

文章编号:1001-9081(2006)10-2272-03

一种基于不精确信息的智能 QoS 组播路由算法

王军伟^{1,2}, 王兴伟¹, 黄敏¹

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004; 2. 东北大学秦皇岛分校 自动化系, 河北 秦皇岛 066004)
(wjw0331@hotmail.com)

摘要:针对满足多个约束条件的服务质量(QoS)组播路由的特点,提出了一种下一代互联网中基于粒子群优化(PSO)和遗传算法(GA)的智能 QoS 组播路由算法。给出了 QoS 组播路由问题模型及其数学描述,针对 QoS 参数信息不精确的情况,综合 PSO 的快速搜索和 GA 的全局寻优能力,找出在给定费用下满足多个 QoS 约束概率最大的组播树的 Pareto 非劣集,从中选出最优组播树。对算法进行了仿真实验与性能评价,结果表明,它是可行和有效的。

关键词:QoS;组播路由;遗传算法;粒子群优化算法;Pareto 非劣集

中图分类号:TP393.07;TP393.04 **文献标识码:**A

Intelligent QoS multicast routing algorithm under inaccurate information

WANG Jun-wei^{1,2}, WANG Xing-wei¹, HUANG Min¹

(1. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110004, China;
2. Department of Automation, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao Hebei 066004, China)

Abstract: Taking the characteristics of multi-constrained Quality of Service(QoS) routing in next generation Internet into account, an intelligent multicast QoS routing algorithm based on Particle Swarm Optimization(PSO) and Genetic Algorithm(GA) was presented. The corresponding model and its mathematical description were introduced. Under inaccurate information of QoS parameters and combining fast searching ability of PSO and global optimization ability of GA, the proposed algorithm tries to find the Pareto no-dominated set with the maximum probability of meeting with multiple QoS constraints under the given cost, from which the best multicast tree was selected. Simulation research and performance evaluation show that the proposed algorithm is both feasible and effective.

Key words: Quality of Service(QoS); multicast routing; Genetic Algorithm(GA); Particle Swarm Optimization(PSO); Pareto no-dominated set

0 引言

多约束 QoS 组播路由问题是 NP 完全的^[1]。近年来,研究者对此类问题做了大量工作,提出了很多解决方法。文献[2]给出了一种延迟约束下的组播路由启发式算法,首先生成一棵最小延迟路径树,然后在不违背延迟约束的前提下,逐步用低费用链路代替高费用链路,由此得出优化路由。文献[3]首先设定链路和目的节点的 QoS 级别,把链路费用定义为 QoS 级别的线性函数,然后用启发式算法得到费用最小的组播树。文献[4]对网络组播服务提出了一种通用模型结构,设计了无环路径协议,并提出一种可扩展的分布式路径计算算法,具有和链路状态协议相同的性能且运行开销更小。文献[5]~文献[7]分别将遗传(Genetic Algorithm, GA)^[8]、蚁群和禁忌搜索等智能优化算法引入 QoS 组播树计算中,取得了较好结果。

上述路由算法多是基于精确 QoS 参数信息的,实际上,这些信息并非完全精确的。为此,本文设计了一种智能 QoS 组播路由算法,通过引入概率论知识适应 QoS 参数的不精

确,基于粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法^[9]和 GA 得到 Pareto 非劣解集,从中选出最优组播树。

1 问题模型

已知连通图 $G(V, E)$, V 是节点集, E 是边集。 $\forall v_i \in V$, 考虑如下参数:延迟、出错率和费用; $\forall e_{ij} \in E$, 考虑如下参数:可用带宽、延迟、出错率和费用, $i, j = 1, 2, 3, \dots, |V|$ 。简单起见,本文把节点参数归并到在路径上其下游边的参数中。这样, e_{ij} 上的参数变为:可用带宽 $b_{ij} \in [b_{ij_{\min}}, b_{ij_{\max}}]$ 、延迟 $d_{ij} \in [d_{ij_{\min}}, d_{ij_{\max}}]$ 、出错率 $l_{ij} \in [l_{ij_{\min}}, l_{ij_{\max}}]$ 和费用 $c(e_{ij})$ 。采用区间形式表示带宽、延迟与出错率是为了适应参数信息难以精确表达的需要。

