

# 多光纤 WDM 网中支持 QoS 的波长重路由算法<sup>1</sup>

何荣希 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 成都 610054)

**摘 要** 在 WDM 网中, 波长连续性限制会降低网络的信道利用率, 增加光路建立请求的阻塞率。采用波长重路由技术可以减少波长连续性限制对网络性能的影响。该文采用波长图模型, 对多光纤 WDM 网中支持 QoS 的波长重路由算法进行了探讨, 提出一种支持 QoS 的波长重路由算法——动态选择法, 并采用两种网络模型, 在不同负载的动态业务下对所提算法进行了仿真研究; 仿真结果表明所提算法既满足了上层业务不同的 QoS 要求, 同时又充分利用了有限的网络资源, 使全网的平均阻塞率降低。

**关键词** 多光纤 WDM 网, 服务质量, 波长重路由算法, 阻塞率  
**中图分类号** TN919.3, TN929.1

## 1 引 言

波分复用 (Wavelength Division Multiplexing, WDM) 技术以它的传输容量大, 对高层协议和技术适应性强, 以及易于扩展等优点而备受青睐。许多学者认为 WDM 光传送网将成为广域骨干网, 下一代 Internet 应是基于 IP 的 WDM 网络<sup>[1]</sup>。宽带视频、多媒体等业务的日益兴起, 特别是 Internet 越来越商业化, 很多用户都对其业务提出了 QoS(Quality of Service) 要求<sup>[2]</sup>。IP over WDM 中如何解决在 WDM 层支持 QoS 要求也逐渐成为研究热点<sup>[3,4]</sup>。文献 [4] 提出一种适用于 WDM 光传送网的 QoS 模型——区分光业务 (Differentiated Optical Service, DOS) 模型, 该模型解决了如何将客户层 (如 IP) 的 QoS 要求映射到光层, 并提供一套机制来保证根据客户层业务的 QoS 要求为它选择合适的可用光路 (Lightpath)。在 WDM 网中, 一条光路所经过的路由和使用的波长通过路由和波长分配 (Routing and Wavelength Assignment, RWA) 算法来决定。在 RWA 算法中, 如果要求一条光路的所有链路都必须使用相同波长, 则称为满足波长连续性限制 (Wavelength continuity constraint)<sup>[5]</sup>。WDM 网中的光路建立问题分为静态和动态两种<sup>[5]</sup>。所谓动态光路建立问题是指根据客户层的要求动态建立和拆除光路。波长连续性限制减小了网络的信道利用率, 增加了光路建立请求的阻塞率<sup>[6]</sup>, 这在动态光路建立问题中尤其明显。采用波长变换器 (Wavelength converter) 或者波长重路由 (Wavelength rerouting) 技术可以减少波长连续性限制对网络性能的影响<sup>[6,7]</sup>。波长变换器可以将一条输入波长转换到不同的输出波长, 从而消除了波长连续性限制, 降低了全网的阻塞率<sup>[8]</sup>。但是, 由于波长变换器价格较贵, 目前在 WDM 网中还未大量使用。而波长重路由通过将一条已经建立的光路重调到一条空闲波长上, 对网络已用资源进行局部调整, 从而能够为一条新的光路建立请求建立满足波长连续性限制的光路<sup>[6,7,9,10]</sup>, 如图 1 所示。图 1(a) 所示为重路由前的情况, 节点  $N_1$ ,  $N_2$  之间已建立光路  $P_1$ , 占用波长  $\lambda_2$ ; 节点  $N_2$ ,  $N_3$  之间已建立光路  $P_2$ , 占用波长  $\lambda_1$ ; 此时在节点  $N_1$ ,  $N_3$  之间又有新的光路建立请求  $P_3$  到达, 由于节点  $N_1$ ,  $N_3$  之间没有满足波长连续性限制的可用波长, 该请求将被拒绝。图 1(b) 所示为采用波长重路由后的情况, 此时将节点  $N_1$ ,  $N_2$  之间的光路  $P_1$  由波长  $\lambda_2$  重调到波长  $\lambda_1$ , 在节点  $N_1$ ,  $N_3$  之间留下一条满足波长连续性限制的空闲波长  $\lambda_2$ , 从而可以为新的光路建立请求  $P_3$  成功建立光路。

<sup>1</sup> 2001-05-18 收到, 2002-04-22 定稿

国家自然科学基金项目资助 (基金号: 69990540, 60002004)

