

## 多光纤 WDM 网中的 QoS 路由算法<sup>1</sup>

何荣希 李乐民 徐世中

(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** 利用区分光业务 (DOS) 模型可以将 WDM 光传送网中客户层 (如 IP) 具有不同 QoS 要求的业务汇聚为较粗粒度的流, 直接映射到光信道上, 从而使客户层业务的不同 QoS 要求可以体现在 DOS 域的边缘光节点处的光路建立请求的不同优先级上. 该文首先探讨了如何将多光纤 WDM 网转化为波长图, 从而一次性解决选路和分配波长 (RWA) 问题, 在此基础上, 提出两种用于多光纤 WDM 网的 QoS 路由算法, 对二者进行了比较, 并进行了计算机仿真.

**关键词** 多光纤 WDM 网, DOS 模型, 波长图, 波长信道, QoS 路由算法

**中图分类号** TN913.24

### 1 引言

业界普遍认为, 无论是在公用网还是专用网 (如企业内部的 Intranet) 的发展中, IP 将起着关键的作用<sup>[1]</sup>, IP 将成为数据传输的主导协议. 而光纤上的波分复用 (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. 越来越多的证据表明 WDM 将成为下一代 Internet 的核心技术<sup>[2]</sup>. 随着光分插复用器 (Optical Add/Drop Multiplexer, OADM) 和光交叉连接设备 (Optical/Wavelength Cross-Connect, OXC/WXC) 的出现, 已经使 WDM 技术从最初的点到点传输技术逐渐转变为一种网络技术<sup>[3]</sup>. 传统的 Internet 仅提供单一的“尽力传送”业务 (Best-effort Service), 只是将数据尽快传输, 并不提供诸如丢失率、带宽、时延及时延抖动等质量保障. 随着 Internet 越来越商业化, 很多用户对其业务提出了 QoS (Quality of Service) 要求<sup>[4]</sup>, 这就要求我们除了利用 WDM 技术提供的巨大带宽来满足日益增长的 Internet 业务的需要, 同时还应该考虑如何对 WDM 网络进行优化以适应 IP 业务和 IP 的 QoS 要求<sup>[2]</sup>.

区分光业务 (Differentiated Optical Service, DOS) 模型<sup>[2]</sup> 是一种适用于 WDM 光传送网的 QoS 模型, 它是在 IETF 区分业务 (IETF DiffServ) 模型<sup>[5]</sup> 的基础上提出的. 该模型解决了如何将客户层 (如 IP) 的 QoS 要求映射到光层的问题. DiffServ 模型将具有相同服务质量要求的分组聚合 (Aggregate) 成较少的几类粗粒度流 (Coarser-grain flow), 并在网络的边缘路由器完成复杂的分类 (Classification)、标记 (Marking)、警管 (Policing) 以及成形 (Shaping) 等功能, 而在中间路由器只进行性能聚合分类 (Behavior aggregate classification)<sup>[4]</sup>. DOS 模型将具有相同 QoS 要求的 DiffServ 流进一步聚合成更粗粒度的流, 从而可以直接映射到光信道的 OC-12, OC-48 和 OC-192 中<sup>[2]</sup>. DOS 域是 DOS 模型中的一个重要概念, 它由一组中心光节点和边缘光节点构成. 中心光节点包括光放大器 (OA), OXC 和波长复用器等, 而边缘光节点由 OADM 组成<sup>[2]</sup>. 边缘光节点完成电-光转换和业务整饰 (Grooming). DOS 模型的主要目的就是要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. 通过 DOS 模型可以将 DiffServ 流直接映射到光传送网中的光流 (Optical Flow), 从而可以利用光网

<sup>1</sup> 2000-09-25 收到, 2002-05-10 定稿

国家自然科学基金重大项目, 基金号: 69990540

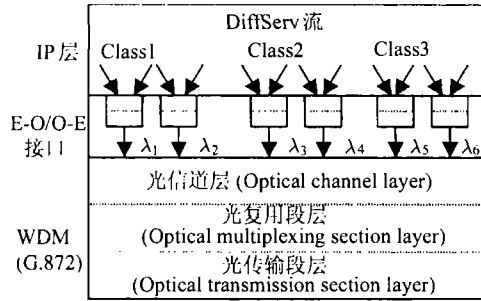


图1 IP 区分业务映射图

网络的监控和信令功能来保证光域的 QoS 参数 [2]。图 1 所示为 IP 层中具有三类不同 QoS 要求的业务时,如何将 IP Diffserv 映射为光流。图中将 WDM 光层的可用波长集分为 3 个不同级别的波长组 ( $\lambda_1, \lambda_2$ ), ( $\lambda_3, \lambda_4$ ) 和 ( $\lambda_5, \lambda_6$ ), 分别对应一类 QoS 业务。每个波长组都有唯一的 DOS 参数。在同一对源、目的节点间的相同 DOS 级别中的各个波长具有相同的光 QoS。

