

# 异构无线网络用户网络关联优化： 一种基于群体博弈的方法

姜 永<sup>1)</sup> 胡 博<sup>1)</sup> 陈山枝<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室 北京 100876)

<sup>2)</sup>(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(Heterogeneous Wireless Networks, HWNs)负载平衡问题,提出了一种基于群体博弈的用户网络关联方案.首先将 HWNs 系统用户网络关联问题抽象成一个群体博弈模型,根据用户在网络中得到的收益函数,证明该群体博弈满足势博弈的条件.利用复制动态作为演化动态工具,证明演化的结果最终会收敛到纳什均衡,这个特性确保了每个用户关联到一个效用最优的网络.然后证明纳什均衡点能最大化整个 HWNs 系统的吞吐量,保证了纳什均衡的有效性.最后,基于复制动态原理提出了用户网络关联算法.仿真实验模拟了用户网络选择过程,得到了均衡点,验证了理论分析的结果.

**关键词** 异构无线网络;演化博弈;群体博弈;势博弈;复制动态;纳什均衡

**中图法分类号** TP393 **DOI号**: 10.3724/SP.J.1016.2012.01249

## User-Network Association Optimization in Heterogeneous Wireless Networks: A Population Game-Based Approach

JIANG Yong<sup>1)</sup> HU Bo<sup>1)</sup> CHEN Shan-Zhi<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(State Key Laboratory of Switching and Networking Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

<sup>2)</sup>(State Key Laboratory of Wireless Mobile Communication, China Academy of Telecommunication Technology, Beijing 100083)

**Abstract** Load balancing is an important issue in Heterogeneous Wireless Networks (HWNs). We propose a user-network association algorithm based on population games to solve the problem. Firstly the user-network association is modeled as a population games which satisfies the requirement of potential games relying on the user utility function in access network. By means of replicator dynamics, we demonstrate that evolutionary result eventually converges to Nash Equilibrium. This makes sure each user connecting to a network with the maximum payoff. Moreover, it is proved that the throughput of whole HWNS system can be maximized after reaching Nash Equilibrium, which ensures the efficiency of Nash Equilibrium. Finally, a user-network association algorithm is presented with the principle of replicator dynamics. Simulation shows that Nash Equilibrium point is achieved and the results of theoretical analysis are verified.

**Keywords** heterogeneous wireless networks; evolutionary games; population games; potential games; replicator dynamics; Nash Equilibrium

收稿日期:2011-12-07;最终修改稿收到日期:2012-05-11.本课题得到国家“八六三”高技术研究发展计划项目基金(2011AA01A101)、科技部国际科技合作计划专题项目基金(2010DFB13020)、教育部高等学校博士点基金(20090005120013)资助.姜 永,男,1980年生,博士研究生,主要研究方向为移动性管理、异构无线网络资源管理. E-mail: jiangyong800800@163.com.胡 博,男,1978年生,博士,副教授,主要研究方向为异构无线网络技术、移动性管理和资源管理.陈山枝,男,1969年生,博士,教授级高工,博士生导师,主要研究领域为新一代移动通信网络、网络融合与演进、移动性管理.

## 1 引 言

近年来,随着各种宽带无线接入技术的出现并广泛的部署以及智能终端技术的发展,人们获取 Internet 访问的方式更加多样化,业务需求更加个性化.一方面,各种无线接入技术,包括 WLAN (Wireless Local Area, 无线局域网)、UMTS (Universal Mobile Telecommunications System, 通用移动通信系统) 和 WiMAX (World Interoperability for Microwave Access, 无线城域网) 等,相互融合、相互补充,为用户提供了一个异构无线网络 (Heterogeneous Wireless Networks, HWNs) 接入环境.另一方面,多模移动终端的智能化,使用户能够做出更加恰当的网络选择决策.多模智能无线接入设备,在 IEEE 802.21 标准<sup>[1]</sup>的支持下,具备了同时接入不同接入技术的网络并从一种接入技术的网络切换到另一种接入技术的网络的能力.在 HWNs 环境中,智能移动终端可以通过基于切换(垂直切换或水平切换)的网络选择机制,选择最优的接入网络,增加自身的收益,进一步提升 HWNs 系统的性能,实现网络之间的负载均衡.

HWNs 的负载平衡可通过两种方式取得:网络驱动的方式和用户驱动的方式.在网络驱动的方法中,网络通过集中式管理,能够将网络资源分配到某个区域或指定用户切换到特定的网络中.这类方法的缺点是系统中各种无线接入网络之间必须紧密集成在一起,大量额外信令开销可能产生.另一种用户驱动的方法,可以通过移动用户主动的网络选择决策或垂直切换实现.基于用户驱动的方式由于实现复杂度低和额外开销少相对更容易实现,但是用户要进行决策首先要获得一定量的决策信息.如果用户能够获得各个网络当前的状态信息(如信号强度,网络负载等),就可以做出最优的网络选择或切换决策,但是往往这些网络状态信息是很难得到的.一种更为简单有效的方式是基于“试错”(try and error)的思想,即首先用户随机接入到一个网络中,然后根据用户在不同网络中的收益通过网络切换不断改变关联网络,最终选取一个收益最优的网络.我们的工作中基于群体博弈的用户网络关联算法,正是利用“试错”的机制来实现 HWNs 负载平衡的.

本文我们以 WiMAX/WLAN 融合的 HWNs 环境为例(如图 1),提出一种 HWNs 中基于群体博弈的用户驱动的网络关联方法,解决了 HWNs 的负

载均衡问题.利用设计的基于用户分配的带宽的收益函数,用户网络关联和 HWNs 资源分配问题被抽象成一个群体博弈 (population games), HWNs 中具有相同的有效接入网络集和传输速率的用户被划分成一个群体.并且我们证明基于当前用户收益下的群体博弈是一个势博弈 (potential games), 其势函数 (potential function) 可以表示成整个网络的吞吐量.为模拟用户网络选择的过程,引入了演化博弈 (evolutionary games).文中采用复制动态 (replicator dynamics) 作为演化博弈动态工具,证明动态演化的过程最终会收敛到演化平稳点,且该平稳点即为系统的纳什均衡点.在均衡点处,群体中的每个用户的收益都趋于相同,并都选择了一个收益最大的接入网络.用户最大化自身收益的博弈过程往往会导导致社会收益不是最优的.我们证明了在纳什均衡点处, HWNs 的总体吞吐量达到最大,从而保证了均衡点的有效性.基于复制动态的原理,一个用户网络关联算法被提出来模拟用户的网络选择过程.仿真实验实现了用户网络关联算法,得到了纳什均衡点,分析了达到稳定后用户和系统的各种性能指标,验证了理论分析的结果.

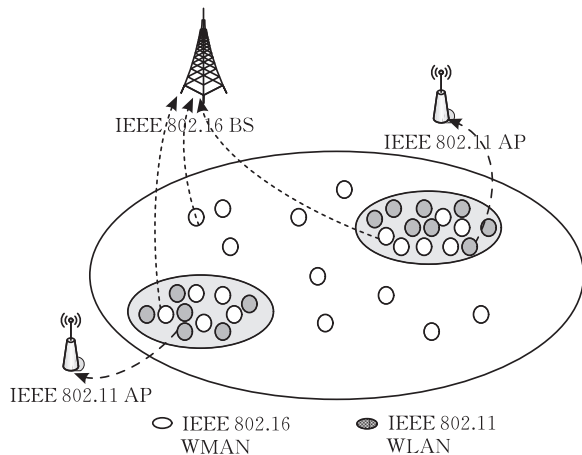


图 1 HWNs 用户接入环境

概括起来讲,本文的主要工作是:

(1) 采用群体博弈的方法来分析用户的网络关联问题.根据用户在接入网络中分配的带宽和花费设计了用户的收益函数,证明基于该收益函数的博弈是一个势博弈.利用复制动态作为演化博弈动态工具,证明演化过程最终会收敛到一个平稳点,即纳什均衡点.进一步证明在均衡点处 HWNs 的总带宽达到了最大值.

(2) 提出并仿真实现一个用户网络关联算法.基于一个 HWNs 场景模拟了用户网络选择并最终

达到稳定的过程. 分析了网络和用户各项性能指标, 验证了理论分析的结果.

本文第 2 节简单介绍基于博弈论进行 HWNs 资源管理的工作; 第 3 节介绍群体博弈和演化博弈的预备知识; 在第 4、5 节中构建用户收益函数和群体博弈模型, 通过演化博弈获得纳什均衡, 并进一步证明均衡点的有效性; 第 6、7 节是用户网络关联算法的设计和仿真分析; 最后第 8 节总结全文.

