



Wi-Fi 6 的多用户技术

王姣姣, 邵震, 黄国瑾

(中国电信股份有限公司研究院, 上海 200122)

摘要: Wi-Fi 6 是 Wi-Fi 联盟对 IEEE 802.11ax 的新命名方式, 以便于这项 Wi-Fi 新技术的推广。Wi-Fi 6 技术聚焦高密度场景的多用户性能、效率等方面, 引入 OFDMA、上行 MU-MIMO 等多用户技术, 极大提升系统容量, 降低传输时延。阐述 OFDMA、MU-MIMO、MU-RTS/CTS 技术的原理, 详细介绍多用户场景的通信流程, 并从理论角度分析 Wi-Fi 6 的上下行并发用户能力, 最后对 Wi-Fi 6 技术的应用前景进行展望和总结。

关键词: Wi-Fi 6; OFDMA; MU-MIMO; 多用户

中图分类号: TN925

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2021065

Multi-user coordination technology

WANG Jiaojiao, SHAO Zhen, HUANG Guojin

Research Institute of China Telecom Co., Ltd., Shanghai 200122, China

Abstract: Wi-Fi 6 was the new name of IEEE 802.11ax by the Wi-Fi Alliance to facilitate the promotion of new Wi-Fi technology. Wi-Fi 6 technology focused on improving multi-user performance and efficiency in dense deployment scenario. Introducing OFDMA, UL MU-MIMO and other multi-user collaboration technologies, greatly increases system capacity and reduces transmission delay. The principles of OFDMA, MU-MIMO, MU-RTS/CTS technologies were described, the communication process in multi-user scenario was introduced in detail, and the UL and DL simultaneous user numbers of Wi-Fi 6 were analyzed in theory. Finally, the application potential of Wi-Fi 6 were discussed.

Key words: Wi-Fi 6, OFDMA, MU-MIMO, multi-user

1 引言

过去, Wi-Fi 协议的发展主要聚焦提供更高的峰值速率, 随着物联网的不断发展, Wi-Fi 设备的数量不断增加, 面对大量的用户数以及多种多样的业务需求, 仅提供更高的峰值速率是不够的。需要基于用户的实际体验进行改进, 提供足够的

容量, 保障终端增长的需求以及多样化应用场景的网络质量。为应对新的需求与挑战, 任务组于 2014 年正式成立, 开发 Wi-Fi 6 协议。Wi-Fi 6 主要聚焦高密度场景的性能改善, 大幅提升传输容量。主要改进目标^[1-3]如下。

- 系统性能提升: 对于高密度场景, 至少提升 4 倍的每用户平均吞吐率, 改善终端的

功耗,降低通信时延。

- 频谱效率提升:提高无线频谱利用率,提供邻近设备干扰管理的能力,以改善高密度部署场景的性能^[4]。
- 频段:支持传统的 2.4 GHz 频段和 5 GHz 频段,新增 6 GHz 频段。

可以看到,Wi-Fi 6 的改进目标并没有最大吞吐率的要求,而是聚焦高密度场景的多用户性能提升、效率提升等方面,向更贴近用户场景的方向迈进。本文围绕 Wi-Fi 6 的多用户技术,详细分析正交频分多址(orthogonal frequency division multiple access,OFDMA)、多用户多进多出(multi-user multiple input multiple output, MU-MIMO)和 MU-RTS/CTS 的技术原理,梳理多用户场景通信流程,并分析 Wi-Fi 6 理论最大并发用户数。

2 多用户技术

为提升多用户性能,Wi-Fi 6 引入 OFDMA 和上行 MU-MIMO,OFDMA 将频域划分成大小不同的资源单元,让不同用户使用不同子载波同时接入信道;上行 MU-MIMO 通过空间复用让多个用户在同一时间接入信道。两者可独立存在,也可以叠加使用。同时,为了保障多用户通信性能,引入 MU-RTS/CTS 流程,保护无线访问接入点(access point, AP)与多个节点的传输机会

