

## 异构无线网络多链路接入动态资源分配算法

俞鹤伟<sup>①</sup> 梁根<sup>\*①②</sup> 秦勇<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(华南理工大学计算机科学与工程学院 广州 510641)

<sup>②</sup>(广东石油化工学院理学院 茂名 525000)

<sup>③</sup>(东莞理工学院计算机学院 东莞 523808)

**摘要:** 异构无线网络(Heterogeneous Wireless Networks, HWNs)环境下现有接入控制算法的主要问题是通过单一的传输链路建立移动用户和无线网络之间的连接,并且接入过程中的资源分配没有对全网的传输性能进行优化。为了解决上述问题,该文分析了 HWNs 中的资源分配模型和链路接入速率模型,提出一种支持多链路接入的动态资源分配算法 MLA-DRA。算法以最大化系统传输速率为目标,将用户接入过程转化为前后相互联系的多阶段决策过程,利用前一阶段用户的资源分配状态计算下一阶段用户的最优解,从而推导出系统传输速率的最优值。在仿真平台上对 MLA-DRA 算法进行了性能分析,并且和其它算法进行了性能比较,实验结果表明,MLA-DRA 算法能有效利用系统资源以及提高系统传输速率。

**关键词:** 异构无线网络; 动态分配; 剩余带宽; 最大速率

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)04-0817-08

DOI: 10.11999/JEIT160583

## Multiple Link Access and Dynamic Resource Allocation Algorithm in Heterogeneous Wireless Networks

YU Hewei<sup>①</sup> LIANG Gen<sup>①②</sup> QIN Yong<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(School of Computer Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

<sup>②</sup>(College of Science, Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming 525000, China)

<sup>③</sup>(School of Computer Science, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China)

**Abstract:** The main problems in the existing access control algorithm under the environment of Heterogeneous Wireless Networks (HWNs) is to set up the connection between mobile users and wireless network through a single transmission link and the resources allocation lacks for optimizing transmission of the whole network in the access process. In order to solve the above problems, the resource allocation model and access link rate model in HWNs are analyzed, and a Multiple Link Access and Dynamic Resource Allocation (MLA-DRA) algorithm that supports multi-link access is proposed in this paper. The algorithm takes the maximum of the system transmission rate as object function, transfers the user access process into the multi-stage decision process that is mutually connected, and employs the previous resource allocation state to calculate the optimal solution of next user, thus deduces the optimal value of system transmission rate. In the simulation platform, the performance of MLA-DRA algorithm is analyzed, and is compared with other algorithms. Experimental results show that MLA-DRA algorithm can effectively utilize the system resources and improve the system transmission rate.

**Key words:** Heterogeneous Wireless Networks (HWNs); Dynamic allocation; Residual bandwidth; Maximum rate

### 1 引言

近年来,适应不同应用场景的多种无线网络技

术获得迅速发展。在传统移动蜂窝网络信号覆盖范围内,部署多种其它无线接入网络,形成了多网络共同存在、覆盖范围重叠的异构无线网络(Heterogeneous Wireless Networks, HWNs)<sup>[1]</sup>。

网络接入控制是 HWNs 融合的关键技术之一<sup>[2]</sup>,其作用是对用户的接入请求和资源分配进行判决,为用户提供相应的服务。如何利用 HWNs 在不同接入技术、重叠网络架构、多业务流量负载等方面的特点,在为用户提供接入服务的同时,保证用

收稿日期: 2016-06-03; 改回日期: 2016-12-12; 网络出版: 2017-02-09

\*通信作者: 梁根 L\_Gen@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(61070179, 61003066), 广东省自然科学基金(10151601501000015)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61070179, 61003066), The Natural Science Foundation of Guangdong Province (10151601501000015)

户业务的服务质量(Quality of Service, QoS)、最优化无线资源利用成为 HWNs 研究中的热点<sup>[3]</sup>。

HWNs接入控制算法的设计直接关系到用户体验和网络资源利用率<sup>[4]</sup>,国内外学者已经做了大量研究和总结<sup>[5,6]</sup>。文献[7]在基于接收信号强度(Received Signal Strength, RSS)算法的基础上进行改进,提出基于RSS和信号强度比例,并且限制不同网络间切换次数的算法,减少了乒乓效应。文献[8]在基于负载均衡接入控制算法的基础上,通过主动发起切换执行负载均衡,以创建更多的可用资源,保证接入请求的成功率,但是算法没有考虑到用户业务对通信质量的需求。文献[9]以用户传输速率作为效用函数,以带宽资源限制作为约束条件,采用凸优化理论得到最大化传输速率,将用户分配到最合适的网络中。但是算法的效用函数不能针对不同的用户需求及网络状态的改变进行动态调整。文献[10]采用灰色模糊控制过程实现联合无线资源管理接入控制,通过减小多用户之间的干扰和阻塞率增加系统容量。但是当算法输入参数数量增加时,模糊推理规则库的规模激增,导致计算复杂度上升。文献[11]采用非合作博弈论提出面向HWNs的无线资源管理和接入控制机制,通过确定带宽预留门限来提高接入业务的优先级。文献[12]在文献[11]的基础上对非合作博弈无线资源分配中纳什均衡点的存在性和唯一性进行论证,提出能够保证通信可靠性的接入控制算法,但是,该算法在一轮博弈中每个网络只能接受一个用户的接入请求,效率较低。

