

基于人工鱼群的 ABC 支持型 QoS 单播路由机制

王兴伟 秦培玉 黄 敏

(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,支持总最佳连接 ABC(Always Best Connected). 但是,由于链路状态的难以精确测量与用户 QoS 需求的难以准确表达,因此 QoS 路由基于的信息实际上是模糊的. 同时,在网络运营日益商业化的环境下,支持 ABC 需要兼顾用户和网络提供方利益,考虑双方效用共赢. 为此,文中引入模糊数学、概率论和博弈论知识,设计了一种 ABC 支持型 QoS 单播路由机制. 该机制采用区间形式描述用户 QoS 需求和边(链路)参数,引入用户满意度和边评价,通过博弈分析,基于人工鱼群算法,寻找使用户和网络提供方效用达到或接近 Nash 均衡下 Pareto 最优的 QoS 单播路径. 仿真结果表明,该机制是可行和有效的.

关键词 服务质量;单播路由;总最佳连接;人工鱼群算法;Nash 均衡;Pareto 最优
中图法分类号 TP393 **DOI 号**: 10.3724/SP.J.1016.2010.00718

ABC Supporting QoS Unicast Routing Scheme Based on the Artificial Fish Swarm

WANG Xing-Wei QIN Pei-Yu HUANG Min

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

Abstract NGI (Next Generation Internet) needs to provide QoS (Quality of Service) routing and support ABC (Always Best Connected). However, due to the difficulty on the exact measurement of the network status and the exact expression of the user QoS requirements, QoS routing should be based on the fuzzy information. Meanwhile, with the gradual commercialization of the network operations, both the network provider and the user profits should be considered to support ABC, thus their utility win-win should be supported. In this paper, by introducing the knowledge of the fuzzy mathematics, probability theory and gaming theory, a QoS unicast routing scheme with ABC supported is proposed. The proposed scheme uses the range to describe the user QoS requirement and the edge (link) parameter and introduces the user satisfaction degree function and the edge evaluation function. With the help of the gaming analysis and based on the artificial fish swarm algorithm, it tries to find a QoS unicast path with the Pareto optimum under the Nash equilibrium on both the network provider utility and the user utility achieved or approached. Simulation results have shown that the proposed scheme is both feasible and effective.

Keywords QoS(Quality of Service); unicast routing; ABC (Always Best Connected); artificial fish swarm algorithm; Nash equilibrium; Pareto optimum

收稿日期:2008-05-22;最终修改稿收到日期:2009-02-12. 本课题得到国家自然科学基金(60673159,70671020,70931001,60802023)、国家“八六三”高技术研究发展计划项目(2007AA041201)、国家科技支撑计划项目(2008BAH37B03,2008BAH37B07)、高等学校博士学科点专项科研基金(20070145017)及中央高校基本科研业务费(N090504003,N090504006)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 Internet 和 IP/DWDM 光 Internet 等. E-mail: wangxw@mail.neu.edu.cn. 秦培玉,男,1985年生,硕士研究生,主要研究方向为 QoS 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.

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)很可能发展成为地面网与空天网、固定网与移动网等异构多段多提供方网络融合而成的一体化网络,出现主干和接入链路多样化的局面.在通信端到端路径上,每一跳都可能存在多种不同类型链路供用户选择,从而使得在通信开始时和进行期间支持用户对 NGI 的总最佳连接 ABC(Always Best Connected)成为可能^[1],实现服务质量 QoS(Quality of Service)全局无缝漫游^[2-3].

ABC 意味着用户在任何时间和任何地点都可以获得当前最佳可用连接,通过当前最佳方式使用 NGI,而且每当有更好的连接方式出现时就可以自适应透明切换.然而,“最佳”本身就是一个模糊概念,依赖很多因素(如用户 QoS 需求、愿付费用、偏爱、终端能力、接入点可用情况等).在网络运营日益商业化的环境下,ABC 也不是用户一厢情愿的事,需要兼顾用户和网络提供方利益,支持双方效用共赢^[4].此外,NGI 组成部分的异构与动态、终端乃至网络移动等的影响和信息传递不可避免的时延及其不确定性等,都导致路由所依赖的链路状态信息难以精确测量.另一方面,用户 QoS 需求受主观因素影响较大,难以准确表达,需要体现一定柔性.这些都使 ABC 支持型 QoS 路由变得非常复杂.

