

# 一种 IP/DWDM 光因特网中的 QoS 组播路由算法<sup>\*</sup>

王兴伟<sup>1</sup> 程辉<sup>1</sup> 李佳<sup>1</sup> 郑露滴<sup>2</sup> 黄敏<sup>3</sup>

(东北大学计算中心 沈阳110004)<sup>1</sup> (朗讯贝尔实验室中国基础科学研究院 北京100080)<sup>2</sup>

(东北大学信息科学与工程学院 沈阳110004)<sup>3</sup>

**摘要** 本文讨论了一种 IP/DWDM 光因特网的 QoS 组播路由算法,在已知 QoS 组播请求和所需时间延迟的前提下,提出了一种可以找到基于柔性 QoS 的、次优的路由树的算法。此外,我们对 QoS 满意程度一术语作了定义。所提出的算法在多种群并行遗传模拟退火算法基础上构建组播树,并根据波长图为树分配波长。此算法将路由选择和波长分配一体化,路由选择的目的在于找到一个次优组播树,波长分配的目的则是通过使波长覆盖数量最小来最小化组播树的延迟。因此,组播树的估价和 QoS 用户满意程度两方面都接近最优。该算法同时考虑了负载均衡。仿真结果表明,该算法是灵活有效的。

**关键词** IP/DWDM 光因特网, QoS 组播路由, 多种群并行遗传模拟退火算法, 负载均衡

## A QoS Multicast Routing Algorithm in IP/DWDM Optical Internet

WANG Xing-Wei<sup>1</sup> CHENG Hui<sup>1</sup> LI Jia<sup>1</sup> ZHENG Lu-Di<sup>2</sup> HUANG Min<sup>3</sup>

(Computing Center, Northeastern University, Shenyang 110004)<sup>1</sup> (Bell Labs Research China, Beijing 100080)<sup>2</sup>

(School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004)<sup>3</sup>

**Abstract** In this paper, a QoS multicast routing algorithm in IP/DWDM Optical Internet is discussed. Given a QoS multicast request and required delay interval, an algorithm is proposed, which can find a flexible-QoS-based and cost-suboptimal routing tree. In addition, a term QoS satisfaction degree is defined. The proposed algorithm constructs the multicast tree based on multipopulation parallel genetic simulated annealing algorithm, and assigns wavelengths to the tree based on the wavelength graph. It integrates routing and wavelength assignment into a single process. The objective of routing is to find a cost suboptimal multicast tree. The objective of wavelength assignment is to minimize the delay of the multicast tree by minimizing the number of wavelength conversion. Thus, both the cost of multicast tree and user QoS satisfaction degree approach the optimum. The proposed algorithm also considers load balancing. Simulation results have shown that the proposed algorithm is both feasible and effective.

**Keywords** IP/DWDM optical Internet, QoS multicast routing, Multipopulation parallel genetic simulated annealing algorithm, Load balancing

## 1 引言

支持服务质量 QoS (Quality of Service) 和组播 (Multicast) 是下一代互联网所要具备的基本能力。IP/DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) 光因特网则是下一代互联网的主要组网技术<sup>[1]</sup>。在 IP/DWDM 光因特网中支持 QoS 组播需要进行有效的路由选择,找到费用优化的组播树,并为之分配波长。寻找这样一棵 QoS 组播树的问题是 NP-hard 问题<sup>[2]</sup>。

单种群遗传算法 GA (Genetic Algorithm) 已被广泛应用在各种组合优化问题中。随着并行计算机和多处理器技术的发展,多种群并行 GA<sup>[3]</sup> 开始兴起,它能够在多台计算机或处理器上同时进行子种群的演化,同时通过网络在子种群间传递有用信息以加速演化过程。多种群并行 GA 更加真实地模拟了自然界中物种的演化过程,相对于单种群 GA,能够获得更好的结果。但是,GA 容易过早收敛,在演化后期搜索效率较低。模拟退火算法 SAA (Simulated Annealing Algori-

thm)<sup>[4]</sup> 也是一种常用的解决组合优化问题的方法,它能够在解空间搜索过程中跳出局部最优。近年来,已经有一些研究将模拟退火和多种群并行遗传结合起来,派生了一个新的优化算法—多种群并行遗传模拟退火算法 MPGSAA (Multipopulation Parallel Genetic Simulated Annealing Algorithm),不仅能够增强 GA 的全局收敛性,而且还能加快进化速度 3 到 5 倍<sup>[5]</sup>。

