

WDM 网状网中基于共享风险链路组限制的 业务量疏导算法¹

何荣希 * ** 温海波 ** 王光兴 * 李乐民 **

*(东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110004)

** (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)

摘要: 该文研究了业务量疏导 WDM 网状网中如何建立可靠的业务连接问题, 提出一种新的基于共享风险链路组 (SRLG) 限制的共享通路保护算法。该算法既可以保证用户业务不同的可靠性要求, 同时又能够有效提高全网的资源利用率, 从而大大降低全网的业务阻塞率。该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: 波分复用, 网状网, 共享风险链路组, 业务量疏导, 共享通路保护

中图分类号: TN913.24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)04-0549-07

Traffic Grooming for Survivable WDM Mesh Networks under Shared-Risk-Link-Group Constraints

He Rong-xi* ** Wen Hai-bo** Wang Guang-xing* Li Le-min**

*(School of Information Sci. & Eng., Northeastern University, Shenyang 110004, China)

** (Nat. Key Lab of Broadband Opt. Fiber Transm. and
Comm. Networks, UEST of China, Chengdu 610054, China)

Abstract This paper addresses the dynamic establishment of dependable connections for grooming WDM mesh networks. A shared path-protection algorithm under Shared Risk Link Group(SRLG) constraints for multi-granularity traffic is proposed. The presented scheme establishes SRLG-disjoint primarily and backups traffic stream paths between the source-destination node pairs and reduces the spare capacity. It provides the same level of protection against single SRLG failure as dedicated path-protection scheme. Moreover it is better than 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 Wavelength-Division Multiplexing (WDM), Mesh network, Share Risk Link Group (SRLG), Traffic grooming, Shared path-protection

1 引言

在光网络中采用波分复用 (Wavelength Division Multiplexing, WDM) 技术, 可以使每个波长提供高达吉比特 / 秒 (如 OC-48, OC-192, 甚至 OC-768) 的传输容量^[1], 而业务连接请求的带宽要求往往小于波长容量。如果为每个请求都建立一条光路 (Lightpath), 一方面会极大地浪费网络资源; 另一方面由于网络中光纤、波长等资源的限制, 也不可能为每个请求都能成功建立一条端到端的光路。因此, 为了提高全网资源利用率, 有效降低网络运营成本, 有必要将多个低速业务流疏导 (Groom) 到同一条大容量的光路上传输^[1-3]。业务量疏导 (Traffic

¹ 2002-10-30 收到, 2003-05-19 改回

国家自然科学基金 (69973011, 60002004 和 69990540) 和中国博士后科学基金 (2003033031) 资助项目

grooming) 就是将低速业务流聚合 / 解聚合并交换到光路上传输^[3]。近年来, 文献中大多基于 SDH/WDM 环网来研究业务量疏导问题^[4], 其目的就是要有效减少全网 SDH 分插复用设备的数量。由于网状网具有一定的抗毁能力, 同时对业务流的波动具有较好的适应性, 因此, 广域骨干网大多已从多个环网互联过渡到网状网结构^[1]。目前, 如何解决 WDM 网状网中的业务量疏导问题已经引起极大关注^[1-3]。文献 [2] 针对静态业务, 将网络的最大吞吐量作为优化目标, 提出了基于整数线性规划 (ILP) 的疏导模型。由于实际网络中业务流往往动态、随机到达, 需要实时为它们建立连接。因此, 针对动态业务的业务量疏导算法更有实际意义。文献 [1, 3] 研究了动态业务下的业务量疏导问题, 提出多种启发式算法, 从而可以有效减少全网业务连接请求的阻塞率。但是, 上述文献在研究业务量疏导问题时都忽略了网络的生存性问题。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, WDM 网络中的一个关键问题就在于如何保证它具有强壮的生存性^[5,6]。

解决 WDM 网络生存性问题的常用方法是在光层引入一定的保护 / 恢复机制。一种提供保护的有效机制是为每个业务连接请求建立两条“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, 可以立刻将业务流切换到保护通路上传输, 这就是通路保护 (Path-protection)^[6]。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^[7]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, 它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。为业务连接请求建立两条 SRLG 分离的通路, 由于这两条通路没有共享风险, 从而可以大大降低它们同时失效的可能性, 提高了其抗毁能力; 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。