为充分利用 HWNs 不同接入技术,在满足用户多业务接入需求的同时,最优化 HWNs 系统性能和资源利用,本文提出一种支持多链路接入的动态资源分配算法(Multiple Link Access and Dynamic Resource Allocation, MLA-DRA), MLA-DRA 算法主要思想如下:

(1)根据 HWNs 的特点对资源分配和接入链路传输速率进行建模,将用户接入过程与带宽资源分配过程建立理论联系,将目标建模为求解系统最大传输速率问题;

(2)根据用户接入顺序构建动态带宽资源分配多阶段求解模型,并且根据系统资源使用状态和用户带宽分配决策转化目标函数最优值,把求解所有用户情况下的系统最大速率问题转化为求解不同用户数情况下的系统最大速率子问题。

## 2 系统模型及问题定义

假设 HWNs 区域存在  $n$  种无线网络,各无线网络在服务区内部署着众多接入点,接入点的信号覆

盖范围有所不同,并存在重复覆盖。区域内随机分布  $m$  个移动用户终端,假设用户终端是多模终端,具有处理所有无线接入技术的能力,可以接入 1 个或者同时接入多个无线网,并且假设网络间和用户间不存在干扰。本文所用到的主要数学符号及其说明如表 1 所示。

表 1 本文所用主要符号及其说明

符号	说明
$n$	接入网络数
$m$	移动终端用户个数
$B$	系统可分配的总带宽资源
$b_j^{\text{ini}}$	网络 $j$ 初始化带宽资源
$b_j^{\text{res}}$	网络 $j$ 中未利用的剩余带宽
$b_{i,j}$	网络 $j$ 为用户 $i$ 分配的带宽大小
$b_i^{\text{req}}$	用户 $i$ 的带宽需求
$s_i$	用户 $i$ 接入时系统带宽资源状态
$u_i$	对用户 $i$ 进行带宽资源分配的决策
$r_i$	用户 $i$ 数据传输速率
$R_{i,m}$	用户 $i$ 到用户 $m$ 的系统传输速率之和
$\gamma_i$	到用户 $i$ 时系统目标函数的阶段指标
$p_{i,m}$	用户 $i$ 到用户 $m$ 的带宽资源分配策略

### 2.1 资源分配模型

本文采用基于正交频分多路复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)的无线网络作为研究对象,以一个子时隙和一个子信道构成的带宽资源作为基本的资源分配单元。

**定义 1** 系统总带宽容量为各无线接入网络分配到的初始带宽之和,即网络中已经连接上的所有用户已分配带宽及网络可用剩余带宽之和。由定义可得

$$B = \sum_{j=1}^n b_j^{\text{ini}} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m b_{i,j} + \sum_{j=1}^n b_j^{\text{res}} \quad (1)$$

式(1)中,接入网的初始带宽  $b_j^{\text{ini}}$  为系统总带宽与接入网权重的乘积,权重可以根据实际需要动态设置,即

$$b_j^{\text{ini}} = B \times \phi_j \quad (2)$$

此外,为了更好地说明每个用户接入 HWNs 时对系统性能的影响和求解每个用户阶段的系统性能指标,本文假设所有用户不在同一时刻接入到 HWNs,而是按照一定的先后次序接入到 HWNs。

**定义 2**  $s_i$  为第  $i$  个用户准备接入 HWNs 时系统带宽资源所处的状态变量。

由定义可知,  $s_i$  既是用户  $i$  接入时系统带宽资源

状态的起点，又是前一个用户  $i-1$  完成接入后系统带宽资源状态的终点。此外，本文假设用户  $i$  的接入状态确定以后，用户  $i$  及其之后的所有用户  $i, i+1, \dots, m$  的接入过程不受用户  $1, 2, \dots, i-1$  影响。

**定义 3** 带宽资源分配决策  $u_i$  表示当系统带宽资源状态处于  $s_i$  时对用户  $i$  进行带宽分配的决策。

由定义可知， $u_i$  是系统带宽资源状态变量  $s_i$  的函数，可表示为  $u_i(s_i)$ 。在 HWNs 的接入环境中，由于用户可能位于一定的信号重叠覆盖范围中，用户可以接入一个或者同时接入多个网络，因此， $u_i$  的取值往往不是唯一，而是允许在某一范围内，在本文中，我们用  $D_i(s_i)$  表示用户  $i$  在状态  $s_i$  时允许的决策集合，因此可得： $u_i \in D_i(s_i)$ 。

## 2.2 链路接入速率模型

若用户接入到一个网络中，网络就会为其分配带宽资源，根据香农公式，用户  $i$  在网络  $j$  中获得带宽  $b_{i,j}$  后，理论上可以达到的最大数据传输速率为<sup>[13]</sup>

$$r_i = \beta_{i,j} b_{i,j} \log_2 \left( 1 + S_{i,j} / N_{i,j} \right) \quad (3)$$

其中， $\beta_{i,j}$ ， $S_{i,j}$  和  $N_{i,j}$  分别表示用户  $i$  在网络  $j$  中的带宽效益因子、信号功率和噪声功率， $\beta_{i,j}$  可根据系统特征具体设定。

本文假设用户终端支持多链路并行接入  $n$  个网络，那么根据式(3)，用户  $i$  能达到的最大数据传输速率为

$$r_i = \sum_{j=1}^n \beta_{i,j} b_{i,j} \log_2 \left( 1 + S_{i,j} / N_{i,j} \right) \quad (4)$$

同样可以推出，对于无线接入网  $j$ ，其数据传输速率可以表示为

$$r_j = \sum_{i=1}^m \beta_{i,j} b_{i,j} \log_2 \left( 1 + S_{i,j} / N_{i,j} \right) \quad (5)$$

