

# El efecto de la concatenación de filtros en la transmisión de supercanales en redes de fibra óptica

Por Pablo Torres Ferrera y Ramón Gutiérrez Castrejón, Coordinación de Eléctrica y Computación, IUNAM

El incesante incremento de la utilización de servicios de telecomunicaciones por la población de todo el mundo ha motivado el desarrollo de avanzadas tecnologías que permiten la transmisión de una cantidad de bits cada vez mayor a lo largo de decenas, centenas e incluso miles de kilómetros. El primer gran paso tecnológico en este sentido se dio en la década de los setenta, con la invención de las fibras ópticas monomodales de bajas pérdidas. Posteriormente, en la década de los noventa, y en buena medida motivado por la aparición de los amplificadores ópticos dopados de erbio, se desarrolló el uso de la multicanalización por división de longitud de onda o WDM (por sus siglas en inglés). La idea atrás de esta tecnología es dividir el considerable ancho de banda que ofrece la fibra óptica en canales, cada uno de ellos transmitido y recibido a una determinada longitud de onda (o frecuencia), pero transmitidos a través de la misma fibra. Así, cada canal ocupa un determinado intervalo espectral, y se separa de sus dos vecinos adyacentes mediante el uso de una banda de guarda que previene que se dé el indeseado fenómeno de diafonía (aparición en uno de los canales de una porción de la señal presente en otro canal), el cual generalmente causa un incremento en el número de errores durante la recepción de la señal digital que se transmite en cada uno de los canales ópticos. La finalidad de los más recientes avances en materia de telecomunicaciones ópticas es precisamente hacer más eficiente la utilización del espectro en sistemas WDM, es decir, buscar la manera de transmitir mayor información en canales que mantengan su ancho espectral, o bien transmitir a la misma tasa de bits en canales de menor ancho espectral. Una solución que integra ambos enfoques es el uso de formatos de modulación de alto orden transmitidos en canales WDM que prácticamente no incorporan banda de guarda, lo que da lugar a la aparición de los llamados supercanales, los cuales presentan tasas de transmisión en el orden de los cientos de Gb/s. Por ejemplo, mediante el uso de modulación DP-QPSK (*dual-polarization quadrature phase-shift keying*) en combinación con cuasi Nyquist-WDM, es posible transmitir siete subcanales, cada uno operando a 100 Gb/s, en un ancho de banda de 200 GHz, lo que representa una eficiencia espectral de 3.5 b/s/Hz para un súper-canal de 700 Gb/s. En la figura 1 se muestra el espectro óptico de este supercanal.

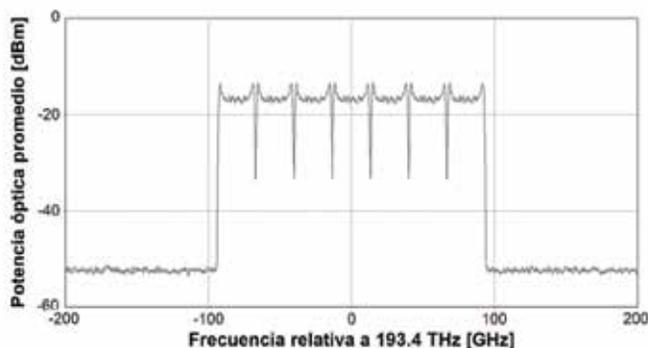


Figura 1. Espectro óptico de un supercanal conformado por siete subcanales con una tasa total de 700 Gb/s. Resolución de 1 GHz.