目前文献中在研究通路保护时, 往往假设所有业务连接都占据整个波长粒度的带宽, 因而为每个请求都建立两条“物理分离”的光路。由于在实际运营网络中, 业务流的带宽要求是动态变化的, 而且通常小于一个波长粒度。因此, 为了充分利用全网的带宽资源, 应该研究具有业务量疏导能力的通路保护算法。文献 [5] 讨论了在业务量疏导网络中如何建立可靠连接的问题, 但是它并没有考虑到不同业务连接需要防止的失效程度可能不同, 而是为所有连接请求都找出“物理分离”的两条通路。事实上, 根据业务流需要防止的失效程度的差异, 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”的通路, 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。本文将研究具有业务量疏导能力的 WDM 网状网中 SRLG 分离的共享通路保护算法, 这种思想目前文献中还未见涉及。

本文研究了动态业务下 WDM 网状网中具有抗毁能力的业务量疏导问题, 提出一种新的基于 SRLG 限制的共享通路保护算法。所提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, 从而大大降低全网的业务阻塞率。本文最后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 WDM 网状网中 SRLG 分离的业务量疏导算法

给定网络物理拓扑 $G(N, L, W)$, 其中 N 为节点集; L 为双向链路集, 每条链路由一对方向相反的单向光纤组成; W 为每根光纤上的可用波长集 $W = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{|w|}\}$, 波长容量为 B 。节点数、链路数和波长数分别用 $|N|$, $|L|$ 和 $|W|$ 表示。考虑的光路为双向光路。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 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_{|L|}\}$ 。每个节点都有一个具有疏导能力的 OXC, 它主要由波长交换结构 (Wavelength switch Fabric, W-F)、疏导结构 (Grooming Fabric, G-F) 以及收发器阵列 (Transceiver, T) 组成^[1]。G-F 可以对低速业务流进行聚合 / 解聚合和交换, 而 W-F 仅完成波长粒度的交换。这两个交换结构通过收发器阵列连接。收发器阵列中所含收发器对的多少决定了 OXC 疏导能力的大小^[1]。假定每个收发器阵列都有 m 对可调谐收发器, 它们可以调谐到其调谐范围内任一波长上。如果一条光路在端点处从 W-F 交换到 G-F, 则称它为可疏导光路^[1]。所有到达业务连接请求的源、宿节点在节点集 N 中随机选择, 而且每次只到达一个请求。对于到达的每个请求, 必须同时为它找到两条满足带宽要求且 SRLG 分离的通路, 其中一条作为工作通路, 另一条作为保护通路。只要有一个没有成功建立, 则拒绝该请求。

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的 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, 则它们对应的保护通路就可以共享资源。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进行讨论^[6,8]) 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, 因而其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。

文献 [1] 利用可达图 (Reachability Graph, RG) 模型来研究具有疏导能力的选路和波长分配 (Routing and Wavelength Assignment, RWA) 算法, 但是文献 [1] 假设所有节点都具有波长变换能力, 也就是都配置了波长变换器 (Wavelength converter)。实际上, 由于技术上的限制以及从成本上考虑, 并不是每个节点都配置波长变换器。因此, 本文讨论时将遵循波长连续性限制。为了更好地描述所提算法, 首先将针对节点无波长变换的情况对 RG 模型^[1] 进行修改。

RG 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, 称为波长平面。波长平面中的节点与 G 中的节点一一对应, 边取决于此时网络中的资源占用情况和存在的可疏导光路的情况。波长平面上的链路分为波长链路和可疏导光路两种。如果 G 中某对节点间有光纤直接连接, 并且此时该光纤上存在空闲波长, 则相应波长平面的相应节点对间就存在一条波长链路。波长链路的 SRLG 标识取决于它所对应物理链路的 SRLG 标识。RG 中对同一条物理链路的所有波长链路都具有相同的 SRLG 标识。如果两个节点间已经建立一条可疏导光路, 则在相应波长平面的相应节点对间增加一条链路。由于可疏导光路可能经过多个具有不同 SRLG 标识的波长链路, 因此, 它可能对应一组 SRLG 标识。图 1(a) 所示为一个 5 节点、单光纤、2 波长的物理网络, 每个节点配备 2 对收发器。链路旁标注的数字表示该链路对应的 SRLG 标识。图 1(b) 为其可达图模型。图中表示节点对 1-3 之间利用波长 1 建立了一条可疏导光路, 剩余带宽为 b_1 , 对应一组 SRLG 标识 (1, 2); 节点对 2-4 之间利用波长 2 建立了一条可疏导光路, 剩余带宽为 b_2 , 对应一组 SRLG 标识 (1, 5)。节点旁标注的数字表示此时该节点处可用的收发器对数。

在 SRLG 分离的 SPP 方式下, 对于到达的业务连接请求 (s_k, d_k, b_k) , 其中 $s_k, d_k \in N$, 表示该请求对应的源、宿节点, b_k 为其带宽要求。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所经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业务量工程扩展的路由协议中获得^[8])。下面将利用 RG 模型来详细阐述本文所提算法:

