

IP/DWDM 光因特网中一种基于人工免疫算法的 QoS 组播路由算法^{*})

王兴伟¹ 陈明华¹ 程辉¹ 黄敏²

(东北大学计算中心 沈阳 110004)¹ (东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110004)²

摘要 本文提出了一种 IP/DWDM 光因特网中基于人工免疫算法的 QoS 组播路由算法,当 QoS 组播请求和需求区间给定时,能够找到一棵基于 QoS 的柔性费用近优组播路由树。该算法基于人工免疫算法构造 QoS 组播路由树,并基于波长图对树进行波长分配,将路由和波长分配集成到一个过程中,同时考虑了负载平衡。仿真结果表明,算法为 IP/DWDM 光因特网中的组播应用构造的 QoS 组播路由树是可行和有效的。

关键词 IP/DWDM 光因特网, QoS, 组播, 路由, 人工免疫算法

An Artificial-Immune-Algorithm-Based QoS Multicast Routing Algorithm in IP/DWDM Optical Internet

WANG Xing-Wei¹ CHEN Ming-Hua¹ CHENG Hui¹ HUANG Min²

(Computing Center, Northeastern University, Shenyang 110004)¹

(School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004)²

Abstract In this paper, an artificial-immune-algorithm-based QoS multicast routing algorithm in IP/DWDM optical Internet is proposed. Given a QoS multicast request and the delay interval required by the group, an algorithm is proposed, being able to find a flexible QoS-based cost near-optimal routing tree. The proposed algorithm constructs the multicast tree based on artificial immune algorithm, and assigns wavelengths to the tree based on the wavelength graph ideas. It integrates routing and wavelength assignment into one single process, and also considers load balancing. Simulation results have shown that it can construct a feasible and effective routing tree for group applications in IP/DWDM optical Internet.

Keywords IP/DWDM optical Internet, QoS, Multicast, Routing, Artificial immune algorithm

1 引言

IP/DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) 光因特网是下一代互联网的主要组网技术^[1]。支持服务质量 QoS(Quality of Service)和组播是下一代互联网所要具备的基本能力^[2,3]。因此,在 IP/DWDM 光因特网中支持 QoS 组播是非常必要的。这就需要进行有效的路由选择,找到费用优化的组播路由树,并为之分配波长。寻找这样一棵 QoS 组播路由树的问题是 NP 难问题^[4]。

近几年来,学术界对 IP/DWDM 光因特网中的 QoS 组播路由问题开展了研究,提出了多种算法^[5,6],但上述研究多是基于刚性 QoS 约束,即给出单一的延迟上界值。由于网络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,区间大小取决于用户和应用。

人工免疫算法 AIA(Artificial Immune Algorithm)是一种新型智能计算方法^[7],能有效解决组合优化问题。端到端延迟区间是一个重要的 QoS 参数,影响用户 QoS 满意度。本文提出一种算法,基于 AIA 构造费用近优 QoS 组播路由树,基于 Chlamtac 提出的波长图思想^[8]构造波长分配算法,最小化

波长转换次数和组播路由树的延迟,并将二者集成到一个过程中。这样,组播路由树的费用趋近于最优,同时兼顾用户 QoS 满意度。

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连通图 $G(V, E)$, 包括 $|V|$ 个节点和 $|E|$ 条边。其中, V 是节点(波长路由器或者 OXC)的集合, E 是边(光纤)的集合。

设每个光节点 $v_i \in V$ 都配置光分叉器,具有组播能力,能将一个输入光信号分叉成任意数目的输出信号。因此,在组播路由树中没有节点度限制。若节点的光分叉功能有限,则组播问题成为一个节点度受限的 Steiner 问题。

假设只有部分节点配置全域波长转换器,可将一个波长的光信号转换成其他任意波长。波长转换引入额外的处理和延迟,称之为波长转换延迟。假设任意两不同波长之间的转换延迟都一样,即 $t(V_i) \equiv t$; 若在某次组播会话中没有在节点 V_i 处进行波长转换,则 $t(V_i) \equiv 0$ 。

