

一种智能 ABC 支持型 QoS 切换决策机制

王兴伟, 郭 磊, 李雪娇, 黄 敏

(东北大学信息科学与工程学院, 辽宁沈阳 110004)

摘 要: 本文提出了一种总最佳连接 ABC(Always Best Connected)支持型服务质量 QoS(Quality of Service)切换决策机制,引入模糊数学和微观经济学等相关知识,刻画应用类型、QoS 需求、接入网络和移动终端,综合考虑应用 QoS 需求、用户愿付费用、用户对接入网络编码制式偏好、用户对接入网络供应商偏好、终端当前运动速度、终端当前剩余电量和接入网络状况等因素,通过博弈分析,基于小生境粒子群优化算法,寻找把 N 个终端分配到 M 个接入网络的最佳切换决策方案,使用户和网络提供方效用达到或接近 Nash 均衡下的 Pareto 最优.仿真结果表明,该机制是有效的.

关键词: 下一代互联网; 接入网络; 切换决策; 总最佳连接; 服务质量; 小生境粒子群优化

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2011)04-0748-09

Intelligent QoS Handover Decision Scheme with ABC Supported

WANG Xing-wei, GUO Lei, LI Xue-jiao, HUANG Min

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

Abstract: In this paper, a QoS (quality of service) handover decision scheme with ABC (always best connected) supported is proposed. With knowledge of fuzzy mathematics and microeconomics introduced, application types, QoS requirements, access networks and terminals are described. With application QoS requirements, costs user willing to pay, user preferences to access network coding schemes, user preferences to access network providers, terminal velocities, terminal battery capacities and access network conditions considered comprehensively, an optimal handover solution of assigning N terminals to M access networks is found based on niche PSO (Particle Swarm Optimization) algorithm. With the help of gaming analysis, Pareto optimum under Nash equilibrium of user utility and network provider utility is achieved or approached for the found solution. Simulation results showed that the proposed scheme was effective.

Key words: NGI (next generation Internet); access network; handover decision; ABC (always best connected); QoS (quality of service); Niche PSO (particle swarm optimization)

1 引言

随着 Internet 和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子网融合而成的一体化网络,出现接入网络异构多样化的局面,每一跳都可能存在多种不同类型接入网络供用户选择,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)^[1],实现服务质量 QoS^[2](quality of service)全局漫游^[3].

在支持 ABC 的 NGI 环境下,用户可固定或移动接入.在这种环境下,切换分成垂直切换和水平切换^[4],前者支持用户在异构网络间切换,后者是传统意义上的切换即支持用户在同构网络间切换.切换通常涉及系统发现、切换决策和切换执行三个阶段.在系统发现阶段,收

集来自不同接入网络发布的信息,包括接入成本和 QoS 参数等.在切换决策阶段,确定发生切换时应该为移动终端选择的接入网络.做出切换决策时,应该考虑接入网络和移动终端当前状况以及用户正在使用的应用类型等因素.在切换执行阶段,完成移动终端在接入网络间的切换.对于水平切换,切换决策简单,主要是确定是否需要切换以及切换时间点.对于垂直切换,切换决策复杂,需要在多个可供选择的异构接入网络间综合权衡.

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接入网络使用 NGI,无论用户移动与否,每当有更好的接入方式出现时,就可以透明切换.切换可能是因为用户移动的原因等而导致的水平或垂直切换,也可能是因为可供选择的接入网络状况、用户使用的移动终端状态或用户使用的应用的类型发生变化的

原因等而导致的垂直切换(尽管用户并未移动或者即使移动但并未移出当前接入网络覆盖范围).然而,“最佳”本身就是一个模糊概念,需要综合考虑多种因素,如应用 QoS 需求、用户愿付费用、用户偏爱、移动终端状况、接入网络状态等.在网络运营商业化的环境下,ABC 更不是用户一厢情愿的事,需要兼顾用户和网络提供方利益^[5].同时,应用 QoS 需求难以准确量化,具有很强的模糊性^[6],切换决策时需要支持对这些模糊信息的处理.同样,支持 ABC 不应导致切换的频繁发生,需要避免“乒乓效应”^[7].综上,支持 ABC 的 QoS 切换决策问题非常复杂,可以归纳如下:有同时被 M 个接入网络覆盖的 N 个待切换的终端,综合考虑应用 QoS 需求、用户愿付费用、用户偏爱、移动终端状况和接入网络状态等因素,确定把 N 个终端分配到 M 个接入网络的最佳方案,使得各方效用达到或接近 Nash 均衡下的 Pareto 最优^[8].该问题不仅属于模糊多目标优化决策问题,而且当 M 和 N 较大时从 M^N 个可能方案中选出最优方案的计算量极大,需要采用启发式或现代优化算法求解.

在文献[9]中,提出了一个基于马尔科夫过程的垂直切换决策算法,但是模型未考虑用户速度和位置信息.在文献[10]中,把垂直切换决策问题归纳为受限马尔科夫过程,在服从预期总接入成本约束的前提下,最大化连接的预期总报偿.在文献[11]中,提出了一个基于效用的接入网络选择策略,使用多个效用函数来寻求用户偏好和垂直切换决策之间的平衡.在文献[12]中,把垂直切换决策归纳为模糊多属性决策,提出了两个定级方法:简单加权 SAW(simple additive weighting)和理想方案相似度偏爱排序技术 TOPSIS(technique for order preference by similarity to ideal solution).在文献[13]中提出的垂直切换决策模式则是以分布式方式使用 SAW 定级方法.在文献[14]中,对 SAW、TOPSIS 和灰色关联分析 GRA(grey relational analysis)的性能进行了比较,为垂直切换决策给出了乘性指数加权方法.在文献[15]中,把切换决策归结为优化问题,每个候选网络都和一个成本函数相关联,而成本函数又依赖于带宽、延迟和功耗需求等多个因素.在文献[16]中,提出了一个类属切换决策函数,使用一组准则来评价可用接入网络质量.在文献[17]中,先用模糊逻辑推理系统处理多项切换准则,而后使用接入网络选择函数挑选合适的网络.

