

异构无线网络中基于 Stackelberg 博弈的分布式定价和资源分配算法

姜永¹, 陈山枝², 胡博¹

(1. 北京邮电大学 网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876;

2. 电信科学技术研究院 无线移动通信国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对异构无线网络资源管理问题, 结合多主多从 Stackelberg 博弈模型, 提出了一种同时满足网络运营商和用户效用最大的异构无线网络定价和资源分配方案。首先设计了一种基于收益和花费的移动用户效用函数, 并证明在运营商的价格确定后, 效用函数满足凹函数的条件, 保证了移动用户间非合作博弈的纳什均衡点存在。为了获取移动用户的最优带宽策略和运营商的最优价格策略, 提出了一种分布式迭代算法。最后通过仿真实验取得了参与者的最优策略和子博弈完美纳什均衡。

关键词: 异构无线网络; 无线资源分配; 定价; Stackelberg 博弈; 子博弈完美纳什均衡

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2013)01-0061-08

Stackelberg games-based distributed algorithm of pricing and resource allocation in heterogeneous wireless networks

JIANG Yong¹, CHEN Shan-zhi², HU Bo¹

(1. State Key Lab of Switching and Networking Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. State Key Lab of Wireless Mobile Communication, China Academy of Telecommunication Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: To deal with resource allocation in heterogeneous wireless networks, an algorithm based on multi-leader multi-follower Stackelberg games model was proposed to satisfy optimal utility of both operators and mobile users. The mobile user's utility function with payoff and cost was designed, and it was demonstrated that the utility function obey concave function condition after defining operator price strategy, which assured the existence of Nash equilibrium point. A distributed iterative algorithm was presented to obtain optimal strategies of mobile user's bandwidth allocation and operator's pricing. At last, simulation experiments acquire player's optimal strategies and Subgame perfect Nash equilibrium.

Key words: heterogeneous wireless networks; wireless resource allocation; pricing; Stackelberg games; subgame perfect Nash equilibrium

1 引言

近十年来, 各种宽带无线接入技术出现并得到广泛的部署(如 WLAN、WiMAX 以及各种 3G 接入技术), 为移动用户提供了一个普适的、异构的无线网络接入环境。除了无线接入技术的多样性, 另一个趋势是网络基础设施已从一个运营商的垄断转变为多个运营商并存的局面。不同运营商的竞

争以及各类无线接入技术的共存, 为移动用户提供了更广泛的覆盖范围、更灵活的接入模式和更好的服务质量。移动用户可以利用多模移动设备(如: 笔记本、智能手机等), 任意地选择不同运营商以及不同的无线接入方式, 以获得丰富的应用服务(如: Internet 访问、VoIP 以及 IPTV 等), 如图 1 所示。移动用户之间存在竞争关系, 他们会更偏向于接入到服务质量更好、价格更低的接入网络。同

收稿日期: 2011-08-29; 修回日期: 2011-12-27

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(2011AA01A101); 中国下一代互联网课题基金资助项目(CNGI-09-02-08); 教育部高等学校博士点基金资助项目(20090005120013)

Foundation Items: The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2011AA01A101); The China Next Generation Internet Project (CNGI-09-02-08); Doctorate Fund of the Ministry of Education (20090005120013)

时,多个无线网络运营商为吸引顾客,相互之间也存在着竞争关系。运营商希望通过收费来支付投资成本,获得自身收益。运营商在制定价格时,必须考虑到竞争对手的价格策略,因为用户能够自主选择一个服务质量和价格等更优的运营商网络接入。运营商、移动用户彼此之间的这种交互特性是一个典型的 Stackelberg 博弈问题^[1]。

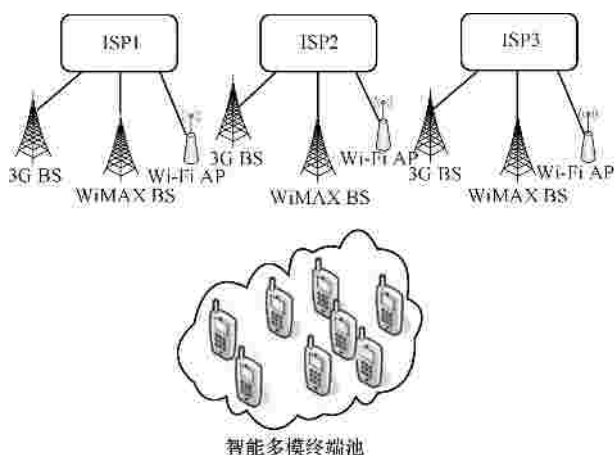


图 1 多运营商的异构无线网络场景

本文为动态地反映网络系统资源的使用情况,无线网络运营商通过字节数计费的动态价格方案出售无线网络资源,移动用户根据价格策略动态地调节自身在不同接入网络的带宽分配策略。为分析用户、运营商相互之间的交互行为,引入了一种多主多从 Stackelberg 博弈模型^[2]。博弈中存在 2 类参与者:领导者(leader)和跟随者(follower)。把每个运营商看为一个领导者,每个移动用户定义为一个跟随者。证明在确定的价格策略下,用户效用函数满足凹函数的特性,保证了用户间构成的非合作博弈纳什均衡点的存在。最后采用一种分布式的迭代算法,取得了异构无线网络系统资源分配的子博弈完美纳什均衡(subgame perfect Nash equilibrium),保证运营商、移动用户都得到了最优效用。

