

## WDM 网状网中支持业务量疏导的区分共享保护算法

向 兵 虞红芳 王 晟 李乐民

(电子科技大学宽带光纤传输与通信网技术重点实验室 成都 610054)

**摘 要:** 该文综合考虑 WDM 网状网生存性及业务量疏导, 采用部分光路共享保护机制为低速业务提供满足其可靠性和带宽需求的连接, 提出了一种基于波长分层图的支持业务量疏导的区分共享保护算法——部分共享保护业务量疏导算法 PSPTG(Partial Shared-path Protection algorithm supporting Traffic Grooming)。仿真结果表明: 该算法可以较好地利用资源。

**关键词:** WDM 网状网, 可靠性, 波长分层图, 区分保护, 共享保护, 业务量疏导

中图分类号: TN915.01

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)08-1299-05

## A Differentiated Shared Protection Algorithm Supporting Traffic Grooming in WDM Mesh Networks

Xiang Bing Yu Hong-fang Wang Sheng Li Le-min

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

**Abstract** Considering both the survivability and traffic grooming, a differentiated shared protection algorithm using wavelength layered-graph called PSPTG, which means Partial Shared-path Protection algorithm supporting Traffic Grooming, is proposed. In this algorithm, a shared protection scheme of partial lightpath based on link reliability is presented to meet the requests of reliability and bandwidth of connections. Simulation results show that the algorithm is efficient in terms of resources utilization.

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

### 1 引言

现代光通信网络的物理拓扑通常由具有 WDM 接口的电复用设备(或边缘路由器)接入节点和由 OXC 节点组成的波长路由核心网络组成, 通过适当的波长路由技术可提供端到端的光路<sup>[1]</sup>。采用波分复用的 WDM 网络中, 网络部件(节点、链路等)的失效往往会影响到高达 Tbps 量级的业务流传输。如何提高网络在经受各种(如信道、链路、节点等)故障后维持可接受的业务质量的能力, 即生存性(Survivability)研究是 WDM 网络研究的一个重要分枝。由于多故障同时发生的几率不高, 而且基于多故障的恢复(Recovery)机制比较复杂, 目前网络生存性的研究主要集中于单故障恢复<sup>[2-5]</sup>。在这些文献中, 多采用端到端的路径保护(Path protection), 而没有考虑有区分(Differentiated)的可靠性服务, 只向用户提供两种可靠性选择: 100%的单故障保护和无保护。随着各种新业务的

不断出现、应用和推广, 对连接的生存性产生不同的要求<sup>[6,7]</sup>, 在网络中支持不同可靠等级的连接请求是目前光网络的发展趋势之一。对于大型网络, 实际网络各部件的故障发生存在一定概率。因此, 网络不可能提供绝对保障而只能提供概率性的保障, 而各种业务的可靠性要求也反映为概率性。在这种情况下, 提供对工作光路中部分链路的保护而非端到端的保护, 既可有效利用网络资源又能满足业务可靠性要求<sup>[7]</sup>。

关于网络生存性的研究主要以波长(或光纤)为基本单位。资源的限制使得不可能在所有业务请求间建立光路, 而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, 通过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, 优化目标主要是减少 ADM 和波长数量, 即网络成

2004-03-05 收到, 2004-09-07 改回

国家自然科学基金(60002004, 60302010)和教育部科学技术研究重点项目(02064)资助课题

本<sup>[8-11]</sup>；少量文献研究了网状网的业务量疏导问题<sup>[12]</sup>，优化目标为网络吞吐量；而考虑对 WDM 网状网中低速业务可靠疏导的文献则更少，在文献[13]和文献[14]中研究了利用共享保护路提供低速业务可靠疏导的方法，但未考虑区分保护的问题。

本文综合考虑 WDM 网状网生存性及业务量疏导问题，基于可靠性采用部分光路共享保护机制为低速业务提供满足其可靠性和带宽要求的连接，提出了一种基于波长分层图的支持业务量疏导的区分共享保护算法——部分共享保护业务量疏导算法(Partial Shared-path Protection algorithm supporting Traffic Grooming, PSPTG)，该算法根据不同业务的带宽和可靠性要求，选择合适的单跳或多跳光路进行业务量疏导，并提供相应可靠等级的部分工作路保护。

