

# 波分复用光传送网中备用选路下的选路和波长分配算法

徐世中, 李乐民, 王 晟

(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, 四川成都 610054)

**摘 要:** 本文研究了动态业务下, 波分复用光传送网的选路和波长分配问题, 提出了一种基于备用选路的选路和波长分配算法. 与文献中已有的利用全网信息的备用选路的算法相比, 该算法能更加精确地描述建立光路对全网的影响, 选择对网络状态影响最小的路由. 波长分配来建立光路, 促进网络资源的有效利用. 计算机仿真表明, 不论在规则的格型环网还是非规则的网络中, 在阻塞率性能方面, 在大多数情况下该算法优于文献中已有的备用选路算法; 同时它也能改善公平性.

**关键词:** 波分复用光传送网; 备用选路; 选路和波长分配算法

**中图分类号:** TN929.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 04-0488-04

## An Alternate Routing Algorithm for WDM Optical Transport Network

XU Shi2zhong, LI Le2min, WANG Sheng

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

**Abstract:** In this paper, an alternate routing algorithm is proposed for the problem of routing and assignment of wavelength in Wavelength Division Multiplexing (WDM) optical transport network. It can more accurately model the state of the whole network after the establishment of new calls than other alternate algorithms proposed before. The route-wavelength pair which has the least influence on the state of the whole network is chosen to accommodate the coming call. The algorithm performs better than other alternate routing algorithms in most cases we studied. Fairness is improved significantly too.

**Key words:** WDM optical transport network; alternate routing; routing and assignment of wavelength

### 1 引言

波分复用(WDM, Wavelength Division Multiplexing)、光交叉连接(OXC, Optical Crossconnect)、光插分复用(OADM, Optical Add&Drop Multiplexing)技术的发展使通信网络具有了更大的带宽和灵活性. 采用波长分配和路由选择的WDM光传送网被认为是下一代高速广域骨干网的最有竞争力的候选者<sup>[1~3]</sup>. 选路和波长分配(RAW, Routing and Assignment of Wavelength)是WDM光传送网中的一个重要问题. 它是指给定一组节点间的全光连接(光路/连接建立)请求: (1) 寻找从源节点到目的节点的路由; (2) 在这些路由上分配波长. 如果分析模型是研究连接建立请求随机到达和离开网络, 则称相应

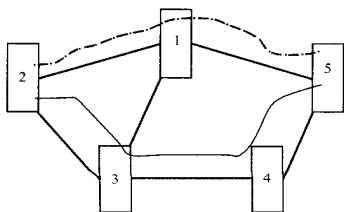


图1 节点间准备多条备用路由示意图

的RAW问题为动态RAW问题. RAW问题的研究中常用的性能指标是光路的阻塞率.

本文将研究在备用选路下的WDM光传送网中的选路和波长分配问题. 如果采用备用选路, 控制中心需要为每对节点准备多条路由. 图1所示为节点2和5之间的两条备用路由. 网络控制机构将根据所采用的具体的选路和波长分配算法, 检查新到达的呼叫请求对应的多条路由, 以决定是否接纳呼叫, 以及如果接纳应选择用哪条路由上的什么波长来接纳. 本文将给出基于备用选路的相对最小影响算法(ARRLI, Alternate Routing@Relative Least Influence). 第2节是相关问题的描述; 第3节将给出ARRLI算法描述; 第4节将通过计算机仿真比较ARRLI算法与其它几种备用选路算法的性能, 第5节为本文结论.

### 2 问题描述

假定网络中已建立了一组光路. 备用选路下的选路和波长分配算法的任务是, 尝试在预定的多条路由中选择合适的路由和波长为新到达的呼叫建立光路, 使阻塞率最小, 同时不

会对已有光路产生任何影响. 由于仅仅其中的波长分配问题就是一个 NP2C(Nondeterministic Polynomial2Complete, 非确定型的多项式算法))) 完全问题, 所以需采用启发式算法.