受两个或两个以上加性或乘性参数约束的 QoS 单播路由问题是 NP 完全的^[5],需采用启发式或智能优化算法解决.在文献[5]中,设计了一种算法,先在网络拓扑中剪掉带宽不满足要求的边,而后以延迟为权值使用 Dijkstra 算法^[6]计算带宽约束最短延迟路径.在文献[7]中,设计了一种分布式启发算法,通过构造延迟和费用向量完成路由计算.在文献[8]中,基于概率论把延迟和费用整合成一个参数用于路由选择.在文献[9]中,把 QoS 参数分为敏感和非敏感两类,简化路由计算.在文献[10]中,引入量化费用函数,基于 Bellman-Ford 算法^[11]设计了一种路由预计算方法.在文献[12]中,设计了一种延迟受限的分布式路由算法.在文献[13]中,设计了一种多约束源路由算法.在文献[14]中,提出了一种可在逐跳路由协议中使用的 K 近似算法,用来寻找多加性 QoS 参数约束路径.在文献[15]中,通过引入单一混成指标求解多约束 QoS 路由.在文献[16]中,提出了两个基于贡献区域的算法求解多约束

QoS 路由.在文献[17]中,把 QoS 指标平均和广度优先搜索相结合来求解多 QoS 约束路由.在文献[18-20]中,把遗传、蚁群和模拟退火这 3 个智能优化算法分别用于寻找 QoS 路径.在文献[21]中,引入 Pareto 最优,设计了两可加 QoS 约束动态权重系数单播路由算法.在文献[22]中,提出了一种基于概率的不精确链路信息下 QoS 单播路由算法,寻找延迟与带宽受限费用最小 QoS 路由.在文献[23]中,把不精确信息下带宽与延迟约束路径问题分解成带宽约束路径和延迟约束路径两个子问题,首先获得非劣解集,而后基于效用函数从中选取特定路径作为问题解.在文献[24]中,针对不精确信息下多加性 QoS 约束路径问题,采用模糊逻辑从一组候选路径中选择符合要求的 QoS 路由.在文献[25]中,提出了一种基于模糊塔的 QoS 单播路由算法,寻找两节点之间既满足用户 QoS 需求又试图最大化网络提供方概率收益的路径.在文献[26]中,提出了一种基于微观经济学的模糊 QoS 单播路由机制,采用启发式选路算法,使得找到的路径不仅满足用户 QoS 需求,而且双方在其上的效用达到或接近 Nash 均衡下的 Pareto 最优.

但是,上述算法尚未从支持 ABC 的角度出发充分考虑在链路状态信息难以精确测量与用户 QoS 需求难以准确表达的情况下,如何实现支持用户和网络提供方效用共赢的 QoS 单播路由机制.本文引入模糊数学、概率论和博弈论知识,设计了一种 ABC 支持型 QoS 单播路由机制,采用区间形式描述用户 QoS 需求和边(链路)参数,引入用户满意度和边评价,通过博弈分析,基于人工鱼群算法^[27],寻找使用户和网络提供方效用达到或接近 Nash 均衡下 Pareto 最优的 QoS 单播路径.仿真结果表明,该机制是可行和有效的.

2 问题描述

2.1 网络模型与路由请求

网络建模为图 $G(V, E)$, V 是节点集, E 是边集. $\forall v_i, v_j \in V (i, j = 1, 2, \dots, |V|)$, 其间可能存在多条边.简单起见,本文把节点参数归并到边参数中. $\forall e_i \in E$, 考虑如下参数:网络提供方编号 N_{i_p} 、可用带宽 $[Bw_{i_L}, Bw_{i_H}]$ 、延迟 $[Dl_{i_L}, Dl_{i_H}]$ 、出错率 $[Ls_{i_L}, Ls_{i_H}]$ 、带宽单位成本 ct_i . 用户 QoS 单播路由请求表示为 $\langle v_s, v_d, [bw_rq_L, bw_rq_H], [dl_rq_L, dl_rq_H], [ls_rq_L, ls_rq_H], P_u \rangle$, 其元素依次代表源节点、目的节点、带宽、延迟、出错率需求区间和愿付

费用上限. 采用区间形式表示带宽、延迟和出错率是为了适应边(链路)参数值的难以精确测量和用户 QoS 需求的难以准确表达.

2.2 边参数概率与用户满意度

e_i 向用户提供带宽 bw_i 的概率 G_{B_i} 与用户对在 e_i 上实际得到带宽 bw_i 的满意度 S_{B_i} 分别定义如下:

$$G_{B_i} = \begin{cases} 1, & bw_i \leq Bw_{iL} \\ \left(\frac{Bw_{iH} - bw_i}{Bw_{iH} - Bw_{iL}} \right)^k, & Bw_{iL} < bw_i < Bw_{iH} \\ \epsilon, & bw_i = Bw_{iH} \\ 0, & bw_i > Bw_{iH} \end{cases} \quad (1)$$

$$S_{B_i} = \begin{cases} 1, & bw_i \geq bw_{rqH} \\ e^{-\left(\frac{bw_{rqH} - bw_i}{bw_i - bw_{rqL}} \right)^2}, & bw_{rqL} < bw_i < bw_{rqH} \\ \epsilon, & bw_i = bw_{rqL} \\ 0, & bw_i < bw_{rqL} \end{cases} \quad (2)$$

G_{B_i} 的定义表明, 越接近边可用带宽区间下限, 则边越可能向用户提供此带宽; S_{B_i} 的定义表明, 越接近用户带宽需求区间上限, 则用户对从边实际得到的带宽越满意.