端到端延迟是一个重要的 QoS 参数,它直接关系到用户对网络 QoS 的满意程度。已有的研究成果<sup>[6-10]</sup> 都是基于刚性 QoS 约束,即给出单一的延迟上界值。但是,由于网络状态信息存在不精确性和动态性,且用户 QoS 需求一般情况下都是柔性的,因此用一个区间来度量比较合理<sup>[11]</sup>。

本文定义了用户 QoS 需求区间,并基于该区间定义了用户 QoS 满意度;提出一种算法,基于 MPGSAA 来构造费用次优组播树,并基于波长图<sup>[12]</sup> 思想构造最小化组播树延迟的波长分配算法,将组播树构造与波长分配一体化考虑,从而避免了二者分别考虑时容易出现无法为组播树分配波长或者波长

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金与朗讯贝尔实验室联合资助项目(60003006, 70101006); 国家高技术研究发展计划资助项目(2001AA121064); 辽宁省科技基金项目资助(20032018, 20032019)。王兴伟 博士,教授,主要研究领域为下一代网络、IP/DWDM 光因特网及移动无线因特网。

分配结果导致组播树 QoS 性能较低的问题<sup>[13]</sup>,在满足用户 QoS 需求的同时,使组播树费用趋近最优。

## 2 模型描述

### 2.1 IP/DWDM 光因特网模型

IP/DWDM 光因特网可以表示为一个有向连通图  $G(V, E)$ 。其中,  $V$  是节点(波长路由器或 OXC)的集合,  $E$  是边(光纤)的集合。每条边都由两根分别在链路的两个方向传输数据的反向光纤构成,将每根有向光纤称为链路。

设每个光节点  $v_i \in V$  都有组播能力,即配置有分光器(optical splitter)<sup>[14]</sup>,能将一个输入光信号分叉成任意数目的输出信号。由于波长转换代价仍然较高,因此只为部分节点配置全域波长转换器(full-range wavelength converter)<sup>[14]</sup>。当节点具有波长转换能力并需要进行波长转换时,可将接收的信号或分叉后的信号输入到波长转换器进行波长转换。网络中任意两不同波长之间的转换延迟都一样,即  $t(v_i) \equiv t$ 。如果在某次组播会话中未在节点  $v_i$  处进行波长转换,则  $t(v_i) = 0$ 。

每一条链路  $e_{ij} = (v_i, v_j) \in E$  具有如下参数:

可用波长集:  $\Lambda(e_{ij}), \Lambda(e_{ji}) \subseteq \Lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_w\}$ ,  $\Lambda$  是每条边支持的波长集合,  $W = |\Lambda|$ ;

传输延迟:  $\delta(e_{ij}), \delta(e_{ji}) = \delta(e_{ij})$ ;

链路费用:  $c(e_{ij})$ 。

### 2.2 数学模型

在图  $G(V, E)$  中,定义一个组播请求为  $R(s, D, \Delta)$ 。其中,组播通信的源节点为  $s$ ,目的节点集合为  $D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ ,  $D \subset V$ 。设  $U = \{s\} \cup D$ 。定义  $\Delta$  为用户的端到端延迟需求区间。

构造  $s$  与  $D$  进行组播通信的一棵路由树  $T = (X, F)$ ,  $X \subseteq V, F \subseteq E$ 。

树  $T$  的费用定义为:  $Cost(T) = \sum_{e_{ij} \in F} c(e_{ij})$  (1)

IP/DWDM 光因特网中光路上的通信延迟由两部分构成:链路传输延迟和波长转换延迟。在树  $T$  中,给出源节点  $s$  与任一目的节点  $d_i$  的会话光路  $P(s, d_i)$  上的延迟  $D_{d_i}$ :

$$D_{d_i} = \left[ \sum_{v_j \in P(s, d_i)} t(v_j) + \sum_{e_{ij} \in P(s, d_i)} \delta(e_{ij}) \right] \quad (2)$$

