

一种基于博弈论方法的模糊 QoS 单播路由机制

王兴伟 侯美佳 黄 敏 王 琦

(东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110004)

摘 要 下一代互联网 NGI(Next-Generation Internet)需要提供服务质量 QoS(Quality of Service)路由能力. 一方面,由于 NGI 网络状态难以精确测量与表达,因此 QoS 路由基于的信息应该是模糊的. 另一方面,随着网络运营的渐趋商业化,付费上网要求实现 QoS 计费,而网络提供方与用户的利益冲突要求实现双赢. 该文设计并仿真实现了一种基于博弈论方法的模糊 QoS 单播路由机制. 该机制由边评判、博弈分析和选路组成,通过适合隶属度函数对边做出模糊综合评判,通过博弈分析确定网络提供方与用户在边上的效用能否达到 Nash 均衡态,通过启发式选路算法使得在找到的路径上不仅用户的 QoS 需求得到满足而且双方的端到端效用达到或接近 Nash 均衡下的 Pareto 最优. 仿真结果表明,同基于 SPF(Shortest Path First)的单播路由机制和基于模糊塔的 QoS 单播路由机制相比,该机制具有较好的性能.

关键词 下一代互联网;服务质量;路由;博弈论;模糊

中图法分类号 TP393

A Game Theory Based Fuzzy Unicast QoS Routing Scheme

WANG Xing-Wei HOU Mei-Jia HUANG Min WANG Qi

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

Abstract QoS(Quality of Service) routing is essential in NGI(Next-Generation Internet). On one hand, due to the difficulty in exact measurement and expression of NGI network status, the necessary QoS routing information is fuzzy. On the other hand, with the gradual commercialization of network operation, paying for network usage calls for QoS pricing and accounting. However, the benefit conflicts between the network provider and the user ask the so-called both-win to be supported. Thus, in this paper, a game theory based fuzzy QoS unicast routing scheme is proposed and has been implemented by simulation. It consists of three parts: edge evaluation, gaming analysis, and route selection. It does fuzzy evaluation on the candidate edge comprehensively by introducing adaptability membership degree functions for edge parameters, determines whether the Nash equilibrium between the network provider utility and the user utility has been achieved on the candidate edge by gaming analysis, and attempts to make not only the user QoS requirements satisfied but also the Pareto-optimum under the Nash equilibrium on the network provider end-to-end utility and the user end-to-end utility achieved or approached along the found route by the proposed heuristic route selection algorithm. Simulation results have shown that the performance of the proposed scheme is better than its counterparts based on SPF(Shortest Path First) and fuzzy tower.

Keywords NGI; QoS; routing; game theory; fuzzy

收稿日期:2005-07-05;修改稿收到日期:2006-09-28. 本课题得到国家“八六三”高技术研究发展计划项目基金(2006AA01Z214)、国家自然科学基金(60673159)、新世纪优秀人才支持计划、高等学校博士学科点专项科研基金、辽宁省自然科学基金(20062022)和国家发改委 CNGI 示范工程项目(CNGI-04-13-2T, CNGI-04-6-2T 和 CNGI-04-15-7A)资助. 王兴伟,男,1968 年生,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为下一代互联网、移动无线 Internet 及 IP/DWDM 光 Internet 等. E-mail: wangxw@mail.neu.edu.cn. 侯美佳,女,1981 年生,硕士研究生,研究方向为下一代互联网中的单播和组播路由机制. 黄敏,女,1968 年生,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为智能算法设计与优化、调度理论与方法等. 王琦,男,1983 年生,硕士研究生,研究方向为下一代互联网中的单播和组播路由机制.

1 引言

近年来,随着 Internet、多媒体内容、移动通信技术等的发展与融合,下一代互联网 NGI(Next-Generation Internet)必然发展成为地面网与空天网、固定网与移动网等融合而成的一体化网络(如图 1 所示),支持任何地点、任何时间、使用任何类型信息在任何人或对象之间以固定或移动方式进行通信^[1-3]. 为了向用户提供端到端服务质量 QoS(Quality of Service)保证^[4-5],NGI 的各个组成部分都应当支持 QoS,无线与有线 QoS 应该无缝融合^[6],如图 2 所示. 由于 NGI 的大规模、异构、动态等特征,终端乃至网络移动的影响,拓扑聚集,信息传递不可避免的延迟及其不确定性,参数值的难以准确计量,特别是无线信道的不可靠与易受环境因素影响以及 NGI 某些组成部分(如某些私有或专用网络)内部信息的隐蔽等,都必然导致其状态难以精

确与完全表达. 另一方面,随着 Internet 运营的日趋商业化,付费上网客观上要求以质论价,实现 QoS 计费^[3,7-8]. 然而,网络提供方追求的是利润最大化,用户则希望花最少的费用获得最满意的服务,双方存在利益冲突,客观上要求实现双赢,研究如何从路由角度较好满足上述需求是一个亟待解决的问题^[7-8].

