

## IP/MPLS over WDM 网中的动态选路和波长分配算法<sup>1</sup>

何荣希\*\*\* 张治中\* 王光兴\*\* 李乐民\* 王 晟\*

\*(电子科技大学宽带光纤传输与通信系统技术国家重点实验室 成都 610054)

\*\* (东北大学信息科学与工程学院网络与通信中心 沈阳 110004)

**摘 要** 该文研究了 IP/MPLS over WDM 网中, 利用综合路由法为到达的业务流建立标签交换路径 (LSP) 时, 如何选择是在 WDM 层为它新建一条光路, 还是利用现有的逻辑 IP 链路来满足其要求, 提出一种带宽碎片消除的策略, 该策略在决定是否利用逻辑 IP 链路来建立 LSP 时, 总是尽量减少造成带宽碎片, 从而可以有效提高全网的资源利用率, 仿真结果表明带宽碎片消除策略可以进一步改善综合路由算法的性能。

**关键词** IP over WDM, 通用多协议标签交换, 综合路由, 动态选路和波长分配, 带宽碎片消除  
**中图分类号** TN919.3

### 1 引 言

波分复用 (Wavelength Division Multiplexing, WDM) 技术以它的传输容量大, 对高层协议和技术适应性强, 以及易于扩展等优点而备受青睐, 加上 Internet 的迅猛发展以及基于 IP 的新业务不断出现, 使业界普遍认为 IP over WDM 将成为下一代 Internet 的基本框架<sup>[1]</sup>。为了简化传统 IP 网络的选路过程从而实现快速有效的转发, IETF (Internet Engineering Task Force) 建议采用 MPLS (Multi-Protocol Label Switch) 技术将到达网络边缘路由器的业务分组映射为不同的转发等价类 (Forwarding Equivalence Classes, FEC), 并贴上相应的标签, 然后通过明晰路由 (Explicit routing) 建立的标签交换路径 (Label Switch Path, LSP) 进行转发。由于 WDM 网络中的光路建立问题与上述 LSP 建立问题具有许多共同之处, 特别是为了在 IP over WDM 网中能够采用统一的控制平面以及信令协议, IETF 结合光网络的具体特点对 MPLS 进行扩展, 提出更通用的 GMPLS (Generalized Multi-Protocol Label Switching) 协议族<sup>[2-5]</sup>, 从而可以将 IP over WDM 网络中各层的控制平面最终融合为一体, 这就是 IP over WDM 网中的对等模型 (Peer model)<sup>[4]</sup>。

在对等模型中, 全网由大量带有 WDM 接口的路由器和光交叉连接设备 (OXC) 通过光纤互连成网状结构。其中路由器能以任意粒度处理业务流, 并且具有波长变换能力, 也就是可以将业务流从任意一个输入接口交换到任意一个输出接口; OXC 只能以整个波长的粒度对业务流进行处理, 它可以将波长从一根输入光纤交换到另一根输出光纤<sup>[6]</sup>。全网采用统一的路由协议, 通过 IGP (如扩展的 OSPF 或者 IS-IS 协议等) 来交换拓扑信息, 从而使路由器和 OXC 中维持同样的链路状态信息<sup>[4]</sup>。路由器可以计算出到其他路由器的端到端路径, 然后通过信令协议 (如 RSVP-TE 和 CR-LDP 等) 来预留带宽资源并建立 LSP。LSP 可以经过 OXC, 实际上就是要在两个边缘路由器之间建立一条光路。一旦建立成功, 该光路就被看作一条虚链路 (Virtual link), 可以被业务量工程 (Traffic Engineering, TE) 和路由计算使用。

在对等模型中, 源路由器为到达的业务流 (Traffic flow) 建立 LSP 时, 既可以通过 IP 层面建立在已经存在的虚拓扑上 (先前已经建立的光路), 也可以在 WDM 层为它新建立一条光路, 这就是 IP over WDM 网中的综合路由 (Integrated routing) 法<sup>[6]</sup>。究竟应该如何选择才有利于提高

<sup>1</sup> 2002-01-04 收到, 2002-05-22 改回

国家自然科学基金项目资助 (基金号: 69990540, 60002004)

