

基于 IEEE 802.11ac 的多用户 MIMO 传输方案的优化设计及其性能分析

冀保峰^{1,2}, 宋康¹, 黄永明¹, 杨绿溪¹

(1. 东南大学 信息科学与工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 河南科技大学 电子信息工程学院, 河南 洛阳 471003)

摘要: 在 IEEE 802.11ac Draft 2.0 标准草案的基础上, 针对其新引入的多用户 MIMO 传输机制进行了深入研究, 提出了几点改进的优化设计方案, 并完成了相应的性能分析。最后对 IEEE 802.11ac 的多用户 MIMO 传输方案进行了系统的性能分析, 仿真结果表明, 改进的传输方案在误比特率(BER)和吞吐量方面获得了明显的性能增益, 且与针对性能的理论分析与仿真结果相吻合。

关键词: IEEE 802.11ac; 无线局域网; 传输机会; 用户分组

中图分类号: TP393.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2013)05-0096-11

Performance analysis and optimal design of MU-MIMO transmission scheme based on IEEE 802.11ac

Ji Bao-feng^{1,2}, Song Kang¹, Huang Yong-ming¹, Yang Lv-xi

(1. School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Electronic & Information Engineering College, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: The recent IEEE 802.11ac adopted a novel multi-user access technique, which was the downlink multi-user MIMO (MU-MIMO) transmission. This was very different from the former IEEE 802.11 standard's protocols. The MU-MIMO transmission technique in IEEE 802.11ac draft was studied and proposed some optimal designs. Finally, the performance of the IEEE 802.11ac MU-MIMO transmission schemes and gives the simulations. The simulation results show that the proposal transmission schemes can achieve gains of BER and throughput in theory and simulations.

Key words: IEEE 802.11ac; WLAN; transmit opportunity; group

1 引言

随着 Internet 的蓬勃发展, 信息获取的及时性和便利性显得越来越重要, 无线局域网(WLAN)的灵活性、拓展性、移动性以及简便安装等特性使得 WLAN 产业成为当前一个重要的发展热点。自 2008 年上半年起, IEEE 就启动了 WLAN 的新标准 IEEE 802.11ac 的制定工作, 它的目标是使无线 Wi-Fi 的传输速度达到 1Gbit/s 以上, 为此成立了一个专门

的工作组, 项目名称为超高吞吐量(VHT, very high throughput)。

从核心技术来看, IEEE 802.11ac 是在 IEEE 802.11a 无线 Wi-Fi 标准之上发展起来的, 包括将使用 IEEE 802.11a 的 5GHz 频段。不过在通道的设置上, IEEE 802.11ac 将沿用 IEEE 802.11n 的 MIMO(多入多出)通信技术, 并推广到多用户 MIMO 通信技术, 为它的传输速率达到 1Gbit/s 打下基础。IEEE 802.11ac 每个通道的带宽将由 IEEE 802.11n 的最大

收稿日期: 2012-02-13; 修回日期: 2012-08-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61271018, 61071113); 国家科技重大专项基金资助项目(2012ZX03004005-003); 江苏省自然科学基金资助项目(BK2011597); 江苏省工业支撑基金资助项目(BE2012167); 教育部新世纪优秀人才资助计划基金资助项目(NCET-11-0088)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61271018, 61071113); The National Science and Technology Major Project of China (2012ZX03004005-003); The Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK2011597); The Research Project of Jiangsu Province (BE2012167); The Program for New Century Excellent Talents in University (NCET-11-0088)

40MHz 提升到 80MHz, 甚至是 160MHz, 再加上大约 10% 的实际频率调制效率提升, 最终理论传输速度将由 IEEE 802.11n 最高的 600Mbit/s 跃升至 1Gbit/s 以上。当然, 实际传输速率可能在 300~400Mbit/s 之间, 接近目前 IEEE 802.11n 实际传输速率的 3 倍(目前 IEEE 802.11n 无线路由器的实际传输速率为 75~150Mbit/s), 完全足以在一条信道上同时传输多路压缩视频流。

多天线通信技术中的 MIMO 预编码和 MISO (多入单出) 发送波束形成可以充分利用系统的空间复用和阵列增益以及空间分集增益, 显著提高 MIMO 系统的性能。单用户的 MIMO/MISO 方案是将所有数据流发送给一个用户, 而多用户的 MIMO/MISO 传输方案可以给不同用户分配数据流从而增加整个系统的容量, 但它们都需要发射端已知信道状态信息(CSI, channel state information)来进行优化的预编码或发射波束形成设计, 消除各数据流或各用户之间的干扰, 并通过功率分配获得最优的系统性能。多用户 MIMO/MISO 的研究主要包括上行多址接入(MAC)信道和下行广播(BC)信道的容量分析, 空分多址方案及用户间干扰的消除或减少, 有限反馈下的多用户 MIMO 方案, MIMO-OFDM 传输方案设计等方面。

IEEE 802.11n 首先在 WLAN 中完整引入了单用户 MIMO 通信技术, 它的信道信息的反馈有 2 种方案, 一种是 TDD 系统下基于信道互易性得到的信道状态信息, 另一种是 FDD 系统下基于接收端的有限反馈而得到信道信息, 具体地说, 是对用户端等效信道矩阵 V (SVD 分解后) 的有限反馈。IEEE 802.11ac 在其 2011 年的标准草案中进一步引入了多用户 MIMO (MU-MIMO) 通信技术, 而且带宽可以最大扩展到 160Mbit/s, 它也需要在 FDD 系统下对用户端等效信道矩阵 V 进行反馈。另外, 由于 IEEE 802.11ac 的国际提案征集刚刚尘埃落定, 有关 IEEE 802.11ac 传输方案的论文研究尚属空白阶段, 因此迫切需要研究 IEEE 802.11ac 的 MIMO 传输方案, 特别是多用户的 MIMO 传输方案的优化设计与系统性能分析。有关 IEEE 802.11 系列在 WLAN 场景下的 MIMO 传输方案及性能分析的研究目前已有较多的进展。Bianchi 最早对 IEEE 802.11 的机制 DCF 进行了性能分析, 利用二维 Markov 链描述了用户接入机制 CSMA, 并且分析了其吞吐量性能^[1]。Gong 等人在文献[2]中研究了

CSMA/CA 的 WLAN MAC 协议下的多用户 MIMO 传输方法, 然而该研究的多种处理方案和目前 IEEE 802.11ac 标准的多用户方案并不吻合, 因而不能得到应用, 例如它是挑选竞争到信道的多个用户而进行的多用户传输, 而 IEEE 802.11ac 标准的多用户实现是基于 4 种接入类别(AC, access category), 即语音(voice)、视频(video)、尽最大努力(best effort)和背景(background)接入来竞争信道, 而且多用户传输之前需要对不同用户进行分组(Group), 帧结构和作用如图 1 所示。Choi 等人在文献[3]中也研究了 IEEE 802.11 在 WLAN 中的多用户 MIMO 传输方法, 然而该文献是先定义了多个门限, 大于该门限的用户可以进行 MU-MIMO 操作, 无法与当前所定的 IEEE 802.11ac 标准匹配。文献[4]在 IEEE 802.11n 的单用户 MIMO 的基础上对其 RTS 帧结构进行改进, 并利用随机波束对多用户进行预编码, 且不需要信道的反馈, 这种随机波束的预编码方案的优点是简单易行, 但缺点则是无法有效消除多用户信道之间的干扰从而会降低 MU-MIMO 传输的性能。