在文献[18]中,提出了一个灵巧切换决策机制,把决策过程分成优先级和正常两个阶段,在优先级阶段建立可用网络列表,在正常阶段使用记分函数.为了从列表中选出最佳可用网络,记分函数综合考虑链路容量、成本和功

耗.在文献[19]中,通过切换成本函数和切换阈值函数评价垂直切换决策,通过函数适应网络环境变化.在文献[20]中,提出了一个基于 QoS 协商的垂直切换决策模式,目标是向用户提供增强的 QoS,同时最大化网络收益.在文献[21]中,提出了一种基于 QoS 满意度评价的垂直切换决策方法,可以根据 QoS 进行自适应切换决策控制.在文献[22]中,提出了一种基于速度感知的垂直切换决策算法,可以自动调整以适应不同的节点运动速度.在文献[23]中,提出了一种基于模糊逻辑的预判辅助垂直切换决策算法,通过网络综合性能评价进行切换决策.

上述机制从多个不同角度对垂直切换决策机制进行了研究,但是对 ABC 情形下的切换决策问题考虑得还不够充分,涉及的决策因素还不够全面.本文引入模糊数学和微观经济学知识,刻画应用类型、QoS 需求、接入网络和移动终端,提出了一种 ABC 支持型 QoS 切换决策机制,通过博弈分析,基于小生境粒子群优化算法^[24],寻找把 N 个终端分配到 M 个接入网络的最佳切换决策方案,使用户和网络提供方效用达到或接近 Nash 均衡下的 Pareto 最优.

2 模型设计

2.1 应用类型、QoS 需求及其模糊度

基于区分服务^[25]思想,设 NGI 中有 K 种不同应用类型, $ATS = \{AT_1, \dots, AT_K\}$ 代表应用类型集合.不同应用类型的 QoS 需求不同,本文考虑带宽、延迟、延迟抖动、比特出错率、分组丢失率和安全等级等 6 个 QoS 参数,分别记作 BW 、 DL 、 JT 、 BE 、 PL 和 SL .由于用户对应用的 QoS 需求难以准确表达而且网络难以维持单一刚性 QoS 值,因此本文采用区间描述 QoS 参数,使用模糊度刻画 QoS 参数取值模糊程度.

应用类型与 QoS 参数取值之间的对应关系如表 1 所示.对于应用类型 AT_i ,定义带宽、延迟、延迟抖动、比特出错率、分组丢失率和安全等级的模糊度 FB_i 、 FD_i 、 FJ_i 、 FE_i 、 FL_i 和 FS_i 如式(1)~(6), $i = 1, \dots, K$.

$$FB_i = \frac{BW_i^h - BW_i^l}{BW_i^h + BW_i^l} \quad (1)$$

$$FD_i = \frac{DL_i^h - DL_i^l}{DL_i^h + DL_i^l} \quad (2)$$

表 1 应用类型与 QoS 参数取值对应关系

应用类型	带宽	延迟	延迟抖动	比特出错率	分组丢失率	安全等级
AT_1	$[BW_1^l, BW_1^h]$	$[DL_1^l, DL_1^h]$	$[JT_1^l, JT_1^h]$	$[BE_1^l, BE_1^h]$	$[PL_1^l, PL_1^h]$	$[SL_1^l, SL_1^h]$
...
AT_K	$[BW_K^l, BW_K^h]$	$[DL_K^l, DL_K^h]$	$[JT_K^l, JT_K^h]$	$[BE_K^l, BE_K^h]$	$[PL_K^l, PL_K^h]$	$[SL_K^l, SL_K^h]$

$$FJ_i = \frac{JT_i^h - JT_i^l}{JT_i^h + JT_i^l} \quad (3)$$

$$FE_i = \frac{BE_i^h - BE_i^l}{BE_i^h + BE_i^l} \quad (4)$$

$$FL_i = \frac{PL_i^h - PL_i^l}{PL_i^h + PL_i^l} \quad (5)$$

$$FS_i = \frac{SL_i^h - SL_i^l}{SL_i^h + SL_i^l} \quad (6)$$

显然,参数描述越精确,模糊度值越小.

2.2 接入网络模型

对于接入网络,使用如下参数进行刻画:

接入网络编号 $j, 1 \leq j \leq M, M$ 表示接入网络数.

接入网络供应商(如中国电信和中国移动等)标识

$$PI_j \in PIS, PIS = \{PI_1, \dots, PI_{|PIS|}\}.$$

接入网络类型(如蜂窝、WiFi、WiMAX、卫星网络和蓝牙网络等)标识 $TI_j \in TIS, TIS = \{TI_1, \dots, TI_{|TIS|}\}.$

接入网络支持的编码制式(TD-SCDMA、GSM、GPRS 和 IEEE 802.11b 等)集合 $CS_j \subseteq CIS, CIS = \{CI_1, \dots, CI_{|CIS|}\}.$

接入网络类型与其覆盖范围 CA_j 和支持的终端最高运动速度 MV_j 存在对应关系,如表 2 所示.

表 2 接入网络类型与其覆盖范围和支持的终端最高运动速度对应关系

接入网络类型	覆盖范围	支持的终端最高运动速度
TI_1	CA_1	MV_1
...
$TI_{ TIS }$	$CA_{ TIS }$	$MV_{ TIS }$

接入网络支持的应用类型集合 $NAS_j \subseteq ATS.$

接入网络支持的频谱范围 $FR_j.$

接入网络总带宽 $TB_j.$

接入网络当前可用带宽 $AB_j.$ AB_j^{\min} 表示接入网络 j 可用带宽下限, AB_j 低于 AB_j^{\min} 时,接入网络 j 性能会急剧下降.若 AB_j 不高于 AB_j^{\min} ,则不再接受终端切换或接入请求.这样做有利于防止“乒乓效应”的发生.

接入网络发出信号最低强度 $TP_j,$ 表示其发射信号在其覆盖范围内的最低强度.

接入网络单位时间单位带宽成本 $ct_j.$

接入网络 j 对 AT_i 类型应用的单位时间单位带宽售价 $pr_{ij},$ 见式(7).

$$pr_{ij} = pb_j + pf_{ij} \quad (7)$$

为促进理性消费带宽,基础价 pb_j 由接入网络供应商确定,分低价区、平价区和高价区^[26].

