

Conmutación de paquetes en el dominio óptico

César Augusto Castaño Salazar

cesar.castano@upb.edu.co

Especialista en Telecomunicaciones

Ferney Amaya-Fernández

ferney.amaya@upb.edu.co, Docente

Universidad Pontificia Bolivariana

Medellín - Colombia

Resumen

La conmutación de paquetes en el dominio óptico es una importante técnica que solucionaría los problemas de velocidad en las redes de alta velocidad a la hora de tomar decisiones de enrutamiento y conmutación. Este artículo presenta una revisión del estado del arte de las diferentes técnicas que permiten la inserción y el intercambio de etiquetas ópticas, así como los métodos de enrutamiento completamente ópticos.

Abstract

The optical switching in the optical domain is a technique that allows to increase the data bit rate, and to simplify the switching in the optical layer. In this paper, we present a review of the state of the art in switching using optical labels.

Palabras Clave—Conmutación óptica, etiquetas ópticas, OPS. Intercambio de etiquetas óptico, Internet óptica.

I. Introducción

El término OLS (*Optical Label Switching*) fue introducido por primera vez cuando DARPA (acrónimo en inglés de Agencia de Investigación de Proyectos Avanzados de Defensa) lo propuso y patentó [1], para describir la tecnología de Internet de nueva generación IP-sobre-WDM que posteriormente se denominó OLS.

OLS puede ser visto como una implementación particular de OPS (*Optical Packet Switching*), en el que solo la cabecera del paquete es procesada electrónicamente con propósitos de enrutamiento, mientras que la carga útil permanece en el dominio óptico. La cabecera contiene una etiqueta óptica que es utilizada por el dispositivo de conmutación óptico para determinar por cuál puerto de salida debe ser enviada la carga útil. Sólo la cabecera es procesada en el dominio eléctrico y la carga útil es conmutada en dicho dominio.

La etiqueta puede ser diferenciada de la carga útil de varias maneras, ya sea empleando diversidad en el tiempo, o empleando una subportadora. En esta última técnica, la etiqueta se inserta en una longitud de onda diferente o empleando formato de modulación distinto al de la carga útil. En general, la etiqueta es codificada a una tasa de bits más baja comparada con la carga útil para simplificar la conversión EO (electro óptica) durante el proceso de extracción y reescritura [2].

Mientras que OLS fue diseñado independientemente de MPLS (*Multi Protocol Label Swapping*) y MPS (*Multi Protocol Lambda Swapping*), su interoperabilidad con estos protocolos implica flexibilidad en la planeación, operación y actualización de la red. Esta interoperabilidad es facilitada por GMPLS (*Generic Multi Protocol Label Swapping*) realizando una extensión al protocolo MPLS, la cual consiste en emplear específicamente OLS proporcionando interoperabilidad entre OCS (*Optical Circuit-Switched*), OBS (*Optical Burst Switching*) y OPS (*Optical Packet Switching*), en el manejo de paquetes y de ráfagas en la capa óptica. Con el uso de OLS para conmutar el tráfico a través de GMPLS, se logra la interoperabilidad con protocolos como IP, MPLS y MPS. OLS es independiente del protocolo de la capa superior, facilitando el transporte de cualquier tipo de tráfico de forma transparente. La tecnología OLS ha tenido grandes progresos desde su surgimiento, en este caso, se han realizado demostraciones con enrutadores OLS totalmente ópticos y se ha realizado la primera prueba de campo de la tecnología OLS [3]. OLS es usado en muchos contextos diferentes como en OPS para el almacenamiento y envío usando etiquetas ópticas o como en OBS para la señalización, como por ejemplo el esquema de señalización JET (*Just Enough Time*), en donde se envía una etiqueta óptica para establecer la ruta y posteriormente se envía la información en la carga útil. La conmutación basada en etiquetas ópticas evita la complejidad de la conversión óptico-eléctrica y eléctrico-óptica, facilitando la conmutación óptica a altas tasas de bits [4].

El intercambio de etiquetas en el dominio totalmente óptico (All OLS, AOLS), implementa las funciones de enrutamiento paquete a paquete y direccionamiento de MPLS directamente en la capa óptica [5]. Esta característica de enrutamiento hace de AOLS una técnica muy deseable para redes de ultra baja latencia y alta velocidad. Este artículo presenta la técnica OLS, mencionando sus ventajas para afrontar las crecientes necesidades de las redes actuales que demandan cada vez una mayor tasa de transferencia de datos. Se presentan, además, los retos que presenta la tecnología y cómo han sido superados, con el propósito de llegar a desarrollar redes completamente ópticas.

El artículo está organizado de la siguiente forma. La sección II presenta las tecnologías MPLS y MPS y su relación con AOLS. En la sección III se discute cómo funciona una red que utiliza la conmutación de etiquetas ópticas y cómo, desde el punto de vista funcional, se encuentra formada, y los componentes que interactúan en su interior. En la sección IV se describe la técnica de multiplexación de subportadora, la cual permite ingresar la etiqueta óptica a la carga útil por medio de una subportadora en la señal transmitida. La sección V muestra una mejora realizada a la técnica de multiplexación que permite subsanar los errores que se presentan por interferencia. La sección VI resume la funcionalidad del intercambio óptico de paquetes y muestra las ventajas y desventajas de las diferentes técnicas disponibles para la generación y extracción de etiquetas. La sección VII presenta cómo se construye un enrutador óptico que utiliza etiquetado para tomar decisiones de enrutamiento y define las características que se deben cumplir para su óptimo desempeño en las redes basadas en etiquetas. La sección VIII describe el funcionamiento de una red OLS de forma detallada y describe cómo estos componentes trabajan para llevar los datos de extremo a extremo en la red. Por último, la sección IX describe brevemente las modulaciones utilizadas en las redes OLS y cómo es el comportamiento de cada una de ellas y las ventajas y desventajas de las mismas a la hora de afrontar los problemas detectados.

