

基于博弈论的异构融合网络接入选择方法研究

陈前斌 周伟光 柴 蓉 唐 伦

(重庆邮电大学移动通信重点实验室 重庆 400065)

摘 要 各种异构接入网络的无缝融合是下一代网络的显著特征之一,不同网络技术接入形式的多样化使得多网络接口的用户终端可自主选择对用户最为有利的接入网络(或 SP, Service Provider)获得互联网服务.文中给出一种面向用户可视化可操作的异种网络接入选择实现机制,该机制采用一种量化接入系统服务质量的统一评价模型及基于最优用户性价比的网络选择决策方法,同时依据不同接入网络之间的合作与非合作关系以及 SP 与用户之间的竞争关系,引入博弈论方法建立网络价格策略的两种博弈模型,通过求解模型的纳什均衡价格及共谋价格,确定网络优化定价机制.仿真结果比较了异构网络融合环境下的各接入网络在非合作和合作博弈模式中的优化定价机制及获得的收益特性,并比较了不同博弈场景下用户选择接入网络的性价比.

关键词 异构网络接入选择;非合作博弈;合作博弈;纳什均衡;性价比

中图法分类号 TP393 **DOI号**: 10.3724/SP.J.1016.2010.01643

Game-Theoretic Approach for Network Access Selection in Heterogeneous Integrated Networks

CHEN Qian-Bin ZHOU Wei-Guang CHAI Rong TANG Lun

(Key Laboratory of Mobile Communication Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065)

Abstract The integration of different heterogeneous access network is one of the remarkable characteristics of the next generation network, in which users with multi-network interface terminals can independently select access network (SP, Service Providers) to obtain the most desired Internet service. In this paper, a user-oriented visualized operational scheme at user terminal is proposed for heterogeneous network access selection. In the novel scheme, a unified quantification model for evaluating access service of heterogeneous systems and a network selection decision-making algorithm for maximizing user performance-cost-ratio are both applied and the optimal network pricing mechanism based on different game models among access networks is described for practical application scenarios. The profit characteristics of access networks for both noncooperative and cooperative game frameworks are compared and the user performance-cost-ratios in different game scenarios are evaluated via extensive numerical simulations.

Keywords heterogeneous network access selection; noncooperative game; cooperative game; Nash equilibrium; performance-cost-ratio

收稿日期:2010-04-25;最终修改稿收到日期:2010-08-02. 本课题得到国际科技合作计划项目基金(2008DFA12110)、国家重大科技专项基金(2008ZX03003-005)和重庆市自然科学基金(CSTC2009BB2083)资助. 陈前斌,男,1967年生,教授,博士生导师,主要研究领域为个人通信、多媒体信息处理与传输技术、下一代网络技术. 周伟光,男,1982年生,硕士研究生,主要研究方向为下一代网络技术、移动性管理、无线资源管理等. E-mail: awcore@163.com. 柴蓉,女,1974年生,博士,副教授,主要研究方向为个人通信、下一代网络技术,包括无线资源管理、移动性管理等. 唐伦,男,1973年生,博士研究生,讲师,主要研究方向为无线资源管理、移动性管理、认知无线电等.

1 引 言

宽带移动通信网络与互联网及电视网络的融合是各个网络相互延伸和渗透的必然趋势,其不仅体现在骨干网络的逐步融合,还体现在不同网络接入方式的融合,从而实现用户在访问网络服务等多种业务的接入形式上的更多选择方式,而支持多网络接口的用户终端使得异构融合网络的接入形式在终端平台上更为便捷地实现.传统蜂窝网络中,用户更换接入网络的过程较为复杂不便,需通过更换 SIM 卡 (Subscriber Identity Module) 或带号换网服务 (Local Number Portability) 来实现.这一问题在支持异构融合的下一代通信系统中将得以解决.支持多网络接口的用户终端将实现在各异构接入系统间的无缝切换及自主通信.图 1 所示为融合了 UMTS、WLAN 及 WMAN 等不同接入网络的下一代异构融合网络模型.

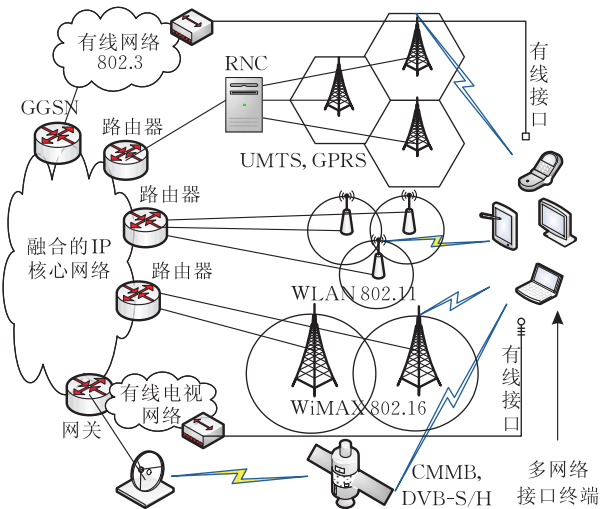


图 1 异构融合网络模型

在下一代异构融合的通信系统中,多网络接口的用户终端能够通过多种不同接入网络获取业务访问服务,并且可实现在各接入网络之间的无缝融合.与传统蜂窝网络中基于终端辅助网络控制的小区选择及切换机制不同,下一代异构网络将支持终端控制的网络选择及切换方式,即终端能够自主选择接入网络,如选择服务质量更好且服务费用低廉的网络作为接入目标网络.在这种情况下,异构融合网络中的不同接入网络会力争为更多用户提供网络接入服务从而最大化其整体收益.用户与各接入网络之间本质的利益取向差异致使彼此之间形成非合作竞争关系,根据博弈理论,这一关系可建模为非合作博

弈模型;通常情况下,不同接入网络之间的激烈竞争会导致接入服务价格降低及各接入网络总体收益下降,为最大化网络总体收益,不同接入网络可能从彼此竞争转向相互合作.本文提出一种面向用户可视化可操作的异种网络接入选择实现机制.该机制采用一种量化不同接入系统服务质量的统一评价模型及基于最大化用户性价比的网络选择决策方法,同时依据不同接入网络之间的合作与非合作关系以及 SP 与用户之间的竞争关系,引入博弈论方法建立网络价格策略的两种博弈模型,通过求解模型的最优价格,确定网络优化定价机制.

