

Arquitectura y prestaciones de un *router* de conmutación de paquetes ópticos para las futuras redes de Internet

Architecture and performance of optical packet switching router architecture for future Internet networks

*Gustavo Puerto Leguizamón**, *Beatriz Ortega*, *José Capmany*, *Carlos Suárez Fajardo*

Departamento de Comunicaciones, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera S/N 46020, Valencia, España.

(Recibido el 20 de febrero de 2009. Aceptado el 6 de abril de 2010)

Resumen

En este artículo se describe la arquitectura, funcionamiento y prestaciones de un prototipo de *router* de conmutación de paquetes ópticos con intercambio de etiqueta y con capacidad para procesar dos canales independientes. Además se describen los principales subsistemas usados en la arquitectura del *router* óptico de conmutación de paquetes en el cual se transportan 10Gb/s NRZ de carga de datos junto con 155Mb/s NRZ de etiqueta codificada en SCM sobre una subportadora de RF de 18GHz.

----- *Palabras clave:* conmutación de paquetes ópticos, conversión de longitud de onda, intercambio de etiquetas ópticas, GMPLS, IP sobre WDM

Abstract

This paper describes the architecture, operation and performance of an optical packet switching node prototype with 2 wavelength/channels and label swapping capabilities. Also, the main subsystems of the node to route and forward optical packets at 10 Gb/s NRZ based on the 155 Mb/s 18GHz-SCM encoded label are described.

----- *Keywords:* Optical packet switching, optical label swapping, wavelength conversion, GMPLS, IP over WDM

* Autor de correspondencia: teléfono: + 34 + 61 + 67 657 75, correo electrónico: gapuerto@dcom.upv.es (G. Puerto).

Introducción

La gran demanda de ancho de banda requerido hoy en día en las redes de telecomunicaciones debida al incremento exponencial del tráfico en Internet, ha generado el estudio y desarrollo de nuevas alternativas tecnológicas para las redes basadas en la transmisión de paquetes actuales, buscando adicionalmente disminuir significativamente el cuello de botella que se origina en el proceso de enrutamiento electrónico de dichos paquetes.

En los últimos años se ha propuesto el enrutamiento de paquetes en el dominio óptico como una alternativa tecnológica que está siendo centro de atención y de investigación, el principal exponente es el modelo conocido como AOLS, siglas de *All-Optical Label Swapping* o intercambio de etiquetas en el dominio óptico [1 - 4]. AOLS combina técnicas de ingeniería de tráfico de MPLS (*Multi-protocol Label Switching*) con técnicas de conmutación óptica de paquetes para hacer las funciones de enrutamiento y transmisión de paquetes IP en el dominio óptico. AOLS se basa en el principio de enviar simultáneamente la información de enrutamiento (etiqueta) junto con la carga (paquete IP) dentro del mismo canal óptico usando alguna de las técnicas de codificación actualmente disponibles tales como la codificación serial o en el dominio temporal [1], multiplexación por subportadora SCM (Sub-Carrier Multiplexing) [1-2], modulaciones ortogonales [3], etc. La codificación serial se basa en multiplexar la etiqueta óptica al inicio de cada paquete IP, con esta técnica es necesario usar un tiempo de guarda para separar la etiqueta óptica del propio paquete, este tiempo de guarda se usa con el fin de facilitar las posteriores tareas de recepción y extracción de etiquetas en cada nodo.

Por otro lado, en la multiplexación por subportadora la etiqueta en banda base primero se modulada en una subportadora de RF y luego se multiplexa con el paquete IP en la misma longitud de onda generando de esta forma un paquete óptico. Esta es una técnica que ofrece grandes ventajas en comparación con la anterior ya que permite la posterior separación de la etiqueta por medio de técnicas comunes de filtrado óptico y por otra par-

te esta técnica no necesita un sincronismo exacto entre cada paquete de datos y su correspondiente etiqueta, proceso que si es requerido en el caso de técnicas de multiplexación en serie y que se traduce en elevados costos de la electrónica necesaria para mantener completamente síncrono el sistema. No obstante, la técnica de etiquetado SCM puede generar efecto de supresión de portadora cuando las señales de carga y etiqueta SCM se transmiten a través de la fibra. Este efecto se mitiga en el prototipo presentado mediante técnicas de filtrado óptico en el proceso de extracción de etiqueta.

La figura 1 muestra el entorno de red en el que cada paquete se transmitirá a través de cada router óptico a lo largo de la red, cada router por lo tanto extraerá la etiqueta del paquete y en función de esta decidirá el puerto de salida y la longitud de onda por el que será transmitido dicho paquete, adicionalmente el router cambiará la etiqueta por una nueva que llevará la información de enrutamiento del siguiente router.