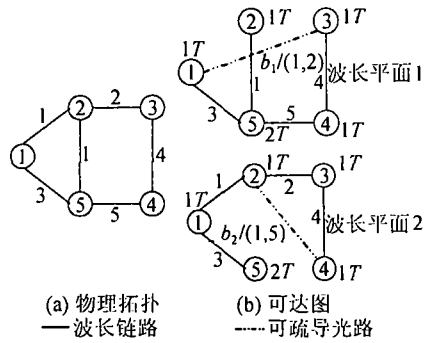


图 1 WDM 网状网中的可达图模型

对于新到的带宽要求为 b 的业务连接请求，首先为它建立工作通路。由于 RG 中剩余带宽不满足要求的所有可疏导光路都不能被该连接使用，因此首先对 RG 进行剪裁，删去那些不满足带宽要求的光路。实际上就是通过修改各个波长平面上相应链路的代价函数来实现。在 RG 模型中，对于波长链路和可疏导光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 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。如果 G 中节点 k, n 之间的光纤对 (即物理链路 l_{kn}) 上的波长 λ_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} 为 G 中链路 l_{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。

可疏导光路 l_{kn}^i 的代价函数 $c(l_{kn}^i)$ 取决于它此时的剩余带宽以及到达连接请求的带宽要求。 l_{kn}^i 的最大可用带宽为波长容量 B ，假设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

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

进而可以求出其代价函数 $c(l_{kn}^i)$ 为

$$c(l_{kn}^i) = \begin{cases} +\infty, & r(l_{kn}^i) < b \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

在剪裁过的可达图上利用最短路径算法 (如 Dijkstra 算法) 分别找出各个波长平面上的一条最短通路 P_w ，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。然后按照代价函数由小到大的顺序依次检查每条通路所经节点是否有足够的收发器对来满足新建可疏导光路的要求，如果不满足，则选择下一条通路进行检查，直到成功为止；如果检查完所有通路都不成功，则拒绝该请求。

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所经链路 SRLG 分离，那么它们的保护通路就可以共享资源。在建立保护通路时，先对可达图进行适当裁减，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. 在为业务连接请求建立保护通路时, RG 中波长链路 h_{kn}^i 的代价函数 $c(h_{kn}^i)$ 为

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

其中 $y_{h_{kn}^i}$ 表示波长链路 h_{kn}^i 的 SRLG 标识. 相应地可求出可疏导光路 l_{kn}^i 的代价函数 $c(l_{kn}^i)$ 为

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

其中 $y_{l_{kn}^i}$ 为可疏导光路 l_{kn}^i 对应的一组 SRLG 标识. m_{kn}^i 取决于建立保护通路时该链路还需预留的带宽资源情况, 所需预留的带宽资源越多它的值就越大. 即

$$m_{kn}^i = \begin{cases} 1, & q(l_{kn}^i) + b \leq f(l_{kn}^i) \\ 1 + \min\{b, q(l_{kn}^i) + b - f(l_{kn}^i)\}, & f(l_{kn}^i) < q(l_{kn}^i) + b \leq r(l_{kn}^i) + f(l_{kn}^i) \\ 1 + b, & q(l_{kn}^i) + b > r(l_{kn}^i) + f(l_{kn}^i), b \leq r(l_{kn}^i) \\ +\infty, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

其中 $q(l_{kn}^i)$ 表示当选定工作通路上任意一条链路出现故障时, 为了保证该通路承载业务连接能够正常恢复, 在可疏导光路 l_{kn}^i 上必须预留的最大保护带宽资源. 式 (7) 保证了在建立保护通路时尽量鼓励使用预留保护带宽越少的链路, 从而提高全网资源利用率.

修改完链路的代价函数值, 然后在各个波长平面上再次利用最短路径算法 (如 Dijkstra 算法) 找出各自的最短路径 P_b 作为保护通路候选集, 要求 $0 < C(P_b) < +\infty$. 然后按照代价函数由小到大的顺序依次检查每条通路所经节点是否由足够的收发器资源来满足新建可疏导光路的要求, 如果不满足, 则选择下一条通路进行检查, 直到成功为止; 如果检查完所有通路都不成功, 则拒绝该请求.

所提算法的流程图如图 2 所示, 其复杂度主要取决于可到达图中多次使用的 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; 然后对找到的最多 $|W|$ 条通路按照代价函数排序, 并按 First-Fit 原则依次检查各通路所经节点是否有足够的收发器资源, 最多需要进行 $(|N||W| + |W|^2)$ 次运算; 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 $O(|W|^2 + |W||N|^2)$.