综上所述, 目前还没有文献完全基于 IEEE 802.11ac 标准协议的规定而对多用户 MIMO 传输方案进行研究。因此本文在 IEEE 802.11ac Draft 2.0 标准草案的基础上对多用户 MIMO 传输机制进行了深入研究, 提出了几点改进的优化设计方案, 并完成了相应的系统性能分析。所提出的改进方案包括: 第一, 针对多用户预编码要求的信道信息比较精确的特点提出在其传输机会(TXOP)初始化后用块确认(BA)帧对信噪比进行反馈来提高多用户预编码的性能, 并基于该反馈信息, 采用“和速率”最大化准则进行了功率分配的优化设计; 第二, 针对 MIMO 多用户分组后通信需要进行 RTS 轮询的机制, 规定接入站点(AP)需要先对主接入类别(AC)用户进行轮询以提高 TXOP 初始化成功的概率; 第三, 由于 MIMO 多用户分组后, 一个用户组有多个主 AC 用户, 如果只对第一个主 AC 用户轮询后失败就放弃该 TXOP 初始化, 则对第 2 个主 AC 用户不公平, 因此提出在多个主 AC 用户存在时 AP 需要对第 2 个主 AC 用户轮询后再决定是否放弃该 TXOP。仿真结果表明, 改进的传输方案在误比特率(BER)和吞吐量方面获得明显的性能增益, 且针对性能的理论分析与仿真结果相吻合。

2 IEEE 802.11ac 中的多用户 MIMO 传输机制

MIMO/MISO 的多用户发送方案可以给不同用户分配数据流从而增加整个系统的容量。多用户 MIMO/MISO 信道主要分为上行多址接入信道(MAC)和下行广播信道(BC)2 个方面。由于 IEEE 802.11ac 标准不采用上行多用户的方案, 所以其多用户 MIMO 的研究主要关于下行多用户发送方面的研究, 多用户传输的前提是发送端需要获得所需的信道状态信息, 若 AP 已知信道信息(CSI), 用户间的干扰可以通过发送端的预编码来减小或者消除。多用户 MIMO 预编码主要包括 2 类, 一类是线性预编码方法, 如迫零、MMSE 预编码方案等, 另一类是非线性预编码方法, 如 DPC 预编码等。虽然 DPC 等非线性预编码方案在理论上有更好的性能改善, 但是在 IEEE 802.11ac 的实际应用场景下, 信道信息的误差会严重影响其性能的提升, 另外它在实现方面更难以求解, 包括一些目标函数和约束条件下的优化求解, 例如最大化加权“和速率”目标函数下的功率分配问题, 非线性预编码方案很难得到解析解, 然而线性预编码的方案可以获得最优解, 因此这里将研究 IEEE 802.11ac 中的多用户 MIMO 线性预编码。

IEEE 802.11ac 的 MU-MIMO 基本实现流程如下。

- 1) 用户站点 STA 通过扫描(分为主动扫描和被动扫描)得到信道列表以决定加入哪个基本服务区(BSS, basic service set)。
- 2) 用户站点 STA 需要通过加入 BSS 的身份认证。
- 3) 用户站点 STA 认证成功后和接入站点 AP

建立关联(若认证或关联不成功需重认证或重关联帧操作), AP 根据 STA 的信息(位置、业务类型等参数)进行分组, 如图 1 所示。

4) 接入站点 AP 通过空数据分组通告帧 NDPA(帧结构和作用如图 2 所示)来通知 STA 反馈所需的等效信道状态信息。

5) 用户站点 STA 通过空数据分组帧 NDP(帧结构和作用如图 3 所示)反馈多用户信道状态信息。

6) 接入站点 AP 竞争到信道后, 对其中一个分组进行 MU-MIMO 操作的第一步——传输机会(TXOP)的初始化(即对分组中的 STA 发送 RTS 或短数据帧进行轮询)。

7) TXOP 初始化成功后, AP 可以在其业务类型所限的时长内实现 MU-MIMO 传输, 包括多用户 MIMO 预编码等, 而不是其服务对象的 STA 可以进入 Power Saving 状态(省电模式以节省电量)。

8) 若数据发完后仍有时长剩余, AP 可通过 CF-END 帧对 TXOP 剩余时长进行清除, 其他 STA 等待 DIFS 时长后可以开始竞争信道。

需要说明的是 IEEE 802.11ac 标准规定在多用户 MIMO 传输时, 多用户多个流的传输场景下每个用户的多个流只能使用一个编码调制方式(MCS)。

在图 1 的 SIG-A 帧结构中 B4~B9 6bit 标识 GroupID, 分组号可以到 63 个。分为一个 Group 的用户具有相同的 GroupID 号, 而且一个 Group 可以有多个用户数, 因此若实现该 Group 用户 MU-MIMO 时有对用户进行选择的需要。

上述 MU-MIMO 实现流程中的 NDPA(null data packet announcement)是空数据分组通告帧, 其作用

B0 B1	B2	B3	B4	B9	B10	B21	B22	B23
BW	Reserved	STBC	Group ID	Nsts	No TXOP PS	Reserved		

图 1 SIG-A 帧结构

Frame Control	Duration	RA	TA	Sounding Sequence	STA Info 1	...	STA Info n	FCS
Octets: 2	2	6	6	1	2		2	4

图 2 NDPA 帧结构

L-STF	L-LTF	L-SIG	VHT-SIG-A	VHT-STF	VHT-LTF	VHT-SIG-B
-------	-------	-------	-----------	---------	---------	-----------

图 3 NDP 帧结构

就是对需要反馈信道信息的用户通告, 每个被通告的用户地址信息放置在 STA Info 1 到 STA Info n 中, 紧跟其后的是 NDP 帧如图 3 所示。

NDP(null data packet)帧中包含了 legacy 的短训练字段(L-STF)和长训练字段(L-LTF)分别用于分组开始的检测和自动增益控制(AGC)设置和信道估计以及更精确的频偏估计和时间同步; 其中, VHT-STF 和 VHT-LTF 是 VHT 格式的短训练字段和长训练字段, 作用和 legacy 相同, 不过是由于超高吞吐量模式下。