全网的资源利用率成为综合路由法中一个值得探讨的问题。文献 [6] 提出一种 MOCA (Maximum Open Capacity routing Algorithm) 的综合路由算法, MOCA 在建立 LSP 时总是尽量选择那些对其他源、宿节点对间能够传输的最大业务流干扰 (Interference) 最少的路径。它通过反复多次 (与潜在的源、宿节点对的数量成正比) 计算不同源、宿节点对间的最大流来决定应该选择那条路建立 LSP, 这无疑大大增加了算法的复杂度 [7]。为了弥补上述缺陷, 本文提出一种新的综合路由算法——带宽碎片消除法 (Bandwidth Defragment Method, BDM)。在 BDM 中, 源路由器为到达的一个业务流建立 LSP 时, 总是尽量减少产生的带宽碎片 (Bandwidth fragment), 从而可以提高全网的资源利用率, 接纳更多的 LSP 建立请求。与 MOCA 相比, BDM 可以避免进行大量的最大流计算, 因而可以大大降低算法的复杂度。

本文第 2 节首先讨论了对等模型中的分层图模型, 然后在此基础上阐述所提综合路由算法——带宽碎片消除法。第 3 节采用文献 [6] 的仿真网络模型, 对所提算法进行了仿真研究, 给出仿真结果。最后第 4 节是全文的总结。

## 2 带宽碎片消除法

### 2.1 网络模型

给定网络物理拓扑  $G(N, L, W)$ , 其中  $N$  代表节点集,  $L$  代表双向链路集,  $W$  是每条光纤上的可用波长集。假定每条链路都由一对方向相反的单向光纤组成, 每条光纤可支持的波长集都是  $\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{|w|}\}$ 。考虑的光路也是双向光路。节点数、链路数和波长数分别用  $|N|$ ,  $|L|$  和  $|W|$  表示。一个节点可能是路由器, 也可能是 OXC (本文限于无波长变换的 OXC, 这有利于降低成本)。用  $R$  代表所有路由器的集合, 用  $S$  代表所有 OXC 的集合, 即  $N = R \cup S$ ; 属于  $R$  的节点可以按任意粒度对不同带宽的业务流进行复用和解复用, 而且可以根据需要将业务流输出到适当的波长上 [6]。假定每个路由器都具有足够的接口来处理所有到达它的业务流; 属于  $S$  的节点只能进行波长交换, 将一条输入光纤上的波长交换到另一条输出光纤上的同一波长上。 $R$  集合中的一部分作为输入 / 输出节点对, 假定所有业务流的源、宿节点都包含在这些节点对间, 而且每次只有一个业务流动态到达源路由器 [6], 然后源路由器通过明晰路由为它建立一条满足带宽要求的 LSP。不妨用  $(o_i, t_i, b_i)$  来表示对应第  $i$  个业务流的 LSP 建立请求, 其中  $o_i, t_i \in R$ , 分别表示该请求对应的源、宿路由器,  $b_i$  表示其带宽要求。不失一般性, 可以用单波长所能支持的传输速率作为带宽要求的基本单位 [6]。

WDM 网中的选路和波长分配 (Routing and Wavelength Assignment, RWA) 问题常分为路由选择和波长分配两个子问题分别解决, 文献 [8] 采用分层图 (Layered Graph, LG) 模型将二者结合在一起进行考虑, 可以进一步降低全网的阻塞率。本文根据对等模型的特点对 LG 模型 [8] 进行了修改。为了便于描述, 先引入波长通道 (Wavelength channel) 的概念。在物理拓扑  $G$  中, 如果节点  $i$  与  $j$  之间存在链路  $l_{ij} \in L$ , 那么构成该链路的光纤对上的每一个波长, 就称为一个波长通道。可见波长通道也是双向的。

分层图 (LG) 模型将物理拓扑  $G$  转化为  $|W|$  个互不相邻的子图, 分别对应一个特定的波长  $\lambda_i (i = 1, 2, \dots, |W|)$ , 称为波长平面。物理拓扑中的每个节点  $N_k \in N$ , 在 LG 中都被复制  $|W|$  次, 对应着  $|W|$  个波长平面中的节点  $N_k^i (i = 1, 2, \dots, |W|)$ ; 物理拓扑中的链路  $l_{kn} \in L$  映射为波长平面  $\lambda_i (i = 1, 2, \dots, |W|)$  中的弧段  $l_{k_n^i}$ , 每个弧段代表一个波长通道。