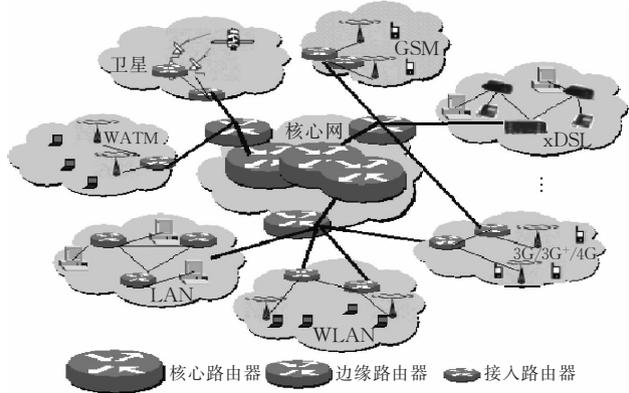


图 1 NGI 示意图

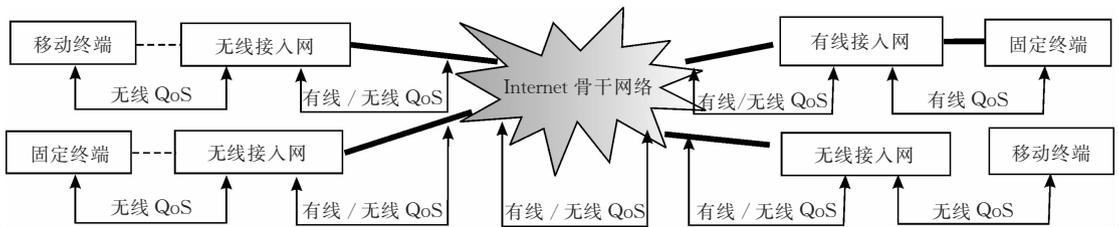


图 2 NGI 中端到端 QoS

目前已有许多算法用于解决 QoS 路由问题,大致可以分为以下几类:第 1 类基于最短路径算法,文献[9]提出了延迟受限单播路由算法,主要考虑链路延迟和代价两个因素,通过构造延迟和代价向量,完成路由计算;文献[10]首先在网络拓扑中剪掉带宽不满足要求的链路,然后以延迟为权使用最短路径算法计算满足带宽约束且具有最短延迟的路径;文献[11]在模糊塔基础上使用最短路径算法,不仅满足了用户 QoS 要求而且最大化了网络提供方收益. 第 2 类基于调度策略,把分组调度策略引入到路由度量值计算中,简化路由计算. 文献[12]在路由算法中融入加权公平排队,使得带宽、延迟、延迟抖动、分组丢失率等不再彼此独立;文献[13]基于概率论把代价和延迟等整合成一个综合参数,使问题得到简化. 第 3 类基于受限 QoS 度量,文献[14]提出了粒度受限启发式算法,限制最优路径数目,对于 α 约束问题,将 $(\alpha-1)$ 种度量映射到 $(\alpha-1)$ 个有限集,降低算法复杂度;文献[15]将 QoS 度量定义成跟路径有关的随机非负变量,分为敏感型和非敏感型两种,简

化路由寻优计算. 第 4 类基于智能优化算法,文献[16-18]分别将遗传、蚁群和模拟退火等优化算法用于 QoS 路由求解,寻找最优(近优)路由.

虽然在 QoS 路由方面已经开展了上述诸多研究,但是在路由过程中尚未充分考虑如何使网络提供方与用户效用同时得到优化,对网络状态模糊性也考虑得不够深入. 为此,本文设计并仿真实现了一种基于博弈论方法的模糊 QoS 单播路由机制,使得找到的路由即使不能使网络提供方和用户效用同时最大,也可以使得没有任何其他路由使双方效用不变小且至少有一方效用增大,从而使双方效用在路由上达到或尽可能接近 Nash 均衡下的 Pareto 最优^[19-20],支持双赢.

2 问题描述

网络模型表示为一连通图 $G(V, E)$, V 是节点集合, E 是边集合. 对任意节点 $v_j \in V (j=1, 2, 3, \dots, |V|)$, 考虑如下参数:延迟、延迟抖动和出错率. 对

$\forall v_j, v_k \in V$ 之间的边 $e_{jk} \in E(j, k = 1, 2, 3, \dots, |V|)$, 考虑如下参数: 可用带宽、延迟和出错率. 简单起见, 本算法把节点参数归并到在路径上其下游边的参数中. 这样, 边上的参数变为: 可用带宽 bw_{jk} 、延迟 del_{jk} 、延迟抖动 jt_{jk} 和出错率 ls_{jk} .

现指定源节点 $v_s \in V$, 目的节点 $v_t \in V$, 要求建立 v_s 与 v_t 之间的一条路径 p_{st} , 使在 p_{st} 上网络提供方端到端效用 TNU 和用户端到端效用 TUU 同时达到或者尽可能接近在 Nash 均衡下的 Pareto 最优, 且满足以下条件:

(A1) p_{st} 所经过边的可用带宽不小于 v_t 的带宽要求 bw_{req_t} ;

(A2) p_{st} 所经过边的总延迟不大于 v_t 的延迟要求 del_{req_t} ;

(A3) p_{st} 所经过边的总延迟抖动不大于 v_t 的延迟抖动要求 jt_{req_t} ;

(A4) p_{st} 所经过边的总出错率不大于 v_t 的出错率要求 ls_{req_t} .

数学模型描述如下:

$$TNU + TUU \rightarrow \max\{TNU + TUU\} \quad (1)$$

$$TNU \rightarrow \max\{TNU\} \quad (2)$$

$$TUU \rightarrow \max\{TUU\} \quad (3)$$

$$\text{s. t. } \min\{bw_{jk} | e_{jk} \in p_{st}\} \geq bw_{req_t} \quad (4)$$

$$\sum_{e_{jk} \in p_{st}} del_{jk} \leq del_{req_t} \quad (5)$$

$$\sum_{e_{jk} \in p_{st}} jt_{jk} \leq jt_{req_t} \quad (6)$$

$$1 - \prod_{e_{jk} \in p_{st}} (1 - ls_{jk}) \leq ls_{req_t} \quad (7)$$

其中, $TNU = \sum_{e_{jk} \in p_{st}} nu_{jk}$, $TUU = \sum_{e_{jk} \in p_{st}} uu_{jk}$, nu_{jk} 和 uu_{jk} 分别表示网络提供方和用户边在边 e_{jk} 上的效用.