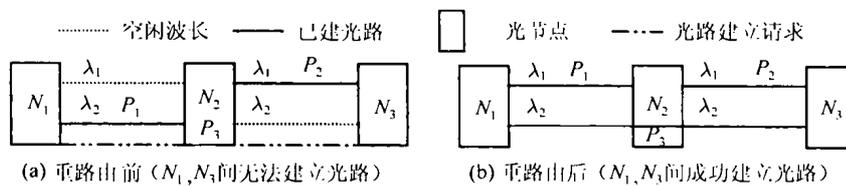


图1 波长重路由示意图

在动态业务环境下,光路建立和拆除请求随机到达,利用波长重路由可以更合理地利用网络资源,降低全网阻塞率。近年来,文献中出现了一些波长重路由算法<sup>[6,7,9,10]</sup>,但是,这些算法仅仅局限在WDM层来讨论光路建立问题,而忽略了不同的光路建立请求可能对应客户层不同QoS要求的业务这一事实,只是简单地将来自客户层的光路建立请求不加区别,同等对待,从而将光路建立问题独立于客户层的QoS要求。文献[11,12]根据客户层业务不同的QoS要求,提出基于优先级的RWA算法。其核心思想就是通过资源预留来保证对应客户层QoS要求业务的光路建立请求可以占用更多资源,从而保证它具有较低阻塞率。但是,由于不同级别的光路建立请求动态到达,很难做到为每个级别的光路建立请求预留的资源恰到好处。如果为各个级别光路建立请求分配资源不当,无疑会造成全网资源利用率下降,增加全网阻塞率。为了避免这种情况出现,本文采用波长重路由的思想来解决支持QoS的RWA问题。WDM网中的RWA问题常分为路由选择和波长分配两个子问题分别解决,文献[13]采用分层图(Layered graph)模型将二者结合在一起进行考虑,可以进一步降低全网的阻塞率。本文结合波长重路由的具体情况,对分层图模型进行了修改,提出一种波长图(Wavelength graph)模型。另外,由于实际铺设的光缆中往往含有多对光纤,同时单光纤环境可以看作是光纤的特例,因此,在多光纤环境下来研究WDM网中支持QoS的波长重路由问题更有价值。

本文首先探讨了多光纤WDM网中的波长图模型,在此基础上提出一种多光纤WDM网中支持QoS的波长重路由算法——动态选择法;然后采用类CERNET和NSFNET T1两种网络模型,在不同负载的动态业务下,对所提算法进行了仿真研究,同时对采用动态选择法和资源预留法<sup>[11,12]</sup>时网络的性能进行了比较。

## 2 多光纤WDM网中支持QoS的波长重路由算法

给定网络物理拓扑 $G(N, L, F, W)$ ,其中 $N$ 代表节点集, $L$ 代表双向链路集, $F$ 是每条链路上的光纤集, $W$ 是每条光纤上的可用波长集。节点数和链路数分别用 $|N|$ 和 $|L|$ 表示;假定每条链路都由 $|F|$ 对方向相反的单向光纤组成,每条光纤可支持的波长集都是 $\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{|w|}\}$ 。假设客户层(如IP)具有不同QoS要求的业务经DOS模型<sup>[4]</sup>聚合后,在DOS域的边缘光节点处表现为优先级 $p_1, p_2, \dots, p_n$ 的光路建立请求,优先级依次降低。各个优先级的光路建立请求以泊松过程独立随机到达,其平均到达率分别为 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ 。一旦建立光路则其持续时间服从指数分布,而且平均持续时间大大超过网络的传输时延以及连接建立时间。为了便于讨论,假设客户层业务不同的QoS要求在WDM层映射为高和低两种优先级的光路建立请求,分别对应客户层有“服务质量”保证和“尽力传送”两种业务。两种优先级的光路建立请求的到达率为 $\beta_1$ 和 $\beta_2$ 。

### 2.1 多光纤WDM网的波长图模型

在具体讨论波长图模型之前,先引入波长信道(Wavelength channel)的概念。在物理拓扑 $G$ 中,如果节点 $i$ 与 $j$ 之间存在链路 $l_{ij} \in L$ ,那么构成该链路的每对光纤上的每一个波长,就