网络接入选择是下一代异构融合网络的研究重点之一,很多文献[1-7]都对其进行了深入研究.文献[1]针对卫星通信网络和 UMTS 网络融合场景提出一种实现用户终端自行选择切换接入网络的系统融合架构,并基于最佳切换时机,确定用户网络选择算法.文献[2]基于 802.11 网络及 802.16 网络提出一种无线网格网络骨干结构及其相应的垂直切换机制,以减少无线骨干网的切换信令开销,并降低用户无缝通信的切换延时.文献[3]基于迟滞电平和驻留定时器法提出了 UMTS 和 WLAN 融合网络的垂直切换判决算法,通过调节切换触发条件在适当时机触发切换以有效改善网络选择的切换性能.文献[4]提出了基于信噪比并综合链路带宽及流量费用因素的异构融合网络切换判决算法,以达到提高吞吐量和降低接入链路掉线率的目的.文献[5]提出基于马尔可夫决策过程的网络选择算法,通过系统带宽和连接延时的联合优化确定候选接入网络.文献[6]提出的接入网络选择算法,综合考虑了各异构接入网络的负载均衡及移动终端电池使用时间的最大化,从而实现异构融合网络无线资源的高效利用.文献[7]提出下一代异构融合网络中基于非合作博弈模型的接入网带宽分配及呼叫接入控制方法,通过求解纳什均衡点实现最优带宽分配以最大化终端通信链路的效用.

本文第 2 节提出一种面向用户可视化可操作的异种网络接入选择实现机制;第 3 节提出在该机制中实现的一种量化不同接入系统服务质量的统一评价模型;第 4 节依据不同接入网络的非合作关系以及网络与用户之间的竞争关系,阐述了网络基于非合作博弈的服务定价机制;第 5 节阐述网络基于合作博弈模型的定价机制;第 6 节给出数值仿真分析;最后给出全文总结.

2 面向用户的异种网络接入选择实现机制

异构融合的网络中,由于各异构网络之间信息交互有限,对某网络来说难以全面了解用户的网络接入状况及用户候选网络状态信息,因此,采用传统的基于网络控制的切换方式,无法实现基于用户偏好及应用特性为用户选择最优切换目标网络.另一方面,网络中多接口用户终端能够及时获知可用网络信息,并根据各接入网络性能特点结合自身业务需求,实现接入网络的自主优化选择,因此,基于终端控制的切换方式将成为下一代异构融合网络中的有效切换方式.现有用户终端无法支持用户自主切换和接入网络选择,针对这一问题,本文提出一种面向用户可视化可操作的异种网络接入选择实现机制,该机制架构图如图 2 所示.

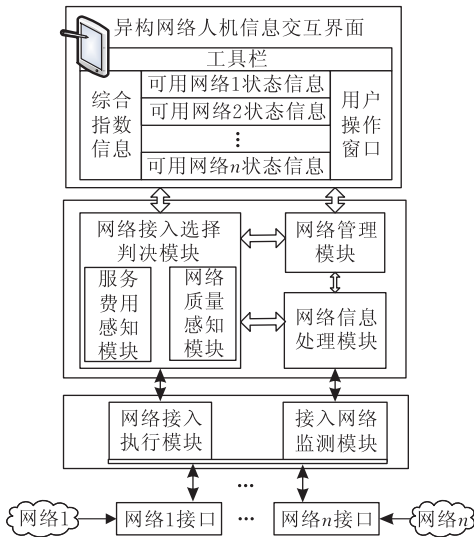


图 2 支持面向用户可视化可操作的异种网络接入选择终端实现机制

2.1 机制流程图

本文所提终端实现机制可在用户终端设备中以软、硬件平台的方式实现,其工作流程如图 3:接入网络监测模块通过终端机的不同网络接口发现可用的有线或无线接入网络,并获知各接入网络的状态信息;这些状态信息经由网络信息处理模块处理后分别发送至网络接入选择判决模块和网络管理模块;网络接入选择判决模块调用内嵌子模块,即费用感知模块及网络质量感知模块,并基于性价比的原则选择异种接入网络;用户通过人机信息交互界面可观察到各异构网络的状态信息,并参与接入网络

选择和切换过程,以实现接入网络异构特性面向用户可视可操作.

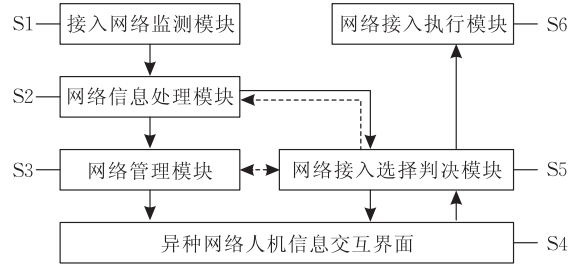


图 3 异种网络接入选择实现机制流程图

2.2 模块具体功能

图 2 所示实现装置中各模块的具体功能如下:

(1) 人机信息交互界面. 用户通过人机交互界面了解各网络信息并设定其网络偏好参数如系统带宽、分组丢失率、单位数据量的功耗、连接时延等.同时,此界面支持将用户策略输入至网络接入选择判决模块及网络管理模块,并将两个模块处理后的数据信息进行输出及显示.

(2) 网络质量感知模块. 内嵌于网络接入选择判决模块. 该模块通过人机信息交互界面中用户设置的网络偏好参数,对各网络参数进行归一化偏移度评估,同时,对于未明确指定的网络参数采用缺省值策略,基于归一化后的网络参数偏移度,应用机器学习机制中的 Sigmoid 函数,量化异种接入网络的服务质量.网络接入服务质量的具体量化模型在第 3 节中详述.

(3) 服务费用感知模块. 内嵌于网络接入选择判决模块. 此功能模块实体通过用户业务识别卡获知不同接入网络业务的资费信息,并在用户变更业务种类(如不同套餐)或接入网络资费变更情况下获知相应变更信息,并通过网络管理模块在人机交互界面中显示不同网络资费信息及各种使用历史记录信息.

