

Mecanismo de Encaminamiento Dinámico en Redes ASON

Xavier Masip Bruin, Raül Muñoz*, Sergio Sánchez López Josep Solé Pareta, Jordi Domingo Pascual y Gabriel Junyent

Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)
Centre de Comunicacions Avançades de Banda Ampla (CCABA)
Jordi Girona, 1-3, 08034 Barcelona
{xmasip, sergio, pareta, jordi}@ac.upc.es, junyent@tsc.upc.es

*Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC)
Optical Networking Group
Gran Capità, 2-4, pl. 2ª, 08034 Barcelona
raul.munoz@cttc.es

1. Introducción:

La creciente demanda de capacidad de transmisión, debida en gran medida tanto al incremento de usuarios como a los requisitos de transmisión solicitados por estos usuarios está haciendo necesario modificar la arquitectura de la infraestructura de telecomunicación pública comúnmente usado hasta la actualidad, a fin de responder a esta demanda. Así, tal y como se muestra en la Fig.1, la arquitectura de red está evolucionando progresivamente hacia la red de transporte óptica inteligente, conocida como *Automatically Switched Optical Network (ASON)*.

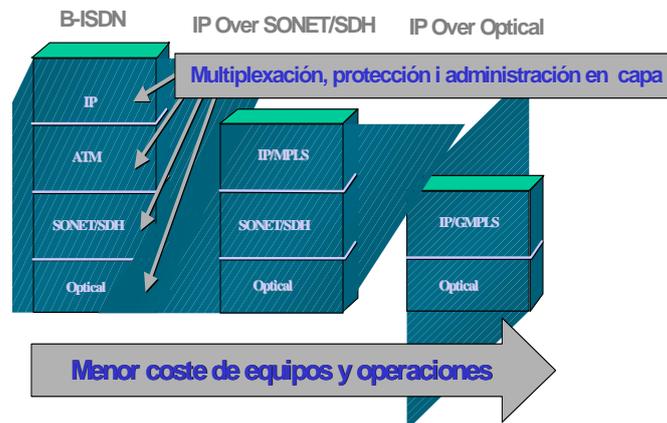


Figura 1. Evolución de la infraestructura de telecomunicación pública hacia una red óptica

A fin de lograr esta evolución, el IETF está definiendo el *Generalized Multiprotocol Label Switching (GMPLS)* [1] como una extensión del ya conocido *Multiprotocol Label Switching (MPLS)*, para que sea capaz de realizar no tan sólo conmutación rápida de paquetes sino también conmutación de circuitos espacial, temporal (*Time Division Multiplexing, TDM*) o de longitud de onda (*Wavelength Division Multiplexing, WDM*). De

manera que las redes ASON serán redes ópticas de conmutación automática de canales ópticos formadas por una serie de nodos ópticos (*Optical Cross-Connects*, OXC) con capacidad para encaminar longitudes de onda dinámicamente. Estos nodos además de realizar puramente tareas de conmutación de longitudes de onda deberán también poder realizar tareas de descubrimiento de vecinos ópticos, descubrimiento de la topología, asignación de recursos mediante protocolos de encaminamiento, y señalización. Todo ello para poder establecer, eliminar o modificar canales ópticos de forma dinámica. Dichas funciones serán realizadas por un plano de control basado en los protocolos GMPLS anteriormente mencionados.

En nuestro estudio nos centraremos en un entorno clásico IP/GMPLS aplicando el OSPF como protocolo de encaminamiento. En realidad, una ASON está formada por tres planos, el plano de transporte, el de control y el de gestión. En la Fig.2 se muestra la arquitectura lógica de una ASON, mostrando los diferentes componentes que la integran. El plano de transporte (ó Red de Transporte Óptica) está formado por conmutadores ópticos y enlaces (fibras) DWDM (*Dense WDM*) y suministra canales ópticos unidireccionales o bidireccionales entre usuarios. El plano de control es quien dota de inteligencia a la red óptica, soportando el establecimiento, modificación y eliminación de canales ópticos como resultado de una petición de la red cliente (a través de la UNI) o del sistema de gestión (conexión *soft-permanent*). El plano de control está implementado por un controlador de conexiones ópticas OCC en cada nodo y una red de señalización. Por último, el plano de gestión lleva a cabo las funciones de gestión (averías, configuración, contabilidad y seguridad) para los planos de transporte y control.