树  $T$  的延迟定义为源节点到所有目的节点的最大延迟:  $Delay(T) = \max\{D_{d_i} | \forall d_i \in D\}$  (3)

设  $\Delta = [\Delta_{low}, \Delta_{high}]$ , 必须满足:

$$\Delta_{low} \geq \max\{delay(P_C(s, d_i)) | \forall d_i \in D\} \quad (4)$$

$delay(P_C(s, d_i))$  是在网络图  $G$  中从  $s$  到目的节点  $d_i$  的最小延迟。通过对  $\Delta$  的设定,可以适应柔性 QoS 需求。

用户 QoS 满意度定义为:

$$Degree(QoS) = \begin{cases} 100\% & Delay(T) \leq \Delta_{low} \\ \frac{\Delta_{high} - Delay(T)}{\Delta_{high} - \Delta_{low}} & \Delta_{low} < Delay(T) < \Delta_{high} \\ 0\% & Delay(T) \geq \Delta_{high} \end{cases} \quad (5)$$

为了有助于网络负载均衡及提高组播树的波长分配成功率,应该优先使用可用波长资源丰富的边。这可以通过对边上的费用函数进行合理定义来调节。例如,通过定义启发式费用函数,使可用波长资源丰富的边费用较小,反之则大。在算法中,链路上  $e_{ij}$  的费用定义为:

$$c(e_{ij}) = W - |\Lambda(e_{ij})| \quad (6)$$

## 3 算法设计

### 3.1 解的表达

采用二进制编码来表示解。用二进制串中的一位对应网络图中的一个节点,为1表示解  $S$  对应的网络图  $G'$  包含此节点,为0则不包含。对于本文要解决的问题,每一个解对应的都应该是一棵覆盖给定节点集  $U$  的树  $T_i(X_i, F_i)$ 。用图  $G'$  的最小生成树作为  $T_i$ 。

因为  $G'$  可能不连通,这种情况下  $G'$  的每一个子图都有一棵最小生成树,对应于解  $S$  的就是一个最小生成森林,也用  $T_i$  表示。

这样,每个解  $S$  对应一个图  $G'$ ,  $G'$  对应一个最小生成森林  $T_i$  (一棵最小生成树可以看成是只有一棵树的森林),再对  $T_i$  进行剪枝,就得到解  $S$  对应的森林  $T_i(X_i, V_i)$ 。

### 3.2 波长分配算法

如果  $T_i(X_i, V_i)$  只含一棵树,则进行波长分配,否则,不进行波长分配。构造的波长分配算法的目标是通过最小化波长转换次数使树  $T_i$  的延迟最小,使用户 QoS 满意度最高。

先对  $T_i$  构造波长图  $WG$ ,  $T_i$  上每条边的可用波长集  $\Lambda(e_{ij})$  是已知的。方法如下:

1)  $N = |X_i|, w = |\bigcup_{e_{ij} \in F_i} \Lambda(e_{ij})|$ , 在  $WG$  中,创建  $w * N$  个节点,即  $v_{ij}, i = 1, 2, \dots, w, j = 1, 2, \dots, N$ 。所有的节点被组织成一个  $w$  行  $N$  列的矩阵。行  $i$  表示  $T_i$  中一个相应的波长  $\lambda_i$ , 列  $j$  表示  $T_i$  中一个相应的节点  $v_j$ , 对  $i$  和  $\lambda_i$  的关系、 $j$  和  $v_j$  的关系分别建立映射表,以便于将来再还原到  $T_i$  中。

2) 对  $i = 1, 2, \dots, w$ , 在第  $i$  行,如果在  $T_i$  中,从节点  $v_j$  到节点  $v_k$  存在链路  $e'_{jk} = \{v_j, v_k\}$ , 且在这条链路上波长  $\lambda_i$  可用,则在波长图  $WG$  中,添加一条边  $(v_{ij}, v_{ik})$ , 并将  $e'_{jk}$  上的传输延迟  $\delta_{jk} = \delta(e'_{jk})$  作为权重分配给这条边。

3) 对  $j = 1, 2, \dots, N$ , 在第  $j$  列,如果节点  $v_j$  有波长转换能力,则对  $\forall i_1, i_2, i_1 \neq i_2$ , 在节点  $v_{i_1 j}$  和节点  $v_{i_2 j}$  之间添加一条边  $(v_{i_1 j}, v_{i_2 j})$ , 并将波长转换延迟  $t$  作为权重分配给这条边。