2 相关工作

最近有许多文献利用各种博弈论模型来研究网络的资源分配问题,包括带宽分配、频谱分配、功率分配等。利用博弈论进行网络资源管理的一般方法是基于一些解决方案的概念(如 Wardrop 均衡、纳什均衡)及其精炼或扩展,来获取网络实体的行为策略。

基于 Stackelberg 博弈模型的资源分配工作可分为 2 类:一类是单主多从式,另一类是多主多从式。文献[3]采用了单个领导者 Stackelberg 博弈模型,分析有线网络的带宽分配问题。文中分析了纳什均衡点的存在性,并通过反向归纳法得到最优价格策略。通过动态博弈和多次逐步诱导算法,网络各条链路中的用户带宽最终收敛到稳定的最优解。文献[4]研究了无线运营商竞争异构无线用户的问题,通过两阶段多主多从 Stackelberg 博弈模拟用户和运营商间的交互行为,并证明了子博弈完美纳什均衡的存在性,最后提出了一个分布式算法全局收敛到系统的均衡点。但是该模型假定网络是饱和的,没有考虑时延带来的用户开销。文献[5]采用单主多从 Stackelberg 博弈模型,研究认知无线场景中授权频段的分配问题,认知用户通过博弈来进行发射功率的分配。文献[6]利用多主多从 Stackelberg 博弈模型,研究了在认知无线网络场景下,主用户和认知用户间的经济交互行为。文中设定了用户的多项式花费函数,并通过逆向归纳法获取了优化策略。

文献[7]中分析了多个认证用户(主用户)向多个非认证用户(认知用户)出售频谱的频谱交易问题。文中采用演化博弈分析认知用户频谱分配的动态行为,通过一个演化过程来模拟认知用户的选择过程。

文献[8]中为实现频谱的有效配置,提出了两层交易系统。上层系统采用密封投标背包拍卖(knapsack auctions)机制,无线服务提供商基于各自的投标动态分配频谱资源;底层采用博弈论方法来解决无线服务提供商同用户之间利益的冲突。

3 多主多从 Stackelberg 博弈简介

设有 2 个决策层,其中,有 m 个领导者和 n 个跟随者。定义领导者的集合为 $M=\{1,2,\dots,m\}$,跟随者的集合定义为 $F=\{1,2,\dots,n\}$ 。假定领导者的策略组合为 $x=\{x_1,x_2,\dots,x_m\}$,策略集为 X ,跟随者的策略组合为 $y=\{y_1,y_2,\dots,y_n\}$,策略集为 Y 。其中,领导者 i 的效用函数为 $G_i(x,y)$,跟随者 j 的效用函数为 $F_j(x,y)$,存在 $x \in X, y \in Y$ 。则上述问题就是一个多主多从 Stackelberg 博弈问题。

用 $N(x)$ 表示在领导者策略为 x 下,跟随者的非合作博弈纳什均衡点的集合。则问题表示为

$$N(x) = \{y^* = (y_1^*, L, y_j^*, L, y_n^*) : F_i(x, y_j^*, y_{-j}^*) = F_i(x, y_j, y_{-j}^*)\} \quad (1)$$

任何策略 $y^* = (y_1^*, L, y_j^*, L, y_n^*)$ 满足式(1), 则称 y^* 是一个带参数的非合作博弈的纳什均衡点。

设 $U = \{x, y, G_i(x, y), F_i(x, y)\}$, $i \in M, j \in F$ 表示两阶段主从式 Stackelberg 博弈均衡问题, 则该问题表示为: 存在 $(x^*, y^*) \in X \times Y$, 使得

$$G_i(x_i^*, x_{-i}^*, y^*) = G_i(x_i, x_{-i}^*, y^*) \quad (2)$$

其中, $i \in M, y^* \in N(x)$ 。

若任何策略组合 $(x^*, y^*) \in X \times Y$ 满足式(2), 则称 (x^*, y^*) 为一个主从 Stackelberg 博弈的均衡点, 又称为子博弈完美纳什均衡。

4 网络模型和算法描述

4.1 异构无线网络中的 Stackelberg 博弈模型

在异构无线网络的多主多从 Stackelberg 博弈模型中存在 2 类参与者: 领导者和跟随者。

领导者: 在异构无线网络环境中, 把每一种无线接入技术的运营商定义为一个领导者。领导者是网络资源的拥有者和策略的制定者, 领导者通过提供用户带宽满足移动用户业务的需求, 并通过价格策略来影响用户的带宽需求策略, 最大化自身网络的效用。

跟随者: 把异构无线网络中每一个多模终端移动用户定义为一个跟随者。跟随者即是网络资源的需求者, 移动用户根据不同网络的价格和自身在网络中获得的效用, 调节自身的带宽需求策略。