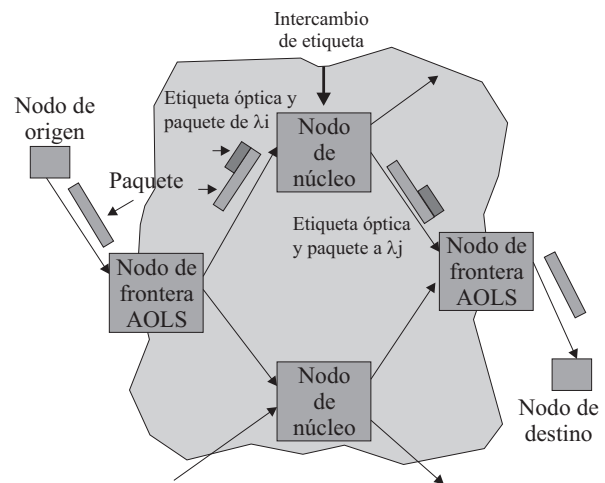


Figura 1 Entorno de red AOLS

Generación de paquetes ópticos SCM

La técnica de generación de paquetes ópticos usando multiplexación por subportadora SCM se puede lograr mediante técnicas de multiplexado eléctrico u óptico de la etiqueta y la carga. En la figura 2(a) se muestra el esquema para cada una de las dos técnicas. En el caso de multiplexación eléctrica, la carga se combina eléctricamente

con la etiqueta que esta modulada sobre una subportadora de radiofrecuencia a 18GHz. La señal RF resultante se aplica a un modulador electro-óptico (EOM), a la salida se obtiene un espectro en el cual la carga ha modulado la frecuencia central del láser y la modulación de doble banda lateral situará la etiqueta a 18GHz de la frecuencia central.

Sin embargo, la sencillez de esta técnica genera el inconveniente que el índice de modulación de la carga y la etiqueta compiten por utilizar todo el rango dinámico del modulador óptico, lo cual conlleva a que parte de la etiqueta module en banda base a la portadora óptica cuando el índice de modulación de la etiqueta es alto en comparación al índice de modulación de la carga. En el caso de multiplexación óptica la carga y la etiqueta se modulan independientemente sobre la misma portadora óptica empleando dos moduladores ópticos. El esquema y su correspondiente espectro se muestra en la figura 2(b), un filtro óptico basado en redes de difracción (FBG) en el brazo donde se modula la etiqueta contiene resonancias estrechas del orden de 25GHz a las longitudes de onda que están siendo transmitidas por el láser de manera que el FBG en transmisión permite la propagación de las etiquetas moduladas en doble banda lateral mientras al mismo tiempo suprime la portadora óptica. En reflexión el FBG debe reflejar completamente la portadora óptica modulada por la carga en el EOM 2.

Con esta técnica los índices de modulación tanto de la etiqueta como de la carga son completamente independientes el uno del otro evitando los problemas de sobremodulaciones como en el caso anterior. El proceso de combinación de la etiqueta y la carga se realiza en el circulador actuando como elemento multiplexor cuando toma la señal de etiqueta transmitida a través del FBG y la carga que es reflejada por el mismo FBG pero en dirección opuesta. En la salida de los generadores las contribuciones de las dos modulaciones generan un espectro similar al del caso anterior, con la diferencia que en este caso pueden ajustarse independientemente los dos índices de modulación.

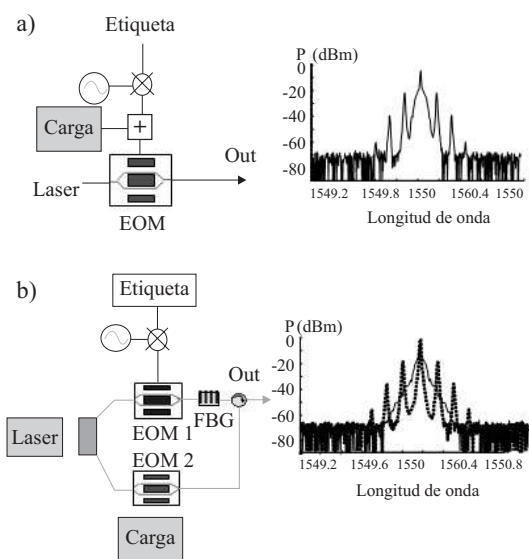


Figura 2 Esquemas para la generación de paquetes ópticos SCM. a) Multiplexación eléctrica. b)

