

DATOS DEL PROYECTO FIN DE CARRERA PRESENTADO

Título: **CARACTERIZACIÓN DE RUIDO EN CONVERTIDORES DE LONGITUD DE ONDA BASADOS EN MODULACIÓN CRUZADA DE GANANCIA CON AMPLIFICADORES ÓPTICOS DE SEMICONDUCTOR EN REDES DWDM**

Dpto. Universitario: Departamento de Ingeniería Electrónica
E.T.S. de Ingenieros de Telecomunicación
Universidad de Sevilla

Autor: D. Manuel Muñoz de la Corte

Tutor: D. Alejandro Carballar Rincón

Fecha de lectura: 13 de Julio de 2001

Calificación: Matrícula de Honor (10)

1. Introducción

La Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM) ha sido vista como una tecnología de transmisión a través de fibra óptica capaz de aumentar considerablemente la tasa binaria en una red óptica. En los últimos años WDM ha pasado a tomar una nueva dimensión al establecerse como una tecnología aplicable a redes completamente ópticas (“*All-optical Networks*” [1]). Esto se ha debido al desarrollo teórico y práctico de dispositivos tales como elementos de conmutación por longitud de onda, fuentes sintonizables, filtros sintonizables y convertidores de longitud de onda. Un detallado repaso de los dispositivos e implementaciones comerciales disponibles hasta la fecha se puede encontrar en [1], [2].

En este proyecto centramos nuestra atención en la conversión en longitud de onda, la cual ha aparecido recientemente como una de las técnicas más populares, por ejemplo, para gestionar el incremento espectacular de tráfico en redes WDM. Tradicionalmente esta conversión se realizaba en el dominio eléctrico, es decir, los pulsos ópticos se trasladaban al dominio eléctrico para posteriormente emitirlos en una longitud de onda deseada u objetivo. La conversión electro-óptica posee el gran inconveniente de la transparencia, es decir, debemos funcionar a una tasa binaria determinada e invariable (normalmente menor a 10 Gb/s), con lo cual estos dispositivos deben ser sustituidos en futuras actualizaciones de la red. Por tanto tendremos un problema de transparencia en su funcionamiento respecto a las características de la señal digital luminosa de entrada.

Este problema es resuelto por la conversión óptica, que permite realizar la conversión sin salir del dominio óptico y cuyo funcionamiento ofrece niveles altísimos de transparencia (esta será mayor o menor dependiendo del método concreto) aunque queda restringida a señales moduladas en ASK (“Amplitude Shift Keying”) binaria. De esta forma la conversión en longitud de onda óptica se presenta en ciertos nodos de una red como una funcionalidad vital que ofrece grandes ventajas en cuanto a interoperatividad transparente entre redes heterogéneas, rutado de señales en el dominio óptico (por longitud de onda), resolución de contenciones en nodos además de, gran flexibilidad y mejor utilización de los recursos ópticos en una red bajo patrones dinámicos de tráfico [2], [3].

2. Redes de Conmutación por Longitud de Onda

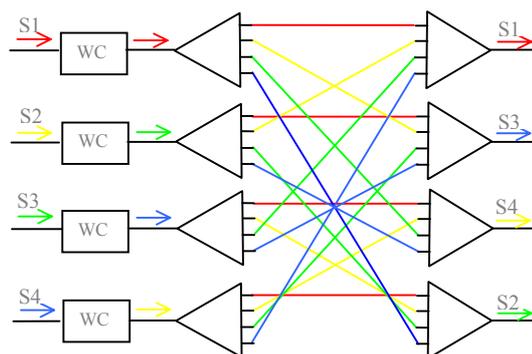


Fig. 1, Ejemplo de elemento de conmutación en una red WDM de conmutación por longitud de onda DWR (“Demultiplexing Wavelength Routing”)

Como consecuencia a todo lo expuesto en el párrafo anterior emergerá un nuevo tipo de red óptica llamada red de conmutación por longitud de onda, en la cual el proceso de conmutación o rutado se realiza en el dominio óptico creando una “capa óptica” que sirve a capas más altas del protocolo y las libera de este menester. Para llevar a cabo el rutado de señales en los nodos que ofrezcan esta posibilidad han sido propuestas varias técnicas como:

- WGR (“Waveguide Grating Routers”): Se fabrica en tecnología planar, y debido a una variación periódica del índice de refracción en un conjunto de guías de onda, presenta la propiedad de colocar una longitud de onda en un determinado puerto de entrada en un puerto determinado de salida. Esto es así ya que podemos ajustar el camino óptico recorrido por las distintas longitudes de onda al atravesar el conjunto de guías de onda.
- FBG (“Fibre Bragg Grating”): Se basa en el efecto de establecer un cierto patrón de dopado periódico en el núcleo de la fibra, con lo que dependiendo del periodo del mismo, tan sólo una longitud de onda de las que se inyectan a la entrada será reflejada. Por tanto conseguimos un demultiplexador para insertar o extraer canales.
- DWR (“Demultiplexing Wavelength Routing”): Se verá un ejemplo a continuación.

En la Fig. 1, podemos ver un ejemplo de DWR reconfigurable [1], que además representa, una arquitectura típica de un nodo en una red de estas características. Éste nos servirá para mostrar los principios de funcionamiento del método de encaminamiento en este tipo de redes. El dispositivo mostrado realiza demultiplexación de la señal DWDM (“Dense Wavelength Division Multiplexing”), conmutación (rutado) de las señales (colores o longitudes de onda) hacia los distintos puertos de salida y finalmente multiplexación de las mismas para conformar una nueva señal DWDM lista para ser transmitida a través de un enlace de fibra óptica.