引入的光信号被光分叉器分叉后,如果需要且有可能,就在输出端口通过波长转换器进行波长转换。

^{*}) 国家自然科学基金项目(60473089, 60003006, 70101006); 国家高技术研究发展计划项目(2001AA121064); 辽宁省自然科学基金项目(20032018, 20032019); 教育部现代远程教育工程资助项目。王兴伟 博士,教授,主要研究领域为下一代互联网、IP/DWDM 光因特网及移动无线因特网。

每条链路 $e_{ij} = (V_i, V_j)$ 具有如下参数:

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

传输延迟: $\delta(e_{ij}) = \delta(e_{ji}), 1 \leq i, j \leq n$;

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, 组通信源节点为 s , 目的节点集合为 $D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$, $D \subseteq V$ 。设 $U = \{s\} \cup D$ 。定义 Δ 为端到端延迟需求区间。

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

树 T 的费用定义为:

$$Cost(T) = \sum_{e_{ij} \in F} C(e_{ij}) \quad (1)$$

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 的会话光路 $P(s, d)$ 上的延迟 $D(s, d)$:

$$D_{sd} = \sum_{v_i \in P(s, d)} t(v_i) + \sum_{e_{ij} \in P(s, d)} \delta(e_{ij}) \quad (2)$$

树 T 的延迟定义为源节点到所有目的节点的最大延迟:

$$Delay(T) = \text{Max}\{D_{sd} | \forall d_i \in D\} \quad (3)$$

设 $\Delta = [\Delta_{low}, \Delta_{high}]$, 若树 T 的延迟不大于 Δ_{low} , 则用户 100% 接受该 QoS; 若树 T 的延迟大于 Δ_{high} , 则用户 100% 拒绝该 QoS。定义用户 QoS 满意度如下:

$$Degree(QoS) = \begin{cases} 100\% & Delay(T) \leq \Delta_{low} \\ \frac{\Delta_{high} - Delay(T)}{\Delta_{high} - \Delta_{low}} & \Delta_{low} < Delay(T) < \Delta_{high} \\ 0\% & Delay(T) \geq \Delta_{high} \end{cases} \quad (4)$$

优化目标是尽可能减小组播路由树的费用。同时, 算法应优先使用可用波长资源丰富的边, 以降低拥塞率, 保证网络负载均衡。链路负载定义为链路上的光通道数, 它可以通过合理定义链路的费用函数来调节。费用函数定义如下:

$$C(e_{ij}) = W - |\Lambda(e_{ij})| \quad (5)$$

3 算法设计

3.1 解的表达

采用二进制编码表示解, 二进制串中的每一位分别对应网络中的一个节点。解 S 的长度是给定图 $G(V, E)$ 的节点数 $|V|$, 其对应图为 $G'(V', E')$ 。设 $bit(S, i)$ 为取解 S 第 i 个位置的值, 若 $bit(S, k) = 1$, 则 $v_k \in V'$, 否则 $v_k \notin V'$; 若 $v_m \in V', v_n \in V'$ 且 $(v_m, v_n) = e_{mn} \in E$, 则 $e_{mn} \in E'$ 。

每个解 S 对应一棵树 $T_i(X_i, F_i)$, 它是图 G' 的最小费用生成树, 覆盖给定节点集 U 。

用最小生成树作为解的对应树时, 如果树中存在不属于 U 的叶子节点, 则对这棵最小生成树进行剪枝操作, 删除这些节点及其邻接边。把剪枝后的树记为 $T_i(X_i, F_i)$ 。

不是所有解都对应一棵树, 因为解 S 对应的图 $G'(V', E')$ 可能不连通, 即解不可行。采用罚函数法和用户 QoS 满意度取较小值的方法, 将不可行解可行化。图 $G'(V', E')$ 的每个子图都对应一棵最小生成树, 对应于解 S 的就是一个最小生成森林, 也用 $T_i(X_i, F_i)$ 表示。与上面对一棵树的处理方法相同, 对该生成森林中的每一棵树也进行剪枝操作, 并记剪枝后的森林为 $T_i(X_i, F_i)$ 。

