



综述

Wi-Fi 8—下一代无线局域网技术

戴星亚^{1,2}, 万国伟^{1,2}, 康凯¹

(1. 中国科学院上海高等研究院, 上海 201210;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了进一步降低无线保真 (wireless fidelity, Wi-Fi) 系统时延、提高系统可靠性, 新一代Wi-Fi技术——Wi-Fi 8 (IEEE 802.11bn) 的协议正在制定中, 预计于2028年正式发布并商用。Wi-Fi 8提出了多项新技术来满足用户对高可靠、大容量、低时延、高速率的需求。从Wi-Fi 8的协议草案入手, 深入介绍与分析了多接入点 (access point, AP) 协调技术、非主信道接入技术、动态子信道操作技术及降低传输时延等多项新技术, 并对新技术的演进方向进行了初步的分析与评估。最后, 对Wi-Fi 8的未来应用进行了展望。

关键词: Wi-Fi 8; 高可靠性; 低时延; 多接入点协调; 非主信道接入; 动态子信道操作

中图分类号: TN925

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2026013

Wi-Fi 8: the next generation of wireless local area network technology

Dai Xingya^{1,2}, Wan Guowei^{1,2}, Kang Kai¹

1. Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: In order to further reduce the delay and improve the reliability of Wi-Fi system, the protocol of the latest generation of Wi-Fi technology, Wi-Fi 8 (IEEE 802.11bn), is under development and is expected to be officially released and commercially available in 2028. Wi-Fi 8 proposes new technologies to meet users' needs for high reliability, large capacity, low latency, and high speed. Based on the Wi-Fi 8 protocol being formulated, many new technologies, such as multiple access point (AP) coordination technology, non-primary channel access technology, dynamic sub-channel operation technology, and reducing transmission delay were introduced and analyzed. Then, a preliminary analysis and evaluation of the evolution direction of the new technology was conducted. Finally, the future application of Wi-Fi 8 was expected.

Key words: Wi-Fi 8, high reliability, low latency, multi-AP coordination, non-primary channel access, dynamic sub-channel operation

收稿日期: 2025-04-02; 修回日期: 2025-06-26

通信作者: 康凯, kangk@sari.ac.cn

基金项目: 上海市浦东新区科技发展基金资助项目 (No. PKX2024-D01)

Foundation Item: Shanghai Pudong New Area Science and Technology Development Fund (No. PKX2024-D01)



0 引言

Wi-Fi是一种基于IEEE 802.11系列标准的无线局域网技术，Wi-Fi设备通过无线电波进行通信，实现设备间的数据传输和互联网访问^[1]。随着互联网技术的飞速发展，Wi-Fi已成为人们日常生活、工作和学习中不可或缺的组成部分。

根据无线宽带联盟（Wireless Fidelity Alliance, WFA）的研究，到2024年，Wi-Fi设备的累计出货量已达到459亿台，其中，约46%的设备正在使用中。2024年，Wi-Fi设备的年度出货量达到41亿台，同比增长约7%，2024年Wi-Fi设备经济贡献价值分布如图1所示，Wi-Fi在2024年为全球经济贡献的价值达到4.3万亿美元，到2025年，这一数值达到4.9万亿美元^[2]。在全球范围内，智能终端设备数量持续增长，各类应用场景对无线网络性能的要求不断提高，市场调查报告显示，未来几年，全球Wi-Fi市场规模将持续扩大。

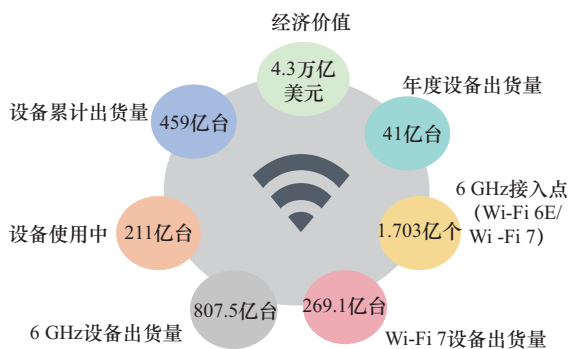


图1 2024年Wi-Fi设备经济贡献价值分布

持续增长的市场需求（年均7%的设备出货增长率）和万亿美元级的经济规模，为芯片制造商、设备厂商和标准组织提供了充分的研发动力和商业回报预期，促使各相关方加速推进Wi-Fi 8在吞吐量（目标100 Gbit/s）、时延（低于1 ms）和多用户并发等关键技术指标上的突破。在全球范围内，随着智能终端设备数量呈指数级增长，以及4K/8K视频传输、工业物联网（industrial In-

ternet of things, IIoT）、增强现实（augmented reality, AR）等新兴应用场景对网络性能要求的持续提升，这种持续扩张的应用场景与性能需求之间的动态平衡，正在从根本上重塑Wi-Fi技术的发展路径，使Wi-Fi 8的标准化进程和商用部署时间表较前代技术显著提前。

本文首先回顾了Wi-Fi技术的飞速发展历程；然后，重点介绍了Wi-Fi 8技术的标准化进展、技术特征与数项关键技术；最后，对Wi-Fi 8的前景与未来的应用进行了总结与展望。

1 Wi-Fi技术的发展历程

基于802.11系列协议的Wi-Fi技术，自1997年诞生以来迅速发展，在传输速率、频谱效率、安全性、密集组网方面取得了显著的进展。

1997年，第一代Wi-Fi正式发布，物理层使用直接序列扩频（direct sequence spread spectrum, DSSS）、跳频技术和红外线技术，最高传输速率为2 Mbit/s^[3]。

1999年，第二代Wi-Fi正式推出，包含802.11a和802.11b两种标准。802.11a工作在5 GHz频段，运用正交频分复用（orthogonal frequency division multiplexing, OFDM）技术，有效地减少了干扰，频谱资源丰富，最高传输速率可达54 Mbit/s。802.11b则工作在2.4 GHz频段，采用DSSS技术，最高传输速率提升至11 Mbit/s^[4]。

2003年，以802.11g为主要代表的第三代Wi-Fi正式发布。它工作在2.4 GHz频段，继承了802.11b的良好兼容性，同时采用了正交频分复用技术^[5]。在2.4 GHz频段，相较于第二代802.11b的11 Mbit/s，第三代802.11g的最高传输速率达到了54 Mbit/s，有了显著提升。

2007年，基于IEEE 802.11n的Wi-Fi 4问世，首次支持2.4 GHz和5 GHz双频段，通过多输入多输出（multiple-input multiple-output, MIMO）和40 MHz信道绑定技术，速率跃升至600 Mbit/s^[6]。

2013 年，基于 IEEE 802.11ac 的 Wi-Fi 5 被推出，仅在 5 GHz 频段运行^[7]。通过支持更高的信道带宽（160 MHz）、更高进制的调制方式、波束成形（beamforming, BF）技术以及下行多用户 MIMO（multi-user MIMO, MU-MIMO）技术，峰值速率达 6.9 Gbit/s。

2019 年，Wi-Fi 6 突破频段限制，同时支持 2.4 GHz、5 GHz 和 6 GHz 这 3 个频段，安全方面采用了 WPA3 安全协议，增强了网络安全防护能力；同时采用正交频分多址（orthogonal frequency division multiple access, OFDMA）、1024QAM 及个体目标唤醒时间（target wake time, TWT）等技术，调制方式高达 1024QAM 调制，最大传输速率为 9.6 Gbit/s^[8]。

2024 年 1 月，Wi-Fi 7（IEEE 802.11be）标准正式发布并逐步进入商用阶段，通过 320 MHz 带宽信道、4096QAM 及信道打孔操作、触发式传输机会（transmission opportunity, TXOP）程序和多链路操作（multi-link operation, MLO）等技术，理论峰值速率达 46 Gbit/s^[9]。

Wi-Fi 4 至 Wi-Fi 8 发展历程见表 1，总结了从 Wi-Fi 4 至 Wi-Fi 8 的发展过程中的重要迭代，其

中，MU-MIMO 技术，基站通过多天线，在同一频段同时向多个用户发送/接收数据，同时服务多个终端，提升网络容量和效率；MLO 是 Wi-Fi 7 的核心新特性，允许设备同时利用多个频段（如 2.4 GHz、5.0 GHz、6.0 GHz）传输数据，突破单频段带宽限制，动态分配流量到最佳频段，显著地提升了速度、降低了时延并增强了可靠性。从表 1 可以对比出每一代 Wi-Fi 的核心技术与参量的变化，这也说明了下一代 Wi-Fi 研究的重要性。为了应对未来无线通信需求的快速增长和支持新兴应用场景对数据容量、速率和传输时延的需求，新一代 Wi-Fi 技术 Wi-Fi 8 的研究与开发具有重要的现实意义。

2 Wi-Fi 8 技术

自 2020 年以来，随着 5G、物联网、人工智能等新兴技术的快速发展，现有 Wi-Fi 技术在传输速率、连接数量、时延等方面已无法满足日益增长的需求。为解决上述问题，2022 年 7 月起，IEEE 802.11bn 超高可靠性（ultra high reliability, UHR）工作组正式启动了 Wi-Fi 8 的标准协议制定工作，专门负责探索和开发提高无线局域网

表 1 Wi-Fi 4 至 Wi-Fi 8 发展历程

参数	Wi-Fi 4	Wi-Fi 5	Wi-Fi 6	Wi-Fi 7	Wi-Fi 8
对应 IEEE 标准	802.11n	802.11ac	802.11ax	802.11be	802.11bn
最大带宽/MHz	40	160	160	320	320
使用频段/GHz	2.4、5.0	5.0	2.4、5.0、6.0	2.4、5.0、6.0	2.4、5.0、6.0
空间流数	4	4	8	8	8
调制方式	64QAM	256QAM	1024QAM	4096QAM	4096QAM
最大速率	600 Mbit/s	6.9 Gbit/s	9.6 Gbit/s	46 Gbit/s	预期 100 Gbit/s
MU-MIMO	—	仅 DL	DL 和 UL	DL 和 UL	DL 和 UL
目标等待时间	—	—	Individual、broadcast	Restricted	Coordinated
OFDM（每个站点分配 RU 数目）	—	—	支持单个	支持多个	支持多个
MLO	—	—	—	支持	支持
多 AP 协调	—	—	—	—	支持