## 2 相关工作

博弈论是指研究多个个体或群体之间, 在特定条件制约下的对局中利用相关方的策略, 实施对应策略的学科, 是研究具有斗争或竞争性质现象的理论和方法. 博弈论在很多领域均可作为重要的理论工具, 解决其中的冲突与合作问题, 如生物学、经济学、国际关系学、计算机科学、政治学、军事战略等. 近年来, 博弈论也被用于设计和分析无线通信网络系统, 包括功率控制、资源分配、路由选择、负载均衡、流量控制、接纳控制等问题. 博弈论应用于 HWNs 中主要解决资源管理的问题(如网络选择、垂直切换、接纳控制等). 目前具有典型代表性的工作主要有:

Khan 等人<sup>[2]</sup>将用户为中心的网络选择模拟成密封投标维克瑞拍卖(Vickrey auction)博弈问题. 用户作为拍卖的拍卖人代表业务的买方, 网络运营商作为卖方, 两者通过交互的方式取得自身收益最大值. 另外, 文中引入了模糊逻辑的方法来降低用户切换的频率.

为实现“Always Best Connected and Served”模式, 文献[3]将不同网络提供商之间通过“联盟协定”相互合作成一个整体. 引入非合作博弈模型来制定接纳和负载控制策略, 通过财政激励手段刺激用户和网络提供者的行为.

文献[4]将 HWNs 资源分配问题模拟成一个概率投票(probabilistic voting)博弈, 其中具有竞争关系的网络提供商模拟成选举的候选人, 移动用户形成选民. 文中主要分析了两个应用案例: MIMO 下行链路电源分配博弈和基于 OFDM 的带宽分配博弈. 通过提出的投票博弈详细地分析了平衡的健壮性和存在性.

文献[5-6]都是基于合作博弈的 HWNs 资源分配方案. 它们各种无线网络资源之间形成一个“联盟”来为一个新的用户分配网络资源. 网络资源分配

的稳定利用博弈论中“核”的概念来分析, 一个用户分配的带宽通过利用沙普利值来获得.

文献[7-8]提出了基于非合作静态博弈的 HWNs 的带宽分配、接纳控制算法. 首先, 通过非合作博弈将无线资源分配到网络环境中不同的服务区域中. 然后, 基于获得的带宽和带宽预留阈值制定了有效的接纳控制策略, 利用接纳控制机制来限制每个区域中接入用户数以保证网络中各类业务的服务质量.

在文献[9-10]中都是基于动态演化博弈的模型, 它们都利用边际成本(marginal cost)来定义用户的收益函数, 将单个用户作为博弈的参与者, 并证明通过单个用户的策略改变最终能够取得一个纯策略平衡.

文献[11]提出了一种用户驱动的基于群体演化博弈的 HWNs 负载均衡方案, 并设计了群体选择和强化学习两种网络选择算法. 但文中缺少对演化稳定性的分析, 也没有考虑演化过程对系统总体吞吐量的影响.

文献[12]提出了两层博弈框架. 底层的动态业务选择模拟成基于复制动态演化博弈问题, 上层的业务提供商之间的竞争采用微分博弈(differential games), 一个开环的纳什均衡作为线性状态微分博弈的解.

以上各种方案基于拍卖博弈、投票博弈、演化博弈以及群体博弈等博弈模式研究 HWNs 的资源分配的问题, 提出了各种网络选择、接纳控制、带宽分配方案, 缺少对用户收益和网络的社会效用(如带宽最大或时延最小)的全面考虑.

## 3 群体博弈和演化博弈预备知识

### 3.1 群体博弈

常常很多问题需要的是一个纯策略的纳什均衡, 但是在实际上基于纯策略的纳什均衡是很难得到的. 群体博弈<sup>[13]</sup>提供了在一个采用纯策略的大规模群体中研究策略交互的通用框架.

**定义 1.** 一个具有  $n$  个群体的群体博弈定义为其中的每个群体包含一个参与者集和一个策略集, 且每个策略具有一个收益函数. 假定群体博弈中群体的集合定义为  $N = \{1, 2, \dots, n\}$ . 群体集中的一个群体  $i$  包含  $p_i$  个参与者, 所有参与者集合定义为  $P = \{1, 2, \dots, p_n\}$ ,  $\sum_{k=1}^n p_k = p$ . 群体  $i$  有  $m_i$  个策略, 其策略集定义为  $M_i = \{s_1, s_2, \dots, s_{m_i}\} \subseteq \{1, 2, \dots, m\}$ .

其中,  $m$  为所有可选择策略的个数. 用  $y_{ij}$  表示为群体  $i$  中选择纯策略  $j$  的参与者的数目, 相应的群体  $i$

的策略分布向量  $\mathbf{y}_i = (y_{is_1}, y_{is_2}, \dots, y_{is_{m_i}})$ ,  $\sum_{i=1}^{m_i} y_{is_i} = p_i$ . 所有群体的总的策略组合定义为  $\mathbf{y} = (\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_n)$ . 群体博弈中只指定选择某一策略的用户数量, 并不明确指出是哪个用户选择了某个纯策略. 对一个群体  $i$ , 定义  $x_{ij}$  为群体  $i$  中选择策略  $j$  的参与者占群体中所有参与者的比率, 则  $x_{ij} = y_{ij} / p_i$ , 该群体的策略分布向量又可以表示为  $\mathbf{x}_i = (\frac{1}{p_i} (y_{is_1}, y_{is_2}, \dots, y_{is_{m_i}}))$ .

群体中一个用户选择一个策略的收益函数依赖于群体自身策略分布. 定义群体博弈的收益函数为  $u_i, u_{ij}(\mathbf{y})$  表示在策略组合为  $\mathbf{y}$  下群体  $i$  中的参与者选择纯策略  $j$  得到的收益, 假设收益函数是连续的. 定义在策略组合  $\mathbf{y}$  下群体  $i$  中所有用户的策略收益函数向量为  $\mathbf{u}_i(\mathbf{y}) = (u_{is_1}(\mathbf{y}), u_{is_2}(\mathbf{y}), \dots, u_{is_{m_i}}(\mathbf{y}))$ . 相应地, 所有群体的收益函数组合  $\mathbf{u}(\mathbf{y}) = (\mathbf{u}_1(\mathbf{y}), \mathbf{u}_2(\mathbf{y}), \dots, \mathbf{u}_n(\mathbf{y}))$ .

如果没有用户单方面地改变自身的策略, 一个群体博弈策略组合  $\mathbf{y}^*$  是一个纳什均衡. 更精确地说,  $\mathbf{y}^*$  是一个纳什均衡, 如果对任意群体  $i$  中选择策略  $j$  的用户数  $y_{ij}^* > 0$ , 且对其中任意用户当前的收益  $u_{ij}(\mathbf{y}^*), u_{ih}(\mathbf{y}^*) \geq u_{ih}(\mathbf{y})$ , 其中  $h \in M_i$ .

### 3.2 演化博弈

一般而言, 传统博弈论中行为的预测是基于一些解决方案的概念, 例如 Wardrop 均衡<sup>[14]</sup>、纳什均衡以及其精炼或扩展. 这些概念需要假定参与者是完全理性的, 且参与者在完全信息条件下进行, 即假定每个用户能够正确地预期其它博弈者如何行动或反映, 并做出“一步到位”的准确决策. 这样的均衡知识的假设条件太强, 一般很难实现. 正如文献[15]序言中所说“传统博弈论描述的是尘埃落定之后的情形, 而对尘埃是如何落定的却没有加以描述”. 作为一种替代方案, 演化博弈解决了“尘埃是如何落定”的问题.

**定义 2.** 演化博弈<sup>[16]</sup>是一种研究博弈参与者在有限理性情况下、在复杂的局面中, 如何动态调整自己的策略的理论和方法. 演化博弈理论并不要求参与者是完全理性的, 也不要求完全信息的条件, 它是博弈者渐进地更新它们的行为以对当前的策略环境做出响应. 这个过程具体而言是通过定义一个称为修订协议 (revision protocols) 的纯策略的修订.

一个修订协议将当前的收益和总的行为作为输入, 输出是一个有条件的切换速率. 切换速率描述了给定当前的收益组合和参与者的策略分布, 处于某一群体中采取策略  $a$  的参与者以哪一个频率改变自己的策略到  $b$ . 这个修订协议表述了在动态的演化环境中相应的参与者更新它们的行为并最终达到演化稳定的过程.