令 η_j 表示接入网络 j 的负荷率,计算如下:

$$\eta_j = 1 - \frac{AB_j}{TB_j} \quad (8)$$

$\eta_j \leq \eta_j^0$ 时,为低负荷,位于低价区, pb_j 按式(9)确定; $\eta_j \geq \eta_j^1$ 时,为高负荷,位于高价区, pb_j 通过拍卖^[27]确定;否则,为中负荷,位于平价区, pb_j 按式(10)确定.

$$pb_j = \begin{cases} pb_j^{\min}, & \eta_j < \eta_j^{\min} \\ \frac{A}{1 + \alpha \cdot \eta_j^{-\beta}}, & \eta_j^{\min} \leq \eta_j \leq \eta_j^0 \end{cases} \quad (9)$$

$$pb_i = \begin{cases} pb_j^{\max}, & \eta_j^{\max} < \eta_j < \eta_j^1 \\ B \cdot (2 - e^{-\delta \cdot (\eta_j - \eta_j^0)^2}), & \eta_j^0 \leq \eta_j \leq \eta_j^{\max} \end{cases} \quad (10)$$

这里, η_j^0 和 η_j^1 是预设经验值, $0 < \eta_j^0 < \eta_j^1 < 1.$ $pb_j^{\min}、pb_j^0$ 和 pb_j^{\max} 分别是低价区起步价、平价区起步价和平价区最高价, $pb_j^{\min} \leq pb_j^0 \leq pb_j^{\max},$ $\eta_j^{\min}、\eta_j^0$ 和 η_j^{\max} 是对应的负荷率. $\eta_j^{\min} \leq \eta_j \leq \eta_j^0$ 时, pb_j 类似升半柯西分布^[28], $\beta = 2,$ $\eta_j = \eta_j^0$ 时 $pb_j = pb_j^0,$ $\eta_j = \eta_j^{\min}$ 时 $pb_j = pb_j^{\min};$ $\eta_j^0 \leq \eta_j \leq \eta_j^{\max}$ 时, pb_j 类似升半正态分布^[28], $\eta_j = \eta_j^0$ 时 $pb_j = pb_j^0,$ $\eta_j = \eta_j^{\max}$ 时 $pb_j = pb_j^{\max};$ 由此可得计算 $A、\alpha、B$ 和 δ 的式(11)~(14).

$$A = pb_j^0 \cdot \left(1 + \frac{pb_j^0 - pb_j^{\min}}{pb_j^{\min} \cdot (\eta_j^{\min})^{-2} - pb_j^0 \cdot (\eta_j^0)^{-2}} \cdot (\eta_j^0)^{-2}\right) \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{pb_j^0 - pb_j^{\min}}{pb_j^{\min} \cdot (\eta_j^{\min})^{-2} - pb_j^0 \cdot (\eta_j^0)^{-2}} \quad (12)$$

$$B = pb_j^0 \quad (13)$$

$$\delta = - \frac{\ln\left(2 - \frac{pb_j^{\max}}{pb_j^0}\right)}{(\eta_j^{\max} - \eta_j^0)^2} \quad (14)$$

调节价 pf_{ij} 根据 AT_i 而定,以反映除带宽之外的其他 QoS 参数对售价的影响,见表 3.

表 3 接入网络 j 对不同应用类型的单位时间单位带宽调节价

接入网络 j 支持的应用类型	单位时间单位带宽调节价
AT_1	pf_{1j}
...	...
$AT_{ NAS_j }$	$pf_{ NAS_j j}$

2.3 终端模型

对于终端,使用如下参数进行刻画:

终端编号 $t, 1 \leq t \leq N, N$ 表示终端个数.

终端支持的应用类型集合 $TAS_t \subseteq ATS.$

终端支持的编码制式集合 $MCS_t \subseteq CIS.$

终端工作频率 $WF_t.$

终端接收最低信号强度 $RS_t,$ 表示终端能够感知的接收信号强度下限.

终端当前运动速度 $CV_t.$

终端当前剩余电量 RC_t 及其阈值 $C_{tc}.$

终端用户对 AT_i 类型应用单位时间单位带宽愿付费用 $HP_{it}.$

终端用户对接入网络编码制式偏好序列 $PC_t =$

$\{PC_{t1}, \dots, PC_{tq}\}, PC_{tp} \in CIS, 1 \leq q \leq |CIS|, 1 \leq p \leq q$, 按偏好程度从高到低排列。

终端用户对接入网络供应商偏好序列 $PP_t = \{PP_{t1}, \dots, PP_{tm}\}, PP_m \in PIS, 1 \leq m \leq |PIS|, 1 \leq n \leq m$, 按偏好程度从高到低排列。

2.4 QoS 满意度

若正在运行 AT_i 类型应用的终端 t 从接入网络 j 上实际得到 $\langle bw_{t,j}, dl_{t,j}, jt_{t,j}, be_{t,j}, pl_{t,j}, sl_{t,j} \rangle$, 则用户对其的评价计算如下:

$$EB_{t,j} = \begin{cases} 0, & bw_{t,j} < BW_i^l \\ \epsilon, & bw_{t,j} = BW_i^l \\ \left(\frac{bw_{t,j} - BW_i^l}{BW_i^h - BW_i^l} \right)^k, & BW_i^l < bw_{t,j} < BW_i^h \\ 1, & bw_{t,j} \geq BW_i^h \end{cases} \quad (15)$$

$$ED_{t,j} = \begin{cases} 0, & dl_{t,j} > DL_i^h \\ \epsilon, & dl_{t,j} = DL_i^h \\ 1 - e^{-\left(\frac{DL_i^h - dl_{t,j}}{DL_i^h - DL_i^l} \right)^k}, & DL_i^l < dl_{t,j} < DL_i^h \\ 1, & dl_{t,j} \leq DL_i^l \end{cases} \quad (16)$$

$$EJ_{t,j} = \begin{cases} 0, & jt_{t,j} > JT_i^h \\ \epsilon, & jt_{t,j} = JT_i^h \\ 1 - e^{-\left(\frac{JT_i^h - jt_{t,j}}{JT_i^h - JT_i^l} \right)^k}, & JT_i^l < jt_{t,j} < JT_i^h \\ 1, & jt_{t,j} \leq JT_i^l \end{cases} \quad (17)$$

