

## 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\*

李明欣<sup>1+</sup>, 陈山枝<sup>2</sup>, 谢东亮<sup>1</sup>, 胡博<sup>1</sup>, 时岩<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(北京邮电大学 网络与交换国家重点实验室,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)

### Resource Allocation and Admission Control Based on Non-Cooperation Game in Heterogeneous Wireless Networks

LI Ming-Xin<sup>1+</sup>, CHEN Shan-Zhi<sup>2</sup>, XIE Dong-Liang<sup>1</sup>, HU Bo<sup>1</sup>, SHI Yan<sup>1</sup>

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

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

+ Corresponding author: E-mail: limx007@gmail.com

**Li MX, Chen SZ, Xie DL, Hu B, Shi Y. Resource allocation and admission control based on non-cooperation game in heterogeneous wireless networks. *Journal of Software*, 2010,21(8):2037–2049. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3638.htm>**

**Abstract:** Radio resource allocation and call admission control are studied in heterogeneous wireless network. A theoretical model of allocating bandwidth and connections is proposed on basis of non-cooperation game theory. Combining with the utility function of network connections, the existence and uniqueness of Nash equilibrium in the processes of non-cooperation game allocating is proved. Furthermore, a call admission algorithm is presented to ensure communication reliability based on the analysis of relationship of traffic intensity and block probability. Simulation results reveal that the allocated mechanism resolves the issues of allocated bandwidth and connections. And it ensures the reasonableness and fairness in general. In addition, the results also show that the call admission control algorithm could guarantee the communication reliability by dynamic adjusting allocated number of connections.

**Key words:** heterogeneous wireless network; non-cooperation game; Nash equilibrium; utility; call admission control

**摘要:** 对异构无线网络中无线资源分配和呼叫接入控制进行研究.基于非合作博弈理论,提出了不同无线资源的带宽和连接数量分配的理论模型.结合网络连接的效用函数,对非合作博弈的无线资源分配中的纳什均衡点的存在性和唯一性进行论证.而且,进一步对业务量与阻塞率之间的关系进行分析,提出了能够保证通信可靠性的接入控制算法.仿真结果表明,基于非合作博弈论的无线资源分配机制能够有效地解决带宽和连接数量的分配问题,并能在整体上保证分配的合理性和公平性.接入控制算法根据需要能够动态地调整在某一区域分配的连接数量,从而保证

\* Supported by the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant Nos.2006AA01Z229, 2007AA01Z222, 2008AA01A316 (国家高技术研究发展计划(863)); the Int'l Cooperation Projects of China and Switzerland under Grant No.2008DFA12110 (中瑞国际合作项目)

Received 2008-12-05; Accepted 2009-03-31

通信的可靠性.

关键词: 异构无线网络;非合作博弈;纳什均衡点;效用;呼叫接入控制

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

下一代无线通信系统的目标是利用不同的接入技术,向用户提供普适接入的多媒体服务<sup>[1]</sup>.这就使得移动用户能够接入异构的无线网络,包括无线局域网(wireless local area network,简称 WLAN)、通用移动通信系统(universal mobile telecommunications system,简称 UMTS)和无线城域网(world interoperability for microwave access,简称 WiMax).在异构无线网络中,应该设计能够同时满足用户和运营商需求的无限资源管理机制(radio resource management,简称 RRM),它包括带宽分配、拥塞控制、接入控制等方面<sup>[2]</sup>.目前,对无线资源管理的研究与性能评价往往从纯粹工程技术的角度出发,如资源利用率、用户公平性等.这些方法着重从技术上改进和提高某项或几项性能指标,而往往忽略客观存在的非合作的系统行为.传统的资源分配技术的设计与优化在具备较高的技术指标的同时,却对用户的行为缺乏合理的解释.在异构无线网络中,一方面,系统要对不均匀的用户接入分配相应的资源,另一方面,终端系统不愿意受系统的束缚,这对于无线资源的分配和接入控制是具有挑战性的问题.因此,在研究异构无线网络的资源管理时,有必要引入新的研究方法和理论,非合作博弈论为该研究提供了坚实的数学基础和合理的解释.

博弈论适用于解决无线网络中资源管理的问题,它已被用于解决许多协议设计问题(比如,资源分配、能量控制等).博弈论的基本概念包括参与者、行动、信息、策略、支付(效用)、结果和均衡,其中参与者、策略和支付是描述一个博弈所需的最少的要素<sup>[3]</sup>.纳什均衡是完全信息静态博弈解的一般概念.构成纳什均衡的策略一定是重复剔除严格劣策略过程中不能被剔除的策略.也就是说,没有任何一个策略严格优于纳什均衡策略,其逆定理不一定成立.从资源分配角度,可将其分为静态分配和动态分配:静态分配将为会话连接保留一定数量的资源,直至会话结束;动态分配将根据网络条件和应用需求动态地调整资源分配的数量<sup>[4]</sup>.通常,静态分配方法依赖于统计模型去估算和预测资源需求,需要预先知道应用流的峰值速率等参数,在实时或交互式应用中很难实现.而过于频繁的动态分配则会给系统带来过多的开销.资源分配一般要考虑两个要素,即分配的公平性和利用率.传统的接入控制策略往往是通过比较呼叫请求的资源量和当前系统的有效资源来决定是否接纳新呼叫.这些策略是假设网络容量保持不变,即网络具有固定容量.而在容量会发生变化的情况下,呼叫接入控制策略如果仅考虑当前时刻的容量信息,在下一时刻网络容量发生下降的情况下就可能会导致过高或不可容忍的掉线率.

本文对异构无线网络环境下(包括 WiMax,UMTS 和 WLAN)无线资源分配和呼叫接入控制进行了研究.基于非合作博弈理论,提出不同无线资源带宽和接入控制的理论模型.此模型将异构无线资源之间的竞争关系表达为非合作博弈问题;参与者为 WiMax 网络和 UMTS 网络(WLAN 的带宽只服务于特定区域,不存在竞争分配问题,所以不包含),策略为调整两个网络在不同服务区域的带宽和准予接入的连接数,支付为连接的带宽效用.结合网络连接的效用函数,证明了非合作无线资源分配博弈中的纳什均衡点的存在性和唯一性.基于此非合作博弈分配机制及对业务量与阻塞率之间的关系进行了分析,提出了能够保证通信可靠性的接入控制算法.该算法通过动态调整带宽资源的分配和连接的数量来保证通信的可靠性.

本文第 1 节描述并定义异构网络模型.第 2 节建立基于非合作博弈模型,从理论上分析和证明资源分配的纳什均衡.第 3 节基于非合作博弈的资源分配及通信可靠性理论提出接入控制算法.第 4 节根据理论分析模型设定参数,建立仿真场景,并对结果进行分析.第 5 节对无线资源管理领域的相关工作进行回顾.第 6 节得出结论.

## 1 异构网络模型

4G 无线通信系统的目标是,为用户在异构无线接入网络中无缝漫游提供便利<sup>[5]</sup>.本节建立了异构无线接入网络模型,包括 WiMax,UMTS 和 WLAN.不失一般性,假定覆盖面积小的接入网络总是在覆盖面积大的接入网络中,比如,WLAN AP 的覆盖范围在 UMTS AP 的覆盖范围中,UMTS AP 的覆盖范围在 WiMax AP 的覆盖范围中.根据以上假定,图 1 是一个异构无线网络单元的架构图,整个网络可看作是多个异构无线网络单元的组合.