设延迟取值在 $[Dl_{iL}, Dl_{iH}]$ 上均匀分布^[28], 则 e_i 的延迟等于 dl_i 的概率 G_{D_i} 和用户对在 e_i 上实际经历延迟 dl_i 的满意度 S_{D_i} 分别定义如下:

$$G_{D_i} = \begin{cases} \frac{1}{Dl_{iH} - Dl_{iL}}, & Dl_{iL} \leq dl_i \leq Dl_{iH} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

$$S_{D_i} = \begin{cases} 1 - e^{-\left(\frac{dl_{rqH} - dl_i}{dl_i} \right)^2}, & dl_i < dl_{rqH} \\ \epsilon, & dl_i = dl_{rqH} \\ 0, & dl_i > dl_{rqH} \end{cases} \quad (4)$$

设出错率取值在 $[Ls_{iL}, Ls_{iH}]$ 上均匀分布, 则 e_i 的出错率等于 ls_i 的概率 G_{L_i} 和用户对在 e_i 上实际经历出错率 ls_i 的满意度 S_{L_i} 分别定义如下:

$$G_{L_i} = \begin{cases} \frac{1}{Ls_{iH} - Ls_{iL}}, & Ls_{iL} \leq ls_i \leq Ls_{iH} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

$$S_{L_i} = \begin{cases} 1 - e^{-\left(\frac{ls_{rqH} - ls_i}{ls_i} \right)^2}, & ls_i < ls_{rqH} \\ \epsilon, & ls_i = ls_{rqH} \\ 0, & ls_i > ls_{rqH} \end{cases} \quad (6)$$

G_{D_i} 和 G_{L_i} 的定义表明, 边在延迟区间和出错率区间各点取值机会均等; S_{D_i} 和 S_{L_i} 的定义表明, 越接近用户延迟和出错率需求区间的下限, 则用户对在边实际经历的延迟和出错率越满意.

在上述定义中, $k > 0$, ϵ 是远小于 1 的纯小数.

2.3 边评价

边评价函数表征边对用户 QoS 需求的适合隶属度. 设用户在 e_i 上实际占用带宽、实际经历延迟和实际经历出错率分别为 bw_i 、 dl_i 和 ls_i , 则定义 bw_i 、 dl_i 和 ls_i 对用户带宽、延迟和出错率需求的适合隶属度函数即边带宽、延迟和出错率评价函数 E_{B_i} 、 E_{D_i} 和 E_{L_i} 如下:

$$E_{B_i} = S_{B_i} \cdot G_{B_i} \quad (7)$$

$$E_{D_i} = S_{D_i} \cdot G_{D_i} \quad (8)$$

$$E_{L_i} = S_{L_i} \cdot G_{L_i} \quad (9)$$

上述定义表明, 带宽、延迟和延迟抖动在一条边上实际取某值的概率越高, 用户在该边上取该值的满意度越大, 则该边越适合满足用户的 QoS 需求.

定义边质量综合评价函数 E_{C_i} 如下:

$$E_{C_i} = \alpha_B \cdot E_{B_i} + \alpha_D \cdot E_{D_i} + \alpha_L \cdot E_{L_i} \quad (10)$$

其中, α_B 、 α_D 和 α_L 分别代表带宽、延迟和出错率对用户 QoS 需求的相对重要性, $0 \leq \alpha_B, \alpha_D, \alpha_L \leq 1$, $\alpha_B + \alpha_D + \alpha_L = 1$. E_{C_i} 反映了用户对 e_i 提供的 QoS 的满意度.

2.4 博弈分析

在本文中, 用户和网络提供方在边上博弈.

2.4.1 带宽定价

带宽定价由基价和浮动价组成, 前者根据边的网络提供方确定, 不参加博弈; 后者根据边的延迟和出错率通过用户和网络提供方博弈确定. 表 1 是边延迟与出错率同带宽浮动价之间的对照关系. 例如, 若 e_i 的延迟与出错率分别位于 $[Dl_1, Dl_2]$ 和 $[Ls_1, Ls_2]$, 则 $\langle PF_{l_1}^{11}, PF_{l_2}^{11}, \dots, PF_{l_m}^{11} \rangle$ 是与之对应的 m 套带宽浮动价.

表 1 边的延迟与出错率同带宽浮动价对照关系

出错率	延迟			
	$[Dl_1, Dl_2]$	$[Dl_2, Dl_3]$...	$[Dl_r, Dl_{r+1}]$
$[Ls_1, Ls_2]$	$\langle PF_{l_1}^{11}, PF_{l_2}^{11}, \dots, PF_{l_m}^{11} \rangle$	$\langle PF_{l_1}^{12}, PF_{l_2}^{12}, \dots, PF_{l_m}^{12} \rangle$...	$\langle PF_{l_1}^{1r}, PF_{l_2}^{1r}, \dots, PF_{l_m}^{1r} \rangle$
$[Ls_2, Ls_3]$	$\langle PF_{l_1}^{21}, PF_{l_2}^{21}, \dots, PF_{l_m}^{21} \rangle$	$\langle PF_{l_1}^{22}, PF_{l_2}^{22}, \dots, PF_{l_m}^{22} \rangle$...	$\langle PF_{l_1}^{2r}, PF_{l_2}^{2r}, \dots, PF_{l_m}^{2r} \rangle$
⋮	⋮	⋮	...	⋮
$[Ls_r, Ls_{r+1}]$	$\langle PF_{l_1}^{r1}, PF_{l_2}^{r1}, \dots, PF_{l_m}^{r1} \rangle$	$\langle PF_{l_1}^{r2}, PF_{l_2}^{r2}, \dots, PF_{l_m}^{r2} \rangle$...	$\langle PF_{l_1}^{rr}, PF_{l_2}^{rr}, \dots, PF_{l_m}^{rr} \rangle$

