



Seguridad y Productividad en la Sociedad de la Información

Cuaderno Red de Cátedras Telefónica



Universidad
Zaragoza

Comunicaciones basadas en conmutación óptica de paquetes

Cátedra Telefónica de la Universidad de Zaragoza

El completo desarrollo de las redes ópticas de próxima generación depende en gran medida de las respuestas a una serie de cuestiones técnicas aún por resolver que se contemplan en este documento: ¿qué estado de madurez precisa la tecnología óptica para poder implementarlas?, ¿cuál es la técnica de señalización más efectiva?, ¿qué penalizaciones introduce el uso de amplificadores ópticos tradicionales?

Alicia López Lucia
Junio 2011

Biografía



Alicia López Lucia

Alicia López Lucia recibió el título de Ingeniera de Telecomunicaciones por la Universidad de Zaragoza (UZ) en 2002 y el de Doctora (UZ) en 2009. Su tesis doctoral titulada “Diseño de análisis de una red de comunicaciones con conmutación óptica de paquetes” fue dirigida por la Dra. María Ángeles Losada y el Dr. Ignacio Garcés y recibió el premio Cátedra Telefónica (UZ) en 2010.

En 2002, se integró como investigadora en el Grupo de Tecnologías Fotónicas (GTF) del Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (i3A). Desde 2004, es además profesora del Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones, UZ. Su investigación está centrada en el diseño y evaluación de arquitecturas y protocolos para redes ópticas.

Índice

1. Escenario actual y nuevas generaciones de redes ópticas
2. Diseño de una red OPS: arquitectura y acceso al medio
3. Escalabilidad: aspectos de tráfico y limitaciones físicas
4. Estudio experimental de subsistemas
 - 4.1. Codificación de la información de control o etiquetado
 - 4.2. Amplificación en redes dinámicas
5. Conclusiones

1. Escenario actual y nuevas generaciones de redes ópticas

El increíble aumento de la capacidad de transmisión requerido por los usuarios en los últimos años ha hecho más patente la brecha existente entre el ancho de banda disponible en la fibra óptica y el ancho de banda que los componentes electrónicos son capaces de gestionar. La tendencia lógica para evitar este hueco es acercar al dominio óptico la implementación de las funciones de red básicas y así conseguir que la información sea transportada por la fibra de forma transparente: sin necesidad de conversiones entre los dominios eléctrico y óptico (O/E/O) e independientemente del formato o la tasa de transmisión.

Sin duda, en la actualidad, la única tecnología de transporte capaz de satisfacer la creciente demanda es WDM. Por otra parte, la evolución del mercado de las telecomunicaciones ha experimentado en los últimos años un indiscutible predominio de aplicaciones basadas en tráfico IP debido principalmente al impactante incremento del número de usuarios de Internet. Hoy en día, la mayor parte de transmisión mediante WDM se realiza a través del estándar SONET/SDH. Sin embargo, la transmisión del ubicuo tráfico IP mediante redes del tipo SONET/SDH presenta serias limitaciones evitables de forma natural eliminando una o varias de las capas intermedias en la pila de protocolos que además, reduce las dificultades y costes derivados de la interoperabilidad entre capas. De esta forma surge el concepto de capa óptica como una capa dotada de inteligencia y capaz de englobar funciones de enlace además de las propias de capa física. La Figura 1 muestra una evolución plausible de la pila de protocolos respecto a la implementación de redes de transporte de paquetes IP.

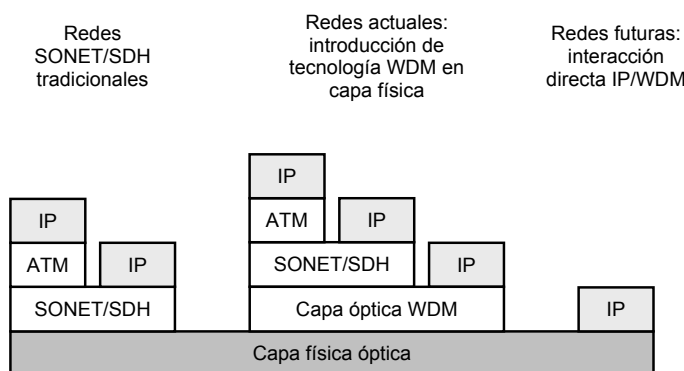


Figura 1: Evolución de las redes de comunicaciones ópticas según una visión multicapa