演化博弈动态 (dynamics of evolutionary games) 用于演化博弈理论中的策略改变模式. 一个策略如果较平均或它的对手做的更好将增加选择它的频率, 同时降低收益低于平均或对手的策略的频率. 演化博弈论中存在多种演化博弈动态 (如 replicator<sup>[17]</sup>、logit<sup>[18]</sup>、BNN<sup>[19]</sup>等).

## 4 无线用户网络关联的群体博弈建模和演化稳定性分析

本文中我们以 WLAN/WiMAX 融合网络作为我们的 HWNs 环境. 由于高的传输速率、大的覆盖范围以及对移动性和安全性的支持, WiMAX 正成为一种非常有前景的无线接入技术. 同 WiMAX 相比 WLAN 的覆盖范围较小, 但是因为造价低、带宽高且易于部署等优点其已经被广泛的应用. 因此 WLAN 和 WiMAX 的共存必将成为一种不可避免的趋势. 由于用户分布、用户偏好和业务需求不同, HWNs 系统中不同网络间的负载水平可能存在明显差异, 如图 1 中 AP2 中的负载相对其它网络出现了显著的拥塞. 确定有效的用户网络关联方案是平衡网络负载、避免网络拥塞、增大用户收益的关键.

为取得有效的用户网络关联关系, 我们首先将移动用户根据在 HWNs 中的分布分成几个不同的群体, 然后利用一个动态演化博弈模拟用户的网络关联行为. 特别地, 我们假定当前的用户都属于同一业务类, 他们分布在 HWNs 不同地理位置区域中竞争不同无线接入网络中有限的网络资源. 在每个用户的智能终端中, 都捆绑了相应的智能算法, 用户的收益和策略都通过智能终端进行计算并决策. 当前网络中网络负载处于一种不平衡状态时, 接入用户的收益也存在明显的差异. 此时, 基于当前信息和用户有限的理性, 演化博弈理论可以用来模拟用户基于垂直切换的网络选择的动态特性. 也就是说, 当用户感受到所获得的收益小于相同群体中的平均收益时, 用户会慢慢地改变自身的接入网络策略. 最终会达到一种演化平衡, 即同一群体中的用户的收益

趋于一致. 此时任何用户不会改变他的网络选择, 因为接入任何其它网络的收益总是比当前平衡状态下取得的收益小.

#### 4.1 HWNs 环境下用户网络关联的群体博弈建模

在 HWNs 系统中用户网络关联的群体博弈模型可以表述如下:

**参与者:** 在 HWNs 环境中不同位置中的用户拥有不同的可选择接入网络, 并且接入网络相同, 有可能接入网络的传输速率不同. 我们将特定业务类中, 有多个网络选择策略的用户称为一个参与者. 例如在图 1 中的参与者是在 WiMAX 和 WLAN 的重叠覆盖区域中竞争 WiMAX 和 WLAN 网络资源的用户. 在其它区域中的用户不属于参与者, 因为这些用户拥有唯一一个有效接入网络.

**策略:** 每个用户的策略, 就是用户可选择的有效网络及在网络中的传输速率. 对单个用户的接入网络策略而言, 一个混合策略意味着一个用户同时接入多种不同的无线接入技术, 并以混合策略中的比率传送业务流. 理论上说, 混合策略能够提供给用户更高的灵活性, 但在技术实现上很困难. 首先, 同时启动多种无线接口会带来过多的电量消耗并产生较高的热量. 其次, 即使不同无线接入技术间使用不重叠的通道, 无线接口之间的干扰仍是不能被忽略的<sup>[20]</sup>. 最后, MAC 层的负载也大大增加了, 因为它必须将业务流劈开并需要将乱序的数据包重排序后发送给上层协议(如 TCP 等). 而更可行的方案是纯策略, 即用户同时接入到一种接入技术的网络中. 为使用户取得一个纯策略, 我们引入了群体博弈模型.

**群体:** 对某一特定业务类, 我们把策略集相同的参与者定义为一个群体, 即有相同的有效接入网络集, 并且在同一网络中拥有相同传输速率的参与者称为一个群体. 假定一个 HWNs 覆盖区域中有  $n$  个这样的用户群体, 群体的集合定义为  $N = \{1, 2, \dots, n\}$ . 我们假定在同一业务区域里群体中用户的数量是有限的, 群体  $i$  中所有用户为  $p_i$  个, 整个网络系统中的所有用户数为  $p = \sum_{k=1}^n p_k$ ,  $p$  表示 HWNs 所有移动用户的集合. 假定群体  $i$  中有  $m_i$  个可选择的网络, 定义群体  $i$  的策略集为  $M_i = \{s_1, s_2, \dots, s_{m_i}\} \subseteq \{1, 2, \dots, m\}$ . 其中,  $m$  为 HWNs 系统中所有无线网络的个数. 相应地, 群体  $i$  的策略分布向量为  $y_i = (y_{is_1}, y_{is_2}, \dots, y_{is_{m_i}})$ ,  $\sum_{l=1}^{m_i} y_{is_l} = p_i$ ,  $y_{ij}$  表示群体  $i$  中选择接入网络  $j$  的用户的数量. 对整个 HWNs 系统,

所有群体的策略组合为  $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ , 所有移

$$\text{动用户数为 } \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^{m_k} y_{ks_l} = p.$$

在一个群体博弈中实际的参与者应该为一个群体, 群体的混合策略可以表示为群体中选择不同纯策略的用户的分布. 但是就群体中的每个用户而言应该是同某一个确定接入网相关联, 即每个用户选择一个纯策略. 所以我们的群体博弈经过一段的时间的演化达到系统纳什均衡后, 对一个群体而言获得的是一个混合策略, 而对每个用户而言获得的是一个纯策略, 对整个系统而言是一个纯策略平衡.

**收益:** 一个用户的收益是由他接入一个网络后所获得的网络效用定义的.

为了衡量用户的收益, 我们用一个效用函数来定义用户取得的带宽的满意程度. 在策略组合  $y$  下, 群体  $i$  中的用户选择网络  $j$  的收益函数为  $u_{ij}(y) = B_{ij}(y) - \alpha C_{ij}(y)$ , 其中  $\alpha$  是一个常量, 在此我们取 1. 收益函数  $u_{ij}(y)$  由两部分组成,  $B_{ij}(y)$  表示为用户接入网络  $j$  获得的带宽, 而  $C_{ij}(y)$  表示用户的花费, 一个用户接入到一个网络获得的带宽同网络中用户的策略组合  $y$  相关. 在策略组合  $y$  下, 对某一接入技术的网络  $j$  而言, 同该网络关联的用户总数  $A_j(y) = \sum_{k=1}^n y_{kj}$ . 参考文献 [21-22] 对 WiMAX 和 WLAN 网络传输速率的分析, 排除了额外的开销, 对用户接入网络获得的带宽进行了如下近似. 假定用户 1 和 2 分别属于两个不同的种群且都和网络  $j$  相关联, 他们在网络  $j$  中的分配的带宽相同, 但各自的传输速率不同. 则用户在网络  $j$  中分配的带宽可表示为  $B_j = r_{1j}t_{1j} = r_{2j}t_{2j}$ , 其中  $t_{1j}$  表示群体  $i$  中的用户占用网络  $j$  的时间比率,  $r_{1j}$  表示用户在网络  $j$  中的传输速率. 考虑到网络  $j$  中所有用户的时间片之和为 1, 则在网络  $j$  中每个用户分配的平均带宽可用式(1)来表示. 由于网络  $j$  中的所有用户的带宽都相同, 所以我们用  $B_j(y)$  来替代网络  $j$  中任意群体  $i$  中用户的带宽  $B_{ij}(y)$ .

$$B_j(y) = \frac{1}{\sum_{k=1}^n y_{kj} \frac{1}{r_{kj}}} \quad (1)$$

根据每个用户的平均带宽和用户的策略分布, 网络  $j$  上的总吞吐量是

$$T_j(y) = A_j(y)B_j(y) = \sum_{k=1}^n y_{kj} \frac{1}{\sum_{k=1}^n y_{kj} \frac{1}{r_{kj}}} \quad (2)$$

