

## 基于分簇的动态业务量疏导区分保护策略

熊余<sup>1,2</sup>, 李圆圆<sup>1</sup>, 唐剑波<sup>1</sup>, 赵莹<sup>1</sup>, 王汝言<sup>1</sup>

(1. 重庆邮电大学 光通信和网络重点实验室, 重庆 400065; 2. 重庆大学 计算机学院, 重庆 400030)

**摘要:** 为对动态业务快速有效疏导, 并实现智能区分保护, 提出一种基于分簇业务量疏导的动态区分保护策略。该策略基于极大独立集将网络有效分簇, 减小疏导寻路耗时; 同时将分层辅助图、波长剩余容量矩阵及簇汇聚层相互协同, 对簇内簇间业务疏导, 实现资源的合理规划, 提高疏导效率; 其后通过感知各优先级业务比例划分波长链路重要度, 设计智能P圈进行区分保护。仿真表明, 所提策略能更充分利用资源, 且随负载增加有较好的阻塞率性能。

**关键词:** WDM 网络; 动态业务量疏导; 智能P圈; 区分保护

**中图分类号:** TN929.11

**文献标识码:** A

## Differentiated protection strategy with dynamic traffic grooming based on clustering

XIONG Yu<sup>1,2</sup>, LI Yuan-yuan<sup>1</sup>, TANG Jian-bo<sup>1</sup>, ZHAO Ying<sup>1</sup>, WANG Ru-yan<sup>1</sup>

(1.Key Laboratory of Optical Communication and Networks, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

2.School of Computer Science, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** To make dynamic traffic grooming faster and more efficient, and achieve an intelligent differentiated protection, a differentiated protection strategy with dynamic traffic grooming based on clustering (DPS-DTGC) was proposed. The whole network topology was allocated some clusters based on maximal independent set, in order to reduce the routing time consumption. Meanwhile, by the cooperation of layered auxiliary graph, residual capacity matrix and cluster aggregation layer, the traffic in inter- and intra- clusters would be groomed to realize the reasonable planning of resources and the higher efficiency of grooming. Furthermore, according to the proportion of different priority traffic in one wavelength, the link importance was evaluated and a smart P-cycle was designed to give differentiated protection to the link. The simulation results show this strategy can make a better utilization of network resource. And with the increase of network load, it will gain a good performance in blocking rate.

**Key words:** WDM network; dynamic traffic grooming; smart P-cycle; differentiated protection

### 1 引言

目前, WDM 网络单光纤波长速率可达 100 Gbit/s 甚至更多, 但业务数据速率范围一般只在 155 (OC-3)~622 Mbit/s(OC-12)<sup>[1,2]</sup>。而传统路由方式, 一个低速业务独占一个波长, 浪费了大量带宽资源。为有效

利用资源, 业务量疏导技术应运而生。而疏导后各波长承载了更大量的业务数据, 一旦故障则损失严重, 须对其进行恰当保护, 且由于疏导后聚合流中不同优先级的业务数量不一, 在保护时应有针对性地区分保护, 才能实现资源的合理有效分配。

收稿日期: 2014-04-17; 修回日期: 2015-09-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61401052); 重庆市自然科学基金资助项目 (2011BA2041); 重庆市教委科学技术研究基金资助项目 (KJ110531, KJ1400418); 重庆邮电大学博士启动基金资助项目 (A2015-09)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China(61401052); The Natural Science Foundation of Chongqing (2011BA2041); The Science and Technology Project of Chongqing Municipal Education Commission (KJ110531, KJ1400418); The PhD Start-up Fund of Chongqing University of Posts and Telecommunications (A2015-09)

业务量疏导即把多个低速率业务合并为一个高速流传输, 共享同一个波长容量, 以提高波长资源利用率及增大网络吞吐量。其优化问题属于 NP 难题, 而整数线性规划(ILP)正是解决优化问题的重要方法, 因此常被用于解决业务量疏导问题<sup>[3]</sup>。但利用 ILP 模型疏导, 需提前知道业务请求矩阵, 计算耗时长, 且耗时随网络规模扩大而剧增, 不适合现在动态变化的网络需求。文献[4]中将源目的节点相距较近的业务分团疏导到一起, 相当于分区域疏导, 能有效提高疏导效率, 但其也要求业务请求是静态的。文献[5]摒弃建立疏导 ILP 模型, 利用多粒度综合辅助图来疏导动态业务, 能便捷有效地考虑波长、端口的限制来分配路由及波长, 但若网络规模较大, 仍需全局寻路, 效率不高。为此, 如何快捷有效地解决动态业务量疏导是目前亟待解决的难题。

高效疏导后, 单光纤承载业务成倍增加, 一旦故障则损失严重, 通常需采取适当保护措施来提高网络的生存性。每个波长中承载不同数量的各个优先级业务, 故进一步提供满足用户服务质量需求的区分保护对网络服务质量的提升至关重要。文献[6]中考虑了物理损伤对业务进行疏导并选取了合适的专有保护通路, 专有保护在保护可靠性上是很高的, 但其资源利用率却很低, 且对每个业务均采用专有保护, 忽略了用户的分级要求。文献[7]针对可疏导的 IP 业务, 区分高低级业务的需求选择可靠性不同的共享保护通路, 能降低网络阻塞率, 但其并未考虑到疏导后每个波长中各级业务的数量不一致问题, 单纯针对各级业务进行保护可能存在保护资源耗费过大, 且共享保护难以达到完全保护的效果。文献[8]考虑到链路保护比通路保护在恢复时有更短的路径建立时间, 因此在疏导保护时, 对低负载情况采取链路保护, 对高负载情况实行专有通路保护和共享通路保护相结合的方式, 从而降低网络阻塞, 但其在链路保护时, 采用预置保护路由并由尽量选取有保护链路的方式缺乏灵活性, 难以满足动态业务的自适应要求。