称为一个波长信道。可见波长信道也是双向的。

在波长图中, 上述物理拓扑  $G(N, L, F, W)$  被转化为  $|W|$  个互不相邻的子图  $G(N^\lambda, L^\lambda)$ ,  $\lambda \in W$ 。每个子图分别对应一个特定的波长  $\lambda_i (i = 1, 2, \dots, |W|)$ , 称为波长平面。  $G$  中的每个节点  $N_k \in N$ , 在波长图中都被复制  $|W|$  次, 对应着  $|W|$  个波长平面中的节点  $N_k^i (i = 1, 2, \dots, |W|)$ ; 物理拓扑中的链路  $l_{kn} \in L$  在每个波长平面中都映射为  $|F|$  条弧段  $l_{kn}^1, l_{kn}^2, \dots, l_{kn}^{|F|}$ , 每条弧段对应物理拓扑中的一对光纤 (实际上每条弧段就代表一个波长信道), 如图 2 所示。图中所示为双光纤、二波长 WDM 网中, 某时刻节点  $N_1, N_2, N_3$  之间的情况。从图 2(b) 可以看出, 此时在节点  $N_1$  和  $N_2$  间的链路上, 光纤对  $f_1$  上的 2 个波长全部被占用, 光纤对  $f_2$  上仅用了波长 2, 波长 1 空闲; 在节点  $N_2$  和  $N_3$  之间的链路上,  $f_1$  和  $f_2$  上的波长 2 空闲, 波长 1 都被占用。图 2(c) 为上述情况对应的波长图, 由 2 个波长平面构成, 从上到下依次对应波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ ; 图 2(a) 中的每个节点在图 2(c) 中映射为 2 个节点, 如节点  $N_1$  对应波长图中节点  $N_1^1$  和  $N_1^2$ 。波长图中的每个弧段代表一个波长信道, 上面的标注代表此时它的代价值,  $f_1$  表示对应光纤对  $f_1, f_2$  表示对应于光纤对  $f_2$ 。

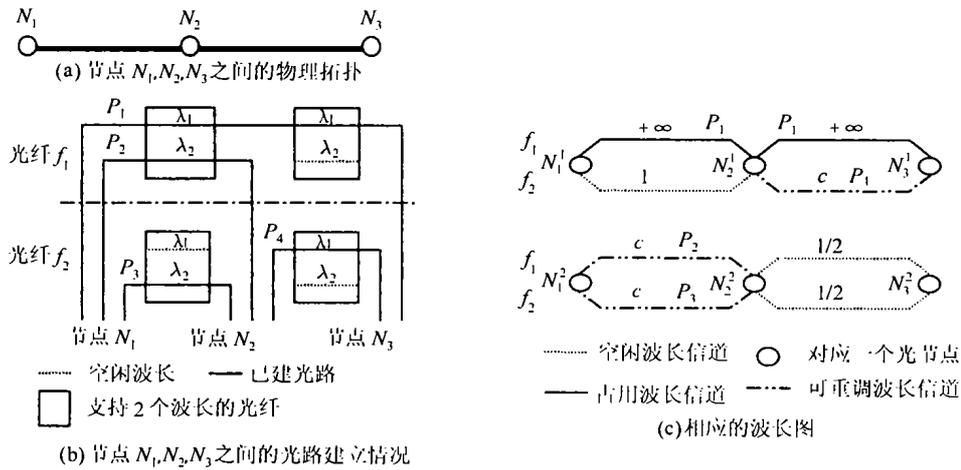


图 2 多光纤 WDM 网络的波长图模型

$G(N, L, F, W)$  的波长图 WG 可表示为

$$WG = \cup_{\lambda \in W} G(N^\lambda, L^\lambda) \tag{1}$$

其中  $N^\lambda = \{i^\lambda : i \in N\}$ ,  $L^\lambda = \{(i^\lambda, j^\lambda)_f : (i, j) \in L\}$ ,  $\lambda \in W$ ,  $f \in F$ 。波长图 WG 的顶点数  $|N^\lambda| = |N| \times |W|$ , 弧段总数  $|L^\lambda| = |L| \times |F| \times |W|$ 。

### 2.2 多光纤 WDM 网中支持 QoS 的波长重路由算法

波长重路由包含重路由操作 (Rerouting operation) 和重路由算法 (Rerouting algorithm) 两个部分<sup>[9]</sup>。重路由由操作完成光路的移动, 也就是将一条已建立的光路重调到一条新的空闲波长上。为了避免引起过长的业务中断时间, 要求重路由操作尽量缩短新旧光路切换的时间, 同时在路由节点处要使交换控制尽量简单。重路由算法决定哪些已建光路可以被重路由, 从其中选择尽量少的光路进行波长重路由, 以满足为一个新的建立请求成功建立光路。一般而言, 重路由既可以改变光路经过的路径, 同时也可以改变光路所使用的波长, 甚至二者兼而有之。但是, 这样会增加控制复杂度, 同时使业务中断时间过长<sup>[6]</sup>。因此, 文献 [6,7,9,10] 所提波长重路由

算法都保留原有路径不变, 仅仅重调已建光路的波长. 波长重路由操作又可分为波长重调和移到空闲两个基本部分<sup>[9]</sup>:

2.2.1 波长重调 (Wavelength-Retuning) 所谓波长重调就是指仅仅改变一条光路所用的波长, 而保持原有路径不变. 光路在重调前、后具有相同的交换节点, 只需考虑改变波长, 从而可以简化控制的复杂度, 减少重路由带来的业务中断时间, 同时也使重路由的计算相对简单.