3 计算机仿真及数据分析

为了更好地说明所提算法 (SPP) 的有效性, 本节将对 SPP 进行仿真研究, 并且与 DPP 方式进行对比. 仿真时采用文献 [1] 所用 NSFNet T1 网络拓扑, 如图 3 所示, 链路旁标注的数字表示其 SRLG 标识. 假设图中每个节点都配备具有疏导能力的 OXC (遵循波长连续性限制), 每条链路由一对方向相反的单向光纤组成, 每根光纤可以支持 10 个波长, 每个波长的容量为 OC-192. 假定所有连接请求按照平均速率服从参数 β 的泊松分布到达, 即全网总的到达率为 β . 所建连接的持续时间服从均值 $1/\mu$ 的指数分布, 即全网总负载为 β/μ Erlang. 到达请求的源、宿节点在所有节点间随机选定, 允许一对节点间同时存在多条连接^[1]. 对于到达的一个连接请求, 要求为它同时建立两条 SRLG 分离的通路. 如果建立不成功, 则拒绝该次请求. 一旦

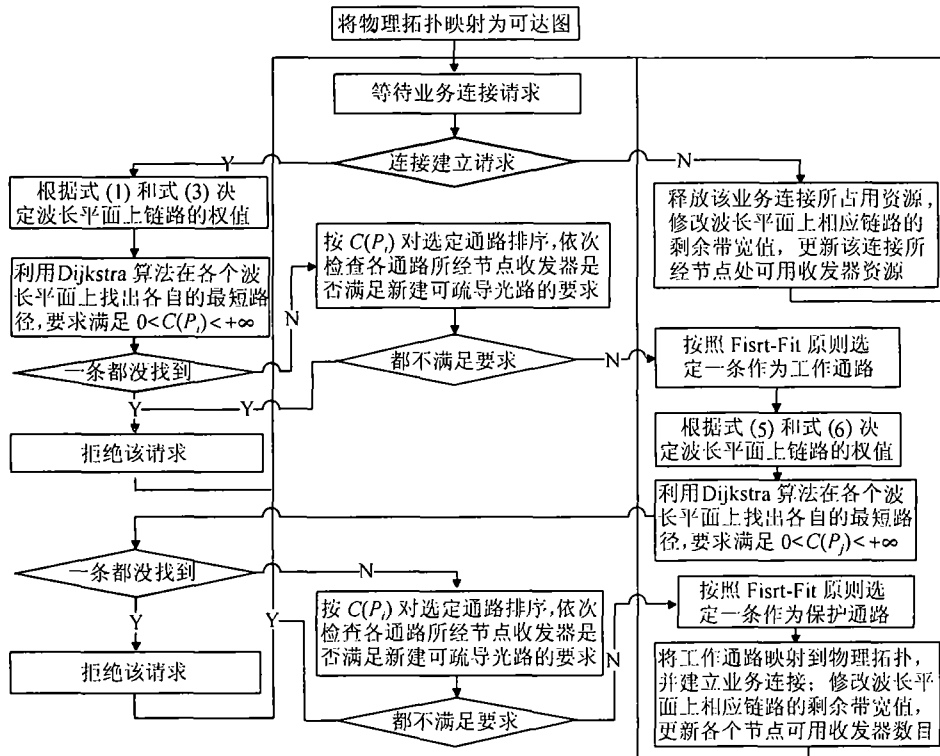


图2 具有业务疏导能力的SPP算法流程图

被拒绝(阻塞),就立即丢弃,即无等待队列。到达请求的带宽要求在 OC-1, OC-3, OC-12 和 OC-48 之中随机选择。我们在不同负载的动态业务下,对两种算法的阻塞率和业务阻塞率(被拒绝业务连接请求的总带宽与到达业务连接请求的总带宽之比)进行了仿真研究;同时,我们还比较了节点中配备不同数量收发器时对全网性能的影响。所得结果是在模拟 10^6 次光路建立请求后经统计得出的,如图4-图6所示(图中 T , SPP_n 和 DPP_n 中的 n 都表示每个节点配备的收发器对数)。