设  $P$  是一对源和目的节点间的多条备用路由组成的集合,  $p \in P$  代表该集合中的一条路由(通路).  $L(p)$  代表  $p$  所经过的所有链路的集合. 考虑多光纤网, 即一条链路上有多根光纤. 每根光纤都能支持  $W$  个波长, 每条链路上有  $F$  根光纤, 也就是说每条链路的每个波长能提供  $F$  个信道. 显然, 当  $F = 1$  时, 得到的网络为单光纤网. 令  $L_c(l, K)$  代表链路  $l$  在波长  $K$  上的剩余信道数, 则任意通路  $p$  在波长  $K$  上的可用信道数  $P_c(p, K) = \min_{l \in L(p)} L_c(l, K)$ . 如果  $P_c(p, K) > 0$ , 则称  $K$  为  $p$  上的可用波长. 对于任意链路  $l \in L(p)$  和可用波长  $K$ , 如果  $L_c(l, K) = P_c(p, K)$ , 则称链路  $l$  为  $p$  在  $K$  上的瓶颈链路. 通路  $p$  上的所有可用波长构成  $p$  的可用波长集  $A(p)$ . 令  $P^*$  代表新到达的呼叫对应的备用路由集. 如果对所有的  $p \in P^*$  都有  $A(p) = \emptyset$ , 则拒绝该请求; 否则选路和波长分配算法要在  $P^*$  中选择一条满足  $A(p) \neq \emptyset$  的通路  $p$ , 并选择  $A(p)$  中的一个波长来建立光路.

文献[1~6]中已提出了多种备用选路下的选路和波长分配算法. 在选择路由和波长时, 不同的算法所依据的信息量是不同的, 而这与算法的性能密切相关. 简单的方法是使用找到的第一条有空闲波长的最短路由[1,4], 然后再进行波长分配. 同时考虑选路和波长分配的算法能够取得较好的性能[2,3,5,6].

### 3 备用选路的相对最小影响算法

本节将给出利用全网信息的备用选路和波长分配算法))) 备用选路的相对最小影响 ARRLI 算法. 该算法能精确地描述新建光路对全网状态的影响, 并能促进网络资源的合理分配, 从而改善全网的阻塞率性能.

令  $P^*$  代表新到达的呼叫对应的备用路由集. 当所有  $p \in P^*$  的可用波长集  $A(p)$  的并集  $\bigcup_{p \in P^*} A(p)$  不为空集时, ARRLI 将从所有空闲的路由2波长对中选择对全网影响最小的路由2波长对, 将光路建立在相应的路由2波长的上.

考虑  $P^*$  中的一条通路  $p^*$ .  $p^*$  上的可用波长集为  $A(p^*)$ . 如果  $A(p^*) = \emptyset$ , 则不可能在  $p^*$  上建立光路; 否则需要计算出在  $A(p^*)$  中任一波长上建立新光路可能对全网的影响. 在得到所有路由2波长对上建立光路对全网的影响后, ARRLI 将选择对全网影响最小的路由2波长对, 将光路建立在相应路由的相应波长上.

下面首先计算将光路建立在  $p^*$  的某个波长上对全网的影响.  $r_{Bc}(p, K)$  代表选择在通路  $p^*$  上用波长  $K$  建立光路对网络中任意通路  $p$  的影响. 只考虑  $p$  与  $p^*$  共享的链路集,  $p$  在  $K$  上遭遇的瓶颈链路总数用  $Bc(p, K)$  来表示.  $Bc(p, K)$  与  $p$  上的可用信道总数的比值就是  $r_{Bc}(p, K)$ . 全网所有通路的  $r_{Bc}(p, K)$  的总和为  $R_{Bc}(p^*, K)$ , 这里用它来表示选择波长  $K$  建立光路  $p^*$  对全网的影响.

定义满足下列条件的通路的集合为  $p^*$  的/邻域  $G(p^*)$ : 与  $p^*$  有共享链路, 并且可用信道总数不小于一. 也

就是说, 如果  $L(p) \cap L(p^*) \neq \emptyset$  且  $E_{p \in G(p^*)} P_c(p, K) \geq 1$ , 则  $p \in G(p^*)$ . 对于任意  $p \in G(p^*)$ 、任意链路  $l \in L(p) \cap L(p^*)$  和可用波长  $K$ , 分配波长  $K$  对  $p$  的影响为  $r_{Bc}(p, K)$ ; 如果  $L_c(l, K) = P_c(p, K)$ , 则将相应的  $r_{Bc}(p, K)$  增加  $1/E_{p \in G(p^*)} P_c(p, K)$ .  $r_{Bc}(p, K)$  的数学表达式为:

$$r_{Bc}(p, K) = \frac{Bc(p, K)}{E_{p \in G(p^*)} P_c(p, K)} = \frac{\sum_{l \in L(p) \cap L(p^*)} D(L_c(l, K), P_c(p, K))}{E_{p \in G(p^*)} P_c(p, K)} \quad (1)$$

其中, 指示函数

$$D(L_c(l, K), P_c(p, K)) = \begin{cases} 1, & \text{如果 } L_c(l, K) = P_c(p, K) \\ 0, & \text{如果 } L_c(l, K) \neq P_c(p, K) \end{cases}$$