$$EE_{t,j} = \begin{cases} 0, & be_{t,j} > BE_i^h \\ \epsilon, & be_{t,j} = BE_i^h \\ 1 - e^{-\left(\frac{BE_i^h - be_{t,j}}{BE_i^h - BE_i^l} \right)^k}, & BE_i^l < be_{t,j} < BE_i^h \\ 1, & be_{t,j} \leq BE_i^l \end{cases} \quad (18)$$

$$EL_{t,j} = \begin{cases} 0, & pl_{t,j} > PL_i^h \\ \epsilon, & pl_{t,j} = PL_i^h \\ 1 - e^{-\left(\frac{PL_i^h - pl_{t,j}}{PL_i^h - PL_i^l} \right)^k}, & PL_i^l < pl_{t,j} < PL_i^h \\ 1, & pl_{t,j} \leq PL_i^l \end{cases} \quad (19)$$

$$ES_{t,j} = \begin{cases} 0, & sl_{t,j} < SL_i^l \\ \epsilon, & sl_{t,j} = SL_i^l \\ \left(\frac{sl_{t,j} - SL_i^l}{SL_i^h - SL_i^l} \right)^k, & SL_i^l < sl_{t,j} < SL_i^h \\ 1, & sl_{t,j} \geq SL_i^h \end{cases} \quad (20)$$

用户对 $bw_{t,j}, dl_{t,j}, jt_{t,j}, be_{t,j}, pl_{t,j}$ 和 $sl_{t,j}$ 的满意度及对 QoS 的综合满意度分别计算如下:

$$SB_{t,j} = \frac{\alpha_B \cdot EB_{t,j}}{\beta_B \cdot FB_i + 1} \quad (21)$$

$$SD_{t,j} = \frac{\alpha_D \cdot ED_{t,j}}{\beta_D \cdot FD_i + 1} \quad (22)$$

$$SJ_{t,j} = \frac{\alpha_J \cdot EJ_{t,j}}{\beta_J \cdot FJ_i + 1} \quad (23)$$

$$SE_{t,j} = \frac{\alpha_E \cdot EE_{t,j}}{\beta_E \cdot FE_i + 1} \quad (24)$$

$$SL_{t,j} = \frac{\alpha_L \cdot EL_{t,j}}{\beta_L \cdot FL_i + 1} \quad (25)$$

$$SS_{t,j} = \frac{\alpha_S \cdot ES_{t,j}}{\beta_S \cdot FS_i + 1} \quad (26)$$

$$SQ_{t,j} = \omega_B \cdot SB_{t,j} + \omega_D \cdot SD_{t,j} + \omega_J \cdot SJ_{t,j} + \omega_E \cdot SE_{t,j} + \omega_L \cdot SL_{t,j} + \omega_S \cdot SS_{t,j} \quad (27)$$

这里, k 是常数, ϵ 是远小于 1 的纯小数; $\alpha_B, \alpha_D, \alpha_J, \alpha_E, \alpha_L, \alpha_S, \beta_B, \beta_D, \beta_J, \beta_E, \beta_L$ 和 β_S 是量纲调节系数; $\omega_B, \omega_D, \omega_J, \omega_E, \omega_L$ 和 ω_S 是权重系数, $\omega_B + \omega_D + \omega_J + \omega_E + \omega_L + \omega_S = 1$, 反映不同 QoS 参数对应用的相对重要程度, 可根据经验设定, 也可通过层次分析法^[29] 等获得. 显然, QoS 参数描述越精确, 用户对实际得到 QoS 的评价越高, 用户对 QoS 的满意度越高.

2.5 价格满意度

如果接入网络 j 对终端 t 上正在运行的 AT_i 类型应用确定的单位时间单位带宽售价为 pr_{ij} , 则用户对接入网络的价格满意度定义如下:

$$SP_{t,j} = \begin{cases} 1, & pr_{ij} \leq HP_{it} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (28)$$

2.6 接入网络编码制式偏好满足度

终端用户对接入网络编码制式偏好满足度定义如下:

$$ST_{t,j} = \begin{cases} \frac{1}{x^2}, & CI_{t,j} \in PC_t \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (29)$$

这里, $CI_{t,j} \in CIS$ 是终端 t 切换到接入网络 j 时使用的编码制式标识, x 是 $CI_{t,j}$ 在 PC_t 中的序号, $1 \leq x \leq |PC_t|$.

2.7 接入网络供应商偏好满足度

终端用户对接入网络供应商偏好满足度定义如下:

$$SR_{t,j} = \begin{cases} \frac{1}{y^2}, & PI_{t,j} \in PP_t \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (30)$$

这里, $PI_{t,j} \in PIS$ 是终端 t 切换到的接入网络 j 的供应商标识, y 是 $PI_{t,j}$ 在 PP_t 中的序号, $1 \leq y \leq |PP_t|$.

2.8 运动速度适合度

终端当前运动速度快, 则应该考虑选择切换进入

覆盖范围大的接入网络,这样做有利于减少切换次数.定义接入网络 j 对终端 t 用户当前运动速度的适合度如下:

$$SM_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{z^2}, & CV_t \leq MV_j \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (31)$$

这里, z 是所有接入网络类型按覆盖范围从大到小排列时 TI_j 的序号, $1 \leq z \leq |TIS|$.

2.9 电池电量适合度

终端当前剩余电量低,则应考虑切换进入覆盖范围小的接入网络,因为终端的发送和接收功耗可以较低,有利于延长终端工作时间.定义接入网络 j 对终端 t 当前剩余电量的适合度如下:

$$SW_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{d^2}, & RC_t \leq C_{ic} \\ 1, & \text{否则} \end{cases} \quad (32)$$

这里, d 是所有接入网络类型按覆盖范围从小到大排列时 TI_j 的序号, $1 \leq d \leq |TIS|$.