RL-SIG)、通用信号字段 (universal signal field, U-SIG)、超高吞吐量短训练字段 (ultra high reliability STF, UHR-STF)、超高吞吐量长训练字段 (ultra high reliability LTF, UHR-LTF) 和尾比特 (packet extension, PE) 组成。这种帧格式在多用户通信场景中发挥着重要作用, 它允许多个用户同时接收数据, 提高了传输效率。在一个办公室环境中, 多个设备 (如笔记本电脑、手机等) 可以同时通过 UHR MU PPDU 格式从接入点接收数据, 缩短了等待时间, 提升了网络的整体吞吐量。它支持多种调制和编码方案, 以适应不同的信道条件和传输需求。根据文档, UHR MU PPDU 的结构和参数由传输向量 (transmit vector, TXVECTOR) 参数决定, 其 FORMAT 参数取值为 UHR_MU^[11]。

UHR TB PPDU 帧格式如图 3 所示, UHR TB PPDU 格式用于在接收到携带触发帧的 PPDU 时, 传输单个 PSDU 作为响应, 与 UHR MU PPDU 帧结构不同之处在于将原本 8 μs 的 UHR-STF 分成了 2 个相同的大小为 4 μs 的 UHR-STF。在无线通信中, 当接入点发送触发帧后, 设备会以 UHR TB PPDU 格式进行响应, 确保数据传输的准确性和及时性^[11]。UHR TB PPDU 主要用于响应触发帧, 其格式设计使它能够特定的触发机制下高效地传输

数据。它在一些需要精确控制和响应的场景中非常重要, 比如工业自动化场景中, 设备需要及时响应控制指令, UHR TB PPDU 格式就能满足这种需求。同样, 其结构和参数也由 TXVECTOR 参数决定, FORMAT 参数取值为 UHR_TB。

UHR ELR PPDU 帧格式如图 4 所示, UHR ELR PPDU 格式专为增强长距离操作而设计, 用于传输单个 PSDU。UHR ELR PPDU 的帧结构与 UHR MU PPDU 的主要帧结构基本一致, 不同之处在于在原本的 UHR-STF 和 UHR-LTF 之间插入了一个大小为 8 μs 的极端长距离标记 (extreme long-range marker, ELR-MARK), 以及在原来的 UHR-LTF 与 Data 之间插入了一个大小为 28.8 μs 的极端长距离信号字段 (extreme long-range signal field, ELR-SIG)。该格式具有固定的 20 MHz 带宽, 旨在克服上行链路和下行链路之间的链路预算不平衡问题, 并提高远离 AP 的站点 (station, STA) 的频谱效率^[11]。在一些大型场所, 如仓库、工厂等, 设备与接入点之间的距离较远, UHR ELR PPDU 格式能够有效地提升信号传输的距离和稳定性。在 2.4 GHz 频段, 它可用于下行链路和上行链路, 而在 5.0 GHz 和 6.0 GHz 频段, 仅用于上行链路。其 FORMAT 参数取值为 UHR_ELRL。

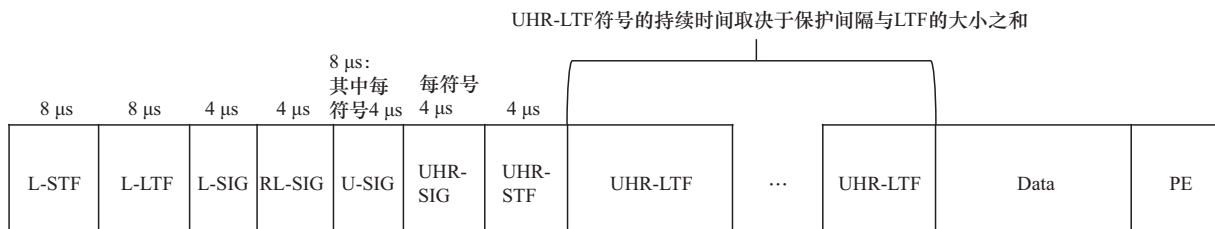


图3 UHR TB PPDU 帧格式



图4 UHR ELR PPDU 帧格式

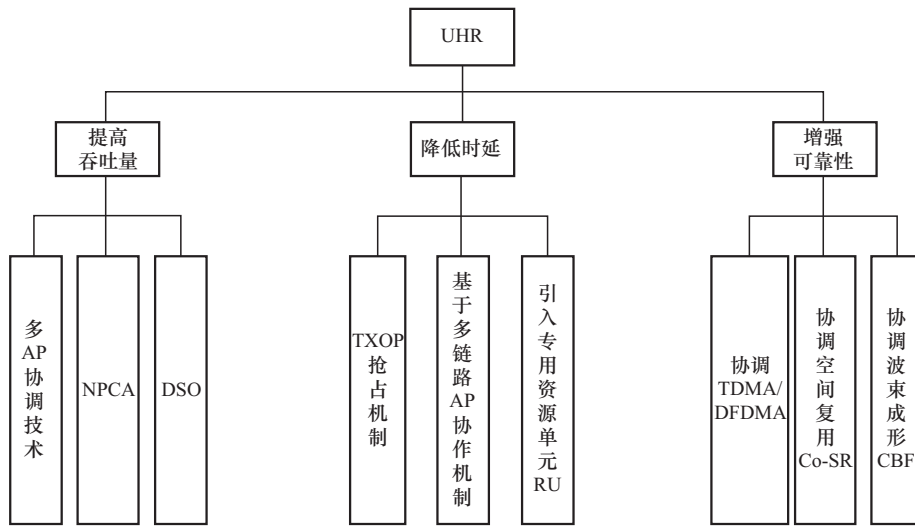


图5 Wi-Fi 8 UHR研究关键性技术

每一代Wi-Fi版本更新都会通过增加频宽、频道数量以及引入全新的编码调制等方式，不断提升Wi-Fi的数据传输速率。然而，Wi-Fi 7的最高速率已高达46 Gbit/s，因此，Wi-Fi联盟并不打算再提高理论速率，而是专注于改善实际性能和增强连接可靠性的新功能。

在传输技术的底层，Wi-Fi 8 (802.11bn) 与Wi-Fi 7 (802.11be) 近乎相同，同样具备2.4 GHz、5.0 GHz和6.0 GHz频段，相同的4096QAM编码、8个空间流、支持MU-MIMO、多重OFDMA，以及最高320 MHz的频道带宽。

相比于Wi-Fi 7，Wi-Fi 8会引入全新的多接入点协调 (multi-access point coordination, MAPC) 技术、非主信道接入 (non-primary channel access, NPCA) 技术、DSO等技术，Wi-Fi 8 UHR研究关键性技术如图5所示。Wi-Fi 8与Wi-Fi 7差异对比见表2，主要目的是改善实际传输性能、降低时延、提升吞吐量和可靠性。

在未来，Wi-Fi 8也会应用到更多新的场景，如沉浸式通信 (增强现实和虚拟现实)、工业互联网、远程医疗以及自动驾驶等。这些应用对网络的延迟、吞吐量和可靠性提出了更高的要求，从而推动了Wi-Fi 8的发展。

表2 Wi-Fi 8与Wi-Fi 7差异对比

特征	Wi-Fi 7	Wi-Fi 8
核心目标	高吞吐量	超高可靠性 (UHR)
新技术	多链路操作 (MLO)	多AP协同、DSO、非主信道接入
应用场景	家庭/企业高速网络	工业自动化、扩展现实、远程医疗
标准化进程	已商用 (2024年)	标准制订中 (预计2028年商用)

2.1 多AP协调技术

多AP协调是Wi-Fi 7及后续Wi-Fi 8网络发展中的关键技术^[12]，旨在解决Wi-Fi网络在高密度部署场景中面临的诸多问题，多AP协调示意图如图6所示，通过优化AP间资源共享与传输协调，提升网络整体性能。

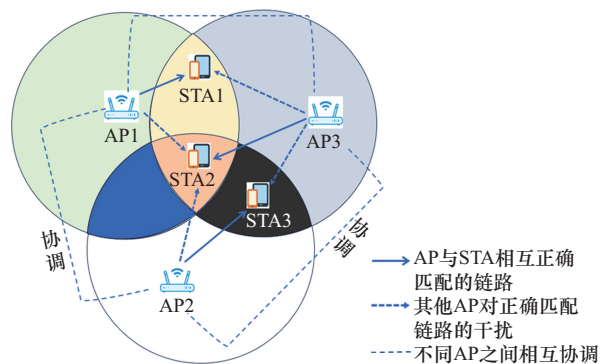


图6 多AP协调示意图

随着 Wi-Fi 技术的迅速发展，在办公室或家庭中，终端同时收到几个或者十几个 AP 的覆盖信号。AP 密集化分布也带来了不少问题。

(1) AP 间的高竞争与干扰。随着 AP 的密集化部署，有限的频率信道导致 AP 间的竞争和干扰加剧。众多 AP 在相同频段工作，易产生冲突，影响网络服务的可靠性和稳定性。传统的 Wi-Fi 机制在这种高密度环境中，无法有效地协调 AP 间的传输，导致网络性能下降。

(2) 传输协调机制缺失。在多 AP 环境中，缺乏有效的协议来协调重叠 AP 的传输，也没有相应机制判断哪些 AP 可同时传输以利用空间复用机会，以及如何为每次协调传输分配这些兼容的 AP。这使 AP 间的协同工作效率低下，无法充分发挥多 AP 网络的优势。

Wi-Fi 7 首次提出多 AP 协调的概念，但因复杂性，实际功能实现被推迟到 Wi-Fi 8。从 Wi-Fi 7 到 Wi-Fi 8，多 AP 协调在核心技术、协调机制、资源分配策略以及实际应用效果等方面都有了显

著的区别和提升，Wi-Fi 7 与 Wi-Fi 8 多 AP 协调技术区别与联系对比见表 3。

Wi-Fi 8 中的多 AP 协调方案预计利用无线和有线信号，这些方案的范围从基本到高级，具体取决于接入点之间必须交换的数据量及实现复杂性^[13]。多 AP 协调主要对以下 4 方面进行研究^[14]：协调时分复用（coordinated time division multiple access, C-TDMA）和协调正交频分复用（coordinated orthogonal frequency division multiple access, C-OFDMA）、协调空间复用（coordinated spatial reuse, Co-SR）和协调波束成形（coordinated beamforming, Co-BF）。