选择波长  $K$  建立光路  $p^*$  对全网的影响  $R_{Bc}(p^*, K)$  可如下计算,

$$R_{Bc}(p^*, K) = \sum_{p \in G(p^*)} r_{Bc}(p, K) = \frac{\sum_{p \in G(p^*)} \sum_{l \in L(p) \cap L(p^*)} D(L_c(l, K), P_c(p, K))}{E_{p \in G(p^*)} P_c(p, K)} \quad (2)$$

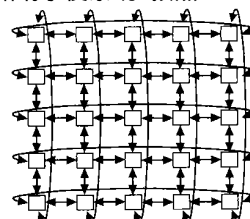
注意, 在定义  $G(p^*)$  时, 已确保了对任意  $p \in G(p^*)$ , 都有  $E_{p \in G(p^*)} P_c(p, K) \geq 1$ . 对于通路  $p \in G(p^*)$ , 新建光路对其的影响为 0, 所以在式(2)中不作考虑.

ARRLI 选择对全网影响最小的路由2波长对, 相应的数学描述如下

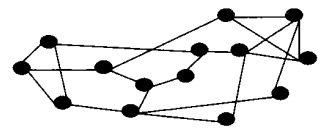
$$p^*, l, p^*, K, l, A(p^*) \quad (3)$$

### 4 计算机仿真结果

本文采用计算机仿真的方法来比较 ARRLI 和文献中性能最好的备用选路算法 LIR[2]以及两种 FPLC 算法的性能. 图 2 所示为仿真时使用的网络模型, 第一种为 5@5 格型环网, 共 25 个节点, 60 条链路. 第二种为 NSFNET 骨干网, 共 14 个节点, 21 条链路. 仿真时假定光路请求按参数为  $K$  的泊松过程到达网络, 即全网的总到达率为  $K$ . 全网所有节点对间的业务强度都相同, 即支持的业务均为均匀业务. 允许一对节点之间同时存在多条光路. 光路建立后的服务时间(保持时间)服从均值为  $1/L$  的负指数分布. 因此到达网络的呼叫的总负载  $Q = K/L$ . 在仿真时, 将平均服务时间设定为一个单位时间. 一旦光路建立请求被拒绝, 则立即被丢弃, 即无等待队列. 为了确保网络运行进入平稳状态, 对每种网络的每个到达率, 都生成了  $10^6$  个光路建立请求. 在进行统计之前, 先处理 10000 个光路请求使系统/预热0.



(a) 5×5 格型环网



(b) NSFNET T1 骨干网

图 2 仿真时采用的网络拓扑

图 3 所示为 5@5 格型环网下单光纤、波长数为 32 时, 随着网络负载的上升, 各种算法的阻塞率的变化曲线。从图中可以看到, 在单光纤的格型环网下, ARRLI 算法的性能明显优于固定选路下的相对最小影响算法(FR/RLI)<sup>[7]</sup>, 这说明引入多条备用路由能大大改善网络性能。与文献中性能最好的 LLR 和两种 FPLC 算法相比, ARRLI 算法的性能比较好。比如, 在负载为 360 爱尔兰时, FR/RLI 的阻塞率高达  $11.3 \times 10^{-2}$ , FPLC N<sup>[6]</sup>和 LLR 性能接近, 阻塞率分别为  $41.5 \times 10^{-3}$ 和  $31.3 \times 10^{-3}$ , 而 FPLC<sup>[5]</sup>的阻塞率则为  $11.0 \times 10^{-3}$ 。本文提出的 ARRLI 算法的阻塞率明显低于其他备用选路算法, 相应的阻塞率为  $11.0 \times 10^{-4}$ 。由于 ARRLI 比其它算法更加精确地描述了建立光路对全网的影响, 选择对网络状态影响最小的路由, 波长对来建立光路, 促进了网络资源的有效利用, 所以性能更好。

