

# IP/MPLS over WDM 网中基于共享风险链路组限制的共享通路保护算法

何荣希, 张治中, 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, 四川成都 610054)

**摘 要:** 本文研究了 IP/MPLS over WDM 网中, 如何建立两条共享风险链路组(SRLG)分离的标记交换路径(LSP)问题, 提出一种新的基于 SRLG 分离的共享通路保护算法. 该算法既可以保证用户业务的可靠性要求, 同时又能够有效提高全网的资源利用率, 从而大大降低全网 LSP 建立请求的阻塞率. 本文还对所提算法进行了仿真研究, 并给出了仿真结果.

**关键词:** 通用多协议标签交换; 共享风险链路组; 共享通路保护; 动态选路和波长分配

**中图分类号:** TN913. 24 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 11-1638-05

## A Shared Path Protection Algorithm in IP/ MPLS over WDM Networks Under Shared Risk Link Groups Constraints

HE Rong-xi, ZHANG Zhi-zhong, LI Le-min, WANG Sheng

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

**Abstract:** Different Shared Risk Link Groups(SRLG) identifiers can be assigned to each link by network administrator in optical Traffic Engineering(TE) with GMPLS to satisfy connection's reliability requirement. A dependable connection can be achieved by establishing two SRLG disjoint paths. A new routing algorithm for shared path protection based on SRLG disjoint is presented in this paper. It provides the same level of protection against single SRLG failure as dedicated path protection scheme. Moreover it is superior to dedicated path protection scheme in network utilization. Network performance, based on dynamic traffic with different load, is investigated via simulations. The results show that the scheme can improve the performance of the network significantly.

**Key words:** generalized multi protocol label switching (GMPLS); shared risk link groups (SRLG); shared path protection; dynamic routing and wavelength assignment(RWA)

### 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 Switching)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)建立的标记交换通路(Label Switched 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 (General-

ized Multi Protocol Label Switching) 协议族, 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>[2]</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>[3]</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>[2]</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。

由于一条光路上可能聚合了大量的业务流, 光路的失效将会造成巨大的损失。因此, IP over WDM 网的一个关键问题就在于如何保证它具有强壮的生存性<sup>[4]</sup>。常用的方法是在光层引入一定的保护/恢复机制, 一种对光路提供保护的有效机制是为每个光路请求建立两条“物理分离”的通路, 分别作为工作通路和保护通路。一旦工作通路失效, 可以立刻将业务切换到保护通路上运行, 这就是通路保护(Path Protection)<sup>[4]</sup>。物理分离根据防止的失效程度不同具有多种含义, 如节点分离、链路分离和范围分离等。IETF 在草案文本<sup>[5]</sup>中提出共享风险链路组(Share Risk Link Groups, SRLG)的概念, 对“物理分离”概念进一步抽象和扩展。SRLG 是指共享相同物理资源(也就是具有共同失效风险)的一组链路。SRLG 可以通过物理链路的路由信息自动导出, 也可以由网络操作者人工指定。每个 SRLG 都对应一个唯一的标识, 称为 SRLG 标识(SRLG Identifier)。网络操作者可以通过指定物理链路属于不同的 SRLG 来满足不同的可靠性要求。例如, 可以指定同一光纤中的所有波长属于同一 SRLG, 也可指定一根光缆中的所有光纤属于同一 SRLG。为业务流建立两条 SRLG 分离的 LSP 可以减少它们同时失效的可能性, 从而提高了其抗毁能力。建立 SRLG 分离的 LSP 实际上就是在业务流的源、宿节点间同时找出两条满足带宽要求的可用通路, 其中一条作为工作通路, 另一条作为保护通路。而且要求工作通路经过的链路 with 保护通路所经链路不能具有相同的 SRLG 标识。此时工作通路上的链路 with 保护通路上的链路具有不同的 SRLG 标识, 属于不同的 SRLG, 从而保证了两条通路没有共享风险, 这样便可以大大降低它们同时失效的可能性。那么, 一旦工作通路失效便可以将业务流切换到保护通路继续传输。