(transmission opportunity, TXOP)。

2.1 OFDMA

OFDMA 是基于正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)的物理层技术,在传统的 OFDM 技术中,一个物理层协议数据单元(PHY protocol data unit, PPDU)中所有子载波只能用于和单一用户通信;OFDMA 技术将频域划分成不同大小的资源单元(resource unit, RU),分配给不同的用户进行并发通信^[5]。使用 OFDMA 技术有如下优点。

- 根据用户数据量进行量体裁衣,减少频谱浪费,提升频谱效率。
- 减少前导(preamble)、帧间隙(SIFS 等)和竞争退避(contention)的时间消耗^[6],降低多用户并发场景的通信时延,以下行 OFDM 与 OFDMA 的传输时序为例,说明 OFDM 和 OFDMA 的差异,下行 OFDM 与 OFDMA 的传输时序如图 1 所示。

Wi-Fi 6 的 OFDMA 实现中,无论是上行还是下行,资源分配都由 AP 完成,资源分配的单位为 RU,每次可为单个用户分配 1 个 RU。为满足多种数据需求,Wi-Fi 6 定义了几种不同大小的 RU,在一次资源分配中,可为不同用户分配不同大小的 RU。不同带宽的 PPDU 包含不同大小 RU 的最大数量见表 1。

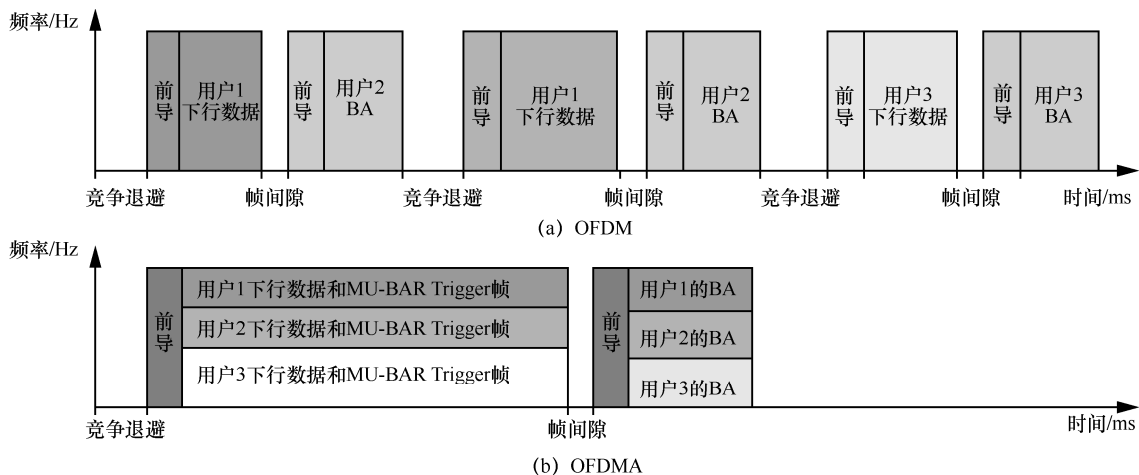


图 1 下行 OFDM 与 OFDMA 的传输时序

表 1 不同工作带宽下的 RU 数量配置^[7]

RU 类型	20 MHz	40 MHz	80 MHz	80+80 MHz 和 160 MHz
26 子载波 RU	9	18	37	74
52 子载波 RU	4	8	16	32
106 子载波 RU	2	4	8	16
242 子载波 RU	1	2	4	8
484 子载波 RU	N/A	1	2	4
996 子载波 RU	N/A	N/A	1	2
2×996 子载波 RU	N/A	N/A	N/A	1

在下行 OFDMA 流程中, AP 知道要发给各个终端的数据量, 直接发送一个数据单元 HE MU PPDU (一种新定义的用于发送下行多用户数据的物理层数据单元格式) 即可, 该 PPDU 的 HE-SIG-B 字段携带了内部的资源映射关系, 主要包括 RU 分配的方案、MU-MIMO 复用的用户数、各个终端的标识及其数据使用的空间流、MCS 和编码方式。终端解析 HE-SIG-B 后, 根据携带的资源映射信息解析其对应的数据。