## 2.3 问题定义

由于接入过程中的带宽资源分配会影响到用户的传输速率，从整个 HWNs 的角度来看，总是希望能够通过对所有用户进行合理的资源分配使得 HWNs 获得最大的系统传输速率，因此，本文将目标函数建模为最大化系统传输速率问题：

$$R(x) = \max \sum_{i=1}^m r_i \quad (6)$$

由式(6)可知，目标函数是定义在所有用户接入过程的函数，严格单调递增，并且全过程和其中任一子过程的目标函数是它所包含的各用户的目标函数之和。设  $R_{i,m}$  表示由用户  $i$  到用户  $m$  的传输速率之和，因此，根据定义 2、定义 3 和式(6)可知， $R_{i,m}$  可以表示为  $s_i$ ， $u_i$  和  $R_{i+1,m}$  的函数，并且  $R_{i,m}$  满足递推关系：

$$\begin{aligned} R_{i,m} & (s_i, u_i, s_{i+1}, \dots, s_{m+1}) \\ & = \gamma_i(s_i, u_i) + R_{i+1,m}(s_{i+1}, u_{i+1}, s_{i+2}, \dots, s_{m+1}), \\ & \quad i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)中， $\gamma_i(s_i, u_i)$  表示第  $i$  个用户接入时系统目标函数的阶段指标。

因此，根据式(4)至式(7)，可以推出最大化系统传输速率为

$$\left. \begin{aligned} \max R_{1,m} & = \max \sum_{i=1}^m r_i = \max \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \beta_{i,j} b_{i,j} \\ & \quad \cdot \log_2 \left( 1 + S_{i,j} / N_{i,j} \right) = \max \gamma_i(s_i, u_i) \\ & \quad + \max R_{i+1,m}(s_{i+1}, u_{i+1}, s_{i+2}, \dots, s_{m+1}) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{j=1}^n b_{i,j} \leq b_i^{\text{req}} \\ & \sum_{i=1}^m b_{i,j} \leq b_j^{\text{ini}} \\ & b_{i,j} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中，约束分别表示用户  $i$  在各个网络获得的总带宽小于等于该用户的需求带宽，网络  $j$  中所有用户的带宽总和应该小于等于网络  $j$  可供分配的总带宽。

## 3 MLA-DRA 方法设计

### 3.1 问题分解及证明

为了求解所有用户的最大化系统传输速率问题，根据用户接入的先后次序，我们把问题的求解转化为多阶段决策过程。

**定义 4** 带宽资源分配策略是按所有用户先后次序，对每个用户进行带宽资源分配的决策组成的集合。由定义 4 和定义 3 可知，它是决策函数的序列，记为  $p_{1,m}$ ，即

$$p_{1,m} = \{u_1(s_1), u_2(s_2), \dots, u_m(s_m)\} \quad (9)$$

在一个控制周期内，由用户  $i$  开始到用户  $m$  的决策序列称为  $i$  子策略，记为  $p_{i,m}$ ，即

$$p_{i,m} = \{u_i(s_i), u_{i+1}(s_{i+1}), \dots, u_m(s_m)\} \quad (10)$$

**定理 1** 设用户数为  $m$  的接入过程，其用户编号为  $i = 1, 2, \dots, m$ ，策略  $p_{1,m} = (u_1, u_2, \dots, u_m)$  使系统达到最大化传输速率的充分必要条件是对于任意一个用户  $i$  ( $1 \leq i \leq m$ )，有

$$\begin{aligned} & R_{1,m}(s_1, p_{1,m}) \\ & = \max_{p_{1,i-1} \in p_{1,i-1}(s_1)} \left\{ R_{1,i-1}(s_1, p_{1,i-1}) + \max_{p_{i,m} \in p_{i,m}(s_i)} R_{i,m}(s_i, p_{i,m}) \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

其中， $p_{1,m} = (p_{1,i-1}, p_{i,m})$ ， $s_i = T_{i-1}(s_{i-1}, u_{i-1})$  是由给定

的系统资源初始状态  $s_1$  和用户 1 开始到用户  $i-1$  的子策略  $p_{1,i-1}$  所确定的用户  $i$  的状态。

**证明** 必要性。设  $p_{1,m}$  是使系统达到最大化传输速率的最优策略, 则

$$\begin{aligned} & R_{1,m}(s_1, p_{1,m}) \\ &= \max_{p_{1,i-1} \in p_{1,i-1}(s_1)} \{R_{1,m}(s_1, p_{1,m})\} \\ &= \max_{p_{1,i-1} \in p_{1,i-1}(s_1)} \{[R_{1,i-1}(s_1, p_{1,i-1}) + R_{i,m}(s_1, p_{1,m})]\} \end{aligned} \quad (12)$$

对于从用户  $i$  至用户  $m$  的接入过程, 它的目标函数指标值取决于过程的起始状态  $s_i = T_{i-1}(s_{i-1}, u_{i-1})$  和子策略  $p_{i,m}$ , 而这个起始状态  $s_i$  是由前一子过程在子策略  $p_{1,i-1}$  下确定的。

因此, 在策略集合  $p_{1,m}$  求最优解, 就等价于在子策略集合  $p_{i,m}(s_i)$  上求最优解, 然后再求这些子最优解在子策略集合  $p_{1,i-1}(s_1)$  上的最优解。因此, 式(12)可以转换为

$$\begin{aligned} & R_{1,m}(s_1, p_{1,m}) \\ &= \max_{p_{1,i-1} \in p_{1,i-1}(s_1)} \left\{ \max_{p_{i,m} \in p_{i,m}(s_i)} [R_{1,i-1}(s_1, p_{1,i-1}) + R_{i,m}(s_i, p_{i,m})] \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