总之, 传统 ILP 疏导模型耗时过长, 分团疏导只针对静态业务, 辅助图疏导仍需全局寻路, 专有疏导保护资源利用太低且没有考虑分级需求, 分级共享保护只针对各级业务一一保护开销过大, 预配置的链路保护不够灵活。因此, 寻找一种合适的方法来快速有效地疏导动态业务, 并针对疏导后“一

波长多业务”的复杂情况实现合理的区分保护是当前网络需要解决的重要问题。

为有效进行动态业务疏导, 且为疏导后各级业务提供合理的区分保护, 提出一种基于分簇的动态业务量疏导区分保护策略 (DPS-DTGC, differentiated protection strategy with dynamic traffic grooming based on clustering)。该策略将网络合理分簇, 利用分层辅助图和虚拟簇汇聚层充分合理规划路由及波长容量, 从而实现快速疏导, 极大地提高了网络资源利用率; 同时通过区分链路波长重要度, 实现不同的服务质量保障; 利用 P 圈全面保护, 并感知业务的到达离开, 动态伸缩 P 圈, 满足当今网络智能化需求, 充分减少了保护资源开销, 增强了网络承载业务的能力。

## 2 疏导区分保护模型

疏导区分保护模型如图 1 所示, 包括业务疏导模块和区分保护模块。其中, 业务疏导模块中簇内业务直接利用分层辅助图进行疏导, 簇间业务先利用虚拟簇汇聚层寻找簇间最短路, 再映射到分层辅助图上进行疏导。区分保护模块首先感知波长链路中各优先级业务比例, 评估其重要度级别, 再分别利用 P 圈进行单、双链路故障保护, 单链路故障保护的波长链路置于 P 圈圈上链路, 双链路故障保护的波长链路置于 P 圈跨接链路, 同时感知业务状态, 智能扩张或释放保护资源。

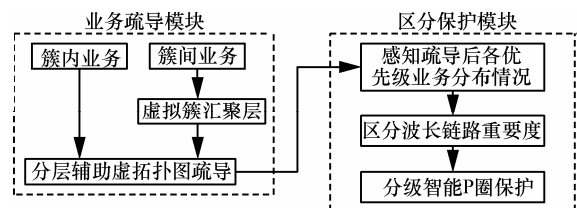


图 1 疏导区分保护模型

## 3 业务疏导模块

### 3.1 基于极大独立集的网络分簇

为增大疏导概率, 需在全拓扑中寻找尽可能多的重叠路由, 这可能导致路由过长从而占用更多资源。源目的节点之间与其他业务重叠的路由可能有多条, 一般疏导算法要将多条路由都找出后再进行最优选择, 此时全局寻路将增大算法复杂度。而网络分簇相当于缩小了路由范围, 能有效降低路由的计算复杂度提高业务疏导效率。但所分簇若太大,

则复杂度降低不明显；所分簇太小，又会带来过多复杂的簇间疏导。同时，若簇头节点与其成员节点距离太远，对于跨簇业务疏导，将业务在簇头节点集中时就可能占用很多资源，影响网络资源的合理利用。因此基于分簇的业务量疏导应满足以下约束条件

$$\min N_H \tag{1}$$

$$\min Dis(Node_H, Node_M) \tag{2}$$

$$\min Dis(Node_H, Node'_H) \tag{3}$$

$$\max N_L \tag{4}$$

其中， $N_H$  表示簇头节点数量， $N_L$  表示簇内链路数量， $Node_H$  表示簇头节点， $Node_M$  表示簇内成员节点， $Dis(i, j)$  表示节点  $i$  和节点  $j$  之间的最短距离。式(1)为最小化簇头数量，以使业务疏导尽量在簇内完成，减少簇间寻路耗时。式(2)为最小化簇头节点与其成员节点间的距离，从而减小簇的规模，使簇内业务能在其中快速完成寻路，且易产生重叠路由便于疏导。同时，便于将跨簇业务在簇头节点汇聚，从而进一步进行跨簇业务路由。式(3)为最小化簇头节点之间的距离，使跨簇业务的簇间路由尽量缩短，减少资源消耗。式(4)为最大化簇内链路数，使在簇内寻路时不容易产生阻塞。

显然，以上几点不能同时满足，在实际中只能权衡取优。综上考虑，为有效将网络进行分割以便于疏导，拟采用基于极大独立集的分簇方法。

**定义 1** 设图  $G = (V, E)$  是简单无向图， $V$  为网络顶点集合， $E$  为边集， $S \subseteq V$ ， $S \neq \emptyset$ ，若  $S$  中任何 2 个顶点都不相邻，则称这个顶点集合  $S$  为图  $G$  的独立集；若  $S$  是图  $G$  的独立集，但是任意增加一个顶点就破坏它的独立性，则称这个独立集  $S$  为极大独立集。

设网络顶点集合  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ ，边集为  $E$ 。则此网络的所有极大独立集  $S$  可通过以下公式求出。

$$A = \bigvee_{\{v_i, v_j\} \in E} (v_i \wedge v_j) \tag{5}$$

$$\bar{A} = \bigwedge_{\{v_i, v_j\} \in E} (\bar{v}_i \vee \bar{v}_j) \tag{6}$$

使  $\bar{A} = 1$  成立的点集即为此网络的极大独立集  $S$ ，上述公式可通过布尔运算化简。

若极大独立集中再任加一个节点就会破坏其独立性，可见极大独立集外其他节点至少都与集合中的一个节点相邻，选取节点数最少的极大独立集

中节点为簇头节点，可以最小化簇头节点数量，以满足约束条件（如式(1)所示）；与簇头节点相邻的节点归为其成员节点，既可将网络剩余节点全部划入簇中，使簇头节点与成员节点间距离最短（此处距离为 1 跳），满足了约束条件（如式(2)所示）。由于簇头数量少，每个簇头分得的成员节点数就会变多，且成员节点若与多个簇头节点相邻则可以同属于多个簇，因此可保证簇内链路数较多，从而尽量满足约束条件（如式(4)所示）。由于簇头节点与每个成员节点相邻，且簇之间不可能出现有节点既不属于此簇又不属于彼簇（若有，则簇头节点集合不是极大独立集），故可以使簇间距离较小，尽量满足约束条件（如式(3)所示）。可见，选取节点数量最少的极大独立集中的顶点作为簇头节点来分簇可以最大可能地满足基于分簇的业务量疏导约束条件，从而实现有效疏导。