II. MPLS Y MPλs y su relación con OLS

La red MPLS es utilizada para transportar distintos tipos de tráfico, incluyendo el proveniente de redes de conmutación de circuitos y el tráfico basado en IP que vienen de redes de conmutación de paquetes. La red MPLS brinda la posibilidad de unir diferentes tipos de tráfico en una única red de transporte. AOLS implementa las funciones de enrutamiento y conmutación de paquetes MPLS directamente en la capa óptica. Las redes ópticas futuras deberán ser capaces de realizar enrutamiento en el dominio óptico, independiente de la longitud del paquete IP y de la tasa de datos de la carga útil, esto debido a que dichas redes deben transportar multiplicidad de protocolos y su naturaleza puede ser muy diversa. Si el transporte de estos datos es transparente al protocolo y a la tasa de bits, pueden lograrse altísimas velocidades que permitan transportar enormes cantidades de información de forma más eficiente.

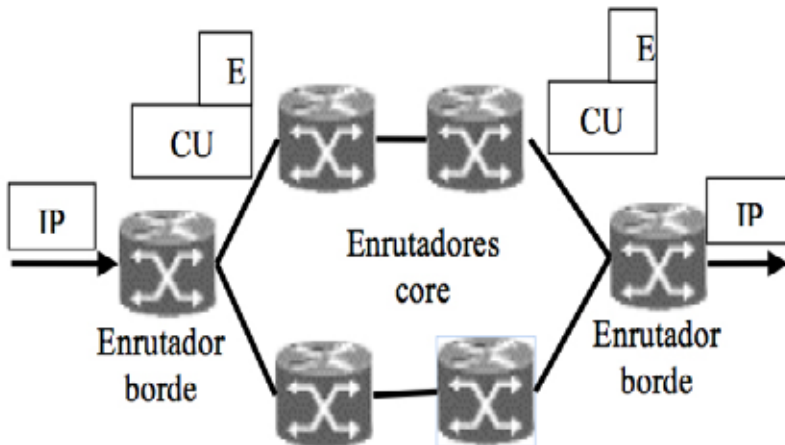
Mientras MPLS trabaja en el dominio eléctrico, OPS es una extensión de MPLS, que permite la utilización de varias longitudes de onda para realizar el enrutamiento y la conmutación. A diferencia de MPLS, su propósito principal es realizar conmutación directamente en la capa óptica sin limitarse a que el dominio sea eléctrico. Esto sería complementario a lo que realiza AOLS en la capa óptica pudiendo tener interoperabilidad con datos y protocolos de todo tipo.

III. Arquitectura de una red OLS

Una red OLS se compone de un conjunto de OLSR (*Optical Label Switch Router*) que pueden ser de núcleo o de borde, dependiendo de su ubicación en la red (ver Figura 1). Los enrutadores de borde añaden o eliminan la etiqueta óptica, dependiendo de si el paquete ingresa o sale de la red OLS. Los enrutadores de núcleo realizan conmutación basados en la etiqueta óptica.

Cada OLSR de núcleo procesa la etiqueta óptica, revisa la tabla de enrutamiento, y toma los pasos necesarios para enviar los paquetes a través de su plano de enrutamiento. Un OLSR puede realizar esta tarea en un tiempo promedio de 250 ns [6].

Fig. 1. Arquitectura básica de una red OLS [5].



Cuando dos o más paquetes compiten por la misma longitud de onda de salida en el mismo instante de tiempo, el OSLR tiene dos opciones: 1) resolución de la contención en la dimensión temporal, en la cual el paquete es almacenado para su posterior transmisión y por lo tanto retardado, 2) resolución de contención en la dimensión espacial: el OSLR busca una ruta alterna y asigna otra longitud de onda al paquete. Esta resolución de contención en las dimensiones del tiempo y espacio es una característica fundamental para la implementación de enrutadores ópticos que no requieren de grandes búferes de almacenamiento, lo cual es una funcionalidad de los enrutadores electrónicos convencionales. Esta alternativa de resolución de contención brinda una efectiva solución para soportar paquetes de longitud variable que llegan asincrónicamente.

La tecnología OLS provee una plataforma multiservicio para el soporte de tráfico de circuitos, de paquetes y en ráfagas. En particular, OLS y OBS [7] son técnicas complementarias en el sentido de que rutas de conmutación de etiquetas basadas en OLS pueden ser establecidas para alcanzar capacidades de OBS. Una etiqueta óptica bien definida es agregada a una ráfaga óptica al ingresar a una red OLS, y posteriormente la ráfaga óptica es conmutada a través del LSP (*Label Switch Path*) establecido en el contenido de la etiqueta óptica. En este esquema, el mejor beneficio de OLS es facilitar procesamiento óptico e ingeniería de tráfico como en GMPLS [8].

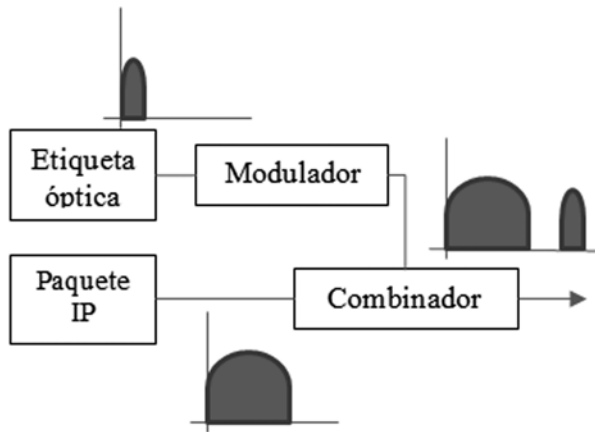
IV. Multiplexación de subportadora

La capacidad de intercambio de etiquetas ópticas es críticamente dependiente del método empleado para agregar la etiqueta óptica en el paquete.

La multiplexación de subportadora óptica (SCM) [9]-[10] es un esquema atractivo de codificación de etiquetas por su simplicidad. Esta técnica transporta tanto la etiqueta como la carga útil en la misma longitud de onda óptica, la carga útil se transporta en banda base mientras que incluye la etiqueta como una subportadora [11] – [13]. Comparado con las técnicas de codificación de etiquetas serial y en el dominio del tiempo [13], en el que la etiqueta se inserta antes de la carga útil, la técnica SCM facilita el intercambio de etiquetas debido a que la etiqueta y la carga útil están separadas en frecuencia, facilitando la identificación y separación.