2.4.2 博弈策略

用户有 n 种策略, 表示为 $\langle b\omega_{l_1}, b\omega_{l_2}, \dots, b\omega_{l_n} \rangle$, $b\omega_{l_x}$ 表示用户在第 x 种策略下在 e_l 上实际占用的带宽. 网络提供方有 m 种策略, 表示为 $\langle PB_l + PF_{l_1}^{ij}, PB_l + PF_{l_2}^{ij}, \dots, PB_l + PF_{l_m}^{ij} \rangle$, 对应 e_l 在 $[L_{s_i}, L_{s_{i+1}}]$ 和 $[D_{l_j}, D_{l_{j+1}}]$ 下的 m 套带宽定价, 其中, PB_l 是网络提供方在 e_l 上的带宽基价.

2.4.3 费用和成本

在策略对 $\langle b\omega_{l_x}, PB_l + PF_{l_y}^{ij} \rangle$ 下, 用户因使用 e_l 的带宽而支付的费用 $EP_{l_{xy}}^l$ 和网络提供方因向用户提供带宽而承担的成本 $CT_{l_{xy}}^l$ 分别计算如下:

$$EP_{l_{xy}}^l = (PB_l + PF_{l_y}^{ij}) \cdot b\omega_{l_x} \quad (11)$$

$$CT_{l_{xy}}^l = b\omega_{l_x} \cdot ct_l \quad (12)$$

2.4.4 效用和 Pareto 优势

定义用户和网络提供方在 e_l 上的效用矩阵为 $[\langle uu_{l_{xy}}^l, nu_{l_{xy}}^l \rangle]_{n \times m}$, 矩阵的 n 行与 m 列分别对应用户和网络提供方的 n 种与 m 种博弈策略, 则在 $\langle b\omega_{l_x}, PB_l + PF_{l_y}^{ij} \rangle$ 下用户和网络提供方在 e_l 上的效用 $uu_{l_{xy}}^l$ 和 $nu_{l_{xy}}^l$ 分别计算如下:

$$uu_{l_{xy}}^l = \frac{CT_{l_{xy}}^l \cdot E_{C_l}}{EP_{l_{xy}}^l} \quad (13)$$

$$nu_{l_{xy}}^l = \frac{EP_{l_{xy}}^l - CT_{l_{xy}}^l}{CT_{l_{xy}}^l} \quad (14)$$

上述定义表明, 用户对所用边的质量的综合评价越高, 用户因使用该边而实际付出的费用越接近网络提供方因提供该边而实际承担的成本 (即用户被网络提供方实际赚取的利润越低), 则用户效用越高; 网络提供方因提供该边而实际从用户赚取的利润越高, 实际承担的成本越低, 则网络提供方效用越高.

假设图中的边 (即网络中的链路) 是由 Q 个网络提供方提供的, 则用户和第 h 个网络提供方在路径 P 上的效用分别计算如下:

$$UU_P = \sum_{e_l \in P} uu_{l_{xy}}^l \quad (15)$$

$$NU_P^h = \sum_{e_l \in P \wedge N_{l_p}^h} nu_{l_{xy}}^l \quad (16)$$

效用对 $\langle uu_{l_{xy}}^l, nu_{l_{xy}}^l \rangle$ 在 e_l 上的 Pareto 优势定义如下:

$$PD_{l_{xy}}^l = \beta_u \cdot \frac{1}{uu_{l_{xy}}^l} + \beta_n \cdot \frac{1}{nu_{l_{xy}}^l} \quad (17)$$

在式 (17) 中, β_u 和 β_n 分别代表对用户和网络提供方的倾斜权值, $0 \leq \beta_u, \beta_n \leq 1, \beta_u + \beta_n = 1$. $PD_{l_{xy}}^l$ 值越小, 双方效用越大且越均衡, 对应的策略对越能使

双方效用 Pareto 最优.