上述问题是 NP 完全问题^[21], 本文采用启发式算法求解.

3 路由机制描述

本文设计的路由机制由边评判、博弈分析和选路三部分组成, 分别描述如下.

3.1 边评判

由于网络状态难以精确描述, 因此引入适合隶属度函数来描述边对用户 QoS 需求的适合程度.

边带宽适合隶属度函数 $g_1(bw, bw_{req_t})$ 定义如下:

$$g_1(bw, bw_{req_t}) = \begin{cases} 0, & bw_{jk} < bw_{req_t} \\ \left(\frac{bw_{jk} - bw_{req_t}}{b - bw_{req_t}}\right)^q + f_1(bw_{jk}, bw_{req_t}), & bw_{req_t} \leq bw_{jk} < b \\ 1, & bw_{jk} \geq b \end{cases} \quad (8)$$

其中,

$$f_1(bw_{jk}, bw_{req_t}) = \begin{cases} \epsilon, & bw_{jk} = bw_{req_t} \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

边延迟适合隶属度函数 $g_2(Jp, del_{jk}, del_{req_t})$ 定义如下:

$$g_2(Jp, del_{jk}, del_{req_t}) = \begin{cases} 0, & del_{jk} > del_{req_t} \\ 1 - e^{-\left(\frac{del_{req_t} - del_{jk}}{\sigma_1}\right)^2} + f_2(Jp, del_{jk}, del_{req_t}), & del_{jk} \leq del_{req_t} \end{cases} \quad (9)$$

其中,

$$f_2(Jp, del_{jk}, del_{req_t}) = \begin{cases} \epsilon, & Jp = 1 \wedge del_{jk} = del_{req_t} \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

边延迟抖动适合隶属度函数 $g_3(Jp, jt_{jk}, jt_{req_t})$ 定义如下:

$$g_3(Jp, jt_{jk}, jt_{req_t}) = \begin{cases} 0, & jt_{jk} > jt_{req_t} \\ 1 - e^{-\left(\frac{jt_{req_t} - jt_{jk}}{\sigma_2}\right)^2} + f_3(Jp, jt_{jk}, jt_{req_t}), & jt_{jk} \leq jt_{req_t} \end{cases} \quad (10)$$

其中,

$$f_3(Jp, jt_{jk}, jt_{req_t}) = \begin{cases} \epsilon, & Jp = 1 \wedge jt_{jk} = jt_{req_t} \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

边出错率适合隶属度函数 $g_4(Jp, ls_{jk}, ls_{req_t})$ 定义如下:

$$g_4(Jp, ls_{jk}, ls_{req_t}) = \begin{cases} 0, & ls_{jk} > ls_{req_t} \\ 1 - e^{-\left(\frac{ls_{req_t} - ls_{jk}}{\sigma_3}\right)^2} + f_4(Jp, ls_{jk}, ls_{req_t}), & ls_{jk} \leq ls_{req_t} \end{cases} \quad (11)$$

其中,

$$f_4(Jp, ls_{jk}, ls_{req_t}) = \begin{cases} \epsilon, & Jp = 1 \wedge ls_{jk} = ls_{req_t} \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

式(8)~(11)均属高斯型隶属度函数^[22-23], 具有光滑平稳的过渡特性. f_h ($h = 1, 2, 3, 4$) 为修正函数, 用来处理单跳路径的特殊情况; Jp 为一正整数, 表示端到端路径跳数; ϵ 是一个远小于 1 的正纯小数; bw, del, jt, ls 分别为边上的可用带宽、延迟、延迟抖

动、出错率; q, b, σ_1, σ_2 和 σ_3 均为正且 $q > 1$. 使用式 (8)~(11) 得到对边的评判矩阵 $\mathbf{R} = (g_1, g_2, g_3, g_4)^T$. 根据应用属性, 给出权值矩阵 $\mathbf{W} = (\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4)$, $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 和 ω_4 分别为代表带宽、延迟、延迟抖动和出错率在用户 QoS 需求中相对重要性的权值, $0 < \omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4 < 1$ 且 $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 = 1$, 则用户就其 QoS 需求而言对边的综合评判值 ω 为

$$\omega = \mathbf{W} \cdot \mathbf{R} \quad (12)$$

ω 越大, 说明边越适合用户的 QoS 需求.

3.2 博弈分析

使用二人博弈, 局中人是网络提供方和用户. 网络提供方有两种策略 s_1 和 s_2 , 分别表示愿意和不愿意把当前边提供给用户. 用户有两种策略 t_1 和 t_2 , 分别表示愿意和不愿意选择当前边. 设网络提供方和用户效用矩阵分别为

$$\mathbf{NM} = \begin{bmatrix} pn_{11} & pn_{12} \\ pn_{21} & pn_{22} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{UM} = \begin{bmatrix} pu_{11} & pu_{12} \\ pu_{21} & pu_{22} \end{bmatrix} \quad (14)$$

\mathbf{NM}, \mathbf{UM} 中的上下两个行向量分别对应于网络提供方的策略 s_1 和 s_2 , 左右两个列向量分别对应于用户的策略 t_1 和 t_2 . \mathbf{NM} 的元素 pn_{mn} ($m, n = 1, 2$) 表示网络提供方选择策略 s_m 与用户选择策略 t_n 时网络提供方在边上的相对效用 (详后), \mathbf{UM} 的元素 pu_{mn} ($m, n = 1, 2$) 表示网络提供方选择策略 s_m 与用户选择策略 t_n 时用户在边上的相对效用 (详后).