目前文献中往往局限在 WDM 层来研究通路保护问题<sup>[6]</sup>, 而且对所有光路请求都找出两条链路(或节点)分离的通路, 并总是选用光纤上的空闲波长资源来建立光路, 而忽略了逻辑链路的存在。因此, 为了充分利用全网的带宽资源, 应该基于对等模型来研究通路保护问题<sup>[4]</sup>。另外, 由于不同业务流可能具有不同的可靠性要求, 那么为它们建立的两条通路的分离程度也应该不一样。由于 SRLG 概念可以很好地体现这种分离程度的不同, 因此, 对业务流提供通路保护应该是为它建立两条 SRLG 分离的 LSP, 而不是像传统文献中那样简单地找出两条“物理分离”的通路。除了文献<sup>[7]</sup>外, 目前还未见其他文献对这种 SRLG 分离的通路保护问题进行讨论。文献<sup>[7]</sup>只在 WDM 层中对此讨论, 而且假设所有业务流都占用整个波长粒度的带宽, 并且针对静态业务进行研究。但是, 在实际运营网络中业务流往往动态到达, 而且带宽要求也是变化的(通常小于一个波长粒度<sup>[3]</sup>)。因此, 本文将针对这种带宽要求变化的动态业务流, 基于对等模型来研究 SRLG 分离的通路保护问题, 这种思想目前文献中还很少涉及。

WDM 光传送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, 而文献<sup>[8]</sup>利用分层图(Layered Graph, LG)模

型将上述两个问题一次性解决, 可以有效降低全网光路请求的阻塞率。因此, 本文首先结合 SRLG 概念和对等模型的特点, 对 LG 模型<sup>[8]</sup>进行修改; 然后在此基础上提出一种新的 IP over WDM 网对等模型中 SRLG 分离的共享通路保护算法。该算法既能满足业务流不同的可靠性要求, 同时又可以有效提高全网的资源利用率, 从而大大降低全网 LSP 建立请求的阻塞率。本文最后利用文献<sup>[3]</sup>的仿真网络拓扑在不同负载的动态业务下对所提算法进行了仿真研究, 并给出了仿真结果。

## 2 IP over WDM 网中 SRLG 分离的共享通路保护算法

### 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。节点数、链路数和波长数分别用  $|N|$ 、 $|L|$  和  $|W|$  表示。假定每条链路都由一对方向相反的单向光纤组成, 每根光纤可支持的波长集为  $\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{|W|}\}$ 。考虑的光路是双向光路。对于链路  $l(l \in L)$ , 网络操作者指定一个 SRLG 标识  $y_l$ 。所有链路的 SRLG 标识构成 SRLG 标识集合  $Y$ , 即  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_{|L|}\}$ 。一个节点可能是路由器, 也可能是 OXC(本文仅限于无波长变换的 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<sup>[3]</sup>。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, 假定所有业务流对应的 LSP 建立请求动态到达这些节点对, 而且每次只有一个请求到达源路由器。对于到达的一个 LSP 建立请求, 必须同时为它找到 SRLG 分离且满足带宽要求的两条通路, 其中一条作为工作通路, 另一条作为保护通路。无论是工作通路还是保护通路, 只要有一个没有成功建立, 则拒绝该次请求。到达的第  $i$  个 LSP 建立请求可以表示为  $(s_i, t_i, b_i)$ , 其中  $s_i, t_i \in R$ , 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, 可以用单波长所支持的传输速率作为带宽要求的基本单位<sup>[3]</sup>。

为了便于对 LG 模型进行描述, 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  $l_{mn} \in L$  映射为波长平面  $N_i(i = 1, 2, \dots, |W|)$  中的弧段  $l_{mn}^i$ , 每个弧段代表一个波长通道。波长通道的 SRLG 标识取决于它所对应的物理链路的 SRLG 标识。LG 中对应同一条物理链路的所有波长通道都具有相同的 SRLG 标识。

