

# 一种 WDM 网状网中基于共享保护的业务量疏导算法<sup>1</sup>

向 兵 王 晟 李乐民

(电子科技大学宽带光纤传输与通信系统技术重点实验室 成都 610054)

**摘 要:** 在 WDM 网络中业务的带宽需求远低于一个波长所提供的带宽, 业务量疏导可以聚集低速业务到大容量的光路中从而有效地利用波长带宽资源. 目前大多数业务量疏导的研究限于环形网, 考虑对 WDM 网状网中低速业务可靠疏导的文献更少. 该文综合考虑 WDM 网状网生存性及业务量疏导, 提出了基于波长分层图的共享保护业务量疏导算法 (SPTG-LG, Shared Protection Traffic Grooming algorithm based on wavelength Layered-Graph), 并对算法进行了仿真和分析.

**关键词:** WDM 网状网, 业务量疏导, 波长分层图, 共享保护

**中图分类号:** TN913.24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)07-1114-06

## A Traffic Grooming Algorithm Based on Shared Protection in WDM Mesh Networks

Xiang Bing Wang Sheng Li Le-min

(Key Lab of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks,  
University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract** In WDM networks, the bandwidth request of a traffic stream can be much lower than the capacity of a wavelength. Traffic grooming can aggregate low-rate connections onto high-capacity lightpaths to make full use of the bandwidth. But most of the researches related to traffic grooming has focused on ring networks, and fewer concerns are about the dependable traffic grooming of low-rate connections in WDM mesh networks. In this paper, a Shared Protection Traffic Grooming algorithm is proposed based on wavelength Layered-Graph (SPTG-LG) considering both the survivability and traffic grooming in WDM mesh networks. Some simulations and analysis are also given out.

**Key words** WDM mesh networks, Traffic grooming, Wavelength layered-graph, Shared protection

### 1 引言

WDM 网络中, 网络部件的失效往往会影响到高达太比特 / 秒的业务流传输. 由于多故障同时发生的几率不高且恢复 (Recovery) 机制较复杂, 目前网络生存性 (即网络在经受各种故障后维持可接受业务质量的能力) 研究主要集中于单故障恢复<sup>[1-7]</sup>.

恢复受影响业务的策略大体上可分为保护 (Protection) 和恢复 (Restoration) 两种机制, 其中保护通过预先计算设置保护资源来快速应对网络故障. 路径保护 (Path protection) 是一种常见保护机制, 设置的工作路与保护路是物理分离的, 网络故障发生时业务流从工作路切换到保护路, 保护路可以是专用的 (Dedicated), 也可以是共享的 (Shared), 共享保护路可以提高资源的利用率, 但要求共享保护路的工作路不能同时失效<sup>[1-3]</sup>. 文献 [6, 7] 分别研究了共享保护路算法, 关键是找到链路分离的工作路并使其保护路尽量共享更多的链路从而有效利用保护资

<sup>1</sup> 2003-03-02 收到, 2003-06-30 改回

国家自然科学基金项目 (60002004) 及教育部科学技术研究重点项目 (02064) 资助课题

源, 算法采用先路由选择后波长分配的策略. 关于网络生存性的研究主要以波长为基本单位, 除文献 [7] 外均未涉及业务量疏导 (Traffic grooming). 基于波长的光路带宽粒度较粗, 相对于端到端实际的细粒度业务来讲带宽利用率不高, 业务量疏导则可以聚集低速业务到大容量的光路中从而有效地利用波长带宽资源. 目前关于业务量疏导的文献主要集中在对 WDM/SONET 环网的研究上 [8-11], 只有少量文献 [12] 研究了网状网业务量疏导问题, 而考虑对 WDM 网状网中低速业务可靠疏导的文献更少, 在文献 [7] 中提出了利用建立保护路的方法对低速动态业务可靠疏导, 采用较复杂的  $k$  路由和 First-fit 的 RWA 算法, 当网络规模大同时业务连接请求较多时计算量较大.

