando la dispersión de la fibra.
XPM	Efecto Kerr: índice de refracción dependiente de la intensidad	<ul style="list-style-type: none"> Potencia del canal. Espaciamiento entre canales. Tipo de fibra (área efectiva, dispersión, coeficiente de índice no lineal, longitud efectiva). Velocidad de símbolo. 	<ul style="list-style-type: none"> Cambio de amplitud. Interferencia (ISI). 	<ul style="list-style-type: none"> Diagrama del ojo. BER. 	<ul style="list-style-type: none"> Aumentando la separación de los canales. Aumentando el área efectiva de la fibra. Aumentando la dispersión de la fibra. Aumentando la velocidad de símbolo.
FWM	Interacción múltiple de fotones.	<ul style="list-style-type: none"> Espaciamiento entre canales. Potencia de la señal. Número de canales. Tipo de fibra (dispersión de la fibra, área efectiva de la fibra). 	<ul style="list-style-type: none"> Generación de componentes FWM que interfieren con la señal original y otras señales WDM. Atenuación en la potencia de los canales existentes. 	<ul style="list-style-type: none"> Espectro óptico. BER. OSNR. 	<ul style="list-style-type: none"> Aumento de la dispersión cromática. Modificar la separación espectral entre canales. Disminuir la intensidad del haz de luz.
IFWM-IXPM	Origen similar a FWM y XPM.	<ul style="list-style-type: none"> Tasa de transmisión. Tipo de fibra. Formato de modulación. 	<ul style="list-style-type: none"> Pulso fantasma en el time slot donde se transmite un 0. Cambio de frecuencia 	<ul style="list-style-type: none"> Diagrama del ojo. Espectro de la señal 	<ul style="list-style-type: none"> Disminuir la dispersión de la fibra.
SBS	Interacción fonon-fotones acústicos	<ul style="list-style-type: none"> Longitud de onda. Tipo de fibra (tamaño del núcleo). Potencia de la señal. Separación entre canales. Ancho de línea de la señal. 	<ul style="list-style-type: none"> Limita la cantidad de luz que puede transmitirse a través de un trayecto de fibra. Errores de bits. Inestabilidad en la señal. Diafonía. 	<ul style="list-style-type: none"> BER 	<ul style="list-style-type: none"> No se presenta en sistemas en los que el ancho espectral de la fuente es mucho mayor que el ancho de banda Brillouin. Utilizando una potencia de señal inferior a la potencia umbral. Uso de aisladores.
SRS	Interacción fotón-fonones ópticos.	<ul style="list-style-type: none"> Intensidad del pulso incidente. Tipo de fibra (Área efectiva, Longitud efectiva). 	<ul style="list-style-type: none"> Pérdida óptica en la fibra. Pérdidas en la potencia de la señal. Crosstalk óptico en sistemas WDM. 	<ul style="list-style-type: none"> BER 	<ul style="list-style-type: none"> Utilizando una potencia de señal inferior a la potencia umbral. Aumentando la separación entre canales. Aumentando el área efectiva de la fibra.

REFERENCIAS

- [1] H. Fragnito. *Fundamentals of Fiber-Optic Communication Systems*. Lectura 1 de 2. Instituto de Física Gleb Wataghin, Campinas, Brasil, 2005.
- [2] A. Viglienzoni. *Relevance of Optical Communications Views from Photonics*. eMobility General Assembly 6, Venecia, 2010.
- [3] C. Cubillos y R. Olivares. "Propagación de Pulsos Solitónicos en Redes Ópticas WDM". *Revista Facultad de Ingeniería*, Vol. 13, N.º 3, pp. 89-95. Universidad de Tarapacá, Valparaiso, Chile, 2005.
- [4] R. J. Millán Tejedor. *Estudio y diseño de multiplexores por división en longitud de onda (WDM) mediante efectos electroópticos, termoópticos y acustoópticos*. Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones e Ingeniería Telemática, Universidad Valladolid, Valladolid, España, 1998.
- [5] E. I. Mena Soliz y R. E. Mendoza Pantoja. *Diseño de una red WDM para Andinatel S.A. en la Provincia de Tungurahua*. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2009.
- [6] O. I. Gaxiola. *Simulador de un sistema de comunicación óptico empleando multicanalización por división de longitudes de Onda (WDM)*. Instituto Politécnico Nacional, Tijuana, B.C., México, 2005.
- [7] B. Mukherjee. *WDM Optical Communication Networks: Progress and Challenges*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 18, No. 10, 2000.