El DWR presentado en la Fig. 1, posee cuatro puertos de entrada y cuatro de salida conectados por dieciséis fibras o guías de onda que, combinadas con los Convertidores de Longitud de Onda (CL) a la entrada, hacen que el DWR adquiera la propiedad de ser completamente reconfigurable. Lo que quiere decir que cualquier señal inyectada en cualquier puerto de entrada podrá ser conmutada a cualquier puerto de salida, sin más que realizar la conversión en longitud de onda conveniente. Además jamás tendremos contenciones en ningún puerto de salida, dado que las señales de entrada y salida son asignadas una a una. Es preciso comentar, en este punto, que los CL suelen ser dispositivos costosos económicamente por lo que un objetivo en el diseño de los nodos es utilizar el menor número de CLs posible, así que tendremos que llegar a una solución de compromiso entre el número de CLs y la probabilidad de que se produzcan contenciones en un nodo. La nueva disposición de los canales a la salida del conmutador nos sirve por tanto para encaminar la señal óptica, estableciendo de esta manera un método de conmutación en el dominio óptico entre dos nodos de una red WDM.

Una consecuencia del rutado en el dominio óptico es la creación de una nueva capa de red (“Capa óptica”) formada por caminos ópticos, que no son más que visión directa a una cierta longitud de onda entre un nodo de origen y otro de destino. Para explicar este punto utilizaremos las Fig. 2.

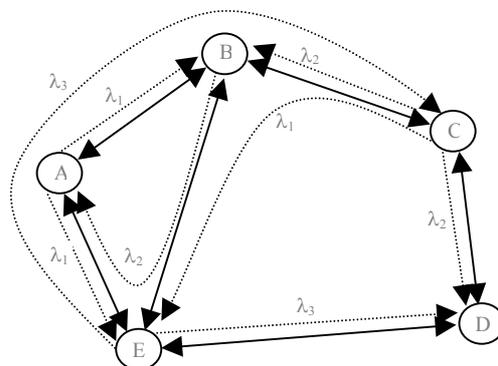


Fig. 2, Red WDM de Conmutación por Longitud de Onda. Topología física y virtual

En la Fig. 2, podemos ver con línea sólida el nivel físico de una red básica de conmutación por longitud de onda WDM con seis nodos y tres longitudes de onda [1]. Con línea punteada se

representan los diferentes caminos ópticos que el operador de red establece y donde suponemos que se han utilizado estructuras de nodo similares funcionalmente a la representada en la Fig. 1. Así, por ejemplo cuando el nodo E quiere enviar datos al nodo D, puede transmitir la señal correspondiente a una longitud de onda λ_2 , que será conmutada convenientemente por el nodo A, ya que existe visión directa entre ambos nodos a esta longitud de onda. Encontramos hasta ocho caminos ópticos sobre la citada topología. Un detalle sumamente significativo es la ausencia de visión directa, es decir, de camino óptico entre los nodos E y B que curiosamente están conectados por un enlace de fibra óptica, así que la señal deberá ser conmutada a través de los nodos A y C. Por tanto tendremos una topología virtual de red que además no tendrá por qué permanecer estática a lo largo del tiempo ni coincidir con la física, permitiendo, según las prestaciones de los dispositivos utilizados, conmutación de paquetes o de circuitos. Otro aspecto que cabe comentar se refiere a la reutilización de longitudes de onda. Como podemos ver la longitud λ_1 es utilizada hasta tres veces, lo que permite un menor número de longitudes de onda presentes en el sistema o, dicho de otra manera, un uso más eficiente de las mismas.

La potencia del rutado en el dominio óptico, unido a la robustez en cuanto a errores en las transmisiones por este medio físico, está provocando una revolución en el diseño de redes ópticas. Las prestaciones ofrecidas por las redes de conmutación por longitud de onda hace innecesarias y obsoletas muchas de las funciones de las capas más altas de la torre de protocolos. De esta manera empieza a ser común que IP se monte directamente sobre WDM con excelentes resultados. Otra gran mejora en prestaciones es la drástica disminución de contenciones que se producían cuando la longitud de onda a la que deseábamos transmitir no se encontraba disponible. Este hecho queda en gran medida solucionado con la introducción de los nuevos dispositivos descritos anteriormente, con especial significación de los CLs [3]. Por último debemos comentar el gran avance en interoperatividad entre este tipo de redes que se consigue con convertidores de longitud de onda en el dominio óptico. Este método ofrece garantías de transparencia, condición indispensable para la interconexión de sistemas heterogéneos.

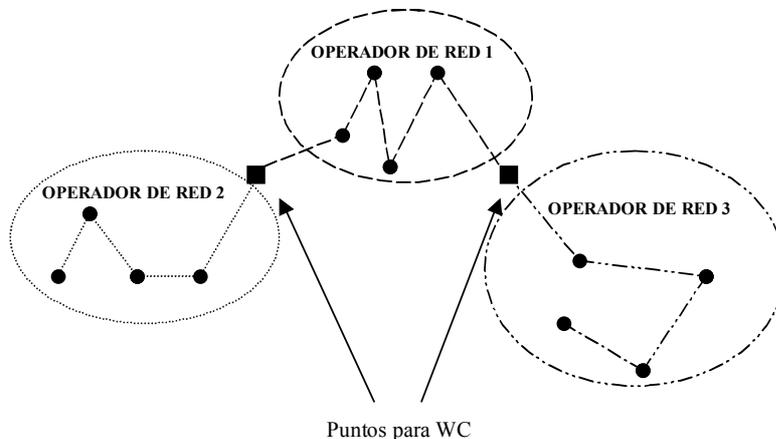


Fig. 3, Ejemplo de separación en subredes gestionadas de forma independiente mediante el uso de WC (Wavelength Converters)

Un ejemplo de esto se puede encontrar en la Fig. 3, en la cual podemos ver cómo es posible la separación de la gestión de red en subredes. De esta forma tendremos asignación independiente de longitudes de onda en el interior de cada una, que podrían ser conectadas entre ella utilizando CLs [3]. Algunos ejemplos notables de implementaciones de este tipo de redes son [2]:

- MONET (“Multiwavelength Optical Network”): Proyecto subvencionado por DARPA (“Defence Advanced Research Project Agency”) y llevado a cabo por Bellcore. Esta red de conmutación por longitud de onda constaba de ocho longitudes de onda separadas 200 GHz y moduladas a 2.5 Gb/s. Hoy en día se realizan ensayos con sistemas capaces de transmitir 10 Gb/s sobre 2000 Km. Además recientemente, estas organizaciones junto con ONTC han implementado con éxito una red en anillo con cuatro longitudes de onda espaciadas 4 nm y moduladas a 155 Mb/s sobre 150 Km.
- AON (“All Optical Network”): Desarrollada en Boston por el MIT’s Lincoln Laboratory, el Campus y DEC. El prototipo usa veinte longitudes de onda espaciadas 50 GHz (0.4 nm), conteniendo cada nodo un transmisor sintonizable (Laser DBR con 10 ns de tiempo de sintonizado) y un filtro sintonizable.
- NTT Unidirectional Ring: Anillo unidireccional con un HUB central y varios nodos de acceso. Los nodos de acceso usan WGR para insertar y extraer longitudes de onda, el anillo tiene un sistema de protección ante fallos. El prototipo utiliza seis longitudes de onda separadas 100 GHz moduladas a 622 Mb/s.
- MWTN (“Multiwavelength Transport Network”): Llevado a cabo por la EUROPEAN RACE hace uso de cuatro longitudes de onda espaciadas 4 nm y moduladas a 622 Mb/s ó 2.5 Gb/s en las pruebas realizadas en Estocolmo.
- Además existen muchos otros ejemplos de redes WDM de conmutación óptica como: WASPNET, OPEN, MOSAIC, OPERA etc.

Existe otro tipo de redes denominadas de difusión y selección, también completamente ópticas, aunque tienen su rango de aplicación en Redes de Área Local (LAN) o Metropolitanas (MAN) (mientras que las anteriores además pueden ser aplicadas a extensas redes de ámbito nacional o internacional). Tendremos la presencia de un medio compartido y dos configuraciones fundamentales, de anillo y en bus en las que los terminales (nodos) tendrán que competir para conseguir acceso. Sin embargo las pérdidas con estas topologías son considerables y no ofrecen prestaciones tan brillantes como las anteriores. No obstante existen implementaciones destacadas, como por ejemplo LAMBDANET a principios de los noventa, que fue implementada por Bellcore. Utilizaba dieciocho longitudes de onda separadas 2 nm y moduladas a 1.5 Gb/s sobre 57 Km. Otros ejemplos son RAINBOW I y II desarrolladas en los laboratorios de IBM para interconectar ordenadores o STARNET-I desarrollada con el mismo fin en la Universidad de Stanford.

Con esto quedan introducidas las redes de conmutación por longitud de onda, ahora nos centraremos en la conversión de longitud de onda y en particular en la basada en Modulación Cruzada de Ganancia con Amplificadores Ópticos de Semiconductor.

3. Conversión en Longitud de onda: Modulación Cruzada de Ganancia

Una de las técnicas de conversión óptica más populares utiliza Modulación Cruzada de Ganancia (XGM) en Amplificadores Ópticos de Semiconductor (SOAs). Esto es así por su simplicidad ya que solo utiliza un amplificador, lo que conlleva además un bajo coste. Sin embargo también tiene serios inconvenientes como la grave degradación de señal, la Emisión Espontánea Amplificada (ASE) y la inversión de la señal digital.

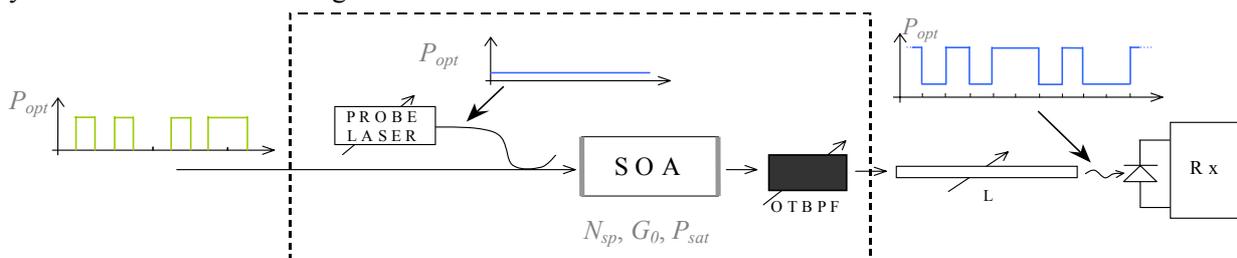


Fig. 4 Modelo de CL basado en XGM con SOAs

El modelo del CL puede verse en la Fig. 4. Dos señales ópticas son inyectadas a la entrada del SOA usando un acoplador óptico. La señal que de línea modula la ganancia del amplificador. La señal pump está modulada en ASK binaria, transporta la información y queremos cambiar su longitud de onda. La señal a la salida del “Probe Laser” es de continua. A la salida del SOA se puede ver un Filtro Paso de Banda Óptico Sintonizable (OTBPF) que servirá para filtrar la señal de salida a la longitud de onda objetivo. Además será sintonizado conjuntamente con el probe laser para seleccionar la longitud de onda a la salida del CL (longitud de onda objetivo λ_T).

La señal óptica llegará al receptor tras una pérdida L medida en dB en un hipotético enlace de fibra óptica. Esta podría ser medida en km suponiendo, por ejemplo, unas pérdidas de 0.2 dB/km. Además se puede suponer que las pérdidas son debidas a la presencia de elementos pasivos como acopladores o circuladores. En este estudio se determina P_{sens} en función de los distintos parámetros presentes en la Fig. 4, como potencias de las señales pump y probe, parámetros del SOA y pérdida en la fibra L y se cuantifica la mejora en la predicción de las prestaciones del sistema obtenida con el novedoso modelo estadístico presentado en este proyecto. Las nuevas expresiones ofrecen un alto grado de exactitud, superior a la expresión Gaussiana que se ha venido utilizando hasta la fecha, pero que no proporciona resultados fiables cuando se usa en este tipo de aplicaciones (CL basado en XGM con SOAs). Adicionalmente supondremos que nuestro sistema trabaja a 2.5 Gb/s por canal en una Red de Area Metropolitana (MAN) y que por tanto nos encontramos muy por debajo del ancho de banda del dispositivo, lo que nos permite ignorar los efectos relacionados con esta limitación. Así en redes más extensas que contienen enlaces ópticos funcionando a tasas mucho mayores aparecen nuevos efectos que deben ser considerados.