在讲述上行 OFDMA 流程前, 先引入 3 个重要的概念。

- Trigger 帧: 一种控制帧, 用于请求一个或多个 HE TB PPDU, 在上行 OFDMA 中用于向一个或多个用户分配 RU 资源。
- HE TB PPDU: 一种新引入的物理层数据协议单元, 用于传输响应 Trigger 帧的 PPDU, 主要用于上行的 OFDMA/MU-MIMO, 收到 AP 发送的 Trigger 帧后, 发送数据。
- 缓存状态报告 (buffer status report, BSR): 用于上报终端的缓存状态, 可以承载在任意帧的 QoS control field 或 BSR control subfield 中, 或者通过 HE TB PPDU 发送。

在上行 OFDMA 流程中, AP 由于不知道每个终端待发送的数据量, 需要通过缓存状态报告获取终端的缓存情况。终端上报缓存报告可分为两

种工作模式。

- 主动模式, 终端在发给 AP 的任意帧的 QoS control field 或 BSR control subfield 中携带 BSR。
- 被动模式, AP 发送类型为获取缓存状态报告 (buffer status report poll, BSRP) 的 Trigger 帧请求终端上报 BSR, 终端在 Trigger 帧分配的 RU 上反馈 BSR。Wi-Fi 6 还提供另一种可选机制, 无须获取终端的 BSR, 基于随机接入的竞争模式, 即上行基于 OFDMA 的随机接入 (uplink OFDMA-based random access, UORA) 过程。UORA 流程由 AP 发起, 发送 Trigger 帧携带用于随机接入的 RU, 即 RA-RU; 无线终端 (station, STA) 则维护一个内部的 OFDMA 竞争窗口 (OFDMA contention window, OCW) 和随机数 OBO (介于 0 到 OCW), 通过判断 OBO 与 RA-RU 数之间的关系, 判断是否随机接入成功, UORA 的接入过程具体流程如图 2 所示。

2.2 MU-MIMO

MU-MIMO 是基于多天线的多用户技术, 多个天线可以看作多个传输通道, 不同的传输通道可分配给不同的用户, 利用天线的空域资源与多个用户同时进行通信。Wi-Fi 6 在 Wi-Fi 5

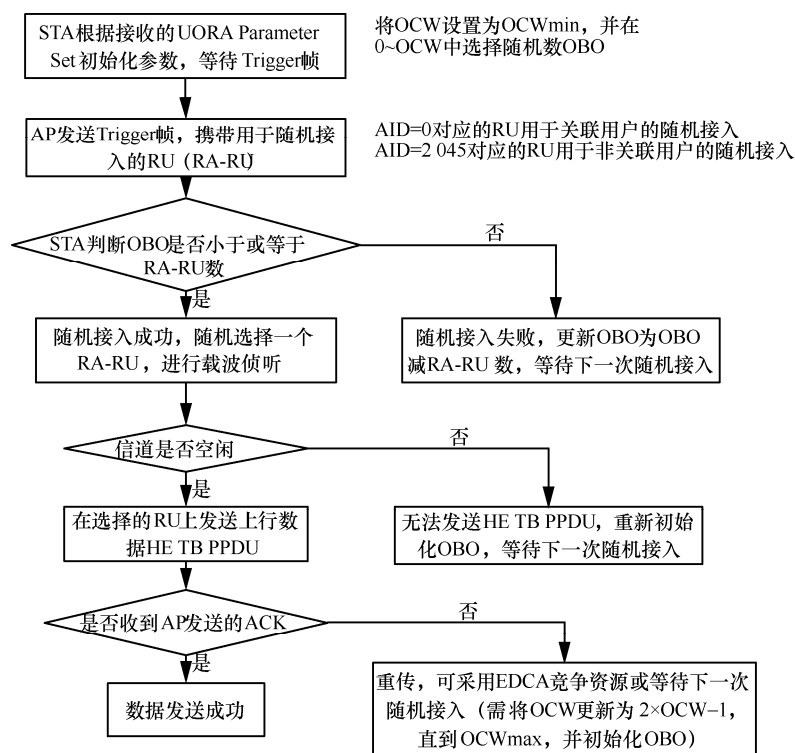


图2 UORA 的接入过程

的基础上, 新增上行 MU-MIMO, 由 AP 控制多个用户的空间流分配, 提升上行容量。同时, Wi-Fi 6 还提供了 MU-MIMO 与 OFDMA 叠加使用的可能, 对于大于或等于 106 子载波的 RU 均支持 MU-MIMO 复用, 单个 RU 内复用的空间流数不超过 8。MU-MIMO 与 OFDMA 同时使用, 需要 AP 和终端支持部分带宽 MU-MIMO。HE MU PPDU 的 HE-SIG-B 字段如图 3 所示,