现指定源节点 v_s , 目的节点集合 M , 寻找一棵组播路由树 $T(W, F)$, $M \subseteq W \subseteq V, F \subseteq E$, 在给定费用下,使之满足带宽、延迟和出错率需求的概率最大。

对在 $T(W, F)$ 上从 v_s 到 $v_m \in M(m = 1, 2, 3, \dots, |M|)$ 的路径 $r_T(s, m)$, 考虑如下参数:

收稿日期:2006-04-28;修订日期:2006-06-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60473089);国家发改委 CNGI 示范工程资助项目(CNGI-04-13-2T;CNGI-04-6-2T;CNGI-04-15-7A);新世纪优秀人才支持计划资助项目

作者简介:王军伟(1971-),男,河北丰宁人,讲师,博士研究生,主要研究方向:下一代互联网、QoS 路由算法;王兴伟(1968-),男,辽宁盖州人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向:下一代互联网、IP/DWDM 光因特网及移动因特网;黄敏(1968-),女,福建长乐人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向:企业风险管理、优化模型算法等。

1) 带宽

假定网络链路之间相互独立且 QoS 组播需求服从参数为 μ 的泊松分布^[10]。设 v_m 带宽需求为 $b_{m_{req}}$, 则 $r_T(s, m)$ 上任一 e_{ij} 满足之的概率为:

$$P_{ij}(b_{m_{req}}) = \begin{cases} 1 & b_{m_{req}} \leq b_{m_{min}} \\ \sum_{b \in [b_{ij_{min}}, b_{m_{req}}]} \frac{\mu^b e^{-\mu}}{b!} & b_{ij_{min}} < b_{m_{req}} < b_{ij_{max}} \\ \varepsilon & b_{m_{req}} = b_{ij_{max}} \\ 0 & b_{m_{req}} > b_{ij_{max}} \end{cases} \quad (1)$$

其中, ε 是一个远远小于 1 的正纯小数, 以适应临界值的需要。

$r_T(s, m)$ 满足 $b_{m_{req}}$ 的概率为:

$$P_m(b_{m_{req}}) = \prod_{e_{ij} \in r_T(s, m)} P_{ij}(b_{m_{req}}) \quad (2)$$

$T(W, F)$ 满足所有 v_m 的 $b_{m_{req}}$ 的概率为:

$$P_{Tb} = \prod_{m \in M} P_m(b_{m_{req}}) \quad (3)$$

2) 延迟

设 v_m 的延迟需求为 $d_{m_{req}}$, 令 $d_{m_{min}} = \sum_{e_{ij} \in r_T(s, m)} d_{ij_{min}}$ 和 $d_{m_{max}} = \sum_{e_{ij} \in r_T(s, m)} d_{ij_{max}}$ 分别表示 $r_T(s, m)$ 的最小和最大延迟。由于排队延迟等不确定性因素的存在而泊松分布仅适合对离散型随机变量概率分布的估计, 因此本文采用瑞利分布作为预测路径满足延迟需求概率的分布函数, 定义如下:

$$P_m(d_{m_{req}}) = \begin{cases} 0 & d_{m_{req}} < d_{m_{min}} \\ \varepsilon & d_{m_{req}} = d_{m_{min}} \\ \int_{d_{m_{min}}}^{d_{m_{req}}} \frac{2(x-d)}{\mu_1} e^{\frac{(x-d)^2}{\mu_1}} dx & d_{m_{min}} < d_{m_{req}} \leq d_{m_{max}} \\ 1 & d_{m_{req}} > d_{m_{max}} \end{cases} \quad (4)$$