由于用户各类接入服务的价格由异构融合网络中不同服务提供商或网络决定,鉴于异构网络接入服务的相似性和可替代性,本文引入基于博弈论的网络价格策略,具体的网络价格策略的建模和形成机制在第 4、5 节中详述.

(4) 网络接入选择判决模块. 依据(2)、(3)子模块处理得到的信息,依据优化接入服务质量性价比的原则,为用户选择最优接入网络,并支持用户通过交互界面实现的手动选择模式和不同场景下可选的自动选择模式.

用户对不同接入目标网络的选择可通过比较不

同候选网络的性价比得到. 具体实施方式在第 4 节中的 4.4 小节中详述.

(5) 网络管理模块. 执行各异构接入网络信息的后台数据处理, 并将管理信息显示在交互界面. 接入网络信息包括网络资费信息、用户使用历史记录信息、网络参数信息及终端 IP 地址变更管理等.

(6) 网络信息处理模块. 将接入网络监测模块获得的接入网络各层信息进行分类处理, 将各接入网络的物理层、数据链路层、网络层及传输层等实时状态参数信息转交至网络质量感知模块和网络信息管理模块, 同时处理来自网络信息管理模块及网络接入选择判决模块反馈的各类信息.

(7) 接入网络监测模块. 通过终端的不同网络接口, 在用户已开通业务的网络中, 发现可用的有线或无线接入网络(如移动终端进入新的无线网络或固定终端连接至有线接口时), 并获知各接入网络的状态信息, 状态信息经提取处理显示在交互界面.

(8) 网络接入执行模块. 根据具体应用场景下用户的网络选择方案, 通过终端的不同网络接口执行链路和数据流的网络间切换. 网络接入执行模块通过终端机的不同网络接口执行连接链路切换接入指令, 通过新网络接入点服务器证实切换成功与否, 并回馈证实消息至网络管理模块及交互界面.

3 网络接入服务质量模型

3.1 参数偏移度

异构融合系统中接入网络的优化选择是实现终端无缝融合的关键步骤, 也是影响系统性能及用户 QoS 体验的重要因素, 目标接入网络的优化选择应综合比较不同网络特性、用户特性及用户喜好^[8]. 多种接入网络的异构性、复杂性导致网络性能统一综合评估的困难. 为公平合理量化异构融合系统中不同接入网络的服务质量, 本文提出对网络接入服务各相关参数进行参数偏移度的统一量化, 将参数分为两类并分别予以偏移度的归一化处理. 第 1 类参数称为有益量, 即终端用户追求其值最大化, 如系统带宽、接入信道信噪比等, 第 2 类参数称为代价量, 即用户追求其值最小化, 如连接延时、终端功耗等, 本文定义两类参数的偏移度衡量公式分别为

有益量参数偏移度

$$V_i = \frac{p_{\max}^i - p_c^i}{p_{\max}^i - p_{\min}^i} \quad (1)$$

代价量参数偏移度:

$$V_i = \frac{p_c^i - p_{\min}^i}{p_{\max}^i - p_{\min}^i} \quad (2)$$

其中, p_c^i 表示第 i 个接入网络为用户终端提供的实际系统参数值, p_{\max}^i 和 p_{\min}^i 分别表示用户应用对 p_c^i 提出的最大及最小需求值. 由式(1)及式(2)可知, V_i 表示参数 p_c^i 的偏移度, $0 \leq V_i \leq 1$, V_i 取值小表明接入网络能够为用户提供较好的服务质量要求.

3.2 量化网络接入服务质量

基于参数偏移度的归一化, 本文引入机器学习机制中的 Sigmoid 函数在网络质量感知模块中实现异种接入网络服务质量的统一量化^[9], 以评估异构融合系统中不同网络的接入服务质量. 该模型通过计算各网络选择相关参数的偏移度并确定参数所对应的敏感度因子及用户可容忍的参数偏移度, 综合衡量网络接入服务质量中各参数的影响程度, 定义 Q 为接入网络的服务质量:

$$Q = C_1 / (1 + \exp(-S \sum_{i=1}^K \omega_i (T_i - V_i))) \quad (3)$$

其中, C_1, S 均为常量, ω_i ($0 < \omega_i \leq 1$) 及 T_i 分别表示参数 i 的敏感度因子和用户可容忍的参数偏移度, S 和 T_i 的取值可根据用户业务特性设定, 分别表示服务质量曲面的斜率和拐点.

图 4、图 5 分别给出了不同敏感度因子及用户可容忍的参数偏移度对应的网络接入服务质量变化. 图中示例选择了两个参数即 $K=2$, 设定 $C_1=1, S=10$. 从图 4 中可以看到, 随着相关参数偏移度的增加, 网络接入服务质量有所下降, 其降低速度与 ω_i 的取值有关, ω_i 越大, 网络接入服务质量衰减越快, 表示其对参数 i 的偏移度越敏感. 图 5 可以看出不同的 T_i 对应网络接入服务质量曲面图的拐点不同.

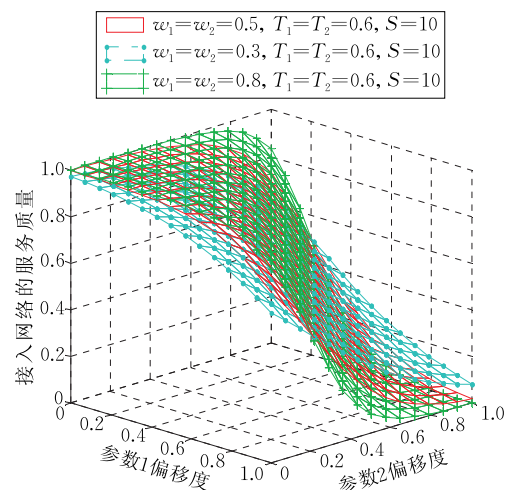
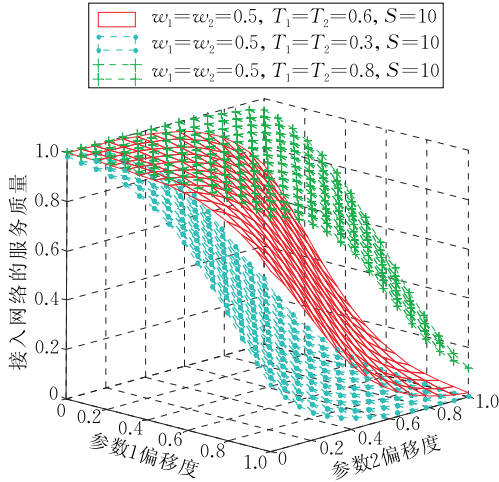