上述实现流程中的传输机会 TXOP (transmit opportunity)是自 IEEE 802.11n 标准开始引入的概念, 指的是当一个 AP 站点竞争到一个信道接入机会后可以在一定时长内(具体多长时间基于其接入类别)给一个用户连续传输多个数据帧, IEEE 802.11ac 同样沿用了 TXOP 的机制并且在 TXOP 内实现 MU-MIMO 操作, IEEE 802.11ac 草案 Draft 1.4 给这种多用户 TXOP 的机制定义为 TXOP sharing。

总之 IEEE 802.11ac 中的多用户 MIMO (MU-MIMO)传输机制是将 IEEE 802.11n 的单用户 TXOP 的机制扩展为多用户的 TXOP sharing, 而 MU-MIMO 传输的实现中需要考虑多方面的因素使得系统吞吐量最大化, 例如用户的选择和调度, 信道信息的精确与否, 预编码方案以及发送端对不同用户的功率分配等方面, 下面针对所需考虑的这些问题进行优化设计使得系统吞吐量最大化。

3 改进的 IEEE 802.11ac 多用户 MIMO 传输方案

3.1 多用户预编码方案的改进和最优功率分配

因为多用户预编码的实现需要发送端已知精确的信道状态信息, 然而遵循现有标准草案 Draft 1.4 的背景下, 发送端 AP 准备给多用户发送数据时并不能获知各用户信道是否有所波动, 针对这种情况本文提出利用物理层 TXOP 时长内信干噪比的反馈对现有的多用户预编码方案进行改进, 即发送端通过信干噪比的反馈来调整多用户预编码的实现。尤其是在一个 TXOP 期间, 次 AC 用户(相对于该 TXOP 期间抢到信道接入类别的其他用户)数据发完后, 剩下的 TXOP 时间可以通过调整加入新的用户来使系统容量最大化, 由于此时新加入用户的信道状态信息是之前反馈的, 此时多用户预编码精确与否 AP 是未知的, 所以可以在 TXOP 初始化的第

一帧后, STA 回复块确认(BA)帧时反馈信干噪比信息来调整编码调制方式(MCS)和确定是否需要信道信息的重新反馈, 然后再进行多用户 MIMO 传输。

因此这里提出在 TXOP 开始的第一帧时, 用户对所收到的信号进行处理, 然后通过反馈所设计的块确认 BA 帧将所需的信干噪比和真实的信干噪比反馈给 AP, AP 通过均衡处理来调整发射功率, 由于不同用户的 AC 不同则可以对不同用户和容量进行加权, 从而可对不同 AC 的用户容量进行最优分配。如前所述, 由于非线性 MU-MIMO 预编码无法求得最优解, 因此本节选择线性 MU-MIMO 预编码进行物理层的最优设计。下一节将提出改进的 MAC 调度方案来进一步提升其多用户 MIMO 传输性能。

注意 IEEE 802.11ac 标准规定了其多用户 MIMO 传输是采用 MIMO-OFDM 模式, 并工作于 5GHz 频段, 基本带宽 40MHz, 必选带宽 80MHz, 可选带宽 160MHz 或 80+80MHz。IEEE 802.11ac 的带宽示意图如图 4 所示。

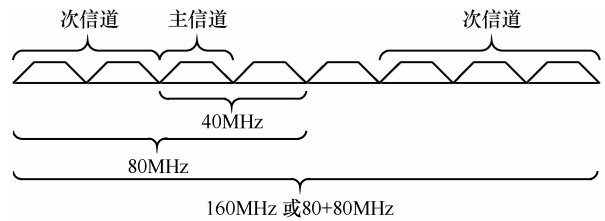


图 4 IEEE 802.11ac 工作带宽示意

下面介绍针对线性 MU-MIMO 预编码方案下的系统模型, 设 $X(t)$ 是进行多用户 MIMO 传输时的发送信号向量, $Y_k(t)$ 是第 k 个用户的接收信号, 则 $Y_k(t)$ 可表示为

$$Y_k(t) = H_k(t)X(t) + Z_k(t) \quad (1)$$

其中, $Z_k(t)$ 是零均值单位方差的加性复高斯噪声, 且 $\mathbb{E}\{\|Z_k(t)\|^2\} = \sigma^2$ 。

由于用户反馈自身信道的 V 矩阵, 则对第 k 个用户经过预编码后的用户端信干噪比为

$$SINR_k = \frac{\|H_k W\|^2}{\sum_{j \neq k, j=1}^K H_j W + \sigma^2} \quad (2)$$

其中, W 是 AP 端的预编码矩阵。如果采用迫零预编码 $W = V(V^H V)^{-1}$, 那么 $SINR_k$ 可写为

$$SINR_k = \frac{\|H_k W\|^2}{\sigma^2} \quad (3)$$

为了使多用户 MIMO 线性预编码的吞吐量最大化, 并进行最优的功率分配, 可以采用基于业务类型 QoS 要求的 Goodput 为将要最大化的目标函数, 由于用户业务类型分为 4 类: voice 用户, Video 用户、best effort 用户和 background 用户、不同用户有相应的 QoS 要求, 因此最后可构成 IEEE 802.11ac 场景下的优化目标函数和约束条件为

$$\begin{aligned}
 f : & \max \{ \alpha_1 \log(1 + \rho_1 SNR_1)(1 - Per_1) + \\
 & \alpha_2 \log(1 + \rho_2 SNR_2)(1 - Per_2) + \\
 & \alpha_3 \log(1 + \rho_3 SNR_3)(1 - Per_3) + \\
 & \alpha_4 \log(1 + \rho_4 SNR_4)(1 - Per_4) \} \\
 \text{s.t.} & \quad \rho_1 SNR_1 \geq t_1 \\
 & \quad \rho_2 SNR_2 \geq t_2 \\
 & \quad \rho_3 SNR_3 \geq t_3 \\
 & \quad \rho_4 SNR_4 \geq t_4 \\
 & \quad \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 = 1 \\
 & \quad \rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \rho_4 = P
 \end{aligned} \tag{4}$$

其中, α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 是加权系数, 最优加权可以为系统实现最大的“和速率”^[6]。 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 是不同用户对速率的 QoS 要求, ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 、 ρ_4 是不同用户的功率分配系数, 求解式(4)对 IEEE 802.11ac 用户实现加权“和速率”目标函数下的最优的功率分配, 式(4)最优解的计算可以通过非线性规划获得。本文可借助 MATLAB 的 *fmincon* 函数求解, 命令的基本格式和所含参数分别为

$$x = fmincon('fun', X_0, A, b, Aeq, beq, VLB, VUB)$$

$$X_0 = \begin{bmatrix} 0.25 \\ 0.25 \\ 0.25 \\ 0.25 \\ 0.25 \times P \\ 0.25 \times P \\ 0.25 \times P \\ 0.25 \times P \end{bmatrix}, \quad
 Aeq = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$beq = [1 \ P]$$

$$b = [t_1 \ t_2 \ t_3 \ t_4]$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$VLB = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$VUB = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ P \ P \ P \ P]$$