其中, d 为取值概率最大的路径延迟, μ_1 表示路径延迟取值对 d 的偏离程度。

$T(W, F)$ 满足所有 v_m 的 $d_{m_{req}}$ 的概率为:

$$P_{Td} = \prod_{m \in M} P_m(d_{m_{req}}) \quad (5)$$

3) 出错率

设 v_m 的出错率需求为 $l_{m_{req}}$, 令 $l_{m_{min}} = 1 - \prod_{e_{ij} \in r_T(s, m)} (1 - l_{ij_{min}})$, $l_{m_{max}} = 1 - \prod_{e_{ij} \in r_T(s, m)} (1 - l_{ij_{max}})$ 分别表示 $r_T(s, m)$ 的最小和最大出错率, 则 $r_T(s, m)$ 满足 $l_{m_{req}}$ 的概率定义如下:

$$P_m(l_{m_{req}}) = \begin{cases} 0 & l_{m_{req}} < l_{m_{min}} \\ \varepsilon & l_{m_{req}} = l_{m_{min}} \\ \int_{l_{m_{min}}}^{l_{m_{req}}} \frac{2(x-l)}{\mu_2} e^{\frac{(x-l)^2}{\mu_2}} dx & l_{m_{min}} < l_{m_{req}} \leq l_{m_{max}} \\ 1 & l_{m_{req}} > l_{m_{max}} \end{cases} \quad (6)$$

其中, l 为概率最大的路径出错率值, μ_2 表示路径延迟对 l 的偏离程度。

$T(W, F)$ 满足所有 v_m 的 $l_{m_{req}}$ 的概率为:

$$P_{Tl} = \prod_{m \in M} P_m(l_{m_{req}}) \quad (7)$$

4) 组播树费用

为了促进网络负载均衡, 鼓励建树时使用轻载边。定义边的费用如下:

$$c(e_{ij}) = 1 - \frac{b_{ij}}{b_{ij_{max}}} \quad (8)$$

组播路由树费用 C_T 定义为:

$$C_T = \sum_{e_{ij} \in T(s, M)} c(e_{ij}) \quad (9)$$

本文算法的目标是在给定费用下使组播路由树满足带宽、延迟和出错率需求的概率最大。数学模型描述如下:

$$\max \{P_{Tb}\} \quad (10)$$

$$\max \{P_{Td}\} \quad (11)$$

$$\max \{P_{Tl}\} \quad (12)$$

$$\text{s. t. } C_T \leq c_{req} \quad (13)$$

其中, c_{req} 为愿付组播费用。

2 算法设计

2.1 Pareto 非劣集

上述描述的数学模型属于多目标优化, 与单目标优化的本质区别在于问题的解不是唯一的而存在一组非劣解, 称为 Pareto 非劣集^[11]。

定义 1 优劣性。向量 $U = (u_1, u_2, \dots, u_m)$ 优于向量 $V = (v_1, v_2, \dots, v_m)$ 当且仅当 $\forall i \in \{1, 2, \dots, m\} u_i \geq v_i$ 且 $\exists j \in \{1, 2, \dots, m\} u_j > v_j$ 。

定义 2 非劣性。对于向量 $U = (u_1, u_2, \dots, u_m)$ 和向量 $V = (v_1, v_2, \dots, v_m)$, 如果 $\exists i \in \{1, 2, \dots, m\} u_i > v_i$ 且 $\exists j \in \{1, 2, \dots, m\} u_j < v_j$, 则称向量 $U = (u_1, u_2, \dots, u_m)$ 和向量 $V = (v_1, v_2, \dots, v_m)$ 互为非劣。

定义 3 Pareto 非劣集。在多目标优化的解空间中, 由所有占优向量和非劣向量组成的可行解的集合, 称为 Pareto 非劣集。

定理 对有 N 个 QoS 参数约束的组播需求, 在其 Pareto 非劣集中组播路由树不超过 $2^N - 1$ 。

证明 考虑极端情况, 由 Pareto 非劣集的定义可知, N 个 QoS 参数约束中一个参数占优而其他参数为劣的可能性有 C_N^1 种, 有两个参数占优而其他参数为劣的可能性有 C_N^2 种, …… N 个参数全占优的可能性有 C_N^N 种, 由这些可能性构成的 Pareto 非劣集中元素的个数为 $C_N^1 + C_N^2 + \dots + C_N^N = 2^N - 1$ 。