3.1. Modelo de ganancia

El SOA viene descrito por una ganancia G_0 , que se supondrá constante con la longitud de onda [4], [5], y por P_{sat} que toma un valor típico de 0.1 mW y depende de aspectos tecnológicos del amplificador como las dimensiones de la cavidad activa o la intensidad de polarización que se inyecte [6].

En la Fig. 5, podemos observar el proceso de saturación de la ganancia del SOA, para potencias típicas totales a la entrada del mismo que se mueven en el rango entre -25 dBm y 1.7 dBm.

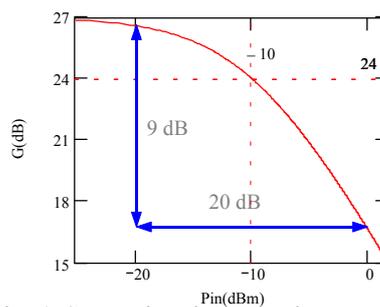


Fig. 4, Saturación de ganancia en un SOA

En este punto hay importantes aspectos que conviene explicar. El primero de ellos es la fuerte dependencia de la ganancia del dispositivo con la potencia total de entrada, lo cual si bien pueda resultar un inconveniente en otro tipo de aplicaciones (amplificador de línea, preamplificador etc.) es, en este caso, una característica fundamental. De esta forma comprobamos que la ganancia del dispositivo está modulada por la potencia total a la entrada del SOA [5].

4. Objetivo

El objetivo es proporcionar al diseñador del sistema óptico una expresión que relacione la probabilidad de error en recepción con los parámetros más significativos que lo describen, como por ejemplo la posición del umbral en recepción, potencias de la señal óptica (cero y uno lógicos) y niveles de ruido en detección. Todo esto, claro está, cuando CLs basados en XGM con SOAs están presentes en la red WDM. La necesidad de un modelo más preciso se deriva de la aparición de una nueva fuente de ruido (ASE) procedente de los SOAs y cuyas componentes se suman en detección a las fuentes de ruido Térmico y Shot (fuentes que siguen una distribución Gaussiana). Sin embargo las componentes de ruido generadas en el receptor debidas al ASE no siguen una distribución Gaussiana, con lo que la expresión que se viene utilizando tradicionalmente, que asume dicha distribución para todas las fuentes de ruido en detección, se hace imprecisa e inadecuada. Este proyecto presenta un nuevo modelo, y por tanto nuevas expresiones para la probabilidad de error, que ofrecen predicciones de eficiencia del sistema más adecuadas en el caso que nos ocupa. Para ello supondremos que las componentes de ruido en el receptor debidas a ASE son dominantes respecto a las demás. Comprobaremos como, cuando hay presente ASE en el sistema e incluso en el caso en que no sea dominante, las nuevas expresiones proporcionarán predicciones para la probabilidad de error más fiables y seguras que las obtenidas usando un modelo puramente Gaussiano.

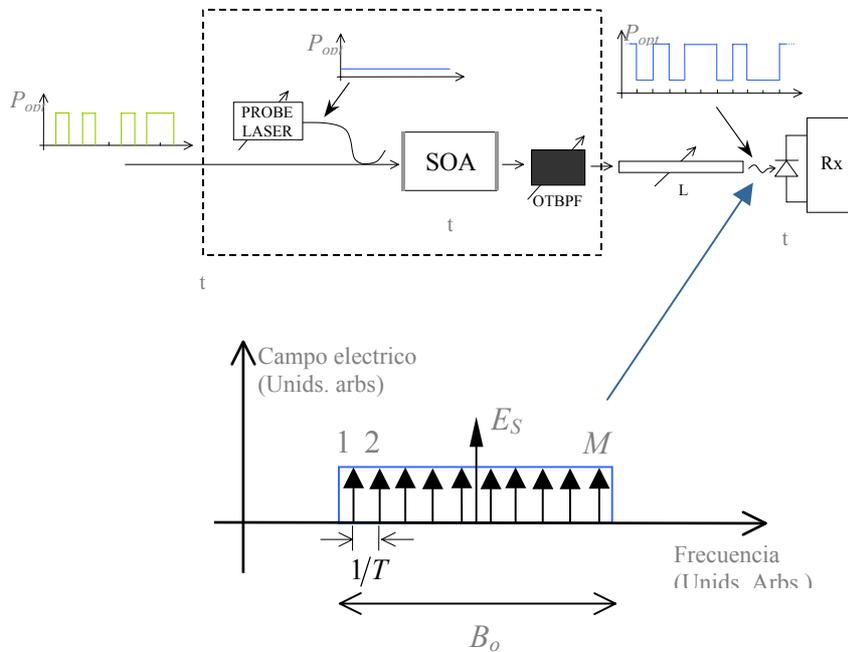


Fig. 5, Componentes de campo eléctrico a la entrada del receptor y degradación de la relación de extinción

Cabe destacar que la degradación de la relación de extinción r y el ASE constituyen, sin ningún lugar a dudas, los inconvenientes más graves a la hora de colocar un CL basado en XGM con SOAs en una red óptica WDM, y cuando el punto de operación en el SOA se encuentra lejos del límite de ancho de banda. El emplazamiento y número de CL que pueden coexistir en un enlace óptico es un tema que aún requiere investigación intensiva y este estudio está enfocado a contribuir en esta línea.

En la Fig. 5, podemos ver como con nuestro modelo supondremos que a la salida del CL tendremos una componente fundamental de campo eléctrico en la longitud de onda objetivo pero también tendremos otras debida al ASE de los amplificadores. Todo este paquete de longitudes de onda entrará en detección generándose fuertes componentes de ruido que no siguen una regla Gaussiana y que requieren el nuevo tratamiento estadístico que se lleva a cabo en este proyecto. Además el nuevo modelo estará orientado a tener en cuenta, la degradación del factor de extinción r es decir del cociente entre la potencia transmitida en el uno con el cero lógico y que deteriora el funcionamiento del sistema de comunicaciones.