Tradicionalmente y en la mayoría de redes actuales la fibra óptica ha sido mero medio de transmisión. Estas redes constituyen la **primera generación** de redes ópticas, con provisión estática de recursos e interacción IP / tecnología óptica a través de múltiples capas intermedias. En las redes ópticas de **segunda generación** la capa de adaptación WDM está dotada de cierta inteligencia que la capacita para asignar recursos

bajo demanda. Este tipo de redes se caracteriza por la provisión dinámica de recursos y la desaparición de muchas de las capas intermedias. En el futuro se prevé la aparición de las denominadas redes ópticas de **tercera generación**, en las que los paquetes IP sean transportados directamente sobre la tecnología WDM.

Las últimas generaciones de redes ópticas sugieren un acercamiento al dominio óptico de la función de encaminamiento o *routing*. Esta orientación ha sido impulsada en parte por el incremento de la tasa de transmisión de los flujos individuales de información, que ha aumentado la complejidad y coste de los circuitos electrónicos. Por otra parte, la introducción de WDM ha multiplicado el número de componentes en los nodos. Ambos efectos resultan en un aumento enorme del coste de la red unido a la necesidad de mayor espacio y al incremento del consumo de energía. La implementación del *routing* en el dominio óptico permite superar las limitaciones de velocidad encontradas al evitar el procesado electrónico de la información de capa superior o *payload* contenida en cada paquete. Además, supone una reducción del espacio y del consumo de energía mediante la integración monolítica de componentes.

De forma análoga a la clasificación de las redes tradicionales de conmutación en el dominio eléctrico según su nivel de granularidad, existen tres paradigmas de conmutación en el dominio óptico:

- OCS (*Optical Circuit Switching*) también conocido como *wavelength routing*, basado en la conmutación a nivel de longitud de onda.
- OBS (*Optical Burst Switching*), basado en la conmutación a nivel de ráfaga (agregación de paquetes con las mismas necesidades de transmisión).
- OPS (*Optical Packet Switching*), basado en la conmutación a nivel de paquete.

2. Diseño de una red OPS

A pesar del desajuste tecnológico, de las tres filosofías de capa óptica descritas, aquella que se considera la mejor solución para redes ópticas de próxima generación es OPS. Las claves del diseño de una red OPS son: encaminamiento transparente en los nodos (sin conversiones O/E/O) y reutilización espacial de las longitudes de onda. Ambos conceptos determinan las reglas del control de acceso al medio (MAC) de la red. En el diseño propuesto, todo el tráfico que no esté destinado a un nodo en particular lo atraviesa de forma transparente. La clave reside en el uso de un *switch* óptico como elemento conmutador de los paquetes. Los recientes avances de tecnología óptica hacen que tanto el *switch* óptico como el resto de componentes de los nodos sean dispositivos comercialmente disponibles y de coste relativamente reducido, lo que aumenta el atractivo de la red y la hace realista y viable hoy en día.

La arquitectura de red propuesta consiste en un anillo WDM unidireccional con dos tipos de nodos: puntos de acceso y puntos de presencia. Los puntos de acceso (APs, *Access Points*) conectan a los usuarios de redes locales al anillo. Por otra parte, los puntos de presencia (POPs, *Points Of Presence*), son necesarios para la conexión con la red de nivel superior en la jerarquía (red troncal o metro/regional). Así, el tipo de tráfico que el anillo gestiona se clasifica en tráfico interno (destinado dentro del anillo) y tráfico externo (destinado fuera). La red está basada en el uso compartido de recursos (longitudes de onda) entre los nodos. La señalización de los paquetes se realiza a dos niveles: por una parte, cada paquete está identificado por la longitud de onda de transporte; por otra, contiene información de control (o *label*) que incluye la dirección destino.

