

# WI-FI 8 前瞻调研报告

Wi-Fi 技术现状和下一代 Wi-Fi 标准方向

<https://shichehu.github.io>

胡世成

ShichengHu

<https://shichehu.github.io>

胡世成 2023 年 11 月 29 日星期三

## 摘要

Wi-Fi 技术作为无线局域网（WLAN）的核心技术，经过 20 多年的演进已经发展至 IEEE 802.11be（即 WiFi 7）版本，商业交互于 2023 年底完成。Wi-Fi 联盟预计于 2024 年第一季度发布 Wi-Fi CERTIFIED R1 测试认证版本。Wi-Fi 7 在国内的商用进程加速。2023 年 12 月，国家无线电办公室印发通知明确 Wi-Fi 7 设备技术要求及测试方法。作为下一代 Wi-Fi 技术，Wi-Fi 8 的讨论正如火如荼。IEEE 802.11 工作组已经成立 IEEE 802.11bn 任务组，制定下一代 Wi-Fi 标准，并预计在 2028 年左右实现工业交互并发布商业认证版本。新一代 Wi-Fi 技术关注提升吞吐量、降低时延、提高网络可靠性和优化整体网络性能。本文将追溯 Wi-Fi 技术的发展历程，深入剖析 Wi-Fi 8 技术的发展和关键技术。鉴于 Wi-Fi 8 技术将长期处于标准制定状态，建议跟踪和布局与公司业务相关的技术点，以提升公司在行业中的影响力。

<https://shichehu.github.io/>

# 目录

<b>第一章</b>	<b>WI-FI 发展历程</b>	<b>6</b>
1.1.	Wi-Fi 诞生	6
1.2.	802.11B	6
1.3.	802.11A	6
1.4.	802.11G	7
1.5.	Wi-Fi 4	7
1.6.	Wi-Fi 5	7
1.7.	Wi-Fi 6	8
1.8.	小结	9
<b>第二章</b>	<b>WI-FI 7 技术现状</b>	<b>9</b>
<b>第三章</b>	<b>下一代 WI-FI 技术 WI-FI 8 现状</b>	<b>11</b>
3.1.	Wi-Fi 8 用例讨论	11
3.1.1.	Wi-Fi 8 发展方向	11
3.1.2.	新兴用例汇总	13
3.1.3.	KPI 要求	14
3.2.	Wi-Fi 8 时间线	15
3.3.	Wi-Fi 8 关键技术点	16
3.3.1.	多 AP 协同	17
3.3.2.	更宽带宽	20
3.3.3.	HARQ	22
3.3.4.	P2P 管理	24
3.3.5.	AI/ML	25
<b>第四章</b>	<b>标准布局可行性</b>	<b>26</b>
	<b>参考文献</b>	<b>27</b>

<https://shichehu.github.io>

### 缩略词

缩写	全称	解释
A-MPDU	Aggregated-MAC Protocol Data Unit	聚合 MAC 层协议数据单元
A-MSDU	Aggregated-MAC Service Data Unit	聚合 MAC 层服务数据单元
AI	Artificial Intelligence	人工智能
AP	Access Point	接入点
AR	Augmented Reality	增强现实
B2B	Business-to-Business	企业对企业
B2C	Business-to-Consumer	企业对消费者
BSSC	Basic Service Set Coloring	基本服务集合染色
CB	Channel Bonding	信道绑定
CCA/CS	Clear Channel Assignment/Carrier Sense	清除信道分配/载波监听
CSI	Channel State Information	信道状态信息
DI	Diffuse Infrared	漫射红外
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum	直接序列扩频
EDCA	Enhanced Distributed Channel Access	增强分布式信道接入
EHT	Extremely High Throughput	极高吞吐量
EMLMR	Enhanced MLMR	增强 MLMR
EMLSR	Enhanced MLSR	增强 MLSR
FHSS	Frequency-Hopping Spread Spectrum	调频扩频
GI	Guard Interval	保护间隔
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request	混合自动重传请求
HEW	high-efficiency wireless	高效无线
HR	High Rate	高速率
HT	High Throughput	高吞吐量
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers	电气与电子工程师协会
ISM	Industrial Scientific Medical	工业科学医疗
KPI	Key Performance Indicator	关键性能指标
LDPC	Low Density Parity Check	低密度奇偶校验码
MCS	Modulation Coding Scheme	调制编码方案
ML	Machine Learning	机器学习
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output	多输入多输出
MLO	Multi-Link Operation	多链路操作
MLMR	Multi-Link Multi-Radio	多链路多射频
MLSR	Multi-Link Single Radio	多链路单射频
MRU	Multi-RU	多 RU
MU-MIMO	Multi-User MIMO	多用户 MIMO
NSTR MLMR	Non-Simultaneous Transmit-Receive MLMR	非瞬时收发 MLMR