2.4.5 博弈过程

在边上博弈的目的是通过确定最佳策略对使双方效用达到或接近 Nash 均衡下的 Pareto 最优. 在 $[\langle uu_{l_{xy}}^l, nu_{l_{xy}}^l \rangle]_{n \times m}$ 中达到 Nash 均衡的 $\langle uu_{l_{x^*y^*}}^l, nu_{l_{x^*y^*}}^l \rangle$ 应该满足^[29]

$$\begin{cases} uu_{l_{x^*y^*}}^l \geq uu_{l_{xy}}^l, & x = 1, 2, \dots, n \\ nu_{l_{x^*y^*}}^l \geq nu_{l_{xy}}^l, & y = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (18)$$

在 $[\langle uu_{l_{xy}}^l, nu_{l_{xy}}^l \rangle]_{n \times m}$ 中, 若只有一个这样的 $\langle uu_{l_{x^*y^*}}^l, nu_{l_{x^*y^*}}^l \rangle$ 存在, 则把其作为用户和网络提供方最佳策略对. 若存在多个这样的 $\langle uu_{l_{x^*y^*}}^l, nu_{l_{x^*y^*}}^l \rangle$ 或不存在这样的 $\langle uu_{l_{x^*y^*}}^l, nu_{l_{x^*y^*}}^l \rangle$, 则进一步比较 Pareto 优势, 选择与 $PD_{l_{xy}}^l$ 最小值对应的策略对作为最佳策略对 (若有多对, 则任选其一).

2.5 数学模型

本文模式的目标是在满足用户 QoS 需求的前提下使双方效用在所选路径上达到或接近 Nash 均衡下的 Pareto 最优, 数学描述如下:

$$\text{Maximize} \{UU_P\} \quad (19)$$

$$\text{Maximize} \{NU_P^h\} \quad (20)$$

$$\text{Maximize} \left\{ UU_P + \sum_h NU_P^h \right\} \quad (21)$$

s. t.

$$B\omega_P \geq b\omega_{rqL} \quad (22)$$

$$DL_P \leq dl_{rqH} \quad (23)$$

$$Ls_P \leq ls_{rqH} \quad (24)$$

$$EP_P \leq P_u \quad (25)$$

这里, 路径 P 的可用带宽 $B\omega_P$ 、延迟 DL_P 、出错率 Ls_P 和用户支付的费用 EP_P 分别计算如下:

$$B\omega_P = \min\{b\omega_{l_i} \mid e_l \in P\} \quad (26)$$

$$DL_P = \sum_{e_l \in P} dl_l \quad (27)$$

$$Ls_P = 1 - \prod_{e_l \in P} (1 - ls_l) \quad (28)$$

$$EP_P = \sum_{e_l \in P} EP_{l_{xy}}^l \quad (29)$$

3 算法设计

人工鱼群算法是一种模拟鱼群行为的群体智能方法^[27]. 它主要模拟鱼的觅食、聚群和追尾行为, 通过人工鱼个体局部寻优, 达到在人工鱼群中突现全局最优. 本文设计的基于人工鱼群的 QoS 单播路由

算法描述如下。

3.1 解的表达、生成和适值函数

在本文中,人工鱼对应问题解即 QoS 单播路径,采用向量表示形式,组成路径的边按从源到目的地的方向依次作为向量元素.采用如下随机路径算法生成初始解。

1. 当前访问节点 $N_c = v_s$, 上次访问节点 $N_p = \text{Null}$, 将 N_p 压栈; 标记图中所有节点状态均为“未访问”。
2. 若 $N_c = \text{Null}$, 则失败结束; 若 $N_c \neq v_d$, 则转步 3, 否则转步 5。
3. 置 N_c 状态为“已访问”. 若 N_c 的所有相邻节点都处于“已访问”状态, 则弹出栈顶元素给 N_p , $N_c = N_p$, 转步 2。
4. 从 N_c 的相邻节点中任选一处于“未访问”状态的节点 N_n ; 从 N_c 与 N_n 之间的边中任选一条作为从 v_s 到 v_d 路径的组成边; 将 N_c 压栈, $N_c = N_n$, 转步 2。
5. 若路径满足式(22)~(25), 则把其作为初始解, 成功结束; 否则, 失败结束。

与人工鱼 f_k 对应的解的适值函数定义如下:

$$FT(f_k) = \sum_{e_i \in P} PD_{xy}^i \quad (30)$$

显然, 适值越小, 解越优。

3.2 人工鱼距离、行为及其选择

两条人工鱼 f_k 和 f_v 间的距离定义如下:

$$d(k, v) = \| f_k - f_v \| \quad (31)$$

式(31)表示在与 f_k 和 f_v 对应的向量中有 $d(k, v)$ 对分量不相同. 本文将 f_k 中这样的分量即边的集合记为 $D_k(k, v)$ 。

设 VD_k 表示 f_k 的感知距离, 则满足 $d(k, v) < VD_k$ 的所有 f_v 构成 f_k 的邻域. Sp 表示人工鱼移动步长, θ 表示拥挤度因子. f_k 觅食行为描述如下:

1. 设定 $CN, CN=0$ 。
2. 对 f_k , 在其邻域内任选一 f_v 。
3. 若 $FT(f_v) \geq FT(f_k)$, 则转步 4, 否则 f_k 向 f_v 方向移动一步: 随机产生整数 $s(1 \leq s \leq Sp)$, 若 $s > d(k, v)$, 则 $s = d(k, v)$; 在 $D_k(k, v)$ 中任选 s 条边进行变换, 使其与 f_v 中的对应边相同, 觅食行为结束。
4. $Cn = Cn + 1$. 若 $Cn < CN$, 则转步 2; 否则, f_k 随机移动一步: 随机产生整数 $s(1 \leq s \leq Sp)$, 在 f_k 中任选 s 条边进行随机变换, 觅食行为结束。

f_k 聚群行为描述如下:

1. 确定 f_k 邻域内所有人工鱼组成的集合 R_k 。
2. 确定 R_k 的中心位置 $f_c = (e_1^c, e_2^c, \dots, e_n^c)$, 其中, e_x^c 是 R_k 中的人工鱼在第 x 个分量上使用最多的边(若有多条这样的边, 则任选其一)。
3. 若 $\frac{FT(f_c)}{|R_k|} < FT(f_k) \cdot \theta$, 则 f_k 向 f_c 方向移动一步,

方法同觅食行为步 3; 否则, 执行觅食行为. 聚群行为结束。

f_k 追尾行为描述如下:

1. 从 R_k 中选出适值最小的 f_v (若有多个, 则任选其一), $f_{\min} = f_v, FT_{\min} = FT(f_v)$ 。
2. 确定与 f_{\min} 对应的 R_{\min} . 若 $\frac{FT_{\min}}{|R_{\min}|} < FT(f_k) \cdot \theta$, 则 f_k 向 f_{\min} 方向移动一步, 方法同觅食行为步 3; 否则, 执行觅食行为. 追尾行为结束。

行为选择采用试探法, 即对 f_k 分别模拟执行觅食、聚群和追尾行为, 得到 f_{k_p} 、 f_{k_s} 和 f_{k_f} : 若 f_{k_p} 、 f_{k_s} 或 f_{k_f} 对应的路径不连通, 则 $FT(f_{k_p})$ 、 $FT(f_{k_s})$ 或 $FT(f_{k_f})$ 置为正无穷大; 若 f_{k_p} 、 f_{k_s} 或 f_{k_f} 对应的路径存在环路, 则去环; 若 f_{k_p} 、 f_{k_s} 或 f_{k_f} 对应的路径不满足式(22)~式(25), 则 $FT(f_{k_p})$ 、 $FT(f_{k_s})$ 或 $FT(f_{k_f})$ 置为正无穷大; 若 $FT(f_{k_p})$ 、 $FT(f_{k_s})$ 和 $FT(f_{k_f})$ 三者不全为正无穷大, 则选择执行与最小适值对应的行为。

3.3 算法流程

本文设计的基于人工鱼群的 QoS 单播路由算法流程描述如下。

1. 设定人工鱼群规模 N , 根据 3.1 节生成 N 条人工鱼. 对每条 f_k , 设定 VD_k 、 Sp 和 θ 。
2. 对每条 f_k , 根据式(30)计算 $FT(f_k)$, 记当前适值最小的 f_k 为 f_{k^*} 。
3. 设定迭代次数 $I, j=1$ 。
4. 对每条 f_k , 根据 3.2 节执行选定的行为, 若 $FT(f_k) < FT(f_{k^*})$, 则 $k^* = k$ 。
5. 若 $j=I$, 则把 f_{k^*} 作为问题解, 结束; 否则, $j=j+1$, 转步 4。

4 仿真实现与性能评价

基于 NS2 (Network Simulator 2)^[30] 仿真实现了上述路由机制. 仿真时, 在路径每一跳上都有卫星、蜂窝和固网 3 个不同网络提供方提供的链路供选择, 在多个实际和虚拟网络拓扑上仿真运行本文机制、基于博弈论方法的模糊 QoS 单播路由机制^[31] (同本文机制相比, 该机制考虑了链路状态不精确和效用双赢, 但未考虑不精确用户 QoS 需求, 也未考虑对 ABC 的支持) 以及基于 Dijkstra 算法^[6] 的单播路由机制 (以下分别简称 A 机制、G 机制和 D 机制). 仿真时主要参数取值如下: $k=2$, $\epsilon=0.001$; $\alpha_B = \alpha_D = \alpha_L = 0.333$, 表示带宽、延迟和出错率在用户 QoS 需求中同等重要; $\beta_u = \beta_n = 0.5$, 表示

在选路时既不向网络提供方倾斜也不向用户倾斜;
 $VD_k = 5, Sp = 3, \theta = 0.618$.

表 2 是 3 种机制在 CERNET2 拓扑(拓扑 1)、CERNET 拓扑(拓扑 2)、GÉANT 拓扑(拓扑 3)和使用 Waxman2 模型^[32]生成的平均节点度数为 3.5 的拓扑(拓扑 4)上的性能比较结果. 这里, QoS 路由请求成功率指成功完成 QoS 路由的请求数占 QoS 路由请求总数的百分比, Nash 均衡下 Pareto 最优

比指达到 Nash 均衡下 Pareto 最优的解占找到的解总数的百分比. 从表 2 可以看出, 本文机制的性能更好. 此外, G 机制和 D 机制的时间复杂度均为 $O(n^2)$, n 为图上节点个数; 本文机制基于人工鱼群这一群体智能优化算法, 仿真实验时一般最多经过 25 次迭代即可收敛到最优解, 因此, 在网络规模较大即 n 较大时, 本文机制有一定优势.