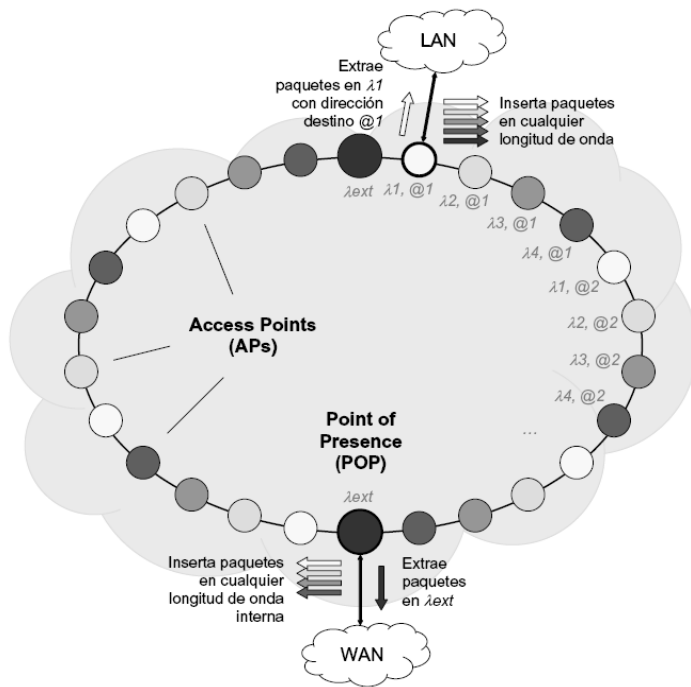


Figura 2: Arquitectura propuesta de red metropolitana OPS

El control de acceso al medio está basado en el uso de una línea de retardo (FDL, *Fibre Delay Line*) y por tanto está diseñado para la operación con paquetes de tamaño fijo (1500 B). La falta de *buffers* ópticos limita la gestión de paquetes de tamaño variable y por tanto, asumimos que los paquetes son encapsulados de forma previa por equipamiento externo a la red. El estudio teórico de los tiempos asociados al MAC ha indicado la necesidad de disponer de un tiempo de guarda entre paquetes para evitar colisiones en el *switch* óptico.

3. Escalabilidad

Se han obtenido los límites de escalabilidad y el rendimiento de la red propuesta mediante simulación. El estudio se ha realizado teniendo en cuenta tanto aspectos relacionados con el tráfico como limitaciones físicas de los componentes que constituyen los nodos y de la propia fibra.

El análisis de aspectos de tráfico ha indicado que la capacidad máxima necesaria en cada punto de inserción de tráfico es del orden de 50 paquetes para los *buffers* de tráfico interno y externo en los APs y 500 paquetes para el *buffer* de tráfico interno en los POPs, lo cual se corresponde con capacidades de 75 y 750 kB, respectivamente. Dado que el almacenamiento se realiza en el dominio eléctrico (de forma previa a la inserción de los paquetes en el anillo), las capacidades requeridas no suponen desafío tecnológico alguno. En este análisis es especialmente relevante el modelo de tráfico implementado. En este sentido, se han considerado dos modelos: por una parte un modelo clásico Poisson, y por otra un modelo autosemejante más realista basado en la agregación de fuentes ON-OFF. Las diferencias observadas según el modelo de tráfico son las siguientes:

- Los límites de carga de tráfico para los cuales la red entra en saturación y sus *buffers* comienzan a experimentar pérdida de paquetes son mayores en el caso del modelo clásico de Poisson.

- Para el modelo autosemejante, el punto de saturación de la red se alcanza de forma brusca e intermitente (efecto de las ráfagas).

La consecuencia clara de la primera observación es que el modelo de tráfico clásico proporciona estimaciones más optimistas que el autosemejante. En cuanto a la segunda observación, su principal efecto será la necesidad de disponer de capacidades de almacenamiento mayores que eviten la pérdida de paquetes ante la llegada de ráfagas. El tamaño máximo de la red se ha evaluado considerando, de forma análoga al análisis de carga de tráfico presentado anteriormente, distintos valores del tiempo de conmutación del *switch* óptico.

La latencia media en la red propuesta es de 0.6 ms para los paquetes de tráfico interno y de 0.3 ms para los de tráfico externo en el caso de una red de 90 nodos (perímetro de 180 km).