经过以上三步,波长图  $WG$  构造完毕。图1和图2是一个波长图构造示例。图1是生成树,节点3有波长转换能力。图2是为图1构造的波长图。波长以数字编号形式表示,图1中某条边旁的  $\{\dots\}$  表示该边上的可用波长集合。

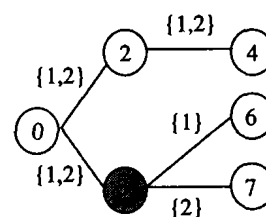


图1 路由树

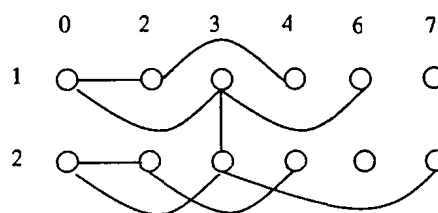


图2 波长图

为方便起见,将  $WG$  中的顶点用  $1 \sim w * N$  之间的顺序节

点号标记,  $i$  行  $j$  列的顺序节点号为:

$$x = (i-1) * N + j \quad (7)$$

将  $WG$  视同于一个普通网络拓扑图, 运行如下算法。

**输入** 波长图  $WG$ ,  $w$  行  $N$  列矩阵中源节点  $s$  和所有目的节点所在的列号  $j_1, j_2, j_3, \dots, j_m$ 。

**输出** 树中  $T_i$  的波长分配。

```

begin
for(k=1, k≤m, k++) //计算源节点 s 到每个目的节点的最短路
{
for(i=1, i≤w, i++) //计算波长平面 i 上的源节点到每个目的节点的最短路
{
 $x_i = (i-1) * N + j_i$ ; //计算波长平面 i 上的源节点号
for(j=1, j≤w, j++) //计算波长平面 i 上的源节点到某目的节点所在列不同波长平面上的目的节点的最短路
{
 $y_{jk} = (j-1) * N + j_{d_k}$ ; //计算位于 j 行,  $j_{d_k}$  列的目的节点号
运用 Dijkstra 算法在波长图中寻找节点  $x_i$  到节点  $y_{jk}$  的最短路径  $P(x_i, y_{jk})$ ;
}
 $P(x_i, y_{jk}) = \min\{P(x_i, y_{jk}), 1 \leq j \leq w\}$ ; //选出波长平面 i 上的源节点到目的节点  $d_k$  的最短路
}
 $P(x_i, y_{jk}) = \min\{P(x_i, y_{jk}), 1 \leq i \leq w\}$  //选出源节点 s 到目的节点  $d_k$  的最短路
}
end
    
```

对波长图中的顺序节点, 其对应原矩阵中的行号为:

$$i = (x-1)/N + 1 \quad (8)$$

列号为:

$$j = (x-1) \% N + 1 \quad (9)$$

用式(8)、(9)和步1中创建的两个映射表, 可以很方便地将波长图  $WG$  中由顺序节点号组成的光路还原为树  $T_i$  上的链路和波长, 从而完成了波长分配。

但是, 上述波长分配结果可能会出现同一链路上使用多个波长传输同一信息的情况, 造成波长浪费, 如图3所示的链路(0,3), 波长1、2被同时用来传输组播信息。对此, 采用如下方法解决: 在这条链路的所有邻接输出链路中, 选出可达目的节点端到端延迟最大的输出链路, 然后该链路上的波长选用该输出链路上的波长。这样, 由于波长转换增加的延迟就加到了原来端到端延迟较小的路径上, 从而对路由树的延迟影响较小。图3中, 假设目的节点7对应的端到端延迟比目的节点6大, 则(0,3)上选用波长2, (0,3)到(3,6)需要进行波长转换。

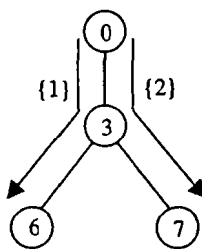


图3

该波长分配算法的时间复杂度为  $O(mN^2w')$ ,  $m$  是目的节点数,  $N$  是  $T_i$  中的节点数,  $w$  是至少在  $T_i$  的一条链路上可用的波长数。三者都是小整数。此外, 因为对除最终解以外的所有其它解的波长分配都是一种预分配策略, 目的是得到光路的端到端延迟, 所以算法运行时需要存储的数据较少, 对存储空间的要求较低。