2.2.2 移到空闲 (Move-To-Vacant) 所谓移到空闲就是指在一条已建光路原有路径上重新为它找到一条满足波长连续性限制的空闲波长. 它具有以下优点: (1) 仅仅对要重路由的光路进行操作, 不会影响其他已建光路; (2) 在为新连接请求建立光路过程中, 并不中断将要被重路由的光路上的业务, 只有当为新连接请求成功建立光路后, 才将原有业务切换到重路由建立的光路上, 从而可以减小重路由算法的业务中断时间. 整个中断时间仅仅是几微秒的数量级<sup>[9]</sup>.

由于 WDM 层的光路建立请求可能对应不同优先级的上层业务, 为了满足上层业务不同的 QoS 要求, 同时又要尽量减少被重路由的光路数量, 我们提出一种支持 QoS 的波长重路由算法——动态选择法 (Dynamic Selection Method, DSM). 在所提算法中, 仅仅当不能为高优先级的光路建立请求成功建立光路时, 才对属于低优先级的已建光路进行波长重路由, 局部调整网络占用资源, 以满足为高优先级光路建立请求成功建立光路. 尽管采用波长重路由算法不可避免地会引起业务中断, 但是, 由于低优先级的已建光路对应的上层业务并没有 QoS 要求, 同时波长重路由引起的业务抖动时间仅仅为微秒级, 通过客户层的固有机制就能很好解决. 因此, 通过对低优先级的已建光路进行重路由, 释放出满足波长连续性限制的资源, 可以大大增加高优先级的光路建立请求成功建立光路的机会, 降低其阻塞率, 从而很好地满足了上层业务不同的 QoS 要求. 同时还充分利用了有限的网络资源, 降低了全网的平均阻塞率.

在波长重路由算法中, 一方面要避免对过多的已建光路进行重路由, 另一方面又要充分利用有限的网络资源, 降低全网的阻塞率; 同时还应该尽量减少对已建光路的业务中断时间, 简化控制的复杂度. 因此, 动态选择法应该遵循以下准则: (1) 在建立光路时, 总是首选空闲资源进行尝试; (2) 在进行波长重路由时, 总是保留光路的原有路径不变, 仅仅改变所用波长; (3) 总是选择代价值最小的通路建立光路; (4) 尽量让空闲波长均匀分散到各个节点间的所有光纤上. 动态选择算法的关键就在于如何构造波长图中各个波长信道的代价函数. 为了便于说明, 引入以下记号:

$l_{kn}^{ij}$ : 波长图中的波长信道. 表示  $\lambda_i$  对应的波长平面上, 节点  $k$  和  $n$  之间对应光纤对  $f_j$  上的弧段;

$o(l_{kn}^{ij})$ : 波长信道  $l_{kn}^{ij}$  的占用函数. 在物理拓扑  $G$  中, 如果节点  $k, n$  之间的光纤对  $f_j$  上的波长  $\lambda_i$  空闲, 则称  $l_{kn}^{ij}$  未占用 (空闲),  $o(l_{kn}^{ij}) = 1$ ; 否则,  $l_{kn}^{ij}$  被占用,  $o(l_{kn}^{ij}) = 0$ .

$t(l_{kn}^{ij})$ : 波长信道  $l_{kn}^{ij}$  的可调函数. 如果通过波长重路由算法可以在波长信道  $l_{kn}^{ij}$  所在光路的原有路径上重新为它找到一条满足波长连续性限制的可用波长, 则称  $l_{kn}^{ij}$  可调,  $t(l_{kn}^{ij}) = 1$ ; 否则,  $l_{kn}^{ij}$  不可调,  $t(l_{kn}^{ij}) = 0$ ;

$y_p(l_{kn}^{ij})$ : 表示波长信道是否属于通路  $P$  的指示函数. 如果波长信道  $l_{kn}^{ij}$  在通路  $P$  上,  $y_p(l_{kn}^{ij}) = 1$ ; 否则,  $y_p(l_{kn}^{ij}) = 0$ .