由于定义 2 假设可知, 式(13)括号内第 1 项与子策略  $p_{i,m}$  无关, 因此得

$$\begin{aligned} & R_{1,m}(s_1, p_{1,m}) \\ &= \max_{p_{1,i-1} \in p_{1,i-1}(s_1)} \left\{ R_{1,i-1}(s_1, p_{1,i-1}) + \max_{p_{i,m} \in p_{i,m}(s_i)} R_{i,m}(s_i, p_{i,m}) \right\} \end{aligned} \quad (14)$$

充分性。设  $p_{1,m} = (p_{1,i-1}, p_{i,m})$  为任一策略,  $s_i$  为  $(s_1, p_{1,i-1})$  所确定的用户  $i$  的起始状态, 则有

$$\begin{aligned} & R_{1,m}(s_1, p_{1,m}) \\ &= R_{1,i-1}(s_1, p_{1,i-1}) + R_{i,m}(s_i, p_{i,m}) \leq R_{1,i-1}(s_1, p_{1,i-1}) \\ & \quad + \max_{p_{i,m} \in p_{i,m}(s_i)} \{R_{i,m}(s_i, p_{i,m})\} \\ &\leq \max_{p_{1,i-1} \in p_{1,i-1}(s_1)} \left\{ R_{1,i-1}(s_1, p_{1,i-1}) + \max_{p_{i,m} \in p_{i,m}(s_i)} R_{i,m}(s_i, p_{i,m}) \right\} \\ &= R_{1,m}(s_1, p_{1,m}) \end{aligned} \quad (15)$$

故只要  $p_{1,m}$  使定理式子成立, 则对于任一策略  $p_{1,m}$ , 都有

$$R_{1,m}(s_1, p_{1,m}) \leq R_{1,m}(s_1, p_{1,m}) \leq \quad (16)$$

因此,  $p_{1,m}$  使系统速率达到最大。证毕

**推论 1** 若策略  $p_{1,m}$  使系统传输速率达到最大, 则对于任意的用户  $i$  ( $1 \leq i \leq m$ ), 它的子策略  $p_{i,m}$  对于以  $s_i = T_{i-1}(s_{i-1}, u_{i-1})$  为起点的  $i$  到  $m$  子过程来说, 也必使系统传输速率最大。

**证明** 用反证法。若  $p_{i,m}$  不是最优策略, 则有

$$R_{i,m}(s_i, p_{i,m}) < \max_{p_{i,m} \in p_{i,m}(s_i)} \{R_{i,m}(s_i, p_{i,m})\} \quad (17)$$

因而:

$$\begin{aligned} R_{1,m}(s_1, p_{1,m}) &= R_{1,i-1}(s_1, p_{1,i-1}) + R_{i,m}(s_i, p_{i,m}) \\ &< R_{1,i-1}(s_1, p_{1,i-1}) \\ & \quad + \max_{p_{i,m} \in p_{i,m}(s_i)} \{R_{i,m}(s_i, p_{i,m})\} \\ &< \max_{p_{1,i-1} \in p_{1,i-1}(s_1)} \left\{ R_{1,i-1}(s_1, p_{1,i-1}) \right. \\ & \quad \left. + \max_{p_{i,m} \in p_{i,m}(s_i)} R_{i,m}(s_i, p_{i,m}) \right\} \end{aligned} \quad (18)$$

故与定理 1 的必要性矛盾。证毕

### 3.2 问题求解

对于求解最大化系统传输速率问题, 我们从用户  $m$  开始, 根据上述定理 1、推论 1 和式(7), 可以推出:

$$R_m = \max_{u_m \in D_m(s_m)} \gamma_m(s_m, u_m) \quad (19)$$

其中,  $D_m(s_m)$  是由状态  $s_m$  所确定的用户  $m$  的决策集合。通过求解该问题, 就可以得到带宽资源分配最优解  $u_m(s_m)$  和系统传输速率最优值  $R_m(s_m)$ 。

对于用户  $m-1$ , 有

$$\begin{aligned} & R_{m-1,m}(s_{m-1}) \\ &= \max_{u_{m-1} \in D_{m-1}(s_{m-1})} [\gamma_{m-1}(s_{m-1}, u_{m-1}) + R_m(s_m)] \end{aligned} \quad (20)$$

其中,  $s_m = T_{m-1}(s_{m-1}, u_{m-1})$ 。由于前一步对用户  $m$  的计算可以求得  $R_m(s_m)$ , 因此, 通过该步对用户  $m-1$  的求解, 得到最优解  $u_{m-1}(s_{m-1})$  和最优值  $R_{m-1,m}(s_{m-1})$ 。

同理, 对于任意用户  $i$ , 有

$$R_{i,m}(s_i) = \max_{u_i \in D_i(s_i)} [\gamma_i(s_i, u_i) + R_{i+1,m}(s_{i+1})] \quad (21)$$

其中,  $s_{i+1} = T_i(s_i, u_i)$ , 通过前一用户  $i+1$  的结果求解得到用户  $i$  的最优解  $u_i(s_i)$  和最优值  $R_{i,m}(s_i)$ 。

以此类推, 直到第 1 个用户, 有

$$R_{1,m}(s_1) = \max_{u_1 \in D_1(s_1)} [\gamma_1(s_1, u_1) + R_{2,m}(s_2)] \quad (22)$$