### 3.2 簇内疏导

为便于路由以及波长分配，利用分层辅助图并定义波长剩余容量矩阵进行簇内疏导，单光纤、波长数为  $n$  的网络拓扑的分层辅助如图 2 所示。根据每根光纤中波长数量来划分层次，每层代表一个波长。分层图中以波长剩余容量矩阵记录剩余单位容量，每次疏导后更新。

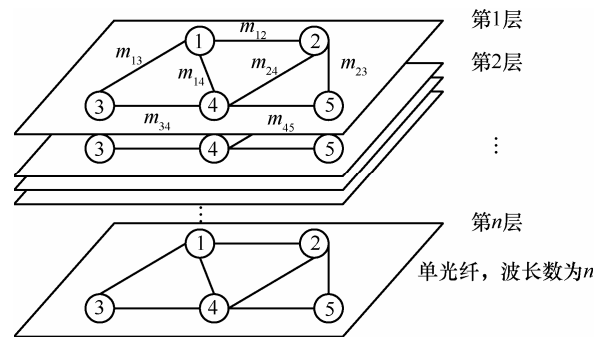


图 2 分层辅助示意

**定义 2** 波长剩余容量矩阵，即矩阵形式的波长资源使用情况信息，根据此记录信息可以便于规划资源，如式(7)所示。在选取疏导路由时，优先选取剩余波长容量足够的已用波长。

$$R = \begin{matrix} & v_1 & v_2 & \dots & v_n \\ \begin{matrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} - & m_{12} & \dots & m_{1n} \\ & - & \dots & \vdots \\ & & - & m_{n-1,n} \\ & & & - \end{bmatrix} \end{matrix} \tag{7}$$

其中, 式(7)中  $m_{ij}$  的取值如式(8)所示,  $E$  为网络边集,  $N_m$  表示波长剩余单位容量。

$$m_{ij} = \begin{cases} N_m, \{v_i, v_j\} \in E \\ 0, \{v_i, v_j\} \notin E \end{cases} \quad (8)$$

波长剩余容量矩阵能够真实地反映出网络中每个波长的耗用情况, 便于疏导时优先选择出重合路由, 将其与分层辅助图相互配合, 能够实现业务的快速疏导。

具体实现伪代码如算法 1 所示, 其中,  $Ser(a,b,c)$  表示某簇内业务,  $a$  指源节点,  $b$  指目的节点,  $c$  指请求单位容量。

### 算法 1 簇内疏导伪代码

输入:  $ser(a,b,c)$

输出: 疏导路由

1) for 第 1 层到第  $N$  层

2) 根据  $R_k$  do

3) 设置链路( $i,j$ )的权重  $weight=m_{ij}$ ;

4) if  $m_{ij}-c \leq 0$  do

5) 删除第  $k$  层的链路( $i,j$ );

6) end if

7) if 第  $k$  层网络拓扑设置完成 do

8) 则跳出循环;

9) else 继续下一层 do

10) 找出当前层中与已删除的第  $k$  层链路( $i,j$ ):

11) if  $m_{ij}-c \leq 0$  do

12) 将链路( $i,j$ )增加到第  $k$  层;

13) else 返回第 9)步;

14) end if

15) end if

16) end for//初始化分层拓扑信息

17) do 根据  $D$  算法找出第  $k$  层中的最短路由

18) 更新  $R$

分簇使疏导的网络规模缩小, 降低了复杂度, 同时结合分层辅助图及波长剩余容量矩阵能合理规划疏导路由, 因此在簇内利用分层辅助图及波长剩余容量矩阵疏导业务效果显著。

### 3.3 簇间疏导

针对簇间业务, 先利用虚拟簇汇聚层寻找簇间最短路由, 再映射到分层辅助图上进行疏导, 如图 3 所示。虚拟簇汇聚层是以网络中各簇头节点指代各簇, 若两簇直接相邻, 则将其簇头节点相连。虚拟

簇汇聚层同样利用分层拓扑来进行路由及波长分配。

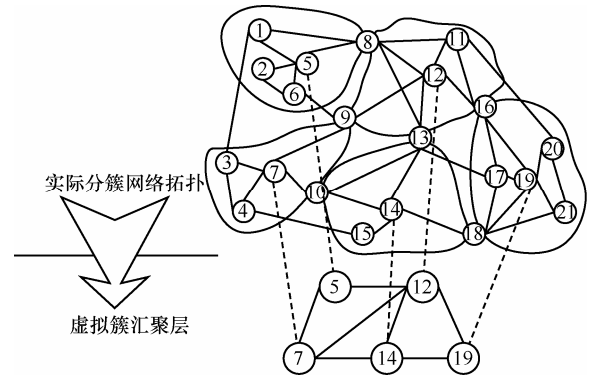


图 3 虚拟簇汇聚层示意

**定义 3** 簇汇聚层簇间链路权重, 即簇间链路的优先级大小, 用以在簇汇聚层中筛选路由, 如式(9)所示, 同簇内疏导相同, 利用分层辅助图进行疏导。

$$Value_c = \frac{N_U^{ij}}{N_C^{ij}} \quad (9)$$

$$N_U^{ij} = \sum_{\substack{e \rightarrow C_i, \& e \rightarrow C_j \\ 0 < N_m(e) < N_{mmax}}} e \quad (10)$$

$$N_C^{ij} = \sum_{\substack{e \rightarrow C_i, \& e \rightarrow C_j \\ v \in C_i, \& v \in C_j}} (e+v) \quad (11)$$

其中,  $N_U^{ij}$  表示簇间链路使用情况, 若连接簇  $C_i$  和簇  $C_j$  的链路  $e$  的波长剩余容量小于波长的最大容量, 则  $e=1$ , 反之  $e=0$ ; 若有  $n$  条链路被占用且这  $n$  条链路都存在剩余波长容量, 则  $N_U^{ij} = n$ , 即在簇汇聚层上优先选择已使用且剩余容量足够的波长最短路。

