

基于 LTE-WLAN 融合网络上行 MU-MIMO 共调度方案

李亚萌^{1,2} 严 军¹

(1. 上海大学通信与信息工程学院 上海 200072; 2. 上海微系统与信息技术研究所 上海 200050)

摘要: 为了提升系统吞吐及频谱效率, IEEE802. 11ax 工作组引入了上行 MU-MIMO 技术。然而现行上行 MU-MIMO 由于 AP 轮询调度依次询问的机制存在用户不足及 AP 空等问题。为解决此问题, 基于 LTE-WLAN 融合网络, 在 C-RAN 架构下利用系统间共调度, 当产生上述问题时, 将用户数据灵活地由 LTE 网络卸载至 WLAN 网络下, 并提出优化的 WLAN 上行 MU-MIMO 传输方案及时结束 AP 等待, 从而有效的补充用户不足并极大减少 AP 空等时间。文章最后利用仿真证明所提共调度方案可显著提升 WLAN 上行 MU-MIMO 的信道容量及系统平均吞吐量, 证明了所提方案的优越性及有效性。

关键词: 异构网络; 上行 MU-MIMO; WLAN; 用户卸载

中图分类号: TN915.04 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5025

Co-scheduling uplink MU-MIMO approach in LTE-WLAN aggregated networks

Li Yameng^{1,2} Yan Jun¹

(1. Communication & Information Department of Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. Shanghai Institute of Microsystem And Information Technology, Shanghai 200050, China)

Abstract: In order to increase the throughput and fully use wider bandwidth, the IEEE 802. 11ax task group introduces UL-MU-MIMO. However, the UL-MU-MIMO is not specifically addressed, due to the complexity of user scheduling. Recently, heterogeneous networks have been widely discussed, and the research on C-RAN provides the flexibility to the offloading between LTE and WLAN. In this paper, we propose a co-scheduling model for UL MU-MIMO based on the heterogeneous network scenario. Simulation results show that the proposed approach significantly improves the capacity and average throughput of the UL MU-MIMO in WLAN networks.

Keywords: heterogeneous network, UL MU-MIMO, WLAN, offloading

1 引言

随着移动数据爆炸式的增长^[1], IEEE802. 11 工作组在 802. 11ax 项目中将目标定位于提升无线频谱效率和小区范围范围的吞吐量, 并将上行多用户多输入多输出 MU-MIMO(multi-user multiple-input multiple-output) 作为下一代网络性能优化的关键技术^[2]。

另一方面, 随着授权频段资源开发日益饱和, 各运营商将视线投向了 2.4 G 及 5 G 的非授权频段。蜂窝网与无线局域网空口聚合已经成为一项潜力十足的技术。基于此, 3GPP 在 R13 制定过程中^[3], 加入了 LTE 与 WLAN 接入

网级别融合的工作组, 旨在通过 LTE 与 WLAN 的协调提升用户体验。LTE-WLAN 异构融合原型, 如图 1 所示, 该原型以 C-RAN 为基础架构^[4], 用户数据流在分组数据汇聚协议 PDCP(packet data convergence protocol)层进行分割, 用户可同时接入 LTE 与 WLAN, 数据的调度由 LTE 完成, 数据交换在 Xw 接口完成。之后进一步提出 LTE 基站可以 WLAN 接入点 AP 共站, 如图 2 所示, 在这种高度融合的网络, 用户数据在 LTE 与 WLAN 间的分流将近乎理想状态, 数据处理更快速^[5]。

目前, WLAN 网络是基于 CSMA/CA(carrier sense multiple access with collision avoidance)的 MAC 协议, 当