近年来,很多学者都对 WDM 网的路由和波长分配 (Routing and Wavelength Assignment, RWA) 问题进行了研究,提出了大量的 RWA 算法 [6-8]。但是,这些算法往往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。实际上,由于实时和多媒体等新兴业务的出现,使得客户层中不再是单一的“尽力传送”业务,因此到达 DOS 域边缘光节点的光路建立请求可能对应不同的上层业务。不同业务对应的光路建立请求应有不同的阻塞率要求,比如对于 IP-Phone, 视频会议以及 VOD (Video On Demand) 等业务,应该具有比文件传输等业务低的阻塞率 [9]。为此,相对于客户层不同 QoS 要求的业务,通过 DOS 模型汇聚后,在 DOS 域的边缘光节点处应该根据其 QoS 要求选择不同的光路,这就是光网中的 QoS 路由问题。

WDM 网的 RWA 问题是个 NP-C 问题,文献中大多将它强行分为路由子问题和波长子问题分别解决。文献 [6] 尝试了在单光纤 WDM 网中,采用波长图 (Wavelength Graph, WG) 的方法来一次性解决 RWA 问题,模拟结果表明此时可以得到比分别求解两个子问题更低的阻塞率。由于波长连续性限制, WDM 网中一条光路上的所有链路都要使用同一条波长。而在多光纤网中,使用同一链路的不同光纤上的相同波长是完全等效的,这等效于单光纤网具有部分波长变换能力后几个不同波长能相互变换的情形。因此多光纤网具有等效的部分波长变换能力 [7],与单光纤网相比,可以进一步降低光路建立请求的阻塞率。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研究光网中的 QoS 路由问题更有价值。

本文探讨了多光纤 WDM 网中的波长图问题,利用波长图来一次性解决 RWA 的路由和波长分配两个子问题;提出一种波长信道动态预留机制,该机制决定了客户层不同 QoS 要求业务对应的光路建立请求可以同时占用的波长信道数;在此基础上提出两种多光纤 WDM 网中的 QoS 路由算法:集中法和均衡法,并对算法进行了计算机仿真。

## 2 多光纤 WDM 网的波长图模型

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  $\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{|W|}\}$ 。考虑的光路也是双向光路。

为了便于讨论,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。上述物理拓扑  $G$  的波长信道总数  $Q$  为

$$Q = |L| \times |F| \times |W| \tag{1}$$

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。  $G(N, L, F, W)$  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。