Como parte de los procesos de enrutamiento y conmutación que se dan en las redes ópticas de alta velocidad, es necesario desagregar subcanales que viajan en un supercanal o, incluso, apartar un supercanal del flujo total de información que se transmite por la fibra óptica. El proceso de extraer e incorporar canales ópticos en los nodos de una red es muy común y lo realiza un dispositivo conocido como multiplexor óptico reconfigurable de extracción e inserción o ROADM (por sus siglas en inglés). Su operación se basa en el uso de filtros ópticos. En particular, los filtros que se utilizan para dividir un supercanal en subcanales son muy sofisticados tecnológicamente hablando, ya que requieren de elementos de alta resolución espectral. El inconveniente de emplear ROADM en una red óptica es que los filtros en los que basan su funcionamiento afectan a la calidad de la señal que se transmite. Por tanto, conforme aumenta el número de ROADM por los que pasa la señal, el desempeño de la red en su conjunto se reduce. Sin embargo, hasta la fecha se desconoce el verdadero impacto que estos indispensables elementos tienen en términos de degradación de la señal transmitida, por lo que un análisis cuantitativo de su efecto, donde se considere la concatenación de filtros, tanto de resolución burda como de alta resolución o HSR (por sus siglas en inglés), resultaría de gran utilidad. Como parte de un proyecto financiado con fondos propios en el que se colabora con Athens

Information Technology ([www.ait.gr](http://www.ait.gr)), en Grecia, mediante el uso de filtros de alta resolución espectral desarrollados en la Universidad Hebrea de Jerusalén, Israel, el Instituto de Ingeniería se encuentra investigando este fenómeno. Para ello, se hace uso de complejos modelos numéricos que permiten simular la situación que se daría en una red óptica real, a la cual sería incosteable acceder físicamente. La investigación se basa en propagar una señal óptica, formada por tres supercanales, como los descritos anteriormente, a lo largo de una red constituida por enlaces de cinco tramos de 80 km, cuyas pérdidas se compensan exactamente utilizando un amplificador óptico, y al final de los cuales se encuentra situado un ROADM. En el elemento de enrutamiento se separa el supercanal central por medio del filtro burdo. Posteriormente, se extrae y se inserta alguno de los subcanales mediante la aplicación del filtro de alta resolución. Finalmente el supercanal procesado se inserta entre los otros dos supercanales para ser lanzado a lo largo del siguiente enlace. La figura 2 muestra la estructura simplificada del ROADM y en ella se explica gráficamente su operación.

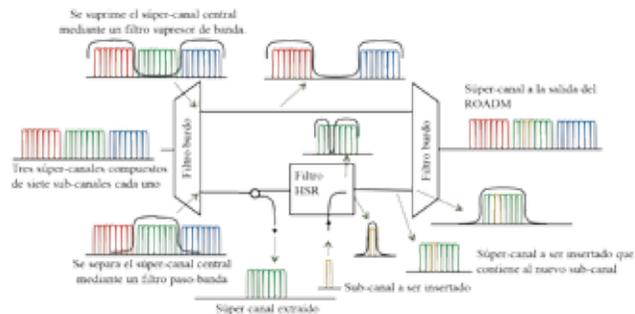


Figura 2. Estructura simplificada del ROADM que consta de dos bancos de filtros burdos y el filtro de alta resolución que permite extraer e insertar subcanales. Cada uno de los tres supercanales se compone de siete subcanales.

Cuando únicamente se estudia la concatenación de  $N$  filtros, resulta factible obtener un filtro equivalente cuya función de transferencia tiene el mismo efecto sobre una señal óptica que el que se obtendría al transmitir esta a través de los  $N$  filtros de manera sucesiva. La función de transferencia del filtro equivalente se obtiene multiplicando las funciones de transferencia individuales. Si cada filtro individual tiene cierto ancho de banda,  $BW_i$ , el ancho de banda del filtro equivalente resulta ser menor que  $BW_i$  y decrece de forma logarítmica a medida que se incrementa  $N$ , lo que se muestra gráficamente en la figura 3. En ella se presenta la función de transferencia del filtro equivalente a  $N$  filtros paso-banda burdos concatenados, donde  $N$  varía de 1 hasta 10. La situación es más compleja cuando se analiza el sistema de transmisión completo, ya que en este caso se deben también tomar en cuenta los

