

小世界优化 ABC 支持型单播路由机制

王兴伟, 杨海泉, 黄敏

(东北大学信息科学与工程学院, 沈阳 110004)

摘要:设计一种 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, 基于小世界优化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。仿真研究结果表明, 该算法是有效的。

关键词:总最佳连接; 服务质量单播路由; 小世界优化算法; Nash 均衡; Pareto 最优

Small-world Optimization ABC Supported Unicast Routing Scheme

WANG Xing-wei, YANG Hai-quan, HUANG Min

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

【Abstract】This paper proposes a QoS unicast routing scheme with Always Best Connected(ABC) supported. It uses the interval to describe the user QoS requirement and the edge (link) parameter and introduces the user satisfaction degree and the edge evaluation. With the help of the gaming analysis and based on the small-world optimization 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 research results show this algorithm is effective.

【Key words】Always Best Connected(ABC); QoS unicast routing; small-world optimization algorithm; Nash equilibrium; Pareto optimum

1 概述

随着 Internet 技术和移动通信技术等的发展与融合, 下一代互联网(Next Generation Internet, NGI)很可能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子网融合而成的一体化网络, 在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, 支持用户对 NGI 的总最佳连接(Always Best Connected, ABC)^[1], 实现服务质量(Quality of Service, QoS)全局漫游^[2]。

ABC 意味着用户在任何时间和任何地点都可以通过当前最佳方式连接 NGI, 而且每当有更好方式出现时就可以透明切换。然而, 在网络日益商业化运营的环境下, ABC 需要兼顾用户和网络提供方利益, 支持各方效用共赢。此外, “最佳”本身就是模糊的, 依赖很多因素。路由时依赖的链路状态信息难以精确测量, 用户 QoS 需求也难以准确表达。这些都使 ABC 支持型 QoS 路由变得非常复杂。

目前已提出了很多启发式和智能 QoS 单播路由算法^[3], 但是尚未从支持 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, QoS 单播路由机制如何支持用户和网络提供方效用共赢。为此, 本文设计了一种 ABC 支持型单播路由机制, 仿真实现和性能评价表明它是有效的。

2 问题描述

2.1 网络模型与路由请求

已知图 $G(V, E)$, 其中, 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。 $\forall e_l \in E$, 考虑如下参数: 网络提供方编号 Np_l , 可用带宽 $[Bw_{l_e}, Bw_{l_h}]$, 延迟 $[Dl_{l_e}, Dl_{l_h}]$,

出错率 $[Ls_{l_e}, Ls_{l_h}]$, 带宽单位成本 ct_l , $l = 1, 2, \dots, |E|$ 。用户 QoS 单播路由请求记为六元组:

$$\langle v_s, v_d, [bw_{rq_L}, bw_{rq_H}], [dl_{rq_L}, dl_{rq_H}], [ls_{rq_L}, ls_{rq_H}], P_u \rangle$$

元素依次代表源节点、目的节点、带宽约束、延迟约束、出错率约束和愿付费用。采用区间形式刻画带宽、延迟和出错率是为了适应边(链路)参数值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_l 向用户提供带宽 bw_l 的概率 G_{B_l} 与用户对在 e_l 上实际得到带宽 bw_l 的满意度 S_{B_l} 分别定义为

$$G_{B_l} = \begin{cases} 1 & bw_l = Bw_{l_e} \\ \left(\frac{Bw_{l_h} - bw_l}{Bw_{l_h} - Bw_{l_e}} \right)^k & Bw_{l_e} < bw_l < Bw_{l_h} \\ \varepsilon & bw_l = Bw_{l_h} \\ 0 & bw_l > Bw_{l_h} \end{cases} \quad (1)$$

基金项目:国家“863”计划基金资助项目(2006AA01Z214); 国家自然科学基金资助项目(60673159, 70671020); 新世纪优秀人才支持计划基金资助项目(NECT-05-0289); 教育部科学技术研究计划基金资助重点项目(108040); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20060145012, 20070145017); 辽宁省自然科学基金资助项目(20062022)

作者简介:王兴伟(1968-), 男, 教授、博士、博士生导师, 主研方向: 下一代互联网, 移动 Internet 和 IP/DWDM 光 Internet; 杨海泉, 硕士研究生; 黄敏, 教授、博士、博士生导师