$c(l_{kn}^{ij})$ : 波长信道  $l_{kn}^{ij}$  的代价函数.

在波长图中,  $c(l_{kn}^{ij})$  除了取决于此时物理拓扑  $G$  中相应链路上的波长使用情况外, 同时还要结合上述准则来决定, 即

$$c(l_{kn}^{ij}) = \begin{cases} 1/m_{kn}^i, & o(l_{kn}^{ij}) = 1 \\ \partial_{kn}^{ij}, & t(l_{kn}^{ij}) = 1 \\ +\infty, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$m_{kn}^i = \sum_{j \in F} o(l_{kn}^{ij}) \quad (3)$$

可见,  $m_{kn}^i$  就是此时物理拓扑  $G$  中节点  $k$ ,  $n$  之间所有光纤对中空闲波长  $\lambda_i$  的总个数.  $\partial_{kn}^{ij}$  是一个常数因子, 称为  $l_{kn}^{ij}$  的重路由因子, 它必须满足约束条件:

$$\partial_{kn}^{ij} \geq |L| \times \max(1/m_{kn}^i) \quad (4)$$

上式保证了无论什么时候, 对于一个新的光路建立请求, 总是首先使用此时空闲的网络资源建立光路, 从而可以大大减少被重路由的光路条数. 引入光路重调率 (Lightpath retuning rate) 来反映动态选择法中被重路由的光路数量的多少, 用  $r$  表示.  $r$  定义为

$$r = \text{已重路由的光路数} / \text{全网总的光路建立请求数} \quad (5)$$

在波长图中, 根据各个波长信道的代价函数, 可以得出波长  $\lambda_i \in W$  对应的子图  $G(N^{\lambda_i}, L^{\lambda_i})$  的代价矩阵  $C(\lambda_i)$ , 如下所示:

$$C(\lambda_i) = [b_{kn}^{\lambda_i}]_{|N| \times |N|}, \quad k, n = 1, 2, \dots, |N| \quad (6)$$

其中

$$b_{kn}^{\lambda_i} = \begin{cases} 1/m_{kn}^i, & \exists o(l_{kn}^{ij}) = 1, \quad j \in F \\ \min(\partial_{kn}^{ij}), & \forall o(l_{kn}^{ij}) = 0, \quad \exists t(l_{kn}^{ij}) = 1, \quad j \in F \\ +\infty, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

下面以图 2 中  $\lambda_2$  对应的波长平面为例进行说明, 求出其代价矩阵:

$$C(\lambda_2) = \begin{bmatrix} +\infty & c & +\infty \\ c & +\infty & 1/2 \\ +\infty & 1/2 & +\infty \end{bmatrix}$$

其中  $c$  为满足 (4) 式的常数因子.

由于波长连续性限制, 一条光路所经过的链路都必须使用相同的波长. 因此, 在波长图中, 一条通路  $P$  只可能属于一个波长平面  $G(N^{\lambda_i}, L^{\lambda_i})$ , 用  $C(P)$  表示其代价函数.  $C(P)$  由该通路所经过的波长信道  $l_{kn}$  的代价值决定. 定义  $C(P)$  为

$$C(P) = \sum_{k, n \in N} b_{kn} y_p(l_{kn}) \quad (8)$$

其中  $b_{kn}$  实际上就是该波长平面对应的代价矩阵中相应节点  $k$  和  $n$  的元素  $b_{kn}^{\lambda_i}$  的值.

在多光纤 WDM 网中, 使用同一条链路上不同光纤中的相同波长是等效的. 此时, 光路建立问题就可以转化为在构成波长图的各个波长平面中通过最短路径算法寻找代价有限的最短路, 然后将该路径映射成物理拓扑中相应的节点、链路和波长, 从而建立光路.