tramos de fibra y amplificadores, cuyas características físicas repercuten en la forma de la función de transferencia equivalente de todo el sistema. Aun así, la función de transferencia del filtro equivalente representa una primera aproximación sobre el comportamiento general del sistema analizado, lo cual es muy valioso. Por ejemplo, utilizándola se puede pronosticar que al atravesar varios ROADM el filtrado burdo afectará más a la señal que se transmite por los subcanales de los extremos del supercanal que a la de los canales internos. Esto se explica por la paulatina disminución del ancho de banda del filtro equivalente. Similarmente, el filtrado ocasionado por el filtro HSR afectará de manera más pronunciada a los subcanales adyacentes al subcanal que se extrae e inserta y a los canales extremos que al resto de los subcanales (ver figuras 2 y 3).

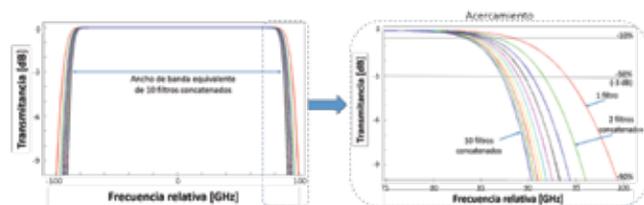


Figura 3. Función de transferencia del filtro equivalente a  $N$  filtros paso-banda burdos concatenados,  $N = 1, \dots, 10$ .

Con el fin de cuantificar el impacto en la calidad de la señal al atravesar varios nodos de la red donde se encuentran localizados los ROADM, se simularon los siguientes escenarios: (i) caso en que la señal se transmite por varios tramos sin considerar la presencia de ROADM: cada tramo está compuesto de 80 kilómetros de fibra óptica terminado en un amplificador óptico de erbio que compensa exactamente las pérdidas de la fibra; y (ii) caso en que después de cada cinco tramos, iguales a los descritos en el caso anterior, se sitúa un ROADM (es decir, cada 400 kilómetros) que extrae e inserta el subcanal tres del supercanal central. En la figura 4 se muestran curvas de razón de bit erróneo o BER (por sus siglas en inglés), en función de la distancia de transmisión para los dos escenarios mencionados anteriormente. El BER es un parámetro de desempeño muy utilizado en sistemas de comunicaciones digitales y se calcula como el número de bits erróneos normalizados con respecto al número de bits transmitidos. Claramente, cuanto menor sea el valor de BER, mejor será el desempeño del sistema. De acuerdo con lo mostrado en la figura 4, la medición del BER se realiza sobre los subcanales cuatro (adyacente) y siete (extremo) del supercanal central. El desempeño del subcanal uno es muy similar al del subcanal siete (ambos extremos), mientras que el del resto de los subcanales internos (2, 3, 5 y 6) es parecido al del subcanal cuatro.

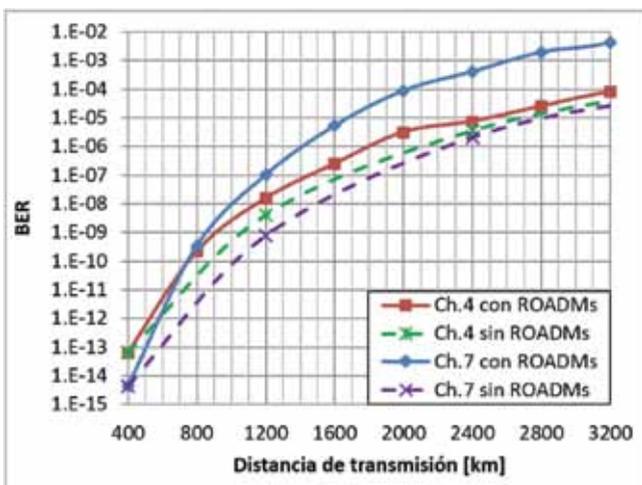


Figura 4. BER de un subcanal adyacente (Ch.4) al subcanal extraído e insertado (Ch.3) y de un subcanal extremo (Ch.7) como función de la distancia de transmisión con y sin presencia de ROADM.