El sistema de intercambio de etiquetas usa SCM para combinar la carga útil de datos con la cabecera que contiene la etiqueta y la información de enrutamiento (ver Figura 2).

Fig. 2. Sistema de transmisión en OLS empleando SCM [14].



La señal combinada muestra una representación análoga de un paquete de datos a la red, el cual puede ser enrutado por los nodos de conmutación. Los nodos de conmutación inspeccionan la cabecera y cambian el estado de un conmutador óptico justo antes a la llegada del paquete. Dado que la cabecera y el paquete son coincidentes en el tiempo, esta funcionalidad se realiza colocando un separador óptico a la entrada del nodo de conmutación y removiendo aproximadamente el 10% de la potencia para el análisis de la cabecera. Esta señal es enviada a un conversor óptico-eléctrico y luego es pasada por un filtro *pasa alto* para remover el paquete y dejar sólo la cabecera, la cual queda en el rango de frecuencia de microondas. Esta señal se lleva a banda base empleando un oscilador local sincronizado a la frecuencia de la portadora, recuperando posteriormente la señal de la cabecera.

El otro 90% de la potencia de la señal es lanzado en un pequeño cilindro óptico de fibra que demora el paquete hasta que la etiqueta es analizada y la conmutación establecida. El paquete puede entonces salir de la línea de espera y viajar desde el conmutador óptico hacia el siguiente enlace de transmisión de fibra.

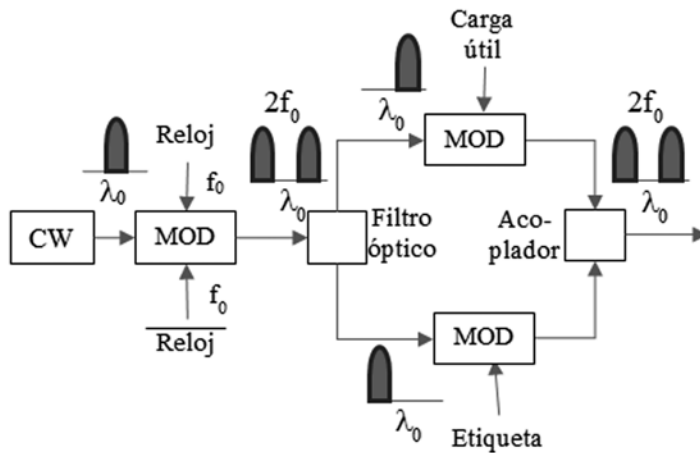
La técnica anterior es empleada experimentalmente en Fiber Channel [14] donde se emplean 10 bytes para identificar la etiqueta, que es empleada para realizar una búsqueda rápida en una tabla que permite la conmutación del paquete. El circuito lógico de cabecera también procesa información de prioridad llevada en la cabecera, para que un paquete de alta prioridad pueda interrumpir un paquete de baja prioridad que está utilizando el puerto de salida deseado. Cada cabecera de paquete también contiene un campo de duración que le informa al circuito lógico de cabecera por cuánto tiempo el paquete usará el conmutador. El circuito lógico de cabecera entonces envía una señal a un circuito de control de conmutación que ubica y mantiene el conmutador óptico por la duración requerida.

La línea de demora óptica debe tener suficiente longitud para retardar el paquete lo suficiente para completar todo el proceso de conmutación. Es importante que los retardos sean determinísticos y controlados para que el tiempo de retardo en la fibra pueda ser calculado [14].

V. Supresión y separación de portadora óptica (OCSS)

En OCSS (*Optical Carrier Suppression and Separation*) la separación entre la carga útil y la etiqueta es siempre igual al doble de la frecuencia de reloj de los bits. El diagrama del transmisor se presenta en la Figura 3.

Fig. 3. Composición de señal para supresión y separación de portadora óptica [35].



Inicialmente se genera la señal portadora de frecuencia f , con la cual se generan dos imágenes del espectro alrededor de la portadora, separados $2f$. Esto se logra empleando un modulador de dos brazos (LN-MOD) que recibe la portadora, la señal de reloj y la señal de reloj invertida, tal como se observa en la figura. La imagen superior del espectro se modula con la carga útil y la imagen inferior del espectro se modula con la etiqueta.

La técnica OCSS tiene varias ventajas. Primero, los anchos de banda de todas las señales RF, componentes eléctricos y ópticos usados son menores que la tasa de bits de la carga útil. Una desventaja de la multiplexación de etiquetas de subportadora SCM (mostrada en el capítulo anterior) es el uso de señales RF de alta frecuencia [14]-[15]. Segundo, OCSS no sufre limitaciones de tasa de extinción (ER , *extinction-ratio*: es la razón entre el nivel de “0” y “1”) para la carga útil o etiquetas. Esto remedia la principal desventaja de la modulación ortogonal [16] – [17]. Tercero, la tasa de

bits implementada puede ser operada a cualquier tasa. El único requerimiento es que la tasa de bits de la etiqueta sea menor o igual al doble de la frecuencia sinusoidal usada para generar la supresión de la portadora. Cuarto, la técnica OCSS puede ser fácilmente usada para etiquetas de alta velocidad y la generación de la carga, ej., 40 Gb/s y más por canal. Debido al ancho espaciado de longitud de onda de la etiqueta y la carga útil son más fáciles de separar con un filtrado óptico [18]. Quinto, la carga útil y la etiqueta pueden ser generadas y separadas sin interferencia entre las mismas. Por ejemplo, la técnica de multiplexación de subportadora introduce una gran cantidad de interferencia entre la etiqueta y la carga útil [14]–[19].

Finalmente, la baja ocupación de ancho de banda puede ser realizada. Los resultados experimentales obtenidos demuestran una alta eficiencia espectral con 0.4 nm de espaciado de canales.

VI. Intercambio de etiquetas totalmente óptico (AOLS)

All-optical label swapping (AOLS) es el método de codificación en que se remueve la etiqueta del paquete recibido y se inserta una nueva etiqueta que permita un enrutamiento totalmente óptico.