通过计算即可获得式(4)的最优解。

式(4)中的 Per_1 Per_2 Per_3 Per_4 分别是 4 类用户的误分组率, 都可通过式(5)计算。

$$P_{per} = 1 - \left(1 - \beta_1 Q(\sqrt{\beta_2 \gamma})\right)^2 \tag{5}$$

其中, γ 是信噪比, $Q(\cdot)$ 表达式为 $Q(\alpha) = 1/\sqrt{2\pi} \int_{\alpha}^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$ 。上式中的 β_1 和 β_2 代表不同的 MCS 类型, 如表 1 所示的是 IEEE 802.11ac 所采用的各种 MCS 方式。当 MCS 阶数较高时候可用式(6)计算 P_{per} :

$$P_{per} = 1 - \left(1 - \frac{2(\sqrt{M} - 1)}{\sqrt{M}} Q\left(\sqrt{\frac{3\gamma}{M-1}}\right)\right)^2 \tag{6}$$

根据文献[7]对迫零 MU-MIMO 预编码的研究, 可以得到迫零预编码的信噪比服从参数为 $n_2 = 2(M - K + 1)$ 和 $n_1 = 2K$ 的 \mathcal{F} 分布(M 是发送端天线数, K 是用户数), 其概率密度函数为

$$f(\gamma) = \frac{(M - K + 1)!}{\sigma^2 K} \mathcal{F}_{2(M-K+1), 2K} \tag{7}$$

式(7)又可以写为

$$f(\gamma) = \frac{\sigma^2 M!}{(K - 1)!(M - K)!} \frac{(\sigma^2 \gamma)^{M-K}}{(1 + \sigma^2 \gamma)^{M+1}} \tag{8}$$

利用文献[10]中的式(3.194.2)可得信噪比 γ 的累积分布函数(CDF, cumulative distribution function)为

$$F(\gamma) = \frac{\sigma^2 M!}{(K - 1)!(M - K)!} \frac{(\gamma/\sigma^2)^{-K}}{K}$$

$${}_2F_1(M + 1, K; K + 1; -\sigma^2/\gamma)$$

因此根据该 CDF 和表 2(用来实现 Group 多于 4 个用户时用户信干噪比的选择门限和最终发送时所对应的可达速率)可以得到不同可达信噪比下的概率, 从而可以用来计算多用户场景下(如第 4 节)的吞吐量性能。下面分析在线性 MU-MIMO 预编码下的 MAC 层用户选择和调度方案。

表 1 IEEE 802.11ac 所采用的 MCS 方式

MCS Index	调制方式	R	Beta1	Beta2
0	BPSK	1/2	1	2
1	QPSK	1/2	1	1
2	QPSK	3/4	1	1
3	16-QAM	1/2	3/2	1/5
4	16-QAM	3/4	3/2	1/5
5	64-QAM	2/3	7/4	1/31
6	64-QAM	3/4	7/4	1/31
7	64-QAM	5/6	7/4	1/31
8	256-QAM	3/4	15/8	1/85

表 2 用户组多于 4 个用户时的信干噪比(SINR)选择门限和最终发送的可达速率

Index	可达发送速率/(Mbit·s ⁻¹)	MU-MIMO 发送	SINR 门限/dB
1	0	≤-8	
2	6	≤-8	≤12.5
3	9	≤12.5	14≤
4	12	14≤	≤16.5
5	18	≤16.5	≤19
6	24	≤19	≤22.5
7	36	≤22.5	≤26
8	48	≤26	≤28
9	54	≤28	

3.2 多用户 MIMO 传输的 MAC 层调度优化方案

AP 站点获得一个传输机会后,只要满足 TXOP 时限,它可以在指定的轮询 TXOP 内传输多个帧交换序列。“所请求的 TXOP 时长”以 32 μs 为单位指定。“所请求的 TXOP 时长”为 0 表示对于指定通信标识符(TID, traffic identifier)没有请求 TXOP。“所请求的 TXOP 时长”不是累加的,对于一个特定 TID 的 TXOP 时长请求将改写任何之前的对该 TID 的 TXOP 时长请求,也就是说 IEEE 802.11ac 场景下用户站点 STA 必须回复 TXOP holder(初始化成功 TXOP 的 STA)的信息。

因为现有的机制在 MU-MIMO 传输之前获得的信干噪比信息相对于实际发送 MU-MIMO 数据时的信干噪比而言是不精确的。这样会使 MU-MIMO 的性能降低,体现不出 MU-MIMO 对于吞吐量的提升作用。因此本节提出一种简单的改进方案可以解决 MU-MIMO 传输时吞吐量的降低问题,具体的改进方案如下。

1) 在 TXOP 内的 MU-MIMO 实现期间发送端 AP 第一帧(标准规定 RTS 或短数据分组可作为第一帧)发送时,以保守 MCS(即低阶 MCS)发送。

2) 用户(STA)在该 TXOP 时长内收到第一个 MU-MIMO 帧后,基于该帧重新估计 SINR。此时由用户完成的 SINR 的计算可有效考虑其他用户(STA)数据流的干扰。

3) 在用户(STA)响应的块确认(BA)帧中将量化的 SINR 的修正量(4bit 左右)反馈给 AP,该步骤需要对帧结构做一些修改,如图 5 所示。

注意对于单用户 MIMO 传输,本改进方案也可适用,同样可带来性能增益。

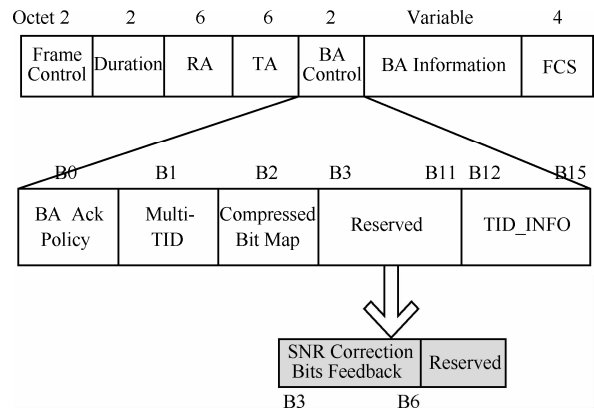


图 5 BA 帧结构修改

对于反馈的主动权而言,AP 和 STA 都可以实现。

1) 对于 AP 而言,为了触发 STA 在非 Sounding (探测)阶段重新估计 SINR 值并在接下来的 BA 帧中返回修正 SINR 量化值,需要在数据帧的 VHT-SIGA 字段使用 1bit 指示该操作,或者将比特信息以扰码的形式加进去,指示该操作。

2) 对于 STA 而言,为了让 AP 获知自身重新估计了 SINR 值,所响应的 BA 帧中带有修正 SINR 量化值,那么可以在 BA 帧中加 1bit,或者以扰码的形式来指示该操作。