2.10 博弈分析

接入网络 j 有两种策略 a_1 和 a_2 , 分别表示愿意和不愿意接受终端 t 切换进入. 终端 t 有两种策略 b_1 和 b_2 , 分别表示愿意和不愿意选择切换进入接入网络 j . 定义接入网络 j 和终端 t 的收益矩阵 NP 和 TP 分别如下:

$$NP = \begin{bmatrix} pr_{ij} - ct_j & pr_{ij} - ct_j \\ -\mu \cdot (pr_{ij} - ct_j) & -(pr_{ij} - ct_j) \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$TP = \begin{bmatrix} HP_{it} - pr_{ij} & -\mu \cdot (HP_{it} - pr_{ij}) \\ HP_{it} - pr_{ij} & -(HP_{it} - pr_{ij}) \end{bmatrix} \quad (34)$$

矩阵的上下两个行向量分别对应 a_1 和 a_2 , 左右两个列向量分别对应 b_1 和 b_2 . 在 NP 中, np_{21} 和 np_{22} 添加负号是因为若接入网络拒绝终端切换进入请求则会失去将要获得的收益. $\mu > 1$ 是惩罚因子^[30], 表示若接入网络拒绝愿意选择切换进入它的终端则会对终端今后是否愿意选择切换进入它造成负面影响. 在 TP 中, tp_{12} 和 tp_{22} 的负号以及 μ 的含义与 NP 中的类似. 如果下列不等式^[8]满足:

$$\begin{cases} np_{c^*d^*} \geq np_{c^*d} \\ tp_{c^*d^*} \geq tp_{c^*d} \end{cases} \quad (35)$$

则 $\{a_{c^*}, b_{d^*}\}$ 是使各方收益达到 Nash 均衡的策略对, $c^*, d^*, c, d = 1, 2$.

2.11 效用计算

引入权重系数矩阵 $\mathbf{A} = [\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 \lambda_5 \lambda_6]$, 用来反映应用 QoS 需求、接入网络单位时间单位带宽售价与用户愿付费用、用户对接入网络编码制式偏好、用户对接入网络供应商偏好、终端当前运动速度和终端当前剩余电量等因素在为终端确定切换进入的接入

网络的决策中的相对重要程度,可根据经验设定,也可通过层次分析法等获得, $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 = 1$. 引入评价矩阵 $G_{t,j} = [SQ_{t,j} \ SP_{t,j} \ ST_{t,j} \ SR_{t,j} \ SM_{t,j} \ SW_{t,j}]^T$. 引入调节系数 Ω , 用来反映博弈各方是否达到 Nash 均衡对效用的影响.

$$\Omega = \begin{cases} 1, & \text{Nash 均衡} \\ < 1, & \text{非 Nash 均衡} \end{cases} \quad (36)$$

综合各方面因素,定义正在运行 AT_i 类型应用的终端 t 因选择切换进入接入网络 j 的效用和接入网络 j 因正在运行 AT_i 类型应用的终端 t 切换进入的效用如下:

$$uu_{t,j} = \begin{cases} \Omega \cdot \mathbf{A} \cdot G_{t,j} \cdot \frac{(HP_{it} - pr_{ij})}{HP_{it}}, & \text{终端 } t \text{ 切换进入} \\ 0, & \text{接入网络 } j \\ & \text{否则} \end{cases} \quad (37)$$

$$nu_{t,j} = \begin{cases} \Omega \cdot \mathbf{A} \cdot G_{t,j} \cdot \frac{(pr_{ij} - ct_j)}{pr_{ij}}, & \text{终端 } t \text{ 切换进入} \\ 0, & \text{接入网络 } j \\ & \text{否则} \end{cases} \quad (38)$$

显然,效用越大越好.

2.12 数学模型

本文寻找的 N 个终端对 M 个接入网络的切换决策方案使用户和网络提供方效用达到或接近 Nash 均衡下的 Pareto 最优,数学描述如下:

$$\text{maximize} \{ uu_{t,j} \} \quad (39)$$

$$\text{maximize} \{ nu_{t,j} \} \quad (40)$$

$$\text{maximize} \left\{ \sum_{t=1}^N \sum_{j=1}^M uu_{t,j} \right\} \quad (41)$$

$$\text{maximize} \left\{ \sum_{t=1}^N \sum_{j=1}^M nu_{t,j} \right\} \quad (42)$$

$$\text{maximize} \left\{ \sum_{t=1}^N \sum_{j=1}^M (uu_{t,j} + nu_{t,j}) \right\} \quad (43)$$

3 算法设计

粒子群优化算法^[31]属于群体智能方法,已得到广泛应用,但存在易陷入局部极值和搜索效率低等缺陷.在文献[24]中,提出了小生境粒子群优化算法,引入小生境技术,在搜索过程中始终赋予粒子生命力.为防止陷入局部极值,每当粒子速度增量小于设定值时,就赋予其一随机速度,强迫其运动.一旦两粒子位置过近,就对其中适值较差的粒子随机化重新启动.对适值差的粒子也重新启动.这样做加快了算法对最优解的收敛速度.本文基于小生境粒子群优化算法寻找将 N 个终端切换到 M 个接入网络中的最优决策方案.

3.1 粒子位置和速度

粒子 q 的位置 $P_q = \langle p_{q_1}, \dots, p_{q_n} \rangle$ 代表问题解,表

示 N 个终端对 M 个接入网络的一种切换方案, p_{q_t} 是终端 t 切换到的接入网络的编号. q 的飞行速度记作 $V_q = \langle v_{q_1}, \dots, v_{q_N} \rangle$. 经过飞行后 q 的新位置记作 $P'_q = \langle p'_{q_1}, \dots, p'_{q_N} \rangle$. $v_{q_t} = p_{q_t} \rightarrow p'_{q_t}$, 表示终端 t 从接入网络 p_{q_t} 切换到接入网络 p'_{q_t} . 这里, $t = 1, \dots, N$. 位置与速度之间关系描述如下:

$$P'_q = P_q \pm V_q \quad (44)$$

$$V_q = P'_q \mp P_q \quad (45)$$

这里, \pm 表示对 q 执行 V_q 代表的飞行, 使 q 的位置从 P_q 到 P'_q ; \mp 表示推出从 P_q 到 P'_q 所需的 V_q . 到 P'_q 后, q 的飞行速度更新为 $V'_q = \langle v'_{q_1}, \dots, v'_{q_N} \rangle$:

$$V'_q = \left(\frac{w}{w + s_1 \times r_1 + s_2 \times r_2} \otimes V_q \right) \oplus \left(\frac{s_1 \times r_1}{w + s_1 \times r_1 + s_2 \times r_2} \otimes (P_q^b \mp P_q) \right) \oplus \left(\frac{s_2 \times r_2}{w + s_1 \times r_1 + s_2 \times r_2} \otimes (P_g^b \mp P_q) \right) \quad (46)$$

这里, w 是惯性权重, 用于调节粒子沿原方向移动的概率; P_q^b 是粒子 q 迄今经历过的最佳位置; P_g^b 是整个粒子群迄今经历过的最佳位置; s_1 和 s_2 是加速常数, r_1 和 r_2 是随机纯小数, $s_1 \times r_1$ 和 $s_2 \times r_2$ 分别用于调节粒子向 P_q^b 和 P_g^b 移动的概率; \oplus 表示多项选一; \otimes 表示以其左操作数代表的概率选择执行其右操作数代表的动作.