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  $h_{kn}^i$  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  $l_{kn}^i$  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。由于逻辑 IP 链路可能经过多个具有不同 SRLG 标识的波长通道, 因此, 它可能对应一组 SRLG 标识。图 1 所示为一个四节点、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。在图 1(a) 中, 链路旁标注的数字表示网络操作者为该链路指定的 SRLG 标识。此时在  $r_1, r_2$  之间已经存在一条剩余带宽为 0.4 单位的逻辑 IP 链路(用  $L-1$  表示), 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 0.6 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, 链路旁所标注的数字中分子表示该链路的可用带宽, 而分母表示其 SRLG 标识。 $r_1-r_2$  之间的虚线就代表逻辑 IP 链路  $L-1$ , 其剩余带宽为 0.4 单位。由于  $L-1$  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, 在分层图中去掉了  $\lambda_1$  对应的波长平面上相应节点对间的波长通道。 $L-1$  对应一组 SRLG 标识(1, 3)。同时图中还表示为经过  $L-1$  的那条 LSP 所承载的业务流建立了一条 SRLG 分离的保护通路。该通路经过使用  $r_1-s_1$  和  $s_1-r_2$  之间光纤对上的波长  $\lambda_2$  建立的光路。因此,  $\lambda_2$  对应波长平面上在  $r_1-r_2$  之间存在一条剩余带宽为 0.4 的逻辑 IP 链路, 它对应一组 SRLG 标识(2, 4)。由于 LSP 动态建立和拆除, 逻辑 IP 链路的剩余带宽将是动态变化的。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 链路还原为 WDM 层中的波长通道。也就是在分层图中删除该逻辑 IP 链路, 同时在该逻辑 IP 链路经过的各个节点对间增加相应的波长通道连接, 并且这些波长通道的剩余带宽为 1。

## 2.2 基于 SRLG 分离的共享通路保护算法

通路保护可分为专用通路保护(Dedicated Path Protection, DPP)和共享通路保护(Shared Path Protection, SPP)两种。在 DPP 中, 对于每条工作通路都要建立一条与它 SRLG 分离的保护通路, 而且这些保护通路不能共享资源。而对于 SPP 而言, 尽管对每条工作通路也要建立一条 SRLG 分离的保护通路, 但是只要两条工作通路所经链路 SRLG 分离, 则它们对应的保

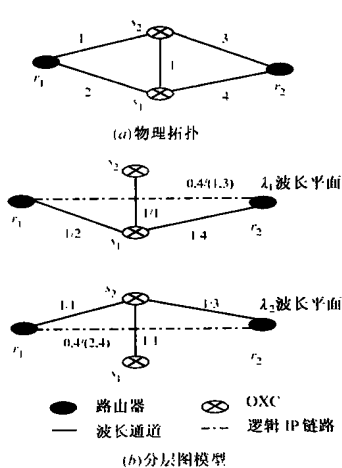


图 1 IP over WDM 网中的分层图模型

护通路就可以共享同一资源。由于保护通路只是在工作通路失效时才使用, 那么只要两条工作通路 SRLG 分离, 在单 SRLG 失效(如单链路或单节点失效, 目前文献中大多针对这两种情况讨论<sup>[6,7]</sup>)时, 这两条工作通路不会同时失效, 它们对应的保护通路不会被同时启动, 因此这两条工作通路对应的保护通路可以共享资源。可见, 在单 SRLG 失效情况下, 采用 SPP 既可以满足业务流的可靠性要求, 达到与 DPP 一样的可靠性保障, 同时又能提高全网的资源利用率。本文主要讨论基于 SRLG 分离的 SPP 算法。

在 SRLG 分离的 SPP 方式下, 对于到达的第  $k$  个 LSP 建立请求( $s_k, t_k, b_k$ ), 如果它成功建立, 则在工作通路所经链路都必须占用  $b_k$  单位的带宽资源; 由于此时 SRLG 分离的工作通路所对应的保护通路可以共享资源, 因此在每条保护通路所经链路上并不一定都要重新预留  $b_k$  单位的带宽, 而是取决于此时保护通路经过链路的带宽使用情况(即该链路上工作通路和保护通路各自占用的带宽多少, 这些信息可以从具有 TE 扩展的路由协议中获得<sup>[6]</sup>)。下面将详细阐述本文提出的 IP/MPLS over WDM 网中 SRLG 分离的共享通路保护算法:

对于新到的带宽要求为  $b$  的 LSP 建立请求, 首先应该为它建立工作通路。由于分层图中所有剩余带宽不满足要求的 TE 链路都不能被该 LSP 使用, 因此可以对分层图进行剪裁, 删去这些不满足带宽要求的链路。实际上就是通过修改分层图中相应链路的代价函数来实现。在分层图模型中, 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  $h_{kn}$  上的波长使用情况, 即