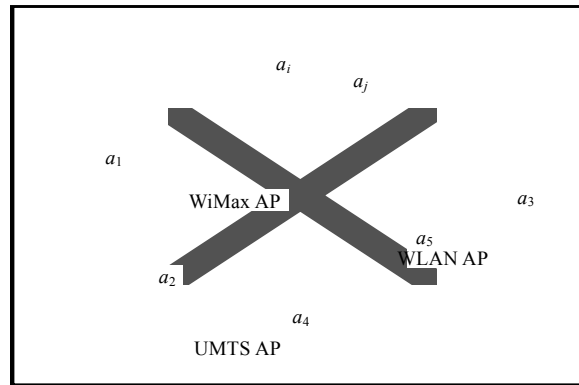


Fig.1 Architecture of heterogeneous wireless networks

图1 异构无线网络架构

**定义 1.** 一个异构无线网络单元含有一个 WiMax AP,一个 WiMax AP 的覆盖范围内有  $m$  个 UMTS AP,一个 UMTS AP 中有  $n$  个 WLAN AP,其中,  $m$  和  $n$  均大于等于 1.系统中所有 AP 可以用集合  $\{ap_1, ap_2, \dots, ap_{m+1}, ap_{m+2}, \dots, ap_{m \times n + 1}\}$  表示.

**定义 2.** 服务区域集合  $\{a_1\}$  表示系统中 WiMax AP(即  $ap_1$ )的覆盖区域减去其中所有 UMTS AP(即  $\{ap_2, \dots, ap_{m+1}\}$ 覆盖区域的剩余面积;对于服务区域集合  $\{ap_2, \dots, ap_{m+1}\}$ ,则表示每个 UMTS AP 的覆盖区域分别减去其中所有 WLAN AP 覆盖区域的集合(如图 1 所示,  $a_2$  表示  $ap_2$  的覆盖区域减去  $ap_4$  的覆盖区域的剩余区域);对于服务区域集合  $\{ap_{m+2}, \dots, ap_{m \times n + 1}, \dots, ap_{m \times n + 1}\}$ ,表示所有 WLAN AP(即  $\{ap_{m+2}, \dots, ap_{m \times n + 1}\}$ )各自覆盖区域的集合.

由定义 2 可知,  $\{a_1\}$  表示的覆盖区域只有 WiMax 信号,  $\{a_2, \dots, a_{m+1}\}$  表示的区域被 WiMax 和 UMTS 两种信号覆盖,而  $\{ap_{m+2}, \dots, ap_{m \times n + 1}, \dots, ap_{m \times n + 1}\}$  表示的覆盖区域被 WiMax, UMTS 和 WLAN 这 3 种信号覆盖.

## 2 基于非合作博弈系统模型

本节将无线网络资源带宽分配问题用公式构建为一个非合作博弈系统模型.非合作博弈系统模型的关键部分是:参与者、策略和支付.参与者指的是一个博弈中的决策主题.其目的是提供选择策略以最大化自己的支付(效用)水平.策略是参与者在给定信息集情况下的行动规则.它规定参与人在什么时候选择什么行动.在博弈中,支付是指在一个特定的战略组合下参与者得到的确定效用水平,或者是参与者得到的期望效用水平.支付是博弈参与者真正关心的,参与者的目标是选择自己的战略以最大化其效用函数.

### 2.1 效用、连接数和带宽

网络中,终端的数目和网络资源的消耗程度是动态变化的,当用户数目较少且网络负载量较小时,会造成大量资源的闲置.当系统的用户数较多且网络负载量较大时,过量的资源需求使得网络阻塞的机会大为增加.本文主要探讨异构无线资源间的博弈,使网络侧异构无线资源间的博弈达到平衡,即每种无线接入网络的利益最大化;同时,考虑网络侧的带宽分配及不同连接数对系统的影响.

在网络侧无线资源分配博弈过程中,各个无线资源均以自己效用最大为目标,而不同的连接个数也将对系统产生影响.涉及到无线网络资源的效用,文献[5]中提到的一种经典的吞吐量效用函数可归纳为定义 3.

**定义 3.** 在网络侧无线资源博弈中(如图 1 所示),  $b_{ap_i}$  的效用函数为

$$U_{ap_i, x} = \omega \log \alpha b \quad (1)$$

其中,  $U_{ap_i, x}$  表示连接  $x$  在  $b_{ap_i}$  覆盖区域的效用,  $b$  表示  $b_{ap_i}$  连接  $x$  的带宽,  $\omega$  和  $\alpha$  为常量参数.

**定义 4.** 在服务区域的平均连接到达率为  $\lambda$ , 每个连接的平均持续时间为  $1/\mu$ , 则呼叫量  $a = \lambda/\mu$ , 平均连接数量可以表示为

$$C = \sum_{i=1}^m i \left( \frac{a^i / i!}{\sum_{r=1}^m a^r / r!} \right) \tag{2}$$

定义 5.  $\{b_{ap_1}\}$  表示 WiMax AP 支持的总带宽,  $\{b_{ap_2}, \dots, b_{ap_{m+1}}\}$  表示各个 UMTS AP 所支持的总带宽,  $\{b_{ap_{m+2}}, \dots, b_{ap_{m \times n+1}}\}$  表示各个 WLAN AP 支持的总带宽.  $\{ap_1\}$  在  $\{a_1\}$  上的带宽可以表示为

$$\{b_{ap_1}^{a_1}\}, b_{ap_1}^{a_1} = b_{ap_1} - \sum_{i=2}^{m+1} b_{ap_1}^{a_i} - \sum_{j=m+2}^{m \times n+1} b_{ap_1}^{a_j}.$$

在 UMTS AP  $\{a_2, \dots, a_{m+1}\}$  上的带宽为

$$\{b_{ap_1}^{a_2} + b_{ap_2}^{a_2}, \dots, b_{ap_1}^{a_{m+1}} + b_{ap_{m+1}}^{a_{m+1}}\}, b_{ap_2}^{a_2} = b_{ap_2} - \sum_{i=m+2}^{m+n+1} b_{ap_2}^{a_i}, \dots, b_{ap_{m+1}}^{a_{m+1}} = b_{ap_{m+1}} - \sum_{i=m \times (n-1)+2}^{m \times n+1} b_{ap_{m+1}}^{a_i}.$$

在 WLAN AP  $\{a_{m+2}, \dots, a_{m+n+1}, \dots, a_{m \times n+1}\}$  上的带宽为

$$\{b_{ap_1}^{a_{m+2}} + b_{ap_2}^{a_{m+2}} + b_{ap_{m+2}}^{a_{m+2}}, \dots, b_{ap_1}^{a_{m+n+1}} + b_{ap_2}^{a_{m+n+1}} + b_{ap_{m+n+1}}^{a_{m+n+1}}, \dots, b_{ap_1}^{a_{m \times n+1}} + b_{ap_{m \times n+1}}^{a_{m \times n+1}} + b_{ap_{m \times n+1}}^{a_{m \times n+1}}\}.$$

定义 6. 纳什均衡是所有参与者的最优战略的组合, 记为  $s^* = (s_1^*, \dots, s_i^*, \dots, s_n^*)$ . 其中,  $s_i^*$  是第  $i$  个参与者在均衡情况下的最优战略. 它是  $i$  的所有可能的战略中使  $u_i$  最大化的战略.  $u_i$  是所有参与人的策略组合的函数,  $i$  的最优策略通常依赖于其他参与者的战略选择. 为了把一个特定的参与者与其他参与者区别开, 用  $s_{-i} = (s_1, \dots, s_{i-1}, s_{i+1}, \dots, s_n)$  表示由除  $i$  外的所有参与者的策略组合的向量.  $s_i^*$  是给定  $s_{-i}$  情况下第  $i$  个参与人的最优策略意味着

$$u_i(s_i^*, s_{-i}) \geq u_i(s_i', s_{-i}), \forall s_i' \neq s_i^* \tag{3}$$

均衡意味着, 对所有的  $i=1, 2, \dots, n$ , 上式同时成立. 也可用另一种表述方式,  $s_i^*$  是下述最大化问题的解:

$$s_i^* \in \arg \max_{s_i \in S_i} u_i(s_1^*, \dots, s_{i-1}, s_i, s_{i+1}^*, \dots, s_n^*) \tag{4}$$

2.2 无线网络资源非合作博弈模型

(1) 参与者: WiMax 网络和 UMTS 网络.