根据 3.1 节, 得到边的综合评判值 ω . 设经验评判值 ω_0 , 如果 $\omega > \omega_0$, 则认为当前边的状况超过用户期望; 如果 $\omega = \omega_0$, 则认为当前边的状况符合用户期望; 如果 $\omega < \omega_0$, 则认为当前边的状况低于用户期望. 由此, 给出网络提供方和用户效用矩阵的具体取值.

$$\mathbf{NM} = \begin{bmatrix} \frac{(uct \frac{\omega}{\omega_0} - uct)}{bw_req}, & \frac{(uct \frac{\omega}{\omega_0} - uct)}{bw_req} \\ -\mu \frac{(uct \frac{\omega}{\omega_0} - uct)}{bw_req}, & -\frac{(uct \frac{\omega}{\omega_0} - uct)}{bw_req} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$\mathbf{UM} =$

$$\begin{bmatrix} \frac{(bw_req \frac{\omega}{\omega_0} - bw_req)}{uct}, & -\mu \frac{(bw_req \frac{\omega}{\omega_0} - bw_req)}{uct} \\ \frac{(bw_req \frac{\omega}{\omega_0} - bw_req)}{uct}, & -\frac{(bw_req \frac{\omega}{\omega_0} - bw_req)}{uct} \end{bmatrix} \quad (16)$$

在式 (15) 和 (16) 中, uct 表示用户因使用该边而需向网络提供方支付的费用. 在 \mathbf{NM} 中, $uct \frac{\omega}{\omega_0} / bw_req$ 表示网络提供方实际所得效用, uct / bw_req 表示依理论计算网络提供方所得效用, 二者之差作为网络提供方的相对效用, 表示网络提供方所得效用是否超出预期及其程度. pn_{21} 和 pn_{22} 之所以添加负号是因为如果网络提供方拒绝用户的请求, 则会失去将要获得的效用. μ 是一个惩罚因子^[17], 表示拒绝愿意使用该网络提供方提供带宽的用户会对用户今后是否愿意使用该网络提供方的带宽造成很大的负面影响, 取大于 1 的值. 同样, 在 \mathbf{UM} 中, $bw_req \frac{\omega}{\omega_0} / uct$ 表示用户实际所得效用, bw_req / uct 表示依理论计算用户所得效用, 二者之差作为用户的相对效用, 表示用户所得效用是否超出预期及其程度. \mathbf{UM} 中负号和 μ 的含义与 \mathbf{NM} 中的类似. 显然, 在 \mathbf{NM} 和 \mathbf{UM} 中, 如果 pn_{mn} 或 pu_{mn} 为负值, 则表示网络提供方和 (或) 用户不满意相应的策略对. 如果下列不等式^[20] 满足

$$\begin{cases} pn_{m^*n^*} \geq pn_{mn^*} \\ pu_{m^*n^*} \geq pu_{m^*n} \end{cases}, \quad m, n = 1, 2 \quad (17)$$

其中, m^*, n^* 代表某一 m, n , 策略对 $\{s_m^*, t_n^*\}$ 为一个非合作纯策略即 Nash 均衡解. 在本算法中, s_m^* 代表 s_1, s_2 , t_n^* 代表 t_1, t_2 . 根据式 (17) 解出对应的 pn_{mn} 和 pu_{mn} , 则相应的策略对 $\{s_m^*, t_n^*\}$ 为所求的 Nash 均衡解^[20].

3.3 选路

(1) 启发式费用

通过边评判与博弈分析, 对边 e_{jk} 得到博弈结果, 将其转换成一权值, 用 Ω_{jk} 表示, 其定义如下:

$$\Omega_{jk} = \begin{cases} 1, & \text{Nash 均衡态} \\ > 1, & \text{非 Nash 均衡态} \end{cases} \quad (18)$$

边 e_{jk} 的启发式费用 $T_{f_{jk}}(\Omega_{jk}, nu_{jk}, uu_{jk})$ 定义如下:

$$T_{f_{jk}}(\Omega_{jk}, nu_{jk}, uu_{jk}) = \Omega_{jk} \left(q_1 \frac{1}{nu_{jk}} + q_2 \frac{1}{uu_{jk}} \right) \quad (19)$$

在式 (19) 中, Ω_{jk} 反映是否达到 Nash 均衡态对选路的影响; q_1 和 q_2 分别为网络提供方倾斜权值和用户倾斜权值, 反映选路时是否向网络提供方或用户效用倾斜以及倾斜程度. nu_{jk} 和 uu_{jk} 分别为网络提供方和用户边 e_{jk} 上的实际所得效用.

算法的目标是使路径上各边启发式费用之和最

小,即

$$\min \left\{ \sum_{e_{jk} \in P_{st}} T_{f_{jk}}(\Omega_{jk}, nu_{jk}, uu_{jk}) \right\} \quad (20)$$

显然,路径上各边启发式费用之和越小,越接近在 Nash 均衡下的 Pareto 最优。

(2) 路由算法

源节点和目的节点分别为 v_s 和 v_t . 令 pc 和 Tc 分别表示节点 v 的 pc 标号和 Tc 标号, $pc(v)$ 表示在满足约束条件下从 v_s 到该节点的最小启发式费用, $Tc(v)$ 表示从 v_s 到该节点的最小启发式费用上限. S_i 表示第 i 步时具有 pc 标号的点的集合. 为了在求出从 v_s 到各节点的最小费用和的同时也求出从 v_s 到各节点的最小费用路径,给每个节点 v 一个 λ 值. 在算法中止时,如果 $\lambda(v) = m$,则表示从 v_s 到 v 的最小费用路径上 v 的前一个节点为 v_m ; 如果 $\lambda(v) = m'$,则表示 G 中不存在从 v_s 到 v 满足约束条件的路径; 如果 $\lambda(v) = 0$,则表示 $v = v_s$. λ 的分配过程见步 2 的第二标号条件的(6),即当第一标号和第二标号条件都满足时,被考察的点的 λ 值被标为最小使用费用路径上引向该点的那个节点的编号. 另外, $\min bw(v_j)$ 为 v_s 到 v_j 的瓶颈带宽值, $del(v_j)$ 为 v_s 到 v_j 的总延迟, $jt(v_j)$ 为 v_s 到 v_j 的总延迟抖动, $ls(v_j)$ 为 v_s 到 v_j 的总出错率. $T_{f_{kj}}$, bw_{kj} , del_{kj} , jt_{kj} , ls_{kj} 分别表示边 e_{kj} 上的费用、可用带宽、延迟、延迟抖动和出错率。