En los últimos años, muchos métodos han sido propuestos y estudiados para el uso de etiquetas completamente ópticas. De acuerdo con la forma en que la etiqueta es agregada al datagrama hay cuatro categorías:

- i) Cabecera multiplexada óptica de subportadora (SCM); ii) cabecera serial de bit;
- iii) modulación óptica ortogonal y iv) etiquetado de longitud de onda WDM.

El método SCM acomoda la etiqueta y la carga útil en la misma longitud de onda, considerando la carga como banda base y modulando la etiqueta en un canal de frecuencia subportadora RF [20]. Sin embargo, durante la propagación de la señal de doble banda lateral (DSB, *Double Side Band*) a través de una fibra dispersiva, las bandas laterales alta y baja de SCM tendrán diferentes cambios de fase, debido a las diferentes velocidades de fase. Hay dos soluciones que pueden manejar esto; una implica la extracción de la etiqueta de portadora suprimida, a través de una rejilla de Bragg (FBG, *Fiber Bragg Grating*) o un espejo de flujo óptico [20], [21], mientras que el otro tiene que ver con transmisión de una sola banda lateral (SSB, *Single Side Band*) a través de un filtro *notch* [10]. Otra desventaja del método de modulación antes mencionado es que SCM no puede soportar adecuadamente, sistemas de altas tasas de bit (40 Gbps y mayor) debido a las limitaciones de los componentes electrónicos [22].

El método de longitud de onda utiliza una longitud separada para la transmisión de la etiqueta óptica [23], [24], haciendo ineficiente uso del ancho de banda y subutilizando las capacidades de etiqueta del canal.

Como la carga útil y la etiqueta se propagan a través de una fibra dispersiva, en longitudes de ondas separadas, ellas pueden tener diferentes velocidades debido a la dispersión cromática, resultando en una diferencia entre ellas [23].

En cuanto al método serial, muchas aproximaciones interesantes han sido propuestas para el procesamiento óptico de la etiqueta (extracción y reinserción) de la carga útil. Estas implican el uso de tiempo a longitud de onda, o mapeo inverso, a través de correlación óptica FBG [25], [26], el uso de guías de onda en el tiempo, con cambios de longitud de onda a través de dispositivos PPLN (*Periodicaly Poled Lithium Niobate*) [27], una lógica XOR [28], una etiqueta continua de onda [29], u otros interesantes métodos de correlación de códigos de pulso [30]–[31]. Sin embargo, el método serial de bit puede requerir sincronización estricta y control de tiempos y demanda diferentes niveles de potencia o formatos de codificación (e.j. carga útil RZ y cabecera con NRZ [5]), para poder distinguir entre la etiqueta y la carga.

El intercambio de etiquetas óptico es un paso crucial en la implementación de OLS [32] – [33], [18], [34], [16] en los nodos de núcleo de la red OPS. En una red OPS, los paquetes ópticos son primero encapsulados con etiquetas ópticas al entrar a la red. Una vez que están en ella, solo la etiqueta sufre conversión OE en el enrutador OPS, así que la información de enrutamiento del paquete y otros datos auxiliares, tales como longitud de onda y tasa de bits de la carga útil, pueden ser determinados. Dado que la carga útil permanece en forma óptica desde la fuente hasta el destino, puede ser codificada a una muy alta tasa de bits usando cualquier formato de modulación [35].

VII. Enrutador óptico

Uno de los más importantes componentes en una red OPS es el enrutador óptico de paquetes. Un enrutador óptico de paquetes consiste de un procesador de enrutamiento para procesar la etiqueta y enrutar la carga útil, un buffer óptico de demora para sincronización y resolución de la contención, un convertidor de longitud de onda para proveer diversidad, un plano de conmutación para físicamente enrutar la carga útil, y puertos de entrada y de salida para regenerar las señales. La función primaria del buffer óptico es resolver la contención en el plano de conmutación. Tal recurso de contención puede surgir cuando dos o más paquetes con la misma longitud de onda están siendo enrutados hacia el mismo puerto físico simultáneamente [35].

La conversión de longitud de onda completamente óptica es considerada como una parte importante de las futuras redes conmutadas de multiplexación por división de la longitud de onda (DWDM), dado que permite unir tráfico, permite resolución de la contención (esquemas de contingencia), y provee efectiva utilización del gran ancho de banda de la fibra [34]–[35]. Se ha reportado una conversión de longitud de onda para paquetes, conteniendo una carga útil a 40 Gbit/s y una etiqueta a 2.5 Gbit/s en una red OPS con una distancia de transmisión de 200 km a través de una fibra monomodo de 28 fibras [35].

En las redes OPS, la naturaleza del tráfico que llega en el receptor es en ráfagas. Para poder detectar y procesar la etiqueta, los receptores de modo ráfaga usualmente necesitan suficiente información de reloj para sincronización. [36] – [37]. Una señal de reloj continua está siempre presente en un paquete generado con la técnica de OCSS, y puede ser recuperado en el *switch* o en el destino final, para que la etiqueta y la carga útil puedan ser procesadas [38].

La falta de una tecnología de RAM óptica viable es una desventaja significativa para realizar un enrutador totalmente óptico. De otro lado, un enrutador completamente óptico puede explotar el nuevo dominio de la longitud de onda disponible en resolución de contención y conmutación, y también puede potencialmente soportar señales multi longitud de onda de tasas altas de línea en el plano óptico con mucho menos potencia típicamente y menos interferencia de la señal que su contraparte eléctrica [39].

Desde los primeros días de los estudios de OPS, los investigadores utilizaron “cabeceras ópticas” junto a “carga útil óptica de datos” para enrutamiento en cada sistema óptico de conmutación (enrutador óptico). Dado que la cabecera óptica solo necesita contener una cantidad de información relativamente baja (típicamente alrededor de 40 bits) para la fuente (10 bits), destino (10 bits) tiempo de vida óptico (4 bits), QoS (3 bits), etc., la tasa de bit para la cabecera óptica puede ser mucho más baja que para la carga óptica [39].