图 4 不同 ω_i 及 S 对 QoS 的变化影响

图5 不同 T_i 及 S 对 QoS 的变化影响

4 基于非合作博弈的最优价格及接入网络选择

4.1 非合作博弈模型

本节研究基于以下常规假设：(1) 不同接入网络(或 SP)之间存在竞争关系,各网络可通过制定价格策略获得更多收益；(2) 不同接入网络之间所提供的服务具有可替代性；(3) 不同接入网络之间不存在垄断共谋.基于这些假设,异构融合系统中不同接入网络之间的关系可建模为非合作的伯川德博弈模型^[10].博弈模型中的参与者为不同的接入网络 and 用户.假设不同接入网络的数量为 M ,不同接入网络 and 用户所采取的博弈策略分别为网络接入服务质量的定价策略和选择性性价比最高的目标切换网络.该博弈模型的基本要素见表 1.

表 1 服务定价及网络选择的非合作博弈模型基本要素

参与者	策略	收益
接入网络 i ($1 < i \leq M$)	网络接入服务质量的 价格策略 P_i	$R_i(\mathbf{P})$
用户 (N)	选择性性价比最佳的网络	接入网络性价比

接入网络 i 的收益函数定义为

$$R_i(\mathbf{P}) = n_i (P_i D_i - c_i e_i D_i + a_i) \quad (4)$$

所有接入网络的收益总和即为

$$R_{\text{Total}}(\mathbf{P}) = \sum_{i=1}^M R_i(\mathbf{P}) \quad (5)$$

上式中, P_i 表示网络 i 接入服务质量的定价策略, D_i 表示用户对接入服务的需求量, c_i 表示网络 i 的成本因子, a_i 为网络为用户切换预留资源所需基础费用(假设接入网络均愿意并有能力满足用户需

求), e_i 表示网络 i 中 D_i 的效率因子,可由公式 $e_i = C_2 \left(1 - \sum_{i=1}^K \omega_i V_i / \sum_{i=1}^K \omega_i\right)$ 求解得到, C_2 为常量, n_i 表示

选择网络 i 的用户数量, $\sum_{i=1}^M n_i = N$. 用户选择接入网络 i 的收益函数,即性价比为用户付出单位价格在网络 i 可获得的服务质量,定义为 $D_i \times e_i / P_i$.

4.2 效用函数

经济学里常用效用函数描述寡头市场(整个市场中为数不多的竞争者生产的产品有差异但又具有相互替代性)的收益竞争关系^[11].本文研究的异构网络接入服务及定价机制具有以下特性：(1) 与典型的寡头市场特性相似,异构网络中各网络的接入服务具有差异性且相互可替代；(2) 为实现所有市场竞争者(即所有 SP)的总体效用最大,需要确保整个市场(异构网络)的用户需求量最大,而需求量与服务价格密切相关,因而网络总效用应为需求量及其服务价格的函数；(3) 二次效用函数应为不同网络需求量的严格凸函数.本文定义博弈模型中各接入网络的效用为网络接入服务质量需求量 D_i 与其相应价格策略 P_i 的二次效用函数^[11-12],则异构接入网络的总效用函数 $U(\mathbf{D})$ 为

$$U(\mathbf{D}) = \sum_{i=1}^M D_i e_i - \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^M D_i^2 + 2\rho \sum_{i \neq j} D_i D_j \right) - \sum_{i=1}^M P_i D_i \quad (6)$$

其中, $\mathbf{D} = (D_1, \dots, D_i, \dots, D_M)$ 为用户对 M 个不同接入网络服务质量的需求向量, ρ 表示不同接入网络间的竞争因子, $0 \leq \rho \leq 1$. $\rho = 0$ 表示一个网络的接入服务具有不可替代的优势(如一个用户终端从一个较小的 UMTS 覆盖区域移动到较大的 WMAN 区域,或当前的接入网络中只有一个接入网络能满足用户最低的服务质量要求), $\rho = 1$ 表示接入网络之间的接入服务无差异, $0 < \rho < 1$ 表示异构融合系统中不同接入网络之间接入服务可替代性的竞争程度.

最优用户需求量 D_i 可通过最大化 $U(\mathbf{D})$ 得到,即将 $U(\mathbf{D})$ 对 D_i 求导并置为 0:

$$\frac{\partial U(\mathbf{D})}{\partial D_i} = e_i - D_i - \rho \sum_{i \neq j} D_j - P_i = 0 \quad (7)$$

联合求解式(7)中的 D_i ($i=1, 2, \dots, M$), 可得到需求量函数:

$$D_i(\mathbf{P}) = \frac{(e_i - P_i) [\rho(N-2) + 1] - \rho \sum_{i \neq j} (e_j - P_j)}{(1-\rho) [\rho(N-1) + 1]} \quad (8)$$

4.3 非合作博弈的纳什均衡

纳什均衡的定义:在有 n 个参与者的博弈标准式 $G = \{S_1, \dots, S_n; u_1, \dots, u_n\}$ 中, S 与 u 分别表示局中人的策略空间及效用空间. 如果对于每一个参与者 $i (i=1, 2, \dots, n)$, s_i^* 是针对其他 $n-1$ 个参与者所选策略 $(s_1^*, \dots, s_{i-1}^*, s_{i+1}^*, \dots, s_n^*)$ 的最优反应策略, 即 $u_i(s_1^*, \dots, s_{i-1}^*, s_i^*, s_{i+1}^*, \dots, s_n^*) \geq u_i(s_1^*, \dots, s_{i-1}^*, s_i, s_{i+1}^*, \dots, s_n^*)$ 对所有的 s_i 都成立.

$$\max_{s_i \in S_i} u_i(s_1^*, \dots, s_{i-1}^*, s_i, s_{i+1}^*, \dots, s_n^*), i=1, 2, \dots, n$$

的解, 即策略空间 $s^* = (s_1^*, \dots, s_i^*, \dots, s_n^*)$ 称为一个纳什均衡解.