(2) 策略: WiMax 可以采用的策略为  $S_{wimax} = \{b_{ap_1}^{a_2}, \dots, b_{ap_1}^{a_{m+1}}, b_{ap_1}^{a_{m+2}}, \dots, b_{ap_1}^{a_{m \times n+1}}\}$ , 即  $\{ap_1\}$  可以调整在区域  $\{a_2, \dots, a_{m+1}, a_{m+2}, \dots, a_{m \times n+1}\}$  上的带宽分配; UMTS 可以采用的策略为  $S_{umts} = \{b_{ap_2}^{a_{m+2}}, \dots, b_{ap_{m+1}}^{a_{m+2}}, \dots, b_{ap_{m+1}}^{a_{m \times n+1}}\}$ , 即  $\{ap_2, \dots, ap_{m+1}\}$  可以调整在区域  $\{a_2, \dots, a_{m+1}, a_{m+2}, \dots, a_{m \times n+1}\}$  上的带宽分配.

(3) 支付: WiMax 的支付(效用)是它向服务区域  $\{a_2, \dots, a_{m+1}, a_{m+2}, \dots, a_{m \times n+1}\}$  提供的带宽的效用(效用函数参见定义 3); UMTS 的支付是它向  $\{a_2, \dots, a_{m+1}, a_{m+2}, \dots, a_{m \times n+1}\}$  提供的带宽的效用.

WiMax 的支付可以表示为

$$U_{wi\ max} = \omega \left[ \begin{aligned} & \left( C_{ap_1} \log \left( \alpha \frac{b_{ap_1} - \sum_{i=2}^{m \times n+1} b_{ap_1}^{a_i}}{C_{ap_1}} \right) \right) + \left( C_{ap_2} \log \left( \alpha \frac{b_{ap_2}^{a_2} + b_{ap_1}^{a_2}}{C_{ap_2}} \right) - C_{ap_2} \log \left( \alpha \frac{b_{ap_2}^{a_2}}{C_{ap_2}} \right) \right) + \dots + \\ & \left( C_{ap_{m+1}} \log \left( \alpha \frac{b_{ap_{m+1}}^{a_{m+1}} + b_{ap_1}^{a_{m+1}}}{C_{ap_{m+1}}} \right) - C_{ap_{m+1}} \log \left( \alpha \frac{b_{ap_{m+1}}^{a_{m+1}}}{C_{ap_{m+1}}} \right) \right) + \dots + \\ & \left( C_{ap_{m+2}} \log \left( \alpha \frac{b_{ap_{m+2}}^{a_{m+2}} + b_{ap_2}^{a_{m+2}} + b_{ap_1}^{a_{m+2}}}{C_{ap_{m+2}}} \right) - C_{ap_{m+2}} \log \left( \alpha \frac{b_{ap_{m+2}}^{a_{m+2}} + b_{ap_2}^{a_{m+2}}}{C_{ap_{m+2}}} \right) \right) + \dots + \\ & \left( C_{ap_{m \times n+1}} \log \left( \alpha \frac{b_{ap_{m \times n+1}}^{a_{m \times n+1}} + b_{ap_m}^{a_{m \times n+1}} + b_{ap_1}^{a_{m \times n+1}}}{C_{ap_{m \times n+1}}} \right) - C_{ap_{m \times n+1}} \log \left( \alpha \frac{b_{ap_{m \times n+1}}^{a_{m \times n+1}} + b_{ap_m}^{a_{m \times n+1}}}{C_{ap_{m \times n+1}}} \right) \right) \end{aligned} \right] \tag{5}$$

UMTS 网络的支付可以表示如下:

$$U_{umts} = \omega \left[ \begin{aligned} & \left( C_2 \log \left( \alpha \frac{b_{ap_2}^{a_2} + b_{ap_1}^{a_2}}{C_2} \right) - C_2 \log \left( \alpha \frac{b_{ap_1}^{a_2}}{C_2} \right) \right) + \dots + \\ & \left( C_{ap_{m+1}} \log \left( \alpha \frac{b_{ap_{m+1}}^{a_{m+1}} + b_{ap_1}^{a_{m+1}}}{C_{ap_{m+1}}} \right) - C_{ap_{m+1}} \log \left( \alpha \frac{b_{ap_1}^{a_{m+1}}}{C_{ap_{m+1}}} \right) \right) + \\ & \left( C_{ap_{m+2}} \log \left( \alpha \frac{(b_{ap_2} - b_{ap_2}^{a_2}) \div n + b_{ap_{m+2}}^{a_{m+2}}}{C_{ap_{m+2}}} \right) - C_{ap_{m+2}} \log \left( \alpha \frac{(b_{ap_2} - b_{ap_2}^{a_2}) \div n}{C_{ap_{m+2}}} \right) \right) + \dots + \\ & \left( C_{ap_{m \times n+1}} \log \left( \alpha \frac{(b_{ap_{m+1}} - b_{ap_{m+1}}^{a_{m+1}}) \div n + b_{ap_{m \times n+1}}^{a_{m \times n+1}}}{C_{ap_{m \times n+1}}} \right) - C_{ap_{m \times n+1}} \log \left( \alpha \frac{(b_{ap_{m+1}} - b_{ap_{m+1}}^{a_{m+1}}) \div n}{C_{ap_{m \times n+1}}} \right) \right) \end{aligned} \right] \quad (6)$$

根据定义 6,  $S^* = (S_{wimax}^*, S_{umts}^*)$  是纳什均衡. 即满足公式(3),  $U_{wimax}(S_{wimax}^*, S_{umts}^*) \geq U_{wimax}(S_{wimax}, S_{umts}^*)$ ,  $U_{umts}(S_{wimax}^*, S_{umts}^*) \geq U_{umts}(S_{wimax}, S_{umts})$ .

对于参与者 WiMax, 其最佳反应函数为  $BR_{wimax}(S_{umts})$ , 根据公式(4), WiMax 获取最大效用对应的函数为

$$S_{wimax}^* = \arg \max_{S_{wimax}} (S_{wimax}, S_{umts}) \quad (7)$$

同样, 对于参与者 UMTS, 其最佳反应函数为  $BR_{umts}(S_{wimax})$ , UMTS 获取最大效用对应的函数为

$$S_{umts}^* = \arg \max_{S_{umts}} (S_{wimax}, S_{umts}) \quad (8)$$

策略集合  $(S_{wimax}^*, S_{umts}^*)$  是纳什均衡点, 当且仅当满足:

$$S_{wimax}^* = BR_{wimax}(S_{umts}^*) \quad (9)$$

和

$$S_{umts}^* = BR_{umts}(S_{wimax}^*) \quad (10)$$

为了获得 WiMax 的最佳反应函数, 公式(5)中的  $U_{wimax}$  对集合  $\{b_{ap_1}^{a_2}, \dots, b_{ap_1}^{a_{m+1}}, \dots, b_{ap_1}^{a_{m \times n+1}}\}$  中的每个元素进行微分, 则可得:

$$\frac{\partial U_{wimax}}{\partial b_{ap_1}^{a_2}} \Rightarrow C_{ap_2} \left( b_{ap_1} - \sum_{i=2}^{m \times n+1} b_{ap_1}^{a_i} \right) = C_{ap_1} (b_{ap_2}^{a_2} + b_{ap_1}^{a_2}) \quad (11)$$

$$\frac{\partial U_{wimax}}{\partial b_{ap_1}^{a_{m+1}}} \Rightarrow C_{ap_{m+1}} \left( b_{ap_1} - \sum_{i=2}^{m \times n} b_{ap_1}^{a_i} \right) = C_{ap_1} (b_{ap_{m+1}}^{a_{m+1}} + b_{ap_1}^{a_{m+1}}) \quad (12)$$

$$\frac{\partial U_{wimax}}{\partial b_{ap_1}^{a_{m \times n+1}}} \Rightarrow C_{ap_{m \times n+1}} \left( b_{ap_1} - \sum_{i=2}^{m \times n} b_{ap_1}^{a_i} \right) = C_{ap_1} (b_{ap_{m \times n+1}}^{a_{m \times n+1}} + b_{ap_m}^{a_{m \times n+1}} + b_{ap_1}^{a_{m \times n+1}}) \quad (13)$$