分层图中的链路分为波长链路和逻辑 IP 链路两种, 统称为 TE 链路。波长链路  $h_{k_n^i} \in L$  表示  $\lambda_i$  对应的波长平面上, 节点  $k$  和  $n$  之间的光纤对上的弧段。实际上它代表物理拓扑  $G$  中节点  $k$  和  $n$  之间光纤对上的波长  $\lambda_i$  对应的波长通道; 逻辑 IP 链路  $l_{k_n^i}$  表示物理拓扑  $G$  中, 在节点  $k$  和  $n$  之间建立的一条光路, 该光路使用波长  $\lambda_i$ 。建立一条逻辑 IP 链路必然要占用 WDM

层部分节点间的波长通道。因此,在分层图中应该去掉相应的波长通道。图 1 所示为一个 4 节点、单光纤、双波长的物理拓扑及其分层图模型,其中  $r_1, r_2$  为路由器,  $s_1, s_2$  为 OXC。图中表示  $r_1, r_2$  之间已经存在一条带宽为 0.6 单位的逻辑 IP 链路,也就是说在  $r_1, r_2$  之间已经建立一条光路,并且其带宽已经被占用 0.4 单位。该光路使用  $r_1-s_2$  和  $s_2-r_2$  之间的光纤对上的波长  $\lambda_1$ 。图 1(b) 为此时的分层图描述,  $r_1-r_2$  之间的虚线就代表逻辑 IP 链路,其剩余带宽为 0.6 单位。由于该逻辑链路对应的光路使用了  $r_1-s_2$  和  $s_2-r_2$  之间的光纤对上的波长  $\lambda_1$ , 因此,在分层图中应该去掉  $\lambda_1$  对应的波长平面上相应节点对间的波长通道。由于 LSP 动态建立和拆除,因此逻辑 IP 链路的剩余带宽是动态变化的。如果一条逻辑 IP 链路的剩余带宽为 0, 则在分层图中就应该删除该条逻辑 IP 链路。相反,如果一条逻辑 IP 链路的剩余带宽达到 1, 则应该将该逻辑 IP 链路还原成 WDM 层中的波长通道。在分层图中,标注在每条链路旁的数字表示此时该链路的剩余带宽值。

假设图 1 所示物理网络中,又有一个业务流  $(r_1, r_2, 0.5)$  到达源路由器  $r_1$ , 由于此时既可以选择  $r_1-r_2$  之间的逻辑 IP 链路为它建立 LSP, 也可以在 WDM 层为它新建一条光路。究竟该怎样选择呢? 这正是本文的主旨所在。对于该问题处理的好坏会直接影响到综合路由算法的效率,影响到是否有效利用全网资源。在具体讨论此问题之前,先引入带宽碎片(Bandwidth fragment)的概念。如果一条逻辑 IP 链路的剩余带宽值总是小于所有后续到达的业务流(LSP 建立请求)的带宽要求,则称它为带宽碎片。带宽碎片实际上就是不能被后续业务流使用的带宽资源。带宽碎片越多,造成的网络资源越浪费,从而可以接纳的 LSP 建立请求越少,相应地全网的阻塞率会越高。为了尽量避免产生带宽碎片,本文提出一种新的策略——BDM。该策略利用到达业务流带宽要求的统计特性(最小和最大带宽要求,它们可以根据源、宿节点对间已经到达的业务流的统计信息,进行预测而得到<sup>[7]</sup>),以及此时网络中逻辑 IP 链路的资源使用情况,动态决定究竟是利用现存的逻辑 IP 链路还是在 WDM 层新建光路来满足业务流的 LSP 建立请求,从而可以有效减少产生的带宽碎片数量,提高全网资源利用率。