说明 Wi-Fi 6 如何实现 MU-MIMO 与 OFDMA 叠加使用。

下行 MU-MIMO 采用 HE MU PPDU 进行发送, 上行 MU-MIMO 采用与上行 OFDMA 相同的 Trigger 机制。在下行 MU-MIMO 过程中, AP 需要获取信道状态信息 (channel state information, CSI), 基于 CSI 计算空间映射矩阵 (steering matrix), AP 使用 HE TB sounding (AP 发送类型为

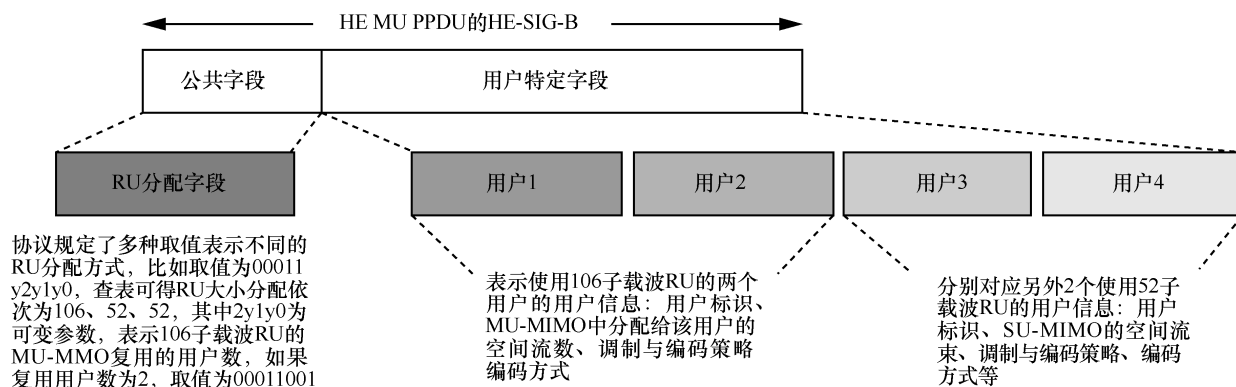


图3 HE MU PPDU 的 HE-SIG-B 字段



BFRP (beamforming report poll) 的 Trigger 帧, 终端使用 HE TB PPDU 反馈相应的 CSI) 流程请求多个终端同时反馈 CSI。

2.3 MU-RTS/CTS

为了解决隐藏节点问题, 引入 RTS/CTS 机制保护发送方和接收方的正常通信。在 Wi-Fi 6 之前, RTS/CTS 流程是双向的, 由数据发送方发起 (既可以是 AP 也可以是终端), 但只能是点对点的交互, 保护 AP 与单个终端 TXOP 的帧交互。Wi-Fi 6 允许多个用户并发通信, 因此引入 MU-RTS/CTS 机制, 保护 AP 与多个目标终端通信的 TXOP 的帧交互。该流程由 AP 统一管理并发起, AP 通过向多个目标终端发送类型为 MU-RTS 的 Trigger 帧, 请求多个终端同时反馈 CTS 响应 (通过 HE TB PPDU)。终端收到 MU-RTS, 经过 SIFS 时间间隔后, 进行载波侦听, 载波空闲时反馈 CTS。其他节点则根据 MU-RTS 和 CTS 帧中的 duration 更新网络分配矢量 (network allocation vector, NAV) 定时器, 并在定时器内保持静默。