为了获得 UMTS 的最佳反应函数, 公式(6)中的  $U_{umts}$  对集合  $\{b_{ap_2}^{a_2}, \dots, b_{ap_{m+1}}^{a_{m+1}}\}$  中的每个元素进行微分, 则可得:

$$\frac{\partial U_{umts}}{\partial b_{ap_2}^{a_2}} \Rightarrow \frac{C_{ap_2}}{b_{ap_2}^{a_2} + b_{ap_1}^{a_2}} = \frac{C_{ap_{m+2}}}{(b_{ap_2} - b_{ap_2}^{a_2}) + n \times b_{ap_{m+2}}^{a_{m+2}}} + \dots + \frac{C_{ap_{m \times n+2}}}{(b_{ap_2} - b_{ap_2}^{a_2}) + n \times b_{ap_{m \times n+1}}^{a_{m \times n+1}}} \quad (14)$$

$$\frac{\partial U_{umts}}{\partial b_{ap_{m+1}}^{a_{m+1}}} \Rightarrow \frac{C_{m+1}}{b_{ap_{m+1}}^{a_{m+1}} + b_{ap_1}^{a_{m+1}}} = \frac{C_{m \times n - n + 2}}{(b_{ap_{m+1}} - b_{ap_{m \times n - n + 2}}^{a_{m+1}}) + n \times b_{ap_{m \times n - n + 2}}^{a_{m+1}}} + \dots + \frac{C_{m \times n + 1}}{(b_{ap_{m+1}} - b_{ap_{m \times n + 1}}^{a_{m+1}}) + n \times b_{ap_{m \times n + 1}}^{a_{m+1}}} \quad (15)$$

### 2.3 网络效用优化

在所有服务区(即对集合  $\{a_1, a_2, \dots, a_{m+1}, a_{m+2}, \dots, a_{m \times n+1}\}$ ) 中的网络效能, 可以根据定义 3 中的公式(1)表示为

$$U_{all} = \omega \left[ \begin{array}{l} C_{ap_1} \log \left( \alpha \frac{b_{ap_1}^{a_1}}{C_{ap_1}} \right) + C_{ap_2} \log \left( \alpha \frac{b_{ap_2}^{a_2} + b_{ap_1}^{a_2}}{C_{ap_2}} \right) + \dots + \\ C_{ap_{m+1}} \log \left( \alpha \frac{b_{ap_{m+1}}^{a_{m+1}} + b_{ap_1}^{a_{m+1}}}{C_{ap_{m+1}}} \right) + \dots + C_{ap_{m \times n + 1}} \log \left( \alpha \frac{b_{ap_{m \times n + 1}}^{a_{m \times n + 1}} + b_{ap_m}^{a_{m \times n + 1}} + b_{ap_1}^{a_{m \times n + 1}}}{C_{ap_{m \times n + 1}}} \right) \end{array} \right] \quad (16)$$

公式(16)中的  $U_{all}$  对集合  $\{b_{ap_1}^{a_2}, \dots, b_{ap_1}^{a_{m+1}}, \dots, b_{ap_1}^{a_{m \times n + 1}}, b_{ap_2}^{a_2}, \dots, b_{ap_{m+1}}^{a_{m+1}}\}$  中的每个元素进行微分,则可得:

$$\frac{\partial U_{all}}{\partial b_{ap_1}^{a_2}} = 0 \Rightarrow \frac{C_{ap_1}}{b_{ap_1} - \sum_{i=2}^{m \times n + 1} b_{ap_1}^{a_i}} = \frac{C_{ap_2}}{b_{ap_2}^{a_2} + b_{ap_1}^{a_2}} \quad (17)$$

$$\dots$$

$$\frac{\partial U_{all}}{\partial b_{ap_1}^{a_{m+1}}} = 0 \Rightarrow \frac{C_{ap_1}}{b_{ap_1} - \sum_{i=2}^{m \times n + 1} b_{ap_1}^{a_i}} = \frac{C_{ap_{m+1}}}{b_{ap_{m+1}}^{a_{m+1}} + b_{ap_1}^{a_{m+1}}} \quad (18)$$

$$\dots$$

$$\frac{\partial U_{all}}{\partial b_{ap_1}^{a_{m \times n + 1}}} = 0 \Rightarrow \frac{C_{ap_1}}{b_{ap_1} - \sum_{i=2}^{m \times n + 1} b_{ap_1}^{a_i}} = \frac{C_{ap_{m \times n + 1}}}{b_{ap_{m \times n + 1}}^{a_{m \times n + 1}} + b_{ap_m}^{a_{m \times n + 1}} + b_{ap_1}^{a_{m \times n + 1}}} \quad (19)$$

$$\frac{\partial U_{all}}{\partial b_{ap_2}^{a_2}} = 0 \Rightarrow \frac{C_{ap_2}}{b_{ap_2}^{a_2} + b_{ap_1}^{a_2}} = \frac{C_{ap_{m+2}}}{(b_{ap_2} - b_{ap_2}^{a_2}) + n \times b_{ap_{m+2}}^{a_{m+2}}} + \dots + \frac{C_{ap_{m+n+2}}}{(b_{ap_2} - b_{ap_2}^{a_2}) + n \times b_{ap_{m+n+2}}^{a_{m+n+2}}} \quad (20)$$

$$\dots$$

$$\frac{\partial U_{all}}{\partial b_{ap_{m+1}}^{a_{m+1}}} = 0 \Rightarrow \frac{C_{ap_{m+1}}}{b_{ap_{m+1}}^{a_{m+1}} + b_{ap_1}^{a_{m+1}}} = \frac{C_{ap_{m \times n - n + 2}}}{(b_{ap_{m+1}} - b_{ap_{m \times n - n + 2}}^{a_{m \times n - n + 2}}) + n \times b_{ap_{m \times n - n + 2}}^{a_{m \times n - n + 2}}} + \dots + \frac{C_{ap_{m \times n + 1}}}{(b_{ap_{m+1}} - b_{ap_{m \times n + 1}}^{a_{m \times n + 1}}) + n \times b_{ap_{m \times n + 1}}^{a_{m \times n + 1}}} \quad (21)$$

将公式(11)~公式(13)变形,可以发现它们与公式(17)~公式(19)一致;公式(14)、公式(15)与公式(20)、公式(21)一致.这说明在每个 WiMax 和 UMTS 信号的区域,达到了网络的优化效能,存在纳什均衡解.对于纳什均衡解的存在性和唯一性,将在第 2.4 节进行讨论和证明.

### 2.4 非合作博弈的纳什均衡

定义 6 中纳什均衡的定义可以简单地理解为,一个参与者在其他参与者选择最优策略之后,无论如何改变其策略都无法增加其效用.