Como en OBS, un sistema típico OPS utiliza un plano de control electrónico y un plano de datos totalmente óptico para que la parte electrónica revise el contenido de la cabecera, realiza decisiones de enrutamiento, y commute en el plano óptico la carga útil. Típicamente, durante este proceso, el remplazo de la cabecera óptica toma lugar. Los procesos de remplazo de la cabecera óptica e intercambio de la etiqueta son idénticos en la capa física (aunque diferentes lógicamente).

OBS emplea un canal separado para el procesamiento y remplazo del encabezamiento, el cual contiene información de la cabecera más la longitud de la ráfaga, mientras que en OPS las cabeceras ópticas deben ser fácilmente agregadas y removidas de la

carga óptica de datos, preferiblemente usando una tecnología completamente óptica. Por esta razón, el formato de las cabeceras ópticas es un factor muy importante para determinar la arquitectura del enrutador óptico. La capacidad de remplazo de la cabecera ayuda a proveer flexibilidad en la red OPS, aunque no es absolutamente necesario en ciertos sistemas o arquitecturas de red [39].

La cabecera puede ser adicionada en serie o en paralelo a la carga útil de datos, usando varias tecnologías. Al escoger la tecnología, el esquema de cabecera óptica debería 1) imponer una mínima sobrecarga a la capacidad de datos de la red, 2) soportar técnicas simples de remplazo de cabeceras, 3) mantener alta fidelidad de la señal a través de la transmisión de fibra y los nodos en cascada, y 4) imponer baja interferencia entre la cabecera y la carga útil [39].

Las técnicas de cabecera serial colocan la cabecera en forma serial con la carga útil en el dominio del tiempo y requiere un estricto control del reloj. Las técnicas de cabeceras paralelas ponen la cabecera en una longitud de onda separada, o en otra frecuencia, formato de modulación o código. La arquitectura de cabecera paralela facilita el proceso de remplazo de la cabecera porque un canal separado permite el procesamiento paralelo de la misma. También provee mejor soporte para conmutación asíncrona de paquetes de longitud variable, ofrece una posible interoperabilidad entre OPS, OCS y OBS, y aligera los requerimientos estrictos de sincronización vistos en las técnicas de cabecera serial [40].

En [39] se propone una arquitectura de un enrutador completamente óptico que cumple las siguientes características: 1) No emplea la arquitectura de almacenamiento y reenvío, 2) adopta etiquetamiento óptico en paralelo (utilizando SCM óptico), y 3) emplea el plano de conmutación óptica basado en enrutamiento de longitud de onda. Estos tres elementos facilitan grandemente la interoperabilidad entre OCS, OBS, y OPS en una sola plataforma OLS, en la cual los enrutadores OLS pueden soportar múltiples servicios y flujos en múltiples longitudes de onda al mismo tiempo. Para soportar esto más allá, la red OLS adopta cuatro clases de formatos de etiquetas ópticas que son de 40 bits de largo. Clase A es un formato de etiqueta óptico orientado a destino, similar a una cabecera IP que contiene destino, fuente, QoS, CoS, ToS, tiempo de vida óptico, y bits experimentales. Clase B es idéntica a Clase A pero incluye características de ingeniería de tráfico codificadas en los bits experimentales. Clase C es para información de enrutamiento basada en circuitos similar a etiquetas MPLS. Clase D es para etiquetas de conmutación de circuitos. Las etiquetas de clases A, B, y D no necesariamente requieren intercambio de etiquetas en cada nodo [39]. Otro aspecto importante del enrutador OLS es la utilización de un esquema unificado y encadenado de resolución de contención en los dominios de longitud de onda, tiempo y espacio para facilitar la interoperabilidad de servicios de red de OPS, OBS, y OCS [39].



VIII. Funcionamiento de una red AOLS

La estructura de la etiqueta está compuesta por un preámbulo (64 bits), una palabra única (16 bits), y la información de enrutamiento (32 bits).

El preámbulo es usado para funciones de recuperación de reloj, la palabra única es la misma cadena de bits para cada etiqueta transmitida y permite la identificación del comienzo de la información de enrutamiento y provee una trama, si la palabra única ha sido apropiadamente identificada. Finalmente, el contenido de enrutamiento lleva la información relacionada a la información de direccionamiento del paquete, prioridad, duración y bits de propósito general. En términos generales, el contenido de enrutamiento define el puerto de salida del nodo y la longitud de onda de salida para cada paquete procesado, además de la nueva etiqueta por ser usada en un subsecuente nodo [41].

Por lo tanto, la información de enrutamiento define el camino del paquete dentro del dominio de la red óptica. Este camino puede ser encontrado a través de las nuevas versiones o modificaciones de RSVP (*Resource Reservation Protocol*), protocolo de reserva de recursos) y LDP (*Label Distribution Protocol*, protocolo de distribución de etiquetas) siguiendo un servicio orientado a la conexión, o por lo contrario, el enrutamiento dentro de la red óptica puede seguir información de enrutamiento basado en IP típico [41].

Así, las etiquetas entrantes identifican enlaces orientados o no a conexiones. En el primer caso, la etiqueta es usada como en redes MPLS, siendo capaces de acomodar ráfagas de paquetes, creando circuitos virtuales basados en la información de la etiqueta [41].

El contenido de la etiqueta es basado en la información de la clase de equivalencia de reenvío de la carga útil (FEC) y es distribuida por el control y manejo de la red con la ayuda del protocolo de señalización de etiqueta, tales como RSVP o LDP. El proceso de colocación de distribución de etiquetas y el camino de conmutación de etiqueta (LSP) en una red OLS es similar a aquel de una red MPLS [44].

La etiqueta generada es entonces combinada con la carga óptica, usando un proceso de codificación de la etiqueta antes de ser transmitido en la red OLS. El desempeño de la red OLS depende grandemente de cómo la etiqueta es codificada con la carga útil asociada en el enrutador de ingreso. En cada enrutador intermediario de núcleo OLS, la etiqueta es ópticamente leída y electrónicamente procesada mientras se mantiene la carga útil en el dominio óptico. De esta manera, el proceso de reenvío de las redes OLS puede ser realizado independiente del formato de la carga útil óptica, tasa de bits o protocolos subyacentes. Basado en la información de la etiqueta recibida y la correspondiente tabla de entrada de reenvío, los enrutadores de núcleo

intercambian la etiqueta con una nueva y envían nuevamente los paquetes ópticos al siguiente salto [44].