5. Modelo estadístico

El nuevo modelo estará basado en la función densidad de probabilidad de una Chi cuadrado [10], la cual se ajusta de forma mucho más precisa el ruido a la salida del SOA y nos permitirá obtener dos nuevas expresiones para la probabilidad de error en función de las potencias de señal y ruido y la posición del umbral en recepción. Además en la Fig. 6, podemos ver representadas esta junto con la Gaussiana para una serie de parámetros típicos. Se aprecia claramente la desviación de esta última frente al modelo más exacto.

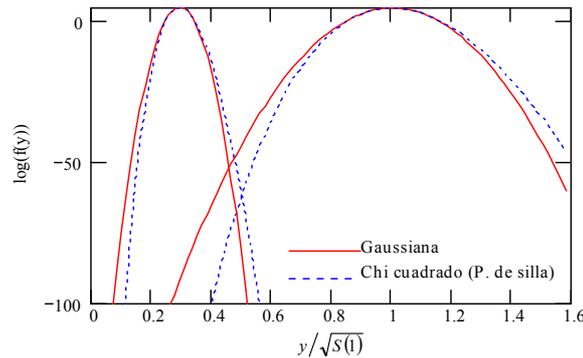


Fig. 6, Comparación Funciones Densidad de Probabilidad Gaussiana y Chi cuadrado con parámetros típicos

5.1 Expresiones resultantes

Para hallar la nueva expresión para la probabilidad de error nos vimos en la necesidad de utilizar la aproximación del Punto de silla (Saddle point approximation [9]) y de Taylor, así obtuvimos la primera de las expresiones cerradas para la probabilidad de error. Además utilizamos un método alternativo basado en la Cota de Chernoff [10] lo que nos llevó a obtener dos expresiones cerradas para la probabilidad de error del sistema basadas en la función de distribución Chi cuadrado. Estas expresiones se presentan en la versión completa del proyecto así como los pasos intermedios para hallarlas. En resumen tendremos dos nuevas expresiones cerradas (Punto de silla y Chernoff) y dos antiguas (umbral teórico [7], [8] y umbral variable [10]) basadas en un modelo Gaussiano.

Los ámbitos de aplicación de las distintas expresiones serán los siguientes,

MODELO GAUSSIANO		MODELO CHI-CUADRADO	
UMBRAL TEÓRICO	UMBRAL VARIABLE	PUNTO DE SILLA	CHERNOFF
RUIDO GAUSSIANO DOMINANTE (TERMICO O SHOT) O ASE PRESENTE CON ANCHOS DE BANDA OPTICOS GRANDES		RUIDO ASE PRESENTE EN EL SISTEMA Y ANCHOS DE BANDA OPTICOS ESTRECHOS	

Obviamente en los sistemas actuales se verificarán las condiciones de aplicación del modelo Chi cuadrado, mucho menos restrictivos. Veremos a continuación qué implicaciones prácticas se derivan de las dos nuevas expresiones.

6. Aplicaciones prácticas

6.1 Diseño de receptores robustos en sistemas altamente ruidosos

Estas dos nuevas expresiones servirán como corrección a la posición del umbral de potencia en el receptor óptico. El umbral ha sido establecido tradicionalmente a partir de las potencias de señal y ruido en recepción suponiendo un modelo de ruido Gaussiano. Esta afirmación podría considerarse certera en el caso en que fuentes como la térmica, shot etc. eran dominantes en el sistema pero no cuando la componente fundamental es debida a ASE que como es bien sabido sigue una distribución Chi cuadrado [8]. En la Fig. 7, podemos ver como las nuevas expresiones, no Gaussianas colocarían el umbral por debajo de lo que lo hace la Gaussiana, de forma más certera y segura. Estas expresiones y en particular la basada en la aproximación de Punto de silla más Chernoff más Taylor será de incalculable valor a la hora de diseñar receptores que vayan a funcionar en sistemas con las características que estamos asumiendo en este proyecto, es decir, donde el ruido debido a la emisión espontánea (ASE) de los amplificadores es dominante. Además tras observar la Fig. 7, llegamos a la conclusión de que el situar incorrectamente el umbral en detección utilizando la expresión Gaussiana puede llevar a un rendimiento deficiente del sistema aún cuando ésta predijera lo contrario.

Así en resumen de la Fig. 7, podemos concluir la gran importancia de la colocación precisa del umbral en detección por la gran sensibilidad que presenta P_e frente a pequeñas variaciones del mismo. Vemos una como el modelo Gaussiano coloca el umbral por debajo que el nuevo modelo más exacto. Por consiguiente el uso de modelos más precisos aparece como imprescindible en sistemas que incorporan CLs basados en XGM con SOAs.

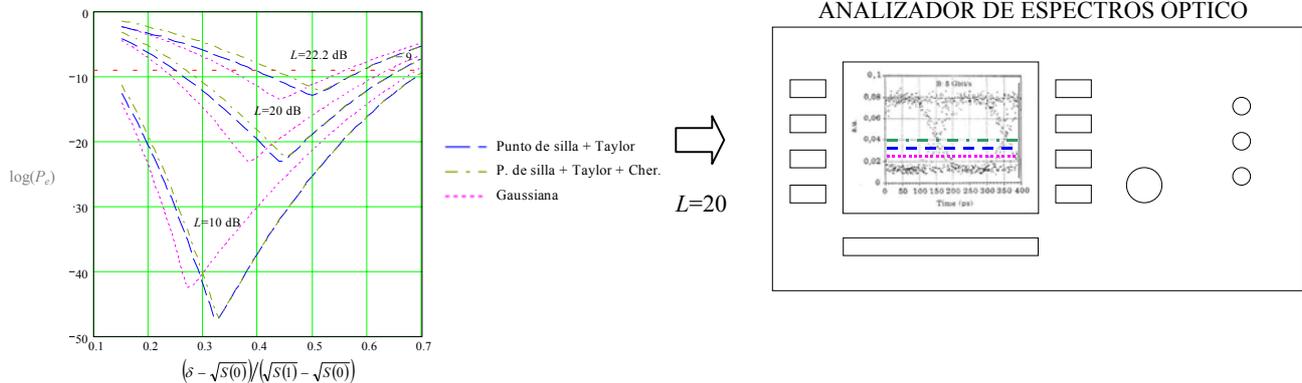


Fig. 4.1. P_e frente a umbral normalizado para $P_{pump} = -3$ dBm, $P_{probe} = -20$ dBm, $r=5$, $N_{sp}=10$, $L=10$ dB.