本文综合考虑 WDM 网状网生存性及业务量疏导问题, 提出了一种机理简单的启发式算法, 即基于波长分层图的共享保护业务疏导量算法 (SPTG-LG, Shared Protection Traffic Grooming algorithm based on wavelength Layered-Graph), 其基本思路是: 依次在各波长平面分别找到链路分离的工作路及同一波长平面相应的共享保护路, 以工作路为基础建立虚拓扑, 在此虚拓扑中进行业务量疏导.

本文内容安排如下: 第 2 节详细描述物理模型及路由策略, 接着在第 3 节介绍基于波长分层图的共享保护业务量疏导算法, 最后是仿真结果分析及结论.

## 2 问题描述

### 2.1 网络模型

所用的  $N$  个节点网状核心网络中, 每条链路由一对双向传输的光纤互连而成; 网络中每个节点均由 ADM 电分插复用设备连接到 OXC 上, OXC 对各光纤波长具有无阻塞的交换能力, 但不具备波长变换能力; 接入节点到核心网络的带宽及处理能力足够大, 不存在瓶颈; 每个波长的带宽粒度为 2.5Gbps (即 OC-48), ADM 可以将 16 个 OC-3 (155Mbps) 细粒度的业务复用到单个波长上, 每条光路中 ADM 是一一对应的. 本文假设对应节点上下路的每个波长均配置一个 ADM, 即节点收发器数不受限制, 同一节点的 ADM 之间可以交换业务流.

利用波长分层图 (Layered Graph, LG) 可以一次性解决 WDM 网络路由选择和波长分配问题 [13], 方法是: 以  $G(N, L, W)$  表示网络的物理拓扑, 其中  $\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\}$  为节点集, 节点由不具备波长变换能力的 OXC 组成, 其数量为  $N$ ;  $\mathcal{L} = \{l_{ij} | i, j \in \mathcal{N}\}$  代表双向链路集, 链路一旦使用, 则可建立双向通道;  $\mathcal{W} = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{|W|}\}$  代表波长集, 假设各光纤的波长数相等均为  $|W|$ . 按照如下步骤可产生分层图  $LG(\mathcal{V}, \mathcal{E})$ :  $G$  中的每个顶点  $n \in \mathcal{N}$  在 LG 中被复制了  $|W|$  次, 对应顶点  $v_n^1, v_n^2, \dots, v_n^{|W|}$ . LG 中各顶点之间的连接方式与  $G$  相同, 即若  $G$  中节点  $n$  与  $m$  之间存在链路  $l_{mn} \in \mathcal{L}$ , 则对于任意  $w \in \{1, 2, \dots, |W|\}$ , LG 中的所有顶点对  $v_n^w$  和  $v_m^w$  之间也存在弧  $e_{mn}^w$ . 这样, LG 中的每个层代表了一个波长, 称为波长平面, 由于各顶点的 OXC 无波长转换能力, 因此各波长平面相互独立. RWA 问题就可以通过在每个波长平面计算路由, 如果在该波长平面找到一条源宿节点间的光路, 则可分配该波长.

### 2.2 路由策略

对于单链路故障的共享保护, 任一工作路均有相应的保护路, 同一故障时刻经过同一保护链路的业务量等于失效工作路容量, 因而业务量的疏导只需在工作路中实施. 基于共享保护的流量疏导可列出整数线性规划 ILP 公式求解 [5,12], 但 ILP 的目标优化是 NP-hard (NP, Nondeterministic Polynomial) 问题, 不适合大规模网络, 因此需要找出启发式算法 (将在第 3 节中详细叙述).

为有效地利用光纤中的波长资源, 启发式算法设计时应尽量少地占用波长. 有研究 [4] 表明: 当采用 First-fit 分配波长时, 工作路与保护路同波长时网络资源可以得到较有效的利用, 同时在不同波长平面寻找共享保护链路又会增加算法复杂度. 因此基于波长分层图的共享保护业

务量疏导算法其工作及保护光路考虑建立在同一个波长平面。节点间的光路可分为单跳 (Single-hop) 光路及多跳 (Multi-hop) 光路, 多跳光路由多个单跳光路组成, 由于单跳光路时延较低, 在进行业务量疏导时, 应考虑尽量先使用单跳光路, 并由单跳光路构建虚拓扑, 进行业务量疏导 [12]。

