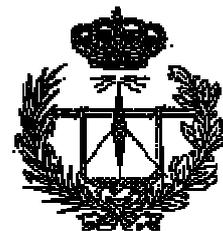


E.T.S.I.T

PROYECTO FIN DE CARRERA

Joaquín Pérez Soler

Dtor. Roberto Llorente Sáez



**Evaluación de la Diafonía Lineal en Redes Ópticas por
Multiplexación en Longitud de Onda mediante
Transformadores Ópticos de Fourier**

1. Motivación

Hoy en día, los sistemas de telecomunicaciones están sufriendo cambios radicales debido a la continuada demanda del tráfico de Internet y de las redes de datos. La demanda de tráfico continúa siendo creciente y afecta a la capacidad de las infraestructuras existentes en todo el mundo. Los sistemas de comunicaciones que originalmente fueron diseñados para servicios de telefonía tradicional, no son capaces de proporcionar el ancho de banda requerido por una sociedad de la información (SI) moderna. Únicamente las nuevas redes de fibra óptica junto con la última generación de sistemas ópticos de transmisión pueden proveer el necesario caudal de tráfico en las redes troncales. Esto es una motivación para mejorar la capacidad de dichas redes troncales mediante avances en campos tales como el procesado óptico de la señal, transmisión óptica, conmutación y enrutado de señales ópticas.

Por ello es necesario desarrollar y demostrar nuevas tecnologías que permitan la transmisión de Terabit/s en enlaces de fibra óptica. Esto conlleva un aumento de la capacidad de transmisión elevando la capacidad de transmisión binaria hacia los 160 Gbit/s y solucionando las limitaciones y degradaciones que esta capacidad y la alta eficiencia espectral necesaria imponen a los sistemas de transmisión.

La transición hacia canales a velocidades binarias mayores (Ej. $N \times 160$ Gbit/s) en sistemas DWDM sólo tiene sentido si la capacidad de transmisión global es mayor, la eficiencia espectral es mayor y/o la complejidad o coste es menor, comparado con los sistemas DWDM basados en las generaciones anteriores: $N \times 10$ Gbit/s y $N \times 40$ Gbit/s. La tecnología de sistemas y dispositivos a 160 Gbit/s que hay en la actualidad no es lo suficientemente madura como para responder a esa cuestión.

Uno de los principales argumentos en contra de la creación de canales a velocidades mayores es que las limitaciones de la transmisión y las degradaciones de la señal asociadas, debidas a la dispersión cromática (GVD), dispersión por polarización (PMD), y no linealidades de la fibra, aumentan enormemente al incrementar la velocidad de transmisión. Además, empiezan a cobrar importancia otros efectos degradantes como la dependencia con la temperatura de la dispersión cromática. Además también se deberán estudiar las limitaciones de los sistemas DWDM a $N \times 160$ Gbit/s, así como la necesidad de disponer de fuentes a 160 Gbit/s transparentes en cuanto a longitud de onda [1].

Este Proyecto Final de Carrera se enmarca dentro de las acciones llevadas a cabo dentro del Proyecto Europeo IST-2000-28657 TOPRATE para el estudio e implementación de técnicas eficientes de monitorización y supervisión de canal en sistemas $N \times 160$ Gbit/s DWDM. Además este Proyecto Final de Carrera ha sido galardonado con una beca por la "Cátedra Telefónica e-BA de la UPV" en su convocatoria 2003-2004.

El principal objetivo del Proyecto TOPRATE es desarrollar y demostrar una tecnología avanzada que permita la transmisión de varios Terabit/s por un enlace de fibra punto a punto, incluyendo una demostración práctica sobre una red de fibra instalada por toda Europa. Además, TOPRATE también pretende investigar las limitaciones y degradaciones de estos sistemas de comunicación para conseguir las velocidades de transmisión comentadas y altas eficiencias espectrales.

Dentro de las líneas de investigación de TOPRATE concretamente este Proyecto Final de Carrera se enmarca dentro del aspecto de análisis, simulación y valoración del impacto de las degradaciones en los sistemas Nx160 Gbit/s DWDM, para lograr el objetivo de poder obtener una correcta supervisión y monitorización del canal en los sistemas Nx160 Gbit/s DWDM.

La motivación y el marco de este Proyecto Final de carrera abarcan tanto la supervisión y monitorización de canal mediante el análisis espectral en tiempo real de los sistemas Nx160 Gbit/s DWDM, como el procesado de sus resultados para la evaluación de aspectos de calidad como son la diafonía intercanal (diafonía debida al canal adyacente) y la dispersión residual del sistema. Esta estimación de la diafonía en los sistemas mediante su análisis espectral en tiempo real proporcionará una estima del funcionamiento del sistema de forma sencilla, práctica y eficiente.

2. Planteamiento del problema

La diafonía lineal junto a la dispersión por polarización (PMD) son las principales limitaciones con las que se encuentran los sistemas de alta eficiencia espectral. Por ello la importancia de las técnicas de monitorización de parámetros clave del canal en los sistemas DWDM.

Estas técnicas de monitorización de canal como la transformada de Fourier óptica (OFT, *optical Fourier transform*) mediante fibra óptica o LCFBG, el uso de la medida de parámetros de Stokes, la medida directa con alta resolución de la relación señal a ruido y otras, son las que actualmente están bajo desarrollo.