Router óptico de conmutación de paquetes

El diagrama de bloques general del *router* óptico de conmutación de paquetes se representa en la figura 3, el diagrama se muestra como cajas negras que definen el respectivo procesamiento de las señales dentro del *router*, dicho procesamiento en conjunto permite realizar conmutación de paquetes ópticos con intercambio de etiqueta. Para ello el *router* incluye funciones tales como las de extracción de etiqueta en la cual esta se separa de la carga útil de datos y posteriormente es enviada al control lógico del sistema quien ejecuta las funciones apropiadas para un enrutamiento correcto. Una etapa de búfer o almacenamiento óptico es necesaria para la sincronización de la carga de datos a fin de igualar el tiempo del procesamiento de la etiqueta dentro del módulo de control, debido a que tecnológicamente hoy en día no se dispone de memorias ópticas de acceso aleatorio este buffer se realiza por medio de líneas de retardo de fibra. La etapa de conversión de longitud de onda y re-escritura de etiqueta desempeña las funciones de intercambio de etiqueta y regeneración de la señal dentro del nodo por medio de circuitos regeneradores 2R (regeneración de la forma del bit sin corrección

temporal de bit) basados en modulación de ganancia cruzada (XGM) y modulación de fase cruzada (XPM) respectivamente, implementados con amplificadores de semiconductor (SOA), finalmente la etapa de enrutamiento dirige cada paquete a su destino correcto de acuerdo con las decisiones de enrutamiento y asignaciones de longitud de onda tomadas en el bloque de control. A continuación se describirá con más detalle cada uno de los bloques que conforman el *router*.

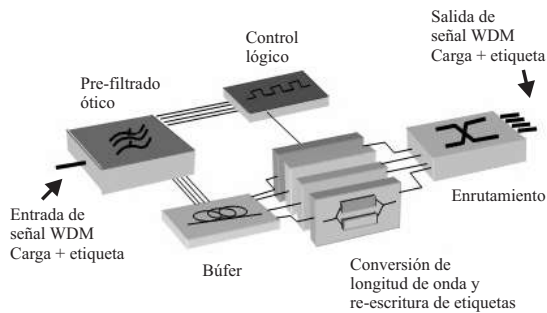


Figura 3 Diagrama de bloques del nodo de conmutación de paquetes

La figura 4 muestra un esquema completo del modelo propuesto en este artículo, incluyendo los cuatro bloques básicos que lo componen. La arquitectura destaca un esquema de re-escritura de etiquetas basada en una configuración de doble brazo similar a la presentada en la sección de generación de paquetes ópticos. Con esta configuración se logra una independencia completa de los índices de modulación de la carga y etiqueta derivándose en la particularidad de poder utilizar todo el margen dinámico en el proceso de remodulación y de esta forma mejorar la calidad de las señales transmitidas desde el *router*.

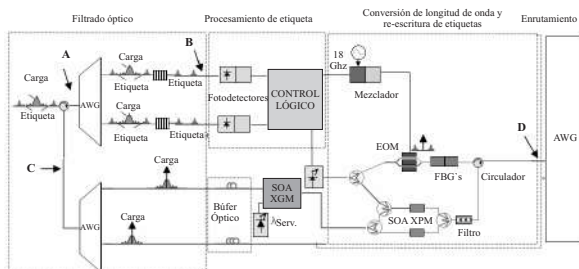


Figura 4 Router de conmutación de paquetes ópticos

Módulo de filtrado óptico

Este módulo realiza una tarea esencial en la implementación de un *router* de intercambio de etiqueta multiplexada en subportadora SCM. Su principal función consiste en extraer de la señal compuesta (carga y etiqueta SCM) la información relevante de enrutamiento transportada por la etiqueta en la subportadora y conducirla al subsistema electrónico que realiza la lectura y procesamiento de la etiqueta para las funciones de enrutamiento de la carga de datos. La extracción de la señal se realiza sin ninguna conversión de la carga útil de datos al dominio eléctrico. Para tal implementación se propone el empleo de la combinación de filtro AWG (Arrayed Waveguide Grating) empleado como demultiplexor WDM y un tándem de FBG's que están sintonizadas a la frecuencia central de los canales entrantes al nodo, de este modo las reflexiones de las portadoras ópticas que transportan la carga de datos provenientes del conjunto de FBG's se multiplexan de nuevo y se dirigen hacia un segundo AWG por medio del circulador óptico donde la carga será demultiplexada de nuevo a fin de obtener los canales WDM independientes para su posterior procesamiento. En transmisión los FBG's permitirán el paso de la etiqueta modulada en doble banda lateral la cual será procesada por el módulo de control, de esta forma se logra la separación óptica de la carga y la etiqueta [5, 6].