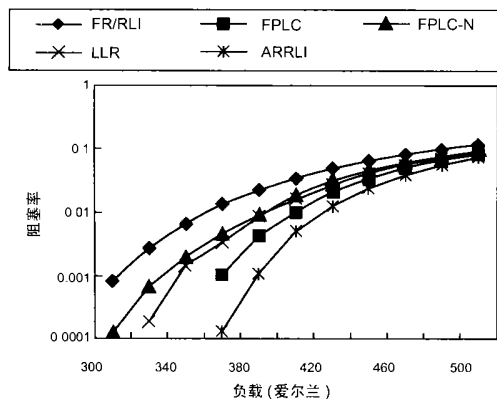


图 3 单光纤 5@5 格型环网下不同算法的性能比较

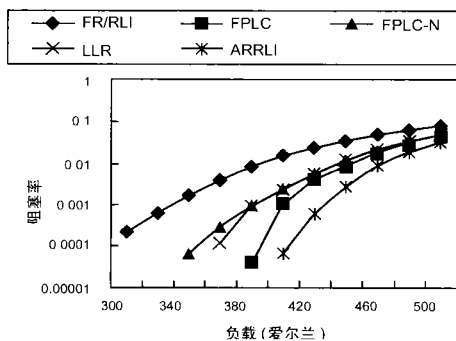


图 4 双光纤 5@5 格型环网下不同算法的性能比较

图 4 所示为 5@5 格型环网下双光纤、波长数为 16 时, 各种算法的阻塞率随着网络负载的上升的变化曲线。在双光纤环网中, ARRLI 算法仍然优于其他备用选路算法, 与单光纤环境下相比较, ARRLI 与那些算法的性能差距比单光纤环境下更大。在负载为 420 爱尔兰时, ARRLI 的阻塞率仅为  $51.9 \times 10^{-4}$ , 而 FR/RLI 的阻塞率高达  $21.4 \times 10^{-2}$ , FPLC N 和 LLR 性能接近, 阻塞率分别为  $51.4 \times 10^{-3}$ 和  $51.5 \times 10^{-3}$ , 而 FPLC 的阻塞率则为  $41.0 \times 10^{-3}$ 。

图 5 所示为 5@5 格型环网中, 每条链路上的信道数固定为 32 时, 网络负载固定为 510 爱尔兰, 每条链路上的光纤数从 1 变化到 32 时, 不同算法的性能比较。从图中可以看到, 在

所有情况下, 备用选路的算法均优于固定选路的算法, ARRLI 优于 LLR 和 FPLC。当光纤数超过波长数以后, FPLC N 的性能优于 ARRLI。单波长、32 条光纤的情形等价于单光纤、32 波长、节点具有全波长变换能力的情形。在网络具有全波长变换能力时, 所谓的选路和波长分配问题就已经简化为路由选择的问题, 采用 FPLC 这样简单的机制就足以取得较好的性能。

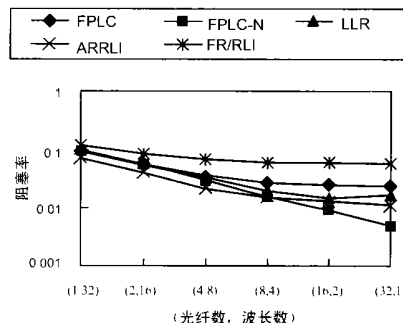


图 5 5@5 格型环网中固定负载, 不同算法在不同光纤数和波长数下的性能

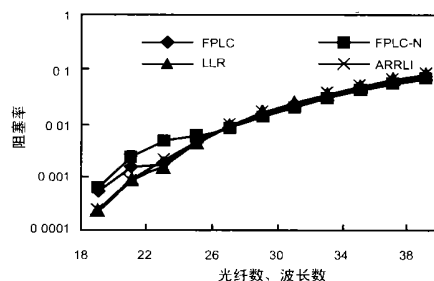


图 6 单光纤的 NSFNET 中不同算法的性能

下面考虑非规则的 NSFNET 中各种备用选路算法的性能。图 6 比较了单光纤、波长数为 8 的 NSFNET 中, 网络负载由低到高变化时各种备用选路算法的阻塞率性能。各种算法的性能非常接近。图 7 比较了四光纤、波长数为 8 的 NSFNET 中, 网络负载由低到高变化时各种备用选路算法的阻塞率性能。可以看到, 多光纤条件下, 对于 NSFNET 这样的非规则网络, ARRLI 算法的性能仍优于其他备用选路算法。