从上面的讨论可知, 动态选择法的核心就是如何在 WDM 层根据上层业务不同的 QoS 要求来决定可以被重路由的已建光路, 以及如何决定波长信道的重路由因子. 下面将给出动态选择法的具体步骤:

步骤 1 将给定的多光纤 WDM 网转化成波长图; 根据物理拓扑初始化  $o(l_{kn}^{ij})$  和  $t(l_{kn}^{ij})$ ,  $k, n \in N, i \in W, j \in F$ ; 计算出波长图中各个波长信道的代价函数值  $c(l_{kn}^{ij})$ , 以及各个波长平面对应的代价矩阵  $C(\lambda_i)$ ;

步骤 2 等待光路请求: 如果到达的是光路建立请求, 则转至步骤 3; 如果到达的是光路拆除请求, 则转至步骤 6;

步骤 3 用 Dijkstra 算法, 在  $|W|$  个波长平面上并行地寻找出各自的最短路径  $P_i$  (通过搜索每个子图的代价矩阵完成), 要求  $0 < C(P_i) < +\infty$ :

(1) 如果一条都没有找到, 则拒绝该光路建立请求, 并转至步骤 2;

(2) 如果找到  $v (v \leq |W|)$  条最短路径  $P_i (i = 1, 2, \dots, v)$ , 则转至步骤 4.

步骤 4 根据到达光路建立请求的优先级  $p_j$  进行不同处理:

(1) 如果到达的是高优先级的光路建立请求, 则比较这  $v$  条最短路径的代价函数  $C(P_i)$ , 从中选出一条  $C(P_i)$  最小的路径  $P_s$ , 检查构成  $P_s$  的所有波长信道  $l_s$ :

(a) 如果任意  $o(l_s) = 1$ , 则将  $P_s$  映射为物理网络中的节点、光纤对以及相应的波长, 并建立光路; 修改  $P_s$  所在波长平面中相应波长信道的占用函数值、可调函数值、代价函数值, 以及  $C(\lambda_i)$ , 然后转至步骤 2;

(b) 如果存在  $t(l_s) = 1$ , 则将所有  $t(l_s) = 1$  的波长信道所在光路重调到预先确定的可用通路  $P_d$ : 如果成功, 则将  $P_d, P_s$  分别映射成物理网络中的节点、光纤对以及相应的波长以建立光路, 并修改  $P_d, P_s$  所在波长平面中相应波长信道的占用函数值、可调函数值、代价函数值, 以及各自的  $C(\lambda_i)$ ; 如果不成功, 则拒绝该光路建立请求. 然后转至步骤 2;

(2) 如果到达的是低优先级的光路建立请求, 则从这  $v$  条最短路径中找出所有由空闲信道占用的路径  $P_m$ :

(a) 如果没有找到满足条件的路径, 则拒绝该光路建立请求, 然后转至步骤 2;

(b) 如果找到  $h (h = 1, 2, \dots, v)$  条满足条件的路径, 则从中选出一条  $C(P_m)$  最小的路径  $P_s$ , 将  $P_s$  映射成物理网络中的节点、光纤对以及相应的波长, 并建立光路, 转到步骤 5;

步骤 5 从余下的  $(h - 1)$  条最短路径中, 寻找与  $P_s$  具有相同节点的路径  $P_n$ :

(a) 如果没有找到符合要求的路径, 则修改  $P_s$  所在波长平面中相应波长信道的占用函数值、代价函数值, 以及  $C(\lambda_i)$ , 然后转至步骤 2;

(b) 如果找到  $u (u < h)$  条路径  $P_n (n = 1, 2, \dots, u)$ , 则比较这  $u$  条最短路径的代价函数  $C(P_n)$ , 从中选出一条  $C(P_n)$  最小的路径  $P_l$ , 修改  $P_s$  所在波长平面中相应波长信道的占用函数值、可调函数值、代价函数值, 以及  $C(\lambda_i)$ , 然后转至步骤 2;

步骤 6 释放该光路占用的资源, 修改相应波长平面中相应波长信道的占用函数值、可调函数值、代价函数值, 以及  $C(\lambda_i)$ , 然后转至步骤 2;

### 3 计算机仿真及数据分析

我们采用两种网络拓扑作为目标网络对所提算法进行了仿真研究. 第一种是类似于中国教育与科研计算机网 (CERNET) 的不规则网络. CERNET 中原本连接到清华大学的部分地区节点被改连到了北京大学和北京邮电大学, 共 10 个节点, 16 条链路, 方框中为节点的编号. 第二种拓扑则采用 NSFNET T1 骨干网, 如图 3 所示.