2.4 运营模式指示

运营模式指示 (operating mode indication, OMI) 机制可用于 AP 和 STA 指示接收模式 (receive operating mode, ROM) 和发送模式 (transmit operating mode, TOM) 的变更。在 ROM 中包含两个参数用于修改 UL MU 操作: UL MU Disable 和 UL MU Data Disable, 即对 Trigger 帧的响应是否支持, 可以切换多用 UL OFDMA、UL MIMO 和单用户模式。

2.5 多用户技术应用场景分析

本次共介绍了 3 个 Wi-Fi 6 的多用户技术, 不同的技术适用的场景不同。OFDMA 技术不能提升物理速率, 而是通过频域向多个用户并发, 提升多用户通信时的效率, 其主要用于多用户小流量业务场景, 降低传输等待时延。MU-MIMO 与 OFDMA 应用场景不同, 主要用于提升多用户并发的吞吐性能, 在大流量传输场景更能体现其增益。同时, 标准允许二者同时使用, 可以满足更多样化的混合业务需求, 提升混合业务场景的多用户性能。MU-RTS/CTS 则用于保护多用户通信流程, 但其并不是必选流程, AP 可根据数据量或 TXOP 时长决定是否使用。

3 Wi-Fi 6 的并发用户能力

由于 Wi-Fi 6 支持 OFDMA 和 MU-MIMO 同时使用, 可以极大增加并发通信能力。当 RU 分配方式如图 4 所示时, 其理论的并发用户数可达到最大, 其中 106 子载波 RU 可以进行 MU-MIMO 复用, 最多可同时分配给 8 个 1 流用户, 因此, 可以计算得到各种工作带宽下理论的并发用户最大值。

20 MHz: $8+1+8=17$ 个用户;

40 MHz: $8+1+8+8+1+8=34$ 个用户;

80 MHz: $8+1+8+8+1+8+1+8+1+8+1+8=69$ 个用户;

160 MHz 和 80 MHz+80 MHz 为 2 个 80 MHz 的组合, 即 $69+69=138$ 个用户。

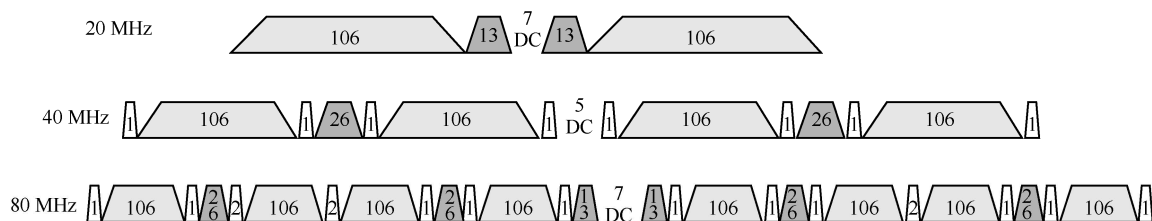


图 4 不同工作带宽下最大并发用户数的 RU 分配

4 多用户场景的通信流程

4.1 上行通信流程

Wi-Fi 6 中由 AP 控制多个终端同时进行上行数据发送, 因此, 先要获取 BSR 信息或者采用 UORA 流程, 随后 AP 根据各个终端的缓存情况分配 RU, 并下发 Trigger 帧 (类型为 Basic), 请求各终端同时发送上行数据 HE TB PPDU。在通信过程中, AP 可根据需要发起 MU-RTS/CTS 流程, 保护此次上行数据发送的 TXOP。