En este Proyecto se propone la monitorización de la red y de los canales DWDM, y se optó por una monitorización. El principio básico es la captura temporal de la señal DWDM durante un periodo de señal limitado (En un periodo de bit) y realizar la transformación de Fourier en todo el espectro de longitudes de onda del sistema. Así una vez que obtenemos el espectro en el dominio temporal, los parámetros clave del sistema que son la potencia de señal y la disposición de las longitudes de onda pueden ser evaluados. La gran ventaja de esta técnica de monitorización es la facilidad de evaluación del nivel de interferencia debido a la diafonía que sufre cualquier canal. Pues una vez que la OFT proporciona la información espectral en el dominio temporal, esta información es fotodetectada, capturada y postprocesada. La medida de la potencia de ruido en el dominio temporal tras la OFT permite observar una cierta distribución uniforme de tiempo en el intervalo temporal en el cual realizamos la OFT. Todo esto es posible al relacionar la potencia con ausencia de información (ceros) y con información en el canal (unos). Esto ha sido llevado a cabo tanto en simulación como en experimentación.

La OFT es entonces la clave en la monitorización propuesta. Para implementar la OFT se hace necesario el uso de elementos dispersivos ópticos, pues se hace uso del efecto de dispersión cromática en fibra monomodo para lograr la conversión de espectro a tiempo. [2;3]. Otras posibilidades experimentadas son el uso de grating de fibra de Bragg (LCFBG) [12] que también son elementos cuya propiedad de dispersión cromática permite realizar la OFT. La elección de la fibra monomodo SSMF aporta la ventaja de la no limitación del ancho de banda de transformación, lo cual es muy interesante al enfrentarnos a canales de gran capacidad en sistemas DWDM. Esta técnica de usar elementos dispersivos para un análisis espectral en tiempo real fue propuesta para un espectro de fase coherente (o sea que toda la luz o señal tiene la misma fase de referencia o sea que el espectro entero del sistema proviene de una única fuente óptica)[4]. Los sistemas reales DWDM ciertamente no poseen esa coherencia de fase entre los diferentes canales DWDM debido a que se originan en diferentes fuentes ópticas. Esta falta de coherencia espectral

da como resultado que la amplitud de ruido presente tras la OFT sea consecuencia del nivel de diafonía. Así el nivel de potencia de ruido proporciona la información sobre la diafonía que sufre el canal debido a la presencia del resto de canales DWDM del sistema, esto es lo que queremos evaluar en este experimento inicial.

Además otro aspecto importante es la expansión temporal que realiza la fibra debido al efecto de dispersión cromática cuando convierte el espacio de frecuencias al dominio temporal. Esta conversión permite disponer del espectro temporalmente y eso puede ser de utilidad a la hora de capturarlo, así fotodetectándolo mediante un convertidor analógico-digital y luego poder post-procesarlo para su estudio.

Así pues las técnicas de monitorización de canal están avanzando rápidamente para dar respuesta a la demanda de redes de alta eficiencia espectral. Este Proyecto se centra en demostrar que la implementación de la OFT es posible, y su utilización como herramienta para el análisis en tiempo real de la diafonía es viable para obtener una estima de la calidad del canal.

3. Simulación y evaluación de la diafonía

3.1. Aplicaciones de la transformada óptica de Fourier

La teoría sobre la transformada óptica de Fourier nos indica que un pulso al propagarse por un medio de transmisión dispersivo sufre unas distorsiones que si el medio de propagación cumple unos parámetros de dispersión y el pulso propagado es estrecho temporalmente puede relacionarse la señal temporal a la salida del medio dispersivo con el espectro frecuencial de ese mismo pulso a la entrada del medio dispersivo [5].

Es decir que si la envolvente compleja de la señal de entrada $\hat{a}_1(t)$ está confinada en un espacio temporal pequeño Δt_1 el coeficiente de dispersión $\ddot{\phi}_0$ es lo suficientemente grande tal que:

$$\left| \frac{\Delta t_1^2}{2\pi\ddot{\phi}_0} \right| \ll 1 \quad (1)$$

La inecuación (1) es por tanto la analogía temporal de la condición de Fraunhofer en espacio libre y es válida si el coeficiente de dispersión de primer orden $\ddot{\phi}_0$ en la fibra o medio dispersivo es mayor que el ancho del pulso de entrada Δt_1 . Solo la magnitud de la señal tras la OFT es evaluable pues su fase se ve afectada por el factor

$$\exp\left(j \frac{1}{2\ddot{\phi}_0} t_R^2\right).$$

Así si se cumple la condición de Fraunhofer temporal (1) se puede asegurar que la potencia media óptica del pulso de salida $P_2(t_R) = |\hat{a}_2(t_R)|^2$ es proporcional a la densidad espectral de energía (magnitud al cuadrado de la señal que obtenemos de la transformada de Fourier) de la envolvente compleja de entrada $\hat{a}_1(t)$ evaluada en $\omega = \frac{t_R}{\ddot{\phi}_0}$.

Una de las ventajas en la realización de la OFT mediante fibra óptica es la no limitación del ancho de banda de trabajo, que si tenemos en los LCFBG [2;3], lo cual hace interesante su aplicación para sistemas DWDM de grandes capacidades (40Gbit/s, 160Gbit/s) y con canales de gran ancho de banda. Otra de las ventajas de usar SSMF es la posibilidad de medir el solape espectral entre las diferentes longitudes de onda del sistema, o sea la diafonía lineal, que depende de la adición de ruido en la salida del transformador de Fourier.