本文非合作博弈的纳什均衡解 P^* 可通过网络各博弈方的最佳反应价格策略函数联立求解获得的. 最佳反应价格策略函数 (BRF) 定义为 $BRF(P_{-i}) = \arg \max_{P_i} R_i(P_{-i} \cup \{P_i\})$, $1 < i \leq M$, 其中 P_{-i} 为网络 i 之外的其它网络价格策略, 当且仅当 $P_i^* = BRF(P_{-i}^*) = \arg \max_{P_i} R_i(P_{-i}^* \cup \{P_i\})$, $\forall i$ 成立时, 向量 $P^* = (P_1^*, P_2^*, \dots, P_{i-1}^*, P_i^*, P_{i+1}^*, \dots, P_M^*)$ 为纳什均衡价格解.

由于各接入网络均通过向用户出售网络接入服务质量获取收益, 由收益函数(4)与需求函数(8)的关系, 每个网络的收益函数可表示为价格函数如式(9) $R_i(P) =$

$$n_i a_i + n_i (P_i - c_i e_i) \left[F_1 (e_i - P_i) - F_2 \sum_{i \neq j} (e_j - P_j) \right] \quad (9)$$

其中,

$$F_1 = \frac{\rho(N-2)+1}{(1-\rho)[\rho(N-1)+1]},$$

$$F_2 = \frac{\rho}{(1-\rho)[\rho(N-1)+1]}.$$

将 $R_i(P)$ 对 P_i 求导并令其为 0:

$$\begin{aligned} \frac{\partial R_i(P)}{\partial P_i} = 0 \Rightarrow P_i^* &= \frac{1}{2}(e_i + c_i e_i) - \\ &\frac{\rho}{2\rho(N-2)+2} \sum_{i \neq j} (e_j - P_j) \end{aligned} \quad (10)$$

可求解得到接入网络 i 的最佳反应价格策略函数 P_i^* , 同理可求得接入网络 j 的最佳反应价格策略函数 P_j^* , 联合求解 P_i^* 和 P_j^* 可得两个接入网络的纳什均衡价格 P^* . 由于各接入网络的最佳反应价格策略函数是线性的, 因而纳什均衡点是存在的且具有唯一性^[13-14].

同理对式(5)求解 $\frac{\partial R_{\text{Total}}(P)}{\partial P_i^T} = 0 \Rightarrow P_i^{T*} =$

$\frac{1}{2}(e_i + c_i e_i)$, $1 \leq i \leq M$, 即 $P^{T*} = (P_1^{T*}, P_2^{T*}, \dots, P_{i-1}^{T*}, P_i^{T*}, P_{i+1}^{T*}, \dots, P_M^{T*})$ 为网络最优价格解, 对应所有非合作博弈网络的收益总和的最大化. 比较 P_i^* 及 P_i^{T*} ($1 < i \leq M$) 可知 $P_i^* \leq P_i^{T*}$, 即在非合作博弈模式下的纳什均衡价格 $P^* = (P_1^*, P_2^*, \dots, P_{i-1}^*, P_i^*, P_{i+1}^*, \dots, P_M^*)$ 为网络各方的局部最优价格, 而非整体收益最大化的全局最优价格; 同时非合作博弈的网络本身也不具有实现整体收益最大的动机及驱动力.

4.4 用户的网络选择机制

通常情况下, 用户都希望选择接入服务质量好的网络, 但是服务质量要求越高, 其相应价格也会随之提高. 本文提出一种基于接入服务质量性价比的网络选择机制. 用户选择网络 i 的性价比通过下式可得

$$\frac{D_i e_i}{P_i^*} = e_i \frac{(e_i - P_i^*)[\rho(N-2)+1] - \rho \sum_{i \neq j} (e_j - P_j^*)}{(1-\rho)[\rho(N-1)+1]P_i^*}.$$

用户对不同接入目标网络的选择可通过比较不同候选网络的性价比得到, 最佳候选性价比的网络 i^* 可由下式求解得到

$$i^* = \arg \max_i (D_i e_i / P_i^*) \quad (11)$$

5 基于合作博弈的最优价格及接入网络选择

异构融合网络的服务区内多端口的用户终端可在不同接入网络间方便地进行选择和切换. 不同接入网络(或 SP)之间会主动或被动发起服务质量和价格竞争以吸纳更多用户来达到增加收益的目的, 尤其是在各接入网络的接入服务质量和价格相互替代性较强而接入网络又属于不同利益共同体的情况下. 通常, 不同接入网络之间的恶性竞争会造成服务价格持续走低和整体收益的萎缩, 从而可能导致网络无法接受该竞争方式, 因此, 在这种情况下, 全部或部分网络将可能从竞争转向合作垄断. 本节基于合作博弈模型来阐述采用合作方式的各接入网络与用户之间的策略及收益问题.

本文所提的合作博弈模型中, 假设在一个寡头的网络市场中, 存在几个不同接入网络相互合作以获取更多利益, 如以某个共谋价格策略向用户提供相同的网络接入服务质量以消除彼此之间的竞争,

因而各接入网络的策略为网络接入服务质量同质同价策略. 该合作博弈模型的基本要素如表 2.

表 2 服务定价及网络选择的合作博弈模型基本要素

参与者	策略	收益
接入网络 i ($1 < i \leq M$)	同质同价策略	$R_{i(C)}(\mathbf{P})$
用户 (N)	选择性价比最佳的网络	接入网络性价比

类似于式(4)、式(5), 合作博弈模型中接入网络 i 和所有网络的收益总和为

$$R_{i(C)}(\mathbf{P}) = n_i(P_{i(C)}D_{i(C)} - c_i e_i D_{i(C)} + a_i) \quad (12)$$

$$R_{\text{Total}(C)}(\mathbf{P}) = \sum_{i=1}^N R_{i(C)}(\mathbf{P}) \quad (13)$$

采用二次效用函数, 可得合作博弈下的用户需求函数:

$$D_{i(C)}(\mathbf{P}) = \frac{e_i - P_{i(C)}}{\rho(N-1) + 1} \quad (14)$$

类似 4.3 节中的求解过程, 可得到网络 i 的最佳反应价格策略函数 $P_{i(C)}^*$:

$$\frac{\partial R_{i(C)}(\mathbf{P})}{\partial P_{i(C)}} = 0 \Rightarrow P_{i(C)}^* = \frac{1}{2}(e_i + c_i e_i) \quad (15)$$

同理可求得 $P_{j(C)}^*$ 及合作博弈共谋价格最优解 $\mathbf{P}_{(C)}^* = (P_{1(C)}^*, P_{2(C)}^*, \dots, P_{i-1(C)}^*, P_{i(C)}^*, P_{i+1(C)}^*, \dots, P_{M(C)}^*)$. 在不同接入网络的合作博弈模型中, 用户选择网络的最佳反应函数与式(11)类似, 并且各网络中某个共谋价格下用户接入服务的性价比均为恒定的.