- [8] G. Agrawal. *Fiber Optic Communications Systems*. Wiley Interscience, Third Edition. The Institute of Optics University of Rochester, Rochester, NY, 2002.
- [9] B. Chomycz. *Planning Fiber Optic Networks*. McGraw-Hill, New York [etc.], 2009.
- [10] G. Gómez, J. F. Grijalba, A. Toledo. *Análisis de desempeño de formatos de modulación en comunicaciones ópticas sobre redes WDM*. Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones GNTT, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2010.
- [11] D. Van Den Borne. *Robust Optical Transmission Systems Modulation and Equalization*. Universidad Técnica de Eindhoven, 2008.
- [12] R. Zengerle, H. Quan and, F. Bu. *Modelling and Simulation of Multichannel DWDM Transmission Links including All Relevant FWM Products*. Technical University of Kaiserslautern. Alemania. Disponible en <http://iroi.seu.edu.cn/prepare/Meeting/File/SODC/F/SODC/R.%20Zengler.pdf>
- [13] Á. Medina. *Fundamentos de comunicaciones ópticas*. Universidad Autónoma de Madrid, España, 2008.
- [14] R. Zengerle. *Modeling of Nonlinear Phenomena in Optical Multi Channel Transmission Systems*. University of Kaiserslautern, Alemania. Available: <http://iroi.seu.edu.cn/prepare/Meeting/File/SODC/data/33%20R.Zengerle.pdf>.
- [15] N. Adams. *Explorations in Modulation Formats for Nonlinear DWDM Fiber Optic Communications*. 2001. Available: http://www.ee.virginia.edu/~optcom/publications/norman/norman_thesis.pdf
- [16] I. Polo. *Optical Modulation for High Bit Rate Transport Technologies*. Sunrise Telecom, Technology Note. Enzo Drive, San José, USA, 2009.
- [17] L. N. Binh and Z. Csematomy. *Double-Sideband Carrier Suppressed RZ and NRZ Modulation Formats for Ultra-High Capacity 40 Gb/s*

- Optical Communications Systems*. Technical Report, Monash University. Clayton, Australia, 2003.
- [18] V. Bobrovs, J. Porins, G. Ivanov. *Influence of Nonlinear Optical Effects on the NRZ and RZ Modulation Signals in WDM Systems*. No. 4(76) Department of Telecommunications, Riga Technical University, Riga, Letonia, 2007.
- [19] P. Winzer. R-J. Essiambre. “Advanced Modulation Formats for High-Capacity Optical Transport Networks”. *Journal of Light Wave Technology*, Vol. 24, No. 12, pp. 4711-4728, 2006.
- [20] O. Vassilieva . *40Gb/s & 100Gb/s Transport in the WAN*. Fujitsu Laboratories of America, Richardson, Texas, 2007.
- [21] G. Agrawal. *Optical Communication Systems*. pp. (1-87) Institute of Optics University of Rochester, Rochester, NY. Estados Unidos, 2007.
- [22] S. Zhang. *Advanced Optical Modulation Formats in High-speed Lightwave System*. University of Kansas, 2004.
- [23] Stratalight Communications: *40Gbps Modulation Schemes Comparison*. Technical Document Rev. 3.0. disponible en: <http://www.opnext.com/applications/papers/SLCappnotemodscheme050907.pdf>
- [24] P. Winzer. R-J. Essiambre. *Advanced Optical Modulation Formats*. Proceedings of the IEEE, Vol. 94, No. 5, Bell Labs, Lucent Technologies, Holmdel, Estados Unidos, 2006.
- [25] H. Shankar, L. Zhao, A. Nachum. *40G QPSK and DQPSK Modulation*. Inphi Corporation. Available: <http://www.inphi.com/technology-overview/40G-QPSK-and-DQPSK-Modulation.pdf>.
- [26] W. Sam. *Adaptive Modulation (QPSK, QAM)*. Intel Corporation, Orden número 303788-001, Estados Unidos, 2004.
- [27] A. Lemus. *Optical Digital Communications! Technology & Modulation Formats*. StrataLight Communications, Estados Unidos, 2008.
- [28] E. Pincemin. *Challenges of 40/100 Gbps deployments in long-haul transport networks on existing fiber and system infrastructure*. France Telecom, Orange Labs, Francia, 2010.
- [29] E. Pincemin, H. Poignant. *Paradigms of 40/100 Gbps Deployments on France Telecom Long-Haul transport Network*. France Telecom, Orange Labs, Lannion, France, 2010.