En la figura 4 se observa que cuando solamente se considera la transmisión sin la presencia de los ROADM (caso i), los subcanales extremos tienen un mejor desempeño que los subcanales centrales. Al superar los 2500 km, aproximadamente, la diferencia se anula. Este comportamiento es consecuencia de la diafonía no lineal que tiene lugar en la fibra óptica y que es producida por el fenómeno conocido como mezclado de cuatro ondas. Cuando este fenómeno se manifiesta, las señales de los diferentes subcanales que se transmiten por la fibra se mezclan y producen tonos indeseados que interfieren con las señales transmitidas, lo cual las degrada. En un sistema multicanal uniformemente espaciado como el que aquí se analiza, el mayor número de tonos indeseados coincide precisamente con la frecuencia de los canales centrales, razón por la cual resultan ser los más afectados por este fenómeno no lineal.

En el escenario donde sí se considera la presencia de los ROADM (caso ii), tanto el desempeño de los subcanales internos como el de los extremos empeora con respecto al caso en que no se consideran. Este deterioro en el desempeño del sistema se debe tanto a la concatenación de los filtros de que se componen los ROADM, como al ruido que añaden estos elementos de red a la señal. Efectivamente, de acuerdo con la figura 4, antes de que la señal atraviese el primer ROADM, situación correspondiente a una distancia de transmisión de 400 km (cinco tramos de 80 kilómetros), el desempeño de los subcanales extremos es mejor que el de los internos. Tras incluir un ROADM, situación correspondiente a una distancia de transmisión de 800 kilómetros (cinco tramos entre el transmisor y el ROADM y cinco tramos entre este y el

receptor), el desempeño de los subcanales extremos con respecto a los internos se invierte. La diferencia en desempeño se intensifica al incluir un mayor número de ROADM (distancias de transmisión a partir de 1200 km). El hecho de que los subcanales extremos tengan un deterioro en su desempeño más pronunciado que los subcanales internos se debe exclusivamente a la concatenación de los filtros que componen los ROADM, tanto de los filtros burdos como de los de alta resolución. Nótese que el efecto del ruido que añade cada ROADM es el mismo para cualquier subcanal, por lo que su impacto no explica esta diferencia en términos de BER.

El impacto negativo en el desempeño del sistema que resulta de incluir los ROADM en los nodos de la red durante la transmisión de los supercanales ópticos puede evidenciarse cuantitativamente midiendo en las gráficas de la figura 4 la máxima distancia de transmisión posible para mantener una BER menor a  $1 \times 10^{-3}$ . Esta condición de desempeño se acepta comúnmente cuando se emplean sistemas con corrección de errores, como es el caso del sistema aquí analizado. De cumplirse, se considera que la transmisión se efectúa "libre de errores". Para el escenario en que no se incluyen ROADM esta máxima distancia es de alrededor de 5000 km (no se alcanza a apreciar en la figura 4). Para el caso en que se incluyen los ROADM en el análisis, el desempeño de los subcanales extremos limita esta máxima distancia a aproximadamente 2500 km, lo que implica que la señal puede transmitirse a través de un máximo de cinco ROADM. Esto se traduce en una disminución considerable, de alrededor de la mitad, en el alcance de los sistemas ópticos conmutados mediante ROADM.

La investigación que aquí se presenta pone de manifiesto la necesidad de contar con filtros ópticos con mejores características, que reduzcan el impacto del filtrado en los ROADM. La incorporación de tecnologías de filtrado óptico de vanguardia permitirá lograr mayores alcances de transmisión, más cercanos a los que se obtienen cuando no se emplean estos módulos de inserción y extracción de subcanales que son indispensables para darle la flexibilidad necesaria a las redes ópticas del futuro. El diseño y la fabricación de mejores filtros ópticos, así como la evaluación de su impacto en las redes ópticas de transmisión, es uno de los objetivos de nuestra colaboración internacional. |