

## 基于模糊积分和博弈论的QoS组播路由机制<sup>\*</sup>

王兴伟<sup>+</sup>, 王琦, 黄敏, 田野

(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

### A Fuzzy Integral and Game Theory Based QoS Multicast Routing Scheme

WANG Xing-Wei<sup>+</sup>, WANG Qi, HUANG Min, TIAN Ye

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

+ Corresponding author: E-mail: wangxw@mail.neu.edu.cn, <http://www.neu.edu.cn>

**Wang XW, Wang Q, Huang M, Tian Y. A fuzzy integral and game theory based QoS multicast routing scheme. *Journal of Software*, 2008,19(7):1743–1752. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/1743.htm>**

**Abstract:** QoS (quality of service) multicast routing is essential to NGI (next generation Internet). On one hand, due to difficulty in exact measurement and expression of NGI network status, the necessary QoS routing information should be fuzzy. On the other hand, with the gradual commercialization of network operation, paying for network usage calls for QoS pricing and accounting. However, benefit conflicts between network providers and users ask the so-called both-win to be supported. Thus, a fuzzy integral and game theory based QoS multicast routing scheme is proposed and has been implemented by simulation. It consists of three parts: Edge evaluation, game analysis, and multicast tree construction. It does comprehensive evaluation on candidate edges based on fuzzy integral and adaptability membership degree functions for edge parameters, determines whether Nash equilibrium between network provider utility and user utility has been achieved on candidate edges by gaming analysis, and attempts to construct a multicast routing tree with not only user QoS requirements satisfied but also Pareto optimum under Nash equilibrium on network provider utility and user utility achieved or approached by the proposed algorithm. Simulation results show that performance of the proposed scheme is better than that of some well known schemes, including QoSMIC.

**Key words:** NGI (next generation Internet); QoS multicast routing; fuzzy integral; game theory; Nash equilibrium; Pareto optimum

**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.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.随着网络运营的渐趋商业化,付费上网要

---

\* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60673159, 70671020 (国家自然科学基金); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2006AA01Z214 (国家高技术研究发展计划(863)); the Program for New Century Excellent Talents in University of China under Grant No.NCET-05-0289 (新世纪优秀人才支持计划); the Key Project of Chinese Ministry of Education under Grant No.108040 (国家教育部科学技术研究重点项目); the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China under Grant No.20060145012 (高等学校博士学科点专项科研基金); the Natural Science Foundation of Liaoning Province of China under Grant No.20062022 (辽宁省自然科学基金)

Received 2006-05-10; Accepted 2007-03-26

求实现QoS计费,而网络提供方与用户的利益冲突要求实现效用双赢.设计了一种基于模糊积分和博弈论的QoS组播路由机制.该机制由边评判、博弈分析和组播路由树建立算法组成,基于模糊积分和适合隶属度函数对边进行模糊综合评判,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,通过组播路由树建立算法使得在建立的组播路由树上不仅用户QoS要求得到满足,而且网络提供方效用与用户效用达到或接近Nash均衡下的Pareto最优.仿真结果表明,与QoS MIC等机制相比,该机制具有较好的性能.

关键词: 下一代互联网;服务质量组播路由;模糊积分;博弈论;Nash均衡;Pareto最优

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

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,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<sup>[1]</sup>.为了向用户提供端到端服务质量QoS(quality of service)保证,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.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,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,都必然导致其状态参数难以精确与完全表达.同时,随着Internet运营渐趋商业化,付费上网客观上要求以质论价,实现QoS计费<sup>[2]</sup>.然而,网络提供方追求利润最大化,用户希望以最少的费用获得最满意的服务,双方存在利益冲突,应该实现双方效用双赢.如何从路由角度满足上述需求是一个亟待解决的问题<sup>[2]</sup>.

QoS组播路由是NGI必备的基本能力之一,已证明是NP完全的<sup>[3]</sup>.目前,已经提出了很多种启发式或智能QoS组播路由算法.Li等人<sup>[3]</sup>设计了一种QoS感知型算法,通过并行多路径搜索构造约束向量,完成组播路由树构建,算法开销较低.Lowu<sup>[4]</sup>提出一种启发式QoS组播路由算法,通过分布式计算与路由标记,降低了算法的时间复杂度.但是,文献[3,4]中的算法都未充分考虑网络状态不精确与双方效用优化.Wang等人<sup>[5]</sup>提出一种非精确信息下多QoS约束组播路由算法,采用改进的Bellman-Ford算法作为路径搜索算法,实现了非精确状态下的组播路由.Li等人<sup>[6]</sup>使用概率论基于遗传算法,求解非精确信息下QoS组播路由问题,得到优化的组播路由树.Chen等人<sup>[7]</sup>使用模糊集描述链路非精确状态,引入模糊测度与遗传算法构建组播路由树,提高了解的质量.但是,文献[5-7]中的算法均只考虑了如何满足用户QoS约束,尚未考虑如何实现双方效用双赢.Crichigno等人<sup>[8]</sup>通过SPEA(strength Pareto evolutionary algorithm)算法构建Pareto最优树,但只考虑了用户效用,未兼顾网络提供方.Deb等人<sup>[9]</sup>把效用函数与定价机制引入组播资源公平分配中,但其目的是控制网络拥挤而非组播路由,同时未考虑网络状态不精确问题.Yuan等人<sup>[10]</sup>把博弈论方法引入到无线网状网中的多跳组播跨层优化问题中,分成网络层数据路由和物理层功率控制两个子问题来解决,但其优化目标是最大化吞吐量.Das等人<sup>[11]</sup>引入了非合作博弈机制,提出了基于拍卖的安全路由、基于效用的动态源路由和基于看守表的路由,但其主要是为了增强无线传感器网络中的安全性.Zhang等人<sup>[12]</sup>提出了一种基于合作博弈的均衡路由方法,建立了路由算法的合作博弈模型,求得了博弈均衡点,但其主要是针对IPv6下的泛播路由.Wang等人<sup>[13]</sup>设计了一种公平QoS组播路由机制,采用基于Kelly/PSP模型的定价机制,但主要是为了解决组间公平性问题,未考虑如何支持双方效用双赢以及如何适应网络状态不精确问题.