### 3.3 适应函数

当运行 MPGSAA 搜索到一个解  $S$  (其对应的树为  $T_i$ ), 运行波长分配算法给  $T_i$  分配波长, 分配完以后,  $T_i$  的延迟就可确定,  $Degree(QoS)$  也相应确定。解  $S$  的适宜值由适应函数

$f$  计算得到, 它由其对应的树(森林)  $T_i(X_i, F_i)$  的费用  $Cost(T_i)$  和  $Degree(QoS)$  决定。对应多棵树的解显然是不可行的, 为了使之可行化, 将解费用加惩罚值, 同时将该解的  $Degree(QoS)$  取较小值。另外, 由于算法设计目标包括较好地满足用户  $QoS$  需求, 所以  $Degree(QoS)$  越高, 适宜值应该越低。适应函数如下:

$$f(S) = \frac{Cost(T_i) + [count(T_i) - 1] * \rho}{Degree(QoS)} = \frac{\sum_{e_j \in F_i} c(e_j) + [count(T_i) - 1] * \rho}{Degree(QoS)} \quad (10)$$

其中,  $count(T_i)$  为  $T_i$  中树的个数,  $\rho$  为常数,  $\rho > 0$ 。这样, 对于每个解, 通过该适应函数得到的适宜值越小, 则认为此解越好。

### 3.4 模拟退火初始温度的选择

采用方法如下:

$$t_0 = K\delta \quad (11)$$

其中,  $K$  是充分大的数,  $\delta = \max\{f(j) | j \in Sp\} - \min\{f(j) | j \in Sp\}$ ,  $Sp$  是解空间。对此问题, 可以简单地估计  $\delta$ :

$$\max\{f(j) | j \in Sp\} \leq C_{graph} \quad (C_{graph} \text{ 是当前整个网络图的费用值});$$

$$\min\{f(j) | j \in Sp\} \geq C_{usernodes} \quad (C_{usernodes} \text{ 是集合 } U \text{ 中所有节点的当前费用值之和});$$

$$\text{即: } \delta = C_{graph} - C_{usernodes} \quad (12)$$

由于采用了罚函数法, 加罚值之后有可能出现解的费用值高出  $C_{graph}$  的情况。为满足  $\max\{f(j) | j \in Sp\} \leq C_{graph}$ , 在计算费用值时, 将  $f(s) > C_{graph}$  的取  $f(s) = C_{graph}$ 。

### 3.5 算法描述

初始化控制参数, 包括: 子种群数  $M$ , 种群规模  $n_p$ , 预定义最大总演化代数  $MAX\_GN$ , 一次独立演化代数  $n_c$ , 子种群  $i$  的交叉概率  $\rho_c(i)$ , 子种群  $i$  的变异概率  $\rho_m(i)$ , 降温系数  $\alpha$ , 子种群  $i$  的退火初始温度  $t_0(i)$  ( $1 \leq i \leq M$ )。

1) 初始化  $M$  个随机子种群。设  $GN=0$ ,  $GN$  标记子种群已经历的演化代数。设  $k=0$ ,  $k$  标记降温次数。设  $f(Sop) = \infty$ ,  $Sop$  标记全局最优解。设  $Loop=0$ ,  $Loop$  是一个计数变量。

2) 如果  $Loop < n_c$ , 转步3, 否则, 转步5。

3) 对子种群  $i$  ( $1 \leq i \leq M$ ), 执行如下操作以产生一个后代子种群。

a) 评价每个染色体的适宜值  $f(S_j)$  ( $j=1, 2, \dots, n_p$ )。

b) 随机选择染色体  $S_j, S_k$  ( $j \neq k$ ), 产生随机数  $num \in [0, 1]$ 。如果  $num > \rho_c(i)$ , 则  $S_j, S_k$  被直接接受进后代子种群, 否则, 执行交叉操作产生两个新染色体  $S'_j, S'_k$ 。评价适宜值  $f(S'_j), f(S'_k)$ ,  $\Delta f' = f(S'_j) - f(S_j)$ 。如果  $\Delta f' < 0$ , 则  $S'_j$  被接受; 如果  $\Delta f' > 0$ , 则以概率  $\exp(-\Delta f' / t_0(i))$  将  $S'_j$  接受。对  $S_k$  以同样的方法决定是否接受进后代子种群。如果  $S'_j, S'_k$  不被接受, 则直接将  $S_j, S_k$  接受。重复这个过程  $n_p/2$  次, 得到后代子种群  $i'$ 。