其中,  $s_2 = T_1(s_1, u_1)$ , 通过求解该极值问题, 得到最优解  $u_1(s_1)$  和最优值  $R_{1,m}(s_1)$ 。

由于可以根据接入网的初始带宽  $b_j^{\text{ini}}$  确定系统资源的初始状态  $s_1$ , 所以  $u_1(s_1)$  和  $R_{1,m}(s_1)$  也可以确定, 从而  $s_2 = T_1(s_1, u_1)$  也可以确定, 于是  $u_2(s_2)$  和  $R_{2,m}(s_2)$  也就可以确定。这样, 按照上述递推过程相反的顺序推算下去, 就可以逐步确定每个用户的带宽分配决策和系统最大传输速率。

### 3.3 带宽分配量化计算

上节给出了求解系统最大速率和用户带宽资源分配的推导方法, 本节给出对每个用户分配带宽的量化计算方法。在本文中, 对于用户  $i$  带宽资源状态

$s_i$  的计算, 我们可以分为两种情况: 接入轻负载网络和接入重负载网络。

**定义 5** 轻负载网络集合为连接到该网络的所有用户的带宽需求总和小于或等于该网络初始带宽的网络集合, 即

$$L: \sum_{i=1}^m b_{i,j}^{\text{req}} \leq b_j^{\text{ini}} \quad (23)$$

根据上述定义, 可以求得接入轻负载网络的剩余带宽资源状态  $s_i$  为

$$s_i = b_j^{\text{ini}} - \sum_{i=1}^m b_{i,j} \quad (24)$$

**定义 6** 重负载网络集合为连接到该网络的所有用户的带宽需求总和大于该网络初始带宽的网络集合, 即

$$H: \sum_{i=1}^m b_{i,j}^{\text{req}} > b_j^{\text{ini}} \quad (25)$$

同理, 可以求得接入重负载网络的带宽资源状态  $s_i$  为

$$s_i = \sum_{i=1}^m b_{i,j}^{\text{req}} - b_j^{\text{ini}} \quad (26)$$

在第  $\tau$  个轮询周期里, 接入到轻负载网络  $j$  的用户  $i$  分配带宽  $b_{i,j}$  的策略  $u_i$  为

$$\left. \begin{aligned} b_{i,j} &= b_i^{\text{req}}, & b_i^{\text{req}} &\leq b_j^{\text{res}} \\ b_{i,j} &= b_j^{\text{res}}, & b_i^{\text{req}} &> b_j^{\text{res}} \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

若用户  $i$  接入到重负载网络  $j$ , 由于此时系统带宽不能满足用户  $i$  的带宽需求, 带宽分配的策略为带宽按一定比例分配给接入到网络  $j$  的用户。

$$b_{i,j} = b_j^{\text{ini}} \times \frac{b_i^{\text{req}}}{\sum_{i=1}^m b_i^{\text{req}}} \quad (28)$$

此外, 对于接入到一个网络但未获得全部需求带宽的用户, 可以通过多链路并行接入同时连接到其它网络中, 其带宽分配方式仍然按上述方法迭代进行, 同时更新其带宽需求, 即

$$b_i^{\text{req}} = b_i^{\text{req}} - \sum_{j=1}^n b_{i,j} \quad (29)$$

### 3.4 MLA-DRA 算法设计

算法流程包括两部分: 多链路接入控制(如表 2 所示)和最大化系统速率动态带宽资源分配(如表 3 所示)。所有用户的最优分配策略可以逐次变换得到, 从而确定系统最大速率。此外, 每个用户的资源分配决策是从系统最优的角度来考虑, 与从用户角度最优决策有可能是不同的。

## 4 实验及性能分析

### 4.1 实验方法

本文在 Fedora 21 平台上基于开源软件 NS-3

表 2 多链路接入控制算法

---

```

1: Initialize  $b_i^{\text{req}}, s_i, 1 \leq i \leq m$ 
2: for  $i = 1$  to  $m$  do
3:   while  $b_i^{\text{req}} > 0$  &&  $s_i \neq 0$ , perform single link or multi
      link network access;
4:   for  $j = 1$  to  $n$  do
5:     Update  $s_i$  according to Equ.(24) or Equ.(26);
6:     Calculate the system rate and the bandwidth  $b_{i,j}$ 
      allocate to user  $i$  according to table 3;
7:     Calculate the  $\gamma_i(s_i, u_i)$  and access network  $j$  which
      has the optimal value;
8:     Update  $b_i^{\text{req}}$  according to Equ.(29) and output  $j$ ;
9:   end for
10: end while
11: obtain the normalized user rate  $r_i$  from Equ.(4);
12: end for

```

---

表 3 最大化系统速率动态带宽资源分配算法

---

```

1: Initialize  $B, b_j^{\text{ini}}, b_i^{\text{req}}, 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n$ 
2: for  $i = m$  to 1 do
3:   Update  $s_i$ ;
4:   Calculate  $R_{i,m}(s_i)$  and  $u_i(s_i)$  according to Equ.(21);
5:   backup  $R_{i,m}(s_i)$  and  $u_i(s_i)$ ;
6:   if  $i \neq 1$  then
7:     calculate  $R_{i-1,m}(s_{i-1})$  and  $u_{i-1}(s_{i-1})$  according to
       $R_{i,m}(s_i)$ ;
8:      $i = i - 1$ ;
9:   else output  $R_{1,m}(s_1)$ ;
10:  end if
11: end for
12: for  $i = 1$  to  $m$ 
13:  Network allocate bandwidth to user  $i$  according to
      Equ.(27) or Equ.(28);
14:  output  $u_i(s_i)$ ;
15:  calculate  $s_{i+1} = T_i(s_i, u_i)$ ;
16:   $i = i + 1$ ;
17: end for