为此,本文引入模糊积分<sup>[14]</sup>和博弈论方法<sup>[15]</sup>,设计并仿真实现了一种QoS组播路由机制.该机制由边评判、博弈分析和组播路由树建立算法3部分组成,基于模糊积分和适合隶属度函数对边进行模糊综合评判,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;通过组播路由树建立算法,使得在建立的组播路由树上不仅用户QoS要求得到满足,且网络提供方效用与用户效用达到或接近Nash均衡下的Pareto最优.

## 1 问题描述

网络模型表示为一幅连通图 $G(V, E)$ ,  $V$ 是节点集,  $E$ 是边集.  $\forall v_j \in V (j=1, 2, \dots, |V|)$ , 考虑如下参数: 延迟、延迟抖动和出错率.  $\forall e_{ij} \in E (i, j=1, 2, \dots, |V|)$ , 考虑如下参数: 可用带宽、延迟和出错率. 为简单起见, 本文把节点参数归并到边

参数中.这样, $e_{ij}$ 上的参数变为:可用带宽 $bw_{ij}$ 、延迟 $dl_{ij}$ 、延迟抖动 $jt_{ij}$ 和出错率 $ls_{ij}$ .

现指定源节点 $v_s \in V$ ,目的节点集合 $M \subseteq V$ ,建立一棵树 $T(W, F), M \subseteq W \subseteq V, F \subseteq E$ ,要求网络提供方和用户在 $T$ 上的效用 $TW$ 和 $TU$ 同时达到或尽可能接近Nash均衡下的Pareto最优,且在 $l_{st}$ (表示在 $T$ 上从 $v_s$ 到 $v_t$ 的路径, $v_t \in M, t=1, 2, \dots, |M|$ )上满足 $v_t$ 的QoS约束: $l_{st}$ 的可用带宽不小于 $v_t$ 的带宽要求 $bw_{rq_t}$ ;  $l_{st}$ 的延迟不大于 $v_t$ 的延迟要求 $dl_{rq_t}$ ;  $l_{st}$ 的延迟抖动不大于 $v_t$ 的延迟抖动要求 $jt_{rq_t}$ ;  $l_{st}$ 的出错率不大于 $v_t$ 的出错率要求 $ls_{rq_t}$ .

数学模型描述如下:

$$TW \rightarrow \max \{TW\} \tag{1}$$

$$TU \rightarrow \max \{TU\} \tag{2}$$

$$TW+TU \rightarrow \max \{TW+TU\} \tag{3}$$

$$\text{s.t. } \min_{e_{ij} \in l_{st}} \{bw_{ij}\} \geq bw_{rq_t}, \forall v_t \in M \tag{4}$$

$$\sum_{e_{ij} \in l_{st}} dl_{ij} \leq dl_{rq_t}, \forall v_t \in M \tag{5}$$

$$\sum_{e_{ij} \in l_{st}} jt_{ij} \leq jt_{rq_t}, \forall v_t \in M \tag{6}$$

$$1 - \prod_{e_{ij} \in l_{st}} (1 - ls_{ij}) \leq ls_{rq_t}, \forall v_t \in M \tag{7}$$

$TW$  和  $TU$  分别计算如下:

$$TW = \sum_{l_{st} \in T} \sum_{e_{ij} \in l_{st}} ws_{ij}^t \tag{8}$$

$$TU = \sum_{l_{st} \in T} \sum_{e_{ij} \in l_{st}} us_{ij}^t \tag{9}$$

其中,  $ws_{ij}^t$  和  $us_{ij}^t$  分别表示网络提供方和用户对 $v_t$ 而言在 $e_{ij}$ 上的效用.

上述问题可归结为受限 Steiner 树问题,利用 Steiner 树问题是 NP 完全问题,并将其变成受限 Steiner 树,可证明其是 NP 完全问题,详细证明过程可参考文献[16].

## 2 路由机制描述

本文设计的路由机制由边评判、博弈分析和组播路由树建立算法 3 部分组成.

### 2.1 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 要求的适合程度.

边带宽适合隶属度函数定义如下:

$$g_{1t}(bw_{ij}, bw_{rq_t}) = \begin{cases} 0, & bw_{ij} < bw_{rq_t} \\ \left( \frac{bw_{ij} - bw_{rq_t}}{b - bw_{rq_t}} \right)^k + f_{1t}(bw_{ij}, bw_{rq_t}), & bw_{rq_t} \leq bw_{ij} < b \\ 1, & bw_{ij} \geq b \end{cases} \tag{10}$$

其中,

$$f_{1t}(bw_{ij}, bw_{rq_t}) = \begin{cases} \varepsilon, & bw_{ij} = bw_{rq_t} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \tag{11}$$

边延迟适合隶属度函数定义如下:

$$g_{2t}(Jp, dl_{ij}, dl_{rq_t}) = \begin{cases} 0, & dl_{ij} > dl_{rq_t} \\ 1 - e^{-\left( \frac{dl_{rq_t} - dl_{ij}}{\sigma_1} \right)^2} + f_{2t}(Jp, dl_{ij}, dl_{rq_t}), & dl_{ij} \leq dl_{rq_t} \end{cases} \tag{12}$$

其中,

$$f_{2i}(Jp, dl_{ij}, dl_{-rq_i}) = \begin{cases} \varepsilon, & Jp = 1 \wedge dl_{ij} = dl_{-rq_i} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