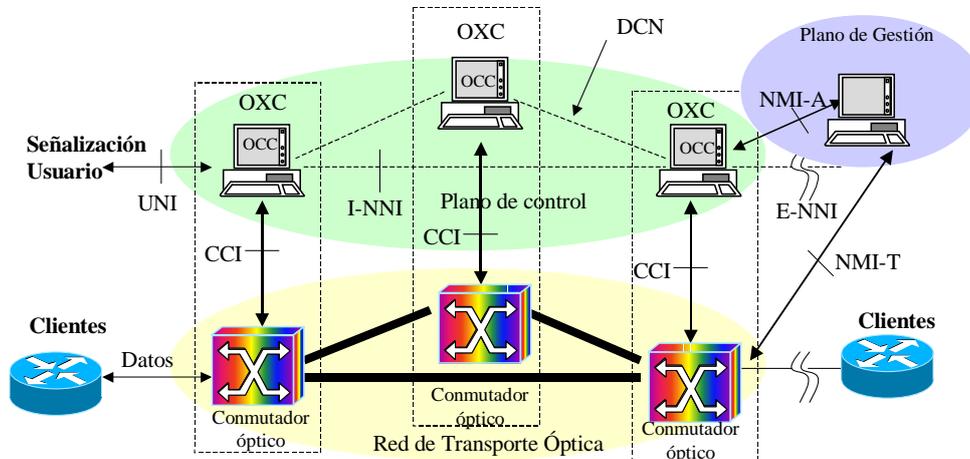


Figura 2. Arquitectura lógica de una red ASON

2. Aproximación al encaminamiento óptico

Un factor muy importante en el desarrollo de redes ópticas es el encaminamiento. A diferencia de un entorno puramente IP, en un medio óptico el mecanismo de encaminamiento no tan solo debe decidir cual va a ser la ruta (*lightpath*) por la cual se va a enviar la información, sino también la longitud de onda λ (o concatenación de λ s) que va a llevar asociada. Así, el problema de seleccionar un camino óptimo en redes ópticas se conoce

como Routing and Wavelength Assignment (RWA) [2] y su estudio variará en función de si el tráfico es estático (Static RWA) o dinámico (Dynamic RWA) [3].

Una primera aproximación al estudio del RWA se basa en descomponer el problema en dos subproblemas, la selección de la ruta física (problema de encaminamiento) y la asignación de una λ por enlace a través de la cual se va a transmitir la información. Basándose en esta descomposición, en [4] se pueden encontrar diferentes soluciones al problema RWA. Así, por una parte existen tres aproximaciones al problema de encaminamiento, denominadas encaminamiento fijo (*fixed-routing*), encaminamiento fijo-alternado (*fixed-alternate routing*) y encaminamiento adaptativo (*adaptive routing*). Dado un conjunto de rutas precalculadas entre cualquier posible par fuente destino, el encaminamiento fijo siempre seleccionará la misma ruta, mientras que el encaminamiento fijo-alternado seleccionará una de ellas según una cierta heurística. Por el contrario en el encaminamiento adaptativo el *lightpath* se selecciona dinámicamente en función del estado actual de la red según cierta heurística como puede ser *Least-Congested Path* (LCP) [5]. El LCP selecciona aquellos enlaces con mayor disponibilidad de longitudes de onda para establecer la ruta. El documento [6] verifica que aplicar LCP a un conjunto de rutas limitado por la previa aplicación del algoritmo de camino más corto (*shortest path*) presenta mejores resultados que aplicar tan sólo el LCP. En general, si bien las aproximaciones basadas en rutas estáticas reducen la complejidad del mecanismo de selección de ruta frente a aquellas basadas en el encaminamiento adaptativo, presentarán una mayor posibilidad de sufrir bloqueo de conexión.

Por otra parte, en cuanto al subproblema de asignación de longitud de onda, existen en la literatura una gran variedad de mecanismos que pueden ser combinados junto a cualquiera de las estrategias de selección de ruta anteriormente citadas, como por ejemplo citaremos mecanismos de asignación de longitud de onda aleatoria (*random*), de la primera que encaje (*first-fit*), de la menos usada, de la más usada, por el mínimo producto, por la suma máxima, etc.

Genéricamente hablando existen dos tipos de redes completamente ópticas según la forma de utilización de las longitudes de onda. Así, en aquellas redes que no disponen de conversores de longitud de onda, conocidas como *redes de longitud de onda selectiva* (WS), una conexión sólo podrá ser establecida cuando la misma longitud de onda esté disponible en todos los enlaces entre fuente y destino. Por otra parte, en aquellas redes que incluyen conversores de longitud de onda, conocidas como *redes de longitud de onda intercambiable* (WI), la ruta entre fuente y destino podrá ser establecida usando una concatenación de longitudes de ondas distintas (una por cada uno de los enlaces de la ruta seleccionada). Cualquiera de las posibles estrategias mencionadas anteriormente para solucionar el problema del RWA pueden ser aplicadas a ambos tipos de redes, si bien para redes WS se deberán considerar ciertas restricciones a fin de asegurar la continuidad de longitud de onda.