C-TDMA 和 C-OFDMA 技术^[15]是两种分别利用时域和频域的基本方法，在 Wi-Fi 网络中，为解决信道接入竞争和提高通信可靠性，C-TDMA 通过将传输机会划分为多个时隙，按顺序分配给不同 AP，让各 AP 在不同时隙进行传输，减少冲突；C-OFDMA 通过为不同 AP 分配不同的频段资源^[16]，让它们能同时传输数据，减少等待信道空

表 3 Wi-Fi 7 与 Wi-Fi 8 多 AP 协调技术区别与联系对比

参数类别	参数	Wi-Fi 7 (802.11be)	Wi-Fi 8 (802.11bn)
多 AP 协调核心技术	多链路操作 (MLO)	支持，通过 2.4 GHz/5.0 GHz/6.0 GHz 多频段聚合提升速率	继承支持，优化频段聚合管理与切换机制
	多资源单元分配 (Multi-RU)	支持，划分子信道资源单元减少设备竞争	继承并优化，支持更精细化的 RU 动态分配策略
	协调空间重用 (Co-SR)	无	新增，通过调整 AP 发射功率与速率，优化频谱利用，降低 AP 间干扰
	协调波束成形 (Co-BF)	无	新增，多 AP 协同定向发送信号，提高目标设备覆盖质量
	动态子信道操作 (DSO)	无	新增，根据设备需求动态分配子信道，提升资源使用效率
资源调度机制	调度模式	以集中式调度为主，主 AP 统一管理资源	引入分布式 OFDMA 调度 (DOS)，支持集中+分布式混合调度
	非主信道接入 (NPCA)	无	新增，保障高优先级业务同时，兼顾低优先级业务资源公平性
干扰管理能力	同频干扰处理	依赖 CSMA/CA 信道竞争规避机制	结合 Co-SR 等技术，系统性优化 AP 间干扰协调
	高密度场景适配	支持但协调能力有限	通过 Co-SR、Co-BF 等技术，显著提升高密度场景吞吐量与稳定性
效果	实际效果提升	吞吐量提升 30%+ (实验室环境)	Co-SR 提升 15%~25% 系统吞吐量，Co-BF 提升 20%~50% 设备吞吐量，DSO 单独使用提升 80% 吞吐量



闲的时间, 进而降低数据传输时延, 通过共享 AP 有效地分配资源, 了解相邻 AP 的信道状况 (比如信道是否拥堵、信号强度等) 和缓冲区状态 (有多少数据等待发送), 再根据这些信息进行复杂的计算, 合理地给各个 AP 安排传输时间和频段资源。C-OFDMA 作为一种多接入点协调机制, 允许 AP 之间共享频率资源, 以提高频谱利用率和网络性能。

在 Co-SR 技术中, AP 通过协同控制各自的发射功率, 实现并发传输, 进而提高整个区域的吞吐量^[17], Co-SR 工作原理过程如图 7 所示。在无线网络环境中, 传统的 802.11ax 空间复用机制下, 一个 AP 以最大功率传输时, 其他 AP 必须相应降低功率, 这可能导致部分 AP 的信号干扰比不理想, 影响传输效率。而 Co-SR 技术使 AP 之间相互协作, 共同调节发射功率。这样一来, 各个 AP 能够在同一时间进行数据传输, 也就是并发传输^[18]。多个 AP 同时工作, 充分利用了空间资源, 减少了传输等待时间, 最终使整个区域内的数据传输总量增加, 即提高了总吞吐量。Co-SR 技术的优势在于, 一方面优化了信号干扰加噪声比, 传统的 802.11ax 空间复用技术下, AP 间功率调整不合理, 使部分接收端的信噪比 (signal-to-interference plus noise ratio, SINR) 不佳。Co-SR 通过 AP 间协调发射功率, 保障了所有接收端 STA 能获得足够的 SINR, 提升了信号质量。另一方面, 与 C-TDMA 和 OFDMA 不同, Co-SR 能在相同的时间和频率资源上实现并行传输。这意味着数据可以同时多个 AP 间传输, 而不需要像 C-TDMA 那样分时传输, 或者像 C-OFDMA 那样划分不同频段传输, 从而提高了吞吐量, 减少了数据在队列中的等待时间, 降低了排队时延。

来自诺基亚贝尔实验室的 Nunez 等在由 4 个接入点组成的密集无线局域网场景中, 对 IEEE 802.11bn 协议下的 Co-SR 机制展开探究^[19]。通过

基于分布式协调功能的信道接入和 AP 间通信实现多 AP 协同传输, 并利用 Bianchi 模型分析性能。研究表明, 在不同 AP 间距离和站点位置条件下, Co-SR 可使吞吐量提升 73%~284%, 显著地优化了频谱资源利用并增强了网络性能, 展示了 Co-SR 技术在提升系统传输吞吐量方面的突出效果。

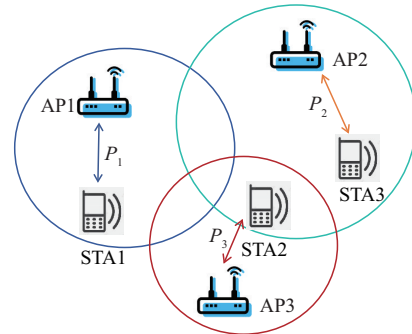


图7 Co-SR 工作原理过程

Co-BF 主要基于空间域特性, AP 通过调整自身波束方向和接收信号的处理方式, 优化信号的传输和接收效果^[20], Co-BF 工作原理示意图如图 8 所示。例如, AP 可以控制发射信号的相位和幅度, 使信号在特定方向上增强, 而在其他方向上减弱。在接收端, AP 也可以利用类似的技术, 增强有用信号, 抑制干扰信号。在无线网络中, 不同的基本服务集 (basic service set, BSS) 可能相互重叠, 导致干扰。重叠基本服务集 (overlapping basic service set, OBSS) 指的是那些与特定 AP 没有关联的其他 BSS。Co-BF 通过多个 AP 的协作来应对这种干扰。多个 AP 之间相互协调, 共同调整波束方向, 避免向 OBSS 中的设备发送干扰信号, 同时也增强对自身服务设备的信号传输能力。多天线 AP 拥有空间自由度, 这意味着它可以在空间中以不同方式发送和接收信号。Co-BF 技术使 AP 能够充分利用这一特性, 一方面通过空间复用技术, 同时与多个自身服务的 STA 进行通信, 提高通信效率; 另一方面, 在与相邻非关联 STA 的信号交互方向上形成辐射零陷, 减少相互之间的干扰。

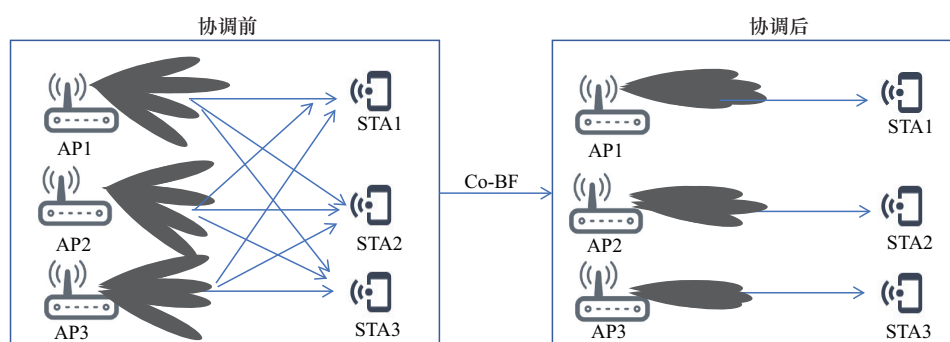


图8 Co-BF工作原理示意图

Shen 等^[21]针对密集毫米波网络中 IEEE 802.11ay 协议下波束成形开销大、网络容量受限的问题,提出了一种新型 Co-BF 方案。该研究在由 12 个 AP 组成的三维城市宏蜂窝场景(包括大学中庭、学生中心和走廊等环境)中,基于不确定性概念预测需更新波束信息的 AP 子集,并利用 AP 不确定性进行干扰感知调度以创建 MU-MIMO 组。实验和仿真结果表明,Co-BF 方案可显著降低波束成形开销,与传统方案相比,网络吞吐量提升 30.8%,BF 开销减少 71%;在 802.11ay 仿真场景中,结合 MU-MIMO 时平均吞吐量最高可达传统方案的 5.5 倍,同时 BF 开销降低到传统方案的 23.8%,验证了 Co-BF 技术提升吞吐量和降低开销的有效性。

多 AP 协调的核心技术之间各有不同的特点,也有不同的使用场景,见表 3,是对它们之间的对比。Wi-Fi 8 的多 AP 协调技术通过 C-TDMA、C-OFDMA、Co-SR 和 Co-BF 的协同应用,实现了时间、频率、空间和波束的多维度优化。这些技术可根据场景需求灵活组合,显著地提升了高密度、高可靠性场景中的网络性能,为工业自动化、智慧城市、自动驾驶等新兴应用提供支撑。随着标准化的推进和设备的普及,未来多技术协同将成为 Wi-Fi 8 的核心竞争力。

C-TDMA 与 C-OFDMA 相互结合。C-TDMA 划分时隙, C-OFDMA 在每个时隙内分配正交子载波,实现时间和频率资源的双重协调。在工业

自动化中,周期性数据传输可通过 C-TDMA 保证时延,同时利用 C-OFDMA 支持多设备并发,提升效率。这样不仅减少了资源冲突,而且提高了频谱利用率,适用于对时延和吞吐量要求均高的场景。

Co-SR 与 Co-BF 也能在一定场景中结合。Co-SR 通过动态调整 AP 的发射功率和传输时机,减少同频干扰;Co-BF 利用多天线阵列形成定向波束,增强目标设备信号强度。两者结合可在高密度环境中显著地提升吞吐量和覆盖范围,例如,在大型公寓楼或办公区中,多个 AP 可以通过 Co-SR 避免干扰,同时利用 Co-BF 精准覆盖边缘设备。这样在减少干扰的同时增强了信号强度,还提升了网络整体性能。