OBSS	Overlapping Basic Service Set	重叠服务集
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	正交频分复用
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access	正交频分多址
PAR	Project Authorization Request	项目授权请求
P2P	Peer-to-Peer	点对点
PP	Preamble Puncturing	前导码打孔
QAM	Quadrature Amplitude Modulation	正交幅度调制
QoS	Quality of Service	服务质量
RU	Resource Unit	资源单元
SCS	Subcarrier Spacing	子载波间隔
SG	Study Group	IEEE 标准学习组
SNR	Signal-to-Noise Ratio	信噪比
SR	Spatial Reuse	空间复用
STA	Station	站点
STBC	Spatial-Time Block Coding	空时块编码
STR MLMR	Simultaneous Transmit-Receive MLMR	瞬时收发 MLMR
TIG	Topic Interesting Group	专题兴趣小组
TG	Task Group	IEEE 标准任务组
TWT	Target Wake Time	目标唤醒时间
TXOP	Transmission Opportunity	传输机会
UHR	Ultra-High Reliability	极高可靠性
VHT	Very High Throughput	甚高吞吐率
VR	Virtual Reality	虚拟现实
WFA	Wi-Fi Alliance	Wi-Fi 联盟
WG	Working Group	IEEE 标准工作组
WLAN	Wireless Local Area Network	无线局域网
XR	Extended Reality	扩展现实

# 第一章 Wi-Fi 发展历程

在过去的 20 年中，Wi-Fi 技术经历了巨大的变革与发展，通信速率从最初的 1Mbps 迅速提升至 30Gbps。这场技术革命不仅仅提升了通信速度，还极大地丰富了 Wi-Fi 的功能性。从最初的简单邮件传输，Wi-Fi 逐步进化为支持无线高清投屏、视频通话，甚至云游戏等多种复杂应用的技术体系。Wi-Fi 的无处不在已经成为现实，它已经深入到商场、工厂、机场、校园、家庭等各个领域。在这些场景中，Wi-Fi 热点已经成为不可或缺的基础设施，为人们提供快捷便利的网络连接。Wi-Fi 技术的发展方向值得关注。随着物联网、5G 等技术的快速发展，Wi-Fi 将继续在“最后一公里”中扮演重要角色，更智能地满足不同场景下的需求。为了分析 Wi-Fi 的发展方向，我们将首先回顾 Wi-Fi 技术发展历程，从中可以发现当前 Wi-Fi 技术发展的优势和瓶颈。

## 1.1. Wi-Fi 诞生

Wi-Fi 技术的诞生可以追溯到 1997 年，由 IEEE 802.11 标准工作组所制定。这一标准明确了 Wi-Fi 工作在 2.4GHz 的非授权 ISM 频段，带宽为 22MHz。初期，Wi-Fi 的物理层采用了三种波形：DI、FHSS 和 DSSS，它们分别实现了最大 1 Mbps、2 Mbps 和 2 Mbps 的速率。后两种波形也被用于蓝牙和 Zigbee 等技术中。该协议最初的目标是为局域网内需要快速部署的移动设备和便携式设备提供无线通信服务。

## 1.2. 802.11b

在 1999 年，802.11 工作组发布了 802.11b 修正案，也称为高速率 HR。这一修正案改进了原有的 802.11 标准中的调制方式，从而将 Wi-Fi 的传输速率提升至最高 11Mbps。同时，受益于硬件成本的降低，802.11b 成为了 WLAN 中最为核心和普及的技术。在 1999 年，3Com、Aironet、Lucent、Nokia 等在内的几家公司共同成立了无线以太网兼容联盟（Wireless Ethernet Compatibility Alliance, WECA），WECA 采用 Wi-Fi 作为其技术工作的正式名称。WECA 于 2002 年正式更名为 WFA。WFA 是 Wi-Fi 领域负责 Wi-Fi 产品测试和认证标准制定的国际机构，补上了 Wi-Fi 标准商业化的关键一环。当产品通过 WFA 的认证测试，制造商或供应商会被授予 Wi-Fi 认证标志的使用权。Wi-Fi 技术逐渐建立了 802.11 工作组制定技术标准，而 WFA 负责 Wi-Fi 产品商业化的标准上下游体系。

## 1.3. 802.11a

在 1999 年，802.11 工作组除了发布 802.11b 修正案之外，还发布了 802.11a 修正案。802.11a 首次采用了多载波 OFDM 技术，首次采用 5 GHz 频