策略: 每个移动用户的策略就是向有效网络请求带宽。由于移动用户可能同时存在多个可选择网络, 所以其带宽策略是一个混合策略。就运营商而言, 策略就是其公告的带宽价格。当运营商只有一种无线网络接入技术, 那他的价格策略就是一个纯策略。

网络资源大致可分为带宽、缓冲、CPU 等, 其中, 无线带宽资源是影响移动用户网络拥塞和传输延迟的最重要因素, 而且跟用户得到的收益最直接相关。假定在一个异构无线网络环境中存在多种异构的无线网络技术, 每一种接入技术被一个运营商运营, 设定为运营商集为 $M = \{1, 2, \dots, m\}$ 。在异构无线网络的覆盖范围内的移动用户集为 $N = \{1, 2, \dots, n\}$, m 个运营商竞争在其重叠覆盖区中

的 n 个移动用户。运营商 j 的价格策略是 p_j , 所有运营商的价格策略向量定义为 $p = (p_1, p_2, \dots, p_m)$ 。一个用户 i 通过向不同的运营商网络订购一定量的带宽资源, 来满足其自身的业务需求, 用户同网络之间的通信可以是上行链路, 也可以是下行链路。假定 q_{ij} 表示用户 i 当前向接入网络 j 请求的带宽, 定义 $q_i = (q_{ij}, q_{-ij})$ 为当前用户 i 的带宽需求矢量, 其中, q_{-ij} 表示用户 i 同除网络 j 外的其他接入网络的带宽策略, $q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ 表示异构无线网络中所有用户的带宽需求组合。定义 C_j 为接入网络 j 的容量, 对用户 i 接入到网络 j 的传输带宽 q_{ij} , 则满足 $0 \leq q_{ij} \leq C_j$, 对整个网络 j 的负载满足 $\sum_{i=1}^n q_{ij} \leq C_j$ 。

用户和运营商相互之间的竞争博弈由 2 个阶段组成。在第一阶段中, 不同网络运营商首先声明价格策略 p , 并将价格公告给所有的移动用户。移动用户间依据收到的价格策略 p , 制定自身的带宽方案 q 。在确定了价格策略后, 用户对网络资源的竞争就构成一个非合作博弈问题, 纳什均衡是该博弈问题的解。在第二阶段中, 运营商在获知移动用户的带宽策略后, 又会通过调节自己的价格来进一步获取最优的效用。其中, (p, q) 表示运营商价格和用户接入带宽的策略分布, 也是 Stackelberg 博弈的一个解。

4.2 效用函数

效用反映了一个博弈的参与者对选择的策略的满意程度, 效用通过基于策略的效用函数来描述。

4.2.1 移动用户效用函数

用户效用函数: 在异构无线网络中对移动用户而言, 他们构成了非合作博弈关系。用户之间不会互相告知彼此的个人信息, 并且每个用户独立地选择接入网络, 制定带宽需求策略。用户的效用函数是由其基于带宽的收益和花费两部分组成。用户的带宽需求是一个动态变化值, 用户收益不但同得到的带宽有关, 不同用户对同一单位带宽其满意程度也有差异。用户的花费包括用户分配的带宽所支付的费用和网络中用户的时延 2 部分。价格升高将增加用户支付的费用, 网络拥塞引起传输时延的增大, 这些因素都会导致用户的花费增加、效用降低。这假定用户是价格的接受者, 用户不去考虑他们的选择对运营商价格的影响。

假定存在移动用户 i , 其效用函数定义为 $F_i(p, q_i, q_{-i})$, 表达式可以表示为

$$F_i(\mathbf{p}, \mathbf{q}_i, \mathbf{q}_{-i}) = U_i(\sum_{j=1}^m q_{ij}) - \sum_{j=1}^m P_j(p_j, q_{ij}) - \sum_{j=1}^m D_j(q_{ij}) \quad (3)$$

其中, 函数 U_i 表示用户 i 在其带宽矢量为 \mathbf{q}_i 时的收益函数, $P_j(p_j, q_{ij})$ 表示用户 i 关联到网络 j 支付给网络 j 的费用, $D_j(q_{ij})$ 表示网络 j 给用户 i 带来的时延的开销。

在实际的网络应用中, 用户分配的带宽是一个非常关键的指标, 在这里仅考虑分配的带宽这一性能指标来衡量用户收益函数。用对数函数来表示移动用户业务流基于带宽的效用函数^[9], 可表示如下

$$U(x) = a \log(1 + x) \quad (4)$$

其中, a 是一个大于零的常量, 跟具体的用户体验相关, x 表示用户获得的总带宽。

每个用户 i 根据当前的价格策略 \mathbf{p} , 调整自己在不同接入网络的带宽需求。最终每个用户的目标是选择自己的最优策略 \mathbf{q}_i^* , 最大化自身的效用函数 F_i , 即满足 $\max\{F_i(\mathbf{p}^*, \mathbf{q}_i, \mathbf{q}_{-i}^*)\}$, 其中, \mathbf{p}^* 和 \mathbf{q}_{-i}^* 表示博弈中的其他参与者 (包括运营商和其他用户) 都各自选择了最优的价格策略和带宽需求策略。