C-TDMA 和 Co-BF 可以实现基于波束增强的时隙调度结合。C-TDMA 将信道划分为周期性时隙,每个 AP 在专属时隙内传输数据,避免冲突。同时在 C-TDMA 时隙内,Co-BF 为每个 AP 分配波束方向,AP 利用多天线阵列形成定向波束,精准指向目标设备,精准覆盖目标设备,结合波束零陷技术,抑制其他时隙的干扰。还可以通过引入强化学习算法,根据实时业务负载、信道质量和设备位置,动态地调整 C-TDMA 时隙分配和 Co-BF 波束方向与零陷位置。这种结合可以使边缘设备速率提升 2~3 倍,覆盖范围扩展 40%,支持低时延、高可靠的实时应用(如远程手术、自动驾驶等)。AP 协调核心技术对比见表 4。



表4 AP协调核心技术对比

技术	协调时分复用 (C-TDMA)	协调正交频分复用 (C-OFDMA)	协调空间复用 (Co-SR)	协调波束成形 (Co-BF)
原理	通过时间划分协调多个 AP 的传输时序	将频谱划分为正交子载波, 动态分配子载波给不同 AP, 实现频域隔离	通过调整 AP 发射功率或空间参数, 允许多 AP 在同一频段并发传输	多 AP 联合调整波束方向, 聚焦信号至目标设备, 减少跨 AP 干扰
资源维度	时间	频率	功率 + 空间	空间
核心机制	集中控制器分配固定或动态时隙, AP 在指定时间段独占信道	集中控制器动态分配子载波资源 (如 OFDMA 的 RU), 支持多 AP 并发传输	多 AP 协商降低发射功率, 使信号在远端被视作噪声, 实现同频段并发传输	多 AP 联合计算波束成形矩阵, 通过空间零陷技术抑制干扰
适用场景	低时延确定性通信 (工业控制) 周期性数据传输 (传感器网络)	高密度客户端环境 (体育场馆、会议中心) 带宽敏感型应用 (4K/8K 视频流)	多 AP 覆盖的密集环境 (公寓、办公区) 需要提升同频段吞吐量的场景	定向覆盖需求 (扩展现实 (extended reality, XR) 设备、智能工厂) 高干扰环境 (邻近 AP 信号重叠)
优点	确定性时延保障避免时间冲突	提升频谱利用率支持细粒度资源分配	提升同频段并发传输能力减少频谱碎片化	精准信号覆盖显著抑制跨 AP 干扰
缺点	时隙分配可能降低频谱利用率需要严格时钟同步	子载波分配复杂度高对信道状态信息依赖性强	功率调整可能影响覆盖范围需要实时跨 AP 协商	计算复杂度高 (需联合波束成形) 依赖多天线硬件支持

2.2 非主信道接入技术

IEEE 802.11 标准在带宽容量上不断演进, 从 IEEE 802.11a 的 20 MHz 发展到 IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) 的 320 MHz, 但由于主信道繁忙时次信道利用不足, 带宽潜力未充分发挥。尽管 IEEE 802.11be 标准支持次信道通信, 但在主信道拥塞时 AP 如何通过次信道传输数据等关键实施方面仍未解决, Wi-Fi 8 最新提出的非主信道接入技术^[22], 着力提升高带宽情况下的信道利用率, 进而提升网络传输速率。

在 Wi-Fi 的协议中, 会指定信道带宽中的一个 20 MHz 带宽作为主信道, 剩余的所有带宽为非主信道。每个用户接入时, 都会使用包含主信道的信道接入, 当主信道繁忙时, 其他用户就会认为整个信道是繁忙的, 需要等待下次接入。在 Wi-Fi 7 中, 最大信道带宽已达 320 MHz, 但是并不是所有的终端用户都支持 320 MHz。此时, 当一个 20 MHz 带宽用户接入时, 剩余的 300 MHz 带宽将不能被使用, 这样会显著降低信道利用率。在这种场景中, 假设每种带宽的用户数量是相同的 (如 80 MHz 带宽场景中, 20 MHz 带宽用户:40 MHz 带宽用户:80 MHz 带宽用户 = 1:1:1), 不同带宽情况下信道利用率和相对损失见表 5,

可以观察到, 随着带宽的增大, 信道利用率不断降低。

表5 不同带宽情况下信道利用率和相对损失

信道带宽	20 MHz	40 MHz	80 MHz	160 MHz	320 MHz
信道利用率	60.000%	45.000%	35.000%	28.125%	23.250%
信道利用率的相对损失	0	25.000%	41.670%	53.130%	61.250%

NPCA 技术是在 Wi-Fi 7 的基础上发展起来的, 主要目的是更高效地利用无线频谱资源。传统的信道接入技术遵循 IEEE 802.11 标准的无线设备使用载波侦听多路访问与冲突避免 (carrier sense multiple access with collision avoidance, CSMA/CA) 协议通信^[23], 主信道和次级信道只能同时接入; 在主信道忙时, 次级信道空闲也不可再接入, 信道选择不灵活, 导致频谱资源利用率不高, 尤其是在如今拓展到 320 MHz 的情况下。80 MHz 带宽下传统信道接入示意图如图 9 所示, 当带宽为 40 MHz 的用户 1 接入时, 只能同时占用 20 MHz 主信道和 20 MHz 的次级信道, 剩余的 40 MHz 带宽空闲也不能接入其他用户。

NPCA 接入机制, 就是当主信道忙时, 次级信道空闲可接入。80 MHz 带宽下 NPCA 示意图如图 10 所示, 当用户 1 占用 40 MHz 带宽信道资

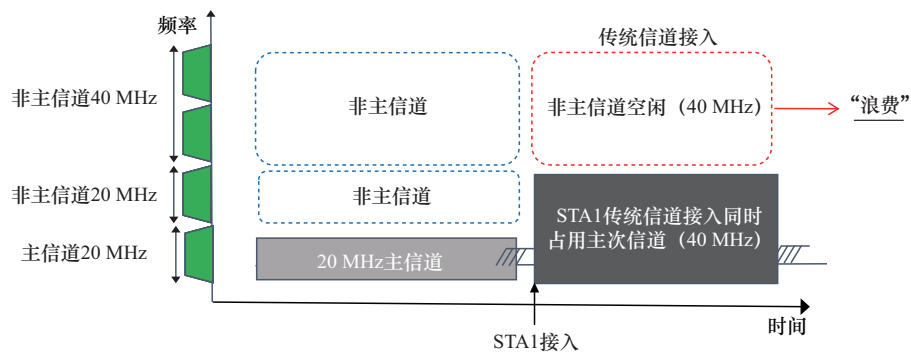


图9 80 MHz带宽下传统信道接入示意图

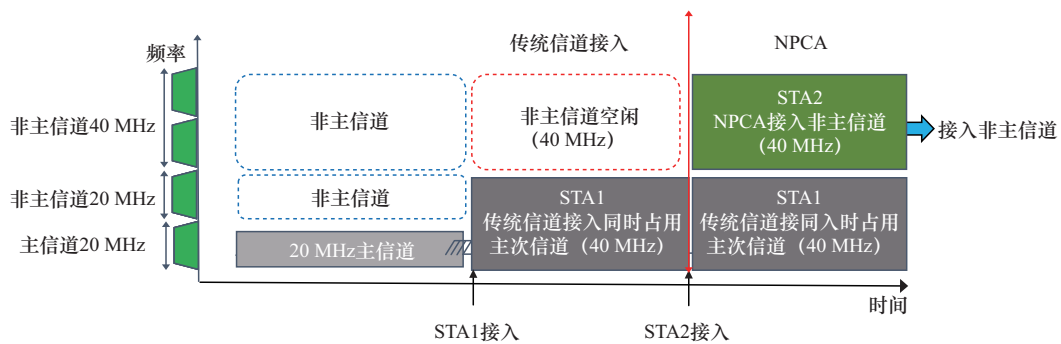


图10 80MHz带宽下NPCA示意图

源时，只能同时占用 20 MHz 主信道和 20 MHz 的次级信道。剩余空闲的 40 MHz 非主信道在带宽足够接入其他用户时，可在接下来的时隙接入用户 2，充分利用剩余空闲带宽。

NPCA 工作流程如图 11 所示，首先用户接入前检查主信道是否空闲，如果主信道空闲即采用 CSMA/CA 完成主信道（primary channel, PCH）接入，同时在用户接入后开始检查后面的时隙是否有用户接入，如果没有，直至接入主信道的用户传输完成，信道由该用户占据；如果主信道已经被占用，此时检查除去主信道占用之外的非主信道（secondary channel, SCH）带宽是否充足，是否足够提供其他的用户接入，如果满足条件，启用 NPCA 让该用户接入非主信道，如果在此期间还有其他用户有需求，剩余带宽仍然满足用户带宽，那么就可以实现多个用户接入非主信道，显著地提高了信道利用率，增加了信道的吞吐量。

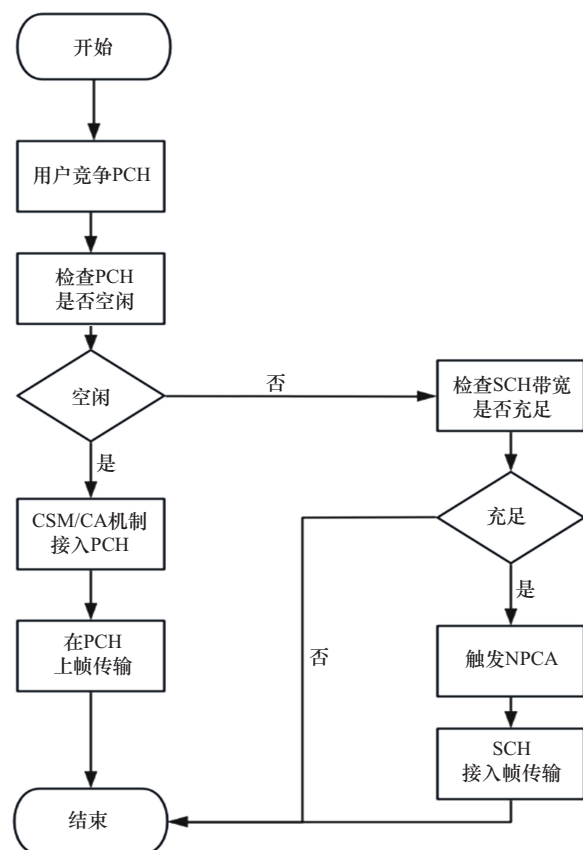


图11 NPCA工作流程



来自美国华盛顿大学的 Wei 等^[24]针对 IEEE 802.11 标准中主信道繁忙时次信道无法被有效利用导致带宽浪费的问题,对 IEEE 802.11 UHR 组定义的非主信道接入协议展开研究。该研究构建了一种新颖的分析模型,用于评估 NPCA 协议在平均吞吐量和时延方面的性能。结果显示, NPCA 网络在主信道繁忙时表现更优,相比 Wi-Fi 6 中传统网络平均吞吐量至少提升 50%,平均时延至少降低 40%。该研究为 IEEE 802.11bn 中 NPCA 的实现提供了分析见解,证实了 NPCA 在优化信道利用、提升网络性能方面的有效性。