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

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  $h_{kn}$  对应的基本代价, 它由相应链路的物理长度、建设费用等多种因素共同决定。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以及到达 LSP 请求的带宽要求。假设链路  $l_{kn}^i$  的最大可用带宽为  $a(l_{kn}^i)$ , 工作通路占用带宽为  $e(l_{kn}^i)$ , 保护通路占用带宽为  $f(l_{kn}^i)$ , 则可以求出其剩余带宽  $r(l_{kn}^i)$  为

$$r(l_{kn}^i) = a(l_{kn}^i) - e(l_{kn}^i) - f(l_{kn}^i) \quad (2)$$

进而可以求出其代价函数  $c(l_{kn}^i)$  为

$$c(l_{kn}^i) = \begin{cases} +\infty, & \text{当 } r(l_{kn}^i) < b \text{ 时} \\ c_{kn}^i, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $c_{kn}^i$  表示该逻辑 IP 链路的跳数(其对应光路的跳数大小)。跳数越大, 其值就相应增加。

在剪裁过的分层图上利用最短路径算法(如 Dijkstra 算法等)找出一条最短通路  $P_w$  作为工作通路, 要求  $0 < C(P_w) < +\infty$ ,  $C(P_w)$  为该通路所经链路的代价函数之和。

为到达请求找到可用的工作通路后, 下面应该为它选择

保护通路。在 SPP 中,要求工作通路和保护通路必须 SRLG 分离;同时只要两条工作通路没有经过具有相同 SRLG 标识的链路,那么它们的保护通路就可以共享资源。在建立保护通路时,可以先对分层图进行适当裁减。删除那些不满足带宽要求的链路,以及与选定的工作通路所经链路具有相同 SRLG 标识的链路。同样可以通过修改相应链路的代价函数值来实现。选定的工作通路  $P_w$  经过的链路的 SRLG 标识构成 SRLG 标识集  $Z$ ,即

$$Z = \{y_l, l \in P_w\} \quad (4)$$

其中,  $y_l$  表示链路  $l$  的 SRLG 标识,该链路在工作通路  $P_w$  上。为带宽要求为  $b$  的 LSP 建立请求建立保护通路时,分层图中波长链路  $h_{kn}^i$  的代价函数  $c(h_{kn}^i)$  为

$$c(h_{kn}^i) = \begin{cases} c_{kn}, & \text{当 } o(h_{kn}^i) = 1 \text{ 且 } y_{h_{kn}^i} \notin Z \text{ 时} \\ +\infty, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $y_{h_{kn}^i}$  表示波长链路  $h_{kn}^i$  的 SRLG 标识。相应地求出逻辑 IP 链路  $l_{kn}^i$  的代价函数  $c(l_{kn}^i)$  为

$$c(l_{kn}^i) = \begin{cases} +\infty, & \text{当 } y_{l_{kn}^i} \in Z \text{ 时} \\ m_{kn}^i, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $m_{kn}^i$  取决于建立保护通路时在该链路还需预留的带宽资源情况。为带宽要求为  $b$  的 LSP 请求建立保护通路时,在链路  $l_{kn}^i$  上还需预留的带宽资源  $v(l_{kn}^i)$  根据下式决定:

$$v(l_{kn}^i) = \begin{cases} 0, & \text{当 } f(l_{kn}^i) \geq b \text{ 时} \\ b - f_{ij}, & \text{当 } r(l_{kn}^i) + f(l_{kn}^i) \geq b \text{ 时} \\ +\infty, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

从提高全网资源利用率来看,显然应该尽量减少建立保护通路时链路上需要增加的带宽预留量。因此,在建立保护通路时应该尽量鼓励使用新占带宽越少的链路。式(6)中的  $m_{kn}^i$  可以按下式决定:

$$m_{kn}^i = c_{kn} + v(l_{kn}^i) \quad (8)$$

修改完 TE 链路的代价函数值,然后在分层图上再次利用最短路径算法(如 Dijkstra 算法等)找出一条最短路径  $P_b$  作为保护通路,要求  $0 < C(P_b) < +\infty$ 。

在分层图模型中, SRLG 分离的共享保护算法的具体步骤如下:

**Step1:** 将给定的物理拓扑  $G(N, L, W)$  转化成分层图;

**Step2:** 等待 LSP 请求:

如果到达的是 LSP 建立请求,则转至 Step3;

如果到达的是 LSP 释放请求,则转至 Step6;

**Step3:** 为该 LSP 建立请求找寻工作通路:

根据到达请求的带宽要求  $b$  和分层图中 TE 链路的剩余带宽情况,根据式(1)和式(3)决定 TE 链路的代价函数值;然后,利用 Dijkstra 算法在  $|W|$  个波长平面上寻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,则拒绝该请求,并转至 Step2;