下面来分析如何定义用户的花费. 在一个网络

中由于不同的用户的物理传输不同,所有用户对网络吞吐量的贡献是不相同的.给定一个时间间隔,一些实时传输速率比较大的用户花费了一个相对较小的传输时间,另外一些实时传输速率比较小的用户花费更大的传输时间.我们定义一个群体  $i$  中用户的通道占用率  $D_{ij}(y)$ ,用它来表示每个用户在群体中所占用通道的比率关系,即

$$D_{ij}(y) = \frac{B_j(y)}{r_{ij}} = \frac{1}{r_{ij}} \sum_{k=1}^n y_{kj} \frac{1}{r_{kj}} \quad (3)$$

它给定了群体  $i$  的用户在网络  $j$  中所用时间与整个网络中所有用户所用时间的比率.用户的平均带宽相等,因此一个更小的占用率意味着在群体中的该用户更有效,相应地应该收更少的费用.反之,占用率更大的用户应该收更多的费用.通道占用率可以被看作用户对网络中其他用户的外部性(externality).我们利用带宽来测量用户的收益,应该将通道占用量转换成带宽来计算.就网络的吞吐量而言,在网络  $j$  中群体  $i$  的用户的费用可以定义为该用户占用时间同网络  $j$  总体吞吐量的乘积.所以从网络运营商的角度,群体  $i$  中一个用户接入到网络  $j$  的花费可以如下表示:

$$C_{ij}(y) = D_{ij}(y) \cdot T_j(y) = \frac{1}{r_{ij}} \sum_{k=1}^n y_{kj} \frac{1}{r_{kj}} \sum_{k=1}^n y_{kj} \frac{1}{r_{kj}} \quad (4)$$

我们称之为“花费价格”.网络  $j$  中所有用户的带宽都是一致的,在策略组合为  $y$  的条件下,就可以确定用户的收益函数  $u_{ij}(y)$ .下一步来证明设计的收益函数能满足群体博弈  $u(y)$  是一个势博弈的条件.

#### 4.2 群体博弈 $u(y)$ 是一个势博弈

对单个用户而言考虑的是用户收益的最大化,而对整个 HWNs 而言考虑的是社会收益的最大化,即整个 HWNs 的总体吞吐量.在网络策略组合为  $y$  下,群体  $i$  中用户接入到网络  $j$  中获得的带宽为  $B_j(y)$ ,系统的整体效益可用总体吞吐量函数  $f(y)$  来表示

$$f(y) = \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^{m_k} y_{ks_l} B_{s_l}(y) \quad (5)$$

**定义 3.** 一个博弈是一个势博弈<sup>[23-24]</sup>,如果存在一个标量值的势函数,它的梯度描述了该博弈的收益.即如果一个收益函数组合为  $u(y)$  的博弈满足条件:存在  $C^1$  (连续可微的) 函数  $f: Y \rightarrow R$ ,

$\frac{\partial f}{\partial y_{ij}}(y) = u_{ij}(y), i \in N, j \in M_i$ , 我们称博弈  $u$  为一个势博弈.上述条件说明存在一个连续的可微函数  $f$ , 其梯度  $\nabla f$  等于收益函数向量,函数  $f$  称为博弈的势函数.如果收益函数  $u$  是  $C^1$ , 则以上条件等价于外部对称(externality symmetry)条件:  $\frac{\partial u_{i_0 p}(y)}{\partial y_{j_0 q}} \equiv$

$$\frac{\partial u_{j_0 q}(y)}{\partial y_{i_0 p}}, i_0, j_0 \in N, p \in M_{i_0}, q \in M_{j_0}.$$

**定理 1.** 用户收益函数组合为  $u(y)$  的群体博弈是一个势博弈,系统总吞吐量函数  $u(y)$  是博弈的势函数.特别地,如果  $y_{ij} = 0$  表示网络  $j$  对群体  $i$  中的用户是无效的.

证明. 对于 HWNs 总吞吐量函数  $f(y) = \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^{m_k} y_{ks_l} B_{s_l}(y)$ , 求  $y_{ij}$  的偏导:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(y)}{\partial y_{ij}} &= \frac{\partial \left( \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^{m_k} y_{ks_l} B_{s_l} \right)}{\partial y_{ij}} = \frac{\partial \left( \sum_{k=1}^n y_{kj} B_j \right)}{\partial y_{ij}} \\ &= \frac{\partial \left[ \sum_{k=1}^n \frac{y_{kj}}{\sum_{k=1}^n y_{kj} \frac{1}{r_{kj}}} \right]}{\partial y_{ij}} \\ &= B_j + \left( \sum_{k=1}^n y_{kj} \right) \cdot \left[ \frac{1}{\sum_{k=1}^n y_{kj} \frac{1}{r_{kj}}} \right]' \\ &= B_j - \frac{1}{r_{ij}} \left( \sum_{k=1}^n y_{kj} \right) \\ &\quad \left( \sum_{k=1}^n y_{kj} \frac{1}{r_{kj}} \right)^2 \\ &= B_j(y) - D_{ij}(y) \cdot T_j(y) = u_{ij}(y) \quad (6) \end{aligned}$$

可见群体博弈  $u(y)$  是一个势博弈,其势函数正是系统的总体吞吐量函数  $f(y)$ . 证毕.

#### 4.3 基于复制动态的演化博弈策略更新机制

这一部分给出了利用复制动态<sup>[25]</sup>设计一个策略选择的更新机制,让群体中的用户基于收益函数改变自身的策略选择,最终整个系统收敛到一个纳什均衡点.

##### 4.3.1 基于复制动态网络关联的演化平衡

**定义 4.** 复制动态是一种常用的策略演化模式,它通过一个 ODE (ordinary differential equations, 常微分方程) 来描述一个随着时间推移的演化过程.演化博弈动态群体中,一个个体如果能够通过变异和选择复制它自身就称为一个模仿者.如果一个模仿者能够得到更大的收益,将更快地模仿它

自身. 复制动态对演化博弈是至关重要的, 因为它提供了在某个时间点上群体中的信息(例如: 选择不同策略的个体的比率). 复制动态对研究到达一个博弈的解的收敛速度也非常重要.

我们以 3.1 节中的群体博弈模型为例来形式化地定义复制动态. 现在假定群体博弈中参与者的策略组合  $y$  是时间  $t$  的函数:  $y = y(t)$ . 但是为了表述上的方便, 可以简单地用  $y$  来表示  $y(t)$ . 策略的轨迹如下描述动态定义为复制动态: 对  $\forall i \in N, j \in M_i$  满足

$$\frac{dy_{ij}(t)}{dt} = \hat{y}_{ij}(t) = y_{ij}(t)(u_{ij}(y(t)) - \bar{u}_i(y(t))) \quad (7)$$

是复制动态, 其中  $\bar{u}_i(y) = \frac{1}{p_i} \sum_{l=1}^{m_i} y_{is_l} u_{is_l}(y)$  表示群体  $i$  用户的平均收益. 如果满足  $\frac{dy_{ij}^*(t)}{dt} = 0$ , 即  $y_{ij}^* = 0$  或  $u_{ij}(y^*) = \bar{u}_i(y^*)$ , 我们说  $y^*$  是平稳点(stationary point). 当策略组合达到平稳点时, 称为演化平衡. 如果选择网络  $j$  的收益大于群体中的平均收益, 则群体中选择网络  $j$  的用户数量就会增加; 如果选择网络  $j$  的收益小于群体中的平均收益, 群体中选择网络  $j$  的用户数量就会减少. 用户是不会选择一个其收益小于群体中的平均收益的网络. 群体  $i$  中, 复制动态满足条件  $\sum_{l=1}^{m_i} \hat{y}_{is_l} = 0$ .

演化平衡是演化博弈的稳定状态. 在基于复制动态的演化过程中, 只要群体中用户的收益不等于平均收益,  $\hat{y}_{ij}$  就不等于零, 群体的演化过程就会继续. 随着时间的变化, 直到群体的策略组合在平稳点处才能达到平衡. 因为在演化的平稳点处每个用户接入当前网络中的收益等于群体的平均收益, 没有用户会再次改变自己的接入网络.

#### 4.3.2 复制动态的正相关特性

**定义 5.** 动态  $\hat{y} = V(y) \neq 0$  如果满足  $\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^{m_k} V_{ks_l}(y) u_{ks_l}(y) > 0$ , 则称动态  $\hat{y} = V(y)$  是正相关的(positively correlated)<sup>[23]</sup>. 下面我们证明复制动态是正相关的.