当前,各大公司针对 NPCA 的细节开展了广泛的讨论。

(1) NPCA 的触发条件机制。为了精确控制 NPCA 的触发,使其在合适的场景下启动,避免不必要的切换,同时满足不同部署场景和设备的需求。

当主信道被占用时, AP 和终端设备可以切换到非主信道继续通信,避免“干等”。但直接切换可能导致混乱,如频繁跳频或信号干扰。因此,需要一套触发机制,明确“什么时候切换?切换到哪?切换多久?”等问题。触发机制的作用类似于交通信号灯:只有满足特定条件(比如主信道被占用时间较长、占用者有其他网络的设备),才会触发切换,确保网络高效且稳定。触发机制主要分为规范定义的硬性条件、AP 自定义的灵活条件(按需配置)、终端设备的个性化条件(按终端能力)这 3 类^[25]。

① 规范定义的硬性条件

规范定义的触发规则,这是 IEEE 标准强制要求的基础条件,确保所有设备统一遵守,避免混乱,核心是判断主信道是否被其他网络长期占用,且占用者身份是否合法。占用时长是否达标可以通过检测主信道被占用的时间是否超过阈值(例如,邻居 AP 在传输一个长达 10 ms 的视频流)来判断,超过阈值时才会触发切换。设置阈值的

目的是避免频繁切换,保持网络稳定,防止误判,确保切换的合理性。如果主信道被短暂占用(例如,邻居 AP 发送一个 1 ms 的确认帧(acknowledgement, ACK)确认帧)就立即切换信道,会导致 AP 和终端设备像“无头苍蝇”一样频繁跳频,反而增加网络时延和信令开销。通过设置时间阈值(例如,主信道被占用超过 5 ms 才切换),确保只有真正需要切换的场景才会触发。例如,当相邻 AP 发送一个长达 10 ms 的视频流,只有超过阈值才会触发切换,而短控制帧(如 1 ms 的信标帧)不会触发切换。对于高效增强版(high efficiency plus, HE+)格式的 PPDU,当网络分配矢量(network allocation vector, NAV)时长加上 PPDU 时长,再减去时间判断点的结果大于特定阈值时, NPCA 的信道切换将被触发。这一规则旨在确保当主信道上的传输活动预计会持续较长时间,且超过设定的阈值时,设备能够及时切换到非主信道,以充分利用空闲的次信道资源。

② AP 自定义的灵活条件

AP 自定义的灵活条件即 AP 可以根据实际场景灵活调整,对 NPCA 的触发条件进行个性化配置,避免“一刀切”情况的出现。例如,在高密度公寓中,邻居 AP 频繁发送短控制帧,如果每次都切换信道,反而会降低效率^[25]。就像生活中交警(AP)根据路口实际情况调整规则:“早高峰禁止切换备用车道,晚高峰仅允许因大货车占道切换,且货车长度需超过 5 m”。通过自定义条件,一方面可以排除短时占用,不因相邻 AP 的短控制帧(如 1 ms 的信标帧)触发切换;另一方面还可以动态地调整信号的强度限制,仅当干扰信号强度足够大(如相邻 AP 信号强度 > -70 dBm)时才切换。同时还可以自定义进行时段限制,例如,在特定时段(如晚上 10 时后)禁用 NPCA,避免与智能家居设备冲突,提高利用率。

③ 终端设备的个性化条件

终端自定义条件是 Wi-Fi 8 中 NPCA 机制的核

心设计之一,本质是让终端设备(如手机、XR头显、IoT设备等)根据自身硬件能力、业务需求或共存限制,主动向AP声明“我在什么情况下允许或禁止信道切换”^[26]。终端自定义条件的意义在于Wi-Fi网络中的设备千差万别,例如,硬件差异,老旧设备可能仅支持20 MHz带宽,无法利用备份信道的宽频资源;业务需求,XR设备需要低时延,而智能电表更关注稳定性;无线共存,手机同时使用蓝牙耳机时,须避免Wi-Fi信道切换导致信号冲突。通过终端自定义条件可以进行个性化适配:使不同设备按需选择切换策略,避免“一刀切”导致的性能损失。同时还可以规避冲突:解决多无线电设备(如Wi-Fi与蓝牙)的信号干扰问题。就像餐厅允许顾客自定义菜单——有人不吃辣(硬件限制),有人赶时间(低时延需求),厨师(AP)根据需求调整菜品(信道切换策略)。当然,这3类条件也有优先级:规范条件>AP条件>终端条件,必须先满足规范条件,再检查AP和终端的自定义规则。当发生冲突时,若AP禁止切换,即使满足规范和终端条件,也不触发NPCA。若终端声明不可用,即使AP允许切换,终端也不会响应。

(2) 主信道被频繁占用,导致频繁切换的问题。无线网络环境中,当多个BSS相互重叠时,基于TWT的服务时段(service period, SP)内,主信道常被其他OBSS频繁占用。在这种情况下,若采用基于传输机会的NPCA,设备会因主信道状态频繁变化而在主信道和非主信道间切换,造成在切换过程中大量的时间浪费,还会因反复进行信道探测、同步等操作,消耗额外网络资源,导致网络效率显著降低^[27]。

提出的基于SP的NPCA方案,为解决上述问题提供了有效的途径。在OBSS TWT SP期间,BSS持续监测主信道,一旦检测到符合特定条件的OBSS PPDU,便立即切换到非主信道。这些特定条件可能包括PPDU来自特定的OBSS、

PPDU的某些特征符合预先设定的规则等。BSS切换到非主信道后,会在此信道持续进行数据传输、接收等操作,直至OBSS TWT SP结束,然后再切回主信道。为减少同频干扰,切换时建议选择与当前OBSS传输信道不相邻的非主信道。相邻信道的信号容易相互干扰,导致信号质量下降、传输错误增加。选择不相邻信道可降低这种干扰,保障数据传输的稳定性和可靠性^[28]。在实际应用场景中,如大型商场或写字楼,多个BSS在同一区域工作,OBSS TWT SP期间主信道竞争激烈。采用基于SP的NPCA方案,BSS可快速地切换到合适的非主信道,在整个SP内稳定通信,避免了主信道频繁被占用导致的频繁切换。

该方案能显著地减少OBSS TWT SP期间的频繁切换。减少切换意味着节省了切换过程中的时间开销,如信道探测、同步等操作所需时间。这使设备能将更多时间用于实际数据传输,从而提高信道利用率。降低干扰提高了数据传输的稳定性和可靠性,减少了信号干扰导致的重传,进而提升了网络在主信道频繁被占用的场景中的整体性能。减少频繁切换也避免了反复切换造成的网络时延和资源浪费,为用户提供更稳定、更高效的网络服务。

2.3 动态子信道操作技术

动态子信道操作技术可根据设备功能和需求动态地分配子信道,显著提升数据吞吐量^[29]。在Wi-Fi 8中,动态子信道操作技术能分析每个设备支持的最大数据速率、当前网络负载等因素,将高速率子信道分配给对速度要求高的设备,低速率子信道分配给需求较低的设备,以提高整体数据传输速率,DSO信道分配示意图如图12所示。在家庭或办公等多设备连接Wi-Fi的场景中,DSO技术发挥着关键作用。DSO根据设备实时需求动态地调整子信道分配,保障每个设备获得合理的网络资源。当有设备进行高清视频播放或在线游



戏等对带宽要求高的业务时，DSO为其分配更多、更优质的子信道；对于进行网页浏览或消息推送等简单业务的设备，则分配相对较少的子信道，进而提升多设备连接时的整体体验。与此同时，DSO还能与其他技术协同应用以提高系统的吞吐量和稳定性，DSO与Co-SR及Co-BF协同应用工作流程如图13所示。

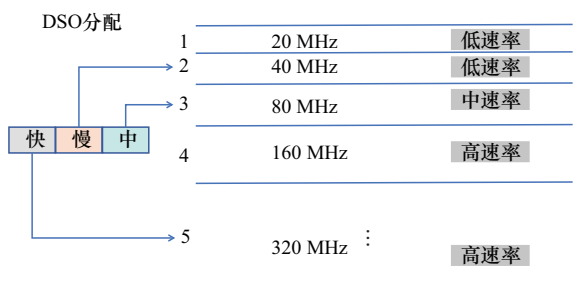


图12 DSO信道分配示意图

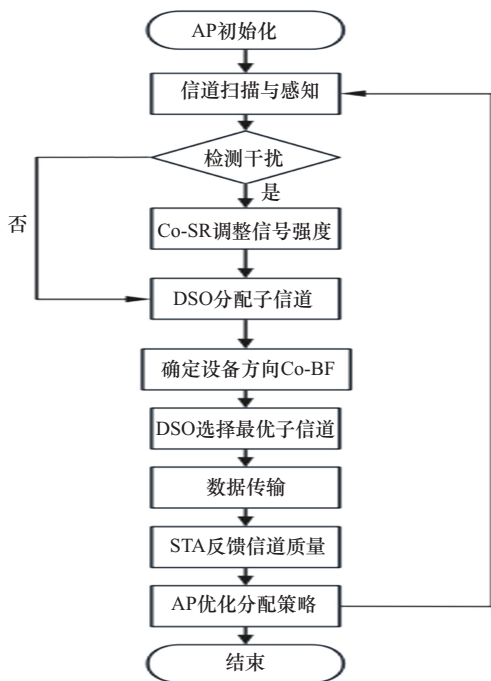


图13 DSO与Co-SR及Co-BF协同应用工作流程

DSO与协调空间复用（Co-SR）协同。Co-SR技术使路由器能根据周围设备情况自动地调整信号强度，减少干扰。DSO与Co-SR结合时，DSO可在Co-SR调整信号强度的基础上，进一步根据干扰情况动态地分配子信道^[30]。当Co-SR检