Una solución óptima del problema del RWA se basa en suponer un grado de fiabilidad total de la información de estado de la red existente en los nodos de la misma. Esta información puede ser global (de toda la red), bien sea centralizada o distribuida, o local. Cuando la información es global y se halla de centralizada, es que

existe un elemento en la red el cual dispone de toda la información a partir de la cual dicho elemento seleccionará y establecerá un *lighpath* para cada petición de conexión que se reciba. En el caso en que dicho elemento de red sea el nodo de entrada al dominio, el encaminamiento se denomina encaminamiento por fuente o explícito. Cuando la información global de estado de la red se encuentra de forma distribuida, cada nodo en la red deberá mantener información completa del estado de la red. En ambos casos, siempre que una nueva conexión se establezca o que una ya existente se libere, todos los nodos deberán ser correctamente informados a fin de que puedan actualizar su información de estado de la red. Este proceso se realiza mediante el envío de mensajes de encaminamiento, los cuales en una red altamente dinámica pueden generar una sobrecarga (*overhead*) de señalización, en algunos casos muy elevada, que debe ser evitado o cuando menos reducido al máximo.

Una forma de reducir dicho sobrecarga es usar información de estado local, dado que en este caso cada nodo sólo contiene información de estado de los enlaces directamente conectados a él. Un paso intermedio entre información de estado local y global es el encaminamiento adaptativo basado en información de vecinos [7], el cual aplica el algoritmo LCP si bien sólo considera los k primeros enlaces en cada ruta. En [7] se demuestra que el comportamiento exhibido cuando $k = 2$ es altamente parecido al exhibido por el encaminamiento fijo-alternado. Una posible estrategia para el encaminamiento adaptativo con información local la podemos encontrar en [8] bajo el nombre de *deflection routing* o *alternate link routing*. Así, mientras que en el encaminamiento fijo-alternado se precálculan un conjunto de posibles rutas entre cualquier par de nodos fuente-destino, en el *deflection routing* se permite a cada nodo mantener una tabla de encaminamiento que contenga diferentes enlaces para cada posible destino, de forma que cualquiera de estos enlaces pueda ser usado para transmitir el tráfico en función de la disponibilidad de recursos de los mismos.

Finalmente, aunque los mecanismos de encaminamiento basados en información global requieren un proceso de actualización de información de estado de la red que puede derivar en una sobrecarga de señalización no deseable, presentan un mejor comportamiento que aquellos mecanismos basados en información local, todo ello siempre y cuando la información de estado de la red esté perfectamente actualizada.

3. Entorno de trabajo y definición del problema

Nuestro trabajo se centra en una ASON formada por un plano de transporte y un plano de control basado en la arquitectura GMPLS y nuestro objetivo final es minimizar la probabilidad de bloqueo de nuevas conexiones para un número fijo de conversores de longitud de onda. Inicialmente, consideraremos que no existen dichos conversores y que por tanto a cada petición de canal óptico se le asignará una longitud de onda común extremo a extremo. Este hecho es de vital importancia en las redes ópticas, dado que si no existen conversores de longitud de onda, el RWA debe asignar una longitud de onda que esté disponible en todo el camino de principio a fin, es decir, no puede asignar diferentes longitud de onda en los diferentes enlaces que tendrá el canal óptico. Finalmente, supondremos que el encaminamiento se realiza de forma explícita en el nodo de

entrada al dominio óptico, por lo que la información de estado es global y centralizada en los nodos de acceso de los dominios ópticos.

En este entorno de trabajo, cuando el nodo de entrada al dominio óptico recibe una petición de canal óptico debe aplicar un algoritmo de encaminamiento para calcular la ruta a seguir y cual debe ser la longitud de onda λ que se le asignará. Para ello dicho algoritmo se basa en la información existente en la base de datos de dicho nodo, donde se almacenará la información de estado de la red. Es fácilmente observable que para que el algoritmo de encaminamiento funcione perfectamente dicha información deberá ser completamente fiable (perfectamente actualizada), o sea deberá en todo momento representar fielmente cual es el estado real de la red. Aunque existen mecanismos de actualización de dichas bases de datos que garantizarán dicha fiabilidad, tal y como se ha descrito anteriormente, si la red es altamente dinámica presentando constantes peticiones y liberaciones de canales ópticos, el número de mensajes de actualización que deben ser enviados por la red pueden generar una sobrecarga que no es en ningún modo deseable.