在第 2.2 节和第 2.3 节中,通过推导可以发现存在纳什均衡解,但不能证明其唯一性.满足纳什均衡存在且唯一需要满足两个条件:(1) 效用函数是严格凹的 ( $\frac{\partial^2 U_{wimax}}{\partial^2 b_{ap_1}^{a_i}} < 0$ ); (2) 交叉偏导数是负的 ( $\frac{\partial^2 U_{wimax}}{\partial b_{ap_1}^{a_i} \partial b_{ap_j}^{a_j}} < 0$ ). 其中,

$i \in \{2, \dots, m+1, \dots, m \times n + 1\}$ ;  $j \in \{2, \dots, m+1\}$ ;  $i \in \{j+m, j+m+n-1\}$ . 满足这两个条件意味着两个参与者的反应函数是斜率为负连续函数,而且二者的斜率不一样,证明如下:

证明:① 证明效用函数为严格凹.

由公式(5)推得:

$$\frac{\partial^2 U_{wimax}}{\partial^2 b_{ap_1}^{a_2}} = - \frac{C_{ap_1}}{\left( b_{ap_1} - \sum_{i=2}^{m \times n + 1} b_{ap_1}^{a_i} \right)^2} - \frac{C_{ap_2}}{(b_{ap_2}^{a_2} + b_{ap_1}^{a_2})^2} < 0,$$

...

$$\frac{\partial^2 U_{wimax}}{\partial^2 b_{ap_1}^{a_{m \times n + 1}}} = - \frac{C_{ap_1}}{\left( b_{ap_1} - \sum_{i=2}^{m \times n + 1} b_{ap_1}^{a_i} \right)^2} - \frac{C_{ap_{m+1}}}{(b_{ap_2}^{a_{m \times n + 1}} + b_{ap_1}^{a_{m \times n + 1}} + b_{ap_{m \times n + 1}}^{a_{m \times n + 1}})^2} < 0.$$

以上各式均为负,UMTS 网络的二阶偏导亦为负.

② 证明交叉偏导数为负.

$$\frac{\partial^2 U_{wimax}}{\partial b_{ap_1}^{a_2} \partial b_{ap_2}^{a_2}} = -\frac{C_{ap_2}}{(b_{ap_2}^{a_2} + b_{ap_1}^{a_2})^2} < 0,$$

$$\dots$$

$$\frac{\partial^2 U_{wimax}}{\partial b_{ap_1}^{a_{m \times n + 1}} \partial b_{ap_{m+1}}^{a_{m \times n + 1}}} = -\frac{C_{ap_{m+1}}}{(b_{ap_{m+1}}^{a_{m \times n + 1}} + b_{ap_1}^{a_{m \times n + 1}})^2} < 0.$$

以上各式均为负,对于 UMTS 网络的交叉偏导亦为负.

证得①和②,由此可知纳什均衡在各个有 WiMax 和 UMTS 信号覆盖的区域存在且唯一.  $\square$

### 3 接入控制算法

$b^{a_i}$  表示在  $a_i$  服务区的总带宽,

$$b^{a_i} = \begin{cases} b_{ap_j}^{a_i}, & j \in \{1\}, i \in \{1\} \\ b_{ap_1}^{a_i} + b_{ap_j}^{a_i}, & i, j \in \{2, \dots, m+1\}, i = j \\ b_{ap_1}^{a_i} + b_{ap_j}^{a_i} + b_{ap_{j'}}^{a_i}, & i \in \{m+2, \dots, m \times n + 1\}, j \in \{2, \dots, m+1\}, j' \in \{m+2, \dots, m \times n + 1\} \end{cases}$$

定义 7.  $C^{a_i} = \left\lceil \frac{b^{a_i}}{\bar{r}} \right\rceil$ , 其中  $C^{a_i}$  表示在区域  $a_i$  支持的连接数,  $\bar{r}$  是一个连接的平均带宽需求.  $C_r^{a_i} = \lceil C^{a_i} \times \tau \rceil + 1$

(其中,  $\tau$  为分配连接数进行调整的阈值,  $i \in \{1, 2, \dots, m+1, m+2, \dots, m \times n + 1\}$ ) 表示服务区  $a_i$  分配的连接数量.

定义 8. 针对连接, 可用 M/M/m/m 排队系统来表示,  $\bar{C}^{a_i}$  表示服务区  $a_i$  的平均连接数, 连接的阻塞率为  $P^{a_i}$ .

$$P^{a_i} = \frac{(a^{a_i})^m / m!}{\sum_{j=0}^m (a^{a_i})^j / j!} \quad (22)$$

其中,  $m$  表示在服务区域  $a_i$  提供的连接数,  $a^{a_i} = \lambda / \mu$  表示服务区域  $a_i$  中的业务量 ( $\lambda$  为呼叫到达率,  $1/\mu$  是指连接被占用的时间服从均值为  $1/\mu$  的指数分配),  $j$  表示正在通信的连接.

服务区域  $a_i$  的效率为

$$\eta = \frac{a^{a_i} (1 - P^{a_i})}{m} \quad (23)$$

阻塞率通常是网络的关键指标, 为保证阻塞率保持在一定的范围 (即  $P^{a_i} < t, t \in (0, 1)$ ), 可通过调整分配给服务区域  $a_i$  的连接数达到目标 (相当于提高用 M/M/m/m 排队系统中的窗口数量  $m$ ).

先规划  $a_i$  服务区域的连接数  $C^{a_i}$ , 则可以根据网络非合作博弈分配模型得出在  $a_i$  的总带宽  $b^{a_i}$ . 由定义 7 中的公式可以得到系统每个连接的平均带宽  $\bar{r} = b^{a_i} / C^{a_i}$ .

如果在  $a_i$  中已经有  $n$  个连接处于使用状态, 则在接入  $n+1$  个连接时需要判断:

- (1) 如果满足条件  $(n+1) < (C^{a_i} - C_r^{a_i}), r_{n+1} < \bar{r}$  和  $P^{a_i} \leq t$ , 则接纳第  $n+1$  个连接.
- (2) 如果满足条件  $(n+1) < (C^{a_i} - C_r^{a_i}), r_{n+1} < \bar{r} + (\bar{r} - r_1) + \dots + (\bar{r} - r_n)$  和  $P^{a_i} \leq t$ , 则接纳第  $n+1$  个连接.
- (3) 如果  $(C^{a_i} - C_r^{a_i}) \leq (n+1) < C^{a_i}$ , 则通过网络非合作博弈的增加分配给  $a_i$  的连接数  $(C^{a_i} + k)$ , 其中,  $k \geq 1$ . 返回步骤(1)和步骤(2)重新计算, 如果满足, 则接纳第  $n+1$  个连接; 否则, 拒绝接入.
- (4) 如果  $P^{a_i} > t$ , 则通过网络非合作博弈的增加分配给  $a_i$  的连接数  $(C^{a_i} + k)$ . 其中,  $k \geq 1$ . 返回步骤(1)和步骤(2)重新计算, 如果满足, 则接纳第  $n+1$  个连接; 否则, 拒绝接入.

详细的系统伪码如图 2 所示.