3.2 波长分配算法

若 $T_i(X_i, F_i)$ 只含一棵树, 则进行波长分配, 否则, 不

行波长分配。构造波长分配算法的目标是通过最小化波长转换次数使树 T 延迟最小, 使用户 QoS 满意度最高。算法基于波长图思想, 先对 T 构造波长图 WG , T 上每条边的可用波长集 $\Lambda(e_{ij})$ 是已知的。主要思想如下:

首先, 建立树 T 中节点与波长图中 WG 节点的对应关系。然后, 按如下原则在波长图中添加边: 若链路 $e'_{jk} = (v_j, v_k)$ 上的波长 λ 可用, 则在波长图中添加边 (v_j, v_k) , 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; 若节点 v_i 有波长转换功能, 则在节点 v_{i1} 和节点 v_{i2} 之间添加一条边 (v_{i1}, v_{i2}) , 并将波长转换延迟 t 作为权重分配给这条边。

$N = |X|, w = |\bigcup_{e_{ij} \in F} \Lambda(e_{ij})|$, 将 WG 中的顶点用 $1 \sim w \times N$ 之间的顺序节点号标记, 则 i 行 j 列的顺序节点号为:

$$x = (i-1) \times N + j \quad (6)$$

将 WG 视为一个普通网络拓扑图, 运用 Dijkstra 算法, 寻找源节点到目的节点列的最短路径, 进行波长分配。

波长图中的顺序节点号 x 对应原矩阵中的行号为:

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

列号为:

$$j = (x-1) \% N + 1 \quad (8)$$

利用式(7)、式(8)和前面建立的树 T 与波长图 WG 的对应关系, 可以很方便地将 WG 中由顺序节点号组成的光路还原为 T 上的链路和波长, 从而完成波长分配。详见文[9]。

但是, 上述波长分配结果可能会导致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。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, 从而对组播路由树的延迟影响较小。

3.3 适应函数

解 S 的适宜值由适应函数 f 计算得到, 它由对应的树(森林) $T_i(X_i, F_i)$ 的 $Cost(T_i)$ 和 $Degree(QoS)$ 决定。当给 T_i 分配完波长以后, T_i 的延迟就可确定, $Degree(QoS)$ 也相应确定。对应多棵树的解显然是不可行的, 为了使之可行化, 将解的费用加惩罚值, 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, 因此 $Degree(QoS)$ 越高, 适宜值应该越低。适应函数定义如下:

$$f(S) = \frac{Cost(T_i) + [count(T_i) - 1] \times \rho}{Degree(QoS)} \quad (9)$$

其中, $count(T_i)$ 为 T_i 中树的个数, ρ 为正常数。对于每个解 S , 通过该适应函数得到的适宜值越小, 则认为此解越好。

4 基于 AIA 的 QoS 组播路由算法设计

将免疫概念及理论应用于遗传算法 GA (Genetic Algorithm), 就形成了 AIA, 它利用待求问题中的一些特征信息或知识抑制 GA 在优化过程中出现的退化现象。已有的理论分析和对一些组合优化问题的仿真结果表明, AIA 不仅是有效和可行的, 而且较好地解决了 GA 中的退化问题。

4.1 AIA 模型

从本质上讲, AIA 可以看作是对 GA 的改进, 在合理提取疫苗基础上, 增加接种疫苗和免疫选择两个操作。前者是为了提高适宜值, 后者则是为了防止种群的退化。AIA 的基本过程为:

$$A_k \xrightarrow[\text{操作}]{\text{交叉}} B_k \xrightarrow[\text{操作}]{\text{变异}} C_k \xrightarrow[\text{疫苗}]{\text{接种}} D_k \xrightarrow[\text{选择}]{\text{免疫}} A_{k+1}$$

4.2 疫苗及接种

在图 $G(V, E)$ 中, 算法要找的是一棵组播路由树, 该树的网络费用应该尽可能小(即树中边上的可用波长资源应该尽可能丰富), 用户 QoS 满意度应该尽可能高(即树的延迟应该尽可能小)。构造的组播路由树应当覆盖集合 U 中所有节点(以下称会话节点), 这启发我们为这些节点找到最优的邻接边, 该邻接边的另一个端节点就是最优邻接节点。在二进制形式解中, 置所有会话节点的最优邻接节点对应位为 1, 置其余位为 0, 就得到疫苗。思想是希望各会话节点的最优邻接节点被包括在组播路由树中。这里, 最优邻接边指节点邻接边中边费用与延迟乘积最低的边。