Existen mecanismos para reducir el número de mensajes de actualización y con ello la sobrecarga de señalización, destacaremos los basados en la definición de políticas de disparo (*triggering policies*), que definen cuando debe ser enviado un mensaje de actualización, o en la agrupación de información de estado como el *link bundling* que consisten en agrupar enlaces que comparten características de *Ingeniería de Tráfico* (TE) y se anuncian en la red óptica como si fuera un único enlace. No obstante, estos mecanismos también provocan que la información contenida en las bases de datos de estado de la red no esté perfectamente actualizada y por tanto puede no representar correctamente el estado de la red. Esto puede conllevar a que la longitud de onda que el nodo de entrada considera que está libre extremo a extremo en el *lightpath* seleccionado, en realidad en algún nodo intermedio de dicho *lightpath* no estuviera disponible. Esto provocaría que cuando el mensaje de establecimiento de la ruta llegara a dicho nodo intermedio, dado que solicitaría transmitir a una longitud de onda que en realidad no estaría disponible y debido a la falta de conversores de longitud de onda en dicho nodo, se bloquearía la conexión, aumentando por consiguiente la probabilidad de bloqueo tal y como se muestra mediante el análisis de distintas simulaciones descrito en [9].

Una opción para solucionar el problema sería añadir conversores de longitud de onda de forma que ante el posible bloqueo de una conexión, se pudiera cambiar a otra longitud de onda que estuviera disponible. Sin embargo, dado que a priori no se conoce cual va a ser la longitud de onda que potencialmente puede no estar disponible, tampoco se conoce el número de conversores de longitud de onda a utilizar ni cual debe ser su situación. Además, esta solución que podemos denominar como *solución hardware* tiene actualmente un alto coste económico dado el elevado precio de los conversores de longitud de onda.

En este artículo se propone una *solución software* al problema basada en la implementación de un mecanismo de encaminamiento dinámico basado en información global, que tendrá en cuenta la inexactitud en la información de estado de la red en el momento de seleccionar la ruta, de forma que como resultado se reduzca la probabilidad de bloqueo de conexiones de la red. Este mecanismo se denomina *BYPASS Based Optical Routing* (BBOR) El BBOR aparece como la extensión óptica del mecanismo de encaminamiento denominado

BYPASS Based Routing (BBR) presentado por los autores en [10] cuya eficacia ya ha sido evaluada en un entorno IP/MPLS. El trabajo que se realizará en este artículo es una primera aproximación a la aplicabilidad del BBR a redes ópticas. Para ello deben modificarse adecuadamente la información almacenada en las bases de datos de estado de la red, los parámetros de selección de rutas y las posibles políticas de disparo a usar.

4. Revisión del *BYPASS Based Routing*

El *BYPASS Based Routing* es un mecanismo de encaminamiento que reduce la probabilidad de bloqueo de nuevas conexiones causada por la inexactitud existente en la información de estado de la red mediante la cual se seleccionan las rutas que seguirá el tráfico, cuando dicha inexactitud es debida a la aplicación de ciertas políticas de disparo. Este mecanismo ha sido probado en un entorno IP/MPLS consiguiendo una sustancial mejora en la probabilidad de bloqueo respecto a otras soluciones existentes en la literatura. El principal concepto del BBR es similar a aquel usado en el *deflection routing* y deriva de [11] donde se analiza el uso de *protection switching* para obtener un rápido reencaminamiento. Sin embargo, existen importantes diferencias entre ambos métodos. Así, a diferencia del *protection switching*, en nuestra propuesta el camino principal o primario y el alternativo (denominado *bypass*) se calculan pero no se establecen conjuntamente. En cuanto al *deflection routing* las diferencias son varias. Así, mientras que en esta aproximación basándose en información local del estado de la red las posibles rutas son precalculadas y debidamente ordenadas en cada nodo para ser usadas en función de la disponibilidad de recursos en ese momento, en el mecanismo BBR la información de estado de la red es global, de forma que se puede aplicar encaminamiento explícito el cual aporta un mayor control sobre el estado de la red no realizándose ningún precálculo de rutas.