文中采用基于带宽的线性价格方案来衡量用户购买带宽的花费。具体地, 用户购买带宽的花费 $\sum_{j=1}^m P_j(p_j, q_{ij}) = \sum_{j=1}^m p_j q_{ij}$, 其中, j 表示用户 i 当前所关联的网络, $q_{ij} > 0$ 表示用户 i 请求的带宽。

文献[10]设定时延花费函数为基于网络负载的多项式时延函数。多项式时延函数能保证每个用户的带宽需求和网络的价格策略都是一个可预测的有效值, 并能使用户非合作博弈的纳什均衡点存在。假定用户 i 传输速率为泊松业务流, 且当一个网络 j 中所有用户总的负载 $Q_j > C_j$, 网络将发生拥塞。只有 $Q_j < C_j$, 网络才能够保证用户业务的有效传输。具体地, 无线网络 j 的负载为 Q_j 时, 用户 i 在网络 j 中的时延花费函数可以表示为

$$D_j(\mathbf{q}) = \begin{cases} \frac{b_j}{C_j - Q_j}, & C_j > Q_j \\ \infty, & C_j \leq Q_j \end{cases} \quad (5)$$

其中, b_j 是跟具体网络接入技术相关的常量。于是对用户 i 其效用函数可表示为

$$F_i(\mathbf{p}, \mathbf{q}_i, \mathbf{q}_{-i}) = a_i \log\left(1 + \sum_{j=1}^m q_{ij}\right) - \sum_{j=1}^m q_{ij} p_j - \sum_{j=1}^m \frac{b_j}{C_j - Q_j} \quad (6)$$

4.2.2 运营商效用函数

运营商效用函数: 对于运营商而言, 不考虑其他的开销, 将其得到的收益定义为运营商的效用, 所以其效用函数可以利用收益函数 $G_j(p_j, \mathbf{q})$ 来表示。

运营商的收益即是运营商向移动用户出售带宽得到的费用。定义第 j 个运营商网络的收益函数为 $G_j(p_j, \mathbf{q}) = Q_j p_j$, 其中, $Q_j = \sum_{i=1}^n q_{ij}$ 表示同网络 j 相关的所有用户的总带宽, 即网络 j 中当前的负载。从运营商的角度分析, 运营商希望通过选择最优的价格来最大自身的收益。如果价格定的过高, 用户可能会切换到竞争对手的网络, 使得当前的接入网络的负载较低; 如果价格很低, 运营商者即使网络趋于饱和也可能使得收益减少。所以运营商必须选择一个适合的价格。假定运营商 j 的最优价格策略是 p_j^* , 则其最大收益可满足 $\max\{G_j(p_j, p_{-j}^*, \mathbf{q}^*)\}$, 其中, p_{-j}^* 和 \mathbf{q}^* 表示博弈中其他参与者都选择了满足自身效用最优的价格策略和带宽需求策略。

4.3 移动用户非合作博弈的纳什均衡点

纳什均衡是非合作博弈问题的基本概念, 是非合作博弈的解。当达到纳什均衡后, 非合作博弈中的每个参与者的效用函数都达到最大值, 且参与者单方面改变自身的策略不会增加自身的收益。但是并不是每一个非合作博弈都存在纳什均衡解, 甚至有些非合作博弈问题有多个纳什均衡解。

定理 1 对于给定的运营商价格策略 $\mathbf{p}=(p_1, p_2, \dots, p_m)$, 用户效用函数为 $F_i(\mathbf{p}, \mathbf{q}_i, \mathbf{q}_{-i})$ 的非合作博弈, 存在纳什均衡点 \mathbf{q}^* 。

证明 显然, 任意用户 i 的带宽策略空间 $\{\mathbf{q}_i\}$ 是欧几里得空间中的有界闭集。此外, 用户的效用函数 F_i 在其策略空间上是连续的。下面证明效用函数为凹函数。

对任意用户 i 的效用函数 $F_i(\mathbf{p}, \mathbf{q}_i, \mathbf{q}_{-i})$ 求一阶偏导得

$$f_i(q_{ij}) = \frac{\partial F_i(\mathbf{p}, \mathbf{q}_i, \mathbf{q}_{-i})}{\partial q_{ij}} = \frac{a_i}{\left(1 + \sum_{j=1}^m q_{ij}\right)} - p_j - \frac{b_j}{(C_j - Q_j)^2} \quad (7)$$

对用户 i 的效用函数 $F_i(\mathbf{p}, \mathbf{q}_i, \mathbf{q}_{-i})$ 求二阶偏导得

$$\frac{\partial^2 F_i(\mathbf{p}, \mathbf{q}_i, \mathbf{q}_{-i})}{\partial q_{ij}^2} = -\frac{a_i}{\left(1 + \sum_{j=1}^m q_{ij}\right)^2} - \frac{2b_j}{(C_j - Q_j)^3} < 0 \quad (8)$$