抽取疫苗过程如下:

步骤 1: 初始化: 为疫苗设置一个全为 0 的二进制串 immune(即二进制形式解); 设 $temp$ 为足够大的正实数; 令集合 $Y=U$; 对任意 $v_i \in Y$, 令 Φ_i 为其邻接边的集合;

步骤 2: 若集合 Y 为空, 则算法结束; 否则, 任取 $v_i \in Y$, 令 $Y=Y-\{v_i\}$;

步骤 3: 若 v_i 的邻接边集合 Φ_i 为空, 则转步骤 5; 否则, 任取边 $e_{ij} \in \Phi_i$, 令 $\Phi_i = \Phi_i - \{e_{ij}\}$, 计算该边的 $C(e_{ij}) \times \delta(e_{ij})$ 值;

步骤 4: 若 $temp < C(e_{ij}) \times \delta(e_{ij})$, 则转步骤 3; 否则, 令 $temp = C(e_{ij}) \times \delta(e_{ij})$, 并标记该边所对应的另一个端节点号为 k , 转步骤 3;

步骤 5: 置 immune 中对应 k 的位为 1, 转步骤 2。

接种疫苗的过程就是将 GA 运行中得到的解与疫苗进行对比, 凡是在疫苗中对应位为 1 而在得到的解中对应位为 0 的一律重新置为 1。疫苗中置 1 的位所对应的节点都是相对于会话节点而言最优的邻接节点, 它们的加入有利于组播路由树选中相应的最优边, 通过最优边来传输信息。通过接种, 疫苗所隐含的有益信息就被接种到解中, 从而让解产生抗体。

4.3 退火机制

即使在接种疫苗后染色体的适宜值减小, 也不一定用生成的子代染色体替换对应的父代染色体, 而是进行退火操作, 以一定的概率接受该染色体。这样做是为了避免陷入局部最优。

算法中使用的退火函数如下:

$$T_0 = \ln((T_0)/k + 1) \quad (10)$$

其中, T_0 为初始温度, k 为 GA 的进化代数。

4.4 算法描述

步骤 1: 初始化: 令种群规模为 P , 最大进化代数为 N , 交叉概率为 p_c , 变异概率为 p_m , 将进化代数 i 清零。

步骤 2: 随机生成初始父代种群 A 。 A 中每个染色体对应一个解, 使用 3.2 节提到的波长分配算法对其进行波长预分配, 并计算解的 QoS 满意度, 得到每个染色体的适宜值。

步骤 3: 按照 4.2 节中的规则提取疫苗。

步骤 4: 进化代数 i 递增, 若 $i \leq N$, 则生成赌轮, 转步骤 4; 否则, 转步骤 9。

步骤 5: 使用赌轮法从 A 中选择染色体, 生成基因池, 池中染色体数目等于种群规模 P 。

步骤 6: 根据交叉概率 p_c 对基因池中的染色体进行交叉操作, 对未进行交叉操作的染色体直接复制, 得到种群 B ; 根据变异概率对 B 中染色体进行变异操作, 得到种群 C 。

步骤 7: 根据 4.2 节中描述的方法, 为种群 C 中染色体接

种疫苗, 得到种群 D 。

步骤 8: 对种群 D 中染色体进行如下选择操作, 得到种群 E :

a) 免疫检测: 若接种疫苗后染色体的适宜值增大, 则用对应父代染色体替换它;

b) 退火: 若接种疫苗后染色体适宜值减小, 则根据 4.3 节中描述的方法进行退火操作。

步骤 9: 计算子代种群 E 中每个染色体的适宜值, 用 E 代替父代种群 A , 转步骤 3。

步骤 10: 计算种群 A 中每个染色体的适宜值, 适宜值最小的染色体就是最终解。采用 3.2 节中波长分配算法进行波长分配, 得到最终的组播路由树。

5 仿真研究与讨论

基于某网络骨干拓扑^[10]进行了仿真研究。仿真分两部分: 对接种疫苗概率进行评价, 对最终得到的组播路由树费用和 QoS 性能进行评价。

5.1 接种疫苗概率性能评价

AIA 适宜值比 GA 适宜值优化百分比如图 1 所示。随着接种概率的增加, AIA 的运算结果也在逐步优化; 在接种概率达到 0.3~0.4 时, 算法的性能已经达到最优。此时, 继续增加接种概率, 只能降低算法运行效率, 而得不到更加优化的结果。