En el estudio de limitaciones físicas se ha considerado el efecto de la fibra (presente en la FDL y en el enlace entre nodos), así como el efecto de los componentes de los nodos. Se ha encontrado que la dispersión en la fibra es el factor limitante de la escalabilidad de la red a tamaños que en el diseño original de los nodos (fibra monomodo estándar en la FDL) no superan los 14 nodos. Sin embargo, este límite puede verse aumentado hasta un valor de 34 nodos en el caso de incorporar un módulo específico de compensación de dispersión. En cuanto a la atenuación, es un factor decisivo en este tipo de redes debido al elevado número de componentes. Es necesaria la inclusión de amplificadores en línea para compensar las pérdidas. Un estudio de distintas configuraciones muestra que existe un compromiso tanto en la elección de la ganancia del amplificador como en la elección de su posición. La mejor configuración es aquella que incluye dos amplificadores de 11 dB ganancia situados en la entrada y salida del nodo. El estudio de limitaciones físicas permite concluir que para la mejor configuración el tamaño máximo de red es de 70 nodos, que es notablemente superior al tamaño máximo obtenido del análisis de tráfico del apartado anterior. En este sentido es importante notar que el análisis de escalabilidad de capa física realizado es bastante optimista ya que no ha considerado el efecto de dependencia de los componentes con la longitud de onda.

4. Estudio experimental de subsistemas

Como complemento de la validación y análisis mediante simulación, se han estudiado experimentalmente algunos subsistemas clave para su implementación.

4.1. Codificación de la información de control o etiquetado

Existen varios métodos de codificación de la información de control o *labeling* que se clasifican según el modo en que la información de control y el *payload* se combinan. Nos centraremos en la técnica basada en el uso de modulaciones ortogonales, en la que el *label* se introduce en una dimensión ortogonal a la

del *payload*. Las dimensiones de la señal óptica que pueden portar una u otra información son amplitud, frecuencia, fase y polarización.

Se ha introducido una técnica de etiquetado que denominamos *narrow-FSK*, caracterizada por la reducción de penalización de ancho de banda propia del uso de modulaciones ortogonales con modulación en frecuencia del *label*. Esta técnica presenta la ventaja añadida de poder ser implementada de forma sencilla mediante modulación directa de láseres de semiconductor gracias al fenómeno de *chirp*. Adicionalmente, la reducida desviación frecuencial de la modulación es ventajosa de por sí por la reducción de modulación de amplitud residual (RIM) y vulnerabilidad frente a dispersión. La implementación del método de *labeling* se ha realizado usando dispositivos comerciales. En el experimento, el *payload* (modulación en intensidad, IM) está formado por tramas GbE, mientras que el *label* (modulación en frecuencia, *narrow-FSK*) consiste en una secuencia con codificación CMI y tasa de 155 Mb/s. El componente más crítico es el filtro demodulador FSK, diseñado específicamente para esta aplicación. La separación frecuencial de tonos FSK es de 0.7 GHz, lo cual requiere un filtro con rango espectral libre reducido. Se ha demostrado experimentalmente la demodulación *narrow-FSK* mediante este filtro. La Figura 3(a) muestra el espectro óptico de la señal tras la doble modulación IM/*narrow-FSK*. La contribución del *chirp* adiabático causa el desdoble de portadora óptica y por tanto introduce la modulación FSK (en gris se representa el espectro óptico de la señal cuando únicamente es modulada en intensidad). Por su parte, la Figura 3(b) muestra los espectros ópticos de las señales en sendas salidas del filtro demodulador FSK.