同理对式(13)求解 $\frac{\partial R_{\text{Total}(C)}(\mathbf{P})}{\partial P_{i(C)}^T} = 0 \Rightarrow P_{i(C)}^{\text{T}*} = \frac{1}{2}(e_i + c_i e_i)$, $1 < i \leq M$, 即 $\mathbf{P}_{(C)}^{\text{T}*} = (P_{1(C)}^{\text{T}*}, P_{2(C)}^{\text{T}*}, \dots, P_{i-1(C)}^{\text{T}*}, P_{i(C)}^{\text{T}*}, P_{i+1(C)}^{\text{T}*}, \dots, P_{M(C)}^{\text{T}*})$ 为合作博弈下各网络最优价格, 对应所有合作博弈网络的收益总和最大. 因 $\mathbf{P}_{(C)}^* = \mathbf{P}_{(C)}^{\text{T}*}$, 即合作博弈模式下的共谋价格解 $\mathbf{P}_{(C)}^*$ 不仅是网络双方的局部最优价格, 同时也是对应整体收益总和最大的全局最优价格, 即共谋价格为帕累托最优价格(即网络双方都不能在对方收益不受损的前提下提高自身的收益).

6 数值结果分析

6.1 参数设置

本文数值仿真实验中假设异构融合系统有两个不同接入网. 参数的设定如下: $C_2 = 1$, $M = 2$, $n_i = n_j = 100$, $c_i = 0.1$, $a_1 = a_2 = 0.5$, $0.3 \leq \rho \leq 0.6$, $0.3 \leq e_i \leq 0.7$, $i = 1, 2$.

6.2 数值结果及其分析

图 6 给出了不同价格策略情况下网络 1、2 的收益变化. 图 6(a)为给定网络 2 的 3 种不同价格策略情况下, 网络 1 的收益与自身价格策略的关系. 可以看出, 网络 1 的收益开始随着价格策略增长而增加, 但是到达某一价格策略后(这个价格策略即为在确定网络 2 的价格策略后网络 1 的最佳反应价格策略), 收益随着自身价格增长而减少. 这也意味着网络制定的价格并非越高越好而应寻找最佳反应价格, 否则, 用户可能会因为网络的价格过高而选择切换到其它网络, 导致高价网络收益的下降. 还可从图中看出, 随着网络 2 的策略价格的增加, 网络 1 可获得的收益也随之增加, 原因是更多用户会从网络 2 选择切换至网络 1.

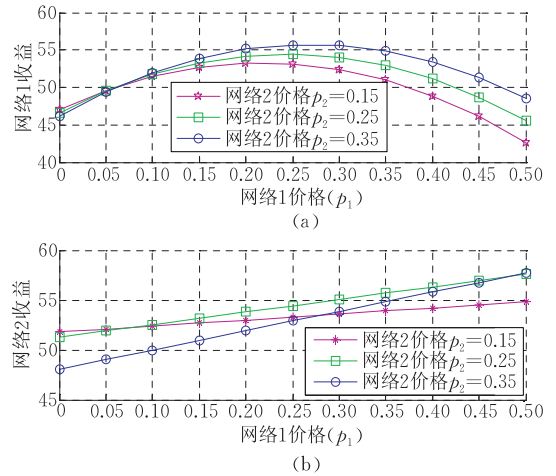


图 6 价格策略与网络收益关系

图 6(b)显示了网络 2 的收益与网络 1 的策略价格的关系. 在网络 2 的某一确定策略价格情况下, 网络 2 的收益随着网络 1 策略价格的增加而增加, 其原因是用户会随着网络 1 策略价格的增加而逐渐增加切换到网络 2 的机率. 同时还可以观察到, 高策略价格(0.35)和低策略价格(0.15)相比, 网络 2 自身的策略价格在适中时(0.25), 收益表现得更好.

图 6 说明当确定网络一方价格策略时, 另一方的最佳反应价格策略是存在的, 并对应其获取最大收益. 当网络双方均调整策略价格时, 存在使得双方都能获得最大收益的纳什均衡价格如图 7 所示.

图 7 给出非合作博弈模式中不同网络环境条件下两个接入网络的最佳反应价格策略函数及其相应的纳什均衡价格点. 两个接入网络的最佳反应价格策略函数的交点即为对应的纳什均衡价格点. 比较图 7 中情形 1、2 可以看出, 当 e_i 增加时, 即网络提供

的接入服务质量提高,网络双方的策略价格均相应提高.比较情形 2、3 可以看出,当两个网络之间的竞争激烈程度增加时,网络双方的策略价格会降低,因为网络会以更低的策略价格吸纳更多用户.此外,比较图中情形 3、4 可看出,当网络一方的服务成本增加时会导致纳什均衡价格点提高,但是服务成本低的网络更具有竞争力(相同的网络服务品质其价格较另一网络低).

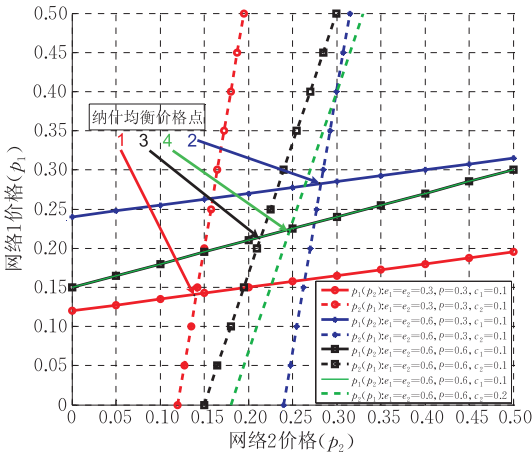


图 7 非合作博弈中的最佳反应价格策略函数和纳什均衡价格

图 8 比较了同种网络环境下网络双方非合作博弈的纳什均衡价格点和合作博弈的共谋价格点,从图中可以看到服务和价格的垄断会造成共谋价格点较纳什均衡价格点高.