Módulo de control lógico

El módulo de control lógico contiene dos partes bien definidas, la primera referida al circuito de recepción de etiqueta y la segunda está relacionada con su procesamiento. El circuito receptor usa un fotodiodo PIN para detectar la señal que es entregada por el módulo de filtrado óptico. El procesamiento de la etiqueta se realiza en un dispositivo electrónico basado en FPGA (Field Programmable Gate Array) el cual lee la información contenida en los 112 bits de longitud de la etiqueta, la compara con la tabla interna de enrutamiento y genera una nueva etiqueta que llevará la información de enrutamiento para el siguiente *router* en la red, además define la nueva

longitud de onda de salida que determinará el puerto de salida del nodo, para lograr esta última función el módulo controla el láser sintonizable que genera dicha longitud de onda. El módulo de control también permite monitorear el número de paquetes que han sido procesados por el *router*, permitiendo de esta forma determinar el porcentaje de paquetes recibidos y enviados correctamente.

Las principales funciones de este módulo ubicado en el nodo son las de controlar y administrar las operaciones necesarias para que el nodo dirija de forma correcta los paquetes de entrada a una salida correspondiente. Estas funciones están basadas en la información contenida en la etiqueta.

Módulo de re-escritura y conversión de longitud de onda

En lo que concierne al proceso de conversión de longitud de onda, se usa una primera etapa de conversión mediante un amplificador de semiconductor basado en modulación de ganancia cruzada (SOA-XGM) a fin de convertir la señal entrante a una longitud de onda interna de servicio. Con esto se dará una mayor flexibilidad al funcionamiento interno del nodo ya que en general permite la asignación de cualquier longitud de onda de entrada a cualquier longitud de onda de salida. Es decir, en caso que el protocolo de enrutamiento determine que la longitud de onda de salida sea igual a la longitud de onda de entrada, esta será convertida a una longitud de onda de servicio para luego ser convertida nuevamente a la longitud de onda original en la segunda etapa de conversión de longitud de onda que usa un esquema de conversión basado en modulación de fase cruzada (SOA-XPM) [7, 8]. El láser sintonizable que alimenta el conversor en XPM es controlado por el módulo de control basado en FPGA la cual establecerá la longitud de onda de acuerdo con lo dictaminado por la tabla de enrutamiento. Un conjunto de FBG's transmitirán solamente la nueva etiqueta generada por el módulo de control y que ya ha sido modulada en la subportadora de 18GHz.

El uso de un filtro con frecuencia central en la longitud de onda de servicio a la salida del conversor XPM permitirá transmitir solamente la carga de datos en la nueva longitud de onda, el proceso de combinación de ambas señales es similar al usado en la técnica de generación usando multiplexación óptica explicado en la sección 2, en donde la carga y la etiqueta se combinan mediante el FBG que permite el paso de la etiqueta y por otro lado refleja la señal de carga proveniente del circulador completando de esta forma el proceso completo de regeneración de la carga con re-escritura de etiqueta. Nótese que se necesitan tantos módulos de conversión de longitud de onda y re-escritura como canales soporte para el sistema.

Módulo de enrutamiento

Un AWG (Arrayed Waveguide Grating) es un dispositivo óptico pasivo con una o más entradas y con múltiples salidas el cual distribuye las longitudes de onda por los distintos puertos de salida dependiendo del puerto de entrada y del valor de la longitud de onda presente en ese puerto. De esta forma se consigue el enrutamiento por longitud de onda. El módulo de enrutamiento del nodo emplea este dispositivo como etapa final, en la que los distintos paquetes se transmitirán por distintos puertos de salida del *router* dependiendo de su longitud de onda. Teniendo en cuenta estas características y sabiendo que la etiqueta de entrada tiene la información de enrutamiento, una vez la FPGA procesa esta información el láser sintonizable transmitirá a la longitud de onda correcta a fin de alimentar el sistema de conversión de longitud de onda, por lo tanto la longitud de onda establecida por el láser sintonizable es la información de enrutamiento que el AWG usara para dirigir la información al puerto apropiado de salida.

Resultados

En esta sección se describirán las principales prestaciones de la integración de los subsistemas del *router* definidos anteriormente, evaluando la

calidad de la señal procesada en varios puntos de control dentro del *router*. La figura 4 muestra el esquema completo del prototipo ensamblado en el laboratorio y la figura 5 muestra unas fotografías del montaje experimental de *router*, en ellas se pueden apreciar los bloques que se han definido en la sección 3.