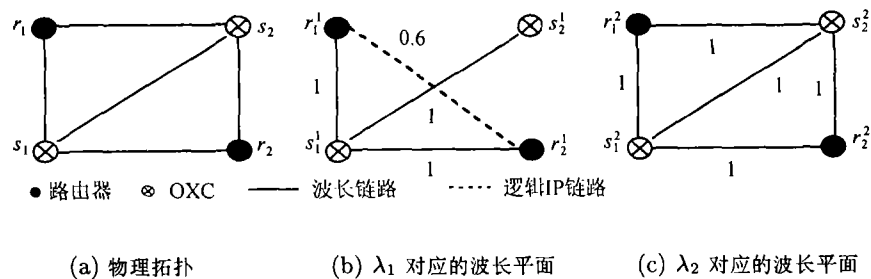


图 1 IP Over WDM 中的分层图模型

## 2.2 算法描述

假设网络中业务流按泊松过程独立、随机到达源端路由器,其平均到达率为  $\beta$ 。业务流的最大和最小带宽(也就是所有 LSP 建立请求的最大和最小带宽)要求分别为  $b_{\max}$  和  $b_{\min}$ 。

将物理拓扑转化为分层图后, LSP 的建立问题就可以转化为在分层图上寻找一条从源路由器到宿路由器的代价最小的通路。此时,如何确定分层图中链路的权值成为解决问题的关键。在分层图中,对于波长链路和逻辑 IP 链路,应该采用不同的方式决定其代价函数:

波长链路  $h_{kn}^i$  的代价函数  $c(h_{kn}^i)$  仅仅取决于物理拓扑  $G$  中相应链路  $l_{kn}$  上的波长使用情况,即

$$c(h_{kn}^i) = \begin{cases} c_{kn}, & o(h_{kn}^i) = 1 \\ +\infty, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

其中  $o(h_{kn}^i)$  为波长链路  $h_{kn}^i$  的占用函数。物理拓扑  $G$  中, 如果节点  $k, n$  之间的光纤对上的波长  $\lambda_i$  空闲, 则称  $h_{kn}^i$  未被占用 (空闲),  $o(h_{kn}^i) = 1$ ; 否则,  $h_{kn}^i$  被占用,  $o(h_{kn}^i) = 0$ ;  $c_{kn}$  是物理拓扑  $G$  中链路  $l_{kn}$  对应的基本代价, 它由多种因素共同决定, 如相应链路的物理长度、建设费用等。为了便于讨论, 不妨假设基本代价值都为 1。

逻辑 IP 链路  $l_{kn}^i$  的代价函数  $c(l_{kn}^i)$  取决于链路的剩余带宽  $b_l$  以及到达 LSP 建立请求的带宽要求  $b$ 。为了避免产生过多的带宽碎片, 在建立 LSP 时总是要尽量做到使网络中所有逻辑 IP 链路上的剩余带宽能够满足更多后续到达的 LSP 建立请求的带宽要求, 从而可以有效地保证接纳更多的后续 LSP 建立请求。逻辑 IP 链路的代价函数  $c(l_{kn}^i)$  为

$$c(l_{kn}^i) = \begin{cases} +\infty, & b_l < b \\ c'_{kn}, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

其中  $c'_{kn}$  由下式决定

$$c'_{kn} = \begin{cases} d_{kn}/\delta, & b_l - b \geq b_{\max} \\ \Delta \cdot d_{kn}, & b_{\min} \leq b_l - b < b_{\max} \\ \theta \cdot d_{kn}, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

其中  $d_{kn}$  是该条逻辑 IP 链路对应光路的跳数;  $\delta, \Delta$  和  $\theta$  都是不小于 1 的常数因子, 而且要求  $\Delta < \theta$ 。它们的具体取值与仿真时所用网络模型的规模大小有关, 网络规模越大, 取值就相应增大。

为带宽为  $b$  的业务流建立 LSP 时只能使用剩余带宽超过  $b$  的链路, 因此在建立 LSP 前, 可以先对分层图进行裁减, 删除那些不满足带宽要求的链路。然后新的分层图上采用最短路径算法 (如 Dijkstra 等) 求出一条权值最小的通路; 该通路的总代价函数  $C(P)$  应该满足  $0 < C(P) < +\infty$ 。

带宽碎片消除法的关键就在于如何根据到达的 LSP 建立请求的带宽要求, 以及全网的资源使用情况来构造分层图, 并决定分层图中逻辑 IP 链路和波长链路的权值。一旦构造好分层图, 则 LSP 建立问题就转化为在分层图上找出一条源、宿路由器之间的最短通路问题。其具体步骤如下:

**步骤 1** 将给定的物理拓扑  $G(N, L, W)$  转化成分层图, 按 (1) 式计算出分层图中各个波长链路的代价函数值;

**步骤 2** 等待 LSP 请求;

如果到达的是 LSP 建立请求, 则转至步骤 3;

如果到达的是 LSP 释放请求, 则转至步骤 6;

**步骤 3** 根据到达 LSP 建立请求的带宽要求  $b$ , 以及各个链路上的剩余带宽情况, 按照 (2) 式和 (3) 式决定分层图中逻辑 IP 链路的代价函数值, 然后转至步骤 4;

**步骤 4** 在分层图中, 用 Dijkstra 算法在  $|W|$  个波长平面上分别找出各自的最短路径  $P_i$ , 要求  $0 < C(P_i) < +\infty$ :

(a) 如果一条都没有找到, 则拒绝该 LSP 建立请求, 并转至步骤 2;

(b) 如果找到  $v (v \leq |W|)$  条最短路径  $P_i (i = 1, 2, \dots, v)$ , 则转至步骤 5;

**步骤 5** 从这  $v$  条可用通路中按 First-fit 原则选出代价函数值最小的那条通路, 并在该通路上建立 LSP; 然后, 删除相应波长平面上该通路所经节点间相应的波长链路, 并修改该通路所在波长平面上相应链路的剩余带宽值, 然后转至步骤 2。

**步骤 6** 释放该条 LSP 所占用的资源, 修改该 LSP 所经逻辑 IP 链路上的剩余带宽值。如果某条逻辑 IP 链路的剩余带宽值达到 1 单位, 则释放该条逻辑 IP 链路, 将它还原为相应节点间的波长链路, 这些波长链路的剩余带宽为 1 单位, 然后转至步骤 2。

本文所提 BDM 算法的复杂度主要取决于步骤 3 到步骤 5 中求点到点最短路径的 Dijkstra 算法。在一个波长平面上运行 Dijkstra 算法的复杂度为  $O(|N|^2)$ ，由于要在  $|W|$  个波长平面分别找出各自的最短通路，因此需要执行 Dijkstra 算法  $|W|$  次；然后再从找出的最多  $|W|$  条通路中选出最短的一条作为工作通路，又最多需要比较  $|W| - 1$  次。从而可得出 BDM 算法的复杂度近似为  $O(|W||N|^2)$ 。文献 [6] 提出的 MOCA 在每个波长平面上都需要执行大量次数的最大流计算（计算次数与网络中业务流潜在的源、宿节点对有关，也就是说最多可能要计算  $|R|^2$  次），而每次最大流计算的时间复杂度为  $O(|N|^3)^{[7]}$ 。再加上共有  $|W|$  个波长平面，因此 MOCA 的总的复杂度近似为  $O(|W||R|^2|N|^3)$ 。可见，本文所提 BDM 可以大大降低算法的复杂度。

### 3 计算机仿真及数据分析

为了更好地说明 BDM 的有效性，本节将对 BDM 进行仿真研究。除了 BDM 外，本文还给出另外 3 种比较直观的策略：尽量使用逻辑 IP 链路、尽量使用波长链路，以及随机选择两种链路来建立 LSP，分别称为逻辑 IP 链路法 (LIPM)、波长链路法 (WLM) 和随机链路法 (RLM)。与 MOCA<sup>[6]</sup> 相比，这 4 种方法的优点就在于都可以大大降低算法复杂度，更具有实用价值。本节将采用文献 [6] 所用网络拓扑（如图 2 所示），通过仿真对上述 4 种策略进行对比研究。图 2 中带阴影的为路由器，不带阴影的为 OXC（考虑无波长变换的情况）。