测到某个区域信号干扰较大时，DSO会避免将子信道分配到该区域，或者调整子信道的频率范围，以避免干扰源，从而更有效地提高网络性能。

DSO与协调波束成形（Co-BF）协同。Co-BF技术能使Wi-Fi信号更精准地指向需要的设备^[31]。DSO与Co-BF配合，可在确定信号传输方向的同时，为设备分配最合适的子信道。当Co-BF将信号精准指向某设备后，DSO会为该设备选择一条干扰小、传输质量好的子信道，使信号在传输过程中能更好地到达目标设备，进一步提升信号的接收效果和传输效率。

2.4 TXOP抢占机制降低时延

在网络通信中，周期流量和非周期流量在数据产生时间规律、应用场景、传输需求和资源调度方式上均存在明显差异。周期流量指按固定时间间隔重复出现、有规律的数据传输流。数据产生和传输具有周期性，在网络中呈现稳定的节奏，数据传输具有很强的规律性和可预测性。而非周期流量是随机产生、不按固定时间间隔出现的数据传输流，发生时间和频率难以预测，具有很强的随机性和突发性。如在线游戏中，玩家操作产生的数据（移动、攻击指令等）完全取决于玩家的实时行为；视频通话时，语音和视频关键帧数据的传输时机不固定，受通话双方说话节奏、画面变化的影响，对传输时延要求极高，须快速处理，否则影响用户体验。

基于TXOP的抢占机制是一种用于优化无线网络中数据传输的技术，旨在减少特定类型数据的传输时延^[32]。该机制通过对传输机会的灵活调配，实现对低时延需求数据的优先处理。该机制主要针对非周期性的时延敏感流量，包括从用户设备到接入点的上行链路（uplink, UL）和从接入点到用户设备的下行链路（downlink, DL）的相关数据传输。UHR致力于改善时延敏感流量的传输时延，这类流量分为周期性和非周期性两种。

周期性时延敏感流量可借助协调 AP 和介质访问技术处理，但非周期性时延敏感流量在传统机制下存在问题。在基线情况下，当新的时延敏感数据包抵达时，AP 或非 AP STA 必须等待正在进行的 TXOP 结束，这会增加非周期性时延敏感流量的传输时延，无法满足如实时游戏、高清视频通话等对时延要求苛刻的应用场景需求。TXOP 抢占机制主要分为以下两个场景。

场景一 抢占 DL 的 TXOP 发送 UL 的重要数据。

抢占 DL 的 TXOP 发送 UL 的低时延 (low latency, LL) 示意图如图 14 所示，当 DL LL 流量在 DL TXOP 期间到达时，采用基于基线机制的简单媒体访问控制 (medium access control, MAC) 解决方案，这种方式能够应对大部分的实际情况，为常见场景中的流量处理提供了基础保障。例如，路由器正给手机发视频 (下行数据)，同时又有重要通知要发给手机，用这个基本方法就能安排好发送顺序。当 UL LL 流量在 DL TXOP 期间到达时，AP 会授予 LL 设备在其 DL TXOP 内进行竞争的机会。AP 通过向 LL 客户端发送指示，该指示可在 DL PPDU 帧头的物理层 (physical layer, PHY) 或 AP 发送的块确认 (block acknowledgement, BA) 帧中携带，并在其中明确增强型分布式信道访问 (enhanced distributed channel access, EDCA) LL 传输的允许持续时间限制。客户端在接收到 DL PPDU/BA 后，会忽略 AP 在之前帧中设置的 NAV，仅依据随机退避计数 (最大时隙数待定) 来参与竞争。为减少隐藏节点问题，AP 还可专门分配一个资源单元

(resource unit, RU)，让所有 LL 客户端能与 BA 一同传输抢占指示帧 (preemption indication, PRI)。简而言之，如果有上行的重要数据在下行 TXOP 时间段到达，这时，AP 会给那些有重要上行数据要发的设备一个在下行 TXOP 里竞争发送的机会。路由器会告诉这些设备可以开始竞争了 (通过在发给设备的数据帧头或者确认帧里通知)，还会规定它们竞争发送的最长时间。设备收到通知后，将忽略之前由 NAV 设置的“信道繁忙”的限制，然后再竞争信道，开始随机等待一段时间 (随机退避计数)，等时间到了就去竞争发送数据^[33]。而且，为了避免有些设备互相“听不到”对方在发数据而产生冲突 (隐藏节点问题)，路由器会专门留出一小块传输资源 (RU)，让这些设备能一起发送一个“我要发重要数据”的信号 (PRI)。

场景二 抢占 UL TXOP 发送 DL 时延敏感流量。

当 DL LL 流量在 UL TXOP 期间到达时，如果客户端允许，AP 便可以接管剩余的 TXOP。具体而言，客户端会授予低时延客户端 (标记为“PR allowed”) 相应权限，使 AP 能够接管剩余的 TXOP，进而完成 DL LL 流量的传输^[34]。这一机制的优势在于充分考虑了无线网络环境中不同链路方向上低时延数据传输的紧迫性，通过灵活的权限授予和资源调配，有效地减少了数据传输的等待时间，提高了网络对时延敏感流量的响应速度，确保了诸如实时游戏、高清视频通话等对时延要求苛刻的应用能够在复杂的网络环境中稳定、流畅地运行。

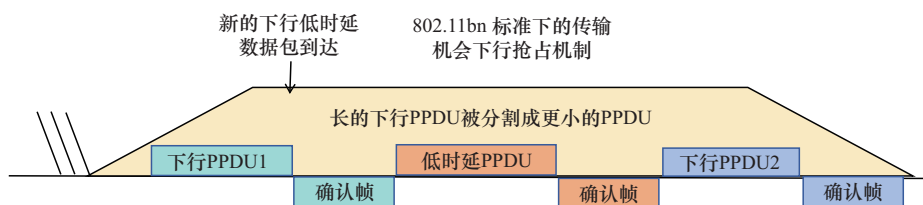


图 14 抢占 DL 的 TXOP 发送 UL 的 LL 示意图



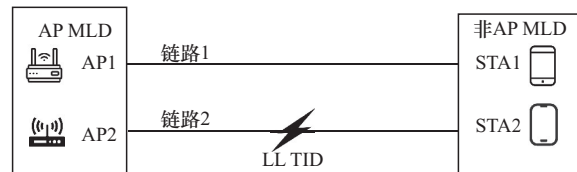
2.5 基于链路优先级调控的多AP协作降低时延方案

在多AP网络环境中，由于AP之间缺乏有效的协调，时延敏感流量的传输面临诸多挑战，一个AP的低时延流量的传输受到另一个AP非低时延流量的干扰。低时延流量指的是对数据传输时延要求极高的网络流量类型，注重实时性和交互性，如视频会议、在线游戏等。非低时延流量指的是对数据传输时延的敏感度相对较低，注重数据传输的完整性和准确性，如文件下载、软件更新等。

在传统的AP之间进行流量传输时，当AP2向其关联的STA2传输非LL流量帧时，关联AP1的非AP多链路设备（multi-link device, MLD）1可能会听到该帧，并根据网络分配向量机制设置自己的NAV。这就导致非AP MLD1在有LL流量帧需要传输时，不得不推迟发送，从而引入额外的传输时延。这种时延会严重影响实时应用的体验，如在线游戏的操作响应延迟、视频通话的卡顿等，降低了用户对网络服务的满意度。

该技术的核心是基于链路优先级进行多AP协调。基于链路优先级的多AP协调示意图如图15所示，AP MLD1会向AP MLD2发送通知帧，在这个通知帧中明确告知用于LL流量的链路（如链路2）的优先级^[35]。当AP MLD2有非LL帧需要传输时，它会根据通知帧中链路1和链路2的优先级信息来选择传输链路。如果链路2被标记为高优先级用于传输LL流量，AP MLD2可能会选择通过链路1来传输非LL帧。这样，非AP MLD1关联的AP MLD1所对应的链路2就可以保持空闲状态，使非AP MLD1能够在有LL流量帧时，顺利地通过链路2向AP MLD1传输数据，有效地避免了链路竞争导致的LL流量传输时延。AP MLD2先向AP MLD1发送请求帧，AP MLD1收到请求后，回传一个响应帧，在响应帧中告知

链路2用于LL流量的优先级。AP MLD2依据这个响应帧中的优先级信息，选择合适的链路（如链路1）来传输非LL帧，为非AP MLD1通过链路2传输LL流量创造条件^[36]。



注：TID为流量标识符（traffic identifier）。

图15 基于链路优先级的多AP协调示意图

例如，在一个大型商场中，部署了多个AP以确保无线网络覆盖。假设AP MLD1服务于商场的A区域，AP MLD2服务于相邻的B区域。在A区域内，有一位顾客正在使用手机进行实时视频通话（产生LL流量），手机关联到AP MLD1；在B区域，另一位顾客正在下载文件（产生非LL流量），手机关联到AP MLD2。当AP MLD2准备传输下载文件的非LL流量帧时，AP MLD1向AP MLD2发送通知帧，告知链路2用于LL流量的优先级较高。AP MLD2收到通知后，选择链路1来传输非LL流量帧，这样AP MLD1的链路2就不会被占用。A区域中进行视频通话的顾客手机（非AP MLD1）在有新的LL流量帧需要传输时，能够顺利通过链路2将数据发送给AP MLD1，保证了视频通话的流畅性，避免了B区域非LL流量的传输导致的视频卡顿或延迟^[37]。

2.6 引入实时应用流量专用RU降低时延技术

随着人们生活水平的提高，对网络传输的实时性要求急剧增长，在Wi-Fi传输过程中，实时应用（real-time application, RTA）的实时性非常重要，常见的RTA包括实时游戏、云游戏、实时视频通话、实时视频流等。RTA流量在传统网络传输中面临着不可预测且较大的传输时延问题。在网络繁忙时，新产生的RTA流量须等待常规流