本文内容安排如下：第2节详细描述网络模型、业务量疏导及部分光路保护机制，接着在第3节介绍了基于波长分层图的部分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  $N$  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，每根光纤(含链路内的光放大器及 WDM 复接器等)的波长数记为  $W$ ，这样一旦建立了节点间的光路连接，就形成了双向通道；网络中每个节点均由电复用设备连接到 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)，电复用设备可以将 16 个 OC-3(155Mbps) 细粒度的业务复用到单个波长上，节点收发器数不受限制，同一节点的电复用设备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<sup>[15]</sup>，方法是：以  $G(N, \mathcal{L}, \mathcal{W})$  表示网络的物理拓扑，其中  $N=\{1, 2, \dots, N\}$  为节点集，节点由不具备波长变换能力的 OXC 组成，其数量为  $N$ ； $\mathcal{L}=\{l_{ij} \mid 0 < i, j \leq N\}$  代表双向链路集，链路一旦使用，则可建立双向通道； $\mathcal{W}$  代表波长集，假设各光纤的波长数相等，每条光纤的波长集都为  $\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{|W|}\}$ 。按照如下步骤可产生分层图  $LG(V, \mathcal{E})$ ： $G$  中的每个顶点  $n \in N$  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  $l_{nm} \in \mathcal{L}$ ，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  $e_{nm}^w$ 。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。这样 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 基于可靠性的共享保护机制

从工程建设的角度，构建 WDM 网络时应充分考虑网络部件的可靠性，如光缆线路的安全性，OXC、光放大器、光/电端机等设备平均使用寿命(MTBF)等。统计意义上这种可靠性可以反映为网络中链路的可靠性。同时，各种业务连接对生存性要求是不同的，客户层实际的业务连接请求需要有区分(Differentiated)的可靠性服务，其可靠性要求可反映为概率性保障，因此只需要提供对工作路中部分光路的保护而非端到端的保护。

如图 1 所示，根据共享保护机制，对于链路分离的工作路  $W_1$  和  $W_2$ ，可分别建立端到端的共享保护路  $P_{1F}$  和  $P_{2F}$ ，另外  $P_{1S}$  和  $P_{2S}$  构成对部分工作路  $0 \leftrightarrow 1$  及  $0 \leftrightarrow 6 \leftrightarrow 7$  的保护。令  $R_i$  代表各链路的可靠性，则工作路(work-path, wp)，分段工作路及(work-segment, ws)相应部分保护路(backup-path, bp)的可靠性分别表示为

$$R_w = \prod_{l \in wp} R_l, \quad R_s = \prod_{l \in ws} R_l, \quad R_b = \prod_{l \in bp} R_l$$

建立的业务连接的综合可靠性为

$$R_c = R_w \cdot (R_s + R_b \cdot (1 - R_s)) / R_s \quad (1)$$

假设各链路的可靠性均为  $R_i=0.98$ ，业务连接的可靠性要求为  $R_r=0.95$ 。工作路可靠性为  $R_{w1}=R_{w2}=0.9412$ ，显然不能满足可靠性要求，需要建立保护路。对于图 1 中建立的两种保护路而言，其综合可靠性分别为 0.9965(完全保护： $P_{1F}$  及  $P_{2F}$ )，0.9596(部分保护： $P_{1S}$ )和 0.9785(部分保护： $P_{2S}$ )，可见部分保护既可满足业务连接可靠性需求又因占用较少的链路而节约网络资源。对于实际的网络由于网络连接度的限制，有时并不能找到部分保护路，此时为保证业务连接请求的建立，源宿节点间的完全保护路也应成为必要的备用选择。基于可靠性的保护机制的关键步骤是如何找到需要保护的工作光路分段，经过分析，需要保护的工作路分段其可靠性应满足： $R_s < R_w / R_r$ <sup>[7]</sup>。

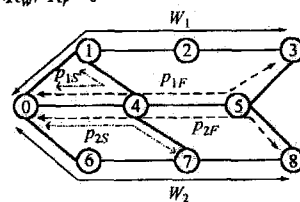


图 1 部分保护及完全保护比较

### 2.3 业务量疏导

对于基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

于共享保护的作业量疏导应分别满足关于网络生存性及作业量疏导的物理路由、虚拓扑连接及作业量等条件限制,可列 ILP 公式求解,但基于 ILP 的目标优化是 NP-hard 问题,不适合大规模网络,需要找出启发式算法(将在第 3 节中详细叙述)。

通常作业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,在此虚拓扑上进行作业量疏导,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,作业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。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,在进行作业量疏导时,通常由单跳光路构建虚拓扑,进行作业量疏导。

低速业务在虚拓扑中疏导时,应采用适当的选路算法(例如 Dijkstra 算法)。对于基于可靠性的作业量疏导,虚拓扑中逻辑链路的权值应考虑时延  $D$  (对应于光路的跳数)。逻辑链路的可靠性  $R$ 、业务带宽  $Bq$  及逻辑链路剩余带宽  $Br$ ,可采用式(2)计算其大小,式中  $W$  为权值调整常数。

$$\text{Cost} = \begin{cases} D - W \cdot \log(R \cdot Bq / Br), & Br \geq Bq \\ \infty, & Br < Bq \end{cases} \quad (2)$$