**定理 2.** 采用复制动态的博弈系统  $u(y)$  是正相关的.

证明.

$$\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^{m_k} u_{ks_l}(y) V_{ks_l}(y) = \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^{m_k} u_{ks_l}(y) \frac{dy_{ks_l}(t)}{dt} \quad (8)$$

将复制动态带入上式得

$$\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^{m_k} u_{ks_l}(y) \left( y_{ks_l} u_{ks_l}(y) - \frac{1}{p_k} \sum_{j=1}^{m_k} y_{ks_j} u_{ks_j}(y) \right) = \sum_{k=1}^n p_k \left( \sum_{l=1}^{m_k} \frac{y_{ks_l}}{p_k} (u_{ks_l}(y))^2 - \left( \sum_{j=1}^{m_k} \frac{y_{ks_j}}{p_k} u_{ks_j}(y) \right)^2 \right) \quad (9)$$

既然  $\sum_{l=1}^{m_i} \frac{y_{is_l}}{p_i} = 1$ , 利用 Jensen 不等式可知上式括号中部分是非负的(当且仅当  $V(y) = 0$  时取零). 所以当  $V(y) \neq 0$  时全式是非负的, 复制动态满足正相关特性. 证毕.

#### 4.3.3 演化平稳点同纳什均衡点的一致性

**定理 3.** 如果一个博弈  $u(y)$  是势博弈, 动态  $V(y)$  是正相关的, 则势博弈的势函数  $f(y)$  是  $V(y)$  的全局李雅普诺夫函数(Lyapunov function).

证明. 由  $V(y)$  的正相关特性

$$\frac{df(y(t))}{dt} = \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^{m_k} \frac{\partial f}{\partial y_{ks_l}} \frac{dy_{ks_l}(t)}{dt} = \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^{m_k} u_{ks_l}(y) \hat{y}_{ks_l}(t) \geq 0 \quad (10)$$

当且仅当  $V(y) = 0$  时, 即在平稳点处,  $\frac{d}{dt} f(y(t)) = 0$ .

可见  $f(y)$  是非负定的, 可以作为动态  $V(y)$  的李雅普诺夫函数. 这意味这动态  $V(y)$  的所有的非稳定点将增加李雅普诺夫函数, 最终收敛到平稳点处系统达到稳定. 因此,  $V(y)$  的平稳点是渐进稳定的. 稳定的平稳点都是纳什均衡点<sup>①</sup>, 所以基于演化的网络选择过程最终要收敛到一个纳什均衡点的集. 由定理 2 可知复制动态  $V(y)$  是正相关的, 所以在  $V(y) = 0$  处的点既是平稳点又是纳什均衡点. 证毕.

通过以上的分析可以得到, 收益函数组合为  $u(y)$  的群体博弈, 在基于复制动态的演化过程达到平稳状态时, 整个网络系统达到了纳什均衡.

#### 4.4 演化博弈对 HWNs 系统性能的影响分析

前面的内容证明了在整个网络系统中, 每个用户通过动态的网络选择增加自身的收益, 最终所有的用户将达到一个稳定状态, 即一个纳什均衡点. 这表明群体中每个用户选择一个纯策略, 且不会改变自己的策略选择. 但是由于在竞争中用户自私的行为, 往往得到的纳什均衡的 Price-of-Anarchy<sup>[26]</sup> 是较低的, 也就是说在一些纳什均衡点处不能保证社

① Barth D, Bournez O, Boussaton O, Cohen J. A dynamic approach for load balancing. LORIA Research Report. 2008. <http://www.loria.fr/bournez/load/Soumis-Octave-Fev-2008.pdf>

会收益的最大。

下面我们来分析用户基于最大收益的网络选择行为对 HWNs 系统整体性能的影响。在前面的工作中我们把系统整体的吞吐量函数  $f(y) =$

$\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^{m_k} y_{ks_l} B_{s_l}(y)$  定义为一个系统的势函数, 它表示 HWNs 中所有用户获得的带宽的总和。从社会收益的角度来看, 为提高整个网络的利用率, 希望系统的吞吐量是最大的。在演化的过程中每个用户基于增加自身收益的目的不断改变自己的网络策略。在纳什均衡点处, 所有用户的收益取得了最大, 不会再改变自己的接入网络。用户的网络选择行为会对整个网络吞吐量产生怎样的影响? 为了实现个体效益和社会效益的一致, 理想的情况是用户自私的行为能够逐渐增加 HWNs 吞吐量函数  $f(y)$ , 并且在纳什均衡点用户的行为趋于稳定, 系统的总体吞吐量也达到最大。直观上看, 基于系统整体吞吐量的势函数在演化过程中单调增加, 达到均衡点处达到局部最大, 是否这个局部最大值即是全局最大值? 下面我们来证明纳什均衡点对系统性能提升上的有效性。

**定理 4.** 系统总体吞吐量的最大问题  $\max f(y)$  同博弈  $u(y)$  的纳什均衡是等价的。

证明. 系统吞吐量的最大化问题可表示为

$$\max_y \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^{m_k} y_{ks_l} B_{s_l}(y) \quad (11)$$

限制条件是每个网络中的用户数  $\sum_{l=1}^{m_k} y_{ks_l} = p_k$ ,  $\forall i \in N$ ; 且  $y_{ij} \geq 0$ ,  $\forall i \in N, j \in M_i$ . 若  $y_{ij} = 0$  表示网络  $j$  对群体  $i$  中的用户是无效的。

我们将这个最优化问题转化成 Lagrangian 最大化问题表示为

$$L(y, \mu, \lambda) = f(y) + \sum_{k=1}^n \mu_k (p_k - \sum_{l=1}^{m_k} y_{ks_l}) + \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^{m_k} \lambda_{ks_l} y_{ks_l} \quad (12)$$

若  $f(y)$  取最大值对应的 Kuhn-Tucker 一阶条件如下:

$$(KT1) \quad \frac{\partial f}{\partial y_{ij}} = \mu_i - \lambda_{ij};$$

$$(KT2) \quad \lambda_{ij} y_{ij} = 0;$$

$$(KT3) \quad \lambda_{ij} \geq 0.$$

(1) 证明如果系统吞吐量  $f(y)$  基于策略组合  $y$  取得最大值, 则相应的非合作博弈  $u(y)$  取得了纳什均衡。

如果  $f(y)$  取得最大值, 则  $(y, \mu, \lambda)$  满足 Kuhn-Tucker 一阶条件, 则对任意的群体  $i$ , 其中 (KT1) 和 (KT2) 暗含着  $\frac{\partial f}{\partial y_{ij}} = u_{ij}(y) = \mu_i$ . 此外, (KT1) 和 (KT3) 暗含着对任意的  $j \in M_i$ ,  $u_{ij}(y) = \mu_i - \lambda_{ij} \leq \mu_i$ . 可见对群体  $i$  中接入到任意的网络  $j$  中的用户收益  $u_{ij}(y) = \mu_i = \max u_{ij}(y)$ . 这表明在策略组合为  $y$  时, 群体  $i$  任意用户的收益达到最大, 且不会改变自身的网络选择策略。所以非合作博弈  $u(y)$  达到纳什均衡点。

(2) 证明如果策略组合为  $y$  时, 相应的非合作博弈  $u(y)$  取得了纳什均衡, 则系统吞吐量  $f(y)$  取得最大值。

相反地, 如果在策略组合  $y$ , 博弈  $u(y)$  达到纳什均衡, 则对任意的群体  $i$  中的用户的收益  $u_{ij}(y)$  达到最大值, 且  $\frac{\partial f(y)}{\partial y_{ij}} = \max u_{ij}(y) = \mu_i$ .  $\lambda_{ij} = \mu_i - u_{ij}(y) \geq 0$ , 且  $\lambda_{ij} y_{ij} = 0$ . 所以在均衡点处满足 Kuhn-Tucker 一阶条件。又因为  $f(y)$  是半正定的, 所以  $f(y)$  是拟凹函数, 即  $f(y)$  的最大化集是凸的。于是可以得到  $f(y)$  有唯一的最大值, 所以 Kuhn-Tucker 条件能够满足全局最优。因此满足纳什均衡的策略组合  $y$  也是网络吞吐量最大化问题  $\max_y \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^{m_k} y_{ks_l} B_{s_l}(y)$  的解。在这里用户的个人收益和整体网络系统的社会收益达到了统一。证毕。

## 5 用户网络关联的实现

在前面的部分中通过理论分析, 证明了群体博弈  $u(y)$  基于复制动态的演化博弈的收敛性以及纳什均衡点的有效性, 但是实际的异构网络环境是一个离散的系统。下面我们提出 HWNs 中一个基于复制动态的用户网络关联算法。在这种方法中, 群体中的用户维护一个策略概率分布向量, 该向量中的元素表示的是用户选择不同接入网的概率, 在初始条件下用户可以根据自身经验随机地选择一个策略概率分布向量。一个中心控制实体维护并向同群体中的用户公告当前群体中的平均收益信息。每个用户在接入一个网络中后, 根据他的收益值调节其网络策略概率分布向量中选择不同网络的概率。然后将当前网络中的收益同从网络中获取的群体平均收益进行比较。如果当前收益小于平均收益值, 根据用户的策略概率分布向量随机地选择一个接入网络;



如果当前收益大于平均收益, 用户不改变当前的接入网络. 直到每个用户的策略概率分布向量是一个单位向量时算法结束. 算法在运行时, 仅需要网络侧的中心管理实体计算并公告每个群体中的平均收益, 不需要大量的额外信令开销.