Dos son los conceptos más importantes en el mecanismo BBR, la definición de una nueva clase de enlace denominado *Obstruct-Sensitive Link* (OSL) y la forma como dichos enlaces son usados a fin de optimizar el proceso de selección de rutas cuando la información de encaminamiento no es completamente fiable. Así, un enlace se define como OSL cuando potencialmente puede no ser capaz de soportar los requerimientos del tráfico que solicita el canal óptico. Dado que la inexactitud es debida a la política de disparo que se ha aplicado para reducir la sobrecarga de señalización, la definición de un OSL se realiza según sea el tipo de política de disparo usada. El funcionamiento del mecanismo BBR varía respecto a cualquier algoritmo de encaminamiento explícito en dos factores. Primeramente, mediante la implementación del mecanismo BBR el nodo fuente calculará la ruta primaria así como tantas rutas de *bypass* como enlaces existan definidos como OSLs. En segundo lugar, asumiendo que aquellos enlaces que no podrán soportar los requerimientos del tráfico son sólo discriminados en el tiempo de establecimiento de la ruta, cuando un nodo intermedio en la ruta primaria seleccionada detecta un enlace con un ancho de banda disponible menor que el requerido por el tráfico, enviará el mensaje de establecimiento a través de la ruta explícita que puentea dicho enlace. Evidentemente para que el mecanismo BBR funcione correctamente, dichos enlaces deberán haber sido definidos como OSL a fin de que exista una ruta de *bypass* que los pueda evitar. Además, dichas rutas de *bypass* deben ser explícitamente enviadas junto con la ruta primaria en el mensaje de establecimiento de la ruta. En [12] puede encontrarse información sobre el mecanismo usado para establecer las rutas de *bypass*.

5. Descripción del *BYPASS Based Optical Routing*

En este artículo se propone un nuevo mecanismo de encaminamiento adaptativo denominado BBOR para hacer frente a los problemas causados por carecer de información de estado de la red totalmente fiable. Así pues, el objetivo primordial de este mecanismo es reducir la probabilidad de bloqueo debida a dicha inexactitud. Partiendo del mecanismo BBOR, se generan dos algoritmos de encaminamiento cuyo funcionamiento será analizado mediante un ejemplo ilustrativo. Un aspecto muy importante en el diseño del mecanismo BBOR es la consideración de cual va a ser la política de disparo que va a ser usada para reducir la sobrecarga de señalización, ya que la inexactitud introducida en la información de estado de la red que se tratará en este artículo dependerá única y exclusivamente de ésta. A fin de poder modelar dicha inexactitud, su fuente, es decir la política de disparo en uso, debe ser perfectamente conocida desde un punto de vista analítico, lo cual nos conlleva a eliminar aquellas políticas basadas en intervalos de tiempo. Así pues los autores sugieren una nueva política de fácil comportamiento y descripción a fin de poder definir perfectamente la inexactitud que se introduce en la información de estado de la red.

La política de disparo introducida en este artículo se basa en incluir la congestión de la red en la decisión de envío de mensajes de actualización. Así, un elemento de la red enviará un mensaje de actualización a los demás elementos de la red siempre que un número fijo N de longitudes de onda cambien su estado, es decir, después de que un número fijo de conexiones N sea establecido o liberado. Cambiando el valor de N será posible evaluar el impacto que producen en la probabilidad de bloqueo diferentes grados de inexactitud en la información de estado de la red.

La principal característica del BBOR es que permite a ciertos nodos de la ruta primaria seleccionada, reencaminar dinámicamente el mensaje de establecimiento enviado por el nodo fuente para establecer la ruta, hacia una ruta alternativa distinta (*bypass*), cuando debido a la inexactitud existente en la información de estado de la red la ruta primaria no puede soportar los requerimientos del tráfico para el cual dicha ruta ha sido seleccionada de forma explícita por el nodo fuente. Básicamente, existirían dos posibles opciones de reencaminamiento, cambiar la ruta manteniendo la longitud de onda o bien cambiar la longitud de onda manteniendo la ruta. Dado que en este artículo consideramos redes WS, la primera opción será la elegida. Por lo tanto, cuando un nodo intermedio en la ruta primaria decida reencaminar el mensaje de establecimiento del canal óptico procedente del nodo fuente, debido a la imposibilidad de disponer de la misma longitud de onda en el enlace inicialmente seleccionado, enviará dicho mensaje de establecimiento a través de una ruta de *bypass* distinta, la cual evitará el enlace que imposibilita mantener la misma longitud de onda extremo a extremo.

Básicamente dos son los factores más importantes en la aplicación del BBOR que deben ser perfectamente descritos, decidir qué longitud de onda y en qué enlace deberá ser puenteada y calcular las rutas de *bypass*. Por una parte, del mismo modo que en un entorno IP/MPLS donde los enlaces a ser puenteados se definían como OSL, en una ASON las longitudes de onda que deberán ser puenteadas se denominan *Obstruct-Sensitive-Wavelength* ($OS\lambda$), de forma que las rutas de *bypass* serán calculadas sólo para aquellas longitudes de onda definidas como $OS\lambda$. Como se ha visto anteriormente el mecanismo usado para definir cuando una

BYPASS Based Optical Routing Mechanism (BBOR)

Entrada: Una petición de conexión entre cualquier par fuente-destino (s,d) con una limitación en la continuidad de longitud de onda extremo a extremo

Salida: Una ruta explícita entre (s,d) con una longitud de onda común disponible en todos los enlaces a lo largo de la ruta seleccionada, con suficientes rutas de *bypass* para puentear los efectos producidos por la inexactitud en la información de estado de la red en aquellas longitudes de onda de aquellos enlaces que han sido definidas como *obstruct-sensitive-wavelength* ($OS\lambda_i$).