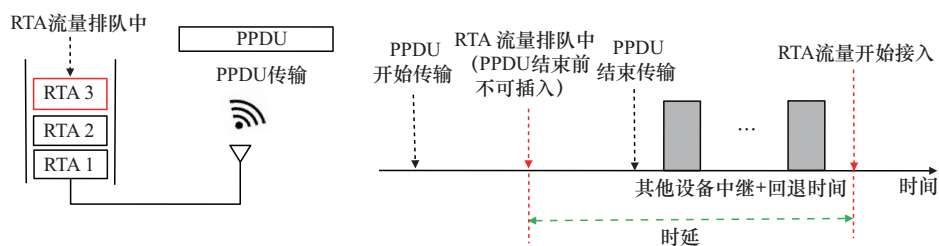


图 16 RTA 流量时延产生原因示意图

量传输完成才能获得信道接入机会，导致传输时延增加。这对于对时延极为敏感的实时应用（如实时游戏、实时视频通话等）来说，会严重影响用户体验，出现游戏卡顿、视频通话不流畅等问题。传统资源单元分配方式下，资源单元在传输开始后若未被占用，后续到达的 RTA 流量无法立即使用，必须等待下一轮资源分配，且传输须与常规传输对齐，灵活性差，无法满足 RTA 流量快速传输的需求。

RTA 流量时延产生原因示意图如图 16 所示，为了解决这个时延问题，引入了专用 RU 来满足实时应用 RTA 流量低时延传输需求，该技术能提升网络对 RTA 流量的传输效率，保障用户在使用实时应用时的体验，RTA 对数据传输的实时性要求极高，数据需要在短时间内完成传输，否则会影响用户体验^[38]。

该技术为 RTA 流量专门开辟一种特殊类型的 RU，该 RU 专门用于低时延传输，RTA 专用流量结构示意图如图 17 所示。在传输过程中，短训练字段（short training field, STF）、长训练字段（long training field, LTF）和简化的 PHY 头可在传输中途发送，为 RTA 流量的传输提供必要的同步和控制信息。与传统资源单元须在频域退避后才能占用不同，专用 RU 可立即被占用，且可能无须进行退避操作^[39]。即使 RTA 流量在当前传输开始后才进入队列，也有机会利用专用 RU 进行传输，并且其传输不一定需要与常规传输保持一致，从而大幅度地提高了 RTA 流量传输的及时性和灵活性。

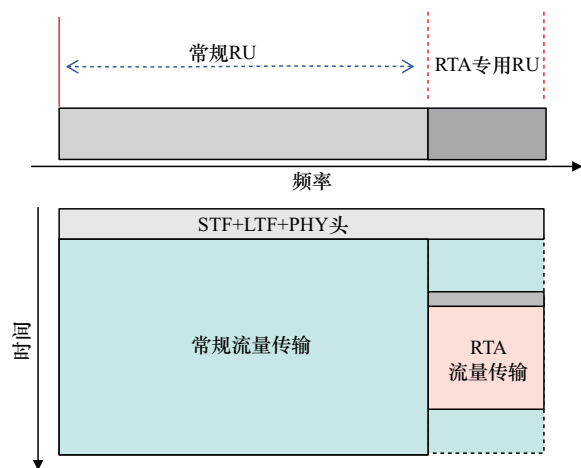


图 17 RTA 专用流量结构示意图

为防止专用 RU 被其他非低时延业务的 OBSS STA（其他基本服务集站点）占用，可采用 AP 或其他非 LL STA 进行预留，或者借助网状接入点（mesh access point, MAP）等方法，确保专用 RU 能优先服务于 RTA 流量。例如，在一场激烈的在线多人竞技游戏中，玩家的操作指令（如射击、移动、释放技能等）属于 RTA 流量。当玩家快速操作时，这些指令数据会迅速产生并需要及时传输到游戏服务器。借助专用 RU 技术，游戏设备在检测到这些 RTA 流量后，可立即将其搭载到正在进行的常规流量传输中的专用 RU 上。例如，当前网络中正在进行视频数据的常规传输，专用 RU 可在不影响视频传输的情况下，插入游戏操作指令数据进行传输。在视频会议场景中，参会者的语音和视频数据传输对时延要求极高。当参会者说话或画面发生变化时，产生的 RTA 流量可通过专用 RU 快速传输。即使在网络繁忙，其他常规数据（如文件下载任务产生的流



量)正在传输的情况下,专用RU也能保证视频会议的关键数据优先、及时地传输,避免出现声音卡顿、画面延迟等问题,确保视频会议的流畅进行。

3 Wi-Fi 8在未来的应用

下一代Wi-Fi技术IEEE 802.11bn,以低时延、高可靠为目标,应用了多项新技术。Wi-Fi 8在未来领域的应用如图18所示,Wi-Fi 8预计将在扩展现实、工业物联网、远程医疗与自动驾驶、高清视频与云游戏等领域得到广泛应用。

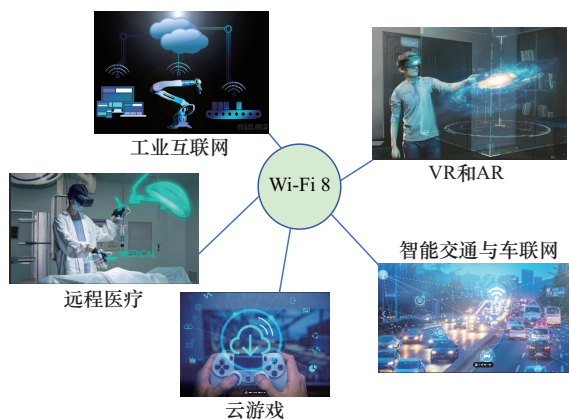


图18 Wi-Fi 8在未来领域的应用

3.1 扩展现实

Wi-Fi 8的低时延($<1\text{ ms}$)和高可靠性可支持云端渲染的增强现实(AR)和虚拟现实(virtual reality, VR)设备,降低本地计算需求,解决设备自身质量、发热和成本问题。Wi-Fi 8在扩展现实领域将发挥巨大的推动作用。其低时延($<1\text{ ms}$)和高可靠性的特性,对于云端渲染的AR/VR设备而言,意义非凡。在当前的AR/VR应用中,本地设备需要强大的计算能力来处理复杂的图形渲染,这不仅导致设备体积大、质量重,还面临发热严重和成本高昂的问题。而Wi-Fi 8凭卓越的网络性能,能够将渲染任务转移到云端进行。

VR和AR应用对网络带宽和时延极其敏感,需要大量的实时数据传输以保证画面的流畅和交

互的实时性^[40]。Wi-Fi 8的高数据传输速率以及低时延特性,能够满足VR/AR设备对高清内容的快速加载需求。在VR多人在线游戏中,玩家的动作、位置等信息需要实时同步到服务器和其他玩家设备上。Co-SR和Co-BF技术,确保在复杂的网络环境中,这些数据也能快速、准确地传输,减少游戏中的时延和卡顿现象,为玩家带来沉浸式的游戏体验。在AR教育应用中,学生通过AR设备查看虚拟的教学模型和场景,Wi-Fi 8的DSO技术根据设备需求智能地分配子信道,保证AR设备能迅速获取高清的虚拟内容,提升学习体验。

3.2 工业物联网

满足工业机器人、传感器等设备对吉比特每秒级通信和“3个9”(99.9%)可靠性的严苛要求,支持实时监控与预测性维护^[41]。工业物联网对网络通信的要求极为严苛,Wi-Fi 8恰好能够满足这些需求。工业机器人和各类传感器在工业生产过程中,需要进行大量的数据传输和实时交互。工业机器人的精准控制,需要毫秒级的指令响应,Wi-Fi 8的低时延特性确保了控制指令能够快速、准确地传达给机器人,实现高精度的操作。例如,在汽车制造工厂中,工业机器人负责汽车零部件的精确组装,Wi-Fi保证了机器人之间以及机器人与中央控制系统之间的数据传输稳定可靠,避免了数据时延导致的组装误差。

在工业互联网领域,Wi-Fi 8的多AP协调技术可使工厂内分布各处的接入点协同工作,减少信号干扰,保障大量工业设备同时稳定联网,实现生产数据的实时传输与交互。DSO技术能根据不同工业设备的通信需求,动态分配子信道,提高频谱利用效率,像高精度的传感器数据传输、自动化生产线的指令传达等都能更高效地完成。NPCA技术则拓展了通信的信道选择范围,即使主信道拥堵,设备也能通过其他信道维持通信。Co-SR技术可调整AP的传输功率,使不同区域的设备通信互不干扰,优化整体网络性能,确保

工业生产流程的连续性与稳定性。

同时,传感器实时采集的生产数据,如设备温度、压力、运行状态等,对于生产过程的监控和优化至关重要。Wi-Fi 8的吉比特每秒级通信能力,能够满足大量传感器数据的高速传输需求。并且“3个9”(99.9%)的高可靠性,保障了数据传输的稳定性,确保生产数据不会丢失或中断。

3.3 远程医疗与自动驾驶

为机器人辅助手术和车联网提供零容忍断连的稳定连接,确保安全性和实时性。在远程医疗和自动驾驶领域,网络连接的稳定性和实时性关乎生命安全,Wi-Fi 8为这些关键应用提供了可靠保障^[42]。在远程医疗领域,Wi-Fi 8的低时延特性是关键。医生进行远程会诊、手术时,低时延可确保视频画面、患者生命体征数据等实时、稳定的传输,避免时延导致的诊断失误或手术风险。Co-BF技术能使信号精准聚焦于医疗设备,保障数据传输的可靠性,例如,远程超声诊断时,高分辨率图像能准确无误地传输到医生的终端。DSO技术可优先为医疗数据分配优质信道资源,保障远程医疗服务的高质量开展。

在车联网方面,车辆之间(vehicle-to-vehicle, V2V)以及车辆与基础设施之间(vehicle-to-infrastructure, V2I)的通信对实时性和可靠性的要求同样极高。自动驾驶汽车依靠与周围车辆和交通设施的信息交互来做出决策,如自动刹车、变道等。Wi-Fi 8的低时延特性使车辆能够快速获取周围环境信息,及时做出反应。例如,当遇到前方突发事故时,附近车辆通过Wi-Fi 8迅速接收到事故信息,并自动调整行驶速度和路线,避免碰撞事故的发生。同时,Co-BF技术减少了信号干扰,进一步提高了通信的稳定性和可靠性,确保车联网通信的零断连,为自动驾驶的安全运行提供了坚实的网络基础。

在智能交通与自动驾驶领域,车联网中车辆之间、车辆与基础设施之间的通信需要实时、准

确地交换大量信息^[43],如路况、车速、车辆位置等。Wi-Fi 8的多接入点协调技术和低时延特性,可确保这些信息的快速、可靠传输。在智能驾驶辅助系统中,车辆通过Wi-Fi 8与周围车辆和交通设施通信,提前获取前方路况信息,实现自动减速、避让等操作。