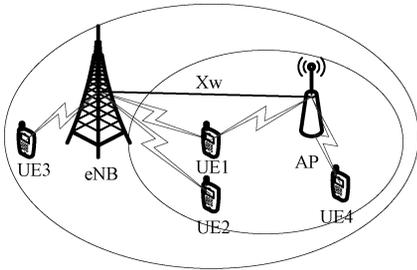


图 1 LTE-WLAN 异构网络

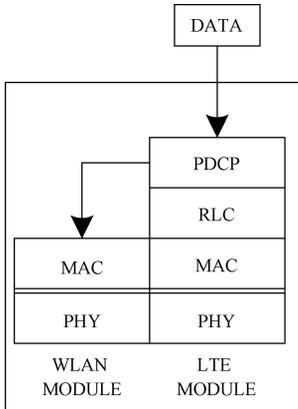


图 2 LTE-WLAN 共基站

用户自发的进行上行传输时也需要同下行传输一样进行信道竞争来获取传输机会。上行 MU-MIMO 最大的挑战就在于上行并发用户同步性的问题,由于 WLAN 与 LTE 传输机制的不同,用户的上行传输并不是由 AP 统一进行资源分配,因此 AP 并不知晓哪些用户有上行传输的需求^[6]。然而在 LTE 中,基站通过用户的上行资源调度请求,针对缓存状态报告为每个用户分配额定的上行资源,这就使 LTE 的网络资源分配非常灵活。在 LTE-WLAN 网络融合下,WLAN 与 LTE 网络可以即时地共享用户状态,那么 WLAN 网络可以将 LTE 下已知的具有上行传输意图的用户卸载至 WLAN,从而有效提高 WLAN 下上行 MU-MIMO 的效率。

目前有关 MU-MIMO 的研究已经较多,文献[7]针对下行 MIMO 链路提出了动态资源分配算法,文献[8]针对 802.11ac 协议,研究了 WLAN 下的 MU-MIMO 传输,利用动态门限实现用户选择。文献[9]通过优化 WLAN 下竞争窗口实现 MU-MIMO 用户的随机接入,从而提升系统吞吐量。文献[10]针对 LTE 上行 MU-MIMO 传输,提出非连续资源块分配算法,降低了传统算法的复杂度。文献[11]对比了多用户 MIMO 与单用户 MIMO 的性能差异,证明了多用户 MIMO 在平均时延和平均吞吐量上的优越性。文献[12]针对多小区重叠覆盖场景,提出相互协作的干扰对齐方案,减少了进行 MU-MIMO 时用户间的干扰。

综上所述,基于 802.11ax 协议针对 WLAN 上行 MU-

MIMO 并行用户不足及 AP 空等的研究尚属空白。本文所提出在 LTE-WLAN 网络融合场景下,利用 LTE 基站进行共调度并改进现行传输流程,通过用户卸载解决当前 WLAN 上行 MU-MIMO 存在的问题,最后利用仿真验证本文的方法对于系统信道容量及吞吐量的提升。

2 WLAN 上行 MU-MIMO

当前正在谈论的 WLAN 上行 MU-MIMO 流程主要分为两种方式:AP 起始和用户站点起始^[6]。这两种方式的区别主要在于整个上行 MU-MIMO 的最初的发起方,但两种方式都必须经过一个 AP 对其他站点轮询的过程。这里以 AP 起始的方式为例,如图 3 所示,当 AP 依次询问潜在的上行传输用户,当该用户具有上行传输意图时将给予回复,AP 在确认 1 个用户的情况下将继续询问,直达到系统最大传输能力,即 4 个并行用户。然后 AP 将发出 trigger 帧触发这些用户同时进行数据传输。通常,AP 的询问过程设置有最大轮询时间,当达到最大轮询时间时不论应答用户是否满足 4 人,即刻停止询问等待,向已应答用户进行 MU-MIMO 发送 trigger 帧。该最大轮询时间至少等于 4 个用户完成应答的总时间,即:

$$T_{\text{MaxCycle}} = 4T_{\text{inq}} + 4T_{\text{resp}} + 7T_{\text{SIFS}} \quad (1)$$

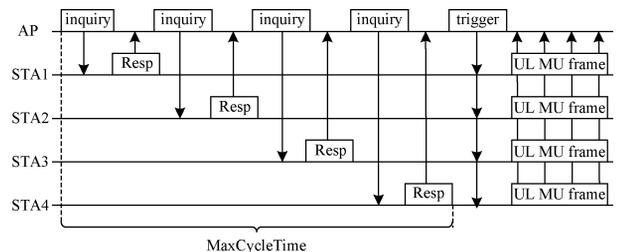


图 3 WLAN 上行 MU-MIMO 流程

在两种情况下,AP 并不能得到 4 个用户的回复。

情况一:WLAN 当前时刻确实有上行传输意图的用户不足 4 人。虽然 WLAN 下可能连接有较多用户,但用户的业务并不一定是连续的也不一定是同时并发的,那么在一些时间段内,给予 AP 回复的用户很有可能不足 4 人。

情形二:AP 与用户站点所处环境存在差异,用户站点收到 AP 隐藏节点的干扰,受到 NAV 的制约或无法完成信道空闲检测 CCA,即使具有上行传输意图也不能立刻进行回复,只能静默等待干扰节点传输结束。这种情况主要存在于 WLAN 基础服务集(BSS)相互重叠区域,在 AP 监听范围外,不同 BSS 内的用户可能相互干扰,从而使得答复 AP 上行 MU-MIMO 询问的用户减少至不足 4 人。