Este proceso de reenvío, leído e intercambio de etiquetas continúa hasta que el paquete alcanza el destino final en el enrutador de salida. Éste último remueve la etiqueta óptica de la carga útil, restaura el formato original del paquete, y lo entrega a la red del cliente destino [44].

Los paquetes ópticos que han llegado asincrónicamente de los nodos previos son recibidos por la interfaz de transporte de entrada. La señal de la etiqueta es extraída en la unidad de procesamiento de etiquetas y la información de la etiqueta es usada para calcular la decisión de reenvío del paquete. La decisión de reenvío principalmente implica revisar las entradas de la tabla de reenvío en el motor de enrutamiento, colocar el puerto apropiado de conmutación y resolver cualquier contención de puerto [44]. La carga óptica es retardada en un dispositivo FDL (*Fiber Delay Line*) que permite el tiempo requerido necesario para la detección de la etiqueta, la decisión de enrutamiento y la preparación de la conmutación. El intercambiador de etiquetas es usado para remover la etiqueta recibida e insertar la nueva etiqueta antes de transmitir el paquete al siguiente nodo, proveyendo así la escalabilidad de la red OLS. El módulo de almacenamiento puede ser usado en varios lugares para facilitar la sincronización de los paquete, ingeniería de tráfico y resolución de contención de puerto. El convertidor realiza conversión de longitud de onda entre las longitudes de onda entrante y saliente para brindar mayor flexibilidad de asignación de longitud de onda y también resolución de contención. El plano de conmutación realiza la conmutación de espacio de los paquetes ópticos direccionándolos desde los puertos de entrada a los puertos apropiados de salida [44].

La generación de etiquetas ópticas es un componente esencial de las redes OLS. Sin embargo, otra tecnología importante para realizar redes ópticas conmutadas de etiquetas escalables es el intercambio de las etiquetas ópticas, un proceso de extracción, procesamiento, y reescritura de la etiqueta óptica en cada enrutador de núcleo. Aunque el intercambio de etiquetas es usado en cada nodo núcleo, la arquitectura y desempeño del esquema de intercambio de etiquetas depende en gran manera de la generación de la etiqueta y el método de codificación empleado en el nodo de ingreso de la red OLS [44].

Por ejemplo, SCM acomoda la etiqueta y la carga útil en banda base en el mismo canal de longitud de onda, tratando la carga como una señal banda base mientras incluye la etiqueta como la subportadora. Las técnicas avanzadas para intercambio de etiquetas para etiquetas SCM reportadas hasta ahora, envuelven transmisores de banda lateral única relativamente complejos, esquemas engorrosos ópticos no lineales basados en fibra, esquemas de convertidores de longitud de onda interferométricos con altos costos de potencia, esquemas de sobre modulación con costos de inter modulación, o esquemas de etiquetas multilongitud de onda con baja eficiencia espectral [43].



Cuando se usa un esquema de etiquetamiento serial, el borrado de la etiqueta puede ser realizado usando conversión de longitud de onda. Usualmente la carga útil es convertida a una nueva longitud de onda usando modulación de fase cruzada en fibra no lineal o un semiconductor amplificador óptico (SOA, *Semiconductor Optical Amplifier*). Dado que la etiqueta y la carga útil son multiplexadas en el dominio del tiempo, la sincronización de la red debe ser precisa y requerida durante la remoción y escritura de la etiqueta [43].

Para el método de codificación ortogonal, la etiqueta y la carga útil son codificadas con diferentes formatos de modulación pero a la misma frecuencia portadora. Dado que la etiqueta necesita ser leída en cada nodo, una modulación encendido apagado (*OOK, On-Off Keying*), requiriendo el más simple receptor, es el formato preferido. Cuando la etiqueta es modulada OOK, el formato de modulación de la carga útil puede ser escogido DPSK (*Differential Phase Shift Keying*) o FSK (*Frequency-Shift Keying*). Las técnicas actuales de borrado para etiquetas OOK y carga útil DPSK/FSK pueden ser realizadas usando modulación sincrónica o desempeño de transmisión no lineal en SOAs [43].

IX. Técnicas de modulación

Las técnicas de modulación híbrida permiten agregar y remover información de etiquetas en los paquetes de carga útil. Algunos formatos híbridos han sido propuestos y experimentalmente probados, tales como modulación por desplazamiento de amplitud (ASK) con modulación por cambio diferencial de fase (DPSK) etiquetamiento (ASK/DPSK) [42], DPSK con etiquetamiento ASK (DPSK/ASK), and modulación en intensidad (IM, *Intensity Modulation*) con modulación por desplazamiento en frecuencia (FSK). El uso de DPSK para transmisiones de largo alcance en vez de la modulación encendido apagado (OOK) es primordialmente debido a la sensibilidad más alta de recepción, usando detección balanceada y su mayor prestación no lineal, lo cual es parcialmente atribuido a la potencia pico más baja de las señales DPSK [43]. En sistemas de transmisión de ultra largo alcance pseudolineal, modulación cruzada de fase entre canales (IXPM) y mezcla de cuatro ondas entre canales (IFWM) son los mayores factores de degradación no lineales. Aunque la IXPM puede ser casi suprimida por un mapa de dispersión simétrico, el IFWM todavía es un reto. La modulación DPSK ha mostrado ser efectiva en la supresión de IFWM hasta cierto nivel en regímenes altamente no lineales, debido a su baja potencia pico y cancelación parcial de los cambios de fase no lineales [42]. El formato FSK, como el DPSK, posee energía constante por bit y mejora la sensibilidad del receptor si es equipado con detección balanceada. Por lo tanto es de interés explorar el desempeño de un formato de modulación híbrida usando DPSK para la carga útil y FSK para la etiqueta.