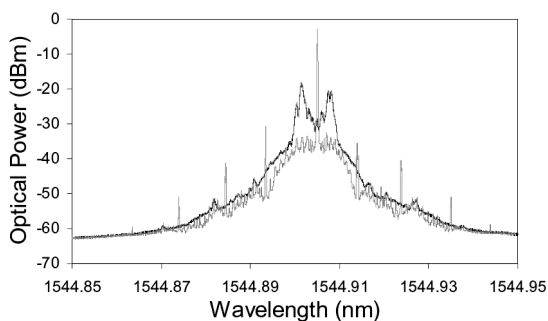


Figura 3(a): Espectros ópticos de la señal GbE (*payload*) y GbE con *labeling narrow-FSK*

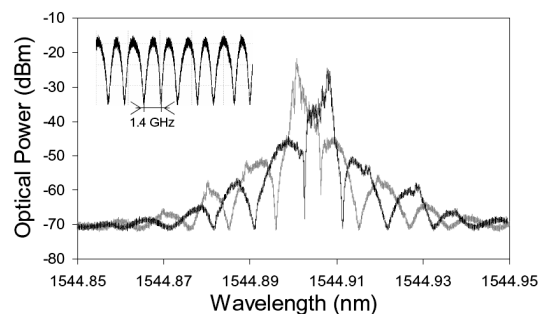


Figura 3(b): Espectros ópticos tras la demodulación *narrow-FSK* (recepción *label*)

Es importante notar que la combinación de modulaciones empleada no es totalmente ortogonal y se debe evaluar el fenómeno de interferencia entre ellas. Este análisis ha revelado que existe un compromiso entre la calidad de *label* y *payload* regulable con la relación de extinción (ER) de este último. Se ha comprobado experimentalmente el efecto de la interferencia entre los campos de control y de datos usando el montaje de laboratorio con componentes comerciales. El análisis ha consistido en la medida de la tasa de error de *label* y *payload* para distintos valores de ER de la modulación IM (*payload*). La tasa de error medida en el caso del *label* es la obtenida directamente de la lectura del BERT (*Bit Error Rate Tester*). En cuanto al *payload* la tasa de error considerada corresponde a la de errores FCS (*Frame Check Sequence*). Los resultados obtenidos se recogen gráficamente en la Figura 4.

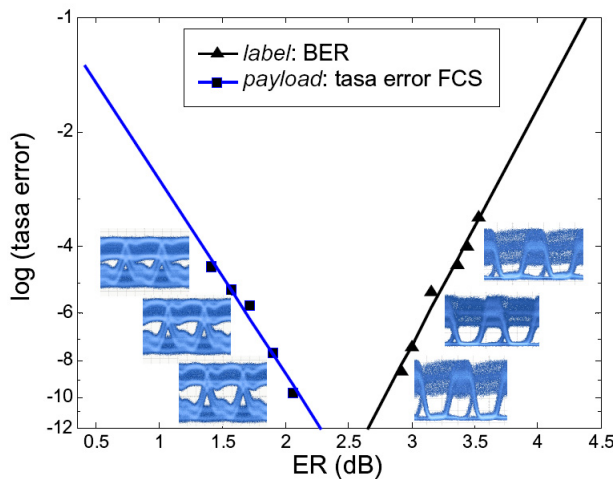


Figura 4: Medida de tasa de error en label y payload, compromiso en la elección ER del último

La predicción teórica de ER_{opt} ha indicado un valor ligeramente superior al obtenido de forma experimental (2.9 frente a 2.5 dB). Esta discrepancia supone un desplazamiento ER_{opt} hacia valores en los que la calidad del *label* es superior a la del *payload*. Es razonable que la causa de este desplazamiento sea el proceso de filtrado FSK previo a la detección del *label*, que se ha considerado ideal en el estudio analítico de *crossstalk*. A pesar de la baja relación de extinción, la calidad de la transmisión del *payload* está garantizada gracias a la reducida modulación en intensidad residual (RIM) asociada a la modulación *narrow-FSK*.

La transparencia al formato del *payload*, reducida penalización de eficiencia espectral y simplicidad de implementación de la técnica propuesta la hacen especialmente apropiada para al red analizada en este trabajo. Por otra parte, y en relación con el análisis de limitaciones físicas, la interferencia cruzada entre los dos campos de información se refleja en una penalización de potencia que previsiblemente hará necesario el uso de amplificadores con mayores factores de ganancia y/o menores figuras de ruido o restringirá la escalabilidad de la red.

