

doi:10.3788/gzxb20144308.0806001

# 最小代价最大节点度数的稀疏光疏导方法

刘焕淋, 徐一帆, 方强, 陈勇

(重庆邮电大学 通信与信息工程学院 重庆市光纤通信技术重点实验室, 重庆 400065)

**摘 要:** 疏导可以增加多播业务请求成功传输概率并提高光纤链路带宽利用率, 但波分复用光网络中所有节点具有疏导能力则会增加网络造价和复杂度. 本文研究了稀疏疏导网络中疏导节点选择策略, 提出基于最小代价最大节点度数的疏导节点选择策略; 根据疏导节点和非疏导节点功能差别, 改进了稀疏疏导网络中多播请求的疏导传输方法. 结合最小代价最大度数疏导节点选择策略和多播业务稀疏疏导传输方法, 提出一种根据网络业务阻塞率限定值指标实现多播请求所需最少数目疏导节点的稀疏路由方法. 仿真结果表明: 在网络给定波长数和光收发器端口数目情况下, 所提策略能够节约所需疏导节点数目并优化疏导节点位置, 降低网络节点构造造价.

**关键词:** 稀疏疏导网络; 光疏导节点; 节点共享度; 节点代价; 请求阻塞率

**中图分类号:** TP30; TN91

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2014)08-0806001-5

## A Method of Sparse Optical Grooming with the Smallest Cost and Largest Degree

LIU Huan-lin, XU Yi-fan, FANG Qiang, CHEN Yong

(Key Laboratory of Optical Fiber Communications Technology, School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunication, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** Grooming can increase multicast traffic request successful transmission probability and improve fiber link bandwidth utilization. But it certainly increases the network cost and complexity that all nodes are configured as grooming node in WDM network. Grooming node selection strategy was studied in the sparse grooming network. A grooming node selection strategy based on smallest cost largest degree was proposed. According to difference of grooming node function and non-grooming node function, the sparse grooming transmission method was improved to transmit the request for multicast request in the sparse grooming network. Lastly, according to the network's blocking probability limit, a sparse routing method, integrated the node selection strategy with the smallest cost largest degree and multicast traffic grooming transmission method, was put forward to meet the multicat request with minimal grooming nodes. The simulation results show that the proposed strategy method can save number of grooming required nodes, optimize the location of grooming nodes and decrease the network node construction cost when network has given number of wavelengths per fiber and given transceivers of node in the sparse grooming network.

**Key words:** Sparse grooming network; Optical grooming node; Node shared degree; Node cost; Request blocking probability

**OCIS Codes:** 060.4510; 060.4255; 060.4265; 060.1155

**基金项目:** 国家自然科学基金(Nos. 61275077, 61371096, 51175535)、国家重点基础研究发展计划项目(No. 2012CB315803)、重庆市科委自然科学基金(Nos. CSTC 2013jcyjA40052, CSTC2012jjB40009)和重庆市教委项目(KJ1400421)资助

**第一作者:** 刘焕淋(1970—), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为光通信技术和网络. Email: liuhl2@sina.com

**收稿日期:** 2013-11-07; **录用日期:** 2014-01-24

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

随着数字广播、物联网和云计算的需求增长,网络中多播应用越来越多,网络资源日趋紧张<sup>[1-4]</sup>.而波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)光网络每个波长信道带宽与各多播业务所需带宽有很大差异,业务疏导成为光多播网络降低业务请求阻塞率和提高波长带宽利用率的有效方法<sup>[5-8]</sup>.