```

---

(Network Simulator 3)搭建符合无线网络协议体系标准规范的 HWNs 仿真环境。仿真网络拓扑结构如图 1 所示, 包括 2 个 LTE eNB 节点、2 个 WiMAX 节点和 4 个 WiFi AP 节点, 这些接入节点分别连接到核心网 PGW/SGW 节点, 另外, 服务器节点通过 P2P 链路连接到 PGW/SGW 节点用于和用户传输数据。HWNs 主要仿真参数如表 4 所示。

### 4.2 算法运行性能分析

图 2 表示的是 MLA-DRA 算法的用户数、周期与系统带宽分配的关系。由图中可以看出, MLA-DRA 算法在用户数约小于 30 的阶段, 由于系统负载较小, 并且存在足够的可用带宽, 系统的带宽分

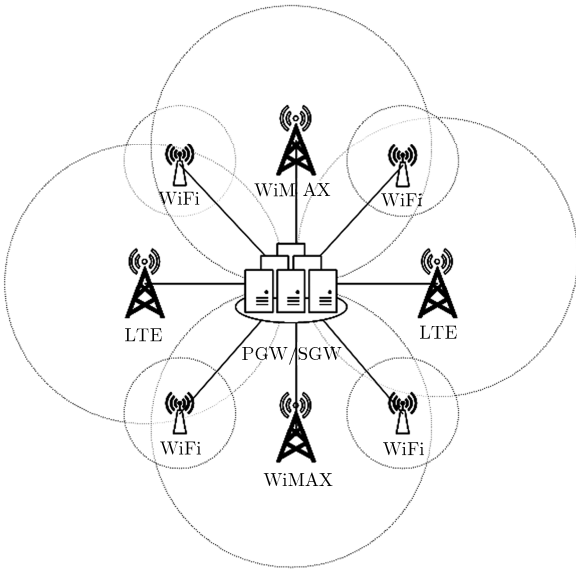


图 1 仿真网络拓扑结构

表 4 HWNs 仿真参数设置

网络	参数	数值
LTE	带宽	5 MHz
	子载波	300
	BS 发射功率	46 dBm
	5 ms 半帧下行符号数	38
	路径损耗	Cost231 模型
WLAN	802.11 标准	80211a
	带宽	20 MHz
	小区半径	50 m
WiMAX	AP 发射功率	16 dBm
	带宽	10 MHz
	PUSC 子载波	840
	符号数	35
	帧长	5 ms
User	BS 发射功率	50 dBm
	带宽需求	$1 \text{ Mbps} \leq b_i^{\text{req}} \leq 1.3 \text{ Mbps}$
	计算周期	1-1000
	用户数	1-50
	移动模型	RandomDirection2D

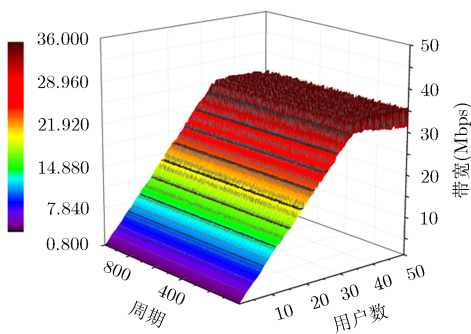


图 2 用户数、周期与系统带宽分配

配与用户数呈线性增长关系，用户接入基本能够得到足够的带宽分配，用户在各个周期内的分配到的带宽相差不大；随着接入用户的增加，系统的总带宽利用大约维持在 35 Mbps。图 3 中的某一个用户在不同用户总数和不同并行接入链路数情况下的具体带宽分配结果展开细节如图 3(a)-图 3(c)所示。

图 3(a)表示，在用户数为 5 的情况下，用户分配到的带宽基本等于用户的带宽需求，在 1000 个周期内，当并行接入链路数分别为 1, 2, 3 时，平均带宽分配分别比带宽需求少 0.063 Mbps, 0.033 Mbps, 0.025 Mbps，其平均减少比例分别为 4.85%, 3.68%, 2.11%。图 3(b)表示当用户数为 25、并行接入链路数分别为 1, 2, 3 时，用户的平均带宽分配分别比其带宽需求少 0.162 Mbps, 0.073 Mbps, 0.034 Mbps，其平均减少比例分别为 14.06%, 6.11%, 2.92%。图 3(c)表示当用户数增加到 50 时，上述数值分别为 0.245 Mbps, 0.123 Mbps, 0.061 Mbps，其平均减少比例分别为 19.85%, 10.44%, 5.31%。由图 3 可以得出，随着用户数的增加，用户的带宽需求与其在系统中获得的带宽分配之差逐渐加大，MLA-DRA 算法通过多链路并行接入，能有效地减少用户带宽需求与带宽分配之间的比例，提高系统的带宽资源利用率。

图 4 表示的是 MLA-DRA 算法的用户数与用户平均带宽分配、最大带宽分配、最小带宽分配的关系。由图可以看出，在用户数增加的过程中，用户的最大带宽分配基本维持在 1.3 Mbps，平均带宽分配由 1.2 Mbps 下降到 0.9 Mbps，最小带宽分配则由 1.10 Mbps 下降到 0.55 Mbps。同时，由图也可以看出，在用户数增长的过程中，用户带宽分配的主要分布数据与平均值的偏差大于 1.5 倍标准差的范围也在增大。