边延迟抖动适合隶属度函数定义如下:

$$g_{3i}(Jp, jt_{ij}, jt_{-rq_i}) = \begin{cases} 0, & jt_{ij} > jt_{-rq_i} \\ 1 - e^{-\left(\frac{jt_{-rq_i} - jt_{ij}}{\sigma_2}\right)^2} + f_{3i}(Jp, jt_{ij}, jt_{-rq_i}), & jt_{ij} \leq jt_{-rq_i} \end{cases} \quad (14)$$

其中,

$$f_{3i}(Jp, jt_{ij}, jt_{-rq_i}) = \begin{cases} \varepsilon, & Jp = 1 \wedge jt_{ij} = jt_{-rq_i} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

边出错率适合隶属度函数定义如下:

$$g_{4i}(Jp, ls_{ij}, ls_{-rq_i}) = \begin{cases} 0, & ls_{ij} > ls_{-rq_i} \\ 1 - e^{-\left(\frac{ls_{-rq_i} - ls_{ij}}{\sigma_3}\right)^2} + f_{4i}(Jp, ls_{ij}, ls_{-rq_i}), & ls_{ij} \leq ls_{-rq_i} \end{cases} \quad (16)$$

其中,

$$f_{4i}(Jp, ls_{ij}, ls_{-rq_i}) = \begin{cases} \varepsilon, & Jp = 1 \wedge ls_{ij} = ls_{-rq_i} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

式(10)、式(12)、式(14)和式(16)属于高斯型隶属度函数,过渡光滑、平稳, $f_{ii}(i=1,2,3,4)$ 为修正函数,用来处理特殊情况; $Jp$ 为一个正整数,表示端到端路径跳数; $\varepsilon$ 是一个远小于1的正纯小数; $k, b, \sigma_1, \sigma_2$ 和 $\sigma_3$ 为正系数且 $k > 1$ .

在已有的很多路由算法中,综合评价多个QoS参数主要是基于加权求和方法,根据不同应用类型,给定不同权重矩阵<sup>[6,13]</sup>.但是,加权求和方法也存在一些不足,它假设各个评价因素之间相互独立,导致在评价过程中忽视了多个QoS参数间的相互联系,而且其变化是线性的,不符合综合评价的特点.为此,本文设计了一种基于模糊积分的多QoS参数综合评价方法,可以更贴切地反映边的当前状况.

采用模糊积分进行综合评判的关键是模糊测度的定义,本文采用 $gg_s$ 测度<sup>[14]</sup>.设论域 $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$ ,其中, $x_1$ =带宽, $x_2$ =延迟, $x_3$ =延迟抖动, $x_4$ =出错率,它们是4个评价因素 $x_i(i=1,2,3,4)$ 的适合隶属度根据式(10)~(17)求得,记作 $hh = \{hh_1, hh_2, hh_3, hh_4\}$ ;根据 $hh_i$ 的大小,对 $x_i(i=1,2,3,4)$ 排序,按从大到小的排序位置记为 $u_1, u_2, u_3, u_4$ ;  $x_i(i=1,2,3,4)$ 对应用的相对重要性记作 $gg\{x_1, x_2, x_3, x_4\} = \{qq_1, qq_2, qq_3, qq_4\}$ .对论域 $X$ 的综合评价为

$$s = \int_A hh(x) \circ gg(x) = \bigvee_{i=1}^4 (hh(u_i) \wedge HH(u_i)) \quad (18)$$

$hh(u_i)$ 为 $hh_i(i=1,2,3,4)$ , $HH(u_i)$ 为 $gg(u_i)$ 的分布,则

$$HH(u_1) = gg(u_1) \quad (19)$$

$$HH(u_i) = gg(u_i) + HH(u_{i-1}) \quad (20)$$

$v_i$ 根据式(10)~式(20)对当前边的状况进行模糊综合评价,得到评价价值 $\omega_i$ .该值越大,当前边越适合 $v_i$ 的QoS要求.

## 2.2 博弈分析

如图1所示,假设共有 $n_u$ 个用户,分为两类:高端用户和低端用户.前者的QoS要求较高,愿出高价,有 $s_u$ 个;后者的QoS要求较低,只愿出低价,有 $n_u - s_u$ 个. $k_u$ 为网络当前可接纳用户数(包括高端与低端用户).显然,  $n_u \geq k_u \geq s_u$ .图1是网络资源紧张时的阶梯状需求曲线, $Y$ 轴代表网络提供方为用户传送数据的单价, $X$ 轴代表网络提供方为用户传送的数据量, $c$ 为网络提供方成本.网络提供方剩余 $P_s$ 和用户剩余 $C_s$ 的计算公式如下<sup>[17]</sup>:

$$P_s = (a_2 + a_3) \cdot s_u + a_3 \cdot (k_u - s_u) \quad (21)$$

$$C_s = a_1 \cdot s_u + a_2 \cdot \frac{k_u - s_u}{n_u - s_u} (n_u - s_u) \quad (22)$$

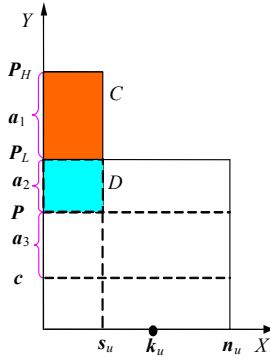


Fig.1 Demand curve

图 1 需求曲线

对于 $v_t$ ,根据式(10)得到边带宽适合隶属度 $g_{1t}$ ,据此判断边带宽相对其要求而言是否丰富:若 $g_{1t} < h_{1t}$ ( $h_{1t}$ 为一常数且  $0 < h_{1t} < 1$ ),则说明当前带宽供不应求,网络提供方可适当提高价格来平抑需求;若 $h_{1t} \leq g_{1t} \leq h_{2t}$ ( $h_{2t}$ 为一常数且  $0 < h_{1t} < h_{2t} < 1$ ),则说明当前带宽供求平衡;若 $g_{1t} > h_{2t}$ ,则说明当前带宽供大于求,网络提供方可适当降低价格来吸引更多用户.因此,增加如下价格调节系数 $\rho_t$ <sup>[18]</sup>:

$$\rho_t = \begin{cases} \rho_{1t}, & g_{1t} < h_{1t} \\ 1, & h_{1t} \leq g_{1t} \leq h_{2t} \\ \rho_{2t}, & g_{1t} > h_{2t} \end{cases} \quad (23)$$

其中, $\rho_{1t} > 1, 0 < \rho_{2t} < 1$ ,均取经验值.