c) 对  $i'$  中的每个染色体  $S_j$ : 产生一个随机数  $num \in [0, 1]$ , 如果  $num > \rho_m(i)$ ,  $S_j$  被接受进后代子种群, 否则, 执行变异操作以产生一个新的染色体  $S'_j$ 。使用 b) 中的方法来决定是否接受  $S'_j$ 。如果不接受, 则  $S_j$  被直接接受。这个操作完成以后, 标记后代子种群为子种群  $i$ 。

4)  $GN = GN + 1$ ,  $Loop = Loop + 1$ , 转步2。

5) 选出每个子种群中的最优染色体, 在这些染色体中再选出最优者, 标记为  $S$ 。用  $S$  替换每个子种群中的最差染色

体。如果  $f(S) < f(Sop)$ , 则  $Sop \leftarrow S$  (即将  $S$  作为新的当前最优解  $Sop$ )。

6) 如果  $GN = MAX\_GN$ , 算法停止, 否则, 修改每个子种群的退火温度, 即:  $t_{k+1}(i) = \alpha t_k(i)$  ( $k \geq 0, 0 < \alpha < 1, 1 < i < M$ )。  $k = k + 1, Loop = 0$ 。转步 2。

当算法停止的时候,  $Sop$  就是最终解。

#### 4 仿真研究与讨论

基于 NSFNET<sup>[15]</sup> 网络拓扑进行了仿真研究。仿真时, 边上的传输延迟在  $[1, 10]$  之间生成, 且跟边的长度成正比; 波长转换延迟设为链路平均延迟的一半。按节点度数由高到低的顺序, 选取前 50% 的节点配置波长转换器。每条链路可支持的最大波长数为 20, 可用波长数在 10 与 15 之间。  $\Delta_{low} = \max\{delay(P_C(s, d_i)) | 1 \leq i \leq m\} + ave\_conv * conv\_delay$ ,  $ave\_conv$  是网络中一条光路的平均波长转换次数, 设为网络直径的一半,  $conv\_delay$  是波长转换延迟。  $\Delta_{high} = 1.25 * \Delta_{low}$ 。种群规模在 20 与 30 之间取值, 交叉率在 0.85 与 0.95 之间取值, 变异率在 0.01 到 0.05 之间取值。遗传代数和基因选择率跟网络有关, 对于 NSFNET, 遗传代数在 20 与 25 之间取值, 基因选择率应该随着组播节点的增加而增加, 一般设为 0.5。降温系数  $\alpha = 0.80$ 。另外, 如果某些染色体的适宜值太大, 会屏蔽其它染色体之间的差异, 因此, 当某个染色体的  $Degree(QoS)$  小于一个较小正值或者其对应的解不可行时, 一律取此较小正值。

##### 4.1 组播树费用评估

为了评估算法在解费用方面的寻优能力, 将运行算法但不考虑用户 QoS 满意度时得到的组播树的费用与穷举法得到的最优费用进行对照, 如表 1。

表 1 组播树费用仿真结果

会话号	会话节点数占总节点数比率	最优组播树费用	$\leq 1\%$	$\leq 5\%$
1	21.43%	33	881	59
2	28.57%	39	870	0
3	35.71%	38	964	0
4	42.86%	48	803	0
5	50.00%	46	982	0
6	57.14%	50	965	15
7	64.29%	50	1000	0
8	71.43%	64	854	56
9	78.57%	69	1000	0
10	85.71%	73	1000	0

表 1 中  $\leq 1\%$  指求得的组播树费用与最优费用的差值 (即此组播树费用的偏差) 占最优费用的比率  $\leq 1\%$ ,  $\leq 5\%$  指差值占最优费用的比率  $> 1\%$  且  $\leq 5\%$ 。各个比率区间下面的值指求得的组播树的偏差比率介于此区间的算法运行次数。仿真实验中, 每个会话运行 1000 次, 得到 1000 个解。