Fig. 7, Colocación del umbral en detección (verde y azul según nuevo modelo, fucsia según modelo Gaussiano)

6.2 Predicción de límites admisibles en degradación de señal

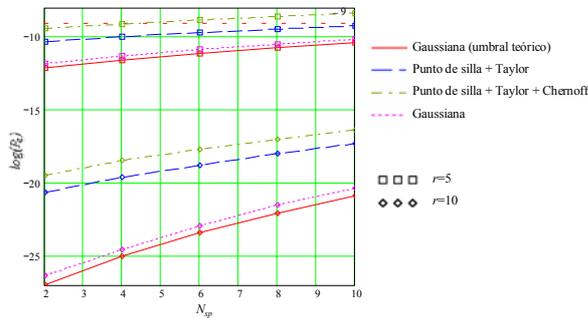


Fig. 5. P_r frente a N_{sp} para $P_{pump}=0$ dBm, $P_{probe}=-20$ dBm, $L=22.2$ dB.

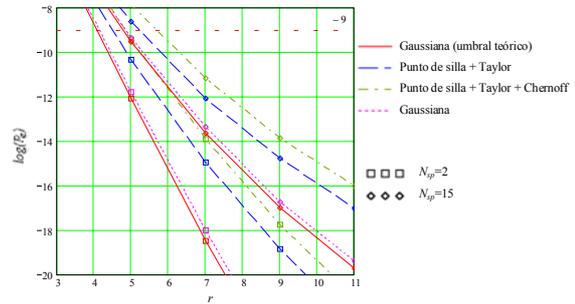


Fig. 6. P_r frente a r para $P_{pump}=0$ dBm, $P_{probe}=-20$ dBm, $L=22.2$ dB.

Fig. 8, Ejemplo gráficas para predicción degradación máxima de señal en ruido y relación de extinción

En la Fig. 8, se encuentra representada la probabilidad de error frente al factor de emisión espontánea y la relación de extinción (cociente entre potencia de señal en uno y cero lógico a la entrada del convertidor) para la expresión Gaussiana y las nuevas expresiones que se derivan del modelo Chi cuadrado. Se pueden observar importantes desviaciones entre ambos modelos. Además obtenemos un método que permite cuantificar la degradación en prestaciones del sistema cuando la señal óptica atraviesa uno de estos dispositivos

6.3 Dimensionamiento del sistema en potencia

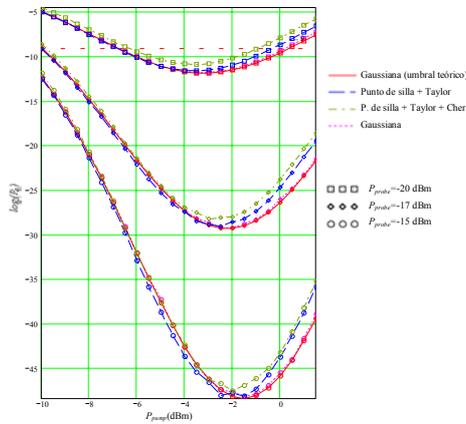


Fig. 11. P_r frente a P_{pump} $N_{sp}=15$, $r=5$, $L=22.2$ dB

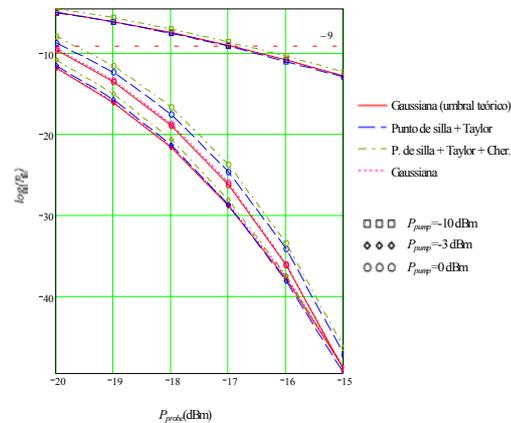


Fig. 12. P_r frente a P_{probe} $N_{sp}=15$, $r=5$, $L=22.2$ dB

Fig. 9, Dimensionamiento en potencia del CL. Potencia de línea y laser

En las Fig. 9, se representa un método para dimensionar un CL en potencia. Así para una potencia de la señal de entrada P_{pump} obtendremos un valor óptimo para la potencia a la salida del probe laser (ajutable). De igual modo para una potencia del probe laser, en el caso de que no pudiéramos variarla, estableceríamos un valor mínimo para la potencia de señal que se debe inyectar para obtener un rendimiento por encima de las especificaciones. También en este caso se observa como el modelo Gaussiano experimenta importantes desviaciones respecto a las nuevas expresiones.

6.4 Límites admisibles de pérdidas

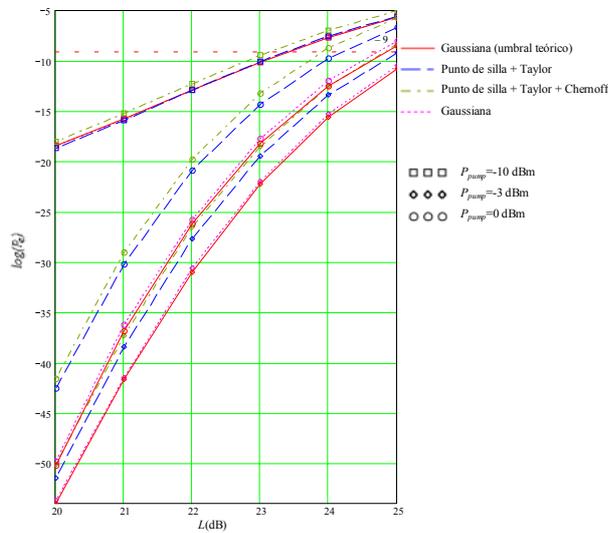


Fig. 10. P_s frente a L para $P_{pump} = -20$ dBm, $N_p = 5$, $r = 10$

Fig. 10, Ejemplo de gráfica para hallar límite de pérdidas admisibles según el modelo Chi cuadrado y Gaussiano.