收稿日期:2009-05-20 **E-mail:** wangxw@mail.neu.edu.cn

$$S_{B_i} = \begin{cases} 1 & bw_i < bw_{rq_H} \\ e^{-\left(\frac{bw_{rq_H} - bw_i}{bw_i - bw_{rq_L}}\right)^2} & bw_{rq_L} < bw_i < bw_{rq_H} \\ \varepsilon & bw_i = bw_{rq_L} \\ 0 & bw_i < bw_{rq_L} \end{cases} \quad (2)$$

设延迟取值在 $[Dl_l, Dl_u]$ 上均匀分布, 则 e_l 的延迟等于 dl_l 的概率 G_{D_l} 和用户对在 e_l 上实际经历延迟 dl_l 的满意度 S_{D_l} 分别定义为

$$G_{D_l} = \begin{cases} \frac{1}{Dl_u - Dl_l} & Dl_l \leq dl_l \leq Dl_u \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

$$S_{D_l} = \begin{cases} 1 - e^{-\left(\frac{dl_{rq_H} - dl_l}{dl_l}\right)^2} & dl_l < dl_{rq_H} \\ \varepsilon & dl_l = dl_{rq_H} \\ 0 & dl_l > dl_{rq_H} \end{cases} \quad (4)$$

设出错率取值在 $[Ls_l, Ls_u]$ 上均匀分布, 则 e_l 的出错率等于 ls_l 的概率 G_{L_l} 和用户对在 e_l 上实际经历出错率 ls_l 的满意度 S_{L_l} 分别定义为

$$G_{L_l} = \begin{cases} \frac{1}{Ls_u - Ls_l} & Ls_l \leq ls_l \leq Ls_u \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

$$S_{L_l} = \begin{cases} 1 - e^{-\left(\frac{ls_{rq_H} - ls_l}{ls_l}\right)^2} & ls_l < ls_{rq_H} \\ \varepsilon & ls_l = ls_{rq_H} \\ 0 & ls_l > ls_{rq_H} \end{cases} \quad (6)$$

其中, $k > 0$; ε 是远小于 1 的纯小数。

2.3 边评价

用户在 e_l 上实际占用带宽、实际经历延迟和实际经历出错率对其需求的适合隶属度函数即边带宽、延迟和出错率评价函数 $E_{B_i}, E_{D_i}, E_{L_i}$ 以及边质量综合评价函数 E_{C_i} 分别定义为

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

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

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

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

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 的重要程度, $0 < \alpha_B, \alpha_D, \alpha_L < 1, \alpha_B + \alpha_D + \alpha_L = 1$; E_{C_i} 反映用户对 e_l 提供的 QoS 的满意程度。

2.4 博弈分析

用户和网络提供方在边上博弈, 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。

用户有 n 种策略, 表示为 $\langle bw_{i1}, bw_{i2}, \dots, bw_{in} \rangle$, bw_{ix} 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 $\langle pc_{11}, pc_{12}, \dots, pc_{1m} \rangle$, 对应在 e_l 上不同质量下的 m 套带宽定价。带宽定价由基价和浮动价组成, 前者由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。 PB_l 是网络提供方在 e_l 上的带宽基价。在策略对

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

$$EP_{xy}^l = (PB_l + PF_{ly}^{ij}) \cdot bw_{ix} \quad (11)$$

$$CT_{xy}^l = ct_l \cdot bw_{ix} \quad (12)$$

表 1 边延迟与出错率同带宽浮动价之间对照关系

出错率	延迟	
	$[Dl_1, Dl_2]$	$[Dl_r, Dl_{r+1}]$
$[Ls_1, Ls_2]$	$\langle PF_{11}^{d1}, PF_{12}^{d1}, \dots, PF_{1m}^{d1} \rangle$	$\langle PF_{11}^{dr}, PF_{12}^{dr}, \dots, PF_{1m}^{dr} \rangle$
...
$[Ls_q, Ls_{q+1}]$	$\langle PF_{q1}^{dq}, PF_{q2}^{dq}, \dots, PF_{qm}^{dq} \rangle$	$\langle PF_{q1}^{dq}, PF_{q2}^{dq}, \dots, PF_{qm}^{dq} \rangle$