光稀疏疏导网络中的节点分为两类:一类是具有疏导能力的疏导节点(Grooming-node, G-node),疏导端口能完成低速业务的交换和疏导功能;另一类是普通的无疏导能力节点(Non-grooming-node, NG-node),没有疏导端口只能完成业务交换功能.国内外围绕业务疏导方法已展开大量研究,并取得显著成果,如:基于整数线性规划的静态业务疏导方法<sup>[9]</sup>、基于扩展光树的多跳多播业务疏导方法<sup>[10]</sup>、基于最少波长使用数最小端口收发器数目的业务疏导方法<sup>[11]</sup>、基于光路和光树结合的业务疏导策略<sup>[12-13]</sup>、基于波长分层图实现多播业务疏导的方法<sup>[14]</sup>及基于节点收发器数目有限的动态多播业务量疏导启发式算法<sup>[15]</sup>.这些研究成果以假设WDM光网络中所有节点具有疏导能力为前提,导致WDM光网络构造复杂且代价高昂,因此考虑在WDM网络中仅对部分节点配置业务疏导能力.此时由于部分节点不能进行低速业务的疏导传输,会降低WDM网络波长带宽利用率,增加业务阻塞概率.因此如何选择疏导节点并且在不明显降低网络性能的前提下尽量少配置疏导节点成为一个值得研究的问题.

本文提出一种基于最小代价最大节点度数的疏导节点选择策略,设计了多播业务稀疏疏导传输方法,并提出一种根据网络的业务阻塞率限定值指标实现多播请求所需最少数目疏导节点的稀疏路由方法.

## 1 稀疏疏导节点选择策略

给定网络拓扑 $G(V, E)$ ,其中 $V$ 表示网络节点集合, $E$ 为网络光纤链路集合,组播请求为 $R(S, D, B, \Delta T)$ , $S$ 为请求源节点, $D$ 为请求目的节点集合, $B$ 为请求带宽粒度, $\Delta T$ 为请求服务时间,每个业务到达时间以及服务时间服从随机分布.在给定网络资源(给定每条光纤上波长数,节点光收发器数,优化目标为选择合适疏导节点,最大化网络吞吐量)且在满足影响网络阻塞率的条件下尽量多地使用无疏导能力的节点构造低节点造价的光网络.

稀疏疏导网络中单播疏导节点选择方法有<sup>[16]</sup>:

1) 基于节点度数的选择策略(Based on Node Degree, BOND):将网络中所有节点按照度数大小进行排序,选出度数最大的 $N$ 个节点作为疏导节点.

2) 基于节点导出度的选择策略(Based on Induced

Node Degree, BOIND):该策略基于最短路径算法思想,认为某个节点基在某条最短路径上,则此节点还可能在另一条最短路径上.首先计算各个节点对之间通过最短路径算法所建立的光路经过哪些节点;然后统计网络中各节点在这些光路中所出现次数,即节点的导出度;最后选择导出度最多的 $N$ 个节点作为疏导节点.

3) 随机选择策略(Random Selection, RS):从网络的所有节点当中任选 $N$ 个节点作为疏导节点.

对于一个国家自然科学基金(National Science Foundation, NSF)网络,节点度为4的节点有2个,节点度为3的节点有10个,节点度为2的节点有2个,所以出现同时满足选择条件的节点有多个,在这些节点中任意选择若干个节点有很多种方法,选择不同的节点疏导对网络性能影响很大.基于节点导出度的疏导节点选择策略是针对单播提出的,因此通过节点对之间最短路径确定疏导节点不适合多播场景,仅根据节点度数、节点导出度数或随机策略选择疏导节点都无法保证多播性能.在多播应用中,源宿节点之间建立信息传输通路是光树,且多播疏导方法中可以通过扩展已建立光树来完成业务疏导.因此提出一种适合多播的最小代价最大度数(Smallest Cost With Largest Degree, SCLD)疏导节点选择策略.

SCLD疏导节点选择策略过程是:根据节点疏导代价从小到大的顺序选择 $N$ 个节点配置为网络的疏导节点.如果多个节点疏导代价相同,则比较这几个节点的度数,优先选择度数小的节点配置为疏导节点;若多个节点疏导代价和度数都相同,则基于阻塞率最小随机选择疏导节点.

基于业务阻塞率的最小随机选择疏导节点步骤为:

Step 1:产生满足泊松过程的1000个随机多播请求;

Step 2:从网络备选节点中任选一节点作为网络疏导节点,并认为它是网络中的唯一疏导节点;

Step 3:动态路由所有业务请求,计算业务请求阻塞次数;

Step 4:从网络备选节点中选择一个其它节点作为唯一疏导节点,重复Step 2至Step 3;

Step 5:根据业务阻塞次数从小到大排序节点作为疏导节点选择顺序.