El nivel de pérdidas admisibles tras una conversión en longitud de onda puede ser establecido utilizando gráficas como la representada en la Fig. 10. Aquí nuevamente se aprecia como el nuevo modelo es pesimista respecto al Gaussiano proporcionando valores para la atenuación menores, lo cual es consecuencia directa de las componentes de ruido debidas al ASE en recepción.

Estas han sido sólo algunos ejemplos de posibles aplicaciones del nuevo modelo que sin ningún lugar a dudas será de vital importancia y referencia a la hora de diseñar sistemas que incorporen convertidores de longitud de onda basados en modulación cruzada de ganancia.

7. Conclusiones y líneas futuras

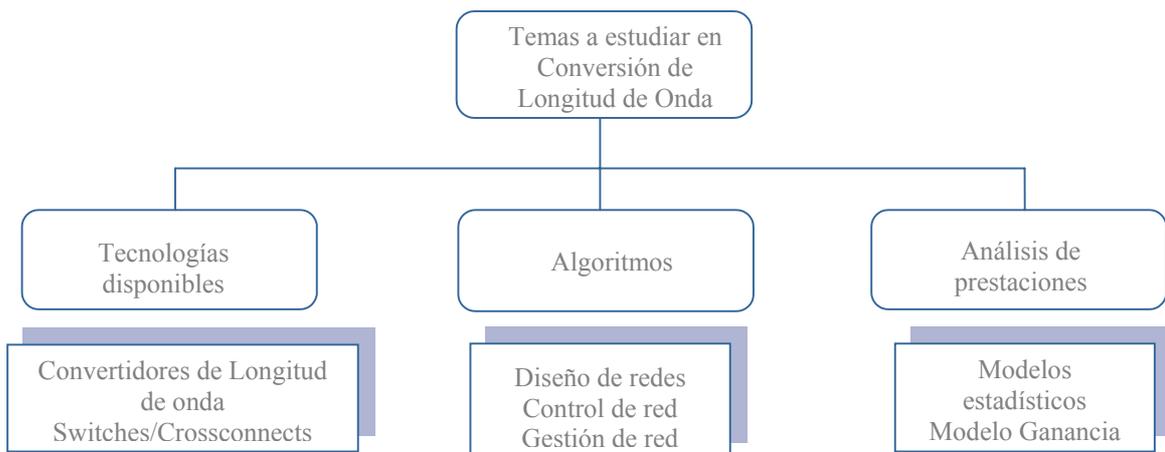


Fig. 11, Líneas de trabajo entorno a las redes completamente ópticas y convertidores de longitud de onda

En este proyecto ha sido presentada una caracterización estadística más precisa del ruido asociado a los convertidores de longitud de onda basados en XGM en SOAs en redes DWDM. Nuestro análisis ha mostrado los efectos sobre la probabilidad de error del sistema de los distintos parámetros, prestando especial atención al efecto de la potencia de las señales pump y probe, la relación de extinción, ruido ASE, pérdidas entre el CL y el receptor y la ganancia no lineal del SOA. Los resultados presentados muestran que la aproximación Gaussiana tradicional es optimista y por lo tanto imprecisa e inadecuada a la hora de diseñar sistemas que incorporen este tipo de CLs. Esto es así ya que esta puede predecir un comportamiento dentro de las especificaciones aún cuando el sistema esté fuera de ellas. Un tratamiento novedoso y extremadamente preciso del ruido debido a emisión espontánea de los amplificadores ha sido presentado utilizando una distribución Chi cuadrado, que ha derivado en la obtención de dos expresiones originales para la probabilidad de error, haciendo uso de la aproximación de Punto de silla en la primera y añadiendo la Cota de Chernoff a la segunda, y donde la segunda es la que proporciona los resultados más precisos, ya que hemos cuantificado una mejora de entorno a un orden de magnitud en predicciones de probabilidad de error, y de hasta 0.5 dB en sensibilidad del sistema respecto a la primera. Es importante destacar como, aún en el caso de que el ASE no sea dominante en el sistema, el nuevo modelo continuará proporcionando predicciones más adecuadas y seguras, ya que, éstas se encuentran en todo momento por debajo (pesimistas) de las obtenidas con el modelo tradicional Gaussiano. Así el nuevo modelo encontrará su rango de aplicación en sistemas donde el ASE esté presente y siempre y cuando sus niveles no se puedan despreciar respecto a los de otras fuentes (que se pueden considerar Gaussianas), todo ello claro está con anchos de banda ópticos relativamente estrechos, como los que se vienen usando en la actualidad. De esta manera hemos confirmado la sospecha que teníamos acerca de la falta de precisión de la aproximación Gaussiana a la hora de medir el rendimiento del creciente número de sistemas que incorporan CLs basados en XGM con SOAs permaneciendo los valores proporcionados por esta por encima de los obtenidos con el nuevo modelo. Se encuentran errores que llegan a varias decenas de órdenes de magnitud para la probabilidad de error (sobre todo cuando $P_e \ll 10^{-9}$) y de 1.5 dB en sensibilidad, lo que puede llevar a la desastrosa situación de un funcionamiento deficiente del sistema aún cuando ésta predijera lo contrario.

Además el presente proyecto contesta algunas cuestiones (y quizás plantea otras) sobre el número y emplazamiento de los CLs en redes WDM y el impacto de otros dispositivos activos (EDFAs) o pasivos sobre los mismos. Estos, sin duda, serán objeto de trabajo intensivo en los próximos años al permanecer muchos aspectos todavía inexplorados. En la figura se presentan los frentes de investigación abiertos en estos momentos donde, sin duda, queda mucho trabajo por hacer, en definitiva, el objetivo que persigue el autor con este proyecto es dar una respuesta a la demanda de modelos más realistas y precisos a la hora de diseñar redes con enlaces ópticos, de las que se espera ofrezcan excelentes niveles de fiabilidad, robustez y flexibilidad, como los obtenidos en sistemas que incorporan la tecnología de conversión en el dominio óptico, y en particular, la basada en modulación cruzada de ganancia con amplificadores ópticos de semiconductor.