当用户应答不足 4 人时,AP 只能触发较少的用户进行上行 MU-MIMO 的传输,这对 WLAN 网络本身是一种资源的浪费。同时,当 AP 触发较少用户的 MU-MIMO 时,询问时间要达到最大轮询时间,在这一阶段消耗的时间往

往要超过触发满额 4 个用户 MU-MIMO 的时间。假设在一个 BSS 中共有 N_u 个用户, 在 AP 进行询问时每个用户有数据传输并能够及时应答的概率为 p , 当 AP 完成询问触发 MU-MIMO 传输时, 每个用户都可以正常发送数据, 不考虑数据发送过程中的干扰、碰撞和路径损耗等因素, 每个站点是等功率且互不相关的, 设发射端用户天线数为 N , 接收端 AP 天线数为 M 。在这种情况下, 信道容量可表示为:

$$C_{EP} = \log_2 \left[\det \left(\mathbf{I}_M + \frac{\rho}{N} \mathbf{H} \mathbf{H}^* \right) \right] \text{b/s/Hz} \quad (2)$$

式中: \mathbf{H} 表示的 $N \times M$ 信道矩阵, \mathbf{H}^* 为 \mathbf{H} 的共轭转置矩阵, 在用户信道相互独立的情况下, 系统信道容量与 $\min(M, N)$ 线性相关。

如图 4 所示在不同概率情况下, 随着 WLAN 小区总用户的变化, 系统信道容量的变化。这里为了直观, 按满额 4 个用户进行 MU-MIMO 对曲线进行归一化处理, 从图中看到系统信道容量随着用户的增多趋于饱和, 并且用户应答概率越高对应曲线越早达到饱和。因为用户应答概率的提高及用户总数的提高均意味着上行 MU-MIMO 用户满额概率的提高, 也就极大地增加了系统信道容量。

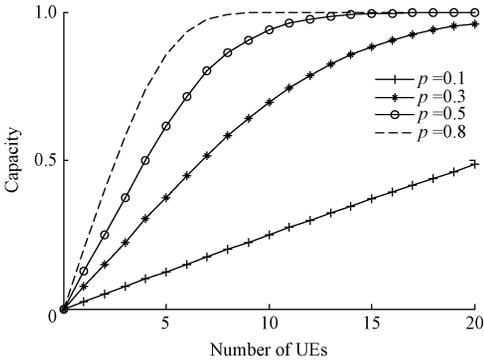


图 4 不饱和 UL-MU-MIMO 系统信道容量

3 LTE-WLAN 融合网络

3.1 基于用户卸载的共调度方案

如前文所述, 当 WLAN 下应答应用户不足时, AP 将一直等待直到最大轮询时间, 这样导致系统吞吐的下降, 并且当系统有能力为 4 个用户进行上行 MU-MIMO 时, 每次用户数的不足都对系统资源产生了浪费。因此, 这里我们提出利用 LTE-WLAN 融合网络的共调度来弥补这一缺点。

在 LTE 与 WLAN 共基站及 C-RAN-BBU-Pool 的场景下, 都可以做到 LTE 与 WLAN 共基带单元, 即两者的基带处理在同一块 PCB 上或不同 PCB 上但通信带宽足够大时延迟足够低。在这种情况下, 用户设备连接不同小区甚至不同制式的阻碍将被打破, 用户设备在不同制式下的数据流可以进行更灵活快速的分配^[5]。这样, 改进 WLAN 上行 MU-MIMO 过程如图 5 所示。当 AP 在询问过程中出现等待时间超过一个用户应答返回时间时, AP 当即结束

轮询过程并将空缺情况共享至 LTE 基站, LTE 基站将在 LTE 链路发送上行资源调度请求 SR(scheduling request) 的用户卸载至 WLAN 链路, 然后一同进行上行 MU-MIMO。