El parámetro principal a tener en cuenta a la hora de realizar la OFT con fibra óptica es el ensanchamiento temporal de los pulsos tras la OFT. Esto limita la tasa de bit R de cada canal, $R=1/T_b$ y la separación espectral entre canales $\Delta(Hz)$. La realización de la OFT del sistema requiere una señal limitada en tiempo, por ello se realiza una captura temporal correspondiente a un tiempo de bit T_b . Los pulsos de entrada tras la OFT quedarán ensanchados y separados por un factor $\Delta \cdot \ddot{\phi}$, siendo $\ddot{\phi}[s^2]$ el coeficiente de dispersión de segundo orden que presenta la fibra transformadora. Tras la captura temporal y la OFT se realiza la conversión analógico-digital de la señal mediante un muestro a velocidad $(1/k \cdot \Delta \cdot \ddot{\phi})$ lo cual permite evaluar el nivel de amplitud de señal del sistema. Esta es la

técnica de realización de la OFT mediante fibra monomodo y su posterior aplicación para la estimación de parámetros fundamentales del canal bajo estudio.

3.2. Sistema propuesto para la evaluación de la diafonía

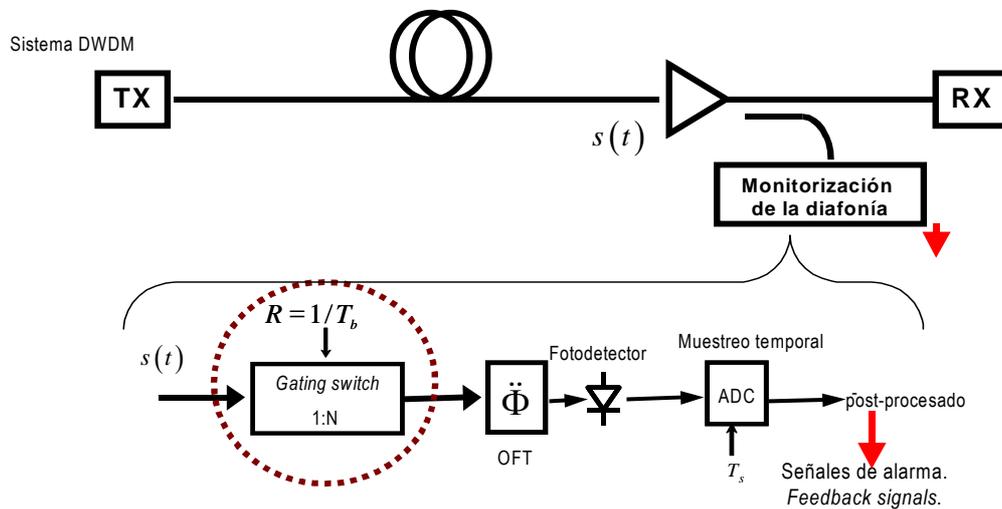


Figura 1 Solución propuesta para el análisis de la diafonía lineal mediante OFT

Este esquema para monitorizar la diafonía en sistemas DWDM posee como características más relevantes el uso de un transformador óptico de Fourier (OFT) realizado con fibra monomodo y la captura temporal de la señal mediante una puerta óptica [6].

Dado que nuestros sistemas DWDM N*160Gbit/s tienen una separación espectral estándar de 400 GHz y usan pulsos gaussianos de 1.6 ps, para comprobar como afecta la diafonía a estos sistemas, se opta por una longitud de 1.6 Km. de fibra SSMF, y la captura de la señal se realiza mediante un factor N=64 que nos proporciona una señal lo suficientemente ensanchada como para poder trabajar con ella una vez convertida y muestreada. Esto hace que la relación entre el ensanchamiento y la separación de pulsos sea la mayor posible atendiendo a la limitación del número de canales bajo estudio (4 canales). Además esto nos asegura que los pulsos de $T_{FWHM}=6.25$ ps cumplen con la condición temporal de Fraunhofer (1) (condición para que se pueda aplicar la teoría de transformadores ópticos de Fourier).

El cálculo de estos parámetros se ha realizado mediante cálculos matemáticos con las fórmulas de la condición de Fraunhofer (1) y de propagación en medios dispersivos, y su posterior simulación en la herramienta de *Virtual Photonics Inc. VPITransmissionMaker*.

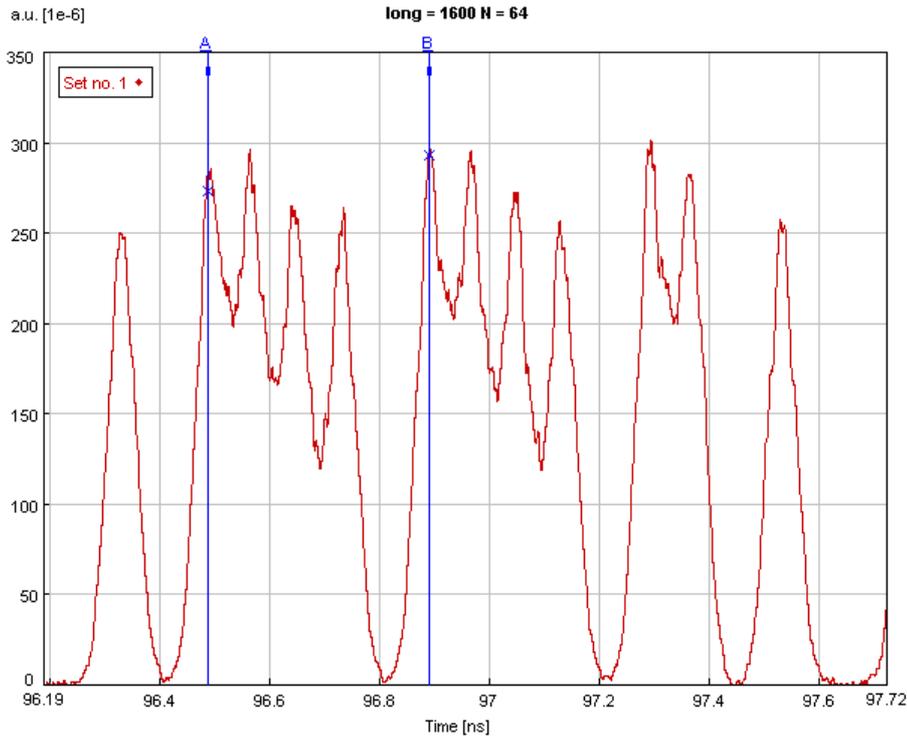


Figura 2 Captura de 1/64 con fibra óptica de longitud 1600 m.