$N_C^{ij}$  表示簇间连通程度大小, 即两簇直接相连的分离链路数量, 若两簇有公共成员节点, 则也算在其内; 如式(11)所示, 若链路  $e$  连接簇  $C_i$  和簇  $C_j$ , 则  $e=1$ , 反之  $e=0$ , 若  $v$  是簇  $C_i$  和簇  $C_j$  交界的共同节点, 则  $v=1$ , 反之  $v=0$ 。即优先选择簇间连通程度大的簇间路由。

## 4 区分保护模块

### 4.1 区分波长链路重要度

由于各业务的源宿节点可能不同, 所经路由也不尽相同, 导致疏导后各波长中各级业务数量不

一，若针对每个业务进行一一对应的区分保护，则会耗费大量保护资源，降低网络资源利用率，故需寻找一种新方法来进行有针对性的分级保护。

**定义 4** 波长链路的重要度(LI, link importance)，即一条波长链路的重要程度，以便按重要级别区分保护。设一段链路的一个波长中经疏导后有多种等级的业务通过，高优先级业务有  $S_1$  个，中优先级业务有  $S_2$  个，低优先级业务有  $S_3$  个， $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  为可调系数， $C$  为波长容量， $C_{S_i}$  为 3 种业务中容量最小值，则链路波长重要度如下

$$LI = \alpha S_1 + \beta S_2 + \gamma S_3 \quad (12)$$

若  $LI \geq \left\lfloor \frac{C}{C_{S_i}} \right\rfloor$ ，则为重要链路波长；若  $LI < \left\lfloor \frac{C}{C_{S_i}} \right\rfloor$ ，则为一般链路波长。其中， $\alpha > \beta > \gamma > 0$ ， $C_{S_i} = \min\{C_{S_1}, C_{S_2}, C_{S_3}\}$ ， $\lfloor \cdot \rfloor$  为向下取整。

式(12)中  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  为 3 级业务各自的权重，可按需进行调整，之所以和一个波长最多能容纳的最小容量业务数对比，是综合考虑了业务等级和大小，不只高优先级业务需要较好的保护，而大数据量的低优先级业务同样需要较好的保护，因其一旦丢失可能导致大量数据重传，耗费大量带宽和时间，网络可能因此更加拥堵。例如，假设波长容量为 OC-8， $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  分别为 3、2、1，且只有一个低优先级业务在其中传输，但此业务容量为 OC-6，按公式计算得  $0+0+1 \geq 1$ ，故此时判定，传输此业务的链路波长为重要链路波长，应给予较好的保护措施。

#### 4.2 分级智能 P 圈保护

由于网络中单链路故障最常出现，因此各种保护方法多以单链路故障为假设前提进行研究。但最近的研究表明实际网络中双链路故障也值得重视，经调查在对某 IPTV 网络为期 4 个月的监测中，就有 17% 的链路故障是双链路故障<sup>[9]</sup>。因此，在保护时应区分保护重要度分别给予双、单链路故障保护。由于疏导后波长中各级业务比例不同，评估重要度后，同重要度级别的波长链路可能并不是一条连续的通路，而是分散在网络中，若采取传统的专有或共享保护的方法，保护效率太低，而 P 圈保护算法，是保护效率极高的一种特殊的链路保护方法，恢复速度快<sup>[10]</sup>，且对于分散的波长链路，P 圈也能较为方便地将其圈在一个 P 圈中，因此采取 P 圈方法来给予区分重要度的保护。

#### 1) P 圈区分保护算法

P 圈算法在保护时其跨接链路比圈上链路的保护路径更多，有 2 条保护路径，若用一条，另一条则冗余。为充分利用 P 圈，提出了区分保护级的 P 圈启发式算法。

其主要思想是：波长链路的重要度若为一般，则使其成为 P 圈圈上链路，为其提供单链路故障保护；若为重要，则使其成为跨接链路，且约束同一圈内所有跨接链路不交叉，以保证若 2 条跨接链路同时故障时，圈内能形成 2 条不重叠的保护路径，为其提供双链路故障保护。双链路故障下跨接链路保护示意如图 4 所示。

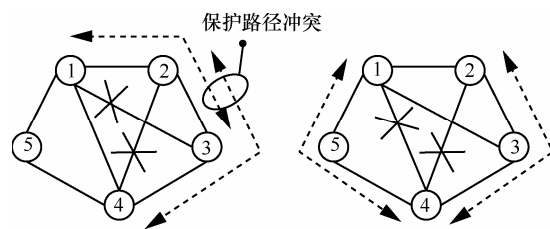


图 4 双链路故障下跨接链路保护示意

#### 2) P 圈生成

根据前述重要度评估公式，将疏导后链路波长分为重要链路波长集  $H = \{h_1, h_2, \dots, h_n\}$  和一般链路波长集  $L = \{l_1, l_2, \dots, l_m\}$ ，具体步骤如下。

**Step1** 将集合  $H$  中的链路波长按同簇或有相同端点顺序排列，得到新集合  $H = \{h_1, h_2, \dots, h_n\}$ 。

**Step2** 从集合  $H$  中  $h_1$  开始，寻找距离  $h_1$  两端点最近的节点，将其相连，再从  $h_1$  两端点出发，寻找并连接  $h_2$  两端点最短路，以此类推直到  $h_n$ 。但若其中  $h_i$  和  $h_{i+1}$  间距离大于 1 跳时，则以  $h_i$  两端点出发寻找最近节点，相连结束此圈；再从  $h_{i+1}$  开始重复此步骤，直到遍历  $H$  中所有链路波长。