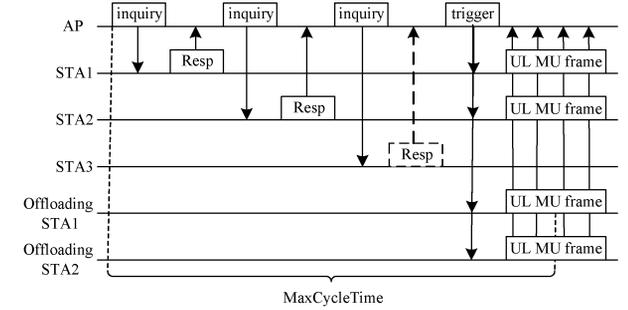


图 5 本文提出的基于用户卸载的上行 MU-MIMO 方案

信令流程如图 6 所示, WLAN-LTE 双连接用户在 LTE 链路发送上行资源调度请求及其缓冲状态报告, 当 AP 询问其下连接用户上行传输需求, 例如只有 3 个用户进行应答 AP 将空额情况反馈至 LTE 基站 eNB(Evolved Node B)。eNB 将用户在 LTE 链路下的传输卸载至 WLAN, 并将相应用户告知 AP。接着, AP 触发用户完成上行 MU-MIMO 传输。在这一过程中, LTE 链路用户在资源请求到数据发送要间隔 k 个子帧, 即 k ms, 而用户与 AP 之间的交互及 AP 与 eNB 板内通信调度过程均为微秒级。

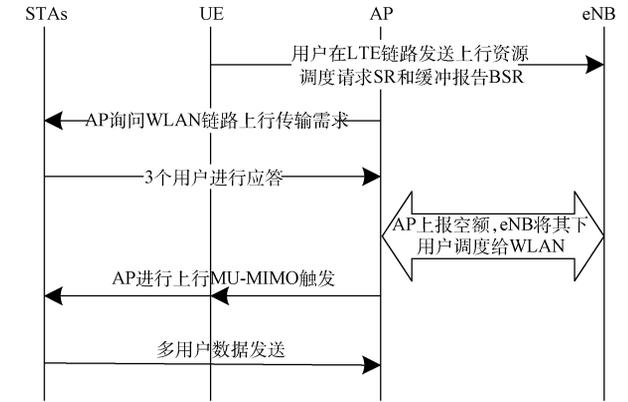


图 6 共调度信令流程

在 LTE 基站进行共调度时, 由于用户本身为 LTE 与 WLAN 的双连接用户, 卸载过程不需通知用户, 当用户收到 AP 上行 MU-MIMO 触发时即将待发送数据转由 WLAN 链路进行发送。共调度过程中, 需要卸载的用户数与 WLAN 下应答应用户数相关, 即:

$$N_{\text{offload}} = N_{\text{max}} - N_{\text{resp}} \quad (3)$$

3.2 系统模型

3.2.1 信道预编码

前文在理想情况下进行信道容量仿真, 但在实际过程中进行 MU-MIMO 的用户不可能完全独立, 他们在传输时

存在相互干扰^[14],因此,这里采用MMSE进行预编码。信道编码矩阵表示为:

$$\mathbf{W} = \mathbf{H}^* (\mathbf{H}^* \mathbf{H} + \beta \mathbf{I})^{-1} \quad (4)$$

则信道容量可表示为:

$$C_{\text{MMSE}} = \sum_{n=1}^{N_r} \log_2 \left(1 + \frac{|h_n \tau w_n|^2}{\sum_{j \neq n} |h_j \tau w_j|^2 + N\sigma^2/P} \right) \quad (5)$$

式中: $\sum_{j \neq n} |h_j \tau w_j|^2$ 表示其他用户对用户 n 带来的干扰, $N\sigma^2/P$ 表示白噪声干扰。

3.2.2 基于信道相关性的用户选择

在实际场景中,当WLAN下活跃用户较多或LTE业务较为繁忙,需要卸载较多用户到WLAN下时,WLAN下具备上行传输需求的用户大于MU-MIMO最大额度,这时可利用用户信道相关性选取最优用户,减少相互间的干扰^[12]。具体步骤如下。

1) 随机选择一个用户作为第一个用户 STA1。

2) 在剩余用户中选择与 STA1 信道相关性最小的用户最为 STA2。

3) 继续在剩余用户中选择与已挑选所有用户信道相关性最小的用户,相应地选择出 STA3 与 STA4。

4) 在步骤 3 中,为避免挑选出的某个用户与 STA1 相关性小但与 STA2 信道相关性很大的这种极值情形,在挑选过程中,设定最小信道相关性阈值,过滤掉极端的用户分组类型再完成步骤 3)。