通常共享保护路算法 [6] (本文定义为 SP-Normal, Normal Shared Protection algorithm) 的 RWA 采用先路由选择后波长分配的策略, 即先找到链路分离的工作路, 并使其保护路尽量共享更多的链路从而有效地利用保护资源, 然后分配波长。对于节点连通度较低的网络, SP-Normal 往往不能找到较多的链路分离工作路, 如图 1 所示: 当有  $0 \rightarrow 1$ ,  $1 \rightarrow 3$ ,  $6 \rightarrow 7$ ,  $0 \rightarrow 7$  四个连接请求时, 可以找到  $0 \rightarrow 1$ ,  $1 \rightarrow 3$ ,  $6 \rightarrow 7$  三个链路分离的工作路, 对于  $0 \rightarrow 7$  则不能找到链路分离的工作路, 因此, 只能建立  $0 \rightarrow 1$ ,  $1 \rightarrow 3$ ,  $6 \rightarrow 7$  三个连接请求; 而基于波长平面的共享保护链路算法则能建立上述四个连接。

本文研究的目的是在考虑网状网生存性情况下, 如何利用波长分层图建立可靠的细粒度业务连接。

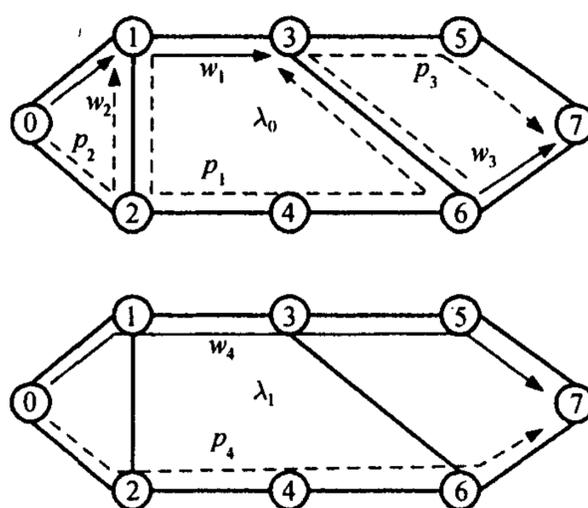


图 1 SPTG-LG 算法示意图

### 3 基于波长分层图的共享保护业务量疏导算法

通常业务量疏导算法可以分为两步: 首先根据业务连接的要求建立虚拓扑, 在此虚拓扑上进行业务量疏导, 简化虚拓扑结构; 然后将简化的虚拓扑映射到实际的物理连接中。文献 [12] 通过对 ILP 求解过程发现: 一旦源宿节点间建好了一条光路后, 业务量疏导总是尽量直接在此光路中进行, 因此建立虚拓扑的关键是建立合适的光路连接。

考虑生存性的业务量疏导算法的基本思路是: 当新的业务连接请求到达时, 首先判断能否在已建单跳工作光路构成的虚拓扑中进行业务量疏导, 若不能则需利用波长分层图建立相应的单跳工作光路及单跳保护光路, 并将新建的单跳工作光路添加到虚拓扑中。对不能同时建立单跳工作光路或保护光路的连接请求视为受阻业务。本文中假定业务连接请求带宽小于波长带宽, 这比较符合实际的应用, 若节点对间的业务连接请求带宽大于波长带宽, 则可将其业务连接请求分解为单独的光路加上小带宽的业务连接请求分别予以处理。

在第 2 节中我们已经描述了基于波长分层图的共享保护业务疏导量算法的思路, 其算法详细步骤如下:

#### 步骤 1 在虚拓扑上疏导低速业务

对到达的业务连接请求根据虚拓扑中各链路的剩余带宽计算链路成本, 当链路的剩余带宽小于业务连接请求时删除该链路, 反之链路成本置 1。应用 Dijkstra 算法建立多跳光路, 若找到一条最短路由, 表明此低速业务可在该最短路由对应的多跳光路 (或单跳光路) 中疏导, 计算该路由所选逻辑链路的剩余带宽; 反之, 若未找到最短路由, 则转步骤 2。