8. Bibliografía

8.1 Bibliografía fundamental

- [1] Jaafar M.H. Elmirghani, H. T. Mouftah, “Technologies and Architectures for Scalable Dynamic Dense WDM Networks”, IEEE Communications Magazine, pp. 58-66, February 2000.
- [2] Jaafar M.H. Elmirghani, H. T. Mouftah, “All-Optical Wavelength Conversion: Technologies and Applications in DWDM Networks”, IEEE Communications Magazine, pp. 86-92, March 2000.
- [3] S. J. B. Yoo, “Wavelength Conversion Technologies for WDM Network Applications”, Journal of Lightwave Technology, vol. 14, no. 6, pp. 955-965, June 1996.

- [4] N. A. Olsson, "Lighthwave Systems with Optical Amplifiers", IEEE Journal of Lightwave Technology, vol. 7, no. 7, pp.1071-1082, July 1989.
- [5] S. I. Pegg, M. J. Fice, M. J. Adams, A. Hadjifotiou, "Noise in Wavelength Conversion by Cross-Gain Modulation in a Semiconductor Optical Amplifier" IEEE Photonic Technology Letters, vol. 11, no. 6, pp. 724-726, June 1999.
- [6] E. Willner, W. Shieh, "Optimal Spectral and Power Parameters for All-Optical Wavelength Shifting: Single Stage, Fanout, and Cascadability", IEEE Journal of Lightwave Technology, vol. 13, no. 5, pp.771-781, May 1995.
- [7] J. G. Proakis, "Digital Communications", Third Edition, McGraw-Hill International Editions, Electrical Engineering Serie, 1995.
- [8] D. Marcuse, "Derivation of Analitical Expressions for the Bit-Error Probability in Lightwave Systems with Optical Amplifiers", IEEE Journal of Lightwave Technology, vol. 8, no. 12, pp. 1816-1823, December 1990.
- [9] D. Shamoon, J. M.H. Emirghani, R. A. Cryan, "Erbium Doped Fiber Amplifier Systems with Fiber Bragg Grating Optical Filters", Journal of Optical Communications, vol. 20, pp.188-193, October 1999.
- [10] N. S. Bergano, F. W. Kerfoot, C. R. Davidson, "Margin Measurements in Optical Amplifier Systems", IEEE Photonic Technology Letters, vol. 5, no. 3, pp. 304-306, March 1993.

8.2 Bibliografía adicional

Sobre redes ópticas WDM

- Apuntes de cátedra de la asignatura "Comunicaciones Ópticas", Grupo de Tecnología Electrónica de la Universidad de Sevilla, Curso 1999-2000
- M. S. Borella, J. P. Jue, D. Banerjee, B. Ramamurthy, B. Mukherjee, "Optical Components for WDM Lightwave Networks", vol. 85, no. 8, pp. 1274-1307, August 1997

Sobre Amplificadores Ópticos de Semiconductor

- P.Brosson, "Analytical Model of a Semiconductor Optical Amplifier", IEEE Journal of Lightwave technology", vol. 12, no. 1, pp. 49-54, January 1994

Sobre Conversión de Longitud de onda

- T. Durhuus, B.Mikkelsen, C. Joergensen, S. L. Danielsen, K. E. Stubkjaer, "All-Optical Wavelength Conversion by Semiconductor Optical Amplifiers", IEEE Journal of Lightwave Technology vol. 14, no. 6, pp. 942-954, June 1996
- B. Ramamurthy, "Wavelength Conversion in WDM Networking", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 16, no. 7, pp. 1061-1073, September 1998

Sobre Modulación Cruzada de Ganancia

- K. Inoue, "Noise Transfer Characteristics in Wavelength Conversion Based on Cross-Gain Saturation in a Semiconductor Optical Amplifier", IEEE Photonics Technology Letters, vol. 8, no. 7, pp. 888-890, July 1996

Sobre modelos estadísticos para el ruido

- Marcuse, "Calculation of Bit-Error Probability for a Lightwave System with Optical Amplifiers and Post-Detection Gaussian Noise", IEEE Journal of Lightwave Technology, vol. 9, no. 4, pp. 505-513, April 1991.

9. Publicaciones y otros méritos

- **Noise Characterisation of Wavelength Converters Based on Cross Gain Modulation in SOAs**

Manuel Muñoz de la Corte, Jaafar M.H. Elmirghani

Symposium of Future Fotonic Network Technologies, Architectures and Protocols. IEEE Globecom 2001. San Antonio, Texas, Noviembre 2001. (Se adjunta copia)

- **Accurate Noise Characterisation of Wavelength Converters Based on Cross Gain Modulation in SOAs**

Manuel Muñoz de la Corte, Jaafar M.H. Elmirghani

IEEE Journal of Lightwave Communications. Pendiente de recibir respuesta (Se adjunta copia)

El proyecto fue realizado en el Communication Systems Laboratory en el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la University of Wales Swansea (Reino Unido) a través del programa Sócrates/Erasmus de la Unión Europea. En este departamento se mantiene estrecha colaboración con diversas compañías (<http://www-ee.swan.ac.uk/DeptEEE/Research/index.html>) propulsoras de la línea de investigación en la que sustenta este proyecto. El autor obtuvo una beca de doctorado en dicha universidad británica.

Además se contó con la inestimable colaboración del Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad de Sevilla.

La aplicabilidad industrial de la conversión de longitud de onda y de la tecnología WDM en general está fuera de toda discusión, así los grandes fabricantes de equipos de comunicaciones disponen de productos que incorporan esta revolucionaria tecnología, la cual ya está siendo profusamente utilizada en las redes troncales de las más importantes operadoras de telecomunicaciones.