SCLD疏导节点选择策略中,节点疏导代价计算是根据该节点在网络中关联的所有输出链路的代价总和来确定,计算公式为

$$C_m = \sum_{n \in V, n \neq m} C(L_{m,n}), \forall m \in V \quad (1)$$

式中, $C(L_{m,n})$ 代表节点 $m$ 到节点 $n$ 的链路代价, $C_m$ 为节点 $m$ 的疏导代价,SCLD算法优先选择总代价最小的节点配置为网络疏导节点.

## 2 多播业务稀疏疏导传输方法

当光网络中所有节点均为疏导能力节点时,多播业务疏导方法有<sup>[5]</sup>:单跳疏导、多跳疏导、混合疏导、扩展光树疏导和直接新建光树等.但是对于稀疏疏导网络来说,由于无疏导能力节点结构中没有电疏导单元,不能进行光-电-光转换,该节点不能疏导业务.改进的多播业务稀疏疏导传输方法如图 1.

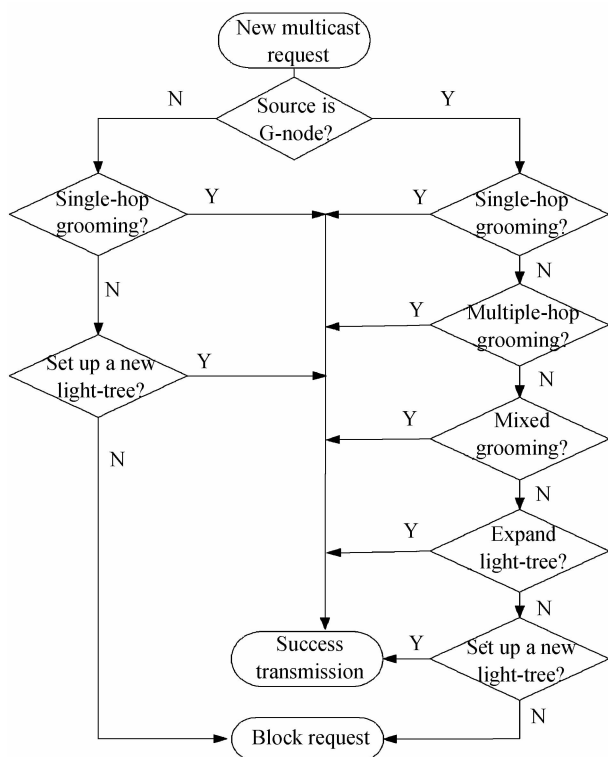


图 1 多播业务稀疏疏导过程

Fig. 1 Process of sparse grooming for multicast traffic

图 1 中,判断多跳疏导是否成功,准则是判断寻找到的第一棵目的节点同源节点不同的光树源节点是否为 G-node,若不是则多跳光树疏导失败;在混合疏导中,寻找到的目的节点同源节点不同的光树源节点必须为 G-node 并且有可用光接收器和空闲光发送器,才能够成功地通过混合疏导完成传输.在扩展光树策略中,必须满足扩展光树的分支节点为 G-node 节点,才能将组播新请求通过此分支节点疏导成功.

## 3 疏导节点数最少的稀疏路由方法

最少疏导节点个数 (Minimal the Number of G-node, MTNG) 的稀疏路由方法步骤是:首先计算假设全疏导网络的初始业务请求阻塞率  $P_0$ ;根据用户性能劣化容许要求,设定一个阻塞率劣化比值  $K$ ,即为允许降低网络性能下降的容差值,从而得到一个业务阻塞率下限值  $P_k = P_0 * K$ ;然后根据提出的 SCLD 稀疏疏导节点选择策略选择一个节点作为 NG-node,并计

算当前稀疏网络的业务阻塞率  $P_i$ ;比较  $P_i$  与  $P_k$ ,如果  $P_i$  小于等于  $P_k$ ,说明此时的网络性能还在允许劣化范围之内, $i$  加 1,继续选择另一节点为 NG-node,同样进行业务阻塞率的比较,直到  $P_i > P_k$ ,说明此时的网络性能已经超出了容许阻塞率劣化范围,则删除前一个添加的 NG-node,即将此节点改变为 G-node.这时候得到的 NG-node 的数目就是在允许的网络阻塞率性能降低范围内最大的非疏导节点数目,对应的网络造价最低.