使用 Trigger 帧 (类型为 BSRP) 主动获取 BSR 信息或采用 UORA 流程作为先导的两种上行通信流程如图 5 所示。

(1) 场景一

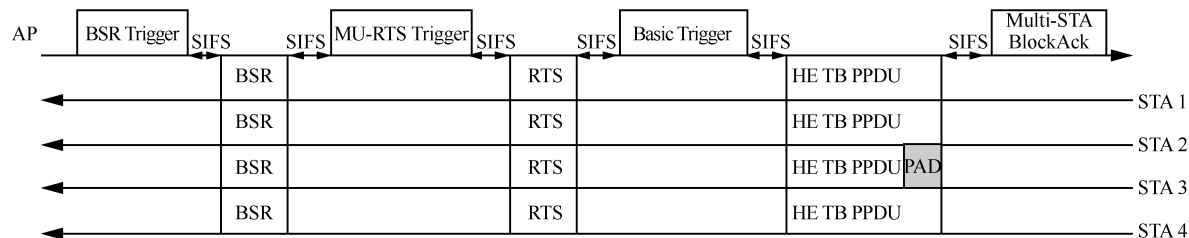
1) BSR 获取流程: AP 发送类型为 BSRP 的 Trigger 帧, 该 Trigger 帧中包含 4 个 STA (连接到无线网络的终端) 的 AID (association identifier, 终端标识) 信息及其分配的 RU, 4 个 STA 在分配的 RU 上发送 HE TB PPDU, HE TB PPDU 承载

至少一个 QoS Null frame, 该 QoS Null frame 至少包含 QoS Control field 和 BSR Control subfield 中的一个, QoS Control field 和 BSR Control subfield 包含当前 buffer 的队列大小, 且该 QoS Null frame 无须立即反馈 ACK。

2) MU-RTS/CTS 流程 (可选): AP 可根据数据大小或 TXOP 时长决定是否发起该流程, MU-RTS/CTS 与 BSR 获取的先后顺序, 标准未限定, 与 AP 实现相关。

3) 上行数据发送流程: AP 根据 STA 反馈的缓存情况, 决定 RU 分配方式, 并发送类型为 Basic 的 Trigger 帧, 该 Trigger 帧内包含 4 个 STA 的 AID 信息及其资源分配信息 (包括上行报文的时长、RU、编码、MCS、起始空间流及总空间流数等)。STA 收到 Trigger 帧后, 根据资源分配信息, 发送相应的上行报文 HE TB PPDU, 对于数据量发送不够的 STA, 需要填充至长度一致 (如图 5 中的 STA3)。AP 收到上行数据后, 通过 Multi-STA BlockAck (新引入的一种 BlockAck 类型, 同时携

场景一: 主动请求BSR上报



场景二: UORA

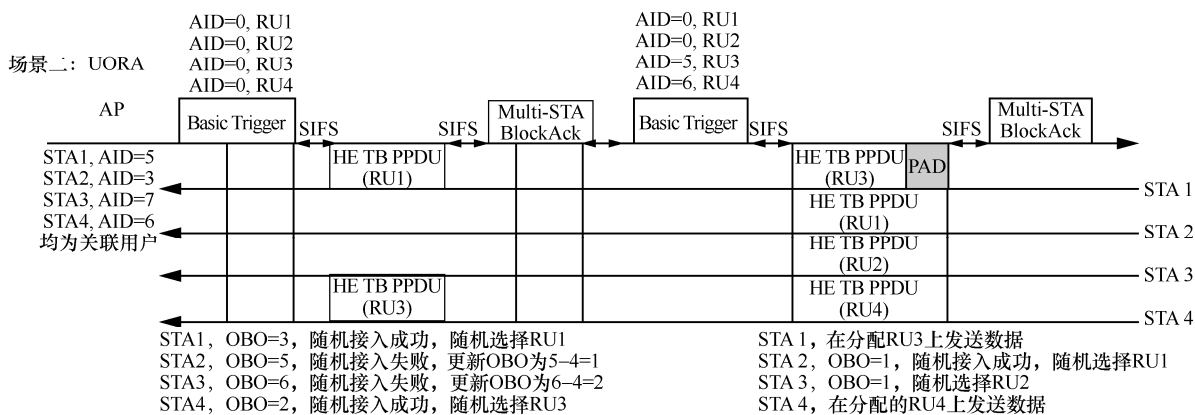


图5 Wi-Fi 6 的两种上行通信流程



带多个终端的 BlockAck 信息)同时给 4 个 STA 反馈 BlockAck。

(2) 场景二

1) AP 下发类型为 Basic 的 Trigger 帧, 包含 4 个用于关联 STA (AID=0) 随机接入的 RU。

2) STA1 初始 OBO=3, 小于 RA-RU 数, 随机接入成功并选择 RU1 发送数据; STA2 初始 OBO=5, 大于 RA-RU 数, 随机接入失败, 更新 OBO=5-4=1, 并等待下一次 UORA; STA3 初始 OBO=6, 大于 RA-RU 数, 随机接入失败, 更新 OBO=6-4=2, 并等待下一次 UORA; STA4 初始 OBO=2, 小于 RA-RU 数, 随机接入成功并选择 RU3 发送数据。