STA 重新获得了带干扰的每个空间流的子载波上的 SINR 以后,取整体的平均值,即将每个空间流的每个子载波上的 SINR 求和,然后除以每个空间流的子载波数再除以流数,得到一个总体平均 SINR,再计算出此 SINR 与之前反馈的总体平均 SINR 的差值 SINR_correction。将这个差值量化成 4bit,放在 BA 帧里的 BA 控制域中来反馈。用 4bit (B3~B6) 来指示这个差值,由于每个 STA 最多可以接收 4 个空间流,也就最多需要反馈 4 个平均 SINR 修正量,因此一共需要 BA control 域中分配 8bit(B3~B10)来指示。

B3、B4 指示第 1 个空间流的平均 SNR, B5、B6 指示第 2 个空间流的平均 SNR, B7、B8 指示第 3 个空间流的平均 SNR, B9、B10 指示第 4 个空间流的平均 SNR。

主要工作流程如图 6 所示,即第 1 步发送端在 TXOP 内以低阶 MCS 发送第 1 个 MU-MIMO 帧;第 2 步用户在收到第一个 MU-MIMO 帧后,基于该帧重新估算 SINR;第 3 步用户在响应帧(BA,块确认帧)中将额外携带 SINR 纠正信息的 BA 帧反馈给发送端;第 4 步发送端在收到该修正的反馈帧后对多用户预编码的实现进行调整(可

进行功率分配, 调整不同用户的加权系数等)以最大化系统的吞吐量。

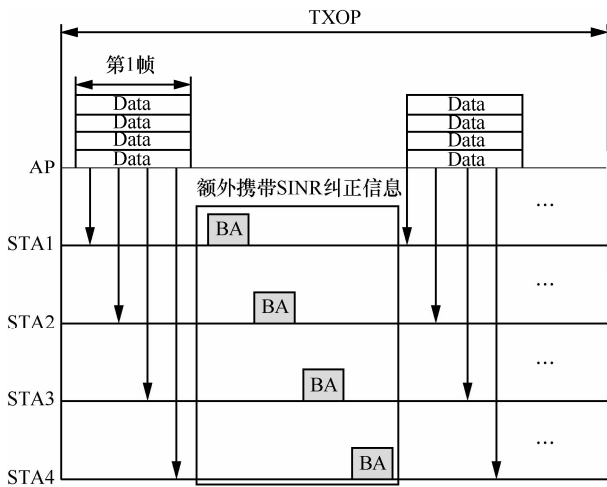


图 6 修改后工作流程

该方案的主要好处是: 不需控制包裹帧反馈的复杂度也不需在 MAC 层增加多余信令开销的情况下, 使 AP 得到更为精确的包含多用户干扰的 SINR 反馈值, 提高 AP 设计多用户预编码的性能, 最终提高物理层的 MU-MIMO 吞吐量。

而且由于在初始化 TXOP 时, 对主 AC 用户第一帧的成功与否至关重要, 如果第一帧交互失败, 那么 TXOP 初始化就失败, 而当进行多用户传输时会有多个用户, 所以应该先询问哪个用户对 TXOP 初始化成功与否也就显得十分重要, 而且如果 Group 包括 2 个以上主 AC 用户时候, 若询问第 1 个主 AC 用户失败则 TXOP 初始化失败, 这样对第 2 个主 AC 用户不公平而且降低了 TXOP 初始化成功的概率。针对这 2 方面的问题本文建议对用户调度进行改进。

1) TXOP 初始化时先对主 AC 用户进行轮询以提高 TXOP 初始化的概率。

2) 如果对第 1 个主 AC 用户第一帧交互失败可以尝试对第 2 个主 AC 用户交互, 这样一方面可以改善多个主 AC 用户的公平性问题, 另一方面增加了 TXOP 初始化成功的概率。

下面针对以上物理层和 MAC 层的 MU-MIMO 优化方案进行理论分析和仿真验证。

4 IEEE 802.11ac 多用户 MIMO 传输方案的性能分析

本节将结合前面所述多用户预编码方案对

IEEE 802.11ac 场景下的吞吐量性能进行分析, 由文献[4]可知, 平均发送帧长 \bar{X} 和所用的平均时长 \bar{T} 之比即为吞吐量, 而且实现下行多用户需要 AP 竞争到信道, 因而吞吐量可以表示为

$$S(m, N, r_\gamma) = P_{AP} \frac{\bar{X}(m, N, r_\gamma)}{\bar{T}(m, N, r_\gamma)} \quad (10)$$

其中, 平均发送帧长 $\bar{X}(m, N, r_\gamma)$ 和所用平均时长 $\bar{T}(m, N, r_\gamma)$ 分别为

$$\bar{X}(m, N, r_\gamma) = \sum_{i=1}^{n_i} il \left(\sum_{\omega=\gamma}^R P_f(i, m, N, r_\gamma, r_\omega) \right) \quad (11)$$

$$\bar{T}(m, N, r_\gamma) = T(0, m) P_f(0, m, N, r_\gamma) + \sum_{i=0}^{n_i} \sum_{\omega=\gamma}^R T(i, m, r_\omega) P_f(i, m, N, r_\gamma, r_\omega) \quad (12)$$

索引 i 表示可能帧类型, $i=0$ 表示无发送情况的空帧, $i=1$ 表示一个波束的帧类型, 其数据分组帧长度为 l bit, $i=2$ 表示 2 个波束的帧类型, 其数据分组帧长度为 $2l$ bit, $i=3$ 表示 3 个波束的帧类型, 其数据分组帧长度为 $3l$ bit, $i=4$ 表示 4 个波束的帧类型, 其数据分组帧长度为 $4l$ bit。则平均发送帧长可通过不同帧类型的比特数与该帧类型的发送概率的乘积计算获得, 而 $P_f(i, m, N, r_\gamma, r_\omega)$ 表示第 i 个帧类型在 N 个用户 m 个时隙内门限为 r_γ 发送速率 r_ω 的概率, 其计算将在下面进行分析。

式(10)中的 P_{AP} 为 AP 竞争到信道的概率, 则 AP 与 $n-1$ 个站点在 m 个时隙内竞争到信道的概率可以表示为^[8]

$$P_{AP} = \frac{m!n!}{m^n} \sum_{j=1}^{\min(m,n)} \frac{(-1)^{j+1} (m-j)^{n-j}}{(j-1)!(m-j)!(n-j)!} \quad (13)$$

因为下行多用户需要 AP 竞争到信道, Group 所含用户不需要竞争信道, 但是由于一个用户可以在不同 Group 中, 所以下行多用户需要对用户进行选择, 选取用户信噪比较大的作为多用户服务的对象, 若选择用户的门限为 r_γ , 则从 N 个用户中选择 n 个 SINR 大于 r_γ 的概率为

$$P_{\text{select}}(n, r_\gamma) = \binom{N}{n} (1 - F(\gamma))^n (F(\gamma))^{N-n} \quad (14)$$

在 $P_{\text{select}}(n, r_\gamma)$ 的基础上如前所述把 $P_f(i, m, N, r_\gamma, r_\omega)$ 分为 5 种不同的帧类型来计算得到 $\bar{X}(m, N, r_\gamma)$ 和 $\bar{T}(m, N, r_\gamma)$ 。