**Algorithm.** Admission control algorithm.

**Variables:**

```
1: int time=0;
2: int c=0;
3: int r=0;
8: int k=5;
8: int n=0;
4: double p=0;
5: double b=0;
6: double avg_b=0;
7: double t=0.1;
8: double a=0;
9: double tr=0.1;
```

**Input:**

```
10: c=15;
11: n=6;
```

**Action:**

```
12: r=[c*tr]+1
13: p=computeBlockProbability(c,a,i);
14: b=getBandwidth(c,i);
15: avg_b=averageBandwidth(c,b,i);
16: a=getTraffic(i);
17: while (time<3)
18:   if ((c-r)<=(n+1)<c||p>t) //Determine whether the number of connections and blocking probability above the threshold
19:     c=addConnections(c,k,i); //Increase number of connections
20:     p=computeBlockProbability(c,a,i); //Blocking probability calculation
21:   end if
22:     b=getBandwidth(c,i);
23:     avg_b=averageBandwidth(c,b,i);
24:     a=getTraffic(i);
25:   if ((n+1)<(c-r) && p<=t)
26:     if (b<avg_b) //Determine whether to accept the request bandwidth
27:       return true;
28:     end if
29:     if (b<(avg_b+getOverplusBandwidth(i)))
30:       return true;
31:     end if
32:   end if
33:   time++;
34: end while
35: return false;
```

Fig.2 Admission control algorithm

图2 接入控制算法

## 4 仿真模型和性能分析

### 4.1 仿真模型和参数设置

仿真模型可参考图1,设置1个WiMax AP,2个UMTS AP和2个WLAN AP,集合定义、覆盖关系按照定义1和定义2,接入点集合为 $\{ap_1, ap_2, ap_3, ap_4, ap_5\}$ ,服务区域集合为 $\{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\}$ .WiMax的传输速率为10Mbps,UMTS的传输速率为2Mbps,WLAN的信道速率为11Mbps(实际最大吞吐量为7Mbps<sup>[2]</sup>).网络效能函数的参数设 $\omega=1, \alpha=0.7$ ;通信的阻塞率 $P^{a_4}$ 分别取0.1和0.2.

### 4.2 网络资源分配

假定在服务区 $\{a_1, a_2, a_3, a_5\}$ 中的连接数为 $\{10, 5, 5, 20\}$ ,但是在服务区 $a_4$ 中的连接数是变化的.如图3(a)所示,随着服务区 $a_4$ 中连接数的增加(分别取15, 20, 25, 30), $ap_1$ (WiMax AP)分配给服务区 $a_1, a_3$ 和 $a_5$ 的带宽下降,而分配给 $a_2$ 和 $a_4$ 的带宽的呈上升趋势; $ap_1$ 分配给 $a_4$ 区域的带宽呈直线增长,而分配给区域 $a_2$ 的带宽在 $a_4$ 中连接数大于20时则增长很小.如图3(b)所示, $ap_2$ (UMTS AP)覆盖的区域为 $a_2$ 和 $a_4$ ,随着服务区 $a_4$ 中连接数的增加, $ap_2$ 分配给 $a_2$ 的带宽逐渐减小,而分配给 $a_4$ 的带宽则持续增加. $ap_3$ (UMTS AP)覆盖的区域为 $a_3$ 和 $a_5$ ,因为 $ap_3$ 和 $ap_2$



服务的区域不存在竞争关系,所以  $ap_3$  对于  $a_3$  和  $a_5$  的带宽影响很小.只有当  $a_4$  中连接数较大时(比如大于 25),由于  $ap_1$  分配给  $a_3$  和  $a_5$  的带宽减少,而且  $ap_5$  的带宽耗尽(最大为 7Mbps),才促使  $ap_2$  分配给  $a_3$  和  $a_5$  的带宽重新调整,达到整体上的带宽分配平衡.可以观察到,当  $a_4$  中的连接数增加到 20 时, $ap_1$  分配给  $a_4$  和  $a_5$  的带宽相等, $ap_2$  分配给  $a_2$  和  $a_4$  的带宽与  $ap_3$  分配给  $a_3$  和  $a_5$  的带宽相等(因为此时它们的连接数相同).这些数据表明,非合作博弈在网络资源分配方面是公平的. $a_4$  中的带宽来自  $ap_1, ap_2$  和  $ap_4$ .从图 3 可以看出,随着  $a_4$  中连接数的增多, $ap_1$  和  $ap_2$  分配给它的带宽是增加的.

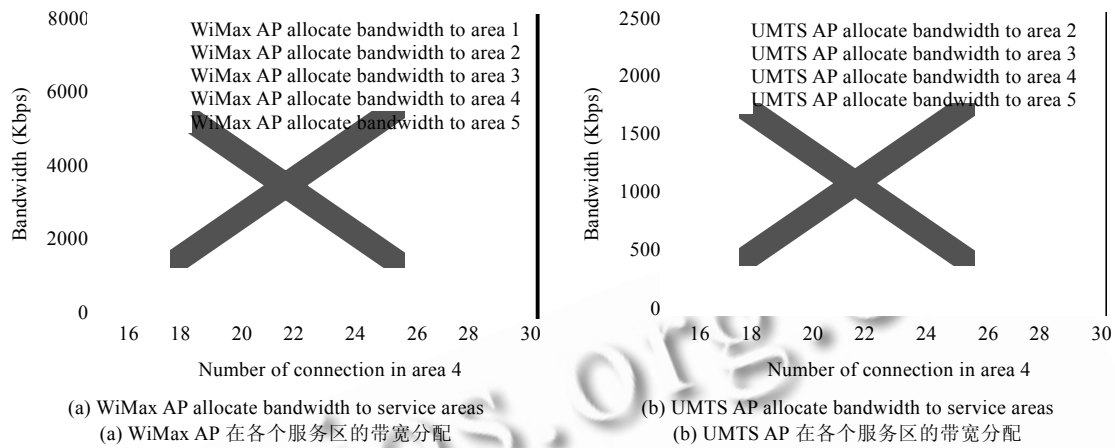


Fig.3  
图 3

如图 4(a)所示,随着  $a_4$  中连接数的增多,其总带宽是快速上升的,而在其他服务区域的带宽是减少的.总体上讲, $a_4$  中的每个连接的平均带宽是下降的.这可以解释为,系统中各种无线资源的总量是一定的,但随着某个区域(本节中研究的是  $a_4$ ,且假定其他区域分配的连接保持不变)中预留的连接数的增大,各个区域的无线资源经过非合作的博弈达到平衡,但各个连接的平均带宽是下降的.

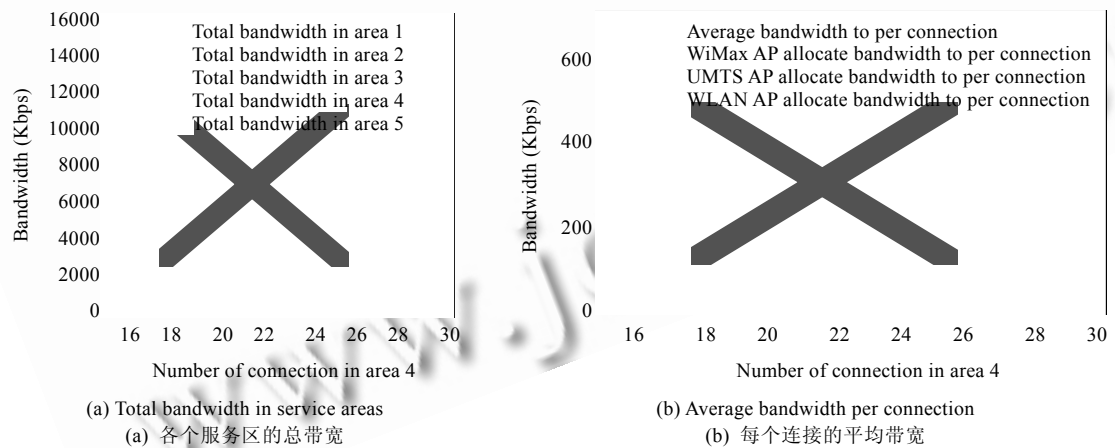


Fig.4  
图 4

如图 5(a)所示,随着业务量的增大,阻塞率也增大.而在一定业务量时, $a_4$  中的连接数越多,阻塞率越小.结合图 5(b)可以分析出,在一定业务量时, $a_4$  中的连接数越多,其效率越低.这说明在  $a_4$  中预留的连接数的大小受两个

因素制约,即阻塞率和系统效率.根据通信网理论,网络的首要指标是呼损(阻塞率),其次才是系统效率<sup>[6]</sup>.因此,阻塞率保持在一定水平(比如  $P^a \leq 0.1$ ),业务量越大,则需要预留的连接数越大,系统的效率也就相对较高.