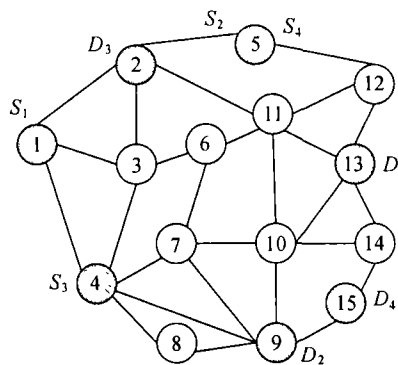


图 2 仿真用的网络模型<sup>[6]</sup>

仿真时分别假定每根光纤可以支持 2 个或 4 个波长。假定所有 LSP 建立请求按照参数为  $\beta$  的泊松过程到达网络，即全网总的到达率为  $\beta$ 。LSP 建立请求的源-宿节点对在  $\{(1-13), (5-9), (4-2), (5-15)\}$  中随机选定，允许一对节点之间同时存在多条 LSP<sup>[6]</sup>。全网所有源-宿节点对间的业务强度都相同，即支持的业务为均匀业务。一旦 LSP 建立请求被拒绝（阻塞），就立即丢弃，即无等待队列。假设用户业务流的带宽要求服从均匀分布<sup>[6]</sup>。我们在不同条件下通过仿真试验对上述 4 种方法的业务丢弃数（被拒绝的 LSP 建立请求数）进行了研究，结果如图 3，图 4 所示。图中共进行了 10 次实验，每次随机产生 40 次（图 3）或 80 次（图 4）LSP 建立请求。另外，我们还在不同负载的动态业务下（假设 LSP 的持续时间服从均值  $1/\mu$  的指数分布，即全网总负载为  $\beta/\mu$  Erlang），对采用上述 4 种方法时，全网 LSP 建立请求的阻塞率进行了仿真研究，所得结果是在模拟  $10^6$  次请求后统计得出的，如图 5 所示。仿真时取  $\delta = |L|$ ， $\Delta = 2/|L|$ ， $\theta = 1$ 。图中  $w$  表示每根光纤支持的波长数， $b_1$ ， $b_2$  分别表示到达业务流的最小和最大带宽要求。

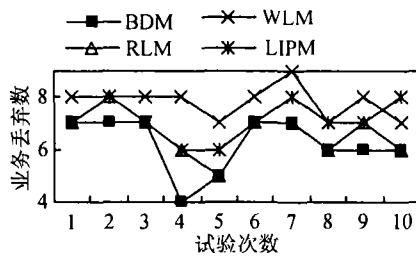


图 3 不同策略的业务丢弃数比较  
( $w = 2, b_1 = 0.1, b_2 = 0.4$ )

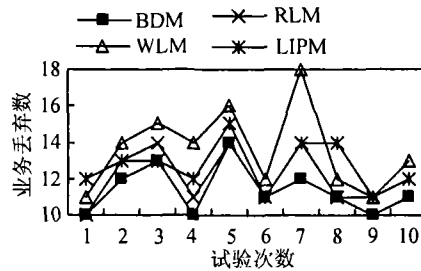


图 4 不同策略的业务丢弃数比较  
( $w = 4, b_1 = 0.1, b_2 = 0.4$ )

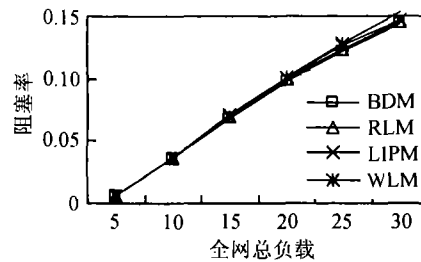


图 5 不同策略阻塞率性能比较 ( $w = 4, b_1 = 0.4, b_2 = 0.7$ )

从图 3 和图 4 可以看出, 带宽碎片消除法的业务丢弃数都低于其他 3 种方法。在仿真中还发现: 负载较轻时, 4 种策略性能较为接近; 随着负载越来越重, BDM 性能优势越明显。这主要是因为负载越轻, 全网资源相对越富裕, 此时即使产生很多带宽碎片, 全网资源仍能满足到达的 LSP 建立要求, 因此 BDM 的优势就不明显。但是, 随着负载增加, 网络资源相对紧张, 此时只有合理分配资源才能减少带宽碎片, 从而可以接纳更多的 LSP 建立请求, 也就是可以降低业务丢弃数, 因此 BDM 效果逐渐显著。另外, 从图 5 可以看出, 与 LIPM 和 WLM 相比, BDM 更能有效降低全网 LSP 建立请求的阻塞率。而且负载越重, 效果越明显。但是, BDM 与 RLM 阻塞率性能非常接近, 只是略微低于后者。总的说来, 与其他 3 种方法相比, BDM 可以有效减少全网的带宽碎片数量, 从而可以提高资源利用率, 接纳更多后续到达的 LSP 建立请求。