步骤 2 利用波长分层图建立工作路及相应的共享保护路, 并构建虚拓扑

(1) 将给定的网络物理拓扑  $G(\mathcal{N}, \mathcal{L}, \mathcal{W})$  转换为分层图  $LG(\mathcal{V}, \mathcal{E})$ , 初始化  $LG$  中每条弧的成本为 Basic-cost(在仿真实验中设为 100)。

(2) 设定当前波长平面为分层图的第一层。

(3) 在当前波长平面上删除已用工作及保护链路, 对到达的业务连接请求用 Dijkstra 算法建立单跳工作光路, 若未找到工作路则转 (4); 若工作路选路成功, 在该波长平面中删除该工作路对应的链路, 恢复所有保护链路, 并降低其链路代价, 再次应用 Dijkstra 算法建立单跳保护光路, 这样保证所建立的工作路与保护路链路分离 (Link-disjoint) 同时使保护路尽量沿已有的保护链路选路; 若保护路选路成功, 计算单跳工作光路的剩余带宽, 转 (5); 反之, 若未找到保护路, 则恢复工作路所占用的链路转 (4)。

(4) 判断所有波长平面是否使用完毕, 若是则转 (5); 否则, 设定分层图的下一层为当前波长平面转 (3);

(5) 若同时找到工作光路及保护光路, 则将已建单跳工作光路添加到虚拓扑中, 其节点为单跳工作光路的端点, 链路容量为相应光路的剩余容量; 否则, 丢弃该连接请求。

以上业务疏導算法, 综合考虑了 WDM 网状网生存性及业务量疏導, 在下一节的仿真实验中, 首先针对不同连接度的网络, 比较当连接请求带宽等于波长带宽时 SPTG-LG 算法与 SP-Normal 算法的性能; 然后, 对 NSFNET 网络中低速业务采用 SPTG-LG 算法仿真, 比较改变保护链路代价对算法的影响, 并与基于专用保护的業務量疏導算法作性能比较。

基于专用保护的業務量疏導算法 (Dedicated Protection Traffic Grooming, DPTG) 步骤与 SPTG-LG 相似, 只对其步骤 2 的 (3) 作如下修改:

(3) 在当前波长平面上删除已用工作及保护链路, 对到达的业务连接请求用 Dijkstra 算法建立单跳工作光路, 若未找到工作路则转 (4); 若工作路选路成功, 在该波长平面中删除该工作路对应的链路, 再次应用 Dijkstra 算法建立单跳保护光路; 若保护路选路成功, 计算单跳工作光路的剩余带宽, 转 (5); 反之, 若未找到保护路, 则恢复工作路所占用的链路转 (4)。

#### 4 仿真及结果分析

本文仿真采用的物理网络拓扑为不同连接度网络及 14 节点 21 链路的 NSFNET, 如图 2 和图 3 所示, 其中图 2 中分别为 6 节点的 Ring, Partialmesh, Fullmesh 网络, 其节点连通度分别为 2, 3, 5。仿真过程如下: 波长带宽设为 16 个 OC-3, 随机产生 500 对业务连接请求源宿节点, 各业务连接请求的带宽分别在 1~4 OC-3 间随机均匀产生, 当无业务量疏導时业

务连接请求带宽等于波长带宽, 业务连接请求顺序到达且不撤销 (Incremental 型)。分别利用第 3 节的启发式算法仿真 100 次, 统计平均不同单纤波长数 ( $W/F$ ) 条件下各次实验建立的业务连接数, 并做相应比较, 仿真结果分别绘于图 4, 图 5 中。