为有效利用光纤中的波长资源,启发式算法设计时应尽量少的占用波长。有研究<sup>[5]</sup>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地利用,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作业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。

本文研究的目的在于考虑网状网生存性及作业量疏导情况下,如何利用波长分层图基于可靠性采用部分光路保护共享保护机制为低速业务提供可靠连接。下节将详细介绍部分共享保护作业量疏导(Partial Shared-path Protection algorithm supporting Traffic Grooming, PSPTG)算法。

### 3 支持作业量疏导的区分共享保护算法

客户层的业务连接请求进入光层时均包含有可靠性及带宽要求,基于可靠性采用部分光路保护机制支持作业量疏导的区分保护算法的基本思路是: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作业量疏导,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。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逻辑链路的剩余带宽、可靠性按式(2)计算链路成本。应用 Dijkstra 算法建立多跳光路,若找到一条最短路由,使得其可靠性满足业务连接可靠性的要求,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,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  $G(N, \mathcal{L}, W)$  转换为分层图  $LG(V, \mathcal{E})$ , 初始化  $LG$  中每条弧的成本为  $\text{Basic\_Cost}$  (在仿真实验中设为 100)。设定当前波长平面为分层图的第 1 层。

(2) 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 算法建立工作光路。若未找到工作路则转(4);若工作路选路成功,判断工作路是否满足该业务连接的可靠性要求,若满足转(5);否则转(3)。

(3) 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。在工作路中找到符合  $R_s < R_w / R_r$  的分段,应用 Dijkstra 算法建立相应保护光路(完全保护可视为分段保护的特例),若存在分段保护使得其综合可靠性满足业务连接可靠性的要求,则在其中选择占用链路资源最少的分段保护,转(5);反之,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(2);

(5) 若找到满足连接请求的工作光路或同时找到工作光路及相应的部分(或完全)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。

当步骤 2 (3)中不恢复已占用的保护路时,即可得到支持作业量疏导的部分专用保护算法(Partial Dedicated-path Protection, PDP)。

以上作业疏导算法,综合考虑了 WDM 网状网生存性及作业量疏导,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部分共享保护算法与部分专用保护算法的性能;然后,对 NSFNET 网络中低速业务分别采用部分共享保护算法与完全共享保护算法<sup>[13]</sup>进行仿真,并作性能比较。仿真结果表明 PSPTG-LG 算法对资源利用率有较佳的改善。

### 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 节点的环形、部分网格和全连接网络, 其节点连接度分别为 2,3,5。

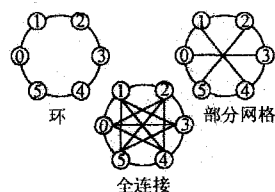


图 2 不同连接度网络

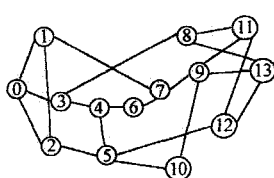


图 3 NSFNET:G(14,2)

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 4~8 个 OC-3 间随机均匀产生, 当无业务量疏导时业务连接请求带宽等于波长带宽, 业务连接请求为双向顺序到达且不撤销(Incremental 型), 链路的可靠性设定在 0.98。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 4~6 中。

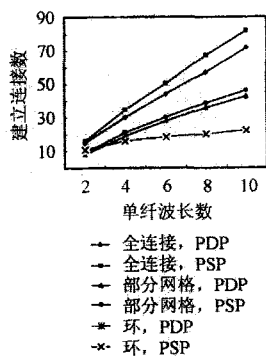


图 4 不同连接度网络中, 部分共享保护与部分专用保护性能比较

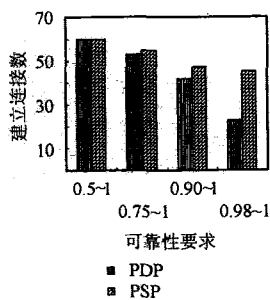


图 5 不同业务连接可靠性要求时, 部分共享保护与部分专用保护性能比较

图 4 反映的是不同连接度网络中, 当连接请求带宽等于波长带宽, 业务可靠性要求在 0.95~1.0 均匀产生时, 分别采用部分共享保护(Partial Shared-path Protection, PSP)与部分专用保护(Partial Dedicated-path Protection, PDP)算法建立的业务连接数。可以得出如下结论: (1) 随着网络可用资源增加, 在连接度较高的网络中或  $W/F$  较高时, 选路成功的业务连接数增加; (2) 在连接度较高的网络中, 由于可供选择的路由较多, 此时 PSP 的保护路可以充分共享复用, 因此能比 PDP 建立更多的业务连接; 而当网络连接度较低时, 共享保护与专用保护的资源利用率差别不大, 特别是对于 Ring 几乎无差别。