网络提供方实际为 $v_t$ 分配的带宽 $f_{ut}$ 计算如下:

$$f_{ut} = \frac{u_{ct}}{\rho_t P} \quad (24)$$

其中, $u_{ct}$ 为 $v_t$ 所付费用, $P$ 为带宽基价.

使用二人博弈.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.设网络提供方效用矩阵 $U1$ 和用户效用矩阵 $U2$ 分别如下:

$$U1 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$U2 = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \quad (26)$$

$U1$ 和 $U2$ 中的上下两个行向量分别对应策略 $s_1$ 和 $s_2$ ,左右两个列向量分别对应策略 $t_1$ 和 $t_2$ . $U1$ 的元素 $a_{cd}$ 和 $U2$ 的元素 $b_{cd}$ 分别表示在策略对 $(s_c, t_d)$ 下网络提供方和用户在边上的相对效用(详细情况见后), $c, d = 1, 2$ .

通过第 2.1 节中的边评判,得到 $\omega_t$ .设经验值为 $\omega_{t0}$ ,如果 $\omega_t > \omega_{t0}$ ,则认为当前边的状况超过用户期望;如果 $\omega_t = \omega_{t0}$ ,则认为当前边的状况符合用户期望;如果 $\omega_t < \omega_{t0}$ ,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对 $v_t$ 而言的效用矩阵具体取值如下:

$$U1_t = \begin{bmatrix} \left( \frac{P_s \omega_t - P_s}{\omega_{t0}} \right) \frac{f_{ut}}{f_{ut}} & \left( \frac{P_s \omega_t - P_s}{\omega_{t0}} \right) \frac{f_{ut}}{f_{ut}} \\ \left( \frac{P_s \omega_t - P_s}{\omega_{t0}} \right) \frac{f_{ut}}{f_{ut}} & \left( \frac{P_s \omega_t - P_s}{\omega_{t0}} \right) \frac{f_{ut}}{f_{ut}} \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$U2_t = \begin{bmatrix} \left( \frac{C_s \frac{\omega_t}{\omega_{t0}} - C_s}{u_{ct}} \right) & -\mu \left( \frac{C_s \frac{\omega_t}{\omega_{t0}} - C_s}{u_{ct}} \right) \\ \left( \frac{C_s \frac{\omega_t}{\omega_{t0}} - C_s}{u_{ct}} \right) & -\left( \frac{C_s \frac{\omega_t}{\omega_{t0}} - C_s}{u_{ct}} \right) \end{bmatrix} \quad (28)$$

在 $U1_t$ 中,  $\frac{\omega_t}{\omega_{t0}} P_s / f_{ut}$  表示网络提供方实际所得效用,  $P_s / f_{ut}$  表示依理论计算其所得效用, 二者之差作为其相对效用, 表示其所得效用是否超出预期及其程度.  $U1_t$  的第2行元素之所以添加负号, 是因为如果网络提供方拒绝用户请求, 则其会失去将要获得的效用.  $\mu$  是一个惩罚因子, 表示拒绝一个愿意使用其提供带宽的用户会对用户今后是否愿意使用其带宽造成负面影响, 取大于1的值. 同样, 在 $U2_t$ 中,  $\frac{\omega_t}{\omega_{t0}} C_s / u_{ct}$  表示用户实际所得效用,  $C_s / u_{ct}$  表示依理论计算其所得效用, 二者之差作为其相对效用, 表示其所得效用是否超出预期及其程度.  $U2_t$  元素中负号和 $\mu$ 的含义与 $U1_t$ 中的类似. 显然, 在 $U1_t$ 和 $U2_t$ 中, 如果元素为负值, 则表示网络提供方和(或)用户不满意相应的策略对. 如果下列不等式成立:

$$\begin{cases} a_{c^*d^*} \geq a_{cd^*} \\ b_{c^*d^*} \geq b_{c^*d} \end{cases} \quad (29)$$

则策略对  $\langle s_{c^*}, t_{d^*} \rangle$  组成Nash均衡解<sup>[15]</sup>,  $c^*$ 和 $d^*$ 代表某一 $c$ 和 $d$ .

### 2.3 组播路由树建立

(1) 启发式费用. 对 $v_t$ , 把网络提供方和用户在 $e_{ij}$ 上的博弈结果转换成一个权值, 用 $\Omega'_{ij}$ 表示, 定义如下:

$$\Omega'_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{Nash均衡} \\ > 1, & \text{非Nash均衡} \end{cases} \quad (30)$$

对 $v_t, e_{ij}$ 的启发式费用 $Tf'_{ij}(\Omega'_{ij}, ws'_{ij}, us'_{ij})$ 定义如下:

$$Tf'_{ij}(\Omega'_{ij}, ws'_{ij}, us'_{ij}) = \Omega'_{ij} \left( q_1 \frac{1}{ws'_{ij}} + q_2 \frac{1}{us'_{ij}} \right) \quad (31)$$

在式(31)中,  $\Omega'_{ij}$  反映是否达到Nash均衡对路由的影响;  $q_1$ 和 $q_2$ 分别为网络提供方倾斜权值和用户倾斜权值, 反映路由时是否需要向网络提供方或用户效用倾斜.  $ws'_{ij}$ 和 $us'_{ij}$ 分别为对 $v_t$ 而言网络提供方和用户 $e_{ij}$ 上实际所得效用.