En el procesamiento de las señales detectadas tras la OFT se encuentra la otra limitación del sistema. Para obtener este muestreo temporal en simulación se propone una solución sobre las trazas espectrales obtenidas tras el fotodetector. Estas trazas visualizan la interferencia espectral (espectro de potencia) entre canales DWDM en transmisión. Para ello es necesario acotar los parámetros de tasa de muestreo, desplazamiento temporal (*offset*), umbral de decisión, varianza y media. Tras simulación y cálculos previos se adopta la solución con velocidad de muestreo máxima igual a la inversa del tamaño temporal de la ventana de transformación en la OFT y como tamaño de captura 1 de cada N bits transmitidos. En este sistema queda reflejado una velocidad de muestreo de 2.5 Gs/s ($(160 \text{ Gbit/s}) / (1 \text{ muestra cada } 64) = 2.5 \text{ Gs/s}$) y una ventana de tamaño 4096 samples por cada periodo de OFT.

Estas trazas espectrales nos permitirán la visualización de la zona de interferencia del espectro en potencia de los canales DWDM en tiempo real.

He de reseñar que los valores de los parámetros anteriores han sido seleccionados también teniendo en cuenta ejemplos de digitalizadores o *sampling scopes* comerciales de *Acquiris Digitizers Inc.*, *Atmel Corporation* y *Gage Applied Technologies Inc.*[7-9] Analizando sus parámetros básicos se ha observado que es posible tomar como velocidad de muestreo en post-procesado 2.5 GS/s y velocidades submúltiplos con lo cual su realización experimental es viable atendiendo a las capacidades de los dispositivos comerciales existentes. Además el ancho de banda de trabajo que nos proporcionan es suficiente para nuestro sistema (alrededor de 1 GHz de resolución).

3.3. Herramientas para el análisis de resultados

La estima de la diafonía lineal conlleva la correlación del comportamiento de la misma en el espectro de potencia antes de la OFT y en las trazas obtenidas tras la OFT.

La medida de la potencia de una señal aleatoria con probabilidad gaussiana, característica de la señal obtenida tras la OFT, se puede definir a través de la densidad espectral de potencia.

Al modelar el ruido del sistema como un proceso ergódico, se puede relacionar la potencia media interferente con la varianza y la media obtenidas de la medida del mismo. Si el proceso es ergódico la potencia media se puede obtener como el valor de la función autocorrelación para $\tau=0$. Es decir:

$$P_{media} = R_{xx}(0) = \{E[v(t)]\}^2 + \sigma^2 \quad (2)$$

Es por ello que este tipo de procesos estadísticos cumplen que el momento de primer orden es igual al valor medio (la media); el momento de segundo orden es igual a la potencia de la componente continua; el valor cuadrático medio es la potencia media; la desviación típica es igual al valor rms de la componente que varía en el tiempo y la varianza es la potencia de la componente alterna o la potencia de la componente que varía en el tiempo.

Esta relación entre la densidad espectral de potencia y la autocorrelación es la relación *Wiener-Khintchine*. [10].

Esto nos permite tener a la varianza de las señales tras la OFT como un estimador de la interferencia entre canales adyacentes y por lo tanto de la diafonía lineal del sistema.

Así en procesos ESA se puede indicar que la inversa de la transformada de Fourier de la densidad espectral de potencia es la media temporal de la función de autocorrelación del proceso. Esto permite relacionar la densidad de potencia espectral de la señal con la autocorrelación del proceso y esta a su vez con la varianza y la media del proceso.

Trabajando con la media, la varianza, la potencia media o instantánea y el histograma de la señal podemos evaluar la diafonía en los sistemas DWDM.

3.4. Análisis de resultados en simulación

Este es el esquema del sistema en VPI para poder realizar un estudio de la diafonía como estima de la calidad de los sistemas N*160 Gbit/s, según lo propuesto en el esquema general anterior.

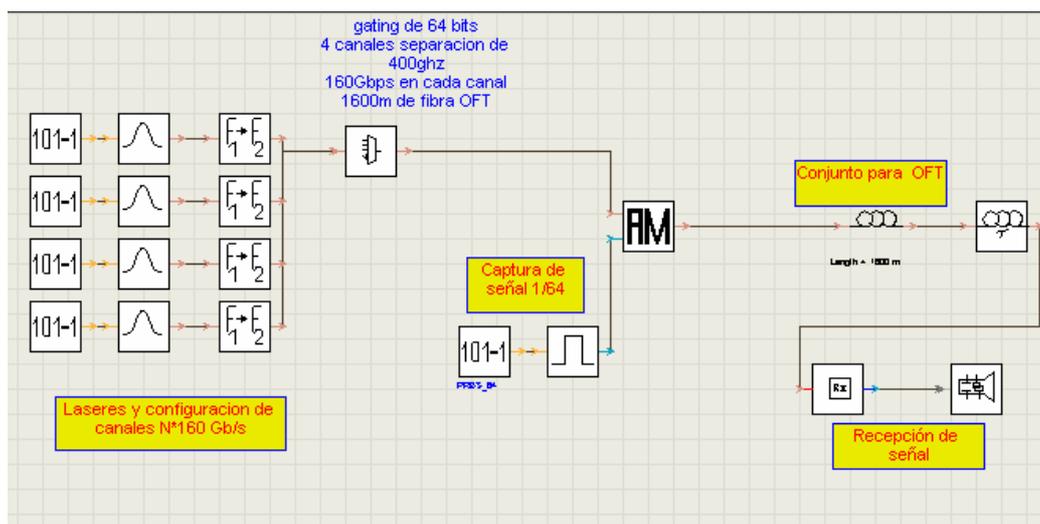


Figura 3 Realización en VPI del esquema del sistema, se utilizan componentes idealizados para poder luego variar los parámetros según las necesidades de la experimentación.