Conclusiones

En este artículo se presentó una revisión de las diferentes técnicas que permiten la inserción y el intercambio de etiquetas ópticas, así como los métodos de enrutamiento completamente ópticos.

La introducción de OLS como alternativa para la transmisión a muy altas tasas de bits es prometedora y con los avances experimentales realizados en la última década se perfila como una solución viable obtener redes totalmente ópticas.

OLS posee características que la hacen una alternativa atractiva para independizar completamente la carga útil de la conmutación en la capa óptica, esto permite que se convierta en el pilar de conceptos como GMPLS que propenden por una integración más completa de los protocolos y tecnologías existentes en las redes de núcleo.

Ya se ha experimentado de manera muy prometedora en aplicaciones comerciales de OLS, y se espera que con la evolución rápida de la tecnología y la siempre creciente demanda de ancho de banda y calidad de servicio su implementación sea una realidad a corto plazo.

Referencias

- [1] S. J. B. Yoo and G. K. Chang, "High-throughput, low-latency next generation internet using optical tag switching," U.S. Patent 6 111 673, Aug. 29, 1997.
- [2] M. Meir, "Optical Switching Networks", Cambridge University Press, 2008.
- [3] V. J. Hernandez, Z. Pan, J. Cao, V. K. Tsui, Y. Bansal, S. K. H. Fong, Y. Zhang, M. Y. Jeon, S. J. B. Yoo, B. Bodtker, S. Bond, W. J. Lennon, H. Higashi, B. Lyles, and R. McDonald, "First field trial of optical label based switching and packet drop on a 477 km NTON/Sprint link," en *OFC Postconference Tech. Dig. (IEEE Cat. No. 02CH37339)*, Washington, DC, 2002, vol. 1, pp. 168–169.
- [4] Min Yong Jeon, "Demonstration of All-Optical Packet Switching Routers With Optical Label Swapping and 2R Regeneration for Scalable Optical Label Switching Network Applications" en *Journal of Lightwave Technology*, vol. 21, No. 11, Noviembre 2003.
- [5] Daniel J. Blumenthal, "All-Optical Label Swapping Networks" en *Journal of Lightwave Technology*, vol. 18, No. 12, diciembre 2000.
- [6] Cao et al.. "Error-Free Multi-hop Cascaded Operation of Optical Label Switching Routers with All-optical Label Swapping." *Proc. OFC 2003*. Atlanta. GA, 2003.
- [7] C. Qiao and M. Yoo, "Optical Burst Switching (OBS) - a New Paradigm for an Optical Internet:" *J. High Speed Networks*. "01.8, 1999. pp. 69-84
- [8] Fei Xue and S. J. Ben Yoo, "High Capacity Multiservice Optical Label Switching for the Next-Generation Internet" *IEEE Optical Communications - Mayo 2004*
- [9] R. Olshansky and V. A. Lanzisera, "60-channel FM video subcarrier multiplexed optical communication system," *Electron. Lett.*, vol. 23, pp. 1196–1198, 1987.

- [10] Y. M. Lin, W. I. Way, and G. K. Chang, "A novel optical label swapping technique using erasable optical single-sideband subcarrier label," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, pp. 1088–1090, Aug. 2000.
- [11] D. J. Blumenthal, A. Carena, L. Rau, V. Curri, and S. Humphries, "Alloptical label swapping with wavelength conversion for WDM-IP networks with subcarrier multiplexed addressing," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, pp. 1497–1499, Nov. 1999.
- [12] H. J. Lee, V. Hernandez, V. K. Tsui, and S. J. B. Yoo, "Simple, polarization-independent, and dispersion-insensitive SCM signal extraction technique for optical switching systems applications," *Electron. Lett.*, vol. 37, pp. 1240–1241, Sept. 2001.
- [13] B. E. Olsson, P. Ohlen, L. Rau, G. Rossi, O. Jerphagnon, R. Doshi, D. S. Humphries, D. J. Blumenthal, V. Kaman, and J. E. Bowers, "Wavelength routing of 40 Gbit/s packets with 2.5 Gbit/s header erasure/rewriting using all-fiber wavelength converter," *Electron. Lett.*, vol. 36, pp. 345–347, Feb. 2000.
- [14] B. Meagher, G. K. Chang, G. Ellinas, Y. M. Lin, W. Xin, T. F. Chen, X. Yang, A. Chowdhury, J. Young, S. J. Yoo, C. Lee, M. Z. Iqbal, T. Robe, H. Dai, Y. J. Chen, and W. I. Way, "Design and Implementation of Ultra-Low Latency Optical Label Switching for Packet-Switched WDM Networks" *Journal Of Lightwave Technology*, Vol. 18, No. 12, diciembre 2000.
- [15] B. Meagher, G. K. Chang, G. Ellinas, Y. M. Lin, W. Xin, T. F. Chen, X. Yang, A. Chowdhury, J. Young, S. J. Yoo, C. Lee, M. Z. Iqbal, T. Robe, H. Dai, Y. J. Chen, and W. I. Way, "Design and implementation of ultra-low latency optical label switching for packet-switched WDM networks," *J. Lightwave Technol.*, vol. 18, pp. 1978–1987, Dec. 2000.
- [16] X. Liu, Y. Su, X. Wei, J. Leuthold, and R. C. Gile, "Optical-label switching based on DPSK/ASK modulation format with balanced detection for DPSK payload," presentado en el Eur. Conf. Optical Communication (ECOC 2003), Rimini, Italia, 2003, Paper Tu4.4.3.
- [17] J. Zhang, N. Chi, P. V. Holm-Nielsen, C. Peucheret, and P. Jeppensen, "A novel optical labeling scheme using a FSK modulated DFB laser integrated with an EA modulator," in *Optical Fiber Communication Conf. Tech. Dig.*, Postconference Edition, 2003, TuQ5.
- [18] Jianjun Yu, Gee-Kung Chang, Arshad Chowdhury, and Joseph L. Long, "Spectral Efficient DWDM Optical Label/Payload Generation and Transport for Next-Generation Internet"
- [19] D. J. Blumenthal et al., "All-optical label swapping networks and technologies," *J. Lightwave Technol.*, vol. 18, pp. 2058–2075, Dec. 2000.
- [20] H. J. Lee, S. J. B. Yoo, V. K. Tsui, and S. K. Fong, "A simple all-optical label detection and swapping technique incorporating a fiber Bragg grating filter," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 13, pp. 635–637, junio 2001.
- [21] G. Rossi, O. Jerphagnon, B. Olsson, and D. J. Blumenthal, "Optical SCM data extraction using a fiber loop mirror for WDM network systems," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, pp. 897–899, jul. 2000.
- [22] E. N. Lallas, N. Skarmoutsos, and D. Syvridis "Coherent Encoding of Optical FSK Header for All Optical Label Swapping Systems" *Journal Of Lightwave Technology*, Vol. 23, No. 3, marzo 2005.
- [23] A. Okada, "All optical packet routing in AWG based wavelength routing networks using an out of band filter," in *Proc. OFC'02*, vol. 1, Wash., DC, 2002, pp. 213–215. Paper WG1.
- [24] N. Wada, H. Harai, W. Chujo, and F. Kubota, "Multihop, 40 Gbits variable length photonic packet routing based on multiwavelength label switching, waveband routing, and label swapping," in *Proc. OFC'02*, vol. 1, Wash., DC, 2002, pp. 216–217. WG3
- [25] X. Jiang, K. M. Feng, M. Cardakli, J. X. Cai, A. E. Willner, V. Grubsky, D. S. Starodubov, and J. Feinberg, "Control monitoring of routing bits and data packets in WDM networks using wavelength to time mapping," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, pp. 1186–1188, sep. 1999.