证毕。

2.2 PSO 操作

定义 4 设 S 是一个非空队列, 从队列 S 到 S 的一个双射称为 S 的一个置换。

定义 5 对于一个有 n 个元素的队列 S , S 上所有 $n!$ 个不同置换的全体记作 S_n 。

定义 6 设 $\Psi_1, \Psi_2 \in S_n$, 定义 S_n 上的二元运算“ \oplus ”, 使得 $\Psi_1 \oplus \Psi_2$ 表示对 S 中的元素先应用 Ψ_1 再应用 Ψ_2 所得到的置换。

定义 7 定义 S_n 上的二元运算“ \otimes ”, 表示“ \oplus ”的逆运算。

粒子速度计算公式定义如下:

$$V_{id}(t+1) = w * V_{id}(t) \oplus c_1 * rand() * [P_{id}(t) \otimes X_{id}(t)] \oplus c_2 * rand() * [P_{gd}(t) \otimes X_{id}(t)] \quad (14)$$

其中 w, c_1, c_2 是反映权重的参数, 分别调节速度、粒子当前位置和它所经历最佳位置的偏差、粒子当前位置和整个粒子群所经历最佳位置的偏差的权重, $rand()$ 为随机数。

粒子移动的下一位置的计算公式定义如下:

$$X_{id}(t+1) = X_{id}(t) \oplus V_{id}(t) \quad (15)$$

从 v_s 到 v_m 的路径可以看作是序列 $(v_s, v_1, v_2, \dots, v_k, v_m)$, 节点的先后顺序表示其在路由上的前后接续关系。通过一系列置换, 可以形成从 v_s 到 v_m 的可行路径集 $Q_m = \{p_m^1, p_m^2, \dots, p_m^k\}$, p_m^j 表示从 v_s 到 v_m 的第 j 条可行路径。

2.3 GA 操作

从每个 Q_m 中随机选取 p_m^j 组成覆盖 v_s 和 M 的组播路由树 $T(W, F)$, 依次排列 j , 形成长度为 $|M|$ 的整数序列, 作为与 $T(W, F)$ 相对应的染色体编码。以每棵组播路由树所对应的 P_{Tb} 、 P_{Td} 和 P_{Ti} 为优化目标构成向量, 寻找其中的占优向量和非劣向量构成初始 Pareto 非劣集。依次以 P_{Tb} 、 P_{Td} 和 P_{Ti} 为适宜值按赌轮法选择, 采用单点交叉和随机变异。

2.4 算法描述

在 PSO 中, 粒子群规模设为 I , 迭代次数设为 N , 第 m 个组播目的节点的路径集设为 Q_m 。第 m 个组播目的节点, 第 i 个粒子在第 n 次迭代的位置、速度及其对应路径的满足带宽、延迟和出错率的概率分别用 X_{ni}^m 、 V_{ni}^m 、 $P_{ni}^m(b)$ 、 $P_{ni}^m(d)$ 和 $P_{ni}^m(l)$ 表示, 到第 n 次迭代时第 i 个粒子和整个粒子群经历过的最佳位置分别用 L_i^m 和 L_g^m 表示。在 GA 中, 种群规模设为 J , 进化代数设为 T , 第 j 条染色体及其在第 t 次进化的适应度分别设为 R_j 、 P_{Tb} 、 P_{Td} 和 P_{Ti} , 交叉率设为 P_c , 变异率设为 P_b , Pareto 非劣集设为 O 。