HWNs 基于群体博弈的用户网络关联算法具体内容可表示如下:

初始时刻 HWNs 中的任意群体所有用户随机地选择一个接入网络, 随机分配一个策略概率分布向量, 如群体  $i$  中用户  $a$  的策略概率分布向量  $\pi_a = (\pi_{as_1}, \pi_{as_2}, \dots, \pi_{as_{m_i}})$ . 然后进入网络选择过程.

在当前时刻  $t$ , 网络的策略组合为  $y(t)$ , 任意群体  $i$  中一个用户  $a$  接入到网络  $j$  得到的收益为  $u_{ij}(y(t))$ . 用户  $a$  的策略分布向量是  $\pi_a(t)$ . 用户  $a$  对接入网络  $j'$  的策略概率分布值  $\pi_{aj'}(t)$  的修订如下

$$\pi_{aj'}(t+1) = \pi_{aj'}(t) + \epsilon(1 + u_{ij}(y(t)))(1_{j'=j} - \pi_{aj'}(t)) \quad (13)$$

其中  $j' \in M_i$ ,  $1_{j'=j}$  表示如果用户当前的接入网络  $j$  同当前网络  $j'$  一致时取 1, 不一致时取 0.  $\epsilon$  是演化影响因子, 它的取值能够改变收敛的速度和精度.

在演化过程中,  $\pi_a(t)$  中选择每一个网络的概率最终或者趋于 1, 或者趋于 0. 所以为了加速收敛, 我们考虑设定两个阈值  $\delta_m$  和  $\delta_M$ , 一旦  $\pi_{aj'}(t)$  达到了这两个阈值按照下面的规则赋值

$$\begin{aligned} \pi_{aj'}(t+1) &\leftarrow 0 \text{ 如果 } \pi_{aj'}(t) < \delta_m \\ \pi_{aj'}(t+1) &\leftarrow 1 \text{ 如果 } \pi_{aj'}(t) > 1 - \delta_M \end{aligned} \quad (14)$$

用户  $a$  从网络侧接收到了群体的平均收益值, 将当前在网络  $j$  中的收益跟从网络中获得的群体平均收益进行比较. 如果用户  $a$  当前的收益  $u_{ij}(t) < \bar{u}_i(t)$ , 则根据  $\pi_a(t+1)$  随机选择一个新的网络. 即用户产生一个随机数  $rand()$ , 如果

$$\sum_{v=0}^{j'-1} \pi_{av}(t+1) \leq rand() < \sum_{v=0}^j \pi_{a(v+1)}(t+1) \quad (15)$$

且当  $v=0$  时,  $\pi_{av}(t+1)=0$ , 则此时  $j'$  为用户选择的新网络. 如果  $j' \neq j$ , 则用户触发垂直切换到网络  $j'$ .

如果对任意群体中的用户的策略概率分布向量  $\pi_a(t) = e_c$ , 则终止循环, 其中  $e_c$  表示第  $c$  个元素值为 1, 其它元素的值为零的单位向量. 否则在下一个时刻  $t+1$ , 继续执行策略概率分布向量的调整, 直到所有用户的策略概率分布向量为单位向量终止. 在算法 1 中给出了 HWNs 用户网络关联算法的伪代码.

### 算法 1. 用户网络关联算法.

输入:  $t=0$ , 任意移动用户  $a$  的策略概率分布向量  $\pi_a(0)$

输出: 任意移动用户  $a$  的策略概率分布向量  $\pi_a(t) = e_c$

1. WHILE  $\exists a, \pi_a(t) \neq e_c$   
// 如果存在用户的概率分布向量不是单位向量,  
// 则执行 while 循环
2. FOR  $i=1$  TO  $n$
3. FOR  $a=1$  TO  $p_i$  // 假设当前移动用户  $a$  正  
// 同网络  $j$  相关联
4. IF  $\pi_a \neq e_c$
5. IF  $\exists \pi_{aj'} > 1 - \delta_M$
6.  $\pi_{aj'}(t+1) \leftarrow 1$
7. ELSE IF  $\exists \pi_{aj'} < \delta_m$
8.  $\pi_{aj'}(t+1) \leftarrow 0$
9. ELSE FOR  $j'=1$  TO  $m_i$
10.  $\pi_{aj'}(t+1) = \pi_{aj'}(t) +$   
 $\epsilon(1 + u_{ij}(y(t)))(1_{j'=j} - \pi_{aj'}(t))$
11. END FOR
12. IF  $u_{ij}(t) < \bar{u}_i(t)$
13.  $a$  根据式(15)确定是否执行网络切换  
以及切换到哪一个网络
14. END IF
15. END IF
16. END IF
17. END FOR
18. END FOR
19.  $t = t + 1$
20. END WHILE

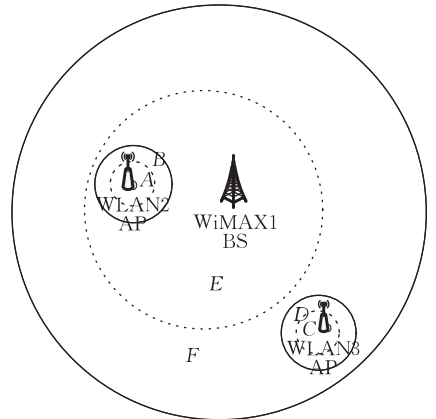


图 2 HWNs 仿真场景图

## 6 用户网络关联算法的仿真与理论分析验证

### 6.1 网络场景及其参数设定

现在我们来考虑一个具体的网络场景如图 3 中

所示. 其中 HWNs 是由一个 WiMAX 网络 1 和两个 WLAN 网络 2、3 构成, 每种接入技术的网络中存在两种传输速率. 其中 WiMAX 是全覆盖的, 其 BS 半径为 500 m. 根据离基站的距离采用 QAM-64、QAM-16 两种不同的调制方式, 其传输速率和传输半径分别是 250 m 内 50 Mb/s、500 m 内 25 Mb/s. 同时 WLAN 的传输直径是 150 m, 传输速率也是不均匀的, 假定 75 m 内 11 Mb/s、150 m 内 5.5 Mb/s. 这样我们的 HWNs 环境中就划分为 A、B、C、D、E、F 6 个区域, 如图 3 中所示. 网络系统中的用户分为两类: 一类是具有多模终端并能接入到多种无线接入技术网络的用户, 称为动态用户; 另一类是用户的终端设备或是只有一种无线接口, 或是当前的网络中只有一种接入网络的信号, 这样的用户称之为静态用户. 静态用户不可能发生接入网络策略的改变, 是不参与动态演化过程的. 图 3 中 A、B、C、D 4 个区域中的动态用户有 WLAN 和 WiMAX 两种网络选择, 这些动态用户构成了 4 个群体. 由于 WLAN 的热点覆盖区域往往集中部署在一个人口密集度比较高的网络中, 我们设定 A、B、C、D 每个区域中的群体中动态用户数量都是 20 个, 静态用户数量都是 10 个. E 区域中的用户数量为 40 个, F 区域中的数量为 20 个. 初始条件下每个群体区域中静态和动态用户选择 WiMAX 和 WLAN 网络的数量都是等量的. 另外假定  $\epsilon=0.1$ ,  $\delta_m=0.2$  和  $\delta_M=0.2$ .