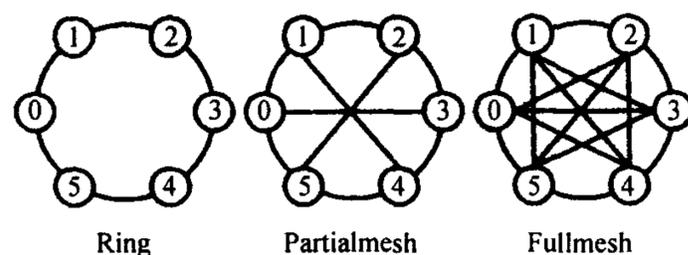


图 2 不同连接度网络

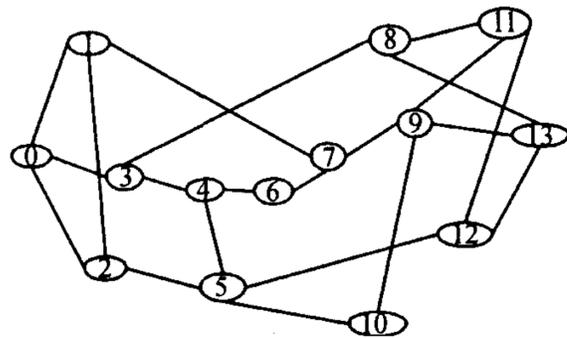


图3 NSFNET:G(14,21)

图4反映的是当  $W/F = 8$ , 当连接请求带宽等于波长带宽时, 分别采用 SPTG-LG 与 SP-Normal 算法建立的业务连接数。正如第2节的分析, 当网络连接度较低时, SPTG-LG 算法比 SP-Normal 算法建立更多的业务连接, 并且是网络连接度越低, SPTG-LG 算法改善越多; 当网络节点完全连接时 (Fullmesh), SPTG-LG 与 SP-Normal

算法建立相同的业务连接。通过对不同的  $W/F$  的仿真实验结果均证实以上结论。

图5反映了采用 SPTG-LG 算法以及基于专用保护的作业量疏导算法, NSFNET 网络拓扑模型中单纤波长数与建立的业务连接数的关系。图例中 S 表示采用 SPTG-LG 算法, NTG 表示无业务量疏导,  $C = 1$ ,  $C = 0.5$ ,  $C = 0$  分别表示保护链路代价不改变, 减少 50% 以及代价为 0; Dedicated 即采用基于专用保护的作业量疏导算法。可以得出如下结论: (1) 相同单纤波长数条件下, 实施业务量疏导时建立的业务连接数较多, 同时采用 SPTG-LG 建立的业务连接数远多于采用专用保护路的作业量疏导算法, 因此 SPTG-LG 算法可以更有效地利用网络资源; (2) 不同保护链路的代价对 SPTG-LG 的性能改变不大, 通常  $C = 0$  时较好。