基于上述分组步骤,用户进行 MU-MIMO 传输时将具有更好的信道容量。

3.2.3 平均吞吐量

共调度模型的引入减少了 AP 询问过程中的等待时间,并且能够保证 AP 满额触发上行 MU-MIMO,因此这里基于该过程利用平均吞吐量证明系统性能的变化。系统平均吞吐量可表示为:

$$S = \frac{\sum_{n=1}^{N_r} X_n}{T_c + \max_{n=1,2,\dots,N_r} \{X_n/R_n\}} \quad (6)$$

式中 X_n 和 R_n 分别表示用户 n 所传输的载荷及数据传输速率, $\max_{n=1,2,\dots,N_r} \{X_n/R_n\}$ 表示 MU-MIMO 用户中最大传输时长, T_c 表示 AP 轮询过程中交换控制帧花费的时间。在共调度模型下,应答用户不足时 T_c 表示为:

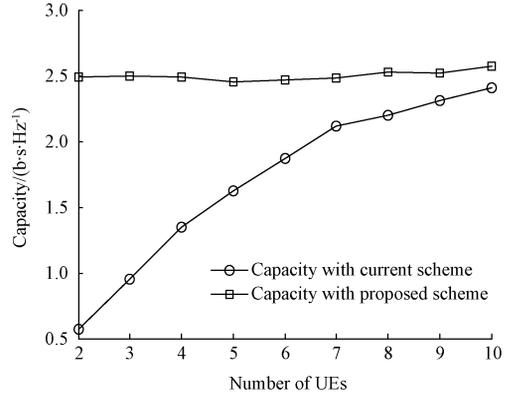
$$T_c = N_{\text{inq}} T_{\text{inq}} + N_{\text{inq}} T_{\text{resp}} + (2N_{\text{inq}} - 1) T_{\text{SIFS}} \quad (7)$$

式中: N_{inq} 表示 AP 发出询问的次数。

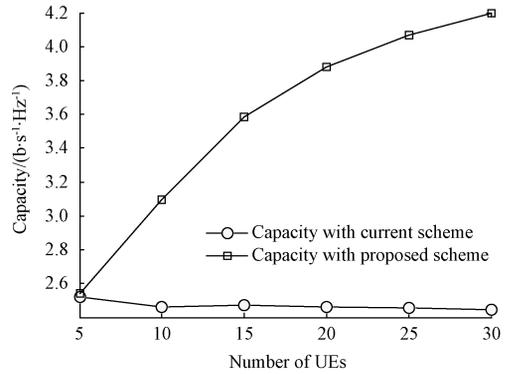
4 仿真结果与分析

本节对所提的基于用户卸载的共调度方案进行仿真分析,首先对共调度方案对信道容量的影响进行仿真。在用户应答概率 $p=0.3$ 和 $p=0.6$ 两种情况下,如图 7 所示,将所提方案与线性方案进行对比,在用户应答概率较小时,共调度方案能够及时的补充用户数的不足,保证系统信道容量在稳定水平;当用户数较多且应答概率较大时,WLAN

系统中可能存在多个用户能够进行 MU-MIMO,这时利用信道相关性选择相关性最弱的用户进行并行传输,可以有效提高系统信道容量。



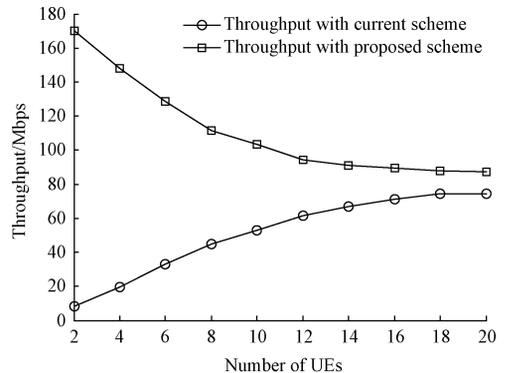
(a) $p=0.3$ 信道容量对比



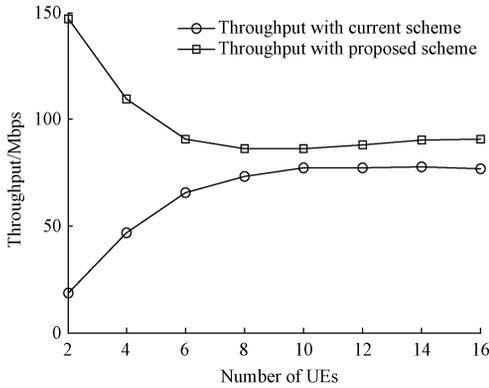
(b) $p=0.6$ 信道容量对比

图7 信道容量对比

图 8 给出了基于用户卸载共调度方案与现行方案的系统平均吞吐量的对比,仿真参数如表 1 所示。为简便,将用户数据包长都设为统一值,数据速率将对应于不同情况下的信道容量的值。由图 8 可以看到,在用户数较少时,AP 轮询时应答用户较少,AP 将经常处于空等状态,此时利用用户卸载可即刻缩短 AP 轮询时间并且补足 MU-MIMO 并行用户,即在更短的时间内传送更多的数据,因此对比现行方案有非常显著的提升;当用户数逐渐增多,用户卸载在