En simulación se comprueban como evoluciona la interferencia y diafonía en los sistemas Nx160 Gbit/s DWDM.

Mediante la captura de los datos de simulación y su procesado en MATLAB se correla la zona de interferencia antes de la OFT (frecuencia) y tras la OFT (tiempo), y se analizan los resultados para obtener una estima de la diafonía lineal.

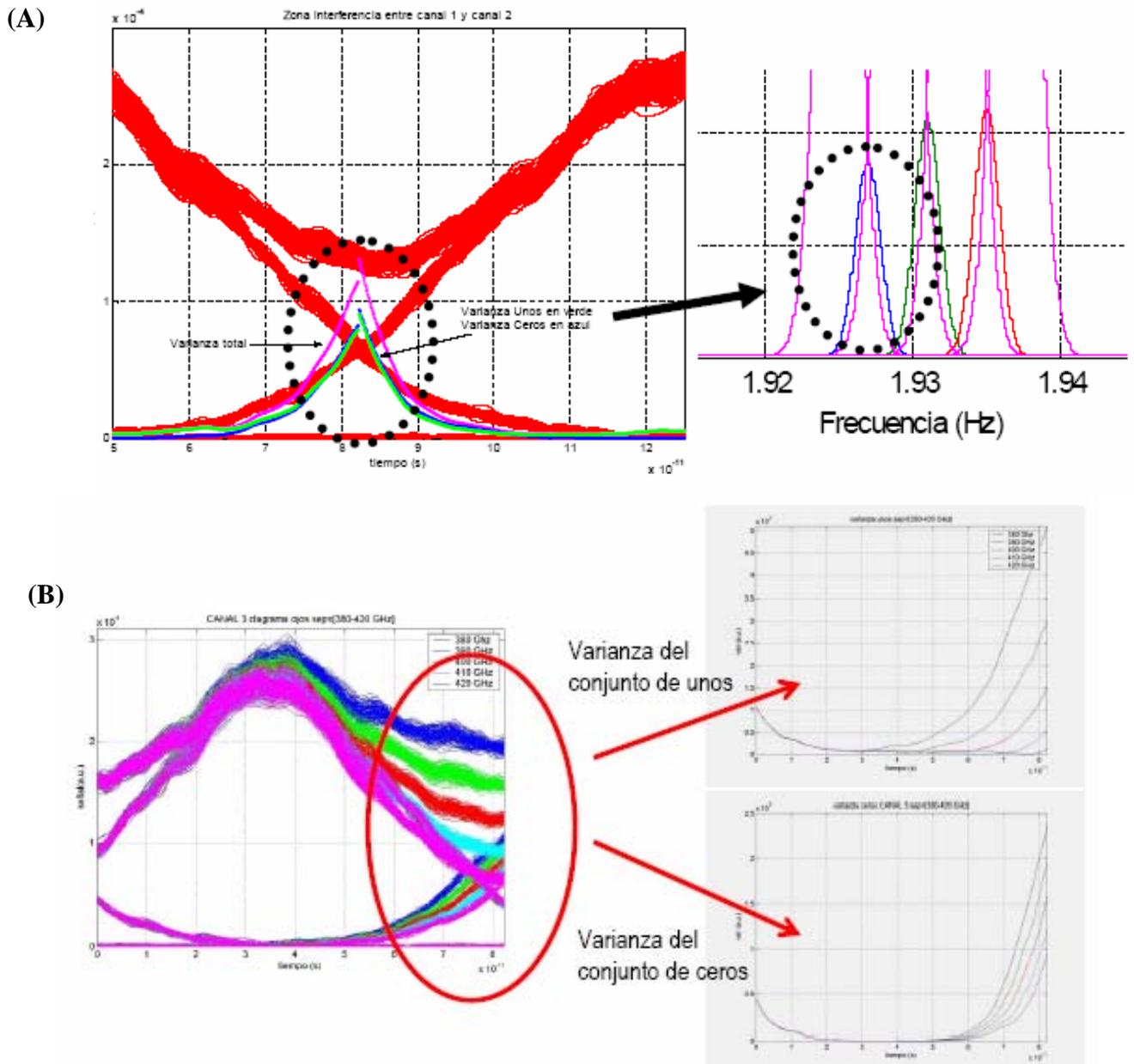


Figura 4 (A) Correlación entre la varianza y la zona de interferencia. (B) Interferencia y varianza asociada a diferentes separaciones de canal.

Las herramientas estadísticas utilizadas son capaces de mostrar cualitativamente la variación de la diafonía lineal conforme varían diferentes aspectos del sistema. En concreto ante el aumento de la separación entre canales

la diafonía disminuye y así lo hace la varianza de la señal procesada. Se ha comprobado que la varianza es un factor que estima la potencia de ruido asociada al sistema.

Pero esta simulación conlleva errores implícitos, idealidades, que han de ser tomados en cuenta:

- Coherencia en fase de las fuentes en VPI. En lo sistemas reales son no coherentes.
- Coherencia en la ventana de modulación de los pulsos temporales. En sistemas reales los pulsos están desplazados entre sí.
- Idealidades de los multiplexores y otros elementos. En sistemas reales existen pérdidas en todos los elementos y es necesario utilizar elementos que las compensen como amplificadores, correctores de la polarización u otros.
- Fuentes de información PRBS.