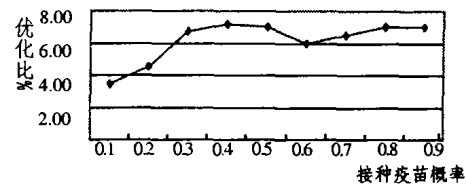


图 1 接种疫苗概率对算法性能的影响

5.2 费用和 QoS 性能评价

由于 AIA 可以看作是对 GA 的改进, 因此对两者的比较进行了定量的分析。得到组播路由树费用及延迟的仿真结果对比如表 1 所示。

表 1 不同算法下组播路由树费用及 QoS 性能仿真结果比较

序号	会话节点比例	费用	延迟
		AIA/GA	AIA/GA
1	10.81%	0.9614/1	0.7673/1
2	18.92%	0.9890/1	1.0413/1
3	27.78%	0.9815/1	0.8591/1
4	37.84%	1.0092/1	0.9903/1
5	48.64%	0.9967/1	0.9676/1
6	59.46%	1.0000/1	1.0414/1
7	72.97%	1.0000/1	1.0000/1

仿真结果表明, 采用 AIA 求解 QoS 组播路由问题得到的结果多数情况下比使用 GA 得到的结果优化; 但随着会话节点所占比例增加, 采用 AIA 所得解与采用 GA 所得解的值逐渐接近。这是因为随着会话节点的增加, 可选路径的数目逐渐减小, 使得解的优化可能也随之降低。个别情况下, AIA 的解甚至会不如 GA, 这是因为这两种算法都属于随机搜索算法, 解都有一定的随机性。当然, 因为 AIA 是在 GA 的基础上

(下转第 44 页)

图 11 到图 15 分别给出了反映各节点最优包服务率比例关系的饼图。从图 10 到图 15 可以看出各站的包服务率的比例和各站的包到达率的比例很相似。这说明在传感器网络设计时,一种简单可行的办法是将各个节点的服务率设置为其包到达率成正比,这样往往能获得更小的时延和丢包率,而且整网也能够节省能量。虽然这不是最优的设置方法,但在大多数情况下都能得到性能的改善。

4.3 实验结论

经过上述实验,我们可以得出下面的结论:

a)模型在各项参数发生变化时均能得到合理的结果并明显地减少了能量的消耗。

b)发现在一定的源节点包到达率的情况下,能量的消耗对时延要求而言,只在一定范围类受限于时延,当所要求的时延不在这一范围内时,可以不需重点考虑时延要求带来的问题。

c)发现在一定的源节点包到达率的情况下,能量的消耗对丢包率要求而言,只在一定范围类受限于丢包率要求,当所要求的丢包率要求不在这一范围内时,可以不需重点考虑丢包率要求带来的问题。

d)经观察发现,最优的节点服务率在大多数时延及丢包率要求下都近似和其包到达率成正比,这样在网络设计时可以通过设定包服务率与其包到达率成正比,来得到性能的改善。

结论 本文提出了一个优化模型,并利用该模型设计了一种集中式优化算法,该模型在保证整网传输时延和丢包率满足应用要求的前提下,最优地选取各节点的调制级数以最小化能量消耗延长网络的生命期。本模型综合考虑了节点能量,计算能力,带宽及存储量受限的情况下,因为排队而造成的时延及丢包的问题,采用排队论和优化理论对问题进行了建模。经实验表明本模型在各种情况下都能够明显地减少能量的消耗,并且发现:在一定的网络结构及各源节点的包到达率的情况下时延及丢包率要求对能耗的影响存在一个敏感区,只有当时延和丢包率要求处于敏感区内对能量消耗的影响才显著,模型能够确定这一区域;节点的最优服务率在大多