第 1 种帧类型 $i=0$ 即空帧，则有

$$P_f(i=0, m, N, r_\gamma) = P_{\text{select}}(0, r_\gamma) + \sum_{n=1}^N P_{\text{select}}(n, r_\gamma) \cdot P_{\text{survive}}(0, m, n)$$

$$P_{\text{survive}}(0, m, n) = \frac{m!n!}{m^n} \cdot \sum_{j=1}^{\min(m, n)} \frac{(-1)^{j+1} (m-j)^{n-j}}{(j-1)!(m-j)!(n-j)!}$$

第 2 种帧类型 $i=1$ 即单个波束帧类型，其帧长为 l bit。

$$P_f(i=1, m, N, r_\gamma, r_\omega) = \sum_{n=1}^N (P_{\text{select}}(n, r_\gamma) \cdot P_{r_1}(r_\omega, n))$$

其中，

$$P_{r_1}(r_\omega, n) = 1 + \sum_{j=2}^n \left(1 - \frac{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega-1} P_r(r_v) \right]^j}{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega} P_r(r_v) \right]^j} \right)$$

其中， $P_r(r_v)$ 是发送速率小于 r_ω 的概率。

第 3 种帧类型 $i=2$ 即双波束帧类型，其帧长为 $2l$ bit。

$$P_f(i=2, m, N, r_\gamma, r_\omega) = \sum_{n=1}^N (P_{\text{select}}(n, r_\gamma) P_{r_2}(r_\omega, n))$$

中，

$$P_{r_2}(r_\omega, n) = 1 + \left(1 - \frac{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega-1} P_r(r_v) \right]^{n-1}}{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega} P_r(r_v) \right]^{n-1}} \right) \left(\frac{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega} P_r(r_v) \right]^{n-1}}{\left[\sum_{v=\gamma}^R P_r(r_v) \right]^{n-1}} \right) +$$

$$\left(\left(1 - \frac{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega-1} P_r(r_v) \right]^n}{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega} P_r(r_v) \right]^n} \right) \left(\frac{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega-1} P_r(r_v) \right]^n}{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega} P_r(r_v) \right]^n} \right) - C_n^1 \frac{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega-1} P_r(r_v) \right]^n}{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega} P_r(r_v) \right]^n} P_r(r_\omega) \right) +$$

$$\left(\left(1 - \frac{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega-1} P_r(r_v) \right]^n}{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega} P_r(r_v) \right]^n} \right) \left(\frac{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega-1} P_r(r_v) \right]^n}{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega} P_r(r_v) \right]^n} \right) - C_n^1 \frac{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega-1} P_r(r_v) \right]^n}{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega} P_r(r_v) \right]^n} P_r(r_\omega) \right)$$

第 4 种帧类型 $i=3$ 即 3 个波束的帧类型，其帧长为 $3l$ bit。

$$P_f(i=3, m, N, r_\gamma, r_\omega) = \sum_{n=1}^N (P_{\text{select}}(n, r_\gamma) \cdot P_{r_3}(r_\omega, n))$$

其中，

$$P_{r_3}(r_\omega, n) = 1 + \left(1 - \frac{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega-1} P_r(r_v) \right]^{n-1}}{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega} P_r(r_v) \right]^{n-1}} \right) \left(\frac{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega} P_r(r_v) \right]^{n-1}}{\left[\sum_{v=\gamma}^R P_r(r_v) \right]^{n-1}} \right) -$$

$$C_n^1 \frac{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega-1} P_r(r_v) \right]^n}{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega} P_r(r_v) \right]^n} P_r(r_\omega) \left(1 - \frac{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega-1} P_r(r_v) \right]^{n-2}}{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega} P_r(r_v) \right]^{n-2}} \right) \left(\frac{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega} P_r(r_v) \right]^{n-2}}{\left[\sum_{v=\gamma}^R P_r(r_v) \right]^{n-2}} \right) +$$

$$\left(1 - \frac{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega-1} P_r(r_v) \right]^n}{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega} P_r(r_v) \right]^n} \right) \left(\frac{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega} P_r(r_v) \right]^n}{\left[\sum_{v=\gamma}^R P_r(r_v) \right]^n} \right) - C_n^1 \frac{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega-1} P_r(r_v) \right]^n}{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega} P_r(r_v) \right]^n} P_r(r_\omega) -$$

$$C_n^2 \frac{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega-1} P_r(r_v) \right]^n}{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega} P_r(r_v) \right]^n} P_r(r_\omega)$$

第 5 种帧类型 $i=4$ 即 3 个波束帧类型，其帧长为 $4l$ bit。

$$P_f(i=4, m, N, r_\gamma, r_\omega) = \sum_{n=1}^N (P_{\text{select}}(n, r_\gamma) P_{r_4}(r_\omega, n))$$

其中，

$$P_{r_4}(r_\omega, n) = \left(1 - \frac{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega-1} P_r(r_v) \right]^{n-1}}{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega} P_r(r_v) \right]^{n-1}} \right) \left(\frac{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega} P_r(r_v) \right]^{n-1}}{\left[\sum_{v=\gamma}^R P_r(r_v) \right]^{n-1}} \right) - C_n^1 P_r(r_\omega) - C_n^2 P_r^2(r_\omega) +$$

$$\left(1 - \frac{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega-1} P_r(r_v) \right]^{n-2}}{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega} P_r(r_v) \right]^{n-2}} \right) \left(\frac{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega} P_r(r_v) \right]^{n-2}}{\left[\sum_{v=\gamma}^R P_r(r_v) \right]^{n-2}} \right) - C_{n-2}^1 P_r(r_\omega) +$$

$$\left(1 - \frac{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega-1} P_r(r_v) \right]^{n-3}}{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega} P_r(r_v) \right]^{n-3}} \right) \left(\frac{\left[\sum_{v=\gamma}^{\omega} P_r(r_v) \right]^{n-3}}{\left[\sum_{v=\gamma}^R P_r(r_v) \right]^{n-3}} \right) + 1$$

根据不同帧类型可得到 $\bar{X}(m, N, r_\gamma)$ ，而 $T(i, m, r_\omega)$ 表示帧类型 i 可达发送速率为 r_ω 的发送时间，可计算如下：

$$T(i, m, r_\omega) = T_{\text{data}}(i, r_\omega) + T_{\text{overhead}}(i, m) \quad (15)$$

$T_{\text{data}}(i, r_\omega)$ 表示帧类型 i 数据分组的发送时间， $T_{\text{overhead}}(i, m)$ 是 TXOP 期间所需的帧交换控制代价，