Esto nos da información para poder plantear la parte experimental de una forma más realista y poder valorar los resultados que de ella se desprendan con la objetividad oportuna.

4. Resultados experimentales

4.1. Montaje realizado y datos obtenidos

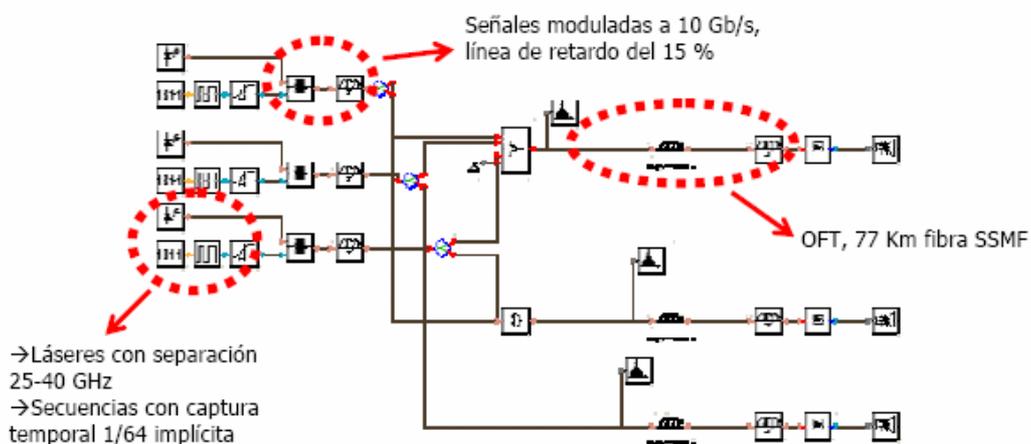


Figura 5 Esquema propuesto para la experimentación.

En la fase de experimentación, se realiza una simulación previa. El entorno de experimentación se traduce en 3 canales de 11 Gbit/s, con una separación de unos 25 GHz, donde el gating está implícito en la señal de RF modulada mediante una secuencia de unos y ceros predefinida. Esto limita la longitud de la fibra SSMF a 77 km. Este experimento es por lo tanto viable para corroborar los datos previos.

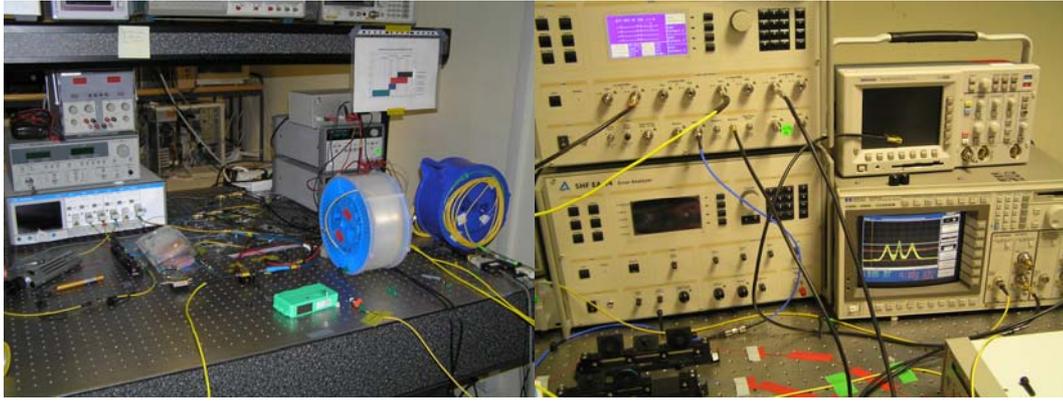


Figura 6 Detalle del montaje de laboratorio.

Se proponen unos casos para corroborar la potencia interferente en el sistema y poder evaluarla con las herramientas anteriormente descritas. Para ello se transmiten canales todo '1' para obtener el peor caso de interferencia posible y poder calcular mediante las herramientas anteriores la potencia interferente y su evolución en estos sistemas. Así mediante la correlación de la interferencia entre canales con el cálculo de la variación del ruido de las trazas obtenidas, podemos realizar una estimación de la diafonía introducida en el sistema por la interferencia cocanal.