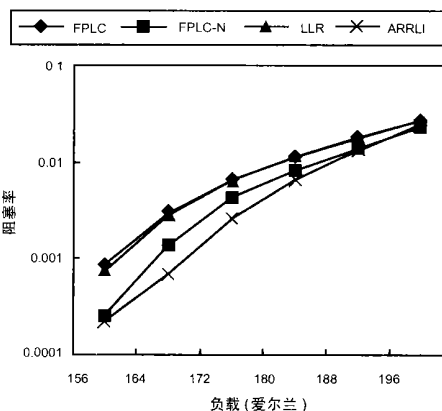


图 7 多光纤的 NSFNET 中不同负载下不同算法的性能

表 1 不同算法的公平性的比较

	IB4	2B3	$(1+2)B(3+4)$
FPLC	0.067	0.141	0.119
FPLC_N	0.041	0.130	0.114
LLR	0.088	0.144	0.121
ARRLI	0.046	0.160	0.153

文献[8]中对光网络的公平性有不同的认识,本文采用了最常见的一种定义:公平性定义为不同长短的光路的平均阻塞率的比值.由于长光路更易遭受波长阻塞和容量阻塞,因此改善公平性的关键在于降低长光路的阻塞率.表1所示为5@5格型环网中不同算法下,间距为单跳的节点对之间的呼叫与间距为四跳的节点对之间的呼叫的平均阻塞率的比值(1B4),间距为双跳的和三跳的节点对之间的呼叫的平均阻塞率的比值(2B3),短间距和长间距的节点对之间的呼叫的平均阻塞率的比值 $((1+2)B(3+4))$ .从上一节的描述可以看到,在ARRLI算法下,新建光路 $p^*$ 对通路 $p$ 的影响正比于 $p$ 在 $p^*$ 上遭遇的瓶颈链路数.通路越长,遭遇较多的瓶颈链路的可能性越大.而其他算法是不考虑遭遇的瓶颈链路数的多少的.因此选择路由2波长对时,ARRLI算法比其他算法更照顾长通路.可见,由于ARRLI算法能更精确地描述新建光路对全网状态的影响,所选择的路由2波长对全网影响最小,不仅能够降低全网的阻塞率,同时也能大大改善公平性.

5 结论

本文研究了动态业务下,WDM光传送网在备用选路下的选路和波长分配问题,提出了备用选路的相对最小影响算法.与文献中已有的利用全网信息的备用选路的算法相比,该算法能更加精确地描述建立光路对全网的影响,选择对网络状态影响最小的路由2波长对来建立光路,促进网络资源的有效利用.计算机仿真表明,不论是规则的格型环网还是非规则的网络中,在阻塞率性能方面,在大多数情况下ARRLI算法优于文献中已有的备用选路算法;在明显降低阻塞率的同时,ARRLI算法也改善了公平性.

参考文献:

[1] Ramasami R, et al. Routing and wavelength assignment in allOptical Networks [J]. IEEE/ACM Trans Networking, 1995, 3(5): 489- 500.

[2] Karasan E, Ayanoglu E. Effects of wavelength routing and selection algorithms on wavelength conversion gain in WDM optical networks [J]. IEEE/ACM Trans Networking, 1998, 6(2): 186- 196.

[3] Harai H, et al. Performance of alternate routing methods in allOptical switching networks [A]. Proc. IEEE INFOCOM 97 [C]. Japan, 1997. 517- 525.

[4] Birman A, et al. Routing and wavelength assignment methods in single hop allOptical Networks with Blocking [A]. Proc. IEEE INFOCOM 95 [C]. Boston, 1995. 431- 438.

[5] Li L, Somani A K. Dynamic wavelength routing using congestion and neighborhood information [J]. IEEE/ACM Trans Networking, 1999, 7(6): 779- 786.

[6] Li L, Somani A K. Blocking performance analysis of fixed2path leas2 congestion routing in multifiber WDM networks [A]. Proc. SPIE All Optical Networking 1999: architecture, control and management issues [C]. Boston: MA, 1999. 56- 57.

[7] Shizhong Xu, Lemin Li, Sheng Wang, Chibiao Chen. A new wavelength assignment algorithm for dynamic traffic in WDM networks [A]. Proc. IEEE ICON 2000, Singapore, 2000.

[8] Douligeris C, Kumar L. Access to a network channel: a survey into the unfairness problem [A]. Proc. IEEE ICC. 92 [C]. Chicago, 1992.

作者简介:



徐世中 男,1972年出生于上海市,1994年、1997年和2001年在电子科技大学分别获工学学士、硕士和博士学位,目前主要研究方向为:WDM光互连网路由和波长分配算法、体系结构和生存性,IP与WDM光网结合,网络QoS问题和无线IP网络及无线接入.

李乐民 男,1932年生于浙江吴兴,教授、博士生导师、中国工程院院士,电子科技大学光纤国家重点实验室,目前主要研究方向包括宽带网络技术,IP网络,WDM光网络等.

王 晟 男,1971年生于四川成都,博士、副教授,电子科技大学光纤国家重点实验室,目前主要研究方向包括WDM光网络和IP网络技术.