通过对其它不同网络如 CERNET 等的仿真实验均得出以上结果, 限于篇幅不再一一列出。

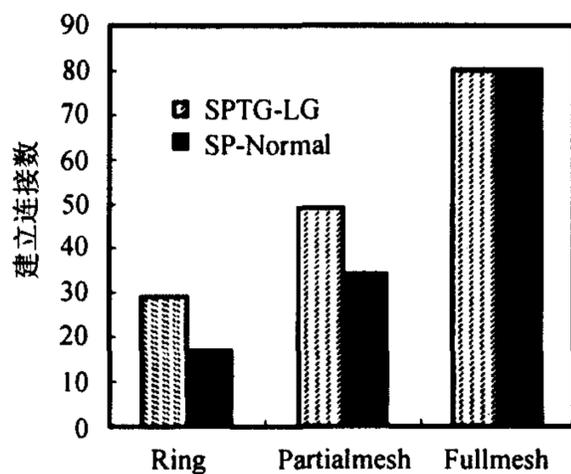


图4 SPTG-LG, SP-Normal 算法比较

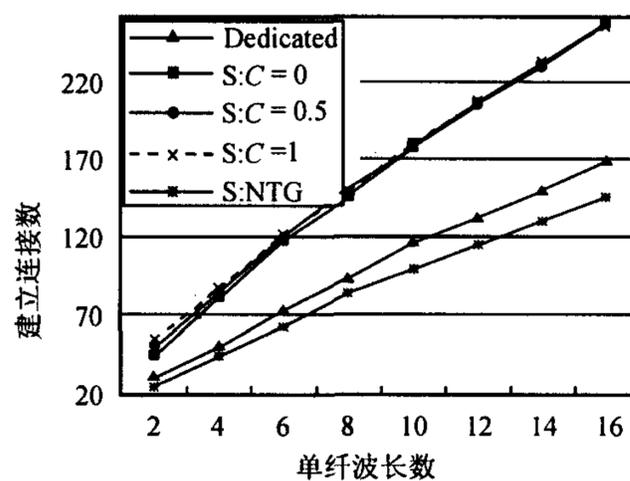


图5 SPTG-LG 算法与 DPTG 算法比较

## 5 结论

通过业务量疏导可以充分利用波长带宽资源, 因而得到了广泛的关注, 但大多数的研究限于 SDH/SONET 环网业务量疏导的研究, 只有少量研究关注于网状网; 另外, 对 WDM 网状网中低速业务可靠疏导也没有足够的重视。针对 WDM 网状网生存性及业务量疏导的要求, 本文提出了基于波长分层图的共享链路保护业务疏导算法 (SPTG-LG)。通过对不同连接度网络进行仿真实验, 结果表明: SPTG-LG 算法能建立较多的业务连接, 优于 SP-Normal 算法; 另外, 在对 NSFNET 网络中的低速业务采用 SPTG-LG 及专用保护路业务量疏导算法仿真实验结果表明: SPTG-LG 算法可以建立更多的低速业务连接, 从而更有效地利用网络资源。

## 参 考 文 献

- [1] Ramamurthy S, Mukherjee B. Survivable WDM mesh networks, Part I—Protection. in Proc., IEEE INFOCOM'99, New York, NY, March 1999: 744–751.
- [2] Ramamurthy S, Mukherjee B. Survivable WDM mesh networks, Part II—Restoration. in Proc. IEEE ICC'99, Vancouver, Canada, June 1999: 2023–2030.

- [3] Sun-il Kim, Lumetta S S. Addressing node failures in all-optical networks. *J. of Optical Networking*, 2002, 1(4): 154-163.
- [4] Anand V, Qiao C. Static versus dynamic establishment of protection paths in WDM networks. *J. of High Speed Networks (JHSN)*, Special issue on optical networks, 2001, 10(4): 317-327.
- [5] Shin'ichi Arakawa, Masayuki Murate. Lightpath management of logical topology with incremental traffic changes for reliable IP over WDM networks. *Optical Networks Magazine*, 2002, 3(3): 68-75.
- [6] Shengll Yuan, Jue J P. Shared protection routing algorithm for optical networks. *Optical Networks Magazine*, 2002, 3(3): 32-39.
- [7] Sashisekaran Thiagarajan, Somani A K. Traffic grooming for survivable WDM mesh networks. *Optical Networks Magazine*, 2002, 3(3): 88-98.
- [8] Wang J, Vemuri V R, et al.. Improved approaches for cost-effective traffic grooming in WDM ring networks: ILP formulation and single-hop and multihop connections. *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, 2001, 19(11): 1645-1653.
- [9] Wan P J, Călinescu G, Liu L, Frieder O. Grooming of arbitrary traffic in SONET/WDM BLSRs. *IEEE J. on Select. Areas in Commun.*, 2000, 18(10): 1995-2003.
- [10] Modiano E, Lin P J. Traffic grooming in WDM networks. *IEEE Commun. Mag.*, 2001, 39(7): 124-127.
- [11] Gerstel O, Ramaswami R, et al.. Cost-effective traffic grooming in WDM rings. *IEEE/ACM Trans. Networking*, 2000, 8(5): 618-630.
- [12] Keyao Zhu, Mukherjee B. Traffic grooming in an optical WDM mesh network. *IEEE J. on Select. Areas in Commun.*, 2002, 20(1): 122-133.
- [13] Chen C, Banerjee S. A new model for optimal routing and wavelength assignment in wavelength division multiplexed optical networks. *IEEE INFOCOM*, San Francisco, April 1996: 164-171.

向兵: 男, 1970年生, 博士生, 目前主要研究方向为 WDM 光网络技术.

王晨: 男, 1971年生, 博士, 副教授, 目前主要研究方向为 WDM 光网络技术.

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宽带通信网技术.