4.2. Amplificación en redes dinámicas

Para abordar la problemática de la amplificación óptica en redes con tráfico dinámico, se ha analizado de forma experimental el comportamiento de los dos tipos de amplificadores ópticos más comunes en escenarios de potencia óptica variable en modo de ráfagas. Los dos amplificadores considerados en el estudio, EDFA (*Erbium Doped Fibre Amplifier*) y SOA (*Semiconductor Optical Amplifier*).

Para los **amplificadores EDFA** se ha implementado una configuración con control de ganancia o *gain clamping* (GC-EDFA). Se ha observado que las degradaciones de calidad propias de la operación del GC-EDFA en redes dinámicas se deben a una contribución estática (variaciones de potencia de estado estacionario, SSPF) y a otra dinámica (oscilaciones de relajación, RO). Sin embargo, el análisis de prestaciones en términos de factor Q muestra una cierta independencia con RO y una relación directa con SSPF, como muestra la Figura 5, donde se representan medidas para los distintos escenarios de red considerados en el estudio (1, 4 y 16 ráfagas).

En cuanto a la dependencia con la variación de potencia óptica a la entrada, los resultados muestran que al aumentar el número de ráfagas insertadas / extraídas el valor de pérdidas en la ruta de realimentación

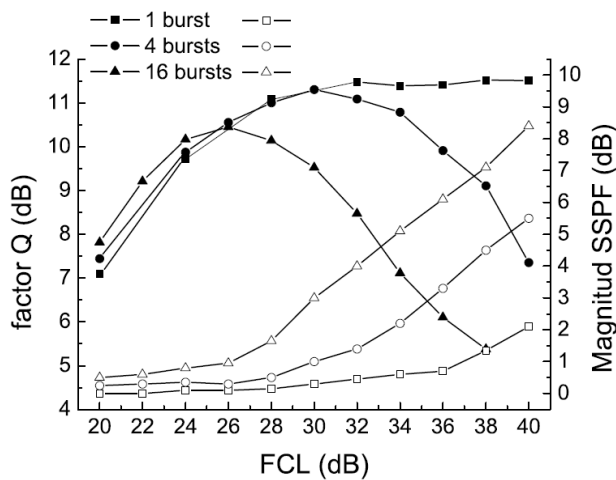


Figura 5: Medida del factor Q en función de FCL y curvas de magnitud de SSPF en tres escenarios

(FCL) requerido para prestaciones óptimas disminuye. Este hecho es debido a que la ganancia necesaria para el canal de realimentación aumenta al aumentar la magnitud de SSPF a la entrada del amplificador.

En el caso de **amplificadores ópticos de semiconductor**, se ha analizado el comportamiento de un dispositivo comercial con control de ganancia, denominado LOA (Linearized Optical Amplifier). El conjunto de resultados obtenidos para este tipo de amplificador demuestra que los LOAs son dispositivos ideales para operar como amplificadores de línea en redes basadas

en conmutación óptica de ráfagas o paquetes. Las penalizaciones encontradas son sensiblemente menores a aquellas observadas en el caso de GC-EDFAs. Es importante notar, que a pesar de las bajas penalizaciones observadas en la operación de amplificadores LOA en redes dinámicas, éstos presentan un moderado factor de ganancia y una relativamente alta figura de ruido, por lo cual es conveniente conocer estas penalizaciones y reducirlas en la medida de lo posible mediante un conocimiento de las condiciones de operación del amplificador y una correcta configuración del mismo.

5. Conclusiones

Se ha presentado una arquitectura de red basada en conmutación óptica de paquetes cuya viabilidad y prestaciones han sido analizadas tanto desde un punto de vista de tráfico como desde un punto de vista físico. Los resultados obtenidos han demostrado su relativamente alto rendimiento y su baja latencia.

En cuanto al estudio experimental de aspectos relacionados con dicha red, se ha propuesto y validado experimentalmente una técnica de *labeling* que por sus características de sencillez y eficiencia espectral resulta especialmente apropiada para la arquitectura propuesta. Por último, el análisis de amplificadores ópticos ha revelado la superioridad de los LOA sobre los GC-EDFA en lo que a tratamiento de tráfico dinámico se refiere. Los primeros resultan, por lo tanto, la mejor alternativa para redes OPS, presentando por otra parte menores coste y consumo de energía y espacio.