其中, $q_{ij} > 0, b_j > 0$ 。可见用户的效用函数是严格凹

的，这确保了纳什均衡的存在性^[11,12]。

4.4 Stackelberg 博弈问题的求解

Stackelberg 博弈求解的一般方法是逆向归纳法^[11]，但是逆向归纳法是一种完全信息的解决方案，即需要博弈的每个参与者必须获知其他参与者的相关信息，这一方法在异构无线网络系统中是很难实现的。本文提出了一种分布式的迭代算法，来获取 Stackelberg 博弈的子博弈完美纳什均衡解，对博弈中每个参与者仅需要获知网络中的一些局部信息。

假定在时刻 t 时运营商公告的价格策略为 $p(t)$ ，这时对移动用户而言其需要调节自身的带宽策略，使其带宽策略满足纳什均衡的解。考虑一个简单的动态模型，其中，用户带宽的改变率同他的效用函数的梯度成正比。

$$\frac{dq_{ij}}{dt} = \dot{q}_{ij} = \frac{\partial F_i(p, q_i, q_{-i})}{\partial q_{ij}} \quad (9)$$

其中， t 是时间变量，效用函数凹函数的特性保证了迭代算法能够收敛到博弈的纳什均衡点^[11]。

具体地，当前时刻 t 和下一时刻 $t + 1$ 的时间间隔内，用户 i 的带宽策略迭代方程可表示为

$$q_{ij}(t + 1) = q_{ij}(t) + v_i \dot{q}_{ij} \quad (10)$$

其中， $v_i > 0$ 表示用户带宽策略调节步长。

在用户达到纳什均衡后，网络运营商根据用户的带宽策略分布，通过价格迭代来调节自身的价格，运营商价格的变化率通过其边际效用表示。对任意网络 j 的价格迭代方程为

$$p_j(t + 1) = p_j(t) + w_j \left(\frac{\partial G_j(p(t), q(t))}{\partial p_j(t)} \right) \quad (11)$$

其中， $w_j > 0$ 表示网络的价格策略调节步长。

网络的边界效用可以通过一个小的变化量 e （例如 $e = 10^{-4}$ ）来计算其对效用产生的影响。例如网络 j 基于价格的边界收益可以粗略计算为

$$\frac{\partial G_j(p(t), q(t))}{\partial p_j(t)} \approx \frac{G_j(L, p_j(t) + e, L) - G_j(L, p_j(t) - e, L)}{2e} \quad (12)$$

在用户达到纳什均衡过程中，网络运营商必须保持价格不变，观察并等候移动用户对不同接入网络带宽策略达到稳定。这一等候时间即是网络运营商一次迭代的间隔时间 Δt ， Δt 也是所有用户迭代并达到纳什均衡的时间间隔。所以网络侧价格变化的

迭代过程包含多个时间片 Δt ，每个时间片 Δt 中又包含多个用户一次迭代的时间间隔 Δt 。对整个异构无线网络系统而言，迭代的最终结果是用户和运营商各自得到了最优带宽策略 q^* 和价格策略 p^* ；由于用户侧和网络侧的博弈都达到了纳什均衡，对两阶段多主从 Stackelberg 博弈而言，取得了子博弈完美纳什均衡 (p^*, q^*) 。算法时间序列如图 2 所示。

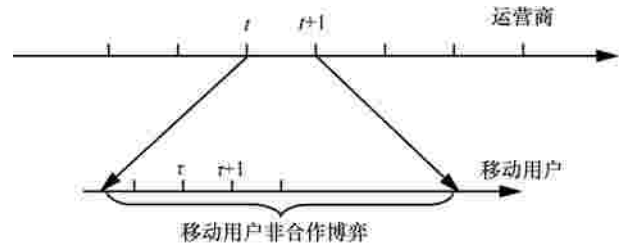


图 2 迭代算法运行时间序列

整个迭代过程采用如下的循序。

- 1) 运营商在每一个时刻 t ，根据式(11)和式(12)的边际效用来重新制定价格策略。
- 2) 用户收到新的价格策略的消息后，在每一个时间间隔 Δt ，根据式(9)和式(10)调节自身的带宽需求策略，直到用户的效用达到最大值，全体用户达到纳什均衡为止。
- 3) 如果此时所有运营商的效用都达到了最大值，则停止迭代。否则在下一个时刻 $t + 1$ ，运营商根据用户的带宽策略，重新回到 1) 继续迭代。

Stackelberg 博弈迭代算法伪码描述如下。

Scenario

Set networkSet = {1, 2, L, m};

Set userSet = {1, 2, L, n};

Initialization

initialize value for

$p_j, \exists j = 1, 2, L, m;$

$q_{ij}, \exists i = 1, 2, L, n \text{ and } j = 1, 2, L, m;$

$t = 0;$

Iteration

while $\exists j \neq \max\{G_j(p_j, p_{-j}^*, q^*)\}, j = 1, 2, L, m$

for each moment t , each network j changes its price p_j by equation (9),(10);

during the epoch Δt ,

each user i changes his bandwidth vector q_i

by equation (11),(12) for each epoch Δt ;