**Step3** 统计此时圈上链路，将已是圈上链路的从集合  $L$  中删除，若此时集合  $L$  为空，则算法结束；若得到新集合  $L = \{l_1, l_2, \dots, l_k\}$ ， $1 \leq k \leq m$ ，则从  $l_1$  的一个端点出发寻找最短路连接  $l_2$  的一个端点，再从  $l_2$  的另一个端点出发寻找最短路连接  $l_3$  的一个端点，直到最后从  $l_k$  的最后一个端点出发再连接到  $l_1$ ，以此形成一个圈；为保证 P 圈不会过大，链路相距小于 2 跳。

#### 3) P 圈扩张

由于业务动态到来和离开，链路波长的重要度随时发生变化，当有新链路波长需要进行保护时，

若总是建立新的 P 圈会导致 P 圈越来越多,降低资源利用率。因此设计一种基于已有 P 圈的圈扩张算法。但为避免扩张后圈太长带来的恢复时间过长,待扩张保护链路波长距离 P 圈应不超过 1 跳。假设已有圈  $C_1$ ,如图 5 所示,链路  $(i, j)$  和  $(i+1, j+1)$  为圈上任意两条相邻跨接链路,节点  $i$  与节点  $i+1$  相邻,  $j$  与节点  $j+1$  相邻,待保护链路为  $(h, k)$ ,  $h$  距离节点  $i$  最近,具体步骤如下。

**Step1** 若  $(h, k)$  为重要级别,跳 Step2; 若为一般级别,跳 Step3。

**Step2** 从节点  $h$  出发寻找最短路连接圈上节点,由于节点  $h$  距离节点  $i$  最近,连接  $hi$ ,再寻找最短路连接节点  $h$  与节点  $i$  的相邻节点  $i+1$ ;从  $(h, k)$  的另一节点  $k$  出发分别寻找最短路连接链路  $(i, j)$  和  $(i+1, j+1)$  另 2 个节点  $j$  和节点  $(j+1)$ ;删去原圈上链路  $(i, i+1)$  和  $(j, j+1)$ 。此步中所寻最短路不超过 1 跳,若超过则取消圈扩张,算法结束。

**Step3** 从节点  $h$  出发寻找最短路连接圈上节点  $i$ ,再从节点  $k$  出发寻找最短路连接节点  $i$  的相邻节点  $(i+1)$ ;删去原圈上链路  $(i, i+1)$ 。此步骤中所寻最短路不超过 1 跳,若超过则取消圈扩张,算法结束。

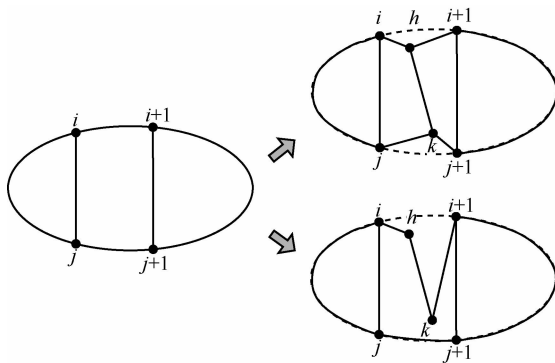


图 5 P 圈扩张示意

#### 4) P 圈收缩

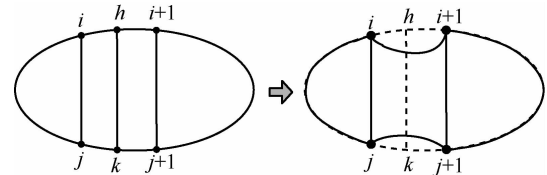
当有链路不需要再进行保护时,为有效利用资源,应当对 P 圈进行收缩,因此提出 P 圈收缩算法。假设已有圈  $C_2$ ,链路波长  $(h, k)$  中的业务已离开,不需要再保护,若  $(h, k)$  为跨接链路时,链路  $(i, j)$  和  $(i+1, j+1)$  是其左右相邻的 2 条跨接链路,如图 6(a)所示,具体步骤如下。

**Step1** 圈  $C_2$  上节点  $h$  的左右相邻节点为  $i$  和  $i+1$ ,寻找最短路连接节点  $i$  和节点  $i+1$ ,同理,寻找最短路连接节点  $k$  的左右相邻节点  $j$  和节点  $j+1$ ;为保证 P 圈不会过大,此处寻找的最短路需短于原

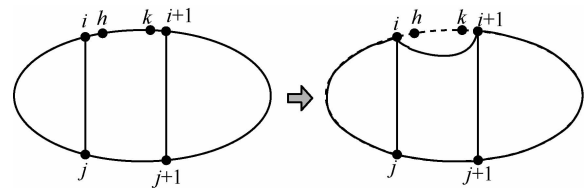
圈上链路  $(i, i+1)$ 、 $(j, j+1)$ ,否则取消收缩,算法结束。

**Step2** 删去原圈上链路  $(i, h)$ 、 $(h, i+1)$ 、 $(j, k)$  和  $(k, j+1)$ 。

若  $(h, k)$  为圈上链路时,节点  $i$  和节点  $(i+1)$  为  $(h, k)$  左右相邻节点,如图 6(b)所示,具体步骤如下。



(a) 跨接链路



(b) 圈上链路

图 6 P 圈收缩示意

**Step1** 寻找节点  $i$  和节点  $i+1$  间最短路,若此最短路小于原圈上链路  $(i, i+1)$ ,则连接;若大于则取消收缩,算法结束。

**Step2** 删去原圈上链路  $(i, h)$ 、 $(k, i+1)$ 。

## 5 仿真验证及结果分析

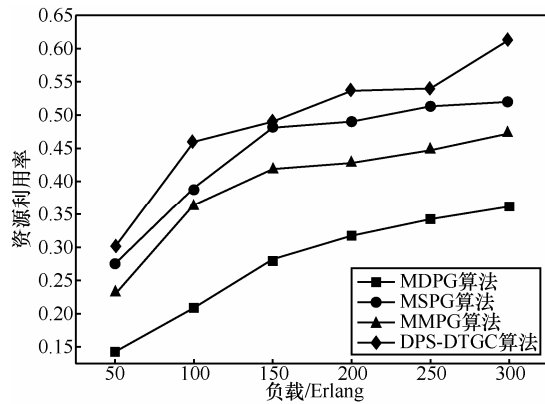
实验采用 VC++6.0 作为仿真平台,对所提 DPS-DTGC 算法进行仿真分析,对比算法选择文献[5]中所提 3 种算法 MDPG、MSPG 和 MMPG,这 3 种算法均运用全拓扑的辅助图进行工作及保护路由的全局搜索,区别为 MDPG 算法采取的保护方式是专有保护, MSPG 算法采取的是共享保护,而 MMPG 算法中混合了专有及共享保护这 2 种保护方式。在仿真时,在 MSPG 中采用 1:2 共享保护, MMPG 中高、中、低三级业务分别采用 1:1 专有保护、1:2 共享保护和 1:3 共享保护。