- 1) 初始化: $m = 1, i = 1, n = 0, Q_m = \Phi, j = 1, t = 0, O = \Phi$ 。
- 2) 随机生成 I 个粒子, 根据式(2)、(4)和(6)分别计算 $P_{ni}^m(b)$ 、 $P_{ni}^m(d)$ 和 $P_{ni}^m(l)$, 令 $P_{ni}^m = P_{ni}^m(b) \times P_{ni}^m(d) \times P_{ni}^m(l)$ 。
- 3) 令 $P_{ni}^m = X_{ni}^m, P_{gi}^m = \max\{P_{ni}^m\}$ 。
- 4) 令 $n = n + 1$ 。根据式(14)和式(15)分别计算 V_{ni}^m 和 X_{ni}^m 。
- 5) 判断 $Q_m \cap X_{ni}^m$ 是否为 Φ ; 若是, 则令 $Q_m = Q_m \cup X_{ni}^m$, 否则, 转 6)。
- 6) 计算 P_{ni}^m 。若 $P_{ni}^m > P_{gi}^m$, 则令 $L_i^m = X_{ni}^m$, 转 7), 否则, 转 8)。
- 7) 若 $P_{ni}^m > P_{gi}^m$, 则令 $L_g^m = X_{ni}^m$, 否则, 转 8)。
- 8) 令 $i = i + 1$ 。若 $i > I$, 则转 9), 否则, 转 4)。
- 9) 若 $n > N$, 则转 10), 否则, 转 4)。
- 10) 令 $m = m + 1$ 。若 $m > |M|$, 则转 11), 否则, 转 2)。
- 11) 产生 J 条染色体。
- 12) 令 $j = 0$, 根据式(3)、(5)和(7)分别计算每条染色体所对应组播路由树的 P_{Tb} 、 P_{Td} 和 P_{Ti} , 比较其 Pareto 优劣并更新 O 。
- 13) O 中组播路由树其对应染色体直接遗传到下一代, $j = j + |O|$ 。
- 14) 依次以 P_{Tb} 、 P_{Td} 和 P_{Ti} 为适宜值按赌轮法选取双亲 R_a 和 R_b 。
- 15) 若 $rand() < P_c$, R_a 和 R_b 交叉得两个子代染色体, 选取适应度大的个体并设为 R_j , 否则, 转 16)。
- 16) 若 $rand() < P_b$, 对 R_j 执行变异操作, 否则, 转 17)。
- 17) 令 $j = j + 1$ 。若 $j > J$, 则转 18), 否则, 转 14)。
- 18) 令 $t = t + 1$ 。若 $t < T$, 则 12), 否则, 转 19)。

19) 根据式(9)计算 O 中每棵组播路由树的 C_T , 若 $C_T < c_{req}$, 则保留, 否则, 从 O 中删除其所对应的组播路由树。

20) 若 $O \neq \Phi$, 则选择 O 中 $P_{Tb} \times P_{Td} \times P_{Ti}$ 值最大的组播路由树输出(若有多, 则任选其一), 成功, 算法结束; 否则, 失败, 算法结束。

3 仿真实现与结果

基于 NS2(Network Simulator 2)平台进行了仿真实验, 在多个实际与虚拟的网络拓扑(如 CERNET、CERNET2 和 NSFNET)上进行了性能测试, 仿真结果比较满意。仿真时, 设定 PSO 中初始粒子为 80 个, 粒子初始速度为 0, 迭代次数为 80; 设定 GA 中种群规模为 80, 交叉概率为 0.9, 变异概率为 0.05, 进化代数 80。

采用穷举法和本文算法找出给定费用下带宽、延迟和出错率满足概率最大的组播路由树, 对三者的比较结果分别如图 1~图 3 所示。可以看出, 本文算法的带宽满足概率、延迟满足概率、出错率满足概率很快收敛到最优值。