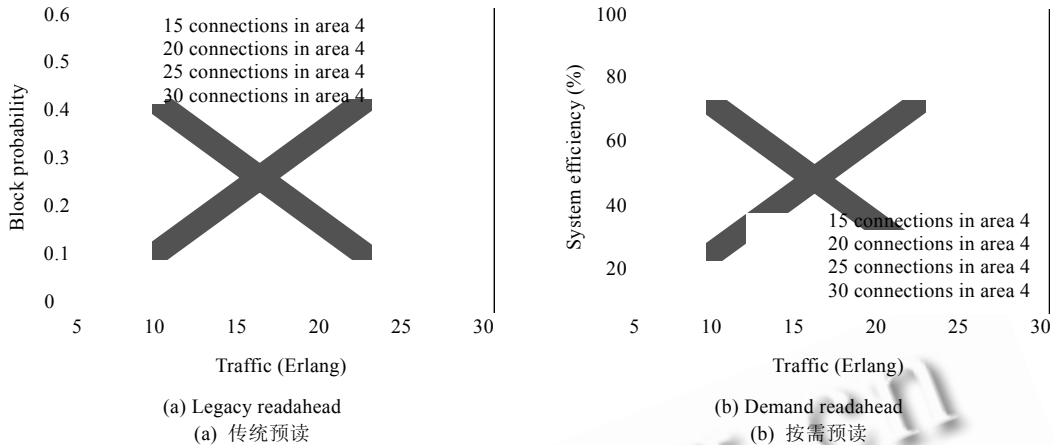


Fig.5

图 5

如图 6 所示,基于博弈的接入控制算法和静态接入控制算法在阻塞率和系统效率方面进行了对比.基于博弈的接入控制算法参见第 3 节.静态接入控制算法是指系统分配给某一区域一定的带宽和连接数(本节假设  $a_4$  得到的带宽为 9 300kbps,分配连接数为 20),相当于排队论中的拒绝服务系统(当窗口已满时,拒绝服务).

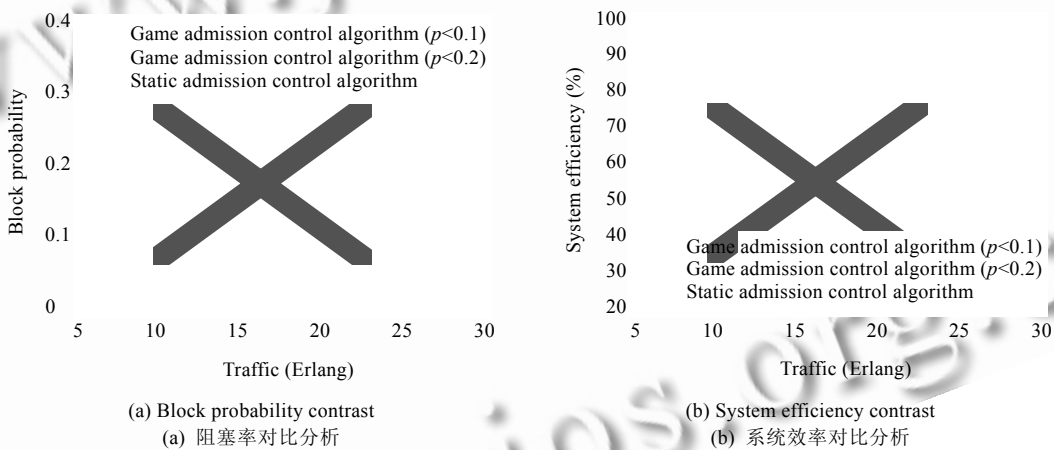


Fig.6

图 6

如图 6(a)所示,基于博弈的接入控制算法在  $a_4$  中的初始连接数(相当于排队系统中的窗口数量)为 15,当  $P^a < 0.1$  且业务量  $a \leq 15$  时,由于能够保证要求的阻塞率,算法对于连接数不作调整,所以其阻塞率会比静态接入控制算法略高.当  $15 \leq a \leq 30$  时,基于博弈的接入控制算法会通过调整连接数控制其阻塞率一直保持在小于 0.1 的水平,而静态控制算法由于没有调整机制,其阻塞率快速上升达到 0.38.在系统效率方面,当  $a \leq 15$  时,基于博弈的接入控制算法高于静态接入控制算法,随着业务量的增加(当  $15 \leq a \leq 30$  时),系统效率会比静态控制算法低 10%左右.当  $P^a < 0.2$  时的分析与以上类似.这些结果表明,基于博弈的接入控制算法兼顾考虑了质量指标和效率指标.而对于静态接入控制算法,如果遇到系统中有突发连接增多的情况,其阻塞率无法控制.

## 5 相关工作

文献[1]中主要研究了异构无线接入技术,比如蜂窝网络、无线局域网和移动自组织网络的整合问题,并描述了整合不同无线技术的问题.文献[7]中说明了下一代移动系统在当前部署和不断发展的 2G/3G 基础设施上无缝整合,实现 4G 接入技术是很重要的,并重点讨论了 WiMax 与 3GPP 如何实现无缝整合.文献[8]中对 WiMax,UMTS 和 WLAN 整合的异构网络构建模型,并基于此模型提出一种基于受限马尔可夫链的垂直切换算法.这些文献主要是研究异构无线网络中的整合问题和切换问题等,但并未考虑带宽分配和预留连接问题.

文献[9]中采用不同的无线资源管理对 WiMax 网络下行链接的性能进行了研究,尤其是对于 QoS 控制的调度和流媒体应用的多连接实现.文献[10]中讨论了如何在多无线接入网络中进行分布无线资源管理,并将其分为 3 类:网络集中、网络分布和终端异构无线网络的资源管理;而且在 B3G 的无线接入网络架构下建模并分析了相关问题.文献[11]中提出了一种在终端侧建立优先级列表的无线资源管理算法.它是一种用户喜好、终端能力、网络负荷和终端位置与速度的折中.

文献[12]中提出了一种非合作博弈论的方法,以优化 WLAN 中随机信道的接入.在文献[13]中,CDMA 系统的接入和速率控制被表达为非合作博弈.文献[14,15]中用博弈论解决 CDMA 系统中的效率和公平性资源分配、能耗控制等问题.文献[16]中基于博弈论,对多服务的 CDMA 网络中不同呼叫类型的接入控制进行了研究.文献[17]中基于博弈论提出了一种支持 WiMax 轮流检测的带宽分配和接入控制方法.在文献[18]中,无线自组织节点间的数据包转发策略被构建为博弈关系,并对其纳什均衡点研究.文献[4]中提出了一种能够反映供求关系的基于竞价的网络资源定价机制,并设计了端系统的效用函数,研究了资源分配中的纳什均衡点,但它主要考虑的是 Internet 网络.这些文献均用到了博弈理论,但主要用于集中解决单一网络中的资源管理问题.

在文献[19]中,在整合的 WLAN 和蜂窝网络的环境下提出了一种分层的无线资源管理机制.文献[20]中提出了一种基于合作博弈的带宽分配框架,用于 4G 异构无线网络,但其假设前提是参与者之间是充分合作的,这与现实中参与者都是理性的且以自己利益最大为原则的情况相违背,不能保证资源分配的公平性.文献[6]中提出了一种基于非合作博弈的无线资源管理框架,但它只探讨了接入异构网络的一个特殊情况,没有讨论针对网络的普遍性及系统的效率问题.