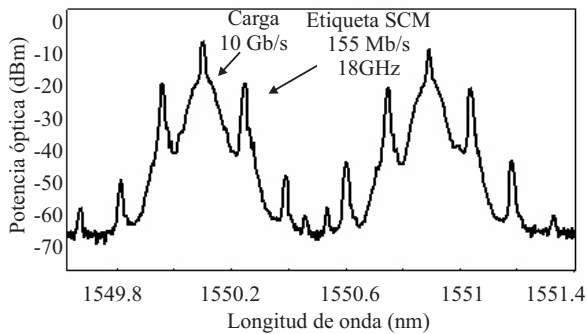


Figura 5 Montaje experimental de los bloques que conforman el *router* de conmutación de paquetes

El prototipo ensamblado puede procesar dos canales simultáneamente, en la figura 6 se muestra el espectro correspondiente a los dos canales de entrada al *router*, los canales están localizados en 1550.1nm y 1550.9nm respectivamente y fueron medidos en el punto A de la figura 4. El espectro contiene la etiqueta codificada SCM en una subportadora a 18 GHz en cada uno de los canales de 10Gb/s. La selección de los canales se deriva de las características de los demultiplexores y multiplexores incorporados en el nodo los cuales tienen un espaciado de canal de 0.8 nm. En esquemas de multiplexación densa, por ejemplo a 0,4 nm (50 GHz), en cuanto a la generación y transmisión no hay ninguna limitación ya espectralmente el paquete ocupa aproximadamente 36 GHz pero si podría presentarse diafonía principalmente en las subportadoras debido a la cercanía de las bandas adyacentes. En este caso la calidad de la señal estaría supeditada a las características de filtrado de los demultiplexores.

La figura 7 muestra la superposición de las señales de etiqueta y carga de ambos canales medidos en el punto B y C de la figura 4 respectivamente. La

traza punteada corresponde a la etiqueta filtrada y lista para ser enviada al sistema de control. Nótese la fuerte supresión de la portadora causada por las excelentes prestaciones de la red de difracción la cual suprime la portadora óptica aproximadamente 50 dB [9]. La traza continua representa las señales de carga de los dos canales en sus respectivas portadoras ópticas que serán enviadas a las etapas de conversión de longitud de onda.

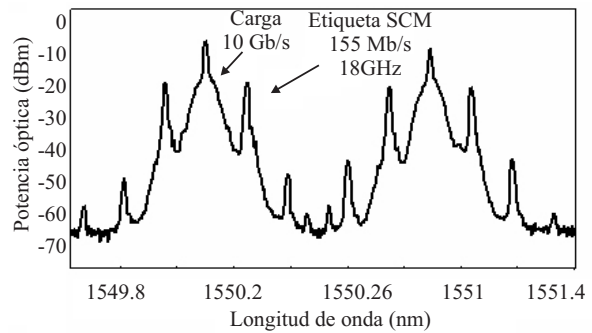


Figura 6 Espectros ópticos correspondientes a los dos canales de entrada al *router*

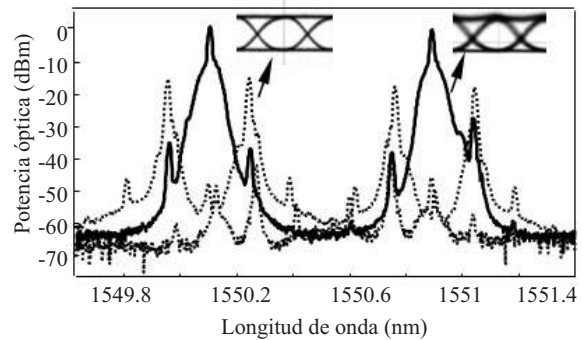


Figura 7 Superposición de las señales de carga y etiqueta filtradas de ambos canales

Asimismo la calidad de las señales filtradas se comprueba mediante el diagrama de ojos de cada una de las señales en el cual se puede observar una señal limpia con un factor de calidad $Q = 16$ para la etiqueta y $Q = 10$ para la carga. La calidad de las señales se debe a las características de la etapa de filtrado óptico, nótese la fuerte supresión de la portadora (46 dB) en la traza de la etiqueta de ambos canales con respecto a la traza que representa la portadora óptica, dicha supresión

se debe al efecto combinado del tándem de dos redes de difracción. Esta fuerte supresión asegura un procesado de etiqueta limpio en el cual la señal remanente de carga es extremadamente débil. Por otro lado, la etiqueta se suprime alrededor de 25 dB en la señal reflejada de la carga debido a la fuerte pendiente que presenta la primera red de difracción, de esta forma se asegura un bajo efecto de diafonía de la etiqueta sobre la carga.