定义粒子飞行速度增量如下:

$$\Delta V = V'_q \text{ 和 } V_q \text{ 中不同 } v'_{q_t} \text{ 和 } v_{q_t} \text{ 的对数, } 1 \leq t \leq N \quad (47)$$

定义粒子位置间距离如下:

$$DP = P_{q_1} \text{ 和 } P_{q_2} \text{ 中不同 } p_{q_1} \text{ 和 } p_{q_2} \text{ 的对数, } 1 \leq t \leq N \quad (48)$$

3.2 可行解和适值函数

P_q 对应的问题解是可行的当且仅当 $\forall t ((TAS_t \subseteq NAS_{p_{q_t}}) \wedge (WF_t \subseteq FR_{p_{q_t}}) \wedge (MCS_t \cap CS_{p_{q_t}} \neq \varphi) \wedge (CV_t \leq MV_{p_{q_t}}) \wedge (RS_t \leq TP_{p_{q_t}}) \wedge ((AB_{p_{q_t}} - BW_t^h) \geq AB_{p_{q_t}}^{\min}))$.

适值函数 $FT(P_q)$ 定义如下:

$$FT(P_q) = \begin{cases} \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{uu_{i,p_{q_t}}} + \frac{1}{nu_{i,p_{q_t}}} \right), & P_q \text{ 是可行的} \\ +\infty, & \text{否则} \end{cases} \quad (49)$$

显然, 用户和网络提供方效用越大且越均衡, 各方效用越接近或达到 Nash 均衡下的 Pareto 最优, 对应的切换方案越好, $FT(P_q)$ 值越小.

3.3 粒子群初始化

对每个粒子位置和飞行速度初始化如下:

步骤 1: 设定粒子群规模 S .

步骤 2: $q = 1$.

步骤 3: $t = 1$.

步骤 4: 任选一接入网络编号赋值给 p_{q_t} .

步骤 5: $V_{q_t} = p_{q_t} \rightarrow p_{q_t}$.

步骤 6: $t = t + 1$.

步骤 7: 若 $t \leq N$, 则转步骤 4.

步骤 8: $q = q + 1$.

步骤 9: 若 $q \leq S$, 则转步骤 3, 否则结束.

3.4 算法描述

步骤 1: 设定迭代次数 IT 、粒子群规模 PS 、粒子飞行速度增量下限 ΔV_b 、粒子位置间距离下限 DP_b 和适值末位淘汰个数 WC 、粒子精英位置集 $ES = \varphi$.

步骤 2: 根据 3.3 节完成粒子群初始化.

步骤 3: 根据式(49)计算 $FT(P_q)$, $q = 1, 2, \dots, PS$; 记最小适值为 FT^* , 将与 FT^* 对应的粒子位置放入 ES ; 记与 FT^* 对应的粒子位置(若有多个, 则任取其一)为 P_g^b .

步骤 4: $it = 1$.

步骤 5: $P_q^b = P_q$, $q = 1, 2, \dots, PS$.

步骤 6: 根据式(46)计算 V'_q ; 对 $\Delta V \leq \Delta V_b$ 的 V'_q , 随机调整 v'_{q_t} 使之满足 $\Delta V > \Delta V_b$; $q = 1, 2, \dots, PS$, $t = 1, \dots, N$.

步骤 7: 根据式(44)计算 P'_q ; 对 $DP \leq DP_b$ 的 P'_q 和 P'_q , 选择适值大的粒子随机调整其分量使之满足 $DP > DP_b$; $q, q_1, q_2 = 1, 2, \dots, PS$.

步骤 8: 选择前 WC 个适值最大的粒子, 根据 3.3 节对其重新初始化.

步骤 9: 若 $FT(P'_q) < FT(P_q^b)$, 则 $P_q^b = P'_q$; 若当前最小适值小于 FT^* , 则记其为 FT^* 并把与之对应的所有粒子位置作为新的 ES ; 如果当前最小适值等于 FT^* , 则把与之对应的所有粒子位置并入 ES ; 从 ES 中任选一粒子位置作为新的 P_g^b ; $P_q = P'_q$, $V_q = V'_q$, $q = 1, 2, \dots, PS$.

步骤 10: $it = it + 1$.

步骤 11: 如果 $it \leq IT$, 则转步骤 6.

步骤 12: 若 $FT^* \neq +\infty$, 则输出 P_g^b 对应的切换方案作为问题解, 成功结束; 否则, 失败结束.

4 仿真实验与性能评价

基于网络仿真器 NS2(network simulator 2)^[32] 仿真实现了本文机制. 在如图 1 所示的三种不同类型接入网络重叠覆盖的六角形蜂窝拓扑上仿真运行本文机制、基于贪心策略^[33]的切换决策机制以及多服务垂直切换决策机制^[34](以下分别简称机制 1、机制 2 和机制 3), 对用户效用、网络提供方效用、Nash 均衡下 Pareto 最优解

比例、QoS 满意度、价格满意度、接入网络编码制式偏好满足度、接入网络供应商偏好满足度、运动速度适合度和电池电量适合度进行了比较. 仿真时生成 3、5、10、20、50 个终端切换请求各 500 次进行切换决策, 取平均值作为仿真结果, 如图 2 ~ 图 10.