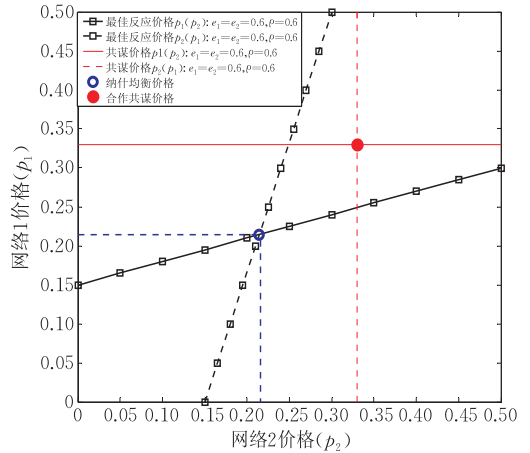
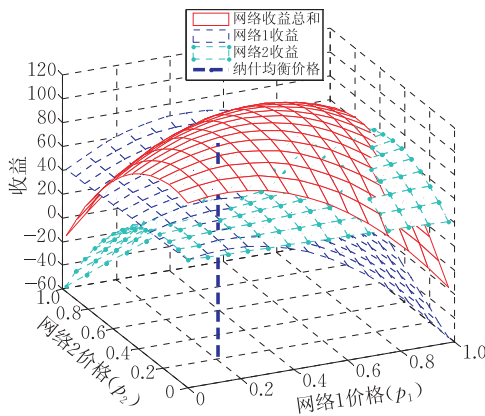
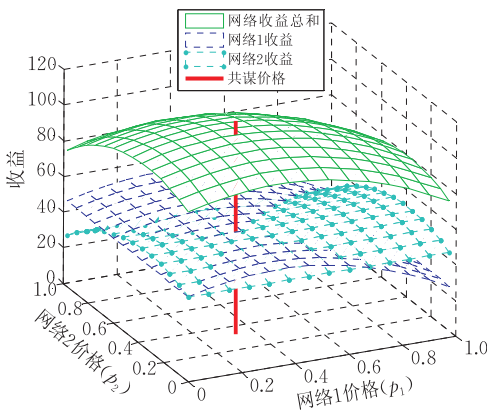


图 8 纳什均衡价格和共谋价格

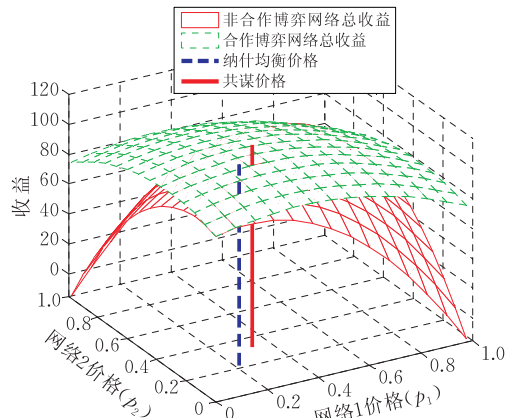
图 9(a) 给出了在非合作博弈模式下两个网络的独立收益,收益总和及纳什均衡价格点对应的收益情况.从图中可以看出非合作博弈的网络双方的收益均衡点与纳什均衡价格是对应的,此时非合作博弈的网络双方都获得最大收益.图 9(b) 所示为合



(a) 非合作博弈的网络 1、2 及其总收益



(b) 合作博弈的网络 1、2 及其总收益



(c) 合作与非合作博弈的总收益比较

作博弈模式下两个网络的独立收益、收益总和情况以及合作共谋价格点对应的收益情况,从图中可以看出合作博弈的网络双方的收益均衡点与合作共谋价格是对应的,此时合作博弈的网络可获取最大收益.图 9(c)比较了非合作博弈和合作博弈两种模型下网络收益总和,可以看出当不同的接入网络之间采取合作方式时,共谋价格处获得的收益总和最大,且合作模型中的收益总和总是不低于非合作模型中的收益总和;此外,合作模型中网络收益总和的起伏变化程度比非合作情况要稳定.比较图 9(a)、(b)可以看出合作对接入网络一般来说是有利的,但是在某些情况下,非合作博弈模式中某一网络的个体收益会出现高于网络收益总和的情况,如图 9(a)所示,主要原因是非合作博弈模式中会出现网络一方的竞争实力远高于另一方的局面,而这种情况则不会在合作博弈模式中出现;同时也说明了只有网络双方的服务竞争实力较为对等时才会为网络双方合作共谋的价格策略创造必要条件.

为评价不同接入服务价格对用户性价比的影响,引入自由价格这一概念,即该价格不受任意竞争者的价格策略的影响.图 10 所示为不同网络的价格策略(最佳反应价格、自由价格、共谋价格)情况下用户可获得的性价比.从图中可以看出用户的性价比随着价格的增加而减小,随着网络效率因子 e_i 的增长而增加.在网络非合作博弈模式中,用户的最佳反应价格策略所对应的性价比优于其自由价格对应的性价比,而在网络合作博弈模式中,用户共谋价格所对应的接入网络性价比略低于网络在非合作博弈下的性价比,这是由于网络合作共谋产生过高价格.

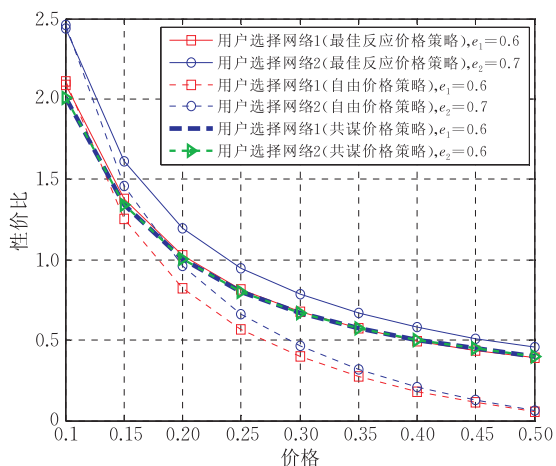


图 10 不同价格策略的性价比

7 总结

本文提出一种面向用户可视化可操作的异种网

络接入选择实现机制,该机制采用一种量化不同接入系统服务质量的统一评价模型及基于最大化用户性价比的网络选择决策方法,同时依据不同接入网络之间的合作与非合作关系以及网络(或 SP)与用户之间的竞争关系,引入博弈论方法建立网络价格策略的两种博弈模型,通过求解模型的纳什均衡解及共谋价格,确定网络优化定价机制.