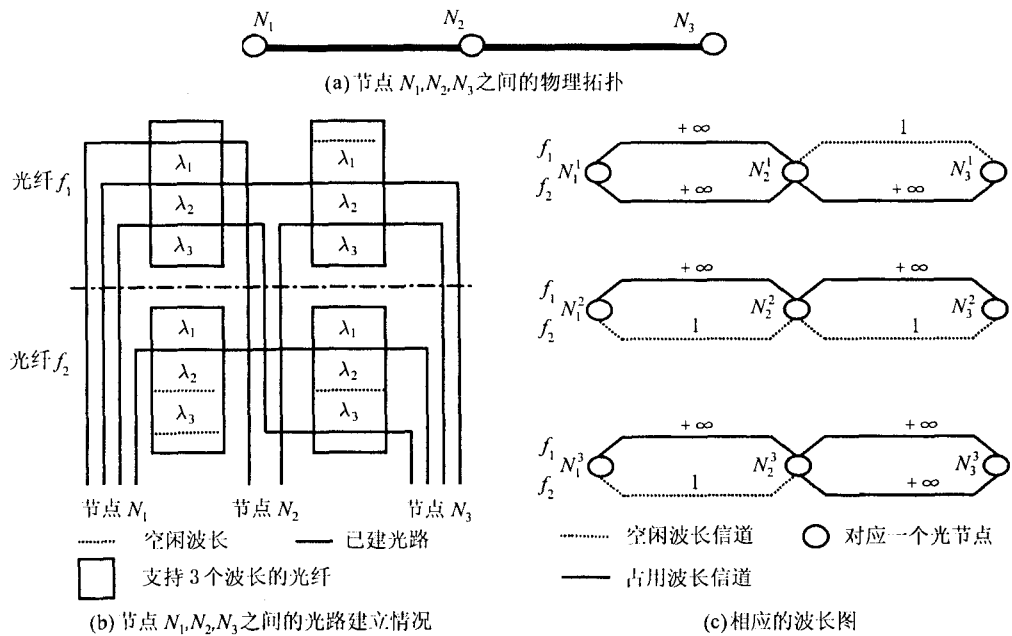


图 2 多光纤 WDM 网络的波长图

图中所示为双光纤、三波长 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 3 个波长全部被占用, 光纤对  $f_2$  上仅用了波长 1, 其余两条波长都空闲; 在节点  $N_2$  和  $N_3$  之间的链路上,  $f_1$  上的波长 1 和  $f_2$  上的波长 2 空闲, 其余波长都被占用。图 2(c) 为上述情况对应的波长图, 由 3 个波长平面构成, 从上到下依次对应波长  $\lambda_1, \lambda_2$  和  $\lambda_3$ ; 图 2(a) 中的每个节点在图 2(c) 中映射为 3 个节点, 如节点  $N_1$  对应波长图中节点  $N_1^1, N_1^2$  和  $N_1^3$ 。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  $f_2$ 。

$G(N, L, F, W)$  的波长图 WG 可表示为

$$WG = \bigcup_{\lambda \in W} G(N^\lambda, L^\lambda) \tag{2}$$

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  $|L^\lambda| = Q$ 。

波长图中的波长信道  $l_{kn}^{ij}$  (表示  $\lambda_i$  对应的波长平面上, 在节点  $k$  和  $n$  之间, 对应于光纤对  $f_j$  的弧段) 的代价函数  $c(l_{kn}^{ij})$ , 根据它在物理拓扑  $G$  中相应链路  $l_{kn}$  上的波长使用情况来决定, 即

$$c(l_{kn}^{ij}) = \begin{cases} 1, & \text{当链路 } l_{kn} \text{ 中的光纤对 } f_j \text{ 上的波长 } \lambda_i \text{ 空闲时} \\ +\infty, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

在波长图中, 对波长  $\lambda_i \in W$  对应的子图  $G(N^{\lambda_i}, L^{\lambda_i})$ , 引入邻接矩阵  $A(\lambda_i)$ , 用下式表示:

$$A(\lambda_i) = [a_{kn}^{\lambda_i}]_{|N| \times |N|}, \quad k, n = 1, 2, \dots, |N| \quad (4)$$

其中  $a_{kn}^{\lambda_i}$  为该波长平面上, 节点  $N_k^{\lambda_i}$  和  $N_n^{\lambda_i}$  之间, 代价函数值为 1 的所有波长信道的总个数。由 (3) 和 (4) 式可以得出子图  $G(N^{\lambda_i}, L^{\lambda_i})$  的代价矩阵  $C(\lambda_i)$ , 用下式表示:

$$C(\lambda_i) = [b_{kn}^{\lambda_i}]_{|N| \times |N|}, \quad k, n = 1, 2, \dots, |N| \quad (5)$$

其中

$$b_{kn}^{\lambda_i} = \begin{cases} 1, & a_{kn}^{\lambda_i} \neq 0 \\ +\infty & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

下面以图 2 中  $\lambda_1$  对应的波长平面为例, 求出其邻接矩阵  $A(\lambda_1)$  如下:

$$A(\lambda_1) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \text{相应地, 其代价矩阵 } C(\lambda_1) \text{ 为 } C(\lambda_1) = \begin{bmatrix} +\infty & +\infty & +\infty \\ +\infty & +\infty & 1 \\ +\infty & 1 & +\infty \end{bmatrix}.$$

由于波长连续性限制, 一条光路经过的所有链路都必须使用相同的波长。在多光纤 WDM 网中, 使用同一链路的不同光纤上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。