表 2 性能比较

指标	拓扑 1	拓扑 2	拓扑 3	拓扑 4
	A : G : D	A : G : D	A : G : D	A : G : D
QoS 路由请求成功率	0.950 : 0.801 : 0.720	0.900 : 0.742 : 0.684	0.928 : 0.803 : 0.714	0.912 : 0.820 : 0.701
用户效用	0.347 : 0.312 : 0.299	0.353 : 0.330 : 0.301	0.362 : 0.335 : 0.304	0.382 : 0.357 : 0.321
卫星提供方效用	0.158 : 0.152 : 0.146	0.162 : 0.154 : 0.148	0.160 : 0.152 : 0.146	0.163 : 0.154 : 0.145
蜂窝提供方效用	0.175 : 0.165 : 0.157	0.186 : 0.176 : 0.154	0.194 : 0.178 : 0.157	0.200 : 0.184 : 0.158
固网提供方效用	0.170 : 0.158 : 0.154	0.184 : 0.169 : 0.158	0.186 : 0.171 : 0.155	0.189 : 0.176 : 0.156
网络提供方总效用	0.503 : 0.475 : 0.457	0.532 : 0.499 : 0.460	0.540 : 0.501 : 0.458	0.552 : 0.514 : 0.459
综合效用	0.850 : 0.787 : 0.756	0.885 : 0.829 : 0.761	0.902 : 0.836 : 0.762	0.934 : 0.871 : 0.780
Nash 均衡下 Pareto 最优比	0.912 : 0.628 : 0.171	0.922 : 0.743 : 0.199	0.938 : 0.725 : 0.183	0.954 : 0.750 : 0.176

5 结 论

本文引入模糊数学、概率论和博弈论相关知识, 基于人工鱼群算法, 设计并仿真实现了一种 ABC 支持型 QoS 单播路由机制, 寻找使用户和网络提供方效用达到或接近 Nash 均衡下 Pareto 最优的 QoS 单播路由. 仿真结果表明, 本文机制是可行和有效的. 算法与模型的实用化、原型系统的开发及对组播的扩展是今后研究的重点.

参 考 文 献

- [1] Eva Gustafsson, Annika Jonsson. Always best connected. *IEEE Wireless Communications*, 2003, 10(1): 49-55
- [2] Gabor Fodor, Anders Eriksson, Aimo Tuoriniemi. Providing quality of service in always best connected networks. *IEEE Communications Magazine*, 2003, 41(7): 154-163
- [3] Zahariadis T B, Vaxeankis K G, Tsantilas C P et al. Global roaming in next-generation networks. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(2): 145-151
- [4] Bob B, Vasilios D, Oliver H. A market managed multi-service Internet. *Computer Communications*, 2003, 26(4): 404-414
- [5] Wang Z, Crowcroft J. Quality-of-service routing for supporting multimedia applications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1996, 14(7): 1228-1234
- [6] Dijkstra E W. A note on two problems in connection with graphs. *Numerical Mathematics*, 1959, 1(1): 269-271

- [7] 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
- [8] Kim Moonseong, Bang Young-Cheol, Choo Hyunseung. New parameter for balancing two independent measures in routing path//*Proceedings of the International Conference of Computational Science and Applications (ICCSA 2004)*. Italy, 2004: 56-65
- [9] Erol Gelenbe. An approach to quality of service//*Proceedings of the 19th International Symposium of Computer and Information Sciences (ISCIS 2004)*. Turkey, 2004: 1-10
- [10] Orda A, Sprintson A. QoS routing: The precomputation perspective//*Proceedings of the 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*. Tel Aviv, Israel, 2000: 128-136
- [11] Cormen T H, Leiserson C E, Rivest R L. *Introduction to Algorithms*. 2nd Edition. Cambridge, MA: MIT Press, 2001
- [12] Shin K G, Chou C C. A distributed route-selection scheme for establishing real-time channels//*Proceedings of the IFIP 6th International Conference on High Performance Networking*. Ireland, 1995: 319-329
- [13] Chen S, Nahrsted K. On finding multi-constrained paths//*Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Communications*. Atlanta, 1998: 874-899
- [14] Xue Guoliang, Sen Arunabha, Sen A et al. Finding a path subject to many additive QoS constraints. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2007, 15(1): 201-211
- [15] Khadivi P, Samavi S, Todd T D, Saidi H. Multi-constraint QoS routing using a new single mixed metrics//*Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Communications*. Paris, 2004: 2042-2046