$t = t + 1;$

end while

End

5 仿真与分析

5.1 参数设定

仿真场景考虑一个由 WiMAX 和 WLAN 2 种无线接入技术相融合的异构无线网络环境, 其中每一种接入技术分别由不同的网络运营商运营, 网络的拓扑结构如图 3 所示。整个异构无线网络环境为 1000m×1000m 的空间, 仿真模型中设置一个 WiMAX BS 和一个 WLAN AP。其中, WiMAX 是全覆盖的, 其传输半径是 500m, 传输带宽 50Mbit/s。WLAN 在 WiMAX 的覆盖范围之内, 其传输半径是 100m, 传输带宽 11Mbit/s。在 WLAN 的覆盖范围内, 存在 10 个 $a = 2$ 的移动用户。WiMAX 的网络覆盖范围除去 WLAN 的覆盖范围剩余空间中分布着 10 个 $a = 1.5$ 的移动用户。仿真中两类移动用户在 2 个网络的初始带宽策略都为 0, 然后逐步改变, 且用户的总带宽不会超过网络的总带宽。假定在初始条件下 WiMAX 和 WLAN 的价格策略都是 0.1, b 值都为 1, $v=0.1$, $w=0.1$ 。仿真工具采用 MATLAB R2009b, 辅助以 Origin 8.0 和 Office 2003 绘图。

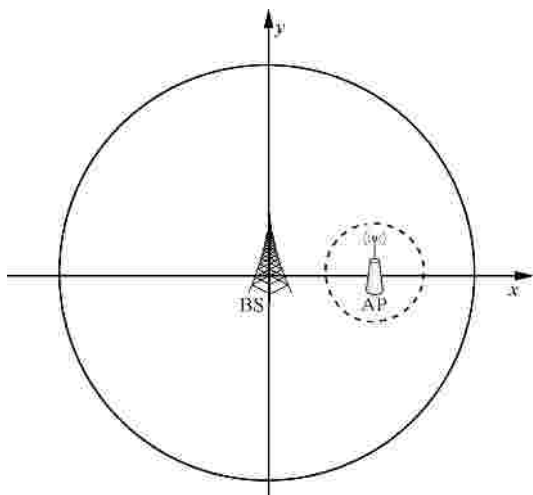


图 3 异构无线网络场景

5.2 仿真结果

首先来分析在运营商公布价格策略后用户间的基于非合作博弈的竞争过程, 然后再分析运营商之间的非合作博弈关系。图 4~图 7 分别分析了迭代过程中 $a = 2$ 用户的带宽策略、网络的负载、影响 $a = 2$ 用户效用函数的影因素、以及不同类型用户间的博弈并达到纳什均衡点的过程。图 8 和图 9 说

明了运营商间的最优效用、最优价格策略以及纳什均衡点的获取的过程。

图 4 给出 $a = 2$ 的用户迭代过程中带宽策略变化曲线。其中, WLAN 和 WiMAX 曲线分别表示用户向 WLAN 网络和 WiMAX 网络请求的带宽。由图可见在迭代过程中用户获取的 WLAN 网络的带宽逐渐增大, 在 0.97Mbit/s 时达到最大, 然后缓慢减小, 直至在 0.93Mbit/s 时达到稳定。用户在 WiMAX 网络中的带宽逐渐增加, 当达到 2.45Mbit/s 时趋于稳定。

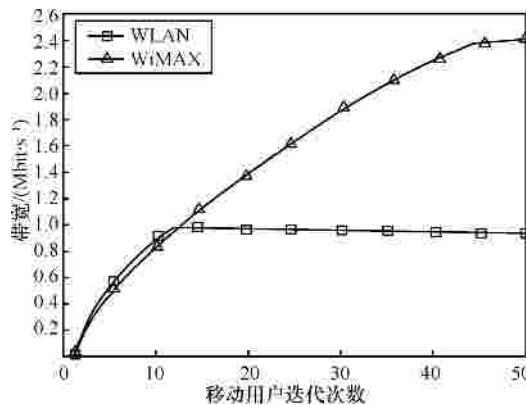


图 4 $a = 2$ 用户在迭代过程中带宽策略的变化

图 5 给出 WLAN 和 WiMAX 网络在迭代过程中网络负载的变化。其中, WLAN 网络中随着用户请求带宽不断的增加, 其负载也逐渐增大, 在 9.7Mbit/s 时达到最大, 然后缓慢减少, 直至在 9.3Mbit/s 时达到稳定。而 WiMAX 网络中的负载是单调增加的, 在 48.3Mbit/s 时趋于稳定。WLAN 和 WiMAX 的负载状态呈现 2 种不同变化趋势的原因是, WLAN 的网络容量较小, 所以较 WiMAX 更早达到饱和, 这时因为网络的拥塞带来了用户开销的增大, 所以用户为增大收益会将一部分带宽转移到负载更小的 WiMAX 网络中。