当建立组播路由树时, 在满足式(4)~式(7)代表的约束前提下, 通过式(32)使网络提供方与用户在建立的组播路由树上的效用达到或尽可能接近Nash均衡下的Pareto最优, 即达到或接近式(1)~式(3)规定的目标.

$$\min \sum_{l_{st} \in T} \sum_{e_{ij} \in l_{st}} Tf'_{ij}(\Omega'_{ij}, ws'_{ij}, us'_{ij}) \quad (32)$$

(2) 算法描述. 本文设计的组播路由树建立算法的基本思想是: 对所有 $v_t$ , 按其带宽要求从高到低排序,  $t=1, 2, \dots, |M|$ . 首先, 运行文献[19]中的基于博弈论的模糊QoS单播路由算法, 寻找从 $v_s$ 到带宽要求最高的 $v_t$ 的启发式费用之和的最小路径, 作为当前组播树 $T$ ; 然后, 运行文献[19]中的算法, 寻找从 $T$ 上节点到带宽要求次高的 $v_t$ 的启发式费用之和最小的路径并与 $T$ 归并, 作为新的 $T$ ; 依此类推, 直到所有 $v_t$ 都已加入到 $T$ 上为止.

用 $l_{ij}$ 表示从 $v_i$ 到 $v_j$ 的路径,  $T(l_{ij}), bw(l_{ij}), dl(l_{ij}), jt(l_{ij})$ 和 $ls(l_{ij})$ 分别表示 $l_{ij}$ 的启发式费用、可用带宽、延迟、延迟抖动和出错率. 使用 $\lambda'$ 记录 $l_{ij}$ ,  $\lambda'(v)$ 表示 $l_{ij}$ 上 $v$ 的前趋节点. 用 $mT_n$ 表示算法第 $n$ 次循环时已经加入 $T$ 的节点集合, 用 $M_n$ 表示尚未加入 $T$ 的目的节点的集合,  $mTf(v_k), mbw(v_k), mdl(v_k), mjt(v_k)$ 和 $mIs(v_k)$ 分别表示在 $T$ 上从 $v_s$ 到 $v_k$ 的路径 $l_{sk}$ 的启发式费用、可用带宽、延迟、延迟抖动和出错率.

算法流程描述如下:

步骤 0:初始化: $n=0, mT_0=\{v_s\}, M_0=M, k=s, mTf(v_k)=0, mbw(v_k)=+\infty, mdl(v_k)=0, mjt(v_k)=0, mls(v_k)=0; \forall v \in V \wedge v \neq v_s, \lambda'(v_s)=0, \lambda'(v)=m'$ .

步骤 1:令  $M'_n = \{v_t | bw\_rq_t = \max_{v_t \in M_n} \{bw\_rq_t\}\} . \forall v_k \in mT_n, \forall v_t \in M'_n$ , 运行文献[19]中的算法得到路径  $l_{kt}$ , 组成路

径集合  $S_n$ ;

步骤 1.1:令  $H_1 = \{l_{kt} | Tf(l_{kt}) = \min_{l_{k,j_t} \in S_n} \{Tf(l_{k,j_t})\}\}$ . 若  $|H_1|=1$ , 则取  $l_{kt} \in H_1$ , 转步骤 1.6; 否则, 转步骤 1.2.

步骤 1.2:令  $H_2 = \{l_{kt} | bw(l_{kt}) = \max_{l_{k,j_t} \in H_1} \{bw(l_{k,j_t})\}\}$ . 若  $|H_2|=1$ , 则取  $l_{kt} \in H_2$ , 转步骤 1.6; 否则, 转步骤 1.3.

步骤 1.3:令  $H_3 = \{l_{kt} | dl(l_{kt}) = \min_{l_{k,j_t} \in H_2} \{dl(l_{k,j_t})\}\}$ . 若  $|H_3|=1$ , 则取  $l_{kt} \in H_3$ , 转步骤 1.6; 否则, 转步骤 1.4.

步骤 1.4:令  $H_4 = \{l_{kt} | jt(l_{kt}) = \min_{l_{k,j_t} \in H_3} \{jt(l_{k,j_t})\}\}$ . 若  $|H_4|=1$ , 则取  $l_{kt} \in H_4$ , 转步骤 1.6; 否则, 转步骤 1.5.

步骤 1.5:令  $H_5 = \{l_{kt} | ls(l_{kt}) = \min_{l_{k,j_t} \in H_4} \{ls(l_{k,j_t})\}\}$ . 若  $|H_5|=1$ , 则取  $l_{kt} \in H_5$ , 转步骤 1.6; 否则任取  $l_{kt} \in H_5$ , 转步骤

1.6.

步

骤

1.6:  $mbw(v_t) = \min \{mbw(v_k), bw(l_{kt})\}, mdl(v_t) = mdl(v_k) + dl(l_{kt}), mjt(v_t) = mjt(v_k) + jt(l_{kt}), mls(v_t) = 1 - (1 - m \quad l \quad s \quad ( \quad v \quad k \quad ) \times (1 - ls(l_{kt})))$ . 若  $mbw(v_t) \geq bw\_rq_t \wedge mdl(v_t) \leq dl\_rq_t \wedge mjt(v_t) \leq jt\_rq_t \wedge mls(v_t) \leq ls\_rq_t$ , 则转步骤 2; 否则失败, 算法结束.

步骤 2:令  $mT_{n+1} = mT_n \cup \{v | v \in l_{kt} \wedge v \neq v_k\} . \forall v \in \{v | v \in l_{kt} \wedge v \neq v_k\}$ , 标记  $\lambda'(v) . M_{n+1} = M_n - \{v_t\}, n = n + 1$ . 如果  $M_n = \emptyset$ , 则成功, 输出结果, 算法结束; 否则, 转步骤 1.