仿真采用 COST 239 网络(11 个节点, 26 条链路, 平均节点度数为 4.73)及 NSF 网络(14 个节点, 21 条链路, 平均节点度数为 3)。每根光纤 8 个波长, 波长容量为 OC-48, 节点具有波长转换功能, 业务请求动态随机到达网络, 到达速率服从参数为  $\beta$  的泊松分布, 业务连接的持续时间服从均值为  $\frac{1}{\mu}$  的指

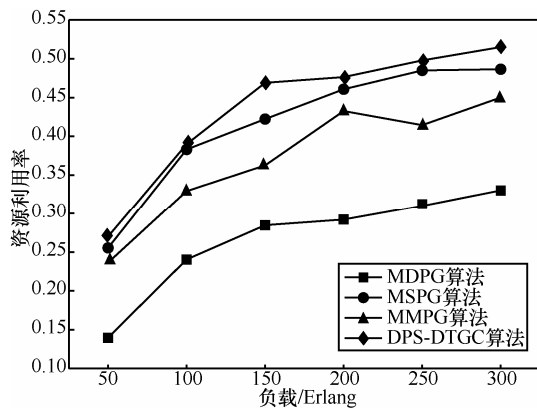
数分布,即全网总负载为  $\frac{\beta}{\mu}$  爱尔兰,仿真时取  $\mu=1$ ,

每个请求的带宽从{OC-3、OC-12、OC-48}中随机分配。到达业务请求的源、目的节点在网络所有节点对之间随机选取；如果业务连接建立失败则立即丢弃，即无等待队列。

图 7 所示为资源利用率随网络负载变化的曲线。



(a) COST239



(b) NSF

图 7 不同网络资源利用率对比情况

**定义 5** 资源利用率(RUR, resource utilization ratio), 即网络中工作通路占用波长的总和与总波长资源开销的比值

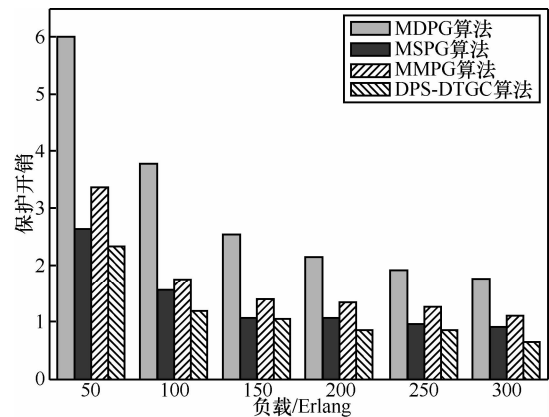
$$RUR = \frac{\sum_{l \in L} w_l}{\sum_{l \in L} (w_l + p_l)} \quad (13)$$

其中,  $l$  为网络中链路的集合,  $w_l$  为链路  $l$  上的工作波长使用数,  $p_l$  为链路  $l$  上的保护波长使用数。资源利用率反映了不同算法的资源开销情况,  $RUR$  值越大, 表明用于工作通路的资源越多, 资源利用越充分。

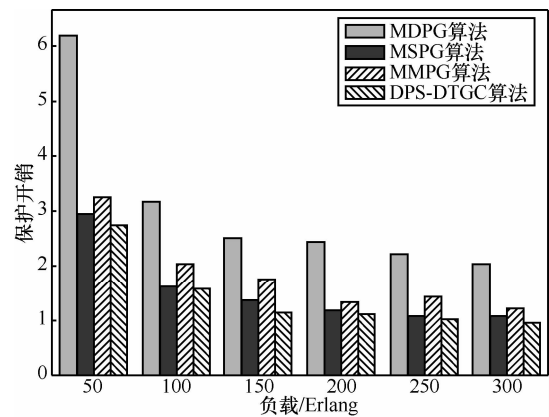
从图 7 中可以看出, 随着负载增大, 所有算法的资源利用率都呈上升趋势, 并逐渐趋于平缓, 而 DPS-DTGC 算法资源利用率最高, MSPG 算法其次,

MMPG 算法再次, MDPG 算法效果最差, 这是因为 MDPG 中使用的专有保护使每个业务都独占其保护通道, 导致保护效率最低, MMPG 中因为有部分保护路径可以被共享, 节约了资源, 故其资源利用率高于 MDPG, 而 MSPG 中所有保护路径都可被共享, 使资源得到充分利用, 而所提算法所用 P 圈保护, 其圈上链路及跨接链路均能共享此圈预留保护资源, 保护效率较高, 使更多资源可以用于工作通路由, 因而资源利用率最高。