MTNG 算法的输入为:网络拓扑  $G(V, E)$ ,每个节点的光收发器数目  $T_m/R_m$ ,每根光纤中包含的波长数  $W$ ,每个波长容量  $C$ ,阻塞率劣化比值  $K$ ,每次仿真中总的连接请求数  $n$ . MTNG 方法的输出为 NG-node 集合,算法流程如图 2.

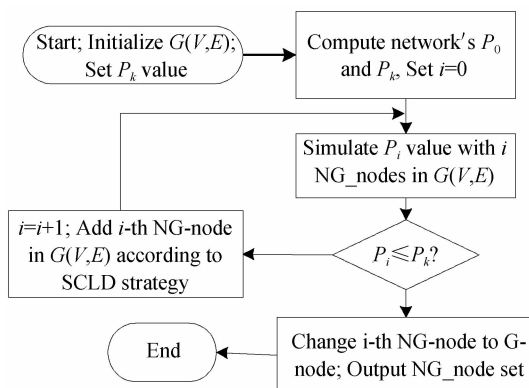


图 2 MTNG 算法流程

Fig. 2 Flow chart of MTNG algorithm

## 4 仿真及分析

仿真采用 14 个节点,21 条链路构成的 NSF 网络,各条链路代价如图 3<sup>[6,17]</sup>,每个节点配备的光、收发器数目关系为: $R_i = 3T_i, R_i = 30$ ,因为网络服务于多播请求,所以要配备更多的光接收器;设疏导节点的疏导端口数不受限制, $W = 6$ ,每波长信道容量是 OC-192,每个新到达多播请求的源节点在 14 个网络节点中随机选一个,目的节点在剩下的 13 个节点中任选,多播目的节点个数服从 $[2, 5]$ 的平均分布,多播请求业务服从参量为  $\lambda$  的泊松分布,请求服务时间服从参量为

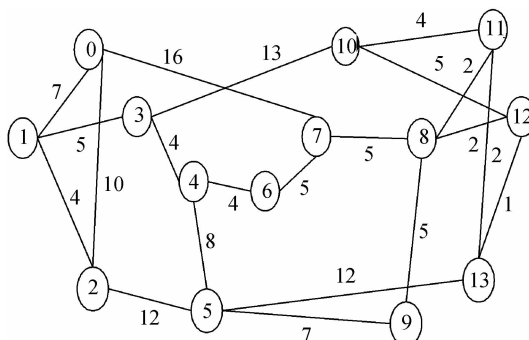


图 3 NSF 网络拓扑

Fig. 3 Topology of NSFNet

$1/\mu$ 的负指数分布.业务请求连接带宽粒度数目比值关系为:OC-3 : OC-12 : OC-48 : OC-192 = 3 : 3 : 3 : 1,仿真实验每次动态产生 100,000 个多播请求.

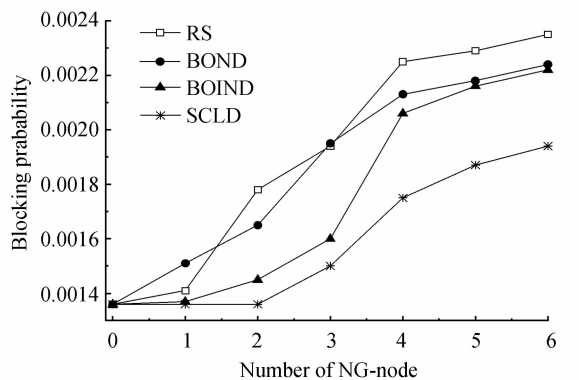
图 4 研究了稀疏疏导节点选择策略对疏导算法的性能影响,比较 SCLD 疏导节点选择策略与 RS 策略、BOND 策略、BOIND 策略的疏导性能.