ALGORITMO 1:

1. Selecciona las rutas más cortas
2. Selecciona aquella λ_i en todas las rutas que minimice $OS\lambda_{i,L}$
3. Si existen más de una se elige la menos congestionada según $OS\lambda_{i,L}$ (F)
4. Calcula rutas de *bypass* para todos aquellos enlaces con λ_i definidas como $OS\lambda_i$

ALGORITMO 2:

1. Selecciona las rutas más cortas
2. Selecciona la λ_i menos congestionada en cada ruta según el valor de F en $OS\lambda_{i,L}$ (F)
3. Si existen más de una se selecciona aquella λ_i que minimice $OS\lambda_{i,L}$
4. Calcula rutas de *bypass* para todos aquellos enlaces con λ_i definidas como $OS\lambda_i$

longitud de onda λ_i deberá ser definida como $OS\lambda_i$ en un enlace determinado, dependerá de cual sea la política de disparo aplicada. En la sección anterior se ha introducido una nueva política de disparo basada en la definición de un valor umbral, de forma que un mensaje de actualización será enviado sólo después de que un valor N de longitudes de onda cambien su estado. De esta forma, podemos decir, que una λ_i será definida como $OS\lambda_i$ en un enlace determinado cuando el número de λ_i disponibles en este enlace sea menor que un cierto porcentaje T de N . Variando T conseguimos variar la definición del $OS\lambda_i$. Dado que el número de $OS\lambda_i$ estará incluido en el proceso de selección de la ruta, dicho valor deberá calcularse para cada enlace cada vez que se reciba una nueva petición de conexión. A fin de que las rutas de *bypass* puedan ser explícitamente distribuidas en el mismo mensaje de establecimiento de la ruta primaria, será el nodo fuente quien deberá realizar las dos funciones básicas del mecanismo BBOR, es decir, detectar aquellas longitudes de onda en cualquier enlace que pudieran no estar disponibles en el momento de establecimiento de la ruta, y calcular una ruta de *bypass* que pueda ser usada cuando así se requiera para aquellas longitudes de onda de los enlaces que formen parte del camino primario seleccionado.

Finalmente, con el fin de incluir las $OS\lambda_i$ en el proceso de selección de rutas, se añade un nuevo parámetro a dicho proceso, denominado $OS\lambda_{i,L}$ (F), donde L representa el número de enlaces en el cual λ_i ha sido definida como $OS\lambda_i$ y F es el mínimo número de fibras en la cual dicha λ_i está disponible en todos los enlaces a lo largo de la ruta seleccionada.

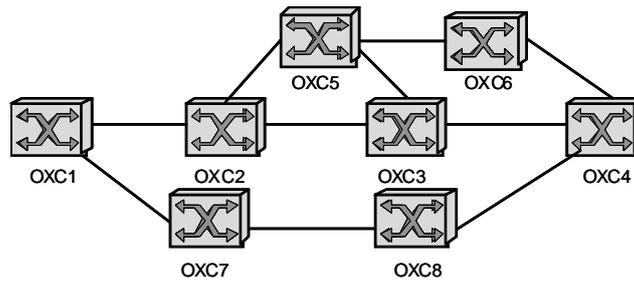


Figura 3. Topología de red usada en el ejemplo

Partiendo de este funcionamiento del mecanismo BBOR, se generan 2 nuevos algoritmos dinámicos de encaminamiento óptico. En el recuadro de la página anterior se muestra el comportamiento de ambos algoritmos. Es importante destacar que ambos algoritmos utilizan un algoritmo de encaminamiento por el camino más corto para seleccionar la ruta física, y que una vez dicha ruta es seleccionada, se asignará la longitud de onda a usar mediante dos procedimientos distintos, que dan lugar a los dos nuevos algoritmos. Dichos procedimientos se diferencian en el orden como los parámetros L y F son considerados.