图 8 所示为保护开销随网络负载变化曲线。



(a) COST239



(b) NSF

图 8 不同网络保护开销对比情况

**定义 6** 保护开销(PO, protection overhead), 即网络中保护通路占用波长的总和与工作通路占用波长总和的比值。保护开销反映了不同保护机制的保护效率,  $PO$  值越小, 表明算法用于保护单工作波长所需保护波长越少, 保护效率越高。

$$PO = \frac{\sum_{l \in L} p_l}{\sum_{l \in L} w_l} \quad (14)$$

从图 8 中可以看出, 随网络负载增加, 保护开销都呈下降趋势, 而 DPS-DTGC 算法保护开销最小, MSPG 算法和 MMPG 算法稍有逊色, MDPG 算法开销最大。这是因为 MDPG 算法针对每个业务都为其寻找一条专有保护通道, 在可疏导的情况下首先保证工作通道最短, 保护通道就可能因此较长, 造成保护开销很大, 随网络负载增加, 网络可用资源减少, 工作通道可能需要绕路而变长, 因此保护开销逐渐下降。MSPG 算法对每个业务都采用共享保护, 因此一开始保护开销便比 MDPG 低, 而随负载增加, 可重合的共享通道增多, 保护开销也在逐渐下降。MMPG 算法由于针对一部分业务采用专有保护, 另一部分业务采用共享保护, 因此保护开销居于 MDPG 与 MSPG 之间。而 DPS-DTGC 算法由于采用的 P 圈算法, 每个圈既能保护圈上链路也能保护跨接链路, 保护效率高, 且可随业务动态变化自动伸缩 P 圈以节约资源, 因此保护开销总体低于上述 3 种算法, 随负载加重, 圈上保护资源得到充分利用, 因而保护开销逐渐下降。

图 9 所示为阻塞率随网络总负载变化曲线。

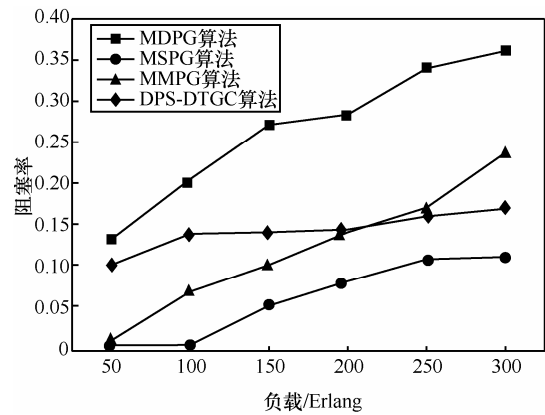
**定义 7** 阻塞率(BR, blocking ratio), 即被拒绝的业务请求数量与到达网络所有业务请求总数的比值。

$$BR = \frac{|R|}{|S|} \quad (15)$$

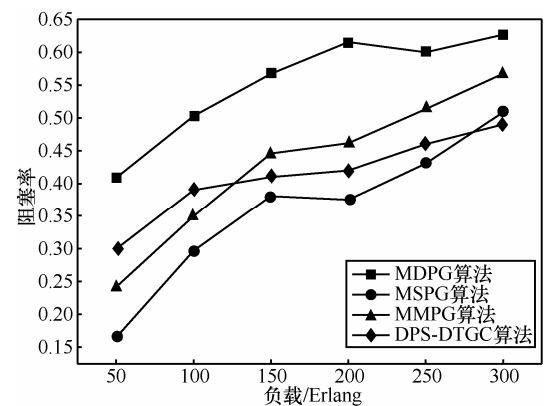
其中,  $R$  为被拒绝业务请求的集合,  $S$  为到达业务请求的集合,  $|R|$ 和 $|S|$ 表示集合中的元素个数。阻塞率反映了不同保护技术对网络吞吐量的影响,  $BR$  越小, 网络吞吐量越大。

从图 9 中可以看出, 随着网络负载加重, 在 2 种网络拓扑中各保护算法的阻塞率都呈上升趋势, 而 MDPG 算法的阻塞率明显最高。这是因为随负载增加, 采用专有保护的 MDPG 算法需要为每个业务提供专有的保护资源, 保护资源开销很大, 阻塞率随之快速增加; MSPG 算法中, 业务可共享保护资源, 保护开销小, 阻塞率最低; MMPG 算法中, 部分保护资源可被共享, 故其阻塞率居中。而 DPS-DTGC 算法在负载较低时, 需要保护的工作通道少, 但仍需要建立足够大的 P 圈进行保护, 故一开始阻塞率稍高于 MSPG 和 MMPG 算法, 随着负载增加, P 圈保护能力得到充分利用, 其圈上链路及跨接链路均可共享 P 圈预留保护资源, 且所提算法能根据网络情况动态调整 P 圈, 有针对性地分配保护资源并能适时地回收, 故阻塞率上升趋势极缓, 逐

渐优于其他算法。而 NSF 网络中阻塞率普遍高于 COST239 网络, 这是因为 NSF 网络平均节点度数低, 导致寻路困难而造成阻塞。



(a) COST239



(b) NSF

图 9 不同网络阻塞率对比情况

图 10 为各种算法无业务量疏导的阻塞率情况对比, 无疏导的算法均以后缀-NG(no grooming)表示。从图中可以看出, 所提算法及 3 种对比算法在无业务量疏导的情况下, 或者说在全是 1 个波长粒度的大容量业务到来的情况下, 阻塞率明显比可疏导的情况高, 但趋势大体相同, 随着网络负载增加, 阻塞率逐渐上升。在无疏导的情况, 即可考察出保护算法的效率, 可以看出, 3 种对比算法中, 专有保护的 MDPG-NG 算法效率最差, 阻塞率最高, 而 MMPG-NG 算法第二, MSPG-NG 算法最好, 所提 CDTG-DPS-NG 算法在业务量较小时, 阻塞率情况比 MMPG-NG 算法和 MSPG-NG 算法稍有逊色, 但在高负载情况下, 其性能优势逐渐体现。这是因为低负载时 P 圈预留的保护资源未能得到充分利用, 随负载升高, P 圈资源得到充分共享, 且所提算法能根据网络情况动态调整 P 圈, 有针对性地分配保护