基于文献[21]中的算法,设计如下路由算法:

1. 初始化: 开始($i=0$)令 $S_0 = \{v_s\}$, $\lambda(v_s) = 0$. 对每一个 $v \neq v_s$, 令 $Tc(v) = +\infty$, $\lambda(v) = m'$, 令 $k = s$.

- (1) $pc(v_k) = 0$;
- (2) $\min bw(v_k) = +\infty$;
- (3) $del(v_k) = 0$;
- (4) $jt(v_k) = 0$;
- (5) $ls(v_k) = 0$;

2. 标号过程

考察每一个 $e_{kj} \in E$ 且 $v_j \in S_i$ 的节点 v_j , 根据式(8)~(19)计算 $T_{f_{kj}}$ 的值.

第一标号条件: 为满足式(20)的要求, 如果 $Tc(v_j) > pc(v_k) + T_{f_{kj}}$, 则计算指标

- (1) $pc'(v_j) = pc(v_k) + T_{f_{kj}}$;
- (2) $\min bw'(v_j) = \min\{\min bw(v_k), bw_{kj}\}$;
- (3) $del'(v_j) = del(v_k) + del_{kj}$;
- (4) $jt'(v_j) = jt(v_k) + jt_{kj}$;
- (5) $ls'(v_j) = 1 - (1 - ls(v_k))(1 - ls_{kj})$;

第二标号条件: 根据式(4)~(7), 如果

- (1) $\min bw'(v_j) \geq bw_{req_i}$;
- (2) $del'(v_j) \leq del_{req_i}$;

$$(3) jt'(v_j) \leq jt_{req_i};$$

$$(4) ls'(v_j) \leq ls_{req_i};$$

则令

- (1) $Tc(v_j) = pc'(v_j)$;
- (2) $\min bw(v_j) = \min bw'(v_j)$;
- (3) $del(v_j) = del'(v_j)$;
- (4) $jt(v_j) = jt'(v_j)$;
- (5) $ls(v_j) = ls'(v_j)$;
- (6) $\lambda(v_j) = k$;

转步 3; 否则, 与用户协商: 成功, 则转步 3; 失败, 则算法结束.

3. 修改过程

为满足式(20)的要求, 令 $H_1 = \{v_{j_i} \mid \min_{v_{j_i} \in S_i} \{Tc(v_{j_i})\}\}$,

对任意 $v_{j_i} \in H_1$, 如果 $Tc(v_{j_i}) < +\infty$, 则转步 3.1; 否则, 无可行解, 与用户协商: 成功, 则转步 3.6; 失败, 则算法结束.

3.1. 如果 $|H_1| = 1$, 则取 $v_{j_i} \in H_1$, 转步 3.6; 否则, 转步 3.2.

3.2. 令 $H_2 = \{v_{j_i} \mid \max_{v_{j_i} \in H_1} \{\min bw(v_{j_i}) - bw_{req_i}\}\}$, 如果 $|H_2| = 1$, 则取 $v_{j_i} \in H_2$, 转步 3.6; 否则, 转步 3.3.

3.3. 令 $H_3 = \{v_{j_i} \mid \max_{v_{j_i} \in H_2} \{del_{req_i} - del(v_{j_i})\}\}$, 如果 $|H_3| = 1$, 则取 $v_{j_i} \in H_3$, 转步 3.6; 否则, 转步 3.4.

3.4. 令 $H_4 = \{v_{j_i} \mid \max_{v_{j_i} \in H_3} \{jt_{req_i} - jt(v_{j_i})\}\}$, 如果 $|H_4| = 1$, 则取 $v_{j_i} \in H_4$, 转步 3.6; 否则, 转步 3.5.

3.5. 令 $H_5 = \{v_{j_i} \mid \min_{v_{j_i} \in H_4} \{ls(v_{j_i})\}\}$, 如果 $|H_5| = 1$, 则取 $v_{j_i} \in H_5$, 转步 3.6; 否则, 取任意的 $v_{j_i} \in H_5$, 转步 3.6.

3.6. 将 v_{j_i} 的 Tc 标号变为 pc 标号, 即令 $pc(v_{j_i}) = Tc(v_{j_i})$, 令 $S_{i+1} = S_i \cup \{v_{j_i}\}$, $k = j_i$, $i = i + 1$, 如果 $k = t$, 则输出各项指标, 算法结束; 否则, 转步 2.

本文算法的计算复杂度同其基于的文献[21]中的算法一致, 因此计算复杂度也是 $O(n^2)$, n 为图上节点个数.

(3) 算法正确性证明

只要证明对于每一节点 $v \in S_i$, $pc(v)$ 是在满足约束条件下从 v_s 到 v 的最小启发式费用和, 即当 $v = v_t$ 时, $pc(v_t)$ 是在满足约束条件下从 v_s 到 v_t 的最小启发式费用和, 从而在找到的路径上网络提供方与用户效用达到或者尽可能接近在 Nash 均衡下的 Pareto 最优.

证明. 对 i 进行归纳

① $i=0$ 时, 结论显然成立.