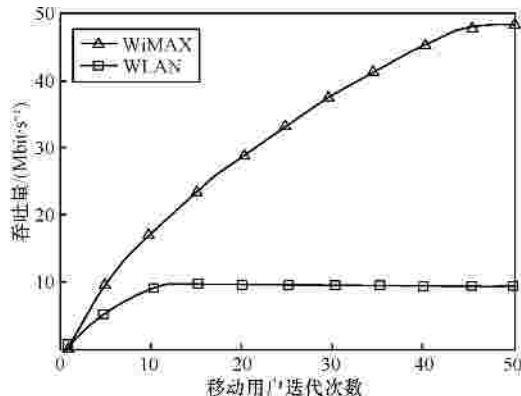


图 5 网络的吞吐量在用户迭代过程中的变化

图 6 显示的是不同因素对 $a = 2$ 移动用户效用函数的影响。从图中可以看出，随着用户向 WLAN 和 WiMAX 网络请求的带宽逐渐增加，用户的收益和购买带宽的花费都随着增加，在趋向收敛的过程中略微有所减小，最终趋于稳定。用户基于时延的花费随着网络负载的增加而急剧变化，最终在纳什均衡点处也达到了稳定。

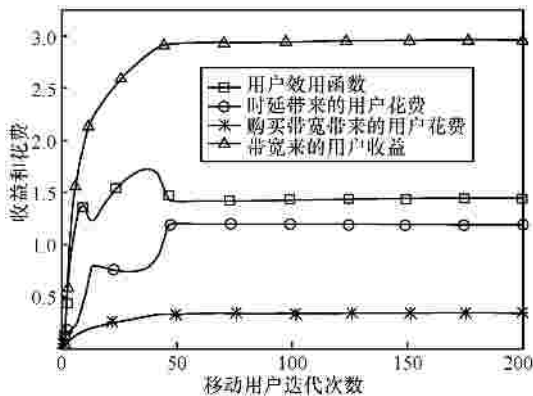


图 6 影响 $a = 2$ 用户效用函数的因素

图 7 显示的是两类不同用户的效用函数在迭代过程中呈现出的变化曲线。曲线 $a = 2$ 中的用户是在 WiMAX 和 WLAN 的双重覆盖区域中，可见其中用户的效用函数在迭代过程中不断变动。曲线 $a = 1.5$ 中的用户仅在 WiMAX 的覆盖区域之内，其效用函数先逐渐增加，后慢慢变小。最终在用户之间达到纳什均衡时，两类用户的效用函数都趋于稳定。

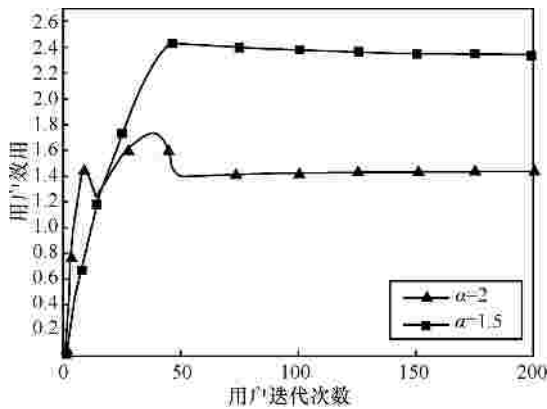


图 7 不同用户的效用函数在迭代过程中的变化

图 8 给出了在固定 WiMAX 网络价格为 0.1 的前提下，WLAN 的效用随价格的变化曲线。显然地，从曲线上看 WLAN 网络的效用函数是基于价格的凹函数。在价格从 0.1 逐渐增大时，WLAN 网络效用随之增大。当价格在 0.38 时，WLAN 的效用达

到最大值 2.82。然后，由于价格的增加带来的网络负载的急剧减小，WLAN 网络的收益开始降低。

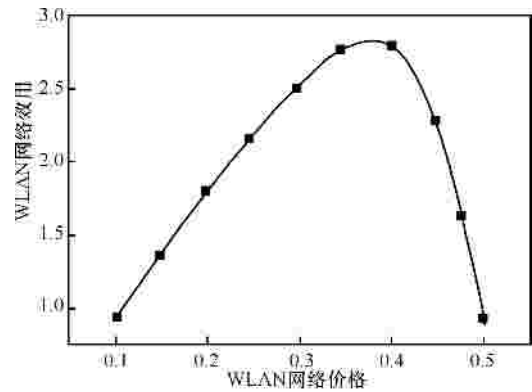


图 8 WiMAX 价格 0.1 时 WLAN 的效用曲线

在图 9 中得到了异构无线网络 Stackelberg 博弈的子博弈完美纳什均衡。图中两条曲线分别是 WLAN 网络的最优价格曲线和 WiMAX 网络的最优价格曲线。两条曲线的交叉点就是纳什均衡点 p^* ，因为在该点处的价格策略能够同时满足 2 个运营商的效用最大，此时如果任意一个运营商单方面改变当前的价格都会降低它的效用，在两条曲线的交叉点处的坐标分别对应 WLAN 和 WiMAX 运营商的最优价格策略。此时，网络侧和用户侧都达到了纳什均衡，对 Stackelberg 博弈取得了子博弈完美纳什均衡。