3.4 高清视频与云游戏

随着4K、8K甚至更高分辨率视频的普及,以及云游戏的兴起,人们对网络带宽和稳定性的要求越来越高。Wi-Fi 8的高吞吐量和稳定的连接性能,使高清视频的播放更流畅,无须担心缓冲问题。在云游戏方面,游戏的运行和渲染在云端服务器完成,通过Wi-Fi 8网络将游戏画面实时传输到用户设备上。Co-SR技术提升系统吞吐量,确保大量游戏数据快速传输;DSO技术根据用户设备需求智能分配子信道,为用户提供稳定、高速的网络连接,使用户在手机、计算机或智能电视上都能随时随地畅玩大型3A游戏,享受与本地主机游戏无异的游戏体验。

4 结束语

作为面向未来无线连接需求的新一代无线网络技术,Wi-Fi 8将借助一系列创新技术,在Wi-Fi 7的基础上构建“高速率、低时延、广覆盖、强连接”的无线网络环境。本文聚焦于下一代Wi-Fi技术——Wi-Fi 8(IEEE 802.11bn)的协议,介绍了Wi-Fi 8协议制定的最新动态,重点介绍了多AP协调技术、非主信道接入技术。同时,对Wi-Fi 8未来的应用进行了展望。

参考文献:

- [1] Pahlavan K, Krishnamurthy P. Evolution and impact of Wi-Fi technology and applications: a historical perspective[J]. International Journal of Wireless Information Networks, 2021, 28(1): 3-19.
- [2] MediaTek. Pioneering the future with Wi-Fi 8[R]. Hsinchu: MediaTek Inc, 2024.



- [3] IEEE 802.11-1997: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications[S].
- [4] IEEE 802.11b-1999: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: higher-speed physical layer extension in the 2.4 GHz band[S].
- [5] IEEE 802.11g-2003: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: further higher data rate extension in the 2.4 GHz band[S].
- [6] IEEE 802.11n-2009: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: enhancements for higher throughput[S].
- [7] Alqudah A M. A survey of IEEE 802.11ac: technology and challenges[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2016, 72: 1-15.
- [8] IEEE 802.11ax-2021: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: enhancements for high efficiency WLAN[S].
- [9] IEEE 802.11be: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: enhancements for extremely high throughput[S].
- [10] Galati-Giordano L, Geraci G, Carrascosa M, et al. What will Wi-Fi 8 be? A primer on IEEE 802.11bn ultra high reliability[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2024, 62(8): 126-132.
- [11] IEEE 802.11 Working Group of the LAN/MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society. IEEE P802.11bn™/D0.1 draft standard for information technology—telecommunications and information exchange between systems local and metropolitan area networks—specific requirements[EB]. 2025.
- [12] Iizuka K, Hashida H, Kawamoto Y, et al. Performance evaluation of coordination function selection in multi-AP coordination for next-generation wireless LANs[C]//Proceedings of the 2024 IEEE 100th Vehicular Technology Conference (VTC2024-Fall). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-5.
- [13] Klein A, Tsodik G, Shilo S, et al. M-AP coordinated transmission framework[C]//IEEE 802.11 Meeting, 2023. doc.: IEEE 802.11-23/1871r0.
- [14] Chisci G, Ho D, Asterjadhi A, et al. Coordinated medium access for multi-AP deployments[C]//IEEE 802.11 Meeting, 2024. doc.: IEEE 802.11-23/1887r0.
- [15] Imputato P, Avallone S, Smith M, et al. Beyond Wi-Fi 7: Spatial reuse through multi-AP coordination[J]. *Computer Networks*, 2024, 239: 110160.
- [16] Haile G, Lim J. C-OFDMA: improved throughput for next generation WLAN systems based on OFDMA and CSMA/CA[C]//Proceedings of the 2013 4th International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation. Piscataway: IEEE Press, 2013: 497-502. DOI: 10.1109/ISMS.2013.121.
- [17] Imputato P, Avallone S, Magrin D. Multi-AP coordination in Wi-Fi 7 exploiting time resources sharing[C]//Proceedings of the 2022 IEEE International Mediterranean Conference on Communications and Networking (MeditCom). Piscataway: IEEE Press, 2022: 166-171.
- [18] Nunez D, Wilhelmi F, Galati-Giordano L, et al. Spatial reuse in IEEE 802.11bn coordinated multi-AP WLANs: a throughput analysis[C]//Proceedings of the 2024 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN). Piscataway: IEEE Press, 2024: 265-270.
- [19] Nunez D, Wilhelmi F, Galati-Giordano L, et al. Spatial reuse in IEEE 802.11bn coordinated multi-AP WLANs: a throughput analysis[C]//Proceedings of the 2024 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN). Piscataway: IEEE Press, 2024: 265-270.
- [20] Xue Q L, Dong C, Niu K, et al. Learned compression and restoration of beam measurements for coordinated hybrid beamforming in multi-cell mmWave systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(12): 18798-18810.
- [21] Shen L H, Feng K T, Hanzo L. Coordinated multiple access point multiuser beamforming training protocol for millimeter wave WLANs[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(11): 13875-13889. DOI: 10.1109/TVT.2020.3030223.
- [22] Bellalta B, Wilhelmi F, Galati Giordano L, et al. Performance analysis of IEEE 802.11bn non-primary channel access[PP]. arXiv preprint, arXiv:2504.15774, 2025.
- [23] 杨早. IEEE802.15.4时隙CSMA/CA算法性能分析与节点功耗改进研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- Yang Z. Performance analysis of IEEE 802.15.4 slotted CSMA/CA algorithm and improvement of node power consumption[D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [24] Wei D Y, Cao L, Zhang L, et al. Non-primary channel access in IEEE 802.11 UHR: comprehensive analysis and evaluation[C]//Proceedings of the 2024 IEEE 100th Vehicular Technology Conference (VTC2024-Fall). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-6.
- [25] Ratnam V. Channel switching rules for NPCA[C]//IEEE 802.11 Meeting, 2024. doc.: IEEE 802.11-24/1115r0.
- [26] Ratnam V. Channel switching rules for NPCA[C]//IEEE 802.11 Meeting, 2024. doc.: IEEE 802.11-24/1115r1.
- [27] Gan M. Some considerations on non-primary channel access[C]//IEEE 802.11 Meeting, 2024. doc.: IEEE 802.11-24/0486r0.
- [28] Zhao Y, Guo J Y, Li Y. et al. SP-based non-primary channel access follow-up triggering event[C]//IEEE 802.11 Meeting,

2024. doc.: IEEE 802.11-24/1259r0.
- [29] Quang K N, Nguyen V D, Choo H. Dynamic subchannel assignment-based cross-layer MAC and network protocol for multihop Ad Hoc networks[J]. Journal of Computer Networks and Communications, 2013, 2013: 962643.
- [30] Park I S, Jung Y H, Min I, et al. Dynamic subchannel and bit allocation in multiuser MIMO/OFDMA systems[C]//Proceedings of the 2004 IEEE 59th Vehicular Technology Conference (VTC2004-Spring). Piscataway: IEEE Press, 2004: 884-888.
- [31] Huang Y M, Zhang F, He S W, et al. Coordinated beamforming design for multicell systems with transceiver impairments: from perspective of spectral efficiency to energy efficiency[J]. Journal on Wireless Communications and Networking, 2015: 198.
- [32] Chisci G, Ho D, Cherian G, et al. Preemption techniques to meet low-latency (LL) targets[C]//IEEE 802.11 Meeting, 2024. doc.: IEEE 802.11-23/1886r0.
- [33] Chisci G, Ho D, Asterjadhi A, et al. Preemption techniques to meet low-latency (LL) targets[C]//IEEE 802.11 Meeting, 2024. doc.: IEEE 802.11-23/1887r0.
- [34] Chisci G, Ho D, Cherian G, et al. Preemption techniques to meet low-latency (LL) targets[C]//IEEE 802.11 Meeting, 2024. doc.: IEEE 802.11-23/1886r3.
- [35] Zhang J. Multi-link based multi-AP coordination for low-latency traffic[C]//IEEE 802.11 Meeting, 2023. doc.: IEEE 802.11-23/1981r0.
- [36] Zhang J. Multi-link based multi-AP coordination for low-latency traffic[C]//IEEE 802.11 Meeting, 2023. doc.: IEEE 802.11-23/1981r1.
- [37] Zhang J. Multi-link based multi-AP coordination for low-latency traffic-follow up[C]//IEEE 802.11 Meeting, 2024. doc.: IEEE 802.11-23/1981r3.
- [38] Qi Y. Latency reduction for immediate real-time application traffic transmission[C]//IEEE 802.11 Meeting, 2024. doc.: IEEE 802.11-24/0442r0.
- [39] Qi Y. Latency reduction for immediate real-time application traffic transmission[C]//IEEE 802.11 Meeting, 2024. doc.: IEEE 802.11-24/0442r2.
- [40] 冯莉颖, 马立尧, 黄业荣. 基于 AR/VR 技术的分析模块开发和应用[J]. 科技创新与应用, 2021, 11(5): 149-151.
Feng L Y, Ma L Y, Huang Y R. Development and application of analysis module based on AR/VR technology[J]. Technology innovation and application, 2021, 11(5): 149-151.
- [41] Liao Y, Loures E D F R, Deschamps F. Industrial internet of things: a systematic literature review and insights[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(6): 4515-4525. DOI: 10.1109/JIOT.2018.2834151.
- [42] Hegde S, Eid N S. Telehealth and remote patient monitoring after the COVID pandemic[J]. Pediatric Allergy, Immunology, and Pulmonology, 2021, 34(4): 130-131. DOI: 10.1089/ped.2021.0162.
- [43] Feng T, Wang W, Yang Y. A survey of world models for autonomous driving[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2024. DOI: 10.1109/TPAMI.2024.

[作者简介]



戴星亚 (2000-), 男, 中国科学院上海高等研究院硕士生, 主要研究方向为下一代无线通信、Wi-Fi 技术。



万国伟 (1999-), 男, 中国科学院上海高等研究院硕士生, 主要研究方向为下一代无线通信、Wi-Fi 技术。



康凯 (1977-), 男, 博士, 中国科学院上海高等研究院正高级工程师、博士生导师, 主要研究方向为下一代无线通信、Wi-Fi 技术、AI 技术。