从表 1 中看出, 算法求得组播树的费用质量精确度都非常高, 有些时候甚至达到最优, 算法的费用寻优能力很强。

##### 4.2 组播树 QoS 性能评估

本文定义了用户 QoS 满意度, 在评价染色体适宜值时考虑了染色体的 QoS 性能。选择染色体时兼顾费用和端到端最大延迟。为了评估组播树的 QoS 性能, 计算出运行 MPGSAA 但不考虑用户 QoS 满意度时得到的组播树的延迟, 将运行本文算法得到的组播树的延迟与其进行对比, 如图 4。从图 4 中可以看到, 相较于不考虑 QoS 的情况, 算法得到的组播树的延迟较小, 有效地改善了组播树的 QoS 性能。

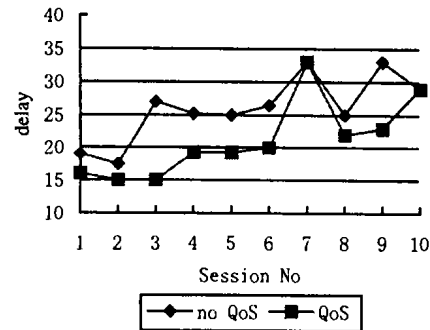


图 4 QoS 性能比较

**结论** 本文介绍了一种用于 IP/DWDM 光因特网的 QoS 组播路由算法。通过 MPGSAA 和启发式费用函数的设计, 使提出的算法能够在考虑网络负载均衡的前提下找到一棵费用次优甚至最优的组播树; 同时以最小化组播树延迟为目标进行波长分配, 使组播树具有较好的 QoS 性能。算法实现了路由选择和波长分配的一体化。仿真表明, 该算法较好地解决了 IP/DWDM 光因特网中的 QoS 组播路由问题。

#### 参考文献

- Green P. Progress in optical networking. IEEE Communication Magazine, 2001, 39(1): 54~61
- Ramaswami R, Sivarajan K N. Routing and wavelength assignment in all-optical networks. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1995, 3(5): 489~500
- Hartmut P. Development and engineering application of evolutionary algorithms: [PhD thesis]. Technical University Ilmenau, Germany, 1998
- Mendivil F, Shonkwiler R, Spruill M C. Restarting search algorithms with applications to simulated annealing. Advances in Applied Probability, 2000, 33(1): 242~259
- 吴浩扬, 常炳国, 朱长纯, 等. 基于模拟退火机制的多种群并行 GA. 软件学报, 2000, 11(3): 416~420
- Jia X H, Du D Z, Hu X D. Integrated algorithms for delay bounded multicast routing and wavelength assignment in all optical networks. Computer Communications, 2001, 24(14): 1390~1399
- Jia X H, Du D Z, Hu X D, et al. Optimization of wavelength assignment for QoS multicast in WDM networks. IEEE Transactions on Communications, 2001, 49(2): 341~350
- Chen B, Wang J P. Efficient routing and wavelength assignment for multicast in WDM networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002, 20(1): 97~109
- Znati T F, Alrabiah T, Melhem R. Low-cost, delay-bounded point-to-multipoint communication to support multicasting over WDM networks. Computer Networks, 2002, 38(4): 423~445
- Huang C H, Jia X H, Zhang Y B. A distributed routing and wavelength assignment algorithm for real-time multicast in WDM networks. Computer Communications, 2002, 25(17): 1527~1535
- Dean H L, Ariel O. QoS routing in networks with uncertain parameters. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1998, 6(6): 768~778
- Chlamtac I, Farago A, Zhang T. Lightpath(Wavelength) routing in large WDM networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1996, 14(5): 909~913
- 黄传河, 陈幸萌, 贾小华. WDM 全光网络中 Multicast 的寻径与波长分配算法. 计算机工程与应用, 2002, 38(15): 153~163
- Ding A J, Poo G S. A survey of optical multicast over WDM networks. Computer Communications, 2003, 26(2): 193~200
- National Science Foundation Network. NSFNet. <http://moat.nlanr.net/INFRA/NSFNET.html>