3) AP 收到上行数据后, 通过 Multi-STA BlockAck 同时给 STA1 和 STA4 反馈 BlockAck。

4) AP 下发类型为 Basic 的 Trigger 帧, 包含 2 个用于关联 STA (AID=0) 随机接入的 RU, 以及分配给 STA1 和 STA4 继续发送上行数据的 RU。

5) STA2 和 STA3 随机接入成功, 分别选择 RU1 和 RU2 发送上行数据, STA1 和 STA4 则在分配的 RU 上发送数据。

6) AP 通过 Multi-STA BlockAck 同时给 4 个 STA 反馈 BlockAck。

另外, 在场景二中同样也可以增加 MU-RTS/CTS 流程。

4.2 下行通信流程

在下行方向, AP 是通过 HE MU PPDU 向多

个终端同时发送数据, 并在该 PPDU 中携带类型为 MU-BAR 的 Trigger 帧请求多个终端同时反馈 BlockAck。对于 DL MU-MIMO, 还需要获取下行 CSI, 下行通信流程如图 6 所示。

(1) CSI 获取流程: 此过程为 DL MU-MIMO 场景所需, 不是每次数据发送过程中都需要, 由 AP 决定 CSI 的获取周期。AP 首先发送的 HE NDP Announcement 为 MAC 控制帧, 包含需要反馈 CSI 的目标 STA 标识、测量的频率位置、反馈的类型 (MU beamforming、SU beamforming、CQI) 以及测量涉及的参数; 经过一个 SIFS 间隔, 发送 HE sounding NDP, 为一个 HE SU PPDU, 该 PPDU 没有 Data 部分, 用于终端进行测量; 再经过一个 SIFS 间隔, 发送类型为 BFRP 的 Trigger 帧, 请求多个目标终端同时反馈 CSI; 终端在收到 BFRP Trigger 后, 在分配的 RU 上反馈 CSI。

(2) MU-RTS/CTS 流程 (可选): AP 可根据待发送的数据量或 TXOP 持续时间决定是否发起该流程。

(3) 下行数据发送流程: AP 发送 HE MU PPDU, 该 PPDU 中的 HE-SIG-B 字段包含各个用户的 RU 分配位置、STA 标识、MCS、空间流等信息; 同时为了请求多个 STA 同时反馈 BlockAck, AP 可以在 HE MU PPDU 中同时携带 MU-BAR Trigger; 各终端收到 PPDU 后, 在相应 RU 的频率位置解析其数据包, 并在 MU-BAR Trigger 中为其分配的 RU 上同时反馈 BlockAck。如果 PPDU 中不携带 Trigger 帧, 则各终端需要依