图 5 表示的是 MLA-DRA 算法的用户数与最大系统传输速率、网络速率的关系。由图可以看出，随着用户数的增加，系统最大速率呈增长趋势，在用户数大约超过 30 时，系统最大传输速率维持在 110 Mbps 左右。由图也可以得到，在本文的仿真环境里，LTE, WiFi 和 WiMAX 这 3 个网络中，WiFi 网络的速率最大，约占系统总速率的 42%，其次是 WiMAX 网络，其速率约占系统总速率的 34%，最后是 LTE 网络，其速率约占系统总速率的 24%。

### 4.3 算法性能对比分析

本文将 MLA-DRA 算法与基于接收信号强度 (RSS)、WLAN 优先 (WLAN-First)、最高速度优先 (Highest Rate)、负载均衡 (Load Balancing) 4 种接

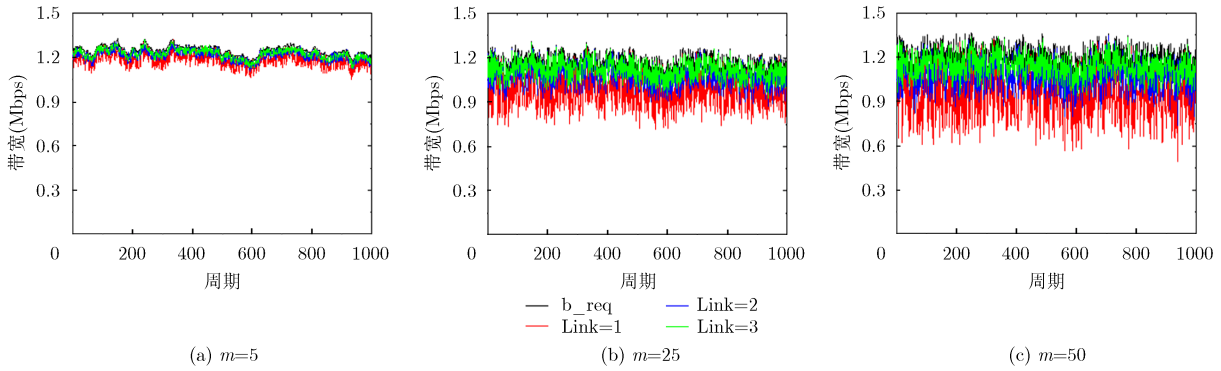


图 3 用户带宽需求与用户带宽分配

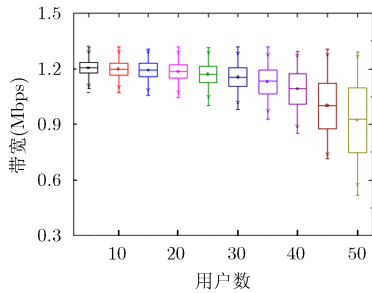


图 4 用户数与用户平均带宽、最大带宽、最小带宽

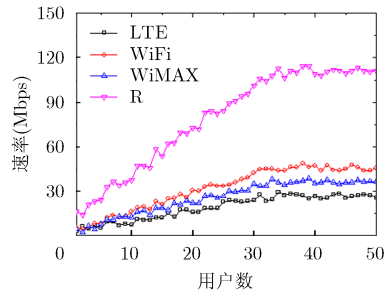


图 5 用户数与系统最大速率、网络速率

入控制算法在用户最小速率、系统平均速率两项性能指标进行比较。

首先我们测试在 1000 个周期里的用户最小速率性能，它反映的是用户在网络中能获得的最小带宽资源保证。如图 6 所示，RSS 算法在用户数较少时最小速率能达到约 3.2 Mbps，但随着用户数的增加，RSS 算法和 WLAN-First 算法一样，会造成较多的用户接入到同一个接入点上，导致这两种算法的用户最小速率下降到约 0.6 Mbps。Highest Rate 算法在用户数较少时具有较好的性能，在用户数增加后，由于系统资源被部分需求较多带宽资源的用户占用后，其剩余带宽资源无法满足其他用户的需求，在用户数为 50 个时，其用户最小速率下降到约 1.4 Mbps。Load Balancing 算法在用户数较少时，其用户最小速率能够达到约 3.5 Mbps。但是由于 Load Balancing 算法用户只能接入唯一的网络，部分用户的带宽需求没有得到完全满足，使得在用户数增加到 50 个时，其用户最小速率下降到约 1.7 Mbps。本文 MLA-DRA 算法不但支持多链路/单链路的用户接入，并且用户在接入网络时能够获得最优的带宽资源分配，保证系统的最大速率，因而，在用户数较少时，MLA-DRA 算法的用户最小速率能够达到约 3.6 Mbps，在用户数增加到 50 个的时候，用户最小速率比上述其它算法依次分别高大约 289%，181%，45%和 20%。

图 7 表示的是用户数与系统平均速率关系。由图可以看出，5 种算法在用户数增加到约 30 个前，其系统平均速率与用户数呈线性增长关系。此外，由于 RSS 算法和 WLAN-First 算法没有考虑网络带宽资源的使用情况，在用户数继续增长到 50 个的时候，表现出较低的系统平均速率，分别大约维持在 74 Mbps 和 77 Mbps 左右。Highest Rate 算法和 Load Balancing 算法能够接入到速率性能相对较好的网络，其系统平均速率分别大约维持在 89 Mbps 和 97 Mbps 左右。由于本文 MLA-DRA 算法在用户数较多的情况下，对每一个接入到网络的用户进行动态资源分配，通过多链路并行接入有效利用其它网络的剩余网络带宽资源，最大化系统速率，系统平均速率比其它 4 种算法依次分别高大约 45%，38%，21%和 8%。