- [26] M. C. Cardakli, S. Lee, A. E. Willner, V. Grubsky, D. Starodubov, and J. Feinberg, "Reconfigurable optical packet header recognition and routing using time-to-wavelength mapping and tunable fiber Bragg gratings for correlation decoding," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, pp. 552–554, mayo 2000.
- [27] D. Gurkan et al., "Simultaneous label swapping and wavelength conversion of multiple independent WDM channels in all optical MPLS using PPLN waveguides as wavelength converters," *J. Lightwave Technol.*, vol. 11, pp. 2739–2745, Nov. 2003.
- [28] T. Fjelde, A. Kloch, D. Wolfson, B. Dagens, A. Coquelin, I. Guillemot, F. Poingt, and M. Renaud, "Novel scheme for simple label swapping employing XOR logic in an integrated interferometric wavelength converter," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 13, pp. 750–752, julio. 2001.
- [29] X. Jiang, X. P. Chen, and A. E. Willner, "All optical wavelength independent packet header replacement using a long CW region generated directly from the packet flag," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, pp. 1638–1640, nov. 1998.
- [30] K. Kitayama and N. Wada, "Photonic IP routing," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, pp. 1669–1671, Dec. 1999.
- [31] S. Aleksic and V. Krajinovic, "Comparison of optical code correlators for all optical MPLS," in ECOC, 2002. 1.4.3.
- [32] G. K. Chang and J. Yu, "Multi-rate payload switching using a swappable optical carrier suppressed label in a packet switched DWDM optical network," *J. Lightwave. Technology.*, vol. 23, no. 1, pp. 196–202, Jan. 2005.
- [33] J. Cao et al., "11-hop operation of optical-label switching system with all-optical label swapping," presented at the Eur. Conf. Optical Communication (ECOC), Rimini, Italia, sep. 21–25, 2003, Paper Th3.3.2.
- [34] A. Chowdhury, J. Yu, and G. K. Chang, "All-optical label swapping for same wavelength data switching using optical carrier suppression and separation and without regular wavelength converter," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, no. 5, pp. 1127–1129, may 2005.
- [35] Gee-Kung Chang, Jianjun Yu, Arshad Chowdhury and Yong-Kee Yeo, "Optical Carrier Suppression and Separation Label-Switching Techniques" *Journal Of Lightwave Technology*, Vol. 23, No. 10, octubre 2005.
- [36] S. Hofjeldt, S. Bischoff, and J. Mork, "All-optical wavelength conversion and signal regeneration using an electro-absorption modulator," *J. Lightwave. Technology.*, vol. 18, no. 8, pp. 1121–1127, agosto 2000.
- [37] T. Durhuus, B. Mikkelsen, C. Jorgensen, S. L. Danielsen, and K. E. Stubkjar, "All-optical wavelength conversion by semiconductor optical amplifiers," *J. Lightwave. Technology.*, vol. 14, no. 6, pp. 942–954, enero 1996.
- [38] J. Yu, G. K. Chang, and A. Chowdhury, "Detecting burst-mode optical label or payload generated by OCSS technique using conventional receivers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, no. 7, pp. 1567–1569, jul. 2005.
- [39] S. J. Ben Yoo, "Optical Packet and Burst Switching Technologies for the Future Photonic Internet" *Journal Of Lightwave Technology*, Vol. 24, No. 12, diciembre 2006
- [40] S. J. B. Yoo, "Optical-label switching, MPLS, MPLambdaS, and GMPLS," *Opt. Netw. Mag.*, vol. 4, no. 3, pp. 17–31, may/jun. 2003.
- [41] Gustavo Puerto Leguizamón, Beatriz Ortega y José Capmany "Advanced Subcarrier Multiplexed Label Swapping in Optical Packet Switching Nodes for Next Generation Internet Networks" *Journal Of Lightwave Technology*, Vol. 27, No. 6, marzo 15, 2009
- [42] T. Koonen, G. Mothier, J. Jennen, H. Waardt, and P. Demeester, "Optical packet routing IP-over-WDM networks deploying two-level optical labeling," in Proc. ECOC, Amsterdam, Holanda, 2001, pp. 14–15.

- [43] Fangfei Liu, Yikai Su, "DPSK/FSK Hybrid Modulation Format and Analysis of Its Nonlinear Performance" *Journal Of Lightwave Technology*, Vol. 26, No. 3, febrero 2009
- [44] A. Chowdhury, "Optical Label Switching Technologies For Optical Packet Switched Networks", School of Electrical and Computer Engineering Georgia Institute of Technology, diciembre 2006.