1)RS 策略:随机选择策略是随机选择疏导节点,所以每次仿真所选择的疏导节点不一样;

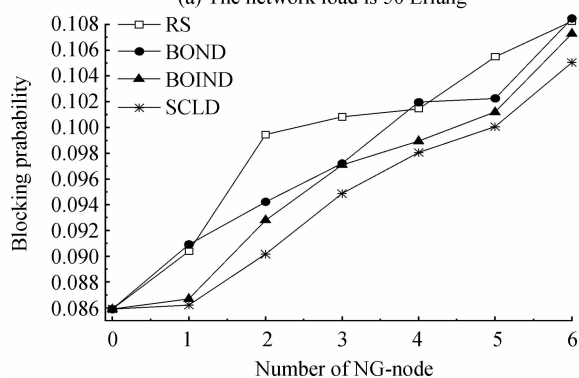
2)BOND 策略:计算图 3 中各节点疏导能力,并从大到小排列节点顺序为: $\{(9,6), (0,1,2,3,4,7,10,11,12,13), (5,8)\}$ ,其中( )内的数字表明这些节点的优先级相同;

3)BOIND 策略:计算图 3 得到节点疏导能力从大到小顺序为: $\{0,11,(2,13),9,10,5,1,(6,12),4,3,7,8\}$ ;

4)SCLD 策略:计算图 3 得到节点疏导能力从大到小顺序为: $\{0,2,1,5,10,3,13,6,4,12,11,7,9,8\}$ .



(a) The network load is 50 Erlang



(b) The network load is 100 Erlang

图 4 阻塞率与疏导节点选择策略关系

Fig. 4 Blocking probability versus grooming node selection strategy

从图 4 可以看出,无论在高负载还是低负载的情况下,SCLD 策略选择疏导节点的网络阻塞率都低于其他疏导节点选择策略,所以在 MTNG 算法中使用 SCLD 疏导节点选择策略.基于节点导出度策略 BOIND 的请求阻塞性能次之,随机选择疏导节点策略的请求阻塞率性能起伏较大,而基于节点度数的 BOND 策略阻塞率性能比较差,这是由于在 NSFNet

网络中具有相同节点度数的节点较多,因此 BOND 不能很好地区分各节点配置为疏导节点的优先顺序.

图 5 表示网络中 NG-node 节点个数对网络阻塞率性能影响.设网络性能劣化比值  $K=1.1$ ,NG 表示网络中无疏导能力节点的个数.从图 5 可以发现,在稀疏疏导网络中,随着波长数的增加,网络的请求阻塞率不断降低,但是当波长数增加到一定值(大于 6),请求阻塞率趋于稳定.波长数确定时,随着网络中非疏导能力节点 NG 数目增加,业务请求阻塞率增加.当波长数为 2 时,NG 节点数为 0 和 5 的请求阻塞率数值分别为 0.143 0 和 0.145 5,数值相差不大,因为波长资源非常少,大量新到达的业务请求很难通过疏导成功传输,所以增加疏导节点数对阻塞率改善作用不大.但是,当单光纤中波长数超过 6 时,请求阻塞率趋于恒定值,因为此时影响网络性能的主要因素是节点收发器数目,波长通道资源相对足够,NG = 5 的阻塞率明显大于 NG = 0 的阻塞率.

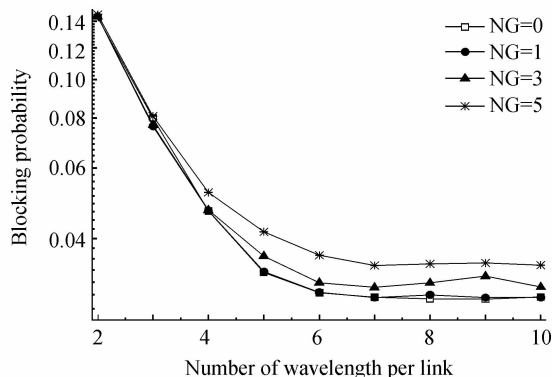


图 5 业务阻塞率与波长数关系

Fig. 5 Blocking probability versus wavelength number

图 6 比较了稀疏疏导网络中节点发送器数目对请求阻塞率的影响.从图中可看出,无论无疏导能力节点数 NG 值为多少,稀疏网络中业务阻塞率都是随着节点光发送器数目的增加而减少,随着光发送器的增加,不同 NG 数目之间阻塞性能的差异也在逐渐减小.当节点发送器数目增加到一定值时(大于 12),阻塞率基