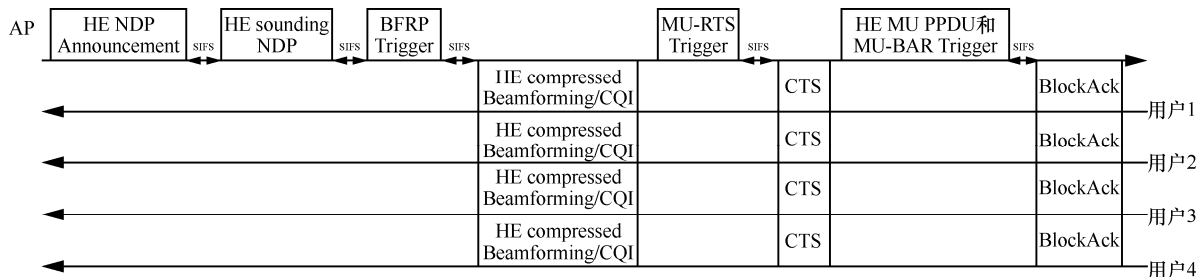


图 6 Wi-Fi 6 的下行通信流程

次竞争信道并反馈 BlockAck。

5 结束语

相对于前几代 Wi-Fi 技术, Wi-Fi 6 具备更高的传输速率、更大的并发容量、更低的传输时延, 这些提升使得其适合更多的应用场景, 既可以满足智慧家庭 4K/8K、AR/VR、网络游戏、智慧家庭智能互联等业务的高效承载, 也可用于学校、车站、商场、生产等高密并发场景。总之, Wi-Fi 6 技术将会是一次令人激动的无线技术革新, 为更多商业模型和应用场景提供了更有力的支撑, 也给人们带来前所未有的网络体验。

Wi-Fi 6 在多用户性能的增强是显著的, 通过 OFDMA 和 MU-MIMO 的引入以及叠加使用, 极大地增加并发用户数, 并降低通信时延, 满足不同业务的 QoS 需求。多用户技术引入后, 对 AP 的要求也越来越高, 无论上行还是下行, 资源分配、调度均由 AP 统一管理, AP 的功能进一步向移动基站靠拢。标准定义中只会定义 RU 资源分配的基本机制, 不会涉及具体分配的算法, 因此不同 AP 厂商的实现会有差异。同时, Wi-Fi 6 标准于 2021 年 2 月发布, 且 2019 年 Wi-Fi 联盟推出的 Wi-Fi 6 认证 1.0^[8], 也仅涵盖了 Wi-Fi 6 标准中部分技术特性的功能性验证, 不涉及 Wi-Fi 6 设备的性能评估, 因此, Wi-Fi 6 的多用户技术性能, 有待产品设备的功能进一步提升后通过试验进行合理评估。

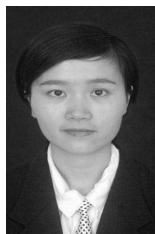
参考文献:

- [1] 凌毓. Wi-Fi 6 技术解读及其对 5G 发展的影响分析[J]. 信息通信, 2020, 33(2): 268-269.
- LING Y. Interpretation of Wi-Fi 6 technology and analysis of its impact on the development of 5G[J]. Information &

Communications, 2020, 33(2): 268-269.

- [2] IEEE P802.11. Proposed 802.11ax Functional Requirements: IEEE 802.11-14/1009r2[Z]. 2014.
- [3] 郑磊. Wi-Fi 6 与 5G 技术的性能对比与应用分析[J]. 科技创新导报, 2019, 16(16): 144-151.
- ZHENG L. Performance comparison and application analysis of WiFi6 and 5G technologies [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2019, 16(16): 144-151.
- [4] 高波, 潘毅明, 黄国瑾. 基于城域网的运营级 WLAN 组网技术[J]. 电信科学, 2015, 31(10): 199-203.
- GAO B, PAN Y M, HUANG G J. Technology of WLAN in operation level based on metropolitan area network[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(10): 199-203.
- [5] 一文带你彻底了解什么是 Wi-Fi 6[Z]. 2020.
- An article will give you a thorough understanding of Wi-Fi 6[Z]. 2020.
- [6] 赵辰, 李云洲, 许希斌, 等. 全双工 WLAN 的吞吐量性能分析[J]. 电信科学, 2016, 32(6): 83-92.
- ZHAO C, LI Y Z, XU X B, et al. Analysis of the throughput in full-duplex WLAN[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(6): 83-92.
- [7] 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 1: enhancements for high efficiency WLAN[Z]. 2019.
- [8] Wi-Fi ALLIANCE. Wi-Fi certified 6th test plan version 1.0. Wi-Fi alliance[Z]. 2019.

[作者简介]



王姣姣(1987—), 女, 中国电信股份有限公司研究院工程师, 主要研究方向为网络架构、协议、Wi-Fi 6 认证要求等。

邵震(1977—), 男, 中国电信股份有限公司研究院高级工程师, 主要研究方向为无线技术与多网协同。

黄国瑾(1984—), 男, 中国电信股份有限公司研究院工程师, 主要研究方向为 WLAN 技术与应用。