(b) 如果找到  $v(v \leq |W|)$  条最短路径  $P_i (i = 1, 2, \dots, v)$ ,则从这  $v$  条可用通路中按照 First Fit 原则选择一条代价最小的通路  $P_w$ ;然后转至 Step4;

**Step4:** 为 LSP 建立请求找寻保护通路:

根据式(5)、式(6)和式(8)修改分层图中 TE 链路的代价函数值;然后,利用 Dijkstra 算法在  $|W|$  个波长平面上寻找出各自的最短路径  $P_j$ ,要求  $0 < C(P_j) < +\infty$ :

(a) 如果一条都没有找到,则拒绝该请求,并转至 Step2;

(b) 如果找到  $k(k \leq |W|)$  条最短路径  $P_j (j = 1, 2, \dots, k)$ ,则从这  $k$  条可用通路中按照 First Fit 原则选择一条代价最小的通路  $P_b$ ;然后转至 Step5;

**Step5:** 在工作通路  $P_w$  上建立 LSP,同时在保护通路  $P_b$  上预留相应的带宽资源;然后修改两条通路所在波长平面中相应链路的剩余带宽值;转至 Step2;

**Step6:** 释放该 LSP 占用的资源,修改它对应的工作通路和保护通路所经 TE 链路的剩余带宽值。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对间的波长链路。这些波长链路的剩余带宽为 1 单位,然后转至 Step2。

Step1 的复杂度正比于 LG 的弧段数  $|L| \times |W|$ , Step6 的复杂度至多正比于网络的直径。因此,本文所提 SPP 算法的复杂度主要取决于 Step3 到 Step5 中使用的 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或保护通路,因此最多需要比较  $|W| - 1$  次;在 SPP 中需要找出工作通路和保护通路,也就是说上述过程要执行两次。从而可得出 SPP 算法的复杂度近似为  $O(2|W||N|^2)$ 。

### 3 计算机仿真及数据分析

正如前文所述,与专用通路保护(DPP)相比,共享通路保护(SPP)可以充分利用网络资源,降低 LSP 建立请求的阻塞率。为了更好地说明所提算法的有效性,本节将对所提算法进行仿真研究,并且与 DPP 方式进行对比。仿真时采用文献<sup>[3]</sup>仿真采用的网络拓扑,如图 2 所示。图中带阴影的为路由器,不带阴影的为 OXC(采用波长连续的交叉连接)。每条链路旁标注的数字表示其 SRLG 标识。

假定所有到达源

路由器的 LSP 建立请求的平均速率服从参数  $\beta$  的泊松分布,即全网总的到达率为  $\beta$ 。LSP 请求的源、宿节点对在  $((1-13), (5-9)), (4-2), (5-15))$  中随机选定<sup>[3]</sup>,允许一对节点之间同时存

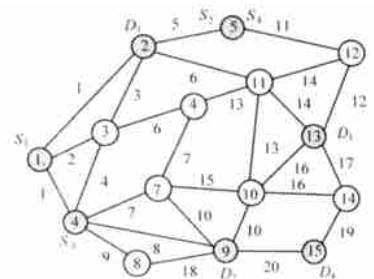


图 2 仿真用的网络模型<sup>[3]</sup>

在多条 LSP。对于到达的一个 LSP 请求,要求为它建立两条 SRLG 分离的通路,如果建立不成功,则拒绝该次请求。一旦 LSP 建立请求被拒绝(阻塞),就立即丢弃,即无等待队列。LSP 请求的带宽要求服从均匀分布  $U(0, 1, 0, 4)$ ,假设每根光纤可

以支持两个波长,对采用 SPP 和 DPP 时全网的业务丢弃数(被拒绝的 LSP 建立请求数)进行了比较,如图 3 所示。图中共进行了 10 次实验,每次随机产生 40 次 LSP 建立请求。另外本文还在不同负载的动态环境下(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 SPP 和 DPP 时全网的阻塞率性能进行了仿真研究,如图 4 和图 5 所示。所得结果是在模拟  $10^6$  次业务连接请求后统计得出的。