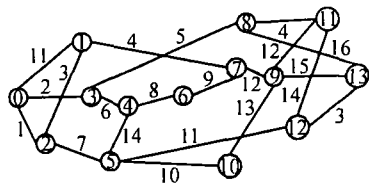


图3 NSFNet T1 骨干网

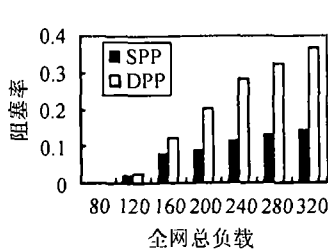


图4 不同算法的阻塞率性能比较

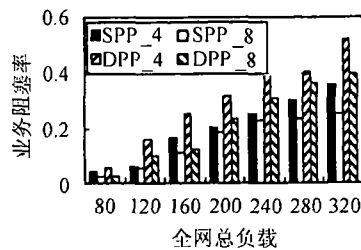


图5 不同算法的业务阻塞率性能比较

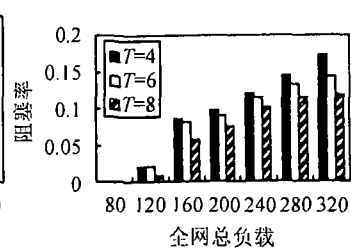


图6 T对SPP阻塞率性能的影响

从图 4 可以看出, 无论全网负载怎样变化, SPP 算法的阻塞率都小于 DPP 算法。这主要是因为 SPP 中, 如果对应业务连接的工作通路 SRLG 分离, 则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连接建立请求。由于到达连接请求具有不同的带宽要求, 而阻塞不同带宽的请求 (如带宽为 OC-12 和 OC-48), 无论是对运营商还是对客户而言, 其影响大不相同。因此, 业务阻塞率比阻塞率更能反映出算法的有效性。图 5 对这两种算法的业务阻塞率性能进行了比较。从图中可看出, 无论全网负载怎样变化, 与 DPP 算法相比, SPP 算法仍然可以大大降低全网的业务阻塞率。图 6 反映了节点配备的收发器对数对 SPP 性能的影响, 从图中可看出: 增加收发器对数 T 可以有效降低全网的阻塞率。但是, 在仿真中发现, 当每根光纤支持的波长数一定时, T 增加到一定程度后, 全网性能再无较大改善。这主要是由于此时收发器资源相对充足, 一个连接能否成功建立主要取决于此时每根光纤所能支持的波长数, 因此继续增加 T 对性能改善不大。

4 结束语

本文研究了抗毁 WDM 网状网中考虑 SRLG 限制的动态业务量疏导问题, 在 RG 模型基础上提出一种具有业务量疏导能力的、基于 SRLG 分离的共享通路保护算法 (SPP)。在单 SRLG 失效情况下, 该算法可以达到与 DPP 算法一样的可靠性。通过不同负载的动态业务下对所提算法进行仿真研究表明: SPP 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, 从而大大降低全网的业务阻塞率。

参 考 文 献

- [1] Zhu K, Mukherjee B. On-line approaches for provisioning connections of different bandwidth granularities in WDM mesh networks [C]. Proc. of IEEE/OSA OFC'02, Anaheim, CA, Mar. 2002: 549-551.
- [2] Zhu K, Mukherjee B. Traffic grooming in an optical WDM mesh network [J]. *IEEE J. on SAC*, 2002, 20(1): 122-133.
- [3] Thiagarajan S, Somani A. Capacity fairness of WDM networks with grooming capabilities [J]. *Optical Network Mag.*, 2001, 2(3): 24-32.
- [4] Dutta R, Rouskas G. On optimal traffic grooming in WDM rings [J]. *IEEE J. on SAC*, 2002, 20(1): 110-121.
- [5] Thiagarajan S, Somani A. Traffic grooming for survivable WDM mesh networks [J]. *Optical Network Mag.*, 2002, 3(3): 88-98.
- [6] Ramamurthy S, Mukherjee B. Survivable WDM mesh networks, Part I—Protection [C]. Proc. of IEEE INFOCOM'99, New York, NY, Mar. 1999, Vol.2: 744-751.
- [7] Poppe F, et al.. Inference of Shared Risk Link Groups [EB/OL]. Internet Draft, Work in Progress, Feb. 2001. <http://www.watersprings.org/links/mlr/id/draft-many-inference-srlg-00.txt>.
- [8] Li G, et al.. Efficient distributed path selection for shared restoration connections [C]. Proc. of IEEE INFOCOM'02, New York, NY, June 2002. <http://www.ieee-infocom.org/2002/papers/466.pdf>.

何荣希: 男, 1971 年生, 博士, 副教授, 主要研究方向为光互联网的路由算法等。

温海波: 男, 1976 年生, 博士生, 主要研究方向为光互联网的约束路由算法等。

王光兴: 男, 1937 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为宽带通信网及其相关技术。

李乐民: 男, 1932 年生, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 主要研究方向为宽带通信网及其相关技术。