② 假设 $i=n$ 时, 结论成立, 即对每一个 $v \in S_n$, $pc(v)$ 是在满足约束条件下从 v_s 到 v 的最小启发式费用和.

③ 考察 $i=n+1$, 因 $S_{n+1} = S_n \cup \{v_{j_n}\}$, 故只要证明 $pc(v_{j_n})$ 是在满足约束条件下从 v_s 到 v_{j_n} 的最小启

发式费用和. 根据本文算法, v_{j_n} 是此时满足约束且具有最小 Tc 标号的节点, 即

$$v_{j_n} \in H_1, H_1 = \{v_{j_n} \mid \min_{v_{j_n} \in S_n} \{Tc_n(v_{j_n})\}\}.$$

为清晰起见, 用 $Tc_n(v)$ 表示当 $i=n$ 执行步 3 时 v 的 Tc 标号. 假设 $p_{s_{j_n}}$ 是 G 中任一条满足约束条件下连接 v_s 到 v_{j_n} 的路径, 因 $v_s \in S_n$ 而 $v_{j_n} \notin S_n$, 则从 v_s 出发沿 $p_{s_{j_n}}$ 必存在一条边, 该边的一个端点属于 S_n 而另一个端点不属于 S_n . 假设 e_{rl} 是第一条这样的边, 对 $p_{s_{j_n}} = (v_s, \dots, v_r, v_l, \dots, v_{j_n})$, 令 $K(p_{s_{j_n}})$ 是其上启发式费用总和, 则

$$K(p_{s_{j_n}}) = K((v_s, \dots, v_r)) + T_{f_{rl}} + K((v_l, \dots, v_{j_n})).$$

由归纳假设, $p_c(v_r)$ 是从 v_s 到 v_r 满足约束条件下的最小启发式费用和, 于是,

$$K(p_{s_{j_n}}) \geq p_c(v_r) + T_{f_{rl}} + K((v_l, \dots, v_{j_n})).$$

根据方法中 Tc 标号的修改规则, 且因 $v_r \in S_n$, $v_l \notin S_n$, 所以, $p_c(v_r) + T_{f_{rl}} \geq Tc_n(v_l)$, 而 $Tc_n(v_l) \geq Tc_n(v_{j_n})$ 且 $K((v_l, \dots, v_{j_n})) \geq 0$, 故

$$K(p_{s_{j_n}}) \geq Tc_n(v_l) + K((v_l, \dots, v_{j_n})) \geq Tc_n(v_{j_n}).$$

这就证明了 $Tc_n(v_{j_n})$ 是在满足约束条件下从 v_s 到 v_{j_n} 最小的启发式费用和. 算法步 3 中令 $p_c(v_{j_n}) = Tc(v_{j_n})$, 即 $p_c(v_{j_n})$ 是在满足约束条件下从 v_s 到 v_{j_n} 的最小启发式费用和, 当 $j_n = t$ 时, $p_c(v_t)$ 就是在满足约束条件下从 v_s 到 v_t 的最小启发式费用和.

证毕.

此算法具有如下性质.

性质 1. 在求得满足约束条件下从 v_s 到 v_t 的最小启发式费用和的同时, 也求得了在满足同一约束条件下从 v_s 到所有 p_c 标号点的最小启发式费用和.

该性质易从算法证明中得出. 据此, 当网络上满足约束条件下从 v_s 到 v_t 的最小启发式费用路径上的目的节点 v_j 提出参与与 v_s 的通信时, 如果 v_j 对 QoS 指标的要求均在 v_t 对 QoS 要求的约束范围之内, 即

$$bw_req_j \leq bw_req_t;$$

$$del_req_j \geq del_req_t;$$

$$jt_req_j \geq jt_req_t;$$

$$ls_req_j \geq ls_req_t;$$

则可直接接纳之.

性质 2. 在保证约束条件下, 此算法在求得从 v_s 到 v_t 最小启发式费用路径的同时, 尽可能使求得路径的各项指标趋于最优.

该性质可由算法的步 3.1~步 3.5 容易得知. 它使算法求得的解具有较好的性能.

4 性能评价

基于 NS2 (Network Simulator 2)^[24] 仿真实现了上述路由机制, 仿真表明主要参数取如下值时性能更好^[25]: $\epsilon = 0.0005$, $q = 3$, $b = 1.5 \times bw_req_t$, $\sigma_1 = del_req_t/3$, $\sigma_2 = jt_req_t/3$, $\sigma_3 = ls_req_t/3$, $\omega_0 = 0.6$, $\mu = 1.5$, 非 Nash 均衡态时 $\Omega_{jk} = 1.5$. 此外, 简单起见, 在仿真时, $q_1 = 1$, $q_2 = 1$, 表示在选路时既不向网络提供方效用倾斜也不向用户效用倾斜; $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = \omega_4 = 0.25$, 表示带宽、延迟、延迟抖动和出错率在用户 QoS 需求中同等重要.

在多个实际网络拓扑与虚拟网络拓扑上仿真运行本文设计的路由机制、基于模糊塔的 QoS 单播路由机制^[11] 以及基于 SPF (Shortest Path First) 的单播路由机制 (以下分别简称博弈论、模糊塔和 SPF 机制), 仿真结果表明, 博弈论机制的性能较好. 图 3、图 4、图 5 和图 6 给出了三种机制在 CERNET2 拓扑 (拓扑 1)、CERNET 拓扑 (拓扑 2) 和使用 Waxman2 算法^[26] 生成的平均节点度数为 3.5 的拓扑 (拓扑 3) 上的性能比较结果.