### 6.2 数值结果分析

#### 6.2.1 群体的演化稳定和纳什均衡点

图 3 中给出了在不同的初始策略下, 系统的演化最终收敛到纳什均衡点的过程. 假定在其它群体中的策略分布为初始条件下的值. 改变群体 A 和 B 中的策略分布我们观察整个系统的收敛过程. 图 3 中黑线给出的是在给定初始条件群体 A 和 B 的初始策略分布向量  $\mathbf{x}_A(0)=(0.3, 0.7)$ ,  $\mathbf{x}_B(0)=(0.3, 0.7)$  时群体中的策略分布不断改变自身的适应性, 最终趋于稳定的轨迹. 对任意比率的策略分布, 不同

群体最终的稳定点是一致的. 图 4 中给出了  $x_{A1}(0)$  分别为 0.3 和 0.7,  $x_{B1}(0)$  分别为 0.3、0.4、0.5、0.6、0.7 等不同初始策略分布下最终都收敛到相同的平稳点(0.4, 1).

图 4 给出了群体 A 在演化过程中策略的改变最终趋于稳定的过程. 假定其它群体的策略分布不变, 在初始条件下群体 A 的策略为  $\mathbf{x}_A(0)=(0.6, 0.4)$ . 由于群体中用户的收益不平衡, 低于平均收益的用户会改变自身的接入网络, 所以整个群体 A 的策略不断变化. 最终地, 群体中的策略都会达到一个稳定状态. 如图 4 中, 群体 A 中选择 WiMAX1 网络的用户占整个群体用户数的 40%, 选择 WLAN2 的用户占整个群体用户数的 60%.

图 5 给出了固定其它用户的策略分布为初始值, 群体 A 中不同策略用户的演化过程. 图中分别给出了群体 A 中的策略分布  $\mathbf{x}_A(0)$  分别为 (0.6,

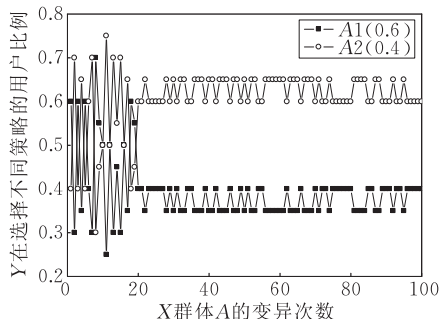


图 4 群体 A 的用户网络关联的演化过程

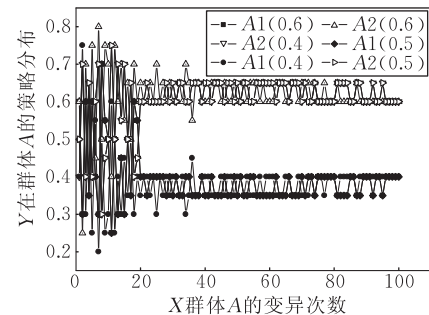


图 5 群体 A 的不同初始策略的演化过程

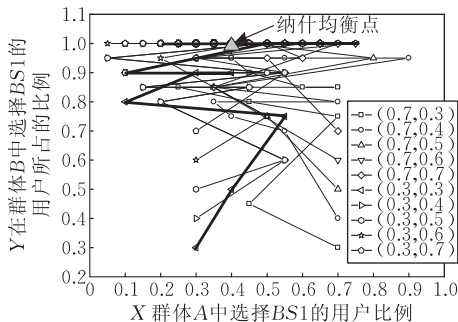


图 3 不同初始策略下用户网络关联的演化过程

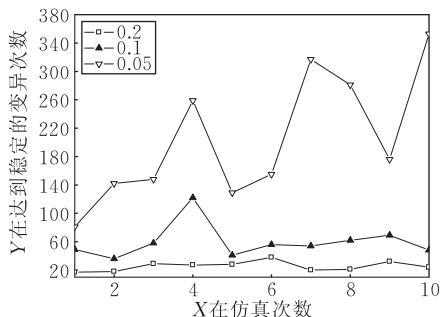


图 6 演化因子对达到平稳点的速度的影响

0.4)、(0.5, 0.5)、(0.4, 0.6) 下的系统演化过程. 随着  $t$  的增大, 无论群体  $A$  中的初始策略为何值, 群体  $A$  中选择不同网络的用户比率趋向于一致, 即  $x_{A1}(t) = 0.4, x_{A2}(t) = 0.6$ .

### 6.2.2 演化因子 $\epsilon$ 对达到平稳点的速度的影响

我们分析不同的演化因子  $\epsilon$  对达到收敛过程的变异次数. 图 6 中给出了初始条件下, 选择不同的演化因子  $\epsilon$  对系统达到演化稳定时变异次数的影响. 可见演化因子  $\epsilon$  对系统的演化次数有重要的影响. 演化因子  $\epsilon$  越大, 用户  $a$  的策略概率向量  $\pi_a(t)$  的变化越快, 最终策略趋向一个纯策略的机会越大, 但是这样演化的结果也会导致更大的误差. 相反地, 演化因子  $\epsilon$  越小, 用户的策略概率分布向量  $\pi_a(t)$  的变化越慢. 最终策略趋向一个纯策略的速度越慢, 但是这样演化的结果也更加逼近平稳点.

### 6.2.3 相同群体中用户收益的一致性

对同一群体中选择不同网络的用户而言, 演化的结果是无论选择哪种网络的用户, 最终他们的收益都会达到一致. 正如图 7 中所示, 初始策略组合下群体  $A$  中选择网络 1 和网络 2 的用户收益不一致. 但是经过多次变异后, 最终不同网络策略的用户收益都趋向于一致. 并且无论初始的策略怎么变化, 达到稳定状态的收益都收敛到一个相同的值.

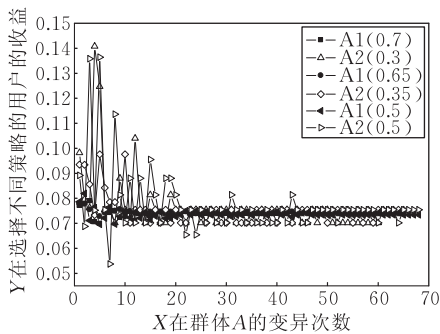


图 7 演化过程中群体  $A$  中的收益值

### 6.2.4 不同接入网在变异过程中平均吞吐量的变化

网络平均吞吐量反映的是网络中所有关联用户分配的平均带宽. 假定群体  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  网络的策略组合为初始值. 从图 8 中看出不同网络平均吞吐量的变化, 在变异过程中随着策略组合  $x(t)$  的改变, 各种网络的平均带宽变化很大, 但最终每个网络中的平均吞吐量逐步稳定. 在最终达到稳定状态时网络 2 和 3 的平均带宽较初始有所增加, 网络 1 的平均带宽基本保持不变. 其原因是系统中整体的吞吐量是增加的, 两个 WLAN 网络中由于接入用户较少, 接入网络策略的改变对其影响较大, 而 WiMAX

的网络用户较多变化不是很明显.

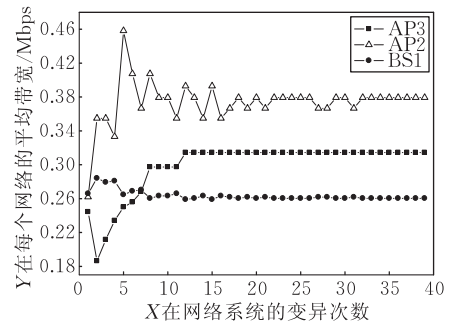


图 8 演化过程中网络的平均吞吐量的变化

### 6.2.5 演化过程对 HWNs 总体吞吐量的影响

在前面部分的论证过程中, 我们证明了如果系统处于不稳定状态, 网络系统的整体带宽会随着时间逐渐增加, 当达到稳定状态时, 系统吞吐量达到最大. 现在我们通过仿真结果更直观地验证这一结论. 图 9 中给出了假定其它参数为初始设置的情况下, 群体  $A$  中选择网络 1 的策略比率分别为 0.3、0.5、0.7 时, 整体网络系统吞吐量在变异过程中改变. 对任意策略组合而言, 在变异过程中系统吞吐量随时间逐渐增加, 在达到稳定点时系统吞吐量达到最大值, 且无论初始条件下的策略组合如何变化, 最终的系统的吞吐量在误差范围内都达到一致. 这就验证了纳什均衡点有效性的结论.