6. Ejemplo ilustrativo del funcionamiento del mecanismo BBOR.

Para explicar el funcionamiento del mecanismo BBOR y de los dos algoritmos que de éste se deducen, vamos a aplicar ambos algoritmos a una topología como la mostrada en la Fig.3. Suponiendo que cada OXC incluye funciones de control y que dispone de capacidad suficiente para ejercer los requerimientos de señalización necesarios, consideraremos 10 fibras por enlace y 4 longitudes de onda por fibra. La actualización de la información de estado de la red se realiza mediante la política de disparo definida en este artículo, de forma que los mensajes de actualización se enviarán siempre que se produzcan $N = 6$ cambios en el estado global de las longitudes de onda. Además, consideraremos $T = 50\%$, es decir, una longitud de onda λ_i será definida como $OS\lambda_i$ en un enlace cuando el mínimo número de longitudes de onda λ_i disponibles en dicho enlace sea menor o igual a 3. Finalmente consideraremos que las peticiones de conexión se reciben en OXC1 con destino a OXC4. En la Tabla 1 se muestra la información de estado de la red existente en OXC1, que consiste en el número de longitudes de onda disponibles en cada enlace. Según esta información en la Tabla 2 se muestra la tabla de encaminamiento existente en OXC1, donde se muestran las posibles rutas que unen OXC1 con OXC4 y el valor del parámetro $OS\lambda_{i,L}$ (F) para cada una de ellas.

Finalmente, en la Tabla 3 se muestra el proceso de aplicación del mecanismo de BBOR en detalle, analizando detenidamente cada uno de los pasos en la ejecución de los algoritmos deducidos del mecanismo BBOR. Como resultado se obtiene una distinta selección de ruta física y una diferente asignación de longitud de onda para cada algoritmo. Así, mientras que para el algoritmo 1 se selecciona la λ_1 en la ruta formada por los OXC 1-2-3-4, en el algoritmo 2 se selecciona la λ_2 en la ruta formada por los OXC 1-7-8-4.

Enlace (OXC)	λ_1 λ_2 λ_3 λ_4	Enlace (OXC)	λ_1 λ_2 λ_3 λ_4
1-2	6 3 3 6	5-6	0 7 3 3
2-3	2 3 6 0	6-4	1 1 1 1
3-4	6 3 0 2	1-7	6 3 1 6
2-5	6 2 0 1	7-8	0 3 6 1
5-3	6 6 6 6	8-4	6 6 0 6

Tabla 1. Información de estado de la red existente en OXC1

Ruta (OXC)	λ_1 λ_2 λ_3 λ_4	OS $\lambda_{i,L}$ (F)
1-2-3-4	2 3 0 0	$\lambda_{1,1}(2)$, $\lambda_{2,3}(3)$
1-2-5-3-4	6 2 0 1	$\lambda_{2,3}(2)$, $\lambda_{4,2}(1)$
1-2-5-6-4	0 1 0 1	$\lambda_{2,3}(1)$, $\lambda_{4,3}(1)$
1-7-8-4	0 3 0 1	$\lambda_{2,2}(3)$, $\lambda_{4,1}(1)$

Tabla 2. Tabla de encaminamiento existente en OXC1

Pasos del BBOR	Algoritmo 1	Algoritmo 2
1	ruta 1: 1-2-3-4 ruta 2: 1-7-8-4	ruta 1: 1-2-3-4 ruta 2: 1-7-8-4
2 (alg.1)	ruta 1: $\lambda_{1,1}$ ruta 2: $\lambda_{4,1}$	
2 (alg.2)		ruta 1: $\lambda_{2,3}$ (3) ruta 2: $\lambda_{2,2}$ (3)
3 (alg.1)	ruta 1: $\lambda_{1,1}(2)$ ruta 2: $\lambda_{4,1}(1)$	
3 (alg.2)		ruta 1: $\lambda_{2,3}$ ruta 2: $\lambda_{2,2}$
4	λ_1 es OS en 2-3 Bypass en: 2-5-3	λ_2 es OS en 1-7-8 No hay bypass

Tabla 3. Ejemplo ilustrativo del funcionamiento del mecanismo BBOR

Una vez las rutas han sido seleccionadas debe aplicarse el proceso de cálculo de rutas de *bypass*. Así, cuando se utiliza el algoritmo 1, dado que la λ_1 ha sido definida como OS λ_1 en el enlace OXC2-OXC3, se seleccionará una ruta de *bypass* a lo largo de los OXC 2-5-3 que podría ser utilizada cuando en el momento de establecimiento de la ruta se observe que dicho enlace no dispone de ninguna λ_1 disponible. Sin embargo, cuando se utilice el algoritmo 2, en el cual la longitud de onda λ_2 ha sido definida como OS λ_2 en los enlaces OXC 1-7-8, no existirá ninguna ruta posible que pueda ser utilizada como *bypass* de dichos enlaces. En este caso el mecanismo de BBOR no podría ser completamente aplicado. En la actualidad se están realizando diversas modificaciones en el mecanismo general BBR para contemplar esta situación en un entorno IP/MPLS.