- [30] A. Escallón , J. Barrios. *Criterios para el monitoreo del canal óptico y la incidencia de los parámetros que afectan la calidad de la señal óptica en el desempeño de una Red Metropolitana WDM*. Universidad del Cauca, Popayán, 2008.
- [31] H. Fragnito. *Fundamentals of Fiber-Optic Communication Systems*. Kyatera, Instituto de Física Gleb Wataghin, Campinas, Brasil, 2005.
- [32] TELNET Redes Inteligentes SA: *Fibra Óptica para NGN - Dispersión Cromática y PMD*. Pp. 1-26, España, 2009.
- [33] G. Agrawal. *Optical Communication Systems*. pp 88-206, Institute of Optics University of Rochester, Rochester, Estados Unidos, 2006.
- [34] R. Ramaswami, K. Sivarajan. *Optical Networks a Practical Perspective*. 2nd ed. Academic Press, 2002.
- [35] S. P. Singh and N. Singh. *Nonlinear Effects in Optical Fibers: Origin, Management and Applications*. Progress In Electromagnetics Research, PIER 73, pp. 249–275, 2007, Department of Electronics and Communication University of Allahabad, India, 2007.

- [36] G. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics and its Applications in Optical Signal Processing*. Institute of Optics University of Rochester, Estados Unidos, 2007.
- [37] I. Garcés. J. Mateo. *Fenómenos no lineales en fibras ópticas*. Universidad de Zaragoza, España, 1997.
- [38] D. Grosz. *Sistemas de comunicación por fibra óptica de alta velocidad*. Departamento de Física y Matemática, Instituto Tecnológico de Buenos Aires, CSI Boletín 51, Argentina, 2003.
- [39] Bo Xu. *Study of Fiber Nonlinear Effects on Fiber Optic Communication Systems*. Faculty of School of Engineering and Applied Sciences, University of Virginia, Estados Unidos, 2003.
- [40] F. Saavedra, A. Lamas, M. Fernández, Y. Cepeda. *Efectos de la modulación de fase cruzada sobre la propagación de ondas en fibra óptica*. Universidad Tarapacá, vol. 13, N.º 3, 2005, pp. 67-74, Chile, 2005.
- [41] W. Mönch. *Four Wave Mixing (FWM)*, JDS Uniphase Corporation, Estados Unidos, 2006.
- [42] Grupo Comunicaciones Ópticas: *Teoría de las telecomunicaciones ópticas*. Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones e Ingeniería Telemática, E.T.S.I. de Telecomunicación, Universidad de Valladolid, Campus Miguel Delibes. Valladolid, España 2006. <http://nemesiis.tel.uva.es/images/tCO/index.htm>, consultado: febrero 5 de 2011.
- [43] J-p. Galup. *Curso de óptica no-lineal*. Universidad de Antioquia, Colombia, 2007.
- [44] H. Fragnito. *Amplificadores ópticos para sistemas de comunicações*, Centro de Pesquisa em Óptica e Fotônica, Universidade Estadual de Campinas, Brasil, 2009.
- [45] A. Fotiadi, R. Kiyari, O. Deparis. *Statistical Properties of Stimulated Brillouin Scattering in Single Mode Optical Fibers Above Threshold*, Optics letters, Vol. 27, No. 2, pp. 83-85, 2002.
- [46] C. Chan. *Optical Performance Monitoring*. Elsevier, Amsterdam [etc.], 2010.
- [47] W. Chen. *Signal Processing for Optical Performance Monitoring and Impairment Mitigation*, Department of Electrical and Electronic Engineering the University of Melbourne, Australia, 2006.
- [48] L-K. Chen, M-H. Cheung, C-K. Chan. *From Optical Performance Monitoring to Optical Network Management: Research Progress and Challenges*. Department of Information Engineering, the Chinese University of Hong Kong, Shatin, N.T., Hong Kong, China, 2004.
- [49] T. Chakma. *Optical Signal to Noise Ratio (OSNR)*. International University Bremen, Alemania, 2005.
- [50] Y. Zhang, M. Lonèar. *Ultra-high quality factor optical resonators based on semiconductor nanowires*. School of Engineering and Applied Sciences, Harvard University, Optical Society of America, Estados Unidos, 2008.
- [51] J. A. Dinamarca Ossa. *Análisis de diagramas de ojo*. Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Electrónica, Chile, 2002.
- [52] L. M. Bazdresch. *Tutorial de Diagramas de Ojo*. Universidad Jesuita de Guadalajara, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente, Departamento de Electrónica, México, 2009.