例如 RTS、CTS 和 SIFS 等时间，具体时间如表 3 所示。

参数	时间值
MAC 头	40byte
PHY 头	24 μ s
SIFS	16 μ s
DIFS	34 μ s
时隙	9 μ s
BA	84 μ s
RTS	20byte
CTS	15byte
DATA MPDU	2 312byte

5 仿真结果与分析

本节对 IEEE 802.11ac 的多用户 MIMO 传输的改进方案性能进行了仿真和分析。仿真假定 AP 有 M 根发送天线，用户为单天线，噪声方差为 1，控制代价如表 3 所示，预编码为迫零预编码。假定 4 个用户分别代表不同接入类别，如语音用户、视频用户、尽最大努力用户和背景用户。设定信道环境为住宅信道环境^[5]。

在主 AC 业务类型为语音时，本文对 AP 有不同天线情况下，语音用户随着信噪比的增加其 BER 的变化情况进行了仿真，结果表明其 BER 随着天线数的增加而显著下降，如图 7 所示。

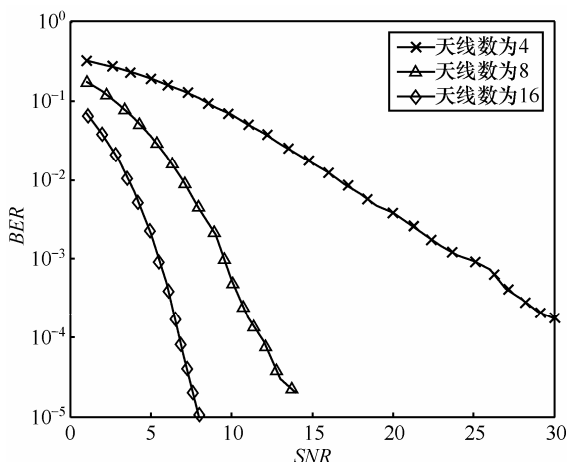


图 7 天线数不同主 AC 用户 BER 和 SNR 之间的关系

当采用迫零 MU-MIMO 预编码时，由于采用信干噪比反馈和不采用反馈时 AP 将决定是否需要信道信息的重新反馈，图 8 对比了不同反馈下主 AC 用户的 BER 随着信噪比的变化情况。

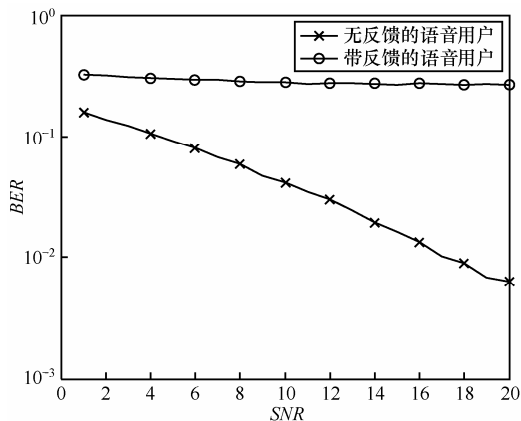


图 8 SNR 反馈的 MAC 方案和无反馈的 BER 性能对比

图 9 对采用式(4)的目标函数进行功率分配的情况下，进行信干噪比反馈和无反馈时 Goodput 的性能差别，仿真表明，反馈精确信道信息下 Goodput 的性能要大于不进行反馈的情况。

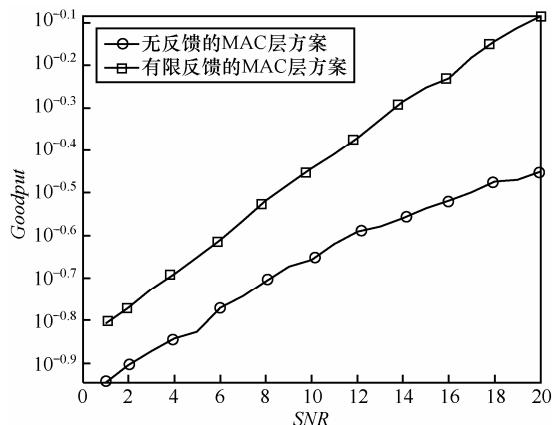


图 9 SNR 反馈的 MAC 方案和无反馈的 Goodput 性能对比

图 10 对系统吞吐量性能的分析结果进行了仿真验证，其中仿真参数如下：门限速率 r_i 分别取值 -8dB、14dB 和 16dB，仿真表明，理论分析结果与仿真结果相吻合，随着时隙数的增加，吞吐量的增加也逐渐缓慢，且门限值越高其吞吐量越小，因为门限值选择较高时会导致能服务的用户数变少，所以吞吐量会降低。

图 11 是对 MAC 优化方案的第 1 种，即在多用户的情况下，TXOP 初始化第 1 帧时候先询问主 AC 用户和不一定先询问主 AC 用户时的 TXOP 初始化