7. Conclusiones y trabajo futuro

En este documento se presenta un nuevo mecanismo dinámico de encaminamiento óptico denominado *BYPASS Based Optical Routing* (BBOR) pensado para reducir los efectos causados en el comportamiento de la red y más concretamente en la probabilidad de bloqueo de conexiones, debidos a disponer de información

de estado de la red poco fiable. Este mecanismo aparece como una extensión del mecanismo de encaminamiento *BYPASS Based Routing* (BBR) propuesto por los autores y cuya mejora en el comportamiento de la red ya ha sido evaluada en un entorno IP/MPLS. Dicha inexactitud en la información de estado de la red aparece en parte debida a las políticas de disparo que se usan para reducir el volumen de mensajes de actualización necesarios requeridos para mantener una red de comportamiento altamente dinámico con información de encaminamiento perfectamente actualizada. A fin de conseguir modelar dicha inexactitud, en el artículo se propone una nueva política de disparo basada en la definición de un valor umbral que permitirá reducir el número de mensajes de actualización.

Del mecanismo BBOR se deducen dos algoritmos que son analizados en este documento y cuyo comportamiento se detalla mediante su aplicación a un ejemplo demostrativo. A partir de este ejemplo demostrativo, basado en la existencia de una topología determinada y la asunción de ciertas condiciones de contorno, se analiza el comportamiento del BBOR para verificar la influencia de este mecanismo, que tiene en cuenta la inexactitud de la información de estado de la red existente en las bases de datos, sobre la probabilidad de bloqueo de la red.

Actualmente se está realizando la implementación de dichos algoritmos en un simulador de red basado en NS2 que nos permitirá cuantificar el rendimiento del mecanismo BBOR.

Agradecimientos

Este trabajo está financiado parcialmente por la CICYT TIC 99-0572-C02-02 y la CIRIT 2001-SGR00226.

Referencias

- [1] <http://www.gmpls.org/>
- [2] Z. Zhang, A. S. Acampora, "A Heuristic Wavelength Assignment Algorithm for Multihop WDM Networks with Wavelength Routing and wavelength Re-use", *IEEE/ACM Trans.Networking*, 3(3), pp.281-288, June 1995.
- [3] H. Zang, J. P. Jue, L. Sahasrabudhe, R. Ramamurthy, B. Mukherjee, "Dynamic Lighpath Establishment in Wavelength-Routed WDM Networks", *IEEE Communications Magazine*, September 2001
- [4] H. Zang, J. P. Jue, B. Mukherjee, "A Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength-Routed Optical WDM Networks", *Optical Networks Magazine*, January 2000.
- [5] K. Chan, T.P. Yun, "Analysis of Least Congested Path Routing in WDM Lightwave Networks", in *Proceedings INFOCOM'94*, vol.2, pp.962-969.
- [6] R. Ramaswami, A. Segall, "Distributed Network Control for Optical Networks", *IEEE/ACM Trans.Net.*, vol.5, n°:6, pp.936-943, Dec. 1997.
- [7] L. Li, A. K. Somani, "Dynamic wavelength Routing Using Congestion and Neighborhood Information", *IEEE/ACM Trans. Net.*, vol.7, n°:5, pp.779-786, Oct.1999.
- [8] J. P. Jue, G. Xiao, "An Adaptive Routing Algorithm with a Distributed Control Scheme for wavelength-Routed Optical Networks", in *Proc. 9th Int'l. Conf. Comp. Commun. Net. Las Vegas.*, pp.192-197, Oc.2000
- [9] J. Zhou, X. Yuan, "A Study od Dynamic Routing and Wavelength Assignment with Imprecise Network State Information", in *Proc. ICPP Workshop on Optical Networks*, Vancouver, Canada, August 2002
- [10] Xavier Masip, Sergi Sánchez, Josep Solé, Jordi Domingo, "Reducing Routing Inaccuracy Effects by Using the BYPASS Based Routing Mechanism", *Technical Report UPC-DAC-2002-30*
- [11] T. M. Chen, T. H. Oh, "Reliable Services in MPLS", *IEEE Communications Magazine*, 1999 pp. 58-62
- [12] Xavier Masip, Sergi Sánchez, Josep Solé, Jordi Domingo, "An Alternative Path Fast Rerouting in MPLS", In *Proc. ISCIS XV*, 2000