La figura 8 muestra las etiquetas a 155Mb/s que han sido detectadas y procesadas en el módulo de control lógico, las etiquetas tienen una duración de 722ns correspondientes a 112 bits que se reparten en 64 bits para la recuperación de reloj, 16 bits de palabra única y 32 bits con la información de enrutamiento, la traza superior representa las etiquetas recibidas y la traza inferior las nuevas etiquetas generadas, el retardo entre las dos trazas es de 1.4µs correspondientes al tiempo de procesado del módulo de control.

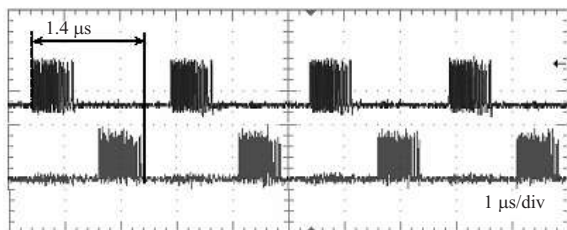


Figura 8 Etiquetas recibidas (traza superior) y nuevas etiquetas generadas (traza inferior)

La figura 9 muestra los espectros de los dos canales regenerados tras las dos etapas de conversión de longitud de onda y con la etiqueta SCM re-escrita, en este caso la carga que estaba originalmente en 1550.9 ha sido convertida a 1550,1, la calidad de la señal muestra un diagrama de ojos con $Q = 7$. Es importante destacar que la etapa de conversión en XGM además de convertir la señal a una longitud de onda fija, suprime el residuo de etiqueta presente en la señal de carga debido al efecto paso bajo del proceso de conversión, debido a esta característica se observa que el residuo de etiqueta proveniente del bloque de filtrado óptico antes del conversor XGM está aproximadamente 4 dB por debajo del nivel de la señal de carga,

después del conversor la diferencia de los dos niveles de señal es de 9 dB.

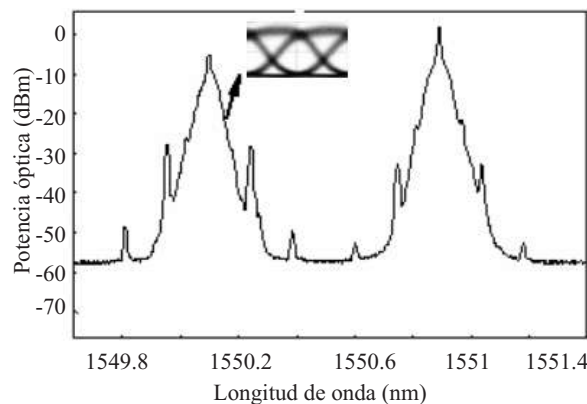


Figura 9 Espectros de los dos canales después de las etapas de conversión de longitud de onda

Una gran variedad de experimentos se han hecho convirtiendo la señal original a diferentes longitudes de onda, para retornarlas luego a la misma longitud de onda original mostrando resultados similares.

Asimismo el prototipo de *router* óptico propuesto ha demostrado sus excelentes prestaciones en lo que al enrutamiento de paquetes ópticos concierne, la figura 10(a) muestra los paquetes de entrada al nodo, la traza superior representa la etiqueta y la inferior la carga útil, nótese que las dos señales están alineadas, es decir el primer bit de cada una de las dos señales se ha transmitido desde el generador de paquetes en el mismo instante de tiempo.

Las figuras 10(b) y 10(c) muestran respectivamente las señales presentes en dos puertos distintos de salida del *router*, como se puede apreciar, ambas salidas son complementarias, para este experimento las etiquetas de entrada han sido establecidas de tal forma que dos paquetes consecutivos saldrán por el puerto 1 y los siguientes dos paquetes por el puerto 2 y así sucesivamente, por consiguiente los paquetes que salen por el puerto 1 tienen una longitud de onda diferente a los que salen por el puerto 2. Específicamente para este ejemplo, por el puerto 1 salen los paquetes con longitud de onda de 1550,9 nm y por el puerto 2 los paquetes a 1550,1 nm.