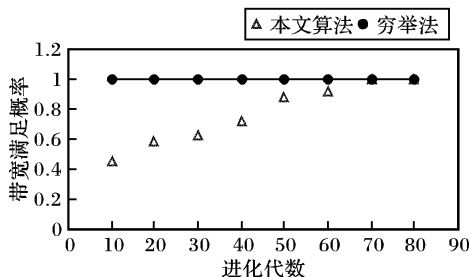


图 1 带宽满足概率

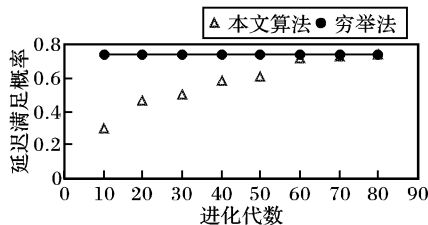


图 2 延迟满足概率

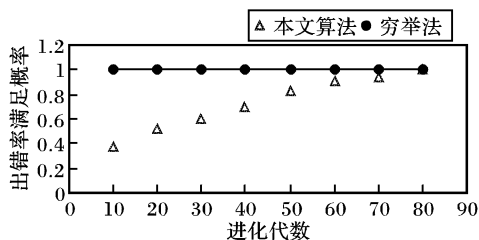


图 3 出错率满足概率

在运行本文算法得到的 Pareto 非劣集中包含最优解的比例如表 1 所示。

表 1 Pareto 非劣集中最优解包含比例

QoS 参数	最优解包含比例 (%)
带宽满足概率	97.32
延迟满足概率	96.58
出错率满足概率	99.24

4 结语

本文结合 PSO 算法的快速搜索以及 GA 算法的全局寻优能力, 设计了一种基于不精确信息的智能 QoS 组播路由算 (下转第 2277 页)

消除误差较大的测量样本。最后 pathrate 实现了内核级的时间戳记录。故相对而言,测量误差小。但背景流量负载较重时,其测量误差也不可忽视。90%的背景流量负载时,测量误差约为 15%。由图 2 可知,pathrate 有相对高些的测量准确性,但所有工具的测量误差随背景流量负载增大而增大。

4.2 测量一致性

各工具的测量一致性如图 3 所示。Pathchar 测量一致性较差,特别是背景流量较大时。Clink 和 pathrate 采取了自适应样本采集和过滤方法保证测量收敛,因此其一致性比 pathchar 有较大提高。由图 3 可知,所有工具的测量一致性随着背景流量的增大而降低。

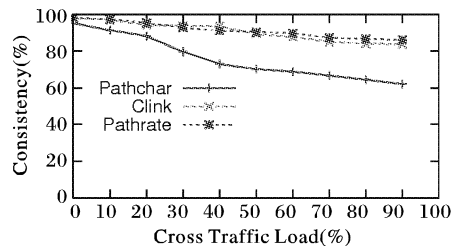


图 3 不同工具的测量一致性

4.3 探测量及测量持续时间

表 3 不同工具的测量探测量

测量工具	背景流量负载									
	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
pathchar (KB)	500.5	500.5	500.5	500.5	500.5	500.5	500.5	500.5	500.5	500.5
clink (KB)	266	266	266	266	266	266	266	266	266	266
pathrate (MB)	1.9	2.2	3.7	4.5	5.8	7.3	8.6	10.1	12.6	14.1

表 4 不同工具的测量持续时间 (min:sec)

测量工具	背景流量负载									
	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
pathchar	3:43	3:26	3:45	3:52	3:36	3:41	3:29	3:42	3:47	3:38
clink	4:23	4:10	4:02	4:34	4:08	4:12	4:21	4:05	4:14	4:27
pathrate	2:58	3:10	3:48	3:57	4:13	4:37	5:01	5:49	7:04	8:10

各工具的测量探测量和测量持续时间如表 3 和表 4 所示。Pathchar 和 clink 的测量探测量和测量持续时间由测量时的参数决定。我们选择在 50% 背景流量下测量最准确的参数完成其他背景流量负载条件下的测量实验,故表 3 和表 4 中,在不同背景流量下其测量探测量和测量持续时间基本

无变化。Pathrate 的测量探测量很大,且随背景流量增大而增长,其测量持续时间也有类似特征,这是因为 pathrate 需要发送很多探测包对和包链来过滤测量误差。总体而言,这几种工具都有较大的探测量开销和较长的测量时间。