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

$$C(P) = \sum_{l_{kn} \in P} b_{kn} \quad (7)$$

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。

波长图中, 如果波长信道  $l_{kn}^f$  被占用, 指示函数  $x(l_{kn}^f) = 1$ ; 否则,  $x(l_{kn}^f) = 0$ 。如果波长信道  $l_{kn}^f$  在通路  $P$  上, 则指示函数  $y_P(l_{kn}^f) = 1$ ; 否则,  $y_P(l_{kn}^f) = 0$ 。用  $U(P)$  表示路径  $P$  的占用函数,  $U(P)$  定义为该路径所经过的节点间所有被占用的波长信道的总个数, 即

$$U(P) = \sum_{k, n \text{ 在 } P \text{ 上}} \sum_{f=1}^{|F|} x(l_{kn}^f) \sum_{m=1}^{|F|} y_P(l_{kn}^m) \quad (8)$$

### 3 多光纤 WDM 网的 QoS 路由算法

#### 3.1 波长信道动态预留机制

假设在 WDM 网中, 客户层 (如 IP) 具有不同 QoS 要求的业务经 DOS 模型聚合后, 在 DOS 域的边缘光节点 (如 OADM) 上表现为优先级为  $p_1, p_2, \dots, p_n$  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均值  $1/\mu$  的指数分布, 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。

为了保证优先级越高的光路建立请求的阻塞率越低, 现提出一种波长信道动态预留机制。该机制根据各个优先级的光路建立请求的平均到达率以及其优先级别, 动态计算出各级别的光路建立请求的波长信道限额。所谓波长信道限额就是指某个优先级的光路建立请求最多可以同时占用的波长信道数。由于在波长图中, 总是选择此刻各个波长平面上的最短通路来建立光路, 那么, 波长信道限额的大小, 就大致反映出同一时刻全网中最多可以为各个优先级的光路建立请求建立光路的数量多少。另外, 波长信道限额还反映出各个优先级的光路建立请求可以占用的网络资源的多少。波长信道限额越大, 能够占用的资源就越多, 该级别的光路建立请求成功建立的概率就越大, 因而其阻塞率越低。下面详细讨论波长信道动态预留机制。

由于各个优先级的光路建立请求的平均到达率分别为  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ , 从而全网总的平均到达率  $\beta = \sum_{i=1}^n \beta_i$ 。令  $\varphi_i = \beta_i/\beta$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )。用  $q_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 表示优先级不高于  $p_i$  的所有光路建立请求的波长信道限额,  $q_i$  按下式进行计算:

$$q_i = \left[ \sum_{j=0}^{n-i} \varphi_{n-j} \delta_j Q \right] \quad (9)$$

而且,  $q_i$  必须同时满足以下两个约束条件:

$$Q \geq q_1 \geq q_2 \geq \dots \geq q_n \geq 1 \quad (10)$$

$$q_1 - q_2 \geq q_2 - q_3 \geq \dots \geq q_{n-1} - q_n \geq q_n \quad (11)$$

其中  $Q$  为波长信道总数,  $\delta_i$  是与优先级有关的常数因子。  $q_i - q_{i+1}$  实际上就是为优先级为  $p_i$  的光路建立请求预留的波长信道数。也就是说, 无论在什么情况下, 该级别的光路建立请求都至少可以占用  $q_i - q_{i+1}$  个波长信道。

采用波长信道动态预留机制, 对于优先级不高于  $p_i$  的所有光路建立请求, 它们最多可以同时占用  $q_i$  个不同的波长信道。用  $B(p_i)$  表示优先级不高于  $p_i$  的所有光路建立请求某时刻已经占用的波长信道数。当到达一个优先级为  $p_i$  的光路建立请求时, 首先检查  $B(p_i) < q_i$  是否成立; 如果不成立, 则拒绝该光路建立请求。只有当上述条件成立时, 才尝试为其选路并分配波长以建立光路。

波长信道动态预留机制既考虑到各个优先级的光路建立请求的平均到达率  $\beta_i$ , 同时又可通过调整常数因子  $\delta_i$  来保证优先级越高的光路建立请求可以占用更多的波长信道, 从而增加了它被成功建立光路的机会, 保证了它的阻塞率越低。

#### 3.2 多光纤 WDM 网的 QoS 路由算法

本节在前述波长图和波长信道动态预留机制的基础上, 提出了两种多光纤 WDM 网中的 QoS 路由算法: 集中法和均衡法。

集中法的基本思想就是尽量使所建光路集中在有限的波长平面的有限弧段上; 而均衡法则正好相反, 它尽量将所建光路均匀分布在各个波长平面中, 以使负载在各个波长上平均分摊。对两种算法叙述如下。