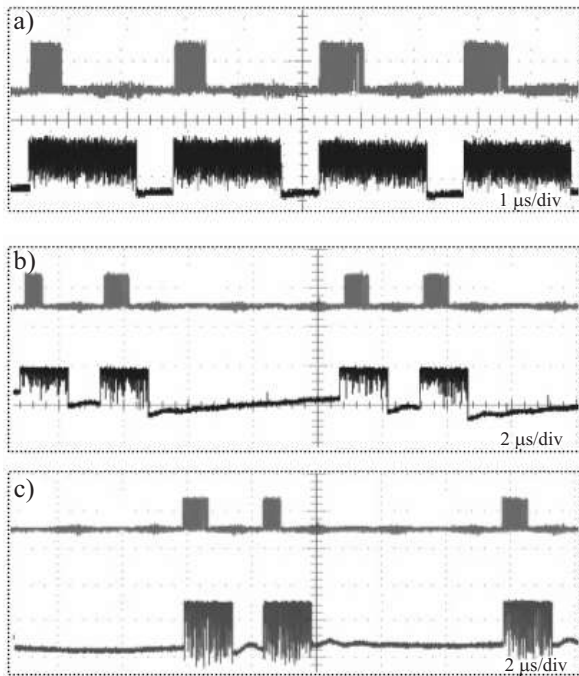


Figura 10 Enrutamiento de paquetes ópticos. a) Paquetes en la entrada al nodo. b) y c) paquetes a la salida del *router* capturados en dos puertos distintos de salida

La figura 11 muestra las medidas de BER realizadas sobre la carga, se observa que el *router* en general ofrece excelentes prestaciones llegando a tasas de error de 10^{-12} para una potencia recibida de $-9,5\text{dBm}$. De igual forma se ha comprobado el comportamiento en cascada del *router* a fin de simular su comportamiento en redes AOLS, para ello se ha implementado una configuración de realimentación que permite analizar la señal de carga cuando ha hecho 1, 3, 7 y 16 pasos a través del nodo, la figura 12 muestra los resultados con una penalización de 1dB para una tasa de error de 10^{-12} y de 2dB para una tasa de error de 10^{-9} . Las medidas de BER mostradas en las gráficas 11 y 12 corresponden a un solo canal óptico. En las medidas realizadas sobre el otro canal se observaron penalizaciones ligeramente mayores (1,3dB para 10^{-12} y 2,2dB para 10^{-9}) causadas principalmente por la diferencia en el punto de trabajo de las etapas de conversión de longitud de onda de dicho canal. En general, las penalizaciones vienen dadas por el ruido

característico de las etapas de regeneración como XGM, además del *jitter* generado por las dos etapas de conversión de longitud de onda y acumulado en cada uno de los pasos de la señal a través del nodo.

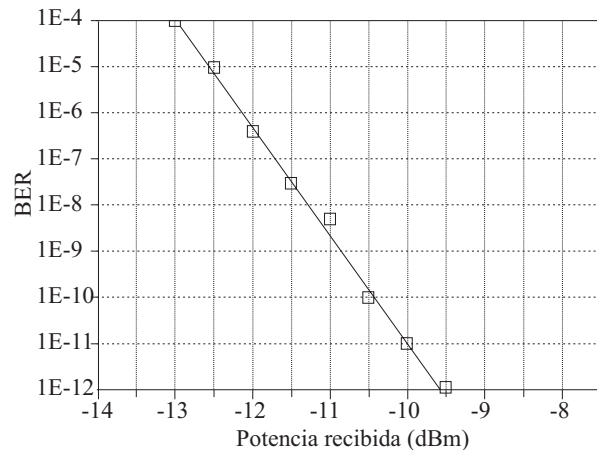


Figura 11 Valores de BER de la carga a 10 Gb/s para distintas potencias recibidas en el *router*

Conclusiones

Se ha descrito el funcionamiento del *router* de conmutación de paquetes que transporta datos ópticos a 10Gb/s con capacidades de intercambio de etiqueta de 155Mb/s y se han demostrado sus prestaciones mediante medidas de calidad de señal en varios puntos de control dentro del *router*, en los cuales se ha comprobado la correcta operación en términos de la separación de la carga y la etiqueta mediante filtrado óptico, el cual presenta un comportamiento adecuado al no imponer penalizaciones significativas sobre las dos señales, la detección de la etiqueta y su correspondiente procesamiento eléctrico se realiza en $1,4\ \mu\text{s}$, tiempo dentro del cual la información de enrutamiento se analiza, se genera la etiqueta de salida y se actualiza el estado de *router* en términos de longitudes de onda y puertos de salida, las etapas de conversión de longitud de onda realizan regeneración 2R sobre cada paquete transmitido a 10Gb/s, el uso de las dos etapas de conversión en cascada permite la asignación de cualquier longitud de onda de salida.