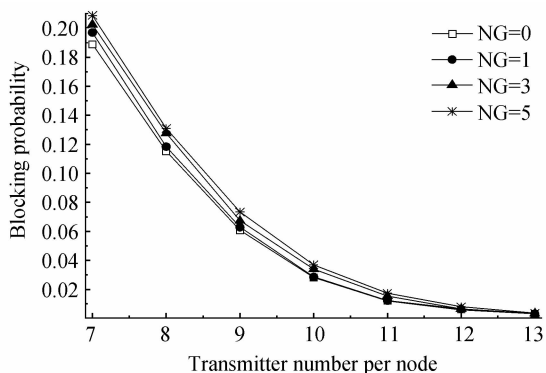


图 6 阻塞率与节点光发送器数目关系

Fig. 6 Blocking probability versus number of transmitters

本不再下降.因为此时节点收发器数目足够,不是影响阻塞率性能的主要因素.

图7表示请求阻塞率与网络负载关系.随着网络负载的增大,稀疏疏导网络中多播请求的阻塞率增加.当NG节点数增加,网络阻塞率受负载影响的差异越来越大.这一结论在图3中也能发现,当网络负载较小时,无疏导节点个数对请求阻塞率影响较小,这时候MTNG输出NG-node集合包含5个节点;同样由于网络负载较低,光纤中的波长数和节点收发器数目资源都相对足够用,所以此时的业务请求阻塞率较低.而且,NG=0和NG=5的请求阻塞率数值相当,因此增加NG-node节点个数,在低负载时对网络的阻塞率性能影响不大.但是,当网络负载比较高时,NG-node节点较多的请求阻塞率就较大,因此在高负载时增加NG-node对网络的请求阻塞率影响较大.

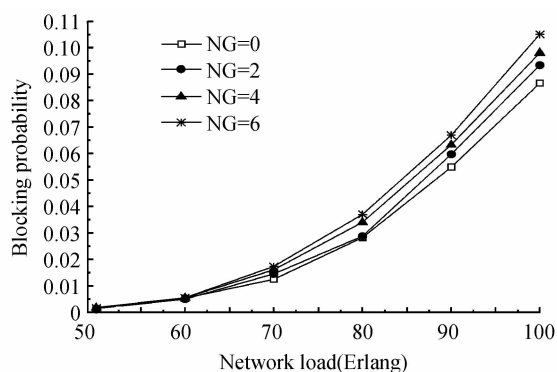


图7 阻塞率与网络负载关系

Fig. 7 Blocking probability versus network load

## 5 结论

针对WDM网络中各个节点都具有疏导能力导致网络造价高昂的问题,研究了稀疏疏导网络中稀疏疏导节点的选择策略,并改进了稀疏疏导网络中多播请求的疏导传输方法,并提出一种根据网络的业务阻塞率性能指标作为配置无疏导能力节点的阻塞率容许最小疏导节点多播方法.研究结果验证了满足阻塞率指标条件下,网络最少配置疏导节点的方法,该方法可以很大程度下降低网络造价.

### 参考文献

- [1] TANMAY D, PUNEET J, AJIT P. Distributed dynamic grooming routing and wavelength assignment in WDM optical mesh networks[J]. *Photonic Network Communications*, 2011, **21**(1): 117-126.
- [2] QIN Hao, ZHANG S, LIU Zeng-ji, et al. Optical multicast wavelength assignment algorithm for limited-range wavelength conversion[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5): 856-860. 秦浩, 张爽, 刘增基, 等. 波长转换受限条件下的最优组播波长分配算法[J]. *光子学报*, 2007, **36**(5): 856-860.
- [3] LIU Huan-lin, XIE Yun-hui, LI Zhen, et al. Study on minimize network coding links based on immune algorithm for optical multicast network [J]. *Journal of Chongqing*

*University of Posts and Telecommunications*, 2011, **23**(4): 384-388.