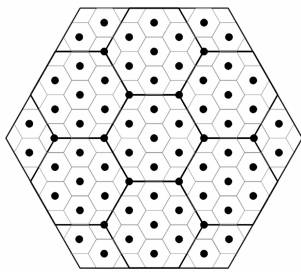


图1 仿真拓扑

从图 2 和图 3 可以看出, 尽管随着终端切换请求数的增加, 三种机制的效用都有所下降, 但是机制 1 的效用值始终远高于机制 2 和机制 3, 这是因为机制 1 的优化目标是各方效用的最大化, 机制 2 仅考虑接入网络负

荷量, 机制 3 仅考虑了用户 QoS. 从图 4 可以看出, 机制 1 远优于机制 2 和机制 3, 这是因为机制 1 在寻找最优解的过程中不仅考虑了用户和网络提供方博弈时是否达到 Nash 均衡对用户效用和网络提供方效用的影响, 而且促进各方效用最大化且尽可能均衡, 从而使解达到或接近 Nash 均衡下的 Pareto 最优, 而机制 2 和机制 3 在求解过程中未考虑这方面因素. 从图 5 - 图 10 可以看出, 除 QoS 满意度之外, 机制 1 均远优于机制 2 和机制 3, 这是因为机制 1 全面考虑了这些指标的满足, 在寻找最优解的过程中使得它们均得到优化, 而机制 2 和机制 3 在求解过程中均未考虑上述因素. 机制 1 在 QoS 满意度方面虽略低于机制 3 但远高于机制 2, 这是因为机制 3 在切换决策时以 QoS 为依据, 机制 2 未考虑 QoS, 机制 1 综合考虑各方面因素而非仅考虑 QoS.

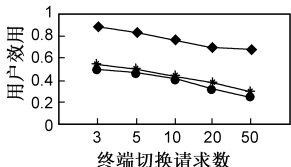


图2 用户效用

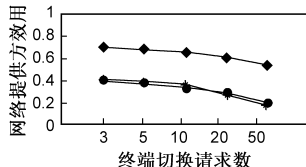


图3 网络提供方效用

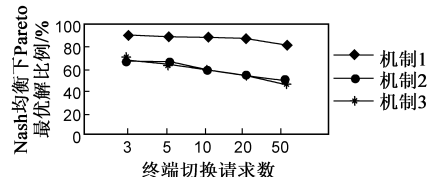


图4 Nash均衡下Pareto最优解比例

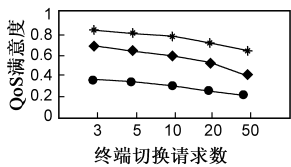


图5 QoS满意度

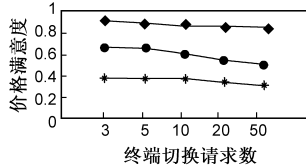


图6 价格满意度

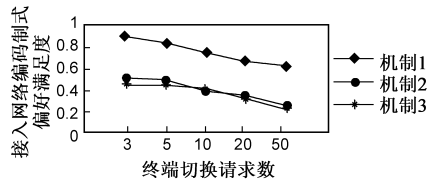


图7 接入网络编码制式偏好满足度

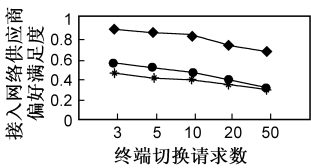


图8 接入网络供应商偏好满足度

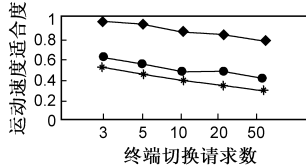


图9 运动速度适合度

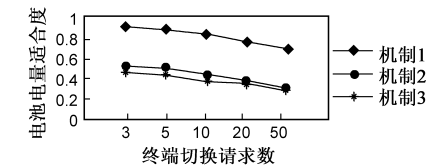


图10 电池电量适合度

5 结论

随着接入网络异构多样化以及移动接入逐渐占据主导地位, NGI 需要具备支持 ABC 的 QoS 切换能力. 本文提出一种 ABC 支持型 QoS 切换决策机制, 兼顾用户和网络提供方利益, 不仅充分考虑了接入网络状态(如当前负荷等)和终端状况(如终端当前运动速度和终端当前剩余电量等), 而且充分考虑了应用 QoS 需求、用户对接入网络编码制式偏好和用户对接入网络供应商偏好等的满足. 基于 NS2 对其进行了仿真实现和性能评价, 结果表明: 本文机制在用户效用、网络提供方效用、Nash 均衡下 Pareto 最优解比例、QoS 满意度、价格满意度、接入网络编码制式偏好满足度、接入网络供应商偏好满足度、运动速度适合度和电池电量适合度等指

标上表现良好. 模型和算法的进一步实用化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.

[2] 刘积仁, 王兴伟, 张应辉. 分布式多媒体系统通信平台及若干相关技术的探讨[J]. 电子学报, 1997, 25(11): 54 - 59.

Liu Ji-ren, Wang Xing-wei, Zhang Ying-hui. Discussions on communication platforms and some related techniques in distributed multimedia systems[J]. Acta Electronica Sinica, 1997, 25(11): 54 - 59. (in Chinese)