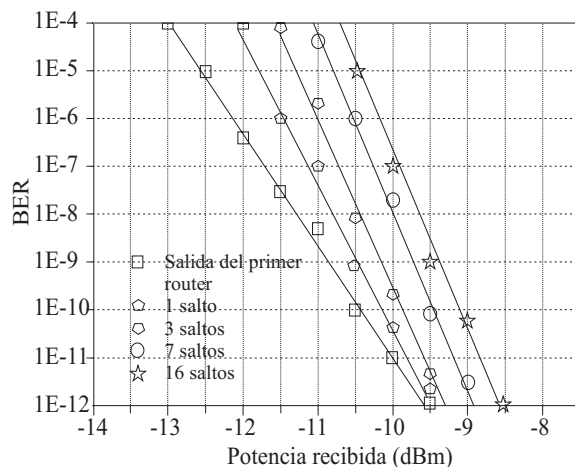


Figura 12 Resultados con una penalización de 1dB para una tasa de error de 10^{-12} y de 2dB para una tasa de error de 10^{-9}

Asimismo el *router* ha trabajado independientemente con dos canales ofreciendo las mismas prestaciones a cada uno por separado. Por otro lado se ha simulado el comportamiento del *router* en un entorno de red midiendo la degradación que sufre la señal de carga cuando ha pasado por el *router* varias veces, los resultados muestran una baja penalización medida hasta 16 saltos, mostrando de esta forma la viabilidad del concepto propuesto para redes WDM.

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado con la financiación de los proyectos: IST-2001-37435 (LABELS) y TEC 2005-08298-C02-01 ADIRA. Gustavo Puerto agradece a la Generalitat Valenciana por la subvención recibida del programa de becas de formación de personal investigador.

Referencias

1. M. Yong, Z. Pan, J. Cao, Y. Bansal, J. Taylor, Z. Wang, V. Akella, K. Okamoto, S. Kamei, J. Pan, S. J. B Yoo. "Demonstration of All-Optical Packet

Switching Routers with Optical Label Swapping and 2R Regeneration for scalable Optical Label Switching Network Operation". *Journal of Lightwave Technologies*. Vol. 21. 2003. pp. 2723-2733.

2. Z. Zhu, V. J. Hernández, M. Y. Jeon, J. Cao, Z. Pan, S. J. B. Yoo. "RF photonics signal processing in subcarrier multiplexed optical-label switching communication systems". *Journal of Lightwave Technologies*. Vol. 21. 2003. pp. 3155-3166.
3. T. Koonen, S.Sulur, I. Monroy, J de Waart. "Optical labeling of packets in IP-over-WDM network". *Proc. ECOC 2002. 5.5.2. Copenhagen (Denmark)*. 2002. pp. 689-690.
4. S. J. B. Yoo, H. Lee, Z. Pan, J. Cao, Y. Zhang, K. Okamoto, S. Kamei. "Rapidly Switching All-Optical Packet Routing System with Optical-Label Swapping Incorporating Tunable Wavelength Conversion and a Uniform-Loss Cyclic Frequency AWGR". *IEEE Photonic Technology Letters*. Vol. 14. 2002. pp. 1211-1213.
5. H. Lee, S. J. B Yoo, V. Tsui, S.K.H. Fong. "A Simple All-Optical Label Detection and Swapping Technique Incorporating a Fiber Bragg Grating Filter". *Photonic Technology Letters*. Vol. 13. 2001. pp. 635-637.
6. H. J. Lee, V. Hernández, V. Tsui, S. J. B. Yoo. "Simple, polarisation-independent, and dispersion-insensitive SCM signal extraction technique for optical switching systems applications". *Electronic Letters*. Vol. 37. 2001. pp. 1240-1241.
7. S. J. B. Yoo. "Wavelength Conversion Technologies for WDM Network Applications". *Journal of Lightwave Technologies*. Vol. 14. 1996. pp. 955-966.
8. T. Durhuus, B. Mikkelsen, C. Joergensen, S. L. Danielsen, K. Stubkjaer. "All-Optical, Wavelength Conversion by Semiconductor Optical Amplifiers". *Journal of Lightwave Technologies*. Vol.14. 1996. pp. 941-954.
9. A. Martinez, G. Puerto, D. Pastor, J. Capmany, B. Ortega, M. Popov, P.Y. Fonjallaz, L. Pierno, M. Varasi, T. Banky, T. Bercei. "Parallel label generation and rewriting configuration for 10 Gb/s/channel DWDM label swapping using FBG arrays". *Proc. IEEE LEOS*. 2004. paper ThM2. pp. 847-848.