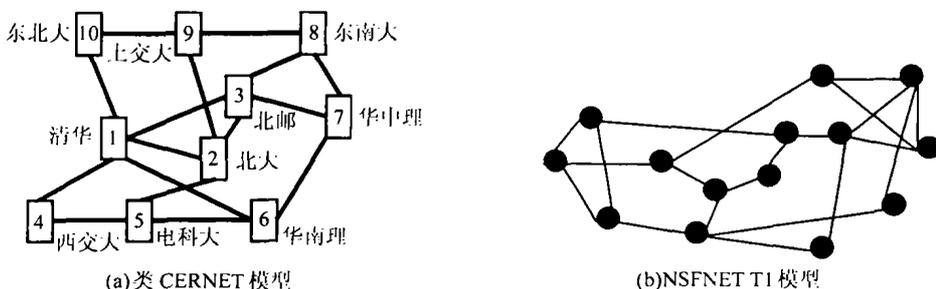


图 3 仿真用的两种网络模型

仿真时假设每条链路由 4 对单向光纤组成, 每根光纤可以支持 8 个波长。客户层不同 QoS 要求的业务经 DOS 模型在光层映射为高和低两种不同优先级的光路建立请求, 它们等概率出现。不同优先级的光路建立请求到达网络的平均速率服从参数  $\beta$  的泊松分布, 即全网总的到达率为  $\beta$ 。全网所有节点对间的业务强度都相同, 即支持的业务为均匀业务。光路连接请求的源-目的节点随机选定, 允许一对节点之间同时存在多条光路。光路建立后的持续时间服从均值  $1/\mu$  的指数分布。一旦光路建立请求被拒绝(阻塞), 就立即丢弃, 即无等待队列。在不同业务负载情况下, 对两种算法中各个优先级的光路建立请求的阻塞率和全网的平均阻塞率进行了仿真研究, 并与采用资源预留思想<sup>[11,12]</sup>时进行了对比。所得结果是在模拟  $10^6$  次光路建立请求后经统计得出的, 如图 4- 图 8 所示。图中  $p-1$  和  $p-2$  分别表示高、低优先级的阻塞率; DSM 表示采用动态选择法时全网的平均阻塞率;  $R-1$  和  $R-2$  表示采用资源预留时全网的平均阻塞率,  $R-1$  和  $R-2$  分别对应为高优先级预留  $1/8$  和  $1/4$  波长时的情况;  $r-N$  和  $r-C$  分别表示采用动态选择法时 NSFNET T1 和 CERNET 模型中的光路重调率。

从图 4 和图 5 可看出: 无论负载怎样变化, 动态选择法都很好地保证了高优先级的光路建立请求的阻塞率低于低优先级; 从图 6 和图 7 可看出, 采用动态选择法, 全网平均阻塞率明显低于资源预留算法。这是因为对高优先级进行资源预留时, 很难做到预留资源恰到好处。预留过多资源会造成资源浪费, 降低资源利用率, 而预留过少资源又不能保证高优先级的低阻塞率要求; 从图 8 可看出, 采用动态选择法时, 光路重调率非常低, 也就是说被重路由的光路条数很少, 因此, 并不会引起太大的业务抖动。