- [16] Zhao You-Jian, Zhang Tie-Lei, Cui Yong. Path reduction for multi-constrained quality-of-service routing. Chinese Journal of Computers, 2007, 30(12): 2090-2100 (in Chinese)
(赵有健, 张铁蕾, 崔勇. 多约束服务质量路由中的路径压缩算法. 计算机学报, 2007, 30(12): 2090-2100)
- [17] Wang Yu, Li Lemin, Xu Du. A multi-constrained quality of service routing based on metrics transform//Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Networking Sensing and Control. London, 2007: 525-529
- [18] Leonard Barolli, Akio Koyama. A genetic algorithm based routing method using two QoS parameters//Proceedings of the 13th International Workshop on Database and Expert Systems Applications. Aix-en-Provence France, 2002: 7-11
- [19] Marco Dorigo. Ant algorithms solve difficult optimization problems//Advances in Artificial Life: 6th European Conference. Prague Czech Republic, 2001: 11-22
- [20] 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)
- [21] Zheng Yan-Xing, Tian Jing, Dou Wen-Hua. A QoS routing algorithm based on Pareto optimal. Journal of Software, 2005, 16(8): 1484-1489 (in Chinese)
(郑彦兴, 田菁, 窦文华. 基于 Pareto 最优的 QoS 路由算法. 软件学报, 2005, 16(8): 1484-1489)
- [22] Chen Ping, Dong Tian-Lin, Shi Jian, Zhao Miao. A probability-based QoS unicast routing algorithm. Journal of Software, 2003, 14(3): 582-584 (in Chinese)
(陈萍, 董天临, 石坚, 赵淼. 一种基于概率的 QoS 单播路由算法. 软件学报, 2003, 14(3): 582-584)
- [23] Turgay Korkmaz, Marwan Krunz. Bandwidth-delay constrained path selection under inaccurate state information. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2003, 11(3): 384-398
- [24] Cohen A, Korach E, Last M et al. A fuzzy-based path ordering algorithm for QoS routing in non-deterministic communication networks. Fuzzy Sets and Systems, 2005(150): 401-417
- [25] Wang Xing-Wei, Yuan Chang-Qing, Zhang Jie, Huang Min. Fuzzy tower-based QoS unicast routing algorithm. Computer Applications, 2004, 24(10): 24-26 (in Chinese)
(王兴伟, 原长青, 张洁, 黄敏. 一种基于模糊塔的 QoS 单播路由选择算法. 计算机应用, 2004, 24(10): 24-26)
- [26] Wang Xing-Wei, Hou Mei-Jia, Wang Jun-Wei, Huang Min. A microeconomics-based fuzzy QoS unicast routing scheme in NGI//Proceedings of the International Conference Embedded and Ubiquitous Computing 2005. Japan, 2005: 376-384
- [27] Li Xiao-Lei, Shao Zhi-Jiang, Qian Ji-Xin. An optimizing method based on autonomous animals: Fish-swarm algorithm. Systems Engineering - Theory & Practice, 2002, 22(11): 32-38 (in Chinese)
(李晓磊, 邵之江, 钱积新. 一种基于动物自治体的寻优模式: 鱼群算法. 系统工程理论与实践, 2002, 22(11): 32-38)
- [28] Lorenz H, Orda Ariel. QoS routing in networks with uncertain parameters. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1998, 6(6): 768-778
- [29] Shi Xi-Quan. Game Theory. Shanghai: Shanghai University of Finance and Economics Press, 2000 (in Chinese)
(施锡铨. 博弈论. 上海: 上海财经大学出版社, 2000)
- [30] Xu Lei-Ming, Pang Bo, Zhao Yao. NS and Network Simulation. Beijing: Posts & Telecom Press, 2003: 1-9 (in Chinese)
(徐雷鸣, 庞博, 赵耀. NS 与网络模拟. 北京: 人民邮电出版社出版, 2003: 1-9)
- [31] Wang Xing-Wei, Hou Mei-Jia, Huang Min, Wang Qi. A game theory based fuzzy unicast QoS routing scheme. Chinese Journal of Computers, 2007, 30(1): 10-17 (in Chinese)
(王兴伟, 侯美佳, 黄敏, 王琦. 一种基于博弈论方法的模糊 QoS 单播路由机制. 计算机学报, 2007, 30(1): 10-17)
- [32] 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.

QIN Pei-Yu, born in 1985, M. S. candidate. His research interests include the scheme of QoS routing.

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.

Background

NGI (Next Generation Internet) needs to provide QoS (Quality of Service) routing and support ABC (Always Best

Connected). However, due to difficulty on exact measurement of NGI network status and exact expression of QoS re-

quirements, QoS routing should be based on fuzzy information. Meanwhile, with the gradual commercialization of network operation, ABC is not a user's own wishful thinking and both the network provider and the user profits should be considered, thus both-win should be supported.

With the Support of National Natural Science Foundation of China, 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 the National High Technology Research and Development Program (863 Program) of China, 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 an artificial fish swarm algorithm based and ABC supported QoS unicast routing scheme in NGI and got National Natural Science Founda-

tion of China support. This paper is the description of its results. The proposed scheme can not only adapt to the situation of inaccurate network status and flexible QoS requirement but also make the Pareto-optimum under the Nash equilibrium on the network provider utility and the user 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 and so on, the authors are doing the multicast extension to and developing the prototype system of the proposed scheme to promote its practicability.