5 结语

本文在对可控、可重复的负载条件下对多种路径容量测量工具性能进行了实验评估,发现: pathchar 较不准确,测量一致性也差; clink 测量一致性虽好,但不准确; pathrate 有较小的测量误差和较好的测量一致性,但其测量探测量和测量时间较多。在背景流量增大时,所有工具都出现较大的测量误差,同时测量一致性变差。如何增强路径容量测量工具对大背景流量的适应性是需要解决的问题。

参考文献:

- [1] 汤艳霞, 谢高岗, 雷震甲. 包交换网络带宽的测量技术[J]. 计算机工程, 2003, 29(17): 46-48.
- [2] DOWNEY AB. Using pathchar to estimate internet link characteristics[A]. Proceedings of ACM SIGCOMM'99[C]. New York: ACM Press, 1999, 241-250.
- [3] BRUCE AM. Pchar: a tool for measuring internet path characteristic [EB/OL]. <http://www.kitchenlab.org/www/bmah/Software/pchar/>, May 2006.
- [4] DOVROLIS C, RAMANATHAN P, MOORE D. Packet-dispersion techniques and a capacity-estimation methodology[J]. IEEE/ACM Transaction on Network, 2004, 12(6): 963-977.
- [5] CARTER R, CROVELLA M. Measuring bottleneck link speed in packet switched networks[J]. Performance Evaluation, 1996, 27(8): 297-318.
- [6] LAI K, BAKER M. Measuring link bandwidths using a deterministic model of packet delay[A]. Proceedings of ACM SIGCOMM'00[C]. Stockholm, Sweden: ACM Press, 2000, 283-294.
- [7] SOMMERS J, KIM H, BARFORD P. Harpoon: a flow-level traffic generator for router and network tests [A]. Proceedings of SIGMETRICS 2004[C]. New York: ACM Press, 2004, 392-392.
- [8] PRASAD RS, DOVROLIS C, MAH BA. The Effect of layer-2 store and forward devices on per-hop capacity estimation[A]. Proceedings of IEEE INFOCOM 2003[C]. San Francisco, CA: IEEE Press, 2003, 2090-2100.

(上接第 2274 页)

法,找出给定费用下带宽、延迟与延迟抖动满足概率最大的组播路由树。仿真结果表明,该算法是可行和有效的,具有较好的性能。

参考文献:

- [1] WANG Z, CROWCROFT J. Quality of service for supporting multimedia application [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communication, 1996, 14(7): 1228-1234.
- [2] SALAMA HF, REEVES DS. Evaluation of multicast routing algorithms for real-time communication on high-speed network [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1997, 15(3): 332-345.
- [3] CHARIKAR M, NAOR J, SCHIEBER B. Resource optimization in QoS multicast routing of real-time multimedia [J]. IEEE/ACM Transaction on Networking, 2004, 12(2): 340-348.
- [4] ZAPPALA D. Alternate path routing for multicast [J]. IEEE/ACM Transaction on Networking, 2004, 12(1): 30-43.
- [5] 郑彦兴, 田菁, 窦文华. 基于遗传算法的有矢量约束的多播路由计算 [J]. 计算机学报, 2003, 26(6): 746-752.

- [6] OH JS, BAE S, AHN J, et al. Routing reinforcement for efficient QoS routing based on ant algorithm[A]. Springer LNCS 3090[C]. 2004, 342-349.
- [7] JEON Y, KIM J. Application of simulated annealing and tabu search for loss minimization in distribution systems [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2004, 26(1): 9-18.
- [8] (日)玄光男,程润伟. 遗传算法与工程设计[M]. 汪定伟,唐加福,黄敏,译. 北京: 科学出版社, 2000: 46-59.
- [9] EAGELS PK, NOCOL VM. Recent approaches to global optimization problems through particle swarm optimization [J]. Natural Computing, 2002, 12(1): 235-306.
- [10] Tanenbaum AS. 计算机网络[M]. 第 4 版. 潘爱民,译. 北京: 清华大学出版社, 2004: 186-189.
- [11] SRINIVAS N, KALYANMOY D. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithm [J]. Journal of Evolutionary Computation, 1995, 2(3): 221-248.