图 4 类 CERNET 模型中所提算法性能

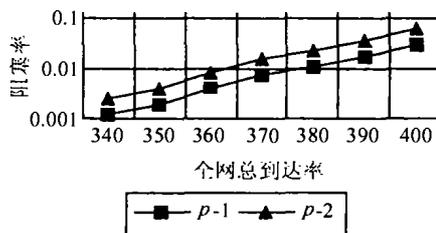


图 5 类 NSFNET 模型中所提算法性能

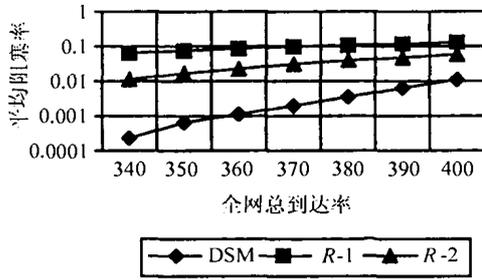


图 6 类 CERNET 中动态选择法与资源预留法的性能比较

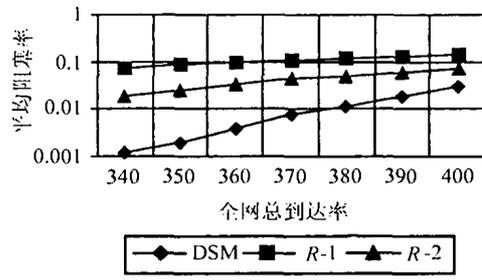


图 7 类 NSFNET 中动态选择法与资源预留法的性能比较

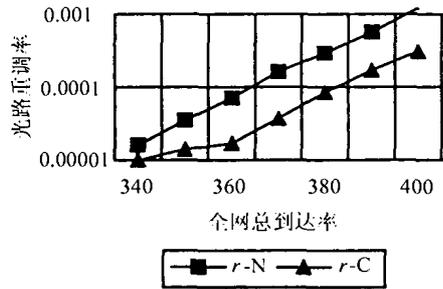


图 8 不同网络模型中的光路重调率

### 5 结束语

本文研究了多光纤 WDM 网中支持 QoS 的波长重路由问题，在波长图模型的基础上提出一种支持 QoS 的波长重路由算法——动态选择法，并在不同负载的动态业务下，采用类 CERNET 和 NSFNET T1 两种网络模型，对所提算法进行了计算机仿真。仿真结果表明所提算法通过对极少量的低优先级光路进行波长重路由，很好地满足了上层业务不同的 QoS 要求，充分利用了有限的网络资源，降低了全网阻塞率。同时在仿真中我们还发现，在网络负载较轻时，采用动态选择法时高、低优先级的光路建立请求的阻塞率非常接近，光路重调率近似为 0，随着网络负载增加，所提算法很好地保证了高优先级的光路建立请求的阻塞率明显低于低优先级光路建立请求，同时全网平均阻塞率大大低于采用资源预留法的平均阻塞率，此时光路重调率仍保持在较低的水平。

### 参 考 文 献

- [1] J. WEI, *et al.*, Network control and management for next generation Internet, *IEICE Trans. on Commun.*, 2000, E83-B(10), 2191-2209.
- [2] X. Xiao, *et al.*, Internet QoS: a big picture, *IEEE Network*, 1999, 13(2), 8-18.
- [3] O. Gerstel, *et al.*, Protocols and architectures for next generation optical WDM networks, *IEEE J. on SAC*, 2000, 18(10), 2051-2083.
- [4] N. Golmie, *et al.*, A differentiated optical services model for WDM networks, *IEEE Commun. Mag.*, 2000, 38(2), 68-73.

- [5] I. Chlamtac, *et al.*, Lightpath communications: An approach to high bandwidth optical WAN's, *IEEE Trans. on Commun.*, 1992, 40(7), 1171-1182.
- [6] G. Mohan, C. Murthy, A time optical wavelength rerouting algorithm for dynamic traffic in WDM networks, *J. Lightwave Tech.*, 1999, 17(3), 406-417.
- [7] G. Mohan, *et al.*, Efficient wavelength rerouting in WDM single-fiber and multi-fiber networks with and without wavelength conversion, *Journal of High Speed Networks*, 1999, 8(3), 149-171.
- [8] R. A. Barry, P. A. Humblet, Models of blocking probability in all-optical networks with and without wavelength changers, *IEEE J. on SAC*, 1996, 14(6), 858-867.
- [9] K. Lee, V. Li, A wavelength rerouting algorithm in wide-area all-optical networks, *J. Lightwave Tech.*, 1996, 14(6), 1218-1229.
- [10] N. Correia, *et al.*, A lightpath rerouting algorithm for WDM circuit-switched networks, *Proc. of 2000 London Communications Symposium*, Torrington Place, London, September 2000.
- [11] S. Cheng, Backtrack routing and priority-based wavelength assignment in WDM networks, *Computer Communications*, 1999, 22(4), 1-10.
- [12] 何荣希等, WDM 光传送网中支持优先级的波长分配算法, *通信学报*, 2001, 22(3), 27-32.
- [13] S. Xu, *et al.*, Dynamic routing and assignment of wavelength algorithm in multifiber wavelength division multiplexing networks, *IEEE J. on SAC*, 2000, 18(10), 2130-2137.

## QoS-BASED WAVELENGTH REROUTING ALGORITHMS IN MULTI-FIBER WDM OPTICAL TRANSPORT NETWORKS

He Rongxi    Li Lemin    Wang Sheng

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

**Abstract** Wavelength continuity constraint leads to inefficient utilization of wavelength channels and results in higher blocking probability in WDM optical transport networks. In order to weaken the inefficiency of the constraint, wavelength rerouting is used. Based on a wavelength graph model, the QoS-based wavelength rerouting strategy, dynamic selection method, is proposed. Simulation results of the network performance in different dynamic traffic loads are given. The results show that the method can not only meet the different QoS requirements of the client layer's service, but also utilize the finite networking resources efficiently with reduced blocking probability.

**Key words** Multi-fiber WDM transport network, Quality of Service(QoS), Wavelength rerouting algorithm, Block probability

何荣希: 男, 1971 年生, 博士, 目前主要研究方向为光联网的路由和波长分配算法、生存性等。  
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。  
王 晟: 男, 1971 年生, 博士, 副教授, 目前主要研究方向为 WDM 光网络技术。