### 3.2.1 集中法

步骤 1 将给定的多光纤网转化成波长图, 算出波长图中各个波长信道的代价函数值, 以及各个波长平面对应的邻接矩阵  $A(\lambda_i)$  和代价矩阵  $C(\lambda_i)$ ; 按照波长信道动态预留机制计算出各个优先级的光路建立请求对应的波长信道限额  $q_j(j = 1, 2, \dots, n)$ ; 初始化  $B(p_j) = 0$ ;

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 5;

步骤 3 根据到达光路建立请求的优先级  $p_j$ , 首先检查  $B(p_j) < q_j$  是否成立:

(1) 如果不成立, 则拒绝该请求, 并转到步骤 2;

(2) 如果上述条件成立, 则用 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邻接矩阵和代价矩阵来完成), 要求  $0 < C(P_i) < +\infty$ :

(a) 如果一条都没有找到, 则拒绝该光路建立请求, 并转到步骤 2;

(b) 如果找到  $v(v \leq |W|)$  条最短路径  $P_m(m = 1, 2, \dots, v)$ , 则转步骤 4.

步骤 4 计算并比较这  $v$  条最短路径的占用函数  $U(P_m)$ , 从中选出一条  $U(P_m)$  最大的路径, 将该条路径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; 修改该路径所在波长平面中相应波长信道的代价函数值, 以及  $A(\lambda_i)$ ,  $C(\lambda_i)$  和  $B(p_j)$ , 然后转至步骤 2.

步骤 5 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代价函数值, 以及  $A(\lambda_i)$ ,  $C(\lambda_i)$  和  $B(p_j)$ , 并转至步骤 2.

3.2.2 均衡法 在均衡法中, 除了步骤 4 与集中法不同外, 其余各步都一样, 步骤 4 修改如下:

步骤 4 计算并比较这  $v$  条最短路径的占用函数  $U(P_m)$ , 从中选出一条  $U(P_m)$  最小的路径, 将该条路径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; 修改该路径所在波长平面中相应波长信道的代价函数值, 以及  $A(\lambda_i)$ ,  $C(\lambda_i)$  和  $B(p_j)$ , 然后转至步骤 2.

## 4 计算机仿真及数据分析

经采用类似于中国教育与科研计算机网 (CERNET)(<http://www.edu.cn/>) 的不规则网络拓扑作为目标网络, 对集中法和均衡法进行了仿真研究. 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, 如图 3 所示. 方框中为节点的编号.

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、中、低三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. 3 个优先级的光路建立请求的波长信道配额分别取:  $q_1 = 512$ ,  $q_2 = 340$ ,  $q_3 = 170$ . 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 6 所示. 图中 P-1, P-2, P-3 分别代表优先级为高、中、低时的光路建立请求的阻塞率, WG-1 和 WG-2 分别表示集中法和均衡法, Avg.-1 和 Avg.-2 分别表示 WG-1 和 WG-2 算法中全网的平均阻塞率.

从图中可看出: 无论负载怎样变化, WG-1 和 WG-2 都保证了优先级越高的光路建立请求, 其阻塞率越低, 即高优先级的光路建立请求的阻塞率始终低于中、低优先级的光路建立请

求, 而中优先级的光路建立请求的阻塞率又低于低优先级的光路建立请求。图中还显示, 无论是从各个优先级的阻塞率, 还是全网的平均阻塞率来看, WG-1 算法的性能都优于 WG-2 算法。