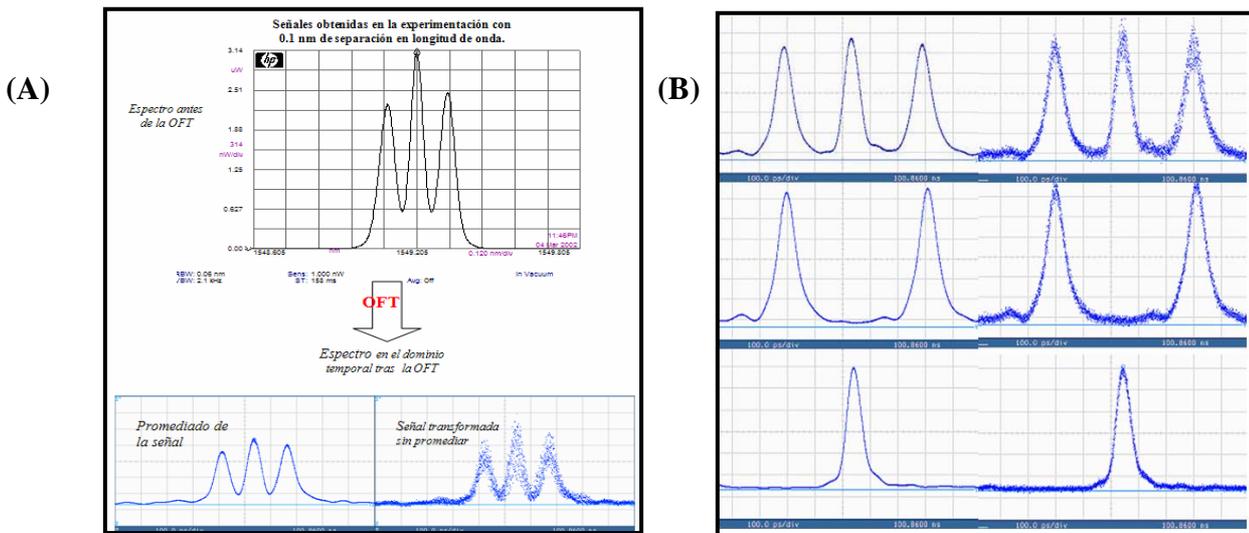


Figura 7 Señales obtenidas en el experimento. (A) Espectro antes y después de la OFT. (B) Datos obtenidos en el osciloscopio de muestreo.

Por las relaciones estadísticas [10], que relacionan esta variación del ruido de fondo con el cálculo de la potencia, se puede obtener una estima de la potencia interferente en los canales bajo estudio.

Seguidamente se muestra la zona de solape multiplicativo o perfil de interferencia obtenido comparado con el ruido de fondo.

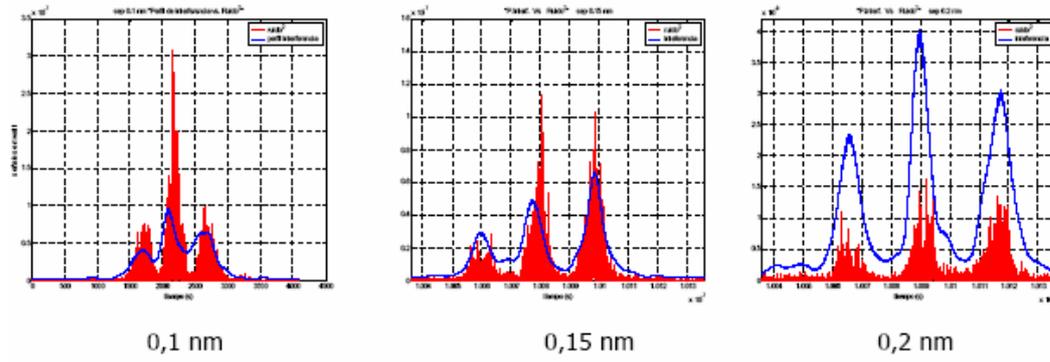


Figura 8 Correlación entre la forma de interferencia multiplicativa y la varianza del ruido

5. Conclusiones

En resumen, en la simulación de sistema Nx160 Gbit/s se ha demostrado que la diafonía afecta de forma clara a los sistemas DWDM.

La varianza de la señal “a priori”, conocida la información que lleva el sistema, se ha mostrado como una herramienta que permite estimar cualitativamente la diafonía lineal en el sistema. Esta varianza puede permitirnos conocer el ruido interferente en la simulación, debido a las relaciones estadísticas entre potencia de ruido varianza y media estudiadas [10]. En definitiva, cualitativamente, la varianza en sistemas con codificación PRBS nos permite analizar la diafonía lineal de los mismos.

En el experimento llevado a cabo se tienen unas condiciones no ideales. Además el estadístico varianza “a priori” no es posible utilizarlo. Esto se traduce en la búsqueda de la correlación de la zona de interferencia y el ruido de fondo, mediante las herramientas perfil de interferencia por solape multiplicativo y varianza del ruido de fondo.

En la zona de interferencia, en los resultados experimentales, se observa que el cálculo de la varianza de ruido es válido para obtener una estima cualitativa de la diafonía en sistemas reales DWDM.

En definitiva podemos realizar una estima de la diafonía en los sistemas DWDM mediante transformadores de Fourier óptico. Pero a su vez se tienen unas limitaciones en la medida; existen no linealidades que introducen interferencias que no se pueden separar de la medida de la diafonía como es la no coherencia de fase de las fuentes del sistema.

6. Líneas futuras

Tras este proyecto quedan ciertos aspectos a tener en cuenta que no pueden ser recogidos en este Proyecto, debido a la limitación tanto en tiempo como esfuerzo que supone un Proyecto Final de Carrera en el actual plan de estudios.

Una de las líneas a seguir es el estudio teórico de la incidencia de las no linealidades del sistema en la diafonía.

Otro campo abierto es la búsqueda de esquemas de simulación que permitan modelar todas las no linealidades que presenta un sistema real DWDM, cuyos resultados podrían dar lugar a mejoras en los simuladores actuales.

En el campo de la monitorización, tras realizar un acercamiento con este Proyecto Final de Carrera a la monitorización de canal, es conveniente extenderlo a otros parámetros no lineales como la PMD.

El nivel de PMD que enfrenta un sistema de transmisión es dependiente de las pequeñas variaciones longitudinales de geometría y/o concentración de dopantes de las fibras y de las condiciones ambientales en las que el sistema se encuentra [11]. Estas irregularidades inducen variaciones locales de birrefringencia que en presencia de vibraciones, cambios de temperatura o tensiones durante el tendido de la fibra hace que ésta tenga un comportamiento no-lineal, no predecible que sólo puede ser caracterizado estadísticamente. Así se pueden plantear objetivos futuros en base a la monitorización de parámetros no-lineales, como la PMD [12], [13]. Esta caracterización es laboriosa y requiere la evaluación del enlace en condiciones de no-utilización. La evaluación de

esta PMD en un sistema en funcionamiento aparece como una línea futura novedosa cuyas conclusiones y resultados pueden permitir la compensación dinámica del nivel de PMD del sistema.