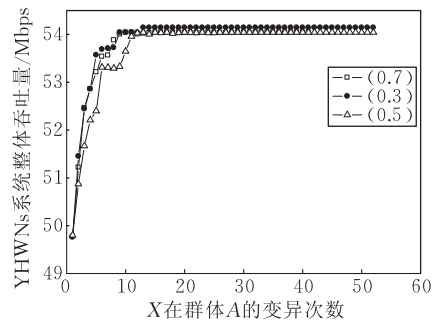


图 9 演化过程对 HWNs 总体吞吐量的影响

## 7 结束语

演化博弈最初主要用来分析生物体的行为, 也可以用于分析有限理性参与者之间竞争资源的问题. 本文中我们将 HWNs 用户竞争有限网络资源的问题, 抽象成一个群体演化博弈模型. 为让每个用户获得一个纯策略, 将具有相同有效接入网络集及传输速率的移动用户形成一个群体, 群体中选择不同网络的用户数量构成群体策略. 根据用户在接入网络分配的带宽和花费来评估群体中用户获得的收

益,并证明基于其收益的博弈是一个势博弈.引入复制动态的数学模型来模拟用户网络选择的动态特性,表现群体中选择不同网络的用户的适应性.基于势博弈、复制动态的特性,证明了系统演化的平稳状态即是一个纳什均衡点,其中所有用户都取得效用相同的最优策略解,并且该解能够使得 HWNs 系统的总体吞吐量达到最大.最后基于复制动态的原理提出一个用户网络关联算法,并通过仿真实验验证了理论分析的结果.下一步的工作应该分析动态移动的用户网络关联问题,此外文中的工作缺少对运营商利益的考虑.

### 参 考 文 献

- [1] IEEE 802.21 WG. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks. Part 21: Media Independent Handover Services. IEEE Std 802.21-2008, 2009
- [2] Khan M A, Sivrikaya F, Albayrak S, Mengaly K Q. Auction based interface selection in heterogeneous wireless networks//Proceedings of the 2nd IFIP Wireless Days. Paris, France, 2009: 1-6
- [3] Charilas D, Mathioudakis P, Panagopoulos A, Constantinou P. Federation agreements performance in heterogeneous environments: Non-cooperative games approach//Proceedings of the Global Telecommunications Conference(GLOBECOM'10). Miami, USA, 2010: 1141-1145
- [4] Amitav M. Probabilistic voting-theoretic strategies for resource allocation in heterogenous wireless networks//Proceedings of the Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'10). Miami, USA, 2010: 1-6
- [5] Isameldin M, Carlos P, Ian O, Janne L. Radio resource allocation in heterogeneous wireless network using cooperative games//Proceedings of the Nordic Radio Symposium 2004. Oulu, Finland, 2004: 1-4
- [6] Niyato D, Hossain E. A cooperative game framework for bandwidth allocation in 4G heterogeneous wireless networks//Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Communications(ICC'06). Istanbul, Turkey, 2006: 4357-4362
- [7] Niyato D, Hossain E. A non-cooperative game-theoretic framework for radio resource management in 4G heterogeneous wireless access networks. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(3): 332-345
- [8] Li Ming-Xin, Chen Shan-Zhi, Xie Dong-Liang, Hu Bo, Shi Yan. Resource allocation and admission control based on non-cooperation game in heterogeneous wireless networks. Journal of Software, 2010, 21(8): 2037-2049(in Chinese)  
(李明欣, 陈山枝, 谢东亮, 胡博, 时岩. 异构无线网络中基于非合作博弈论的资源分配和接入控制. 软件学报, 2010, 21(8): 2037-2049)
- [9] Coucheny P, Touati C, Gaujal B. Fair and efficient user-network association algorithm for multi-technology wireless networks//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications(INFOCOM'09). Rio de Janeiro, Brazil, 2009: 2811-2815
- [10] Tran M A, Tran P N, Nadia B. Strategy game for flow/interface association in multi-homed mobile terminals//Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Communications(ICC'10). Cape Town, South Africa, 2010: 1-6
- [11] Niyato D, Hossain E. Dynamics of network selection in heterogeneous wireless networks: An evolutionary game approach. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(4): 2008-2017
- [12] Zhu K, Niyato D, Wang P. Optimal bandwidth allocation with dynamic service selection in Heterogeneous Wireless Networks//Proceedings of the Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'10). Miami, Florida, USA, 2010: 1-5
- [13] Sandholm W H. Evolutionary game theory. Madison: University of Wisconsin, Technical Report: 1, 2007
- [14] Wardrop J G. Some theoretical aspects of road traffic research//Proceedings of the Institution of Civil Engineers. London, UK, 1952: 325-378
- [15] Sheng Zhao-Han, Jiang De-Peng. Evolutionary Economics. Shanghai: Sanlian Press, 2002(in Chinese)  
(盛昭瀚, 蒋德鹏. 演化经济学. 上海: 三联出版社, 2002)
- [16] Weibull J W. Evolutionary Game Theory. Cambridge, MA: The MIT Press, 1995
- [17] Peter D T, Leo B J. Evolutionarily stable strategies and game dynamics. Mathematical Biosciences, 1978, 40(1-2): 145-156
- [18] Drew F, David K L. Theory of Learning in Frames. Cambridge, MA: The MIT Press, 1998
- [19] George W B, John V N. Solutions of games by differential equations//Harold W K, Albert W T. Contributions to the Theory of Games I of Annals of Mathematics Studies. Princeton: Princeton University Press, 1950: 73-79
- [20] Zhu J, Waltho A, Yang X, Guo X G. Multi-radio coexistence: Challenges and opportunities//Proceedings of the 16th International Conference on Computer Communications and Networks(ICCCN'07). Honolulu, USA, 2007: 358-364
- [21] Yousaf F, Daniel K, Wietfeld C. Performance evaluation of IEEE 802.16 WiMAX link with respect to higher layer protocols//Proceedings of the International Symposium on Wireless Communication Systems. Trondheim, Norway, 2007: 180-184
- [22] Kuriakose G, Harsha S, Kumar A, Sharma V. Analytical models for capacity estimation of IEEE 802.11 WLANs using DCF for Internet applications. Wireless Networks, 2009, 15(2): 259-277
- [23] Sandholm W H. Potential games with continuous player sets. Journal of Economic Theory, 2001, 97(1): 81-108

- [24] Monderer D. Potential games. *Games and Economic Behavior*, 1996, 14(1): 124-143
- [25] Sastry P, Phansalkar V, Thathachar A. Decentralized learning of nash equilibria in multi-person stochastic games with incomplete information. *IEEE Transactions on System,*

*Man, and Cybernetics*, 1994, 24(5): 769-777

- [26] Papadimitriou C H. Algorithms, games, and the Internet// *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on the Theory of Computing*. Hersonissos, Crete, Greece, 2001: 749-753



**JIANG Yong**, born in 1980, Ph. D. candidate. His research interests focus on mobility management, wireless resource management in heterogeneous wireless networks.

**HU Bo**, born in 1978, Ph. D. , associate professor. His current research interests include heterogeneous wireless network technology, mobility management and resource management.

**CHEN Shan-Zhi**, born in 1969, Ph. D. , professor, Ph.D. supervisor. His current research interests include mobile communication technology, network convergence and evolution, and mobility management.

## Background

With the development of multiple broadband wireless access technologies as well as intelligent mobile terminals, the ways that people acquire Internet information and service are also changing rapidly. Mobile users will be confronted with different wireless access technologies, such as WLAN, UMTS and WiMAX, in heterogeneous wireless networks (HWNs) environment, and the mobile terminals could intelligently select more appropriate access network by vertical handover or horizontal handover. Generally, mobile terminals make network selection based on the decision information including residual bandwidth, signal strength, transmission rate and so on, but the information is uneasy to capture. A more effective method is to make use of the mechanism of try and error. At first each user chooses an access network randomly. Then it constantly changes its strategies in terms of the profit and selects an optimal access network definitely. We adopt the thought of try and error to wireless resource optimization of HWNs.

In the paper, we specialize in the user-network association based on population games in order to implement maximum of the user's payoff and load balancing of the HWNs

system. Generally speaking, the main contributions in this paper include: (1) The issue of user-network association is modeled as population games which is subject to the conditions of potential games based on the user's payoff function. By means of replicator dynamics, we demonstrate the convergence of evolutionary games. Moreover, the bandwidth maximum of HWNs system is also proved. (2) A user-network association algorithm is designed with the principle of replicator dynamics, and the process of network selection is imitated by the simulation. Simulation shows that Nash Equilibrium point can be achieved, and the results of theoretical analysis are verified.

The research is supported by the National High Technology Research and Development Program(863 Program) of China under Grant No. 2011AA01A101, International Science and Technology Cooperation Program of Ministry of Science and Technology under Grant No. 2010DFB13020 and Doctorate Fund of the Ministry of Education Project under Grant No. 20090005120013. Our research themes focus on the theories and technologies of mobility management as well as wireless resource management in HWNs.