数值仿真结果显示,异构融合环境中各个不同接入网络均可以在非合作和合作模式中分别获得纳什均衡价格和共谋价格及其相应的最大收益,并且在不同异构网络合作博弈模式中接入网络所获得收益高于非合作博弈模式下所得收益.仿真结果还比较了不同博弈场景下用户选择接入网络的性价比,证实异构融合网络的非合作博弈模式中的用户性价比略高于合作博弈模式场景性价比.以后的研究工作将会分析不同接入网络价格竞争机制的动态特性及博弈模型中非线性需求,并进一步对具体网络应用环境进行系统仿真.

参 考 文 献

- [1] Nay P, Zhou C. Vertical handoff decision algorithm for integrated UMTS and LEO satellite networks//Proceedings of the WRI International Conference on Communications and Mobile Computing. Yunnan, China, 2009: 180-184
- [2] Zhang Y Q, Zhuang W H, Saleh A. Vertical handoff between 802.11 and 802.16 wireless access networks//Proceedings of the IEEE GLOBECOM 2008. New Orleans, LA, USA, 2008: 1-6
- [3] Liu M, Li C Z, Guo X B, Dutkiewicz E. Performance analysis and optimization of handoff algorithms in heterogeneous wireless networks. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(7): 846-857
- [4] Yang K, Gondal I, Qiu B. Multi-dimensional adaptive SINR based vertical handoff for heterogeneous wireless networks. IEEE Communications Letters, 2008, 12(6): 438-440
- [5] Stevens-Navarro E, Lin Y X, Vincent Wong W S. An MDP-based vertical handoff decision algorithm for heterogeneous wireless networks. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(2): 1243-1254
- [6] Lee S K, Sriram K, Kim K, Kim Y H, Golmie N. Vertical handoff decision algorithms for providing optimized performance in heterogeneous wireless networks. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(2): 865-881
- [7] Niyato D, Hossain E. A noncooperative game-theoretic framework for radio resource management in 4G heterogeneous wireless access networks. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(3): 332-345
- [8] Chai R, Zhou W G, Chen Q B, Tang L. A survey on vertical handoff decision for heterogeneous wireless networks//Proceedings of the IEEE Youth Conference on Information,

Computing and Telecommunication. Beijing, China, 2009; 279-282

- [9] Mitchell Tom M. Machine Learning. New York: McGraw-Hill, 1997
- [10] Noam N, Tim R, Eva T, Vijay V V. Algorithmic Game Theory. New York: Cambridge University Press, 2007
- [11] Vives X. On the efficiency of bertand and cournot equilibria with product differentiation. Journal of Economic Theory, 1985, 36(1): 166-175
- [12] Niyato D, Hossain E. Competitive pricing for spectrum sha-

ring in cognitive radio networks: Dynamic game, inefficiency of nash equilibrium, and collusion. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(1): 192-202

- [13] La R J, Anantharam V. Network pricing using game theoretic//Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control. Phoenix, AZ, USA, 1999; 4008-4013
- [14] Saraydar C U, Mandayam N B, Goodman D J. Efficient power control via pricing in wireless data network. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(2): 291-303



CHEN Qian-Bin, born in 1967, professor, Ph. D. supervisor. His research interests include personal communications, multimedia information processing and transmission technology, next generation network technology, etc.

ZHOU Wei-Guang, born in 1982, M. S. candidate. His research interests include next generation network technolo-

gy, mobility management, wireless resource management, etc.

CHAI Rong, born in 1974, Ph. D. , associate professor. Her research interests include personal communications, next generation network technology, mobility management, wireless resource management, etc.

TANG Lun, born in 1973, Ph. D. candidate, lecturer. His research interests include wireless resource management, mobility management, cognitive wireless radio, etc.

Background

The selection or switch for access networks in traditional cellular system and mobile Internet is both inconvenient and time-consuming for users, as they have to change their SIM (Subscriber Identity Module) cards or carrying out Local Number Portability service. This issue is expected to be solved in next generation heterogeneous integrated systems in which different access networks are integrated together to support user seamless communications and proactive access network selection.

During the proactive access network selection, users are able to actively and conveniently handoff to more satisfied or low-cost access network and service providers (SPs) will compete more intensely with each other for attracting more users accessing to their systems. On the one hand, the time of want-and-do is significantly decreased when the user wants to switch to another access network or SPs, and instinctively self-regard behavior of user will increase the total access selection numbers because users are inclined to choose the "best" network access service in heterogeneous integrated systems. On the other hand, SPs will face more intensely competition in order to gain more profits in launching actively or passively the price or quality competition to attract more users. Therefore, the competitive relationship in nature among the SPs and user can be formulated as different game models.

This paper proposes a user-oriented visualized of operational scheme at user terminal for heterogeneous network access selection. A unified quantification model for evaluating the access service of heterogeneous systems and a network selection decision-making algorithm for maximizing user performance-cost-ratio are applied in the proposed scheme. The game-theoretic approach for network selection algorithm in heterogeneous integrated access network was formulated. Furthermore, the proposed algorithm can formulate the design and service perspectives for service providers in the operation and management of heterogeneous integrated networks, in which all access networks or service providers can obtain Nash equilibrium price and coalition price under non-cooperative and cooperative game model, respectively, and the total revenue of cooperative model is higher than that of noncooperative model. The user performance-cost-ratio for network selection is also compared under different scenarios, and it is demonstrated that the performance-cost-ratio for noncooperative game model is slightly higher than that of cooperative scenario.

This work was supported by International Science and Technology Cooperation Program (2008DFA12110), Important National Science and Technology Specific Project (2008ZX03003-005), Natural Science Project of Chongqing (CSTC2009BB2083).