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

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

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

若图中边(即网络链路)是由 Q 个网络提供方提供的, 则用户和第 h ($1 \leq h \leq Q$) 个网络提供方在路径 P 上的效用分别计算如下:

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

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

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

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

其中, β_u 和 β_n 分别代表对用户和网络提供方效用的倾斜权值, $0 < \beta_u, \beta_n < 1, \beta_u + \beta_n = 1$ 。 PD_{xy}^l 值越小, 各方效用越大, 越均衡, 越能 Pareto 最优。

达到 Nash 均衡的 $\langle uu_{x^*y^*}^l, nu_{x^*y^*}^l \rangle$ 应满足:

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

若这样的策略对只有一个, 则将其作为最佳; 若有多个或没有, 则比较 Pareto 优势, 把与 PD_{xy}^l 最小值对应的策略对作为最佳(若还有多个, 则任选其一)。

2.5 数学模型

本文目标是在满足用户 QoS 需求同时使各方效用在所选路径上达到或接近 Nash 均衡下 Pareto 最优, 即

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

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

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

s.t.

$$Bw_P \leq bw_{rq_L} \quad (22)$$

$$Dl_P \leq dl_{rq_H} \quad (23)$$

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

$$EP_p = P_u \quad (25)$$

$$Bw_p = \min\{bw_l | e_l \in P\} \quad (26)$$

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

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

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

3 算法设计

小世界优化算法^[4]把优化过程视为在搜索空间中从侯选解向最优解传递信息的过程,利用小世界现象有效信息传递机理,在搜索过程中考虑小世界效应,即在局部搜索(局域短连接搜索)的基础上,引入全局随机搜索(随机长连接搜索),可有效避免陷入局部最优,收敛快。下面为基于小世界优化的ABC支持型QoS单播路由算法描述。

3.1 解的表达与初始解的生成

本文把路径作为解,对应小世界优化算法的传递节点,采用二进制编码 $P = x_1x_2 \dots x_{|E|}$, x_l 为1或0,分别表示对应的 e_l 是否在 P 上。随机生成初始解,即每一位编码随机赋值为0或1。随机生成 N 个初始解,构成初始解集 $S_p = \{P_1, P_2, \dots, P_N\}$ 。

3.2 解的适值函数与解间距

P 的适值函数定义如下:

$$FT(P) = \begin{cases} \sum_{e_l \in P} PD_{xy}^l & P \text{ 连通、无环且满足式(22)~(25)} \\ \infty & \text{否则} \end{cases} \quad (30)$$

显然,适值越小,与 P 对应的解越优。

$\forall P_i, P_j \in S_p$, 其间距定义如下:

$$d(P_i, P_j) = \|P_i - P_j\| \quad (31)$$

其中, $\|P_i - P_j\|$ 是 P_i 和 P_j 之间的海明距离。

P_i 的 ℓ 邻域定义为

$$\zeta^\ell(P_i) = \{P_j | 0 < \|P_i - P_j\| \leq \ell\}, \text{ 记}$$

$$\overline{\zeta^\ell(P_i)} = \{P_j | \|P_i - P_j\| > \ell\}, 1 \leq \ell \leq |E|。$$

3.3 短连接搜索和长连接搜索

引入局域短和随机长连接搜索算子 Ψ 和 Γ 。 Ψ 用于将信息从 P_i 传

递给 $\zeta^\ell(P_i)$ 中的目标节点 P_j' , 记作 $P_j' \leftarrow \Psi(P_i)$, ℓ 取值较小。

构造 Ψ 如下:任取 P_i , 对 P_i 任意相邻 k 位按位取反,得 P_i' , $k \leq \ell$ 。 Γ 在 $\overline{\zeta^\ell(P_i)}$ 中按预设概率随机选取一点作为 P_i' , 记作 $P_i' \leftarrow \Gamma(P_i)$, ℓ 取值较大。构造 Γ 如下:设定 ℓ 和随机长连接搜索概率 p_{ls} ;随机生成一纯小数,若小于 p_{ls} ,则随机长连接搜索结束;随机生成整数 μ 和 ν , $1 \leq \mu < \nu \leq |E|$, $|\mu - \nu + 1| \leq \ell$;对 P_i 从第 μ 位到第 ν 位按位对调,得 P_i' 。

3.4 算法流程

算法流程如下:

步骤 1 生成初始解集 $S_p = \{P_1, P_2, \dots, P_N\}$ 。

步骤 2 对每个 $P_i \in S_p$, 计算 $FT(P_i)$, 得最小适值 FT^* 和与之对应的 P^* 。

步骤 3 设定迭代次数 J 和每次迭代局域短连接搜索次数 L , $j=1$ 。

步骤 4 $l=1$ 。

步骤 5 任取 $P_i \in S_p$, 执行 $P_i' \leftarrow \Psi(P_i)$ 。

步骤 6 若 $FT(P_i') < FT(P_i)$, 则 $S_p = S_p - \{P_i\} + \{P_i'\}$ 。

步骤 7 若 $FT(P_i') < FT^*$, 则 $P^* = P_i'$, $FT^* = FT(P_i')$ 。

步骤 8 $l=l+1$ 。

步骤 9 若 $l \leq L$, 则转步骤 5。

步骤 10 任取 $P_i \in S_p$, 执行 $P_i' \leftarrow \Gamma(P_i)$ 。

步骤 11 若 $FT(P_i') < FT(P_i)$, 则 $S_p = S_p - \{P_i\} + \{P_i'\}$ 。

步骤 12 若 $FT(P_i') < FT^*$, 则 $P^* = P_i'$, $FT^* = FT(P_i')$ 。

步骤 13 $j=j+1$ 。

步骤 14 若 $j \leq J$, 则转步骤 4。

步骤 15 若 $FT^* = \infty$, 则路由失败结束;否则,输出 P^* 作为问题解,路由成功结束。

4 性能评价

基于 NS2 仿真实现了上述路由机制。在仿真时,设在路径每一跳上都有 3 个不同网络提供方提供的卫星、蜂窝和固网链路供选择,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^[5]以及基于 Dijkstra 算法的单播路由机制(以下分别简称 A 机制、G 机制和 D 机制)。

表 2 是它们在 CERNET2(拓扑 1)、CERNET(拓扑 2)、GÉANT(拓扑 3)和根据 Waxman2 模型生成的平均节点度为 3.5 的虚拟网络(拓扑 4)上的比较结果,可以看出本文机制性能更好。

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	0.937: 0.801:0.720	0.882: 0.742:0.684	0.925: 0.803:0.714	0.929: 0.820:0.701
用户效用	0.339: 0.312:0.299	0.351:0.330:0.301	0.359: 0.335:0.304	0.381: 0.357:0.321
卫星链路网络提供方效用	0.156: 0.152:0.146	0.158: 0.154:0.148	0.159: 0.152:0.146	0.158: 0.154:0.145
蜂窝链路网络提供方效用	0.182: 0.165:0.157	0.180: 0.176:0.154	0.186: 0.178:0.157	0.191: 0.184:0.158
固网链路网络提供方效用	0.173: 0.158:0.154	0.177: 0.169:0.158	0.178: 0.171:0.155	0.183: 0.176:0.156
网络提供方总效用	0.511: 0.475:0.457	0.515: 0.499:0.460	0.523: 0.501:0.458	0.533: 0.514:0.457
综合效用	0.850: 0.787:0.756	0.866: 0.829:0.761	0.882: 0.836:0.762	0.914: 0.871:0.778
Nash 均衡下 Pareto 最优比	0.891: 0.628:0.171	0.918: 0.743:0.199	0.923: 0.725:0.183	0.937: 0.750:0.176

5 结束语

支持 ABC 是 NGI 的基本需要,ABC 支持型路由是满足这种需要的基本手段。本文提出一种 ABC 支持型单播路由机制,引入概率论和模糊数学知识适应链路状态和用户 QoS 需求不精确,引入微观经济学知识兼顾用户和网络提供方利益,通过博弈分析,基于小世界优化算法,寻找在满足用户 QoS 需求的同时使各方效用在所选路径上达到或接近 Nash 均衡下 Pareto 最优的单播路径。仿真研究表明,本文提出的 ABC 支持型单播路由机制在路由请求成功率、效用和 Nash 均衡下 Pareto 最优比等方面具有明显优势。算法与模型的实用化、原型系统的开发及其对组播的扩展是今后研究工作的重点。

参考文献

[1] Gustafsson E, Jonsson A. Always Best Connected[J]. IEEE Wireless Communications, 2003, 10(1): 49-55.

(下转第 130 页)