文献[19]的单播路由算法是分布式算法, 其时间复杂度是  $O(n^2)$ . 由于本文设计的组播路由树建立算法基于文献[19]中的算法, 因此, 也是分布式算法, 而且因建立组播路由树时每次加入一个目的节点, 故本文算法的时间复杂度为  $O(mn^2)$ ,  $m$  为组播目的节点数.

### 3 性能评价

基于 NS2(network simulator 2)平台<sup>[20]</sup>对上述路由机制进行了仿真实现. 仿真结果表明, 其主要参数取如下值时性能更好<sup>[21]</sup>:  $\varepsilon=0.0005, k=3, b=1.5 \times bw\_rq_t, \sigma_1=dl\_rq_t/3, \sigma_2=jt\_rq_t/3, \sigma_3=ls\_rq_t/3$ ; 在计算网络提供方与用户剩余时,  $a_1=0.5, a_2=0.4, a_3=0.6; h_{1t}=0.4, h_{2t}=0.8, \rho_{1t}=1.2, \rho_{2t}=0.8, \omega_0=0.6, \mu=1.5$ ; 非 Nash 均衡时,  $\Omega_j^i=2.5$ . 此外, 为简单起见, 仿真时,  $q_1=1, q_2=1$ , 表示在路由时既不向网络提供方效用倾斜也不向用户效用倾斜.

在多个实际与虚拟网络拓扑上, 仿真运行本文设计的路由机制、与之对应的采用加权求和评判边的 QoS 组播路由机制<sup>[21]</sup>、QoS MIC 组播路由机制<sup>[22]</sup>和基于 PRIM<sup>[23]</sup>的组播路由机制(以下分别简称 FGQM(fuzzy gaming QoS multicast), WGQM(weighted gaming QoS multicast), QoS MIC 和 PRIM). 它们在 CERNET2 拓扑(拓扑 1, 如图 2 所示)、CERNET 拓扑(拓扑 2, 如图 3 所示)和根据 Waxman 随机图模型<sup>[24]</sup>生成的 30 节点拓扑(拓扑 3, 如图 4 所示)上的性能比较结果见图 5、表 1 和表 2.

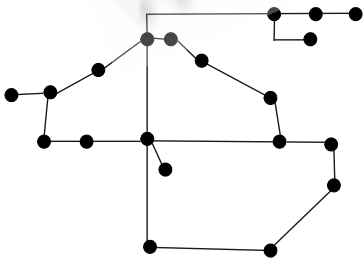


Fig.2 The first topology

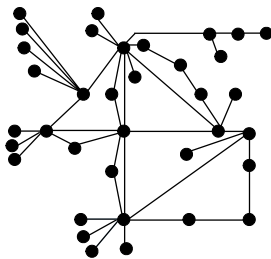


Fig.3 The second topology

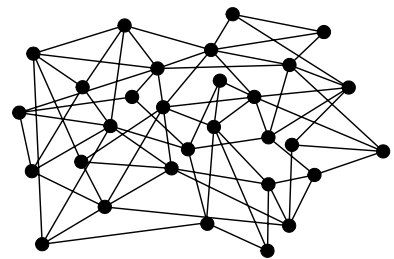


Fig.4 The third topology

图2 拓扑1

图3 拓扑2

图4 拓扑3

能够成功完成 QoS 组播路由树建立的请求占所有请求的比例称为请求成功率.在拓扑 1、拓扑 2 和拓扑 3 上的仿真结果如图 5 所示.PRIM 不能灵活适应当前网络资源使用情况,请求成功率最低;QoSMIC 的请求成功率比 PRIM 略有提高;FGQM 与 WGQM 能够有效地根据网络资源实际情况建立组播路由树,请求成功率提高较大,且 FGQM 优于 WGQM.

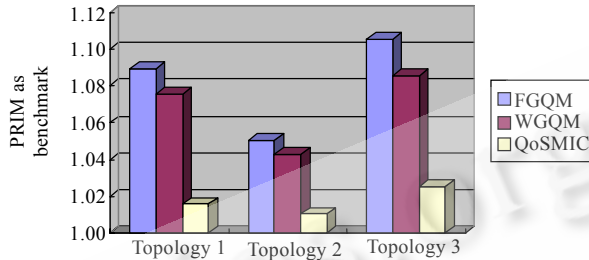


Fig.5 Comparison of request succeeded rate among FGQM, WGQM, QoSMIC and PRIM

图5 FGQM,WGQM,QoSMIC 和 PRIM 之间请求成功率比较

表 1 和表 2 分别给出了 FGQM,WGQM,QoSMIC 和 PRIM 在拓扑 1、拓扑 2 和拓扑 3 上不同组播组规模(group size,简称 GS)和组播组数(group number,简称 GN)下的网络提供方效用(network utility,简称 NU)、用户效用(uesr utility,简称 UU)和综合效用(comprehensive utility,简称 CU,CU=NU+UU)仿真结果.其中:表 1 中的组播组规模 GS1,GS2,GS3,GS4,GS5,GS6 分别代表有 3,6,9,12,15,20 个成员参与组播的情形;表 2 中的组播组数 GN1,GN2,GN3,GN4,GN5 分别代表拓扑上同时有 1,4,7,10,15 个组播组的情形.从表 1 和表 2 可以看出,FGQM 和 WGQM 的效用明显优于 QoSMIC 和 PRIM,这是因为,前两者在路由时明确考虑了效用优化,而 FGQM 优于 WGQM 是因为前者采用模糊积分而非加权求和综合评价多个 QoS 参数,QoSMIC 略优于 PRIM.此外,从表 1 和表 2 还可以看出,当 GS 和 GN 较大时,FGQM 的效用都会下降,但是依然优于其他 3 种机制.