## 4 结 束 语

本文对 IP/MPLS over WDM 网的综合路由算法中如何决定究竟是选用逻辑 IP 链路还是选用波长链路来建立 LSP 的策略进行了研究, 提出一种新的策略——BDM, 并对所提算法进行了计算机仿真研究。仿真结果表明: 采用该策略可以有效减少全网的带宽碎片数量, 从而提高了全网资源利用率, 可以接纳更多 LSP 建立请求, 降低其阻塞率。另外, 与 MOCA<sup>[6]</sup> 相比, BDM 可以大大降低算法的复杂度, 更具有实用价值。

## 参 考 文 献

- [1] N. Ghani, *et al.*, On IP-over-WDM integration, *IEEE Commun. Mag.*, 2000, 38(3), 72-82.
- [2] A. Banerjee, *et al.*, Generalized multiprotocol label switching: An overview of routing and management enhancements, *IEEE Commun. Mag.*, 2001, 39(1), 2-8.

- [3] D. Awduce, *et al.*, Multiprotocol lambda switching combining MPLS traffic engineering control with optical crossconnects, *IEEE Commun. Mag.*, 2001, 39(3), 111–116.
- [4] S. Seetharaman, *et al.*, IP over optical networks: A summary of issues, Internet Draft, draft-osu-ipo-mpls-issues-02. txt, Apr. 2001.
- [5] K. Kompella, *et al.*, OSPF extensions in support of generalized MPLS, Internet Draft, draft-kompella-ospf-gmpls-extensions-01. txt, Feb. 2001.
- [6] M. Kodialam, *et al.*, Integrated dynamic IP and wavelength routing in IP over WDM networks, *IEEE INFOCOM*, Anchorage, Alaska, Apr. 2001, 358–366.
- [7] S. Suri, *et al.*, Profile-based routing: a new framework for MPLS traffic engineering, *Proc. Quality of future Internet Services*, Lecture Notes in Computer Science 2156, Berlin, Springer Verlag, Sept. 2001, 138–149.
- [8] 徐世中, 李乐民, 王晟, 多光纤波分复用网动态路由和波长分配, *电子学报*, 2000, 28(7), 23–27.

## DYNAMIC ROUTING AND WAVELENGTH ASSIGNMENT ALGORITHMS IN IP/MPLS OVER WDM NETWORKS

He Rongxi\* \*\*    Zhang Zhizhong\*    Wang Guangxing\*\*    Li Lemin\*    Wang Sheng\*

\*(*National Key Lab of Broadband Optical Fiber Transmission and  
Communication Networks, UESTC, Chengdu 610054, China*)

\*\*(*Institute of Info. Sci. and Eng., Northeastern University, Shenyang 110004, China*)

**Abstract** One of the key issues in integrated dynamic IP and wavelength routing algorithm is how to determine whether it is better to route an arriving Label Switch Path (LSP) establishment request over the existing topology or to open new wavelength paths. A new scheme, Bandwidth Defragment Method (BDM), is presented in this paper. It makes full use of the statistic information of the networking link-state and resource availability to determine how to route an arriving LSP request. The integrated dynamic Routing and Wavelength Assignment (RWA) algorithm based on BDM can reduce the numbers of bandwidth fragment and increase the utility of network resource. Simulation results show that the scheme can improve the performance of the network significantly.

**Key words** IP over WDM, Generalized Multi-Protocol Label Switch (GMPLS), Integrated routing, Dynamic Routing and Wavelength Assignment (DRWA), Bandwidth defragment

何荣希: 男, 1971 年生, 博士, 讲师, 目前主要研究方向为光联网的路由算法和生存性问题等。  
张治中: 男, 1972 年生, 博士, 讲师, 目前主要研究方向为宽带交换技术和 WDM 光网络技术。  
王光兴: 男, 1938 年生, 教授, 博士生导师, 目前主要研究方向为通信网与宽带通信技术。  
李乐民: 男, 1932 年生, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 目前主要研究方向为通信网与宽带通信技术。  
王 晟: 男, 1971 年生, 博士, 副教授, 目前主要研究方向为通信网与宽带通信技术。