称在所有路由请求中能成功按照 QoS 需求完成找路的路由请求所占的比例为请求成功率. 仿真结果如图 3 所示. SPF 机制始终按照最短路径找路, 不能灵活适应当前网络资源使用情况, 请求成功率最低且随网络拓扑变化较大. 博弈论和模糊塔机制能够灵活地根据当前网络资源使用情况进行找路, 请求成功率均高于 SPF. 此外, 在节点平均度数相对较大、资源相对丰富的拓扑 1 和拓扑 3 上, 博弈论机制优于模糊塔机制; 在节点平均度数相对较小、资源相对紧张的拓扑 2 上, 模糊塔机制优于博弈论机制.

SPF、模糊塔和博弈论机制在拓扑 1、拓扑 2 和拓扑 3 中的网络提供方效用之比分别为 1 : 1.129 : 1.148, 1 : 1.029 : 1.018 和 1 : 1.087 : 1.113, 用户效用之比分别为 1 : 1.017 : 1.023, 1 : 1.005 : 1.0006 和 1 : 1.015 : 1.020, 综合效用 (网络提供方效用 + 用户效用) 之比分别为 1 : 1.122 : 1.140, 1 : 1.027 : 1.017 和 1 : 1.120 : 1.136, 分别如图 4、图 5 和图 6 所示. 显然, 博弈论和模糊塔机制在网络提供方效用、用户效用和综合效用上都高于 SPF 机制, 说明这两个算法在追求网络提供方与用户效用优化方面是有效的. 对拓扑 1 和拓扑 3, 博弈论机制优于模糊塔机制; 对拓扑 2, 模糊塔机制优于博弈论机制.

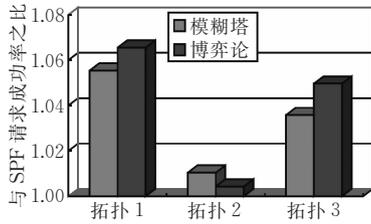


图 3 请求成功率比较

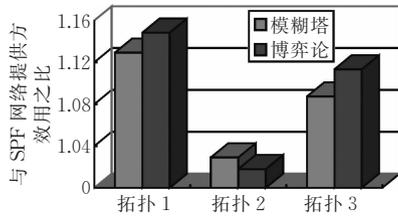


图 4 网络提供方效用比较

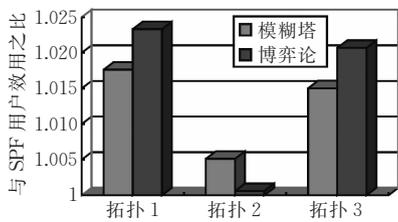


图 5 用户效用比较

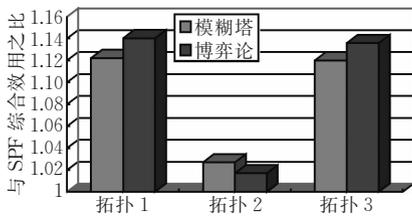


图 6 综合效用比较

5 结束语

本文基于博弈论方法和模糊数学知识设计并仿真实现了一种 QoS 单播路由机制. 该机制不仅能够适应 NGI 网络状态难以准确描述的实际情况, 而且使得找到的路径在满足用户 QoS 需求的同时网络提供方与用户效用达到或接近 Nash 均衡下的 Pareto 最优, 从路由角度支持双方效用双赢的实现. 仿真研究表明, 本文提出的路由机制是有效的. 算法与模型的进一步实用化、原型系统的开发及其组播扩展将是我们今后工作的重点. 此外, 本文设计的路由机制尚未考虑由于用户 QoS 需求难以准确与完全描述而带来的模糊性问题, 这也将是我们今后研究工作的重要方向.

参 考 文 献

- [1] Tachikawa K. A perspective on the evolution of mobile communications. *IEEE Communications Magazine*, 2003, 41(10): 66-73
- [2] Cochennec J Y. Activities on next-generation networks under global information infrastructure in ITU-T. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(7): 98-101
- [3] Zahariadis T B, Vaxeankis K G, Tsantilas C P. Global roaming in next-generation networks. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(2): 145-151
- [4] Sanso B, Girard A, Mobio F. Integrating reliability and quality of service in networks with switched virtual circuits. *Computers and Operations Research*, 2005, 32(1): 35-58
- [5] Bouras C, Gkamas A, Karaliotas A, Stamos K. Architecture and performance evaluation for redundant multicast transmission supporting adaptive QoS. *Multimedia Tools and Applications*, 2005, 25(1): 88-96
- [6] Alam M, Prasad R, Farserotou J R. Quality of service among IP-based heterogeneous networks. *IEEE Personal Communications*, 2001, 8(6): 18-24
- [7] Briscoe B, Darlagiannis V, Heckman O. A market managed multi-service Internet. *Computer Communications*, 2003, 26(4): 404-414
- [8] Guo Xi-Bao, He Ling. *Microeconomics*. Beijing: China Social Sciences Press, 2002 (in Chinese)
(郭熙保, 何玲. 微观经济学. 北京: 中国社会科学出版社, 2002)
- [9] Salama H F, Reeves D S, Viniotis Y. A distributed algorithm for delay-constrained unicast routing. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2000, 8(2): 239-250
- [10] Wang Z, Crowcroft J. QoS routing for supporting resource reservation. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1996, 14(7): 1228-1234
- [11] Wang X W, Yuan C Q, Huang M. A fuzzy-tower-based QoS unicast routing algorithm//Proceedings of the International Conference EUC 2004, Aizu-Wakamatsu City, Japan, LNCS 3207, 2004: 923-930
- [12] Zhao Jian, Wu Jie-Yi, Gu Guan-Qun. A class of network quality of service based unicast routing algorithm. *Journal of China Institute of Communications*, 2001, 22(11): 30-41 (in Chinese)
(赵键, 吴介一, 顾冠群. 一类基于网络服务品质要求的单播路由算法. 通信学报, 2001, 22(11): 30-41)
- [13] Kim M, Bang Y C, Choo H. New parameter for balancing two independent measures in routing path//Proceedings of the International Conference ICCSA 2004, Assisi, Italy, LNCS 3046, 2004: 56-65
- [14] Yuan X, Liu X. Heuristic algorithm for multi-constrained quality of service routing problem//Proceedings of the IEEE INFOCOM'01, Alaska, 2001: 844-853
- [15] Gelenbe E. An approach to quality of service//Proceedings of the 19th International Symposium of Computer and Information Sciences—ISCIS'04, Turkey, 2004: 1-10