(a) $p=0.3$ 平均吞吐量对比



(b) $p=0.6$ 平均吞吐量对比

图 8 系统平均吞吐量对比

表 1 仿真参数表

参数	值
$T_{inquiry}$	48 μ s
T_{resp}	40 μ s
T_{SIFS}	16 μ s
数据包长 X	2 000 byte
应答概率 p	0.3/0.6
带宽	20 MHz

减少 AP 轮询时间的优势逐渐降低,性能差别体现在数据速率的分别即信道容量的差别,但本文所提方案仍具有 15 Mbps 左右的提升。

5 结 论

本文在现行 802.11ax 上行 MU-MIMO 过程的基础上,针对一些情况下 AP 询问过程应响用户不足的问题,提出了利用 LTE-WLAN 融合网络的用户卸载方案,有效地完成用户补充,并及时终止 AP 轮询过程。通过仿真表明,该方案可在低用户数目情况下,稳定信道容量在较高水平,在高用户数目时大幅提升信道容量。并且由于对 AP 轮询的改进,缩短了 AP 空等时间,因此对系统平均吞吐量也有很好地提升。

参考文献

[1] 瞿佳俊,严军,朱渊婧. 无线传感网低开销型数据可靠传输方法的研究[J]. 电子测量技术,2014,37(1): 92-95.

[2] Huawei Technologies. 802.11 HEW SG Proposed PAR[S]. IEEE 802.11-14/0165r1, 2014.

[3] 3GPP. RP-150510, New WI Proposal: LTE-WLAN radio level integration and interworking enhancement[S].

Intel Corporation, 2015.

[4] 徐湛,赵明,程波波. 基于 Cloud-RAN 的协作式无线接入网架构[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(7): 929-944.

[5] HU H, WANG R. User-centric local mobile cloud-assisted D2D communications in heterogeneous cloud-RANs[J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 22(3): 59-65.

[6] ltd with Kyushu Institute of Technology. UL-MU MAC throughput under non-full buffer traffic-Radrixx co[S]. IEEE 802.11-15/0376r2, 2015.

[7] 孙巧云,田辉,董琨,等. 下行链路 MIMO-OFDM 系统中的动态资源分配[J]. 仪器仪表学报,2009,30(7):1504-1507.

[8] CHOI Y J, LEE N H, BAHK S. Exploiting multi-user MIMO in the IEEE 802.11 wireless LAN systems [J]. Wireless Personal Communication, 2010,54(10): 385-396.

[9] WU S S, MAO W G, WANG X D. Performance analysis of random access multi-user MIMO wireless LANs[C]. Globecom, 2013: 4396-4401.

[10] BISWAS J, NI W, LIU R P, et al. Low complexity user pairing and resource allocation of heterogeneous users for uplink virtual MIMO system over LTE-A network[C]. WCNC, 2014:1903-1908.

[11] THAPA A, SHIN S. A MAC protocol to select optimal transmission mode in very high throughput WLAN: MU-MIMO vs. multiple SU-MIMO [C]. AHICI, 2012: 1-5.

[12] 冀保峰,杨绿溪. VHT WLANs 多用户 MIMO 传输 OBSS 干扰问题的解决方案研究[J]. 信号处理, 2013, 29(1): 44-53.

[13] 黄武,王志. 一种 LTE-Advanced 系统信道估计算法的设计与实现[J]. 国外电子测量技术,2014,33(9): 28-30.

[14] 吕红芳,张浩. 协作中继网络资源分配控制算法研究[J]. 仪器仪表学报,2014,35(4):880-888.

作者简介

李亚萌, 1991 年出生,上海大学通信与信息工程学院工学硕士,主要研究方向为异构网络融合等。
E-mail: yameng.li@wico.sh

严军,上海大学通信与信息工程学院,硕士生导师,高级工程师,主要研究方向为物联网、信号与信息处理等。
E-mail: yanjun@staff.shu.edu.cn