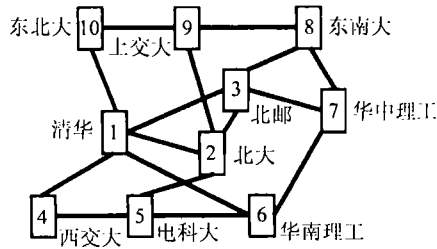


图 3 仿真用的网络模型: 类 CERNET 网, 10 个节点 16 条链路

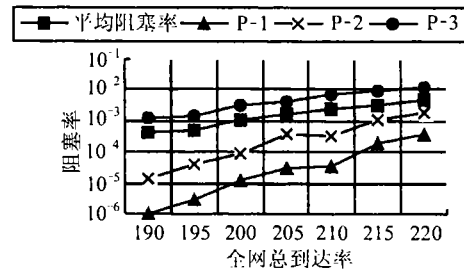


图 4 不同负载下 WG-1 算法的仿真结果

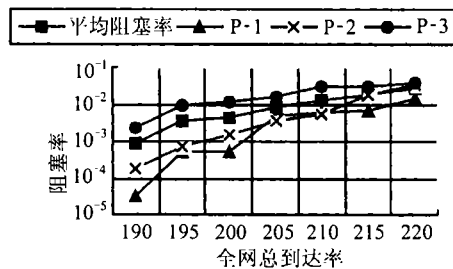


图 5 不同负载下 WG-2 算法的仿真结果

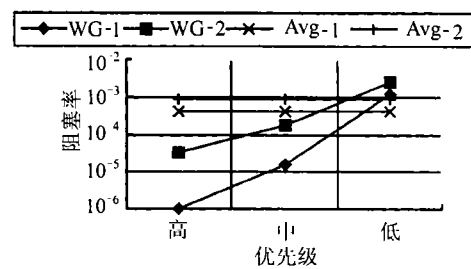


图 6 WG-1 和 WG-2 算法的性能比较

## 5 结束语

本文研究了如何利用波长图的方法来解决多光纤 WDM 网中的 RWA 问题; 并采用 DOS 模型将客户层不同的 QoS 要求映射为 DOS 域边缘光节点处不同优先级别的光路建立请求, 通过波长信道动态预留机制来为每种优先级的光路建立请求分配波长信道限额; 在此基础上提出两种多光纤 WDM 网的 QoS 路由算法: 集中法和均衡法, 并在不同负载的动态业务下, 采用类 CERNET 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很好地保证了优先级越高的光路建立请求其阻塞率越低, 同时鼓励资源集中使用的 WG-1 算法的性能略优于鼓励资源分散使用的 WG-2 算法。

## 参 考 文 献

- [1] Nortel Networks White Paper, IP QoS—A Bold New Network, <http://www.nortelnetworks.com/MPLS>.
- [2] N. Golmie, *et al.*, A differentiated optical services model for WDM networks, *IEEE Communication Magazine*, 2000, 38(2), 68–73.
- [3] N. Ghani, Integration strategies for IP over WDM, *Workshop Opt. Networking*, Dallas, TX, Jan. 2000.
- [4] Xipeng Xiao, *et al.*, Internet QoS: A big picture, *IEEE Network*, 1999, 13(2), 8–18.
- [5] Y. Bernet, *et al.*, A framework for differentiated services, *Internet draft*, Feb 1999.
- [6] K. Lee, *et al.*, A wavelength rerouting algorithm in wide-area all-optical networks, *Journal of Lightwave Technology*, 1996, 14(6), 1218–1229.

- [7] A. Mokhtar, *et al.*, Adaptive wavelength routing in all-optical networks, IEEE/ACM Networking, 1998, 6(2), 197-206.
- [8] 徐世中等, 多光纤波分复用网动态路由和波长分配算法, 电子学报, 2000, 28(7), 23-27.
- [9] S. Cheng, Backtrack routing and priority-based wavelength assignment in WDM networks, Computer communications, 1999, 22(4), 1-10.

## QoS ROUTING ALGORITHM IN MULTI-FIBER WDM TRANSPORT NETWORKS

He Rongxi    Li Lemin    Xu Shizhong

(*Nat. Key Lab of Broadband Opt. Fiber Transm. and Comm. Networks,  
UEST of China, Chengdu 610054, China*)

**Abstract** Basing on the DOS model's aggregating ability, the client layer's services with different QoS requirements can be mapped directly into the optical channel. Then the different QoS requirements of the client layer's services can be reflected by the different priorities of the connection request at the border optical node in a DOS domain. A wavelength graph method is presented in the multi-fiber WDM optical transport network to reduce the blocking probability of the connection request. Two optical QoS routing strategies, concentrating method and equalizing method, are proposed. The two methods are compared by simulation results of the network performance in different dynamic traffic load situations.

**Key words** Multi-fiber WDM transport network, Differentiated optical service model, Wavelength graph, Wavelength channel, Quality of service routing algorithm

何荣希: 男, 1971 年生, 博士, 目前主要研究方向为 WDM 光传送网的路由和波长分配算法、抗毁性以及 IP 的 QoS 路由技术.

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.

徐世中: 男, 1972 年生, 博士, 目前主要研究方向为: WDM 光互联网路由和波长分配算法、体系结构和生存性.