刘焕淋, 谢芸徽, 李祯, 等. 基于免疫算法的光组播最少网络编码链路研究[J]. *重庆邮电大学学报*, 2011, **23**(4): 384-388.

- [4] GOND V J, GOEL A. Performance analysis of traffic groomed optical network [J]. *International Journal for Light and Electron Optic*, 2012, **123**(9): 788-791.
- [5] LIU Huan-lin, FANG Qiang, WANG Yang-yang, et al. An adaptive algorithm for dynamic multicast traffic grooming in WDM mesh network[J]. *Journal of Optoelectronic • Laser*, 2012, **24**(3): 269-277. 刘焕淋, 方强, 王杨杨, 等. WDM网状网络中一种动态多播自适应业务疏导算法[J]. *光电子 • 激光*, 2013, **24**(1): 69-74.
- [6] WU D P, AI Y, WANG R Y, et al. Coding aware network architecture for dynamic grooming mechanism[C]. *Proceeding of IMSNA'2012*, 2012, **2**: 562-566.
- [7] LIU Huan-lin, FANG Qiang, LEI Fang. Analysis of multicast traffic grooming algorithms in WDM mesh networks [J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommun*, 2012, **24**(3): 269-277. 刘焕淋, 方强, 雷芳. WDM光网络中多播业务量疏导方法分析. *重庆邮电大学学报*, 2012, **24**(3): 269-277.
- [8] LUO Pei, HUANG Shan-guo, GE Zhen-bin, et al. Dynamic inter-domain traffic grooming policies in WDM mesh optical networks[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(4): 686-690. 罗沛, 黄善国, 葛振斌, 等. WDM网状网中动态域间流量疏导策略[J]. *光子学报*, 2008, **37**(4): 686-690.
- [9] BILLAH A R B, WANG B, AWWAL A A S. Multicast traffic grooming in WDM optical mesh networks [C]. *Proceeding of IEEE GLOBECOM'03*, 2003, **5**: 2755-2760.
- [10] GUMASTE A, DAS T, VAISHAMPAYAN R, et al. Extending light-trails to regional networks: Multi-hop light-trails (MLT)-System design and performance[J]. *IEEE/Osa Journal of Optical Communications and Networking*, 2012, **4**(12): 1046-1061.
- [11] LIN R P, ZHONG W D, BOSE S K, et al. Design of WDM networks with multicast traffic grooming [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, **29**(6): 2337-2349.
- [12] YU X J, XIAO G X, CHENG T H. Dynamic multicast traffic grooming in optical WDM mesh networks: lightpath versus light-tree [J]. *IEEE/Osa Journal of Optical Communications and Networking*, 2013, **5**(8): 870-880.
- [13] YU X, XIAO G, CHENG T-H. Dynamic multicast traffic grooming in optical WDM mesh networks: Lightpath versus light-tree [J]. *IEEE/Osa Journal of Optical Communications and Networking*, 2013, **5**(8): 870-880.
- [14] LIAO L, LI L, WANG S. Dynamic multicast traffic grooming in wdm mesh networks[C]. *Proceeding of Next Generation Internet Design and Engineering*, 2006, **5**: 366-370.
- [15] LIAO Lu-hua, WEN Hai-bo, WANG Sheng, et al. A novel multicast routing algorithm for WDM groomed networks[J]. *Journal of Optoelectronic • Laser*, 2007, **18**(2): 200-203. 廖露华, 温海波, 王晟, 等. WDM疏导网络中一种新的多播业务路由算法[J]. *光电子 • 激光*, 2007, **18**(2): 200-203.
- [16] FANG Qiang. Research on the dynamic multicast traffic grooming in WDM optical networks [D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecom, 2013. 方强. WDM光网络中动态多播业务疏导方法研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2013.
- [17] MARSDEN A, MARUTA A, KITAYAMA K. Reducing the lightpath establishing time of FWM-aware dynamic RWA for wavelength-routed optical networks [J]. *Photonic Network Communications*, 2009, **18**(2): 183-190.