资源并能适时地回收，故能有效减缓阻塞率上升，逐渐显现出优势。且通过有无疏导的算法阻塞率对比，可以看出采用疏导后，所提算法能明显降低网络阻塞。

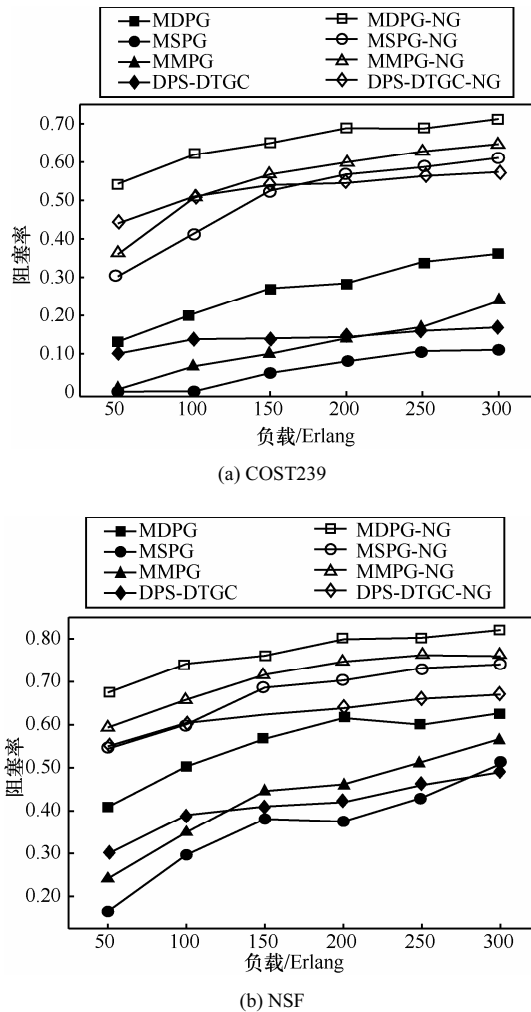


图 10 无疏导的阻塞率对比情况

通过以上分析可知，无论在何种负载情况下，所提 DPS-DTGC 算法的资源利用率和保护开销性能都是优于对比算法的。对保护开销而言，比 MSPG 优 14.3%左右，比 MMPG 优 29.4%左右，甚至比 MDPG 优 52%。而对于阻塞率，轻负载时所提算法 DPS-DTGC 的性能并不是最优的，如在 NSF 网络中，其阻塞率平均就比 MSPG 和 MMPG 算法高 8% 和 21%左右。但随着负载的增大，所提算法的阻塞性能也逐渐优于其他对比算法。这也可以得出结论，由于所提算法的智能 P 圈能对网络资源进行动态调控，其综合性能在重负载时表现最佳，更适合重负载的网络场景。

## 6 结束语

为使动态业务量疏导更快速有效，通过感知业务优先级来评估波长链路重要度，从而使区分保护更合理智能，研究了一种基于分簇的动态业务量疏导区分保护策略。通过将网络分簇，从而进行动态业务量疏导时无需全局寻路，簇内业务直接利用分层辅助图在簇内进行疏导，簇间业务先利用虚拟簇汇聚层寻找最优簇间最短路，再映射到分层辅助图上进行疏导，充分合理地规划路由及波长容量，提高了疏导效率。疏导后由于每条波长链路中存在多种优先级业务，感知各级业务比例，定义波长链路重要度，区分不同保护级，重要波长链路置于 P 圈跨接链路，同一圈内跨接链路不交叉，以保证若 2 条跨接链路同时故障时，圈上能形成 2 条不重叠的保护路径，为其提供高级双链路故障保护；一般波长链路置于 P 圈圈上链路，为其提供低级单链路故障保护；同时智能感知业务的到达离开，动态伸缩 P 圈。本文所提策略能充分利用网络资源，有效降低阻塞，提高了网络不同优先级业务在重负载下的性能。

### 参考文献：

- [1] YE Z, CAO X, GAO X, *et al.* A predictive and incremental grooming scheme for time-varying traffic in WDM networks [A]. INFOCOM 2013 Proceedings IEEE[C]. Turin, 2013. 395-399.
- [2] JAEKEL A, BARI A, RAHMAN Q, *et al.* Resource efficient network design and traffic grooming strategy with guaranteed survivability [J]. Optical Switching and Networking, 2012, 9(4): 271-285.
- [3] ZHU K, MUKHERJEE B. Traffic grooming in an optical WDM mesh network [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002, 20(1): 122-133.
- [4] DE T, PAL A, SENGUPTA I. Traffic grooming, routing, and wavelength assignment in an optical WDM mesh networks based on clique partitioning[J]. Photonic Network Communications, 2010, 20(2): 101-112.
- [5] WU J, GUO L, WEI X, *et al.* Survivable integrated grooming in multi-granularity optical networks [J]. Optical Fiber Technology, 2012, 18(3): 146-156.
- [6] GAO C, CANKAYA H C, PATEL A N, *et al.* Survivable impairment-aware traffic grooming and regenerator placement with connection-level protection [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2012, 4(3): 259-270.
- [7] ALSHAER H, ELMIRGHANI J M H. Probabilistic differentiated availability services in WDM networks protected by shared protection schemes [A]. 2011 IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM) [C]. Dublin, 2011. 281-288.
- [8] DIKBIIYIK F, TOMATORE M, MUKHERJEE B. Exploiting excess capacity for survivable traffic grooming in optical backbone net-

works[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2014, 6(2): 127-137.

[9] LIU V Y, TIPPER D. Spare capacity allocation using shared backup path protection for dual link failures [J]. Computer Communications, 2013, 36(6): 666-677.

[10] WU B, YEUNG K L, HO P H. ILP formulations for p-cycle design without candidate cycle enumeration [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking (TON), 2010, 18(1): 284-295.

**作者简介:**



**熊余** (1982-), 男, 四川资中人, 博士, 重庆邮电大学副研究员, 主要研究方向为宽带网络可靠性及抗毁、无源光网络带宽分配及节能等。



**唐剑波** (1990-), 男, 四川威远人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为无源光网络。



**赵莹** (1988-), 女, 四川泸州人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为 WDM 光网络。



**李圆圆** (1990-), 女, 河南驻马店人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为光网络。



**王汝言** (1969-), 男, 湖北浠水人, 博士, 重庆邮电大学教授, 主要研究方向为全光网络、下一代光网络故障管理机制、多媒体信息处理等。