数情况下都和其包到达率近似成比例,这样在一般的传感器网络设计中可以设定各站的服务率与其到达率成正比来得到性能的改善。这些结论对传感器网络的设计都是很有意义的。

今后的研究工作将主要从下面几个方面入手:

a)考虑集中控制与分布式自治相结合的策略,进一步改进该模型,使其考虑各节点能够根据自身周围环境对其调制级数的调整问题,并分析其对整体性能的影响。

b)考虑有多个 sink 的情况。当有多个 sink 时,每个 sink 提出的信息收集任务的质量要求是不一样的,需要综合考虑不同质量要求的数据包流在各节点的调度问题。

c)分析并采用更多的节能技术来达到满足任务质量要求的前提下最小化能量消耗。

参考文献

- 1 Prabhakar B, Uysal-Biyikoglu E, Gamal A E. Energy-efficient Transmission over a Wireless Link via Lazy Packet Scheduling. In: Proc. of IEEE INFOCOM, Anchorage, Alaska, March 2001, 1: 386~394
- 2 Gamal A E, et al. Energy-efficient scheduling of packet transmissions over wireless networks. In: Proc. of IEEE INFOCOM, New York: USA, June 2002, 3: 1773~1782
- 3 Yu Y, Krishnamachari B, Prasanna V K. Energy-Latency Trade-offs for Data Gathering in Wireless Sensor Networks. to appear in IEEE INFOCOM 2004
- 4 Raghunathan V, et al. Energy-Aware Wireless Microsensor Networks. IEEE Signal Processing Magazine, 2002, 40~50
- 5 Foresti G L, Snidaro L. A distributed sensor network for video surveillance of outdoor environments. In: Intl. Conf. on Image Processing, (ICIP '02), New York, USA, September 2002, 1: 22~25
- 6 Krishnamachari B, Estrin D, Wicker S. The Impact of Data Aggregation in Wireless Sensor Networks. In: Intl. Workshop on Distributed Event-Based Systems, (DEBS '02), Vienna, Austria, July 2002. 575~578
- 7 Roy S, Wang H Y. Performance of CDMA slotted ALOHA multiple access with multiuser detection. In: Wireless Communication and Networking Conf. 1999, 2: 839~843
- 8 Takacs L. Introduction to the Theory of Queues. Oxford University Press, New York, 1962
- 9 Schurgers C, Aberborne O, Srivastava M. Modulation scaling for energy-aware communication systems. In: ISLPED, 2001. 96~99
- 10 for multicast in WDM Networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002, 20(1): 97~109
- 5 Aijun D, Gee-Swee P. A survey of optical multicast over WDM networks [J]. Computer Communications, 2003, 26(2): 193~200
- 6 Kuipers F, Miegheem P V. MAMCRA: a constrained-based multicast routing algorithm [J]. Computer Communications, 2002, 25(8): 802~811
- 7 王凌. 智能优化算法及其应用[M]. 清华大学出版社, 施普林格出版社, 2001
- 8 Chlamtac I, Farago A, Zs [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1996, 14(5): 909~913
- 9 王兴伟, 程辉, 李佳, 黄敏. 一种 IP/DWDM 光因特网中的组播路由算法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2003, 24(12): 1165~1168
- 10 程辉. IP/DWDM 光因特网中基于智能计算方法的 QoS 组播路由选择机制的研究与仿真实现[D]. 沈阳: 东北大学, 2004

(上接第 27 页)

改进得到的,所以 AIA 的解在整体上优于 GA。

结论 本文基于 AIA 和波长图思想,构造 QoS 组播路由算法,以支持 IP/DWDM 光因特网中的组应用。波长分配和构造组播路由树在同一过程中完成,既考虑了费用,又兼顾了端到端延迟。仿真结果表明,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

- 1 Hadrien L, Anes H, Klaus P. Analytical model for the performance evaluation of DWDM transmission systems [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(9): 1219~1221
- 2 Wittmann R, Zitterbart M. Multicast communication: protocols, programming, and applications [M]. San Francisco, CA: Morgan Kaufman, 2000
- 3 Xiao X P, Ni L M. Internet QoS: the big picture [J]. IEEE Network, 1999, 13(2): 1~13
- 4 Chen B, Wang J P. Efficient routing and wavelength assignment