图 5 反映了  $W/F=6$  时, 采用部分共享保护及部分专用保护算法, 全连接网络拓扑模型中不同业务连接可靠性要求与建立的业务连接数的关系。仿真结果表明: 当业务连接可靠性要求越高, 由于需要建立保护路的业务较多, PSP 比 PDP 对网络资源的利用改善越多。而当业务连接可靠性要求较低时, 大部分业务只需要建立工作路即可满足其可靠性要求, 这时, 共享保护与专用保护无多大区别。通过对不同  $W/F$  的仿真均可得出同样的结论。

图 6 中绘出了 NSFNET 网络中, 业务可靠性要求在 0.75~1.0 均匀产生时, 分别采用部分共享保护 PSP 与完全共享保护(Full Shared-path Protection, FSP)算法, 在实施业务量疏导(TG)及不实施业务量疏导(NTG)时建立的业务连接数。可以得出如下结论: (1) 部分保护时, 针对不同业务连接可靠性的要求, 部分业务只需要建立工作路, 其它需要建立保护路的业务其保护路占用的链路资源也较少, 选路成功的业务连接数较多; (2) 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 PSPTG 建立的业务连接数远多于采用完全共享保护路的业务量疏导算法, 因此 PSPTG 算法可以更有效地利用网络资源。

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。

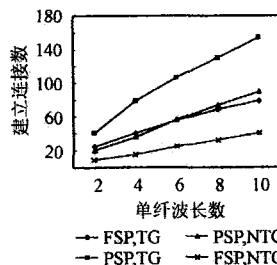


图 6 部分共享保护与完全共享保护性能比较

### 5 结束语

在服务多样化的背景下, 提供有区分的可靠服务已成为光网络发展趋势之一; 同时实际业务连接的带宽需求往往远远小于波长带宽, 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, 本文基于可靠性采用部分共享保护机制为低速业务提供可靠连接, 提出了基于波长分层图的部分共享保护业务量疏导算法 (PSPTG)。仿真结果表明: 该算法在保证业务连接可靠性及带宽需求的同时能更有效地利用网络资源。

## 参考文献

- [1] Mukherjee B. WDM optical communication networks: Progress and challenges. *IEEE J. Select. Areas in Commun.*, 2000, 18(10): 1810 – 1823.
- [2] Ramamurthy S, Mukherjee B. Survivable WDM mesh networks, Part I-Protection. in Proc. IEEE INFOCOM'99, New York, NY, March 1999: 744 – 751.
- [3] Ramamurthy S, Mukherjee B. Survivable WDM mesh networks, Part II-Restoration. in Proc. IEEE ICC'99, Vancouver, Canada, June 1999: 2023 – 2030.
- [4] Yuan S, Jue J P. Shared protection routing algorithm for optical networks. *Optical Networks Mag.*, 2002, 3(3): 32 – 39.
- [5] 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.
- [6] Gerstel O, Sasaki G. Quality of Protection (QoP): A quantitative unifying paradigm to protection service grades. *Optical Networks Mag.*, 2002, 3(3): 45 – 49.
- [7] Saradhi C V, Murthy C S R. Routing differentiated reliable connections in WDM optical networks. *Optical Networks Mag.*, 2002, 3(3): 50 – 67.
- [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.e
- [9] Wan P J, Călinescu G, et al.. 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] Zhu K Y, Mukherjee B. Traffic grooming in an optical WDM mesh network. *IEEE J. on Select. Areas in Commun.*, 2002, 20(1): 122 – 133.
- [13] Xiang B, Wang S, Li L M A traffic grooming based on shared protection in WDM mesh networks. IEEE PDCAT, ChengDu, China, August 2003: 254 – 258.
- [14] Thiagarajan S, Somani A K. Traffic grooming for survivable WDM mesh networks. *Optical Networks Mag.*, 2002, 3(3): 32 – 39.
- [15] 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, 高级工程师, 研究方向为WDM光网络技术。
- 虞红芳: 女, 1975年生, 在职博士生, 讲师, 研究方向为WDM网中的优化设计问题包括网络生存性和重配置。
- 王晟: 男, 1971年生, 博士, 副教授, 研究方向为WDM光网络技术。
- 李乐民: 男, 1932年生, 中国工程院院士, 教授, 博士生导师, 研究方向为宽带通信网。