- [16] Barolli L, Koyama A. A genetic algorithm based routing method using two QoS parameters. *IEEE Computer Society*, 2002, 8(1): 7-11
- [17] Marco D. Ant algorithms solve difficult optimization problems//Proceedings of the 6th European Conference — ECAL 2001, Czech Republic, 2001: 11-22
- [18] Cui Yong, Wu Jian-Ping, Xu Ke. A QoS routing algorithm by applying simulated annealing. *Journal of Software*, 2003, 14(5): 877-884(in Chinese)
(崔勇, 吴建平, 徐恪. 基于模拟退火的服务质量路由算法. *软件学报*, 2003, 14(5): 877-884)
- [19] Quan Xian-Tang, Zhang Jian. *Economic Game Analysis*. Beijing: China Machine Press, 2003(in Chinese)
(全贤唐, 张健. *经济博弈分析*. 北京: 机械工业出版社, 2003)
- [20] Shi Xi-Quan. *Game Theory*. Shanghai: Shanghai University of Finance & Economics Press, 2000(in Chinese)
(施锡铨. *博弈论*. 上海: 上海财经大学出版社, 2000)
- [21] Wang Xing-Wei, Wang Zhi-Jun, Huang Min, Liu Ji-Ren. Quality of service based initial route setup algorithms for multimedia communication. *Chinese Journal of Computers*, 2001, 24(8): 830-837(in Chinese)
(王兴伟, 王志军, 黄敏, 刘积仁. 基于服务质量的多媒体通信初始路由建立算法的研究. *计算机学报*, 2001, 24(8): 830-837)
- [22] Xie Ji-Jian, Liu Cheng-Ping. *Application of Fuzzy Mathematics*. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2000(in Chinese)
(谢季坚, 刘承平. *模糊数学方法及其应用*. 武汉: 华中理工大学出版社, 2000)
- [23] Yang Guan-Biao, Gao Ying-Yi. *Principle and Application of Fuzzy Mathematics*. 3rd Edition. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2002(in Chinese)
(杨纶标, 高英仪. *模糊数学原理及应用*. 第3版. 广州: 华南理工大学出版社, 2002)
- [24] Xu Lei-Ming, Pang Bo, Zhao Yao. *NS & Network Simulation*. Beijing: Posts & Telecom Press, 2003(in Chinese)
(徐雷鸣, 庞博, 赵耀. *NS 与网络模拟*. 北京: 人民邮电出版社, 2003)
- [25] Zhang Jie. Research and simulated implementation of micro-economics-based fuzzy QoS routing algorithm[M. S. dissertation]. Shenyang: Northeastern University, 2005 (in Chinese)
(张洁. 基于微观经济学的模糊 QoS 路由选择算法的研究与仿真实现[硕士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2005)
- [26] Waxman B M. Routing of multipoint connections. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1988, 6(11): 478-489



WANG Xing-Wei, born in 1968, Ph. D., professor, Ph. D. supervisor. His research interests include NGI, mobile wireless Internet, and IP/DWDM optical Internet, etc.

HOU Mei-Jia, born in 1981, M. S. candidate. Her research interests include unicast and multicast routing

Background

QoS (Quality of Service) routing is essential in NGI (Next-Generation Internet). On one hand, due to the difficulty in exact measurement and expression of NGI network status, the necessary QoS routing information is fuzzy. On the other hand, with the gradual commercialization of network operation, paying for network usage calls for QoS pricing and accounting. However, the benefit conflicts between the network provider and the user ask the so-called both-win to be supported.

With the support of National Natural Science Foundation of China under the grant No. 60003006, the authors have done research on routing scheme in IP over DWDM optical Internet in depth, which is one of the mainstream networking techniques of NGI backbone. With the support of national 863 program under the grant No. 2001AA121064, the authors have also done investigation on routing scheme in mobile Internet deeply. Based on the above researches, the authors began to do research on the game theory based fuzzy

schemes in NGI.

HUANG Min, born in 1968, Ph. D., professor, Ph. D. supervisor. Her research interests include intelligent algorithm design and optimization, scheduling theory and method, etc.

WANG Qi, born in 1983, M. S. candidate. His research interests include unicast and multicast routing schemes in NGI.

QoS unicast routing scheme and got the NSFC support under the grant No. 60673159. This paper is the description of its results. The proposed scheme can not only adapt to the situation of inaccurate network status but also make the Pareto-optimum under the Nash equilibrium on the network provider end-to-end utility and the user end-to-end utility achieved or approached with the user QoS requirements satisfied, supporting both-win of the network provider utility and the user utility from routing viewpoint. Simulation results have shown that the proposed scheme is feasible and effective with better performance. At present, with the support of "Program for New Century Excellent Talents in University" from China Ministry of Education and CNGI demonstration project from the National Development and Reform Commission of China, the authors are doing the multicast extension to and developing the prototype system of the proposed scheme to promote its practicability, attempting to do its experiment in CERNET2.