Otra línea abierta surge del hecho de estudiar el impacto y la penalización que sufre el sistema al usar diversos tipos de muestreo temporal o *gating* a la hora de su implementación y su posible variación.

La implementación del muestreo temporal se realiza en la actualidad siguiendo diversos esquemas, mediante dispositivos saturables de absorción [14] [15], dispositivos interferométricos como NOLM [16] o interferómetros no lineales ultrarrápidos (UNI, *ultrafast non-linear interferometer*) [17], o arquitecturas Mach-Zehnder que hacen uso de amplificadores ópticos semiconductores (SOA, *semiconductor optical amplifiers*) [18]. Estas implementaciones para realizar la captura de un bit con todas las longitudes de onda del sistema dependen tanto de la dispersión cromática como del tiempo de referencia en la captura. Pero la característica fundamental de estas implementaciones son las no linealidades de cada uno de los dispositivos empleados (SOA, UNI, NLM,...). Así la cantidad de desviaciones y efectos no lineales a tener en cuenta pueden llevar a un trabajo arduo y costoso en el estudio de la captura de la señal, pero interesante.

En definitiva este Proyecto Final de Carrera ha sido un paso más en la monitorización de redes ópticas y el paso siguiente lo debemos dar nosotros con nuestra curiosidad, imaginación y esfuerzo.

7. Referencias

- [1] H.Bülöw, E.Lach, K.Satzke, A.Clausen, B.Sartorius, J.R.Burie, R.Leppla, E.Le Rouzic, A.Richter, F.Ramos, and P.Pecci, "Towards ultra-high channel bitrates," *Optical Network Design & Modelling Conference ONDM*, Feb.2003.
- [2] M.A.Muriel, J.Azaña, and A.Carballar, "Real-time Fourier transformer based on fiber gratings," *Optics Letters*, vol. 24, no. 1 Jan.1999.
- [3] R.Llorente, J.Martí, and F.Ramos, "Simultaneous DWDM channel monitoring using optical Fourier transformer," NOC optical networks conference, Jan. 2002.
- [4] J.Azaña and M.A.Muriel, "Real-Time optical spectrum analysis based on time-space duality in chirped fiber gratings," *IEEE Journal of quantum electronics*, vol. 36, no. 5 May2000.
- [5] T.Jansson, "Real-time Fourier transformation in dispersive optical fibers," *Optics Letters*, vol. 8, pp. 223-234, Jan.1983.
- [6] J.-H. Lee, L. K. Oxenløwe, M. Ibsen, K. S. Berg, A. T. Clausen, D. J. Richardson and P. Jeppesen, "All-optical TDM data demultiplexing at 80 Gb/s with significant timing jitter tolerance using a fiber Bragg grating based rectangular pulse switching technology", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 21, no. 11, pp. 2518-2523, Nov. 2003.
- [7] Acquiris Digitizers Inc., "DP240 DP235, technical specifications.," 2002.
- [8] Atmel Corporation, "TS8308500, ADC 8-bit 500 MSps," 2003.
- [9] Gage Applied Technologies Inc, "Compuscope 82G, technical specifications," 2003.
- [10] P.Z.Peebles Jr, *Probability, Random variables and Random Signal principles*, 4 ed 2001.
- [11] T.Stern and K.Bala, *Multiwavelength Optical Networks: A layered approach* Ed Addison Wesley, 1999.
- [12] M.Petersson, H.Sunnerud, M.Karlsson, and B.-E.Olsson, "Performance monitoring in optical networks using Stokes parameters," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 16, no. 2 Feb.2004.
- [13] L.Möller, P.Westbrook, S.Chandrasekhar, R.Dutta, and S.Wielandy, "SOP and PMD monitoring with DWDM polarimeter," *Electronics Letters*, vol. 38, no. 12 June 2002.

- [14] J.Mangeny, N.Stelmakh, A.Shen, J.M.Lourtioz, A.Alexandrou, J.-P.Likforman, C.Clerc, V.Thierry-Mieg, E.Lugagne-Delpon, and J.-L.Oudar, "Sub-picosecond wideband efficient saturable absorber created by high energy (200MeV) irradiation of Au⁺ ions into bulk GaAs," *IEE Electronics Letters*, vol. 34, no. 14, pp. 818-820, July 1998.
- [15] H.Kobayashi, R.Takahashim, Y.Matsuoka, and H.Iwamura, "1 Tbit/s demultiplexing using low temperature grown InGaAs/InAlAs multiple quantum wells," *IEE Electronics Letters*, vol. 34, no. 9, pp. 908-910, Apr.1998.
- [16] N.Chi, L.Oxenlowe, A.Siahlo, and P.Jeppesen, "All-optical fiber signal processing based on balanced NOLM and imbalanced NOLM," *Proceedings ECOC*, vol. 6.3.5 Sept.2002.
- [17] C.Schubert, S.Diez, J.Berger, R.Ludwig, U.Feiste, H.G.Weber, G.Toptchiyski, K.Petermann, and V.Krajinovic, "160-Gbit/s all-optical demultiplexing using a gain-transparent ultrafast-nonlinear interferometer (GTUNI)," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 13, no. 5, pp. 475-477, May2001.
- [18] M.Heid, S.L.Jansen, S.Spalter, E.Meissner, W.Vogt, and H.Melchior, "160-Gbit/s demultiplexing to base rates of 10 and 40 Gbit/s with a monolithically integrated SOA-Mach-Zehnder interferometer," *Proceedings ECOC*, vol. 8.4.3 Sept.2002.