Table 1 Utility comparison among FGQM, WGQM, QoSMIC and PRIM under different group scales

表 1 FGQM,WGQM,QoSMIC 和 PRIM 之间不同组播组规模下效用比较

		FGQM:WGQM:QoSMIC:PRIM		
		NU	UU	CU
Topology 1	GS1	1.10:1.06:1.02:1.00	1.14:1.10:1.03:1.00	1.11:1.07:1.02:1.00
	GS2	1.12:1.08:1.03:1.00	1.12:1.08:1.02:1.00	1.12:1.08:1.03:1.00
	GS3	1.15:1.11:1.05:1.00	1.10:1.06:1.01:1.00	1.13:1.08:1.03:1.00
	GS4	1.16:1.12:1.05:1.00	1.09:1.05:1.01:1.00	1.14:1.09:1.03:1.00
	GS5	1.16:1.12:1.05:1.00	1.08:1.04:1.01:1.00	1.14:1.09:1.03:1.00
	GS6	1.13:1.09:1.03:1.00	1.05:1.03:1.00:1.00	1.09:1.06:1.02:1.00
Topology 2	GS1	1.06:1.03:1.00:1.00	1.08:1.04:1.01:1.00	1.07:1.04:1.00:1.00
	GS2	1.09:1.06:1.01:1.00	1.07:1.04:1.00:1.00	1.08:1.05:1.01:1.00
	GS3	1.13:1.09:1.02:1.00	1.07:1.03:1.00:1.00	1.10:1.06:1.02:1.00
	GS4	1.15:1.09:1.02:1.00	1.06:1.02:1.00:1.00	1.10:1.06:1.02:1.00
	GS5	1.15:1.10:1.03:1.00	1.06:1.02:1.00:1.00	1.11:1.06:1.02:1.00
	GS6	1.11:1.07:1.01:1.00	1.04:1.02:1.00:1.00	1.07:1.05:1.01:1.00
Topology 3	GS1	1.14:1.06:1.02:1.00	1.16:1.12:1.04:1.00	1.14:1.08:1.03:1.00
	GS2	1.16:1.10:1.04:1.00	1.13:1.09:1.03:1.00	1.15:1.09:1.04:1.00
	GS3	1.17:1.13:1.06:1.00	1.12:1.08:1.02:1.00	1.16:1.10:1.05:1.00
	GS4	1.18:1.14:1.07:1.00	1.11:1.07:1.01:1.00	1.16:1.11:1.05:1.00
	GS5	1.18:1.14:1.07:1.00	1.11:1.06:1.01:1.00	1.16:1.12:1.06:1.00
	GS6	1.17:1.11:1.05:1.00	1.08:1.06:1.01:1.00	1.13:1.08:1.03:1.00

4 结束语

本文引入模糊积分和博弈论方法,设计并仿真实现了一种 QoS 组播路由机制.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,而且使得找到的组播路由在满足用户 QoS 要求的同时,网络提供方与用户效用达到或接近 Nash 均衡下的 Pareto 最优,从路由角度支持效用双赢.仿真研究表明,该机制是有效的.算法与模型的进一步实用化以及原型系统开发将是我们今后的工作重点.此外,本文设计的组播路由机制尚未考虑由于用户 QoS 要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的重点.

**Table 2** Utility comparison among FGQM, WGQM, QoSMIC and PRIM under different group numbers  
表 2 FGQM, WGQM, QoSMIC 和 PRIM 之间不同组播组数下效用比较

		FGQM:WGQM:QoSMIC:PRIM		
		NU	UU	CU
Topology 1	GN1	1.12:1.08:1.03:1.00	1.12:1.08:1.02:1.00	1.12:1.08:1.03:1.00
	GN2	1.13:1.10:1.04:1.00	1.11:1.07:1.02:1.00	1.12:1.08:1.03:1.00
	GN3	1.15:1.11:1.05:1.00	1.10:1.06:1.01:1.00	1.13:1.09:1.03:1.00
	GN4	1.16:1.11:1.05:1.00	1.09:1.05:1.01:1.00	1.14:1.10:1.03:1.00
	GN5	1.14:1.10:1.04:1.00	1.08:1.04:1.00:1.00	1.12:1.08:1.02:1.00
Topology 2	GN1	1.09:1.06:1.01:1.00	1.07:1.04:1.00:1.00	1.08:1.05:1.01:1.00
	GN2	1.11:1.07:1.01:1.00	1.07:1.03:1.00:1.00	1.09:1.05:1.01:1.00
	GN3	1.13:1.09:1.02:1.00	1.07:1.02:1.00:1.00	1.10:1.06:1.01:1.00
	GN4	1.14:1.10:1.02:1.00	1.06:1.02:1.00:1.00	1.11:1.06:1.01:1.00
	GN5	1.11:1.08:1.02:1.00	1.05:1.02:1.00:1.00	1.08:1.05:1.01:1.00
Topology 3	GN1	1.16:1.10:1.04:1.00	1.13:1.09:1.03:1.00	1.15:1.09:1.04:1.00
	GN2	1.17:1.11:1.05:1.00	1.12:1.08:1.02:1.00	1.15:1.09:1.04:1.00
	GN3	1.17:1.13:1.06:1.00	1.12:1.07:1.02:1.00	1.15:1.10:1.05:1.00
	GN4	1.17:1.13:1.06:1.00	1.11:1.07:1.01:1.00	1.16:1.10:1.05:1.00
	GN5	1.16:1.11:1.05:1.00	1.10:1.04:1.00:1.00	1.13:1.07:1.03:1.00