### 5 结束语

为了优化 HWNs 接入中的资源分配，提高 HWNs 的系统传输速率，本文提出了一种支持多链路接入的动态带宽资源分配方法 MLA-DRA，通过对链路接入和带宽资源分配进行建模和分析，得出最大化系统速率的用户带宽资源分配方案，实验结果表明，本文提出的 MLA-DRA 能够有效提升系统整体性能。

本文的进一步研究工作包括：(1)在MLA-DRA

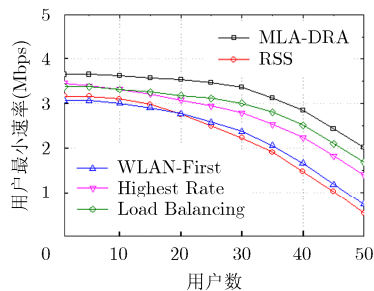


图 6 用户数与用户最小速率

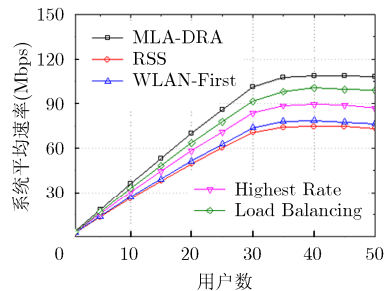


图 7 用户数与系统平均速率

算法中进一步考虑功率、移动性等因素以克服无线传输路径对系统性能产生的影响；(2)针对时延、业务优先级、用户偏好等更多QoS受限条件下多链路带宽分配问题进行研究以达到系统性能的最优化。

### 参考文献

- [1] FERRUS R, SALLENTO O, and AGUSTI R. Interworking in heterogeneous wireless networks: Comprehensive framework and future trends[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2010, 17(2): 22-31. doi: 10.1109/MWC.2010.5450657.
- [2] JO M, MAKSYMUK T, BATISTA R L, et al. A survey of converging solutions for heterogeneous mobile networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2014, 21(6): 54-62. doi: 10.1109/MWC.2014.7000972.
- [3] MEHBODNIYA A, AISSA S, and ADACHI F. Efficient resource utilization for heterogeneous wireless personal area networks[J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2013, 96(6): 1577-1587. doi: 10.1587/transcom.E96.B.1577.
- [4] ZHOU Tianqing, HUANG Yongming, and YANG Luxi. Joint user association and resource partitioning with QoS support for heterogeneous cellular networks[J]. *Wireless Personal Communications*, 2015, 83(1): 383-397. doi: 10.1007/s11277-015-2398-y.
- [5] WANG Lusheng and KUO G G S. Mathematical modeling for network selection in heterogeneous wireless networks — A tutorial[J]. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2013, 15(1): 271-292. doi: 10.1109/SURV.2012.010912.00044.
- [6] AHMED A, BOULAHIA L M, and GAITI D. Enabling vertical handover decisions in heterogeneous wireless networks: A state-of-the-art and a classification[J]. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2014, 16(2): 776-811. doi: 10.1109/SURV.2013.082713.00141.
- [7] ROY S D and REDDY S R V. Signal strength ratio based vertical handoff decision algorithms in integrated heterogeneous networks[J]. *Wireless Personal Communications*, 2014, 77(4): 2565-2585. doi: 10.1007/s11277-014-1655-9.
- [8] MA Dong and MA Maode. Proactive load balancing with admission control for heterogeneous overlay networks[J]. *Wireless Communications & Mobile Computing*, 2013, 13(18): 1671-1680. doi: 10.1002/wcm.1224.
- [9] JIANG Jian, LI Jiandong, HOU Ronghui, et al. Network selection policy based on effective capacity in heterogeneous wireless communication systems[J]. *Science China-Information Sciences*, 2014, 57(2): 1-7. doi: 10.1007/s11432-013-4899-1.
- [10] WU J and HUEY R. Improved joint radio resource management usage grey fuzzy control in heterogeneous wireless networks[J]. *Journal of Internet Technology*, 2015, 16(5): 777-788. doi: 10.6138/JIT.2015.16.5.20130319.
- [11] NIYATO D and HOSSAIN E. A noncooperative game-theoretic framework for radio resource management in 4 G heterogeneous wireless access networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2008, 7(3): 332-345. doi: 10.1109/TMC.2007.70727.
- [12] 李明欣, 陈山枝, 谢东亮, 等. 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[J]. *软件学报*, 2010, 21(8): 2037-2049. doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03638.
- LI Mingxin, CHEN Shanzhi, XIE Dongliang, et al. Resource allocation and admission control based on non-cooperation game in heterogeneous wireless networks[J]. *Journal of Software*, 2010, 21(8): 2037-2049. doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03638.
- [13] CHOI Y, KIM H, HAN S, et al. Joint resource allocation for parallel multi-radio access in heterogeneous wireless networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(11): 3324-3329. doi: 10.1109/TWC.2010.11.100045.

俞鹤伟: 男, 1967 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为计算机网络技术和多载波通信技术。  
梁根: 男, 1979 年生, 副教授, 博士生, 研究方向为计算机网络接入控制及资源调度算法。  
秦勇: 男, 1970 年生, 教授, 博士, 研究方向为网络并行分布式处理技术与应用。