从图 3 可以看出, SPP 算法的业务丢弃数确实小于 DPP 算法。这主要是因为 SPP 中,只要不同 LSP 请求对应的工作

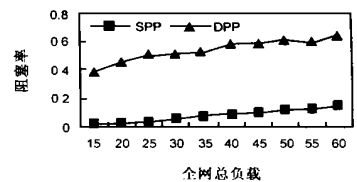
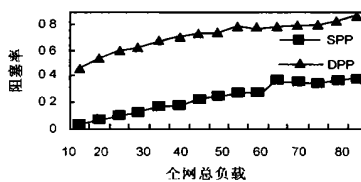
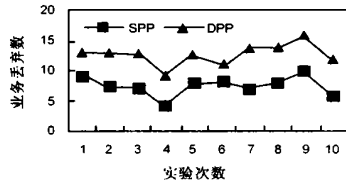


图 3 不同算法的业务丢弃数比较 图 4 不同算法的阻塞率性能比较(波长数为 2) 图 5 不同算法的阻塞率性能比较(波长数为 4)

## 4 结束语

在 IP over WDM 网中,全网采用基于 GMPLS 的控制平面来实现业务量工程。网络操作者可以通过赋予链路不同的 SRLG 标识来满足用户业务不同的可靠性要求。此时,通过建立两条 SRLG 分离的 LSP 就能为业务流提供不同程度的可靠性保证。因此,如何建立 SRLG 分离的 LSP 是一个值得研究并且具有现实意义的问题。本文在 IP over WDM 网络对等模型下,利用分层图模型对此问题进行了研究。针对单 SRLG 失效情况提出一种 SRLG 分离的共享通路保护算法;并在不同负载的动态业务下对所提算法进行仿真研究。结果表明:该算法既可以保证业务流的可靠性要求,同时又能够有效提高全网的资源利用率,从而大大降低 LSP 建立请求的阻塞率。

## 参考文献:

- [1] Ghani N, et al. On IP over WDM integration [J]. IEEE Commun. Mag., 2000, 38(3): 72-82.
- [2] Seetharaman S, et al. IP over optical networks: A summary of issues [EB/OL]. <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-osur-ipompls-issues02.txt>, 2001.
- [3] Kodialam M, et al. Integrated dynamic IP and wavelength routing in IP over WDM networks [EB/OL]. <ftp://166.111.67.78/pub/Research/Conferences/Papers/InfoComm2001/6601946817677.ps>, 2001.
- [4] Ye Y, et al. A simple dynamic integrated provision/protection scheme in IP over WDM networks [J]. IEEE Commun. Mag., 2001, 39(11): 174-182.
- [5] Poppe F et al. Inference of shared risk link groups [EB/OL]. <http://www.watersprings.org/links/mlr/id/draft-many-inference-srlg00.txt>, 2001.

通路 SRLG 分离,则它们相应的保护通路就可以共用资源。与 DPP 相比,这样便可以大大降低网络中为保护通路预留的带宽资源总量,从而可以接纳更多后续的 LSP 建立请求。从图 4 (表示每根光纤支持 2 个波长时的情况)可看出,无论全网负载怎样变化,与 DPP 算法相比, SPP 算法都可以大大降低全网 LSP 建立请求的阻塞率。图 5 表示每根光纤支持的波长数为 4 时的情况,此时 SPP 的阻塞率仍然大大低于 DPP 算法。可见,即使在负载相对较轻时,采用 SPP 算法也能大大改善全网的阻塞率性能。

- [6] Kodialam M and Lakshman T. Dynamic routing of bandwidth guaranteed tunnels with restoration [A]. Sidi M, et al. Proc. of IEEE INFOCOM 2000 [C]. Tel Aviv, Israel: IEEE Computer and Communications Societies, 2000. 902-911.
- [7] Zang H, et al. Path protection routing and wavelength assignment in WDM mesh networks under shared risk group constraints [A]. Optical Networking, QIAO C and XIE S. APOC 2001 [C]. Beijing, China: SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2001. 49-60.
- [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分配[J].电子学报,2000,28(7):23-27.

## 作者简介:



何荣希 男, 1971 年 6 月出生于四川南充, 博士, 讲师, 目前主要研究方向为: 光联网的综合路由算法、生存性问题以及 QoS 路由技术。Email: herongxi@sina.com.

张治中 男, 1972 年 10 月出生于湖北恩施, 博士, 目前主要研究方向为宽带交换技术和 WDM 光网络技术。

李乐民 男, 1932 年 5 月出生于浙江吴兴, 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 1 月出生于四川成都, 博士, 副教授, 目前主要研究方向为通信网与宽带通信技术。