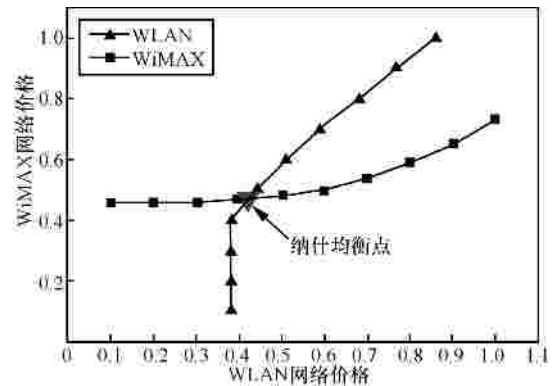


图 9 运营商间博弈的纳什均衡点

6 结束语

本文的异构无线网络资源管理方案，同时考虑了运营商和用户的利益，采用 Stackelberg 博弈来分析移动用户和运营商彼此之间的交互关系。移动用户在运营商确定的价格策略下，形成一个非合作博弈问题。基于用户效用函数凹函数的假设，确保了

用户间的非合作博弈纳什均衡点的存在。然后提出了一种分布式迭代算法,来获取参与者的最优价格策略和最优带宽策略。用户将效用函数的一阶导数作为带宽策略的变化率,改变用户自身的带宽策略,并能保证最终用户间的博弈能够收敛到纳什均衡点。基于用户的最优带宽策略,运营商通过迭代也取得了纳什均衡点,整个异构无线网络系统达到了子博弈完美纳什均衡。本文下一步的工作应是对网络侧运营商之间非合作博弈纳什均衡点的存在性从理论上进行分析,另在计算运营商的效用时缺少对运营商购买牌照的花费和网络建设和运营花费的考虑。

参考文献:

- [1] (美)佛登伯格, (法)梯诺尔著. 博弈论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2002.
FUDENBERG D, TIROLE J. Game Theory[M]. Beijing: China Renmin University Press, 2002.
- [2] 田厚平, 郭亚军, 王学军. 一类基于进化博弈的多主多从 Stackelberg 对策算法[J]. 系统工程学报, 2005, (3):303-307.
TIAN H P, GUO Y J, WANG X J. Algorithm of stackelberg game with multiple leaders_followers based on evolutionary game theory[J]. Journal of System Engineering, 2005, (3):303-307.
- [3] 魏蛟龙, 胡进, 代文娟等. 基于 Stackelberg game 诱导策略的网络调度算法[J]. 通信学报, 2009, 30(1):135-140.
WEI J L, HU J, DAI W J, *et al.* Network scheduling algorithm based on stackelberg game with incentive strategy[J]. Journal on Communications, 2009, 30(1):135-140.
- [4] GAJIC V, HUANG J W, RIMOLD B. Competition of wireless providers for atomic users[A]. Proceedings of 47th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing[C]. Monticello, Illinois, USA, 2009.1203-1210.
- [5] 罗荣华, 杨震. 认知无线电中基于 Stackelberg 博弈的分布式功率分配算法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(12):2964-2969.
LUO R H, YANG Z. Stackelberg game-based distributed power allocation algorithm in cognitive radios[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(12):2964-2969.
- [6] ELIAS J, MARTIGNON F. Joint spectrum access and pricing in cognitive radio networks with elastic traffic[A]. 2010 IEEE International Conference on Communications (ICC 2010)[C]. Cape Town, South Africa, 2010.1-5.
- [7] DUSIT N, EKRAM H, ZHU H. Dynamics of multiple-seller and multiple-buyer spectrum trading in cognitive radio networks: a game-theoretic modeling approach[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2009, 8(8):1009-1022.
- [8] SENGUPTA S, CHATTERJEE M. An economic framework for dynamic spectrum access and service pricing[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2009, 17(4):1200-1213.
- [9] JIANG Z, GE Y, LI Y. Max-utility wireless resource management for best-effort traffic[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(1):100-111.
- [10] ALTMAN E, BASAR T, JIMENEZ T, *et al.* Competitive routing in networks with polynomial costs[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2002, 47(1):92-96.
- [11] ROSEN J B. Existence and uniqueness of equilibrium points for concave n-person games[J]. Econometrica, 1965, 33(3):520-534.
- [12] ALPCAN T, BASAR T. A game-theoretic framework for congestion control in general topology networks[A]. Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control[C]. Las Vegas, Nevada, USA, 2002. 1218-1224.

作者简介:



姜永 (1980-), 男, 山东昌邑人, 北京邮电大学博士生, 主要研究方向为内容分发网络、移动性管理、异构无线网络的资源管理、基于博弈论的网络资源管理。

陈山枝 (1969-), 男, 浙江台州人, 电信科学技术研究院教授级高工、博士生导师, 主要研究方向为移动性管理和网络生存性。

胡博 (1978-), 男, 安徽桐城人, 北京邮电大学副教授, 主要研究方向为移动互联网和移动性管理。