成功的概率进行了对比，仿真结果表明，先对主 AC 用户询问 TXOP 初始化成功的概率要远远大于不一定先对主 AC 用户询问的情况。

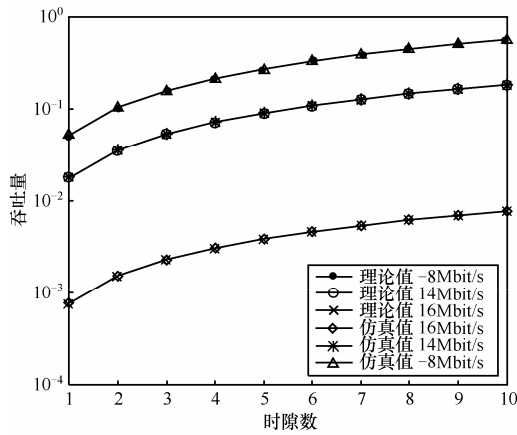


图 10 可达发送速率不同时吞吐量随时隙变化性能对比

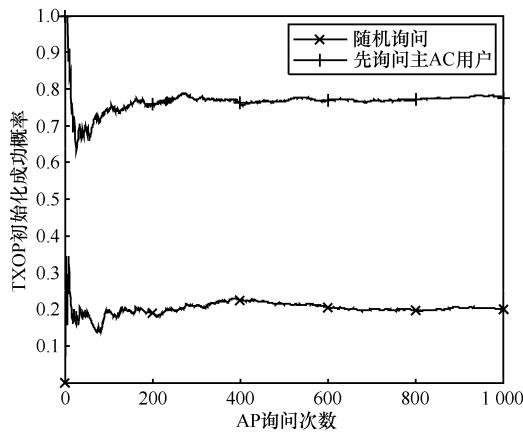


图 11 先询问主 AC 用户 TXOP 初始化成功概率随着询问次数的变化

图 12 是对 MAC 优化方案的第 2 种，即在 Group 中多个主 AC 用户存在的的情况下，AP 对第 2 个主

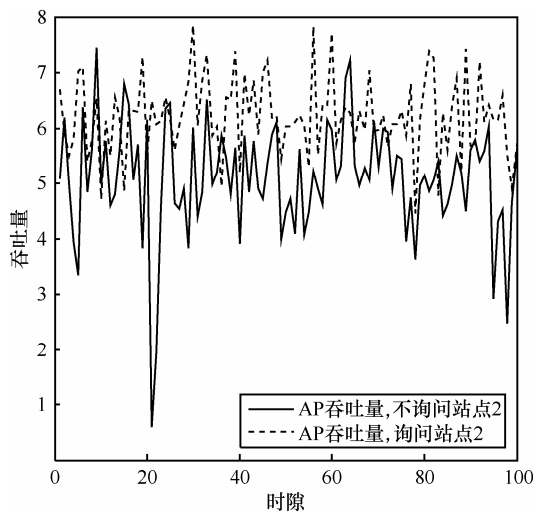


图 12 AP 询问第 2 主用户 AP 吞吐量和无询问吞吐量对比

AC 用户尝试询问和不对第 2 个主 AC 用户询问的性能进行了对比，仿真结果表明对第 2 个主 AC 用户询问会大大增加下行多用户的吞吐量，这是因为对第 2 个主 AC 用户的询问一方面使 TXOP 初始化成功的概率增加，另一方面也增加了 AP 占用信道的时间，从而使得 IEEE 802.11ac 下行多用户的吞吐量增加。

6 结束语

本文基于 IEEE 802.11ac/D1.4 标准草案对其多用户 MIMO (MU-MIMO)传输方案进行了改进和仿真分析，针对多用户时用户信道信息有延迟的特点需要 TXOP 期间用户通过响应 BA 帧进行信干噪比的反馈，结果表明 MU-MIMO 传输时信干噪比的反馈会使多用户 BER 的性能有很大的提高，也提高了系统正确接收的比特数(即 goodput)，本文又在加权“和速率”最大化的目标函数下进行了功率的最优分配，结果表明有反馈相比于无反馈的系统性能有较大的提升。

针对 TXOP 初始化对主 AC 询问失败的特点，本文还提出 2 个 MAC 层的优化方案，这 2 个方案是对主 AC 用户的优先询问和对第 2 个主 AC 用户的尝试询问，降低了 TXOP 初始化失败的概率，同时增加了 IEEE 802.11ac 下行多用户 MIMO 传输的吞吐量。

本文基于 IEEE 802.11ac/D1.4 标准草案并结合本文所述多用户预编码方案对 IEEE 802.11ac 场景下的吞吐量性能进行了分析，针对 5 种不同的帧类型计算了不同的平均发送帧长和所用的平均时长，从而计算出该帧类型下的吞吐量性能，通过仿真表明随着门限速率的增加吞吐量降低，并随着时隙的增加吞吐量趋于平坦，表明了本文分析结果的正确性。

参考文献:

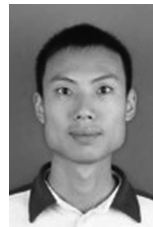
- [1] BIANCHI G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function[J]. IEEE Journal on Selected in Communications, 2000, 18(3):535-547.
- [2] GONG M X, PERAHIA E, STACEY R, et al. A CSMA/CA MAC protocol for multi-user MIMO wireless LAN[A]. IEEE Global Telecommunications Conference[C]. 2010. 1-6.
- [3] CHOI Y J, LEE N H. Exploiting multiuser MIMO in the IEEE 802.11 wireless LAN systems[J]. IEEE Wireless Personal Communication, 2010, 54(3):385-396.

- [4] KARTSAKLI E, ZORBA N, ALONSO L, *et al.* A threshold selective multiuser downlink MAC scheme for 802.11n wireless networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(3):385-396.
- [5] IEEE 802.11ac/D2.0, Draft STANDARD for Information Technology-Telecommunications and Information Exchange Between Systems: Local and Metropolitan Area Networks-Specific Requirements, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, Amendment 5: Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6 GHz[S]. 2011.
- [6] CHRISTENSEN S, AGARWAL S R, CARVALHO E, *et al.* Weighted sum-rate maximization using weighted MMSE for MIMO-BC beamforming design[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(12):4292-4799.
- [7] SHAO X, YUAN J. Error performance analysis of linear zero forcing and MMSE precoders for MIMO broadcast channels[J]. IET Communications, 2007, 1(5):1067-1074.
- [8] SZPANKOWSKI W. Analysis and stability considerations in a reservation multi-access system[J]. IEEE Transactions on Communications, 1983, 31(5):684-692.
- [9] PROAKIS J G. Digital Communication[M]. McGraw-Hill, 2008.
- [10] GRADSHTEYN I S, RYZHIK I M. Table of Integrals, Series, and Products[M]. San Diego, 6 edition, 2000.

作者简介:



冀保峰 (1985-), 男, 河南洛阳人, 东南大学博士生, 主要研究方向为无线局域网、无线通信中的中继技术、协作通信等。



宋康 (1986-), 男, 山东青岛人, 东南大学博士生, 主要研究方向为网络编码等。

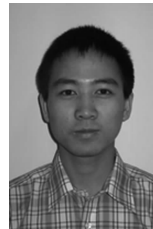
黄永明 (1977-), 男, 江苏吴江人, 东南大学副教授、博士生导师, 主要研究方向为 MIMO 信号处理和协作通信等。

杨绿溪 (1964-), 男, 安徽桐城人, 博士, 东南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为协作通信、MIMO 信号处理、干扰管理等。

(上接第 95 页)

- [11] RAHELI R, POLYDOROS A, TZOU C K. Per-survivor processing: a general approach to MLSE in uncertain environments[J]. IEEE Trans Commun, 1995, 43(2/3/4):354-364.
- [12] MORELLI M, MENGALI U. Joint frequency and timing recovery for MSK-type modulation[J]. IEEE Trans on Communications, 1999, 47(6):938-946.
- [13] 廖灿辉, 周世东, 朱中梁. 基于最大似然的同频混合信号联合定时估计算法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(6):1121-1124.
LIAO C H, ZHOU S D, ZHU Z L. ML-based joint timing estimation algorithm for co-frequency signals[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(6):1121-1124.
- [14] 廖灿辉, 黄渊凌, 周世东. 卫星成对载波多址信号的一种联合分离解调算法[J]. 通信学报, 2010, 31(6):99-105.
LIAO C H, HUANG Y L, ZHOU S D. Joint separation and demodulation algorithm for paired carrier multiple access signals[J]. Journal on Communications, 2010, 31(6):99-105.

作者简介:



廖灿辉 (1982-), 男, 湖南长沙人, 博士, 盲信号处理国家重点实验室工程师, 主要研究方向为信号检测、卫星信号盲处理等。

涂世龙 (1980-), 男, 四川资阳人, 博士, 盲信号处理国家重点实验室工程师, 主要研究方向为信源容错处理、单通道盲分离等。

万坚 (1977-), 男, 江西南昌人, 博士, 盲信号处理国家重点实验室高级工程师, 主要研究方向为卫星通信、盲信号分离等。