[3] Theodore B Z, Konstantinos G V, et al. Global roaming in next-

- generation networks [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(2): 145 – 151.
- [4] McNair J, Zhu F. Vertical handoffs in fourth-generation multi-network environments [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2004, 11(3): 8 – 15.
- [5] Bob B, Vasilios D, Oliver H. A market managed multi-service internet [J]. *Computer Communications*, 2003, 26(4): 404 – 414.
- [6] Giupponi L, Perez-Neira A I. Fuzzy-based spectrum handoff in cognitive radio networks [A]. In Proc. CrownCom'08 [C]. Piscataway: IEEE Computer Society, 2008. 1 – 6.
- [7] Kim W, Lee B J, Song J S, et al. Ping-Pong avoidance algorithm for vertical handover in wireless overlay networks [A]. In Proc. IEEE VTC'07 [C]. Piscataway: IEEE Computer Society, 2007. 1509 – 1512.
- [8] 朱·弗登博格, 让·梯若尔. 博弈论 [M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2003. 10 – 23.
Drew Fudenberg, Jean Tirole. *Game Theory* [M]. Beijing: China Renmin University Press, 2003. 10 – 23. (in Chinese)
- [9] Stevens-Navarro E, Lin Y, Wong W. An MDP-based vertical handoff decision algorithm for heterogeneous wireless networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(2): 1243 – 1254.
- [10] Sun C, Enrique S N, et al. A constrained MDP-based vertical handoff decision algorithm for 4G wireless networks [A]. In Proc. ICC'08 [C]. Piscataway: IEEE Inc., 2008. 2169 – 2174.
- [11] Ormond O, Murphy J, Muntean G. Utility-based intelligent network selection in beyond 3G systems [A]. In Proc. ICC'06 [C]. Piscataway: IEEE Inc., 2006. 1831 – 1836.
- [12] Zhang W. Handover decision using fuzzy MADM in heterogeneous networks [A]. In Proc. WCNC'04 [C]. Piscataway: IEEE Inc., 2004. 653 – 658.
- [13] Tawil R, Salazar O, Pujolle G, et al. A decision scheme for vertical handoff in overlay wireless networks [A]. In Proc. Innovations'07 [C]. Piscataway: IEEE Computer Society, 2007. 436 – 440.
- [14] Stevens-Navarro E, Wong W. Comparison between vertical handoff decision algorithms for heterogeneous wireless networks [A]. In Proc. VTC'06 [C]. Piscataway: IEEE Inc., 2006. 947 – 951.
- [15] Chen W, Shu Y. Active application oriented vertical handoff in next generation wireless networks [A]. In Proc. WCNC'05 [C]. Piscataway: IEEE Inc., 2005. 1383 – 1388.
- [16] Hasswa A, Nasser N, Hassanein H. Generic vertical handoff function for heterogeneous wireless networks [A]. In Proc. WOCN'05 [C]. Piscataway: IEEE Inc., 2005. 239 – 243.
- [17] Nkansa-Gyekye Y, Agbinya J. Vertical handoff decision algorithm for UMTS-WLAN [A]. In Proc. AusWireless'07 [C]. Piscataway: IEEE Computer Society, 2007. 37 – 37.
- [18] Chen L, Sun T, Chen B, et al. A smart decision model for vertical handoff [A]. In Proc. ANWIRE'04 [C]. Piscataway: IEEE Inc., 2004. 1 – 5.
- [19] Hassawa A, Nasser N, Hassanein H. Tramcar: a context-aware cross-layer architecture for next generation heterogeneous wireless networks [A]. In Proc. ICC'06 [C]. Piscataway: IEEE Inc., 2006. 240 – 245.
- [20] Song Q, Jamalipour A. A quality of service negotiation-based vertical handoff decision scheme in heterogeneous wireless systems [J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 191: 1059 – 1074.
- [21] 时岩, 陈山枝. 一种基于 QoS 满意度评价的 mSCTP 垂直切换决策方法 [J]. *微电子学与计算机*, 2008, 25(2): 9 – 13.
Shi Yan, Chen Shan-zhi. A QoS satisfaction degree evaluation based vertical handoff decision method for mSCTP [J]. *Microelectronics & Computer*, 2008, 25(2): 9 – 13. (in Chinese)
- [22] 刘敏, 李忠诚, 过晓冰. 一种基于速度感知的垂直切换算法 [J]. *电子学报*, 2008, 30(6): 1198 – 1201.
Liu Min, Li Zhong-cheng, Guo Xiao-bing. A speed sensitive vertical handoff algorithm [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 30(6): 1198 – 1201. (in Chinese)
- [23] 刘侠, 蒋铃鸽, 何晨. 一种基于模糊逻辑的预判决辅助垂直切换算法 [J]. *电子学报*, 2007, 30(10): 1989 – 1993.
Liu Xia, Jiang Ling-ge, He Chen. A novel vertical handoff algorithm based on fuzzy logic in aid of pre-decision method [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 30(10): 1989 – 1993. (in Chinese)
- [24] 滕居特, 顾幸生. 小生境粒子群优化算法 [J]. *华东理工大学学报*, 2007, 33(1): 133 – 136.
Teng Ju-te, Gu Xing-sheng. Niche particle swarm optimization algorithm [J]. *Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2007, 33(1): 133 – 136. (in Chinese)
- [25] Blake S. An architecture for differentiated services [S]. IETF2475, December, 1998.
- [26] Odlyzko A. Paris metro pricing: The minimalist differentiated services solution [A]. In Proc. IEEE/IFIP IWQoS'99 [C]. Piscataway: IEEE Inc., 1999. 559 – 561.
- [27] Maillé P, Tuffin B. Pricing the Internet with multibid auctions [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2006, 14(5): 992 – 1004.
- [28] 杨纶标, 高英仪. 模糊数学原理及应用 (第三版) [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2001. 76 – 79.
- [29] Saaty T L. *The Analytic Hierarchy Process* [M]. New York: McGraw-Hill Company, 1980. 1 – 20.
- [30] Cao X R, Shen H X, et al. Internet pricing with a game theoretical approach: concepts and examples [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2002, 10(2): 208 – 216.

- [31] Parsopoulos K E, Vrahatis M N. Recent approaches to global optimization problems through particle swarm optimization [J]. *Natural Computing*, 2002, 12(1): 235 – 306.
- [32] 徐雷鸣, 庞博, 赵耀. NS 与网络模拟 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003. 1 – 9.

- [33] 王晓东. 计算机算法设计与分析(第二版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005. 86 – 113.
- [34] Zhu F, McNair J. Multiservice vertical handoff decision algorithms [J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2006: 1 – 13.

作者简介



王兴伟 男, 1968 年 1 月出生于内蒙古包头市, 博士, 东北大学信息科学与工程学院教授, 博士生导师, 主要研究领域为下一代互联网、自组织网络和移动互联网等。



李雪娇 女, 1986 年 2 月出生于辽宁省沈阳市, 硕士生, 主要研究领域为 QoS 管理机制。



郭磊(通信作者) 男, 1980 年 4 月生于四川省眉山市, 博士, 东北大学信息科学与工程学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为新一代互联网和光网络生存性技术等。

E-mail: guolei@ise.neu.edu.cn



黄敏 女, 1968 年 2 月出生于辽宁省沈阳市, 博士, 东北大学信息科学与工程学院教授, 博士生导师, 主要研究领域为算法设计与优化等。