## References:

- [1] Tachikawa K. A perspective on the evolution of mobile communications. *IEEE Communications Magazine*, 2003,41(10):66–73.
- [2] Briscoe B, Darlagiannis V, Heckman O, Oliver H, Siris V, Songhurst D, Stiller B. A market managed multi-service Internet. *Computer Communications*, 2003,26(4):404–414.
- [3] Li LY, Li CL. A QoS multicast routing protocol for dynamic group topology. *Information Sciences*, 2005,169(1-2):113–130.
- [4] Lowu F, Baryamureeba V. On efficient distribution of data in multicast networks: QoS in scalable networks. In: Lirkov I, ed. *Proc. of the Large-Scale Scientific Computing*. LNCS 3743, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. 518–525.
- [5] Wang L, Li ZZ, Song CQ, Yan Y. A dynamic multicast routing algorithm with inaccurate information satisfying multiple QoS constraints. *Acta Electronica Sinica*, 2004,32(8):1244–1247 (in Chinese with English abstract).
- [6] Li LY, Li CL. Genetic algorithm-based QoS multicast routing for uncertainty in network parameters. In: Zhou X, ed. *Proc. of the Web Technologies and Applications: 5th Asia-Pacific Web Conf*. LNCS 2642, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2003. 430–441.
- [7] Chen P, Dong TL. A fuzzy genetic algorithm for QoS multicast routing. *Computer Communications*, 2003,26(6):506–512.
- [8] Crichigno J, Barán B. A multicast routing algorithm using multi-objective optimization. In: Souza D, ed. *Proc. of the 11th Int'l Conf. on Telecommunications*. LNCS 3124, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2004. 1107–1113.
- [9] Deb S, Srikant R. Congestion control for fair resource allocation in networks with multicast flows. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2004,12(2):274–285.
- [10] Yuan J, Li ZP, Yu W, Li BC. A cross-layer optimization framework for multihop multicast in wireless mesh networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2006,24(11):2092–2103.
- [11] Agah A, Basu K, Das SK. Security enforcement in wireless sensor networks: A framework based on non-cooperative games. *Pervasive and Mobile Computing*, 2006,2(2):137–158.
- [12] Zhang HJ, Zhou LH, Zhai HM. A balance route arithmetic based cooperative game theory. *Computer Science*, 2006,33(12):43–45 (in Chinese with English abstract).
- [13] Wang XW, Liu C, Cui JY, Huang M, Das SK. A fair QoS multicast routing scheme for IP/DWDM optical Internet. In: McKinley P, ed. *Proc. of the 25th IEEE Int'l Conf. on Distributed Computing Systems Workshops*. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2005. 624–629.

- [14] Yang GB, Gao YY. Theory and Application of Fuzzy Mathematics. 3rd ed., Guangzhou: South China University of Technology Press, 2002. 311–326 (in Chinese).
- [15] Shi XQ. Game Theory. Shanghai: Shanghai University of Finance & Economics Press, 2000. 30–53 (in Chinese).
- [16] Wang XW. Research on QoS management and group communication mechanisms in distributed multimedia systems [Ph.D. Thesis]. Shenyang: Northeastern University, 1998 (in Chinese with English abstract).
- [17] Hu YM, Zhang JS. Research on the difference pricing strategy of Internet congestion. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2004,35(7):133–138 (in Chinese with English abstract).
- [18] Quan XT, Zhang J. Analysis of Economics Game. Beijing: China Machine Press, 2003. 53–68 (in Chinese).
- [19] Wang XW, Hou MJ, Wang JW, Huang M. A microeconomics-based fuzzy QoS unicast routing scheme in NGI. In: Yang LT, ed. Proc. of the Embedded and Ubiquitous Computing. LNCS 3824, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. 1055–1064.
- [20] Xu LM, Pang B, Zhao Y. NS and Network Simulation. Beijing: Posts & Telecom Press, 2003. 26–195 (in Chinese).
- [21] Zhang J. Research and simulated implementation of microeconomics-based fuzzy QoS routing algorithm [MS. Thesis]. Shenyang: Northeastern University, 2005 (in Chinese with English abstract).
- [22] Yan SQ, Faloutsos M, Banerjee A. QoS-Aware multicast routing for the Internet: The design and evaluation of QoS-MIC. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2002,10(1):54–66.
- [23] Yan WM, Wu WM. Data Structures. Beijing: Tsinghua University Press, 2002. 173–176 (in Chinese).
- [24] Waxman BM. Routing of multipoint connections. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1988,6(9):1617–1622.

#### 附中文参考文献:

- [5] 王立,李增智,宋承谦,闫焱.一种非精确状态下满足多 QoS 约束的动态组播路由算法.电子学报,2004,32(8):1244–1247.
- [12] 张惠娟,周利华,翟鸿鸣.一种基于合作博弈的均衡路由方法.计算机科学,2006,33(12):43–45.
- [14] 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,2002.311–326.
- [15] 施锡铨.博弈论.上海:上海财经大学出版社,2000.30–53.
- [16] 王兴伟.分布式多媒体系统服务质量管理与组通信机制的研究[博士学位论文].沈阳:东北大学,1998.
- [17] 胡杨梅,张金水.Internet 拥堵的差别定价策略研究.数量经济技术经济研究,2004,35(7):133–138.
- [18] 全贤唐,张健.经济博弈分析.北京:机械工业出版社,2003.53–68.
- [20] 徐雷鸣,庞博,赵耀.NS 与网络模拟.北京:人民邮电出版社,2003.26–195.
- [21] 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.
- [23] 严蔚敏,吴伟民.数据结构.北京:清华大学出版社,2002.173–176.



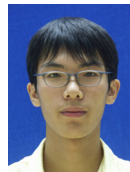
王兴伟(1968—),男,辽宁盖州人,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为下一代互联网,自组织网络,移动 Internet,IP/DWDM 光 Internet.



黄敏(1968—),女,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为算法设计与优化.



王琦(1983—),男,硕士生,主要研究领域为 QoS 路由与切换管理机制.



田野(1982—),男,硕士生,主要研究领域为 QoS 路由与切换管理机制.