文献[21]中提出了一种呼叫接入控制算法,考虑了阻塞率和基于等级服务的机制.它主要通过基于等级服务函数得出最小值来确定分配的信道数,但是权重调整有一定的随意性.文献[22]中提出了一种公平的呼叫接入控制算法,它基于自适应马尔可夫模型,能够适用于不同的业务流,但是它研究的前提是网络容量固定.

基于对以上文献的分析,本文提出了一种基于非合作博弈的无线资源分配方法.它建立的模型具有普遍性,能够兼顾公平性和效率.在呼叫接入控制方面,考虑了无线信道数的分配和通信的阻塞率,提出了一种可调整网络容量的算法.它用于解决网络中局部业务量突增而使阻塞率上升的问题,能够使阻塞率低于通信过程中可容忍的水平.

## 6 结束语

本文对异构无线网络(包括 WiMax,UMTS 和 WLAN)下的无线资源管理进行了研究,基于非合作博弈论提出并证明了不同服务区域的带宽、连接数量分配机制及接入控制算法.这种分配机制考虑了各种无线资源之间的竞争博弈,对每个服务区域分配一定数量的连接且能够满足带宽分配的公平性.本文提出的接入控制算法不仅考虑了接入连接的带宽是否满足,而且考虑了其在服务区域的阻塞率情况.如果当某服务区业务量增大时,其阻塞率也增大,则通过基于非合作博弈的分配机制对该区域的分配的连接数进行调整,从而保证通信的可靠性,将业务量保持在一定水平.验证分析表明,基于非合作博弈的带宽和连接分配机制是公平的,相应的接入控制算法可以动态地调整,从而保证系统通信的有效性并兼顾效率.

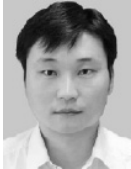
**References:**

- [1] Cavalcanti D, Agrawal D, Cordeiro C, Xin B, Kumar A. Issues in integrating cellular networks, WLANs, and MANETs: A futuristic heterogeneous wireless network. *IEEE Wireless Communications*, 2005,12(3):30–41. [doi: 10.1109/MWC.2005.1452852]
- [2] Niyato D, Hossain E. A non-cooperative game-theoretic framework for radio resource management in 4G heterogeneous wireless access networks. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2008,7(3):332–345. [doi: 10.1109/TMC.2007.70727]
- [3] Zhang WY. *Game Theory and Information Economics*. Shanghai: People Press, 1996. 43–84 (in Chinese).
- [4] Tao J, Wu QL, Wu Q. Application research of network resource allocation algorithm based on non-cooperative bidding game. *ACTA Electronic Sinica*, 2006,34(2):241–246 (in Chinese with English abstract).
- [5] Tang A, Wang JT, Low SH. Counter-Intuitive throughput behaviors in networks under end-to-end control. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2006,14(2):355–368. [doi: 10.1109/TNET.2006.872552]
- [6] Zhou JP. *Theoretical Basis for Communication Network*. Beijing: Posts & Telecommunications Press, 1999. 207–242 (in Chinese).
- [7] Taaghoul P, Salkintzis AK, Lyer J. Seamless integration of mobile WiMax in 3GPP networks. *IEEE Communications Magazine*, 2008,46(10):74–85. [doi: 10.1109/MCOM.2008.4644122]
- [8] Sun C, Stevens-Navarro E, Wong VWS. A constrained MDP-based vertical handoff decision algorithm for 4G wireless networks. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications*. 2008. 2169–2174.
- [9] Huang CY, Juan HH, Lin MS, Chang CJ. Radio resource management of heterogeneous services in mobile WiMax systems. *IEEE Wireless Communications*, 2007,14(1):20–26. [doi: 10.1109/MWC.2007.314547]
- [10] Magnusson P, Lundsjö J, Sachs J, Wallentin P. Radio resource management distribution in a beyond 3G multi-radio access architecture. In: *Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conf.* 2004. 3472–3477.
- [11] Modeas I, Kaloxylas A, Passas N, Merakos L. An algorithm for radio resources management in integrated cellular/WLAN networks. In: *Proc. of the 18th Annual IEEE Int'l Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2007)*. 2007. 1–5.
- [12] Altman E, Borkar VS, Kherani AA. Optimal random access in networks with two-way traffic. In: *Proc. of the 15th Annual IEEE Int'l Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2004)*. 2004. 609–613.
- [13] Lin HT, Chatterjee M, Das SK, Basu K. ARC: An integrated admission and rate control framework for competitive wireless CDMA data networks using non-cooperative games. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2005,4(3):243–258. [doi: 10.1109/TMC.2005.35]
- [14] Koskie S, Gajic Z. A Nash game algorithm for SIR-based power control in 3G wireless CDMA networks. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2005,13(5):1017–1026. [doi: 10.1109/TNET.2005.857068]
- [15] Meshkati F, Chiang M, Poor HV, Schwartz SC. A game-theoretic approach to energy-efficient power control in multicarrier CDMA systems. *IEEE Journal Selected Areas in Communications*, 2006,24(6):1115–1129. [doi: 10.1109/JSAC.2005.864028]
- [16] Virapanicharoen J, Benjapolakul W. Fair-Efficient guard bandwidth coefficients selection in call admission control for mobile multimedia communications using game theoretic framework. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications*. 2004. 80–84.
- [17] Niyato D, Hossain E. Radio resource management games in wireless networks: An approach to bandwidth allocation and admission control for polling service in IEEE 802.16. *IEEE Wireless Communications*, 2007,14(1):27–35. [doi: 10.1109/MWC.2007.314548]
- [18] Félégyházi M, Hubaux JP, Buttyán L. Nash equilibria of packet forwarding strategies in wireless ad hoc networks. *IEEE Trans. on Mobile Computers*, 2006,5(5):463–476. [doi: 10.1109/TMC.2006.68]
- [19] Karetos GT, Kyriazakos SA, Groustiotis E, Di Giandomenico F, Mura I. A hierarchical radio resource management framework for integrating WLANs in cellular networking environments. *IEEE Wireless Communications*, 2005,12(6):11–17. [doi: 10.1109/MWC.2005.1561940]
- [20] Isameldin MS, Pomalaza-Ráez C, Oppermann I, Lehtomäki J. Radio resource allocation in heterogeneous wireless networks using cooperative games. In: *Proc. of the Nordic Radio Symp. on Including Finnish Wireless Communications Workshop*. 2004.
- [21] Zhang JF, Mark JW, Shen XM. A novel resource reservation scheme for handoff in CDMA wireless cellular networks. *IEEE Wireless Communications and Networking*, 2003,3:2069–2074.

- [22] Kibria MR, Jamalipour A. Fair call admission control for prioritizing vertical handoff in multi-traffic B3G networks. In: Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conf. 2006. 1-5.

附中文参考文献:

- [3] 张维迎. 博弈论与信息经济学. 上海: 人民出版社, 2004. 43-84.  
[4] 陶军, 吴清亮, 吴强. 基于非合作竞价博弈的网络资源分配算法的研究. 电子学报, 2006, 34(2): 242-246.  
[6] 周炯盘. 通信网理论基础. 北京: 人民邮电出版社, 1999. 207-242.



李明欣(1977-), 男, 河南平顶山人, 博士, 主要研究领域为异构网络, 移动性管理.



胡博(1978-), 男, 博士, 讲师, 主要研究领域为移动移动 IP 网络, 移动性管理.



陈山枝(1969-), 男, 博士, 教授级高工, 博士生导师, 主要研究领域为移动性管理, 路由抗毁.

时岩(1975-), 女, 博士, 讲师, 主要研究领域为移动性管理, 异构网络.



谢东亮(1974-), 男, 博士, 副教授, 主要研究领域为传感器网络, 异构网络.