段，采用 20MHz 信道，并采用 312.5kHz 的子载波间隔。它支持最高 64-QAM 调制方式，可实现最大 54Mbps 的传输速率。由于 OFDM 技术易于扩展，适用于高阶调制，因此后续的 Wi-Fi 和 4G/5G 蜂窝网络技术中也广泛采用了这种波形。802.11b 虽然覆盖范围广、稳定性好但通信速率较低，而 802.11a 的通信速率高但易受信道干扰影响。在 WLAN 中对高速传输需求的背景下，OFDM 技术成为后续 Wi-Fi 技术演进的基础。

## 1.4. 802.11g

802.11g 标准于 2003 年发布，它的主要贡献在于兼容了 802.11b 标准和 802.11a 标准。相比于 802.11b/a 分别在不同频段工作且采用不同的射频实现，802.11g 首次采用了 802.11a 的 OFDM 波形，但工作频段为 2.4GHz，同时也兼容了 802.11b 的单载波传输波形，成为后续 Wi-Fi 技术沿用的兼容方式。相比 5GHz 非授权国家信息基础设施 (Unlicensed National Information Infrastructure, UNII) 频段支持最多 13 个非重叠 20MHz 频段，2.4GHz 有最多 13 个工作信道，但只拥有 3 个非重叠 20MHz 信道，使得 2.4GHz 频段受到的信道干扰影响更为严重。同时相比于 5GHz 芯片的高昂成本，2.4GHz 芯片更便宜且采用 2.4GHz 频段扩展了 Wi-Fi 信号的覆盖范围。

## 1.5. Wi-Fi 4

Wi-Fi 4，即 802.11n 修正案，于 2009 年发布，别名为 HT。相较于 802.11g，Wi-Fi 4 的最大吞吐量提升了 10 倍，达到了 600Mbps。这一新标准在多个方面对 Wi-Fi 技术进行了重大改进，汇总如下：

1. Wi-Fi 4 首次采用了 MIMO 技术，通过 MIMO 提升了空间复用能力，支持 STBC，最多支持 4 个空间流。其次，Wi-Fi 4 扩展了可用带宽范围。它支持在 2.4GHz 和 5GHz 频段工作，并且通过静态 CB 技术提升传输带宽，最大可达 40 MHz。
2. Wi-Fi 4 优化了 SNR 调度粒度，引入了新的 MCS，在 64-QAM 的基础上，将 3/4 码率提升至 5/6 的码率，并多样化 GI 选择，进一步提升传输容量。在信道质量良好的情况下，允许采用 400 ns 的 GI，而非常规的 800 ns GI。
3. Wi-Fi 4 还首次引入了 EDCA，将 QoS 管理纳入 Wi-Fi 标准。通过分配不同传输优先级，提供差异化的传输服务。最后，Wi-Fi 4 引入了帧聚合，提升了单次传输的效率。这些新设计机制为后续 Wi-Fi 标准的持续演进奠定了基础。

## 1.6. Wi-Fi 5

Wi-Fi 5 对应于 802.11ac 修正案，于 2013 年发布，别名为 VHT。Wi-Fi 5 的最大吞吐量达到 6.9 Gbps，相比 Wi-Fi 4 提升了 11 倍。这项新标准主要对 802.11n 进行了功能性改进，主要有：

1. 只支持 5 GHz 频段: Wi-Fi 5 只工作在 5 GHz 频段, 这一调整旨在避开日益拥挤的 2.4GHz 频段信道干扰。不过这一变化在后续的标准中并没有延续。同时, 协议规定的最大传输带宽也增加到了 160 MHz, 进一步提升了传输容量。
2. 支持 256-QAM: Wi-Fi 5 提高了调制阶数, 最高支持 256-QAM, 这进一步提升了吞吐量。
3. MIMO 功能改进: Wi-Fi 5 加强了 MIMO 功能, 支持了 8 个空间流, 并支持了下行 MU-MIMO, 由此设计了传输机会共享机制。
4. 动态信道管理: Wi-Fi 5 支持了动态 CB, 使得主次信道有一个空闲时仍可正常工作, 提升了信道管理的灵活性。
5. 帧聚合功能改进: Wi-Fi 5 改进了帧聚合功能。在 802.11n 中定义了 A-MSDU 和 A-MPDU 两种聚合方式。但在实际应用中, A-MSDU 的传输容错能力较差。因此, 802.11ac 仅采用了 A-MPDU, 并增强了 A-MPDU 的聚合度。

## 1.7. Wi-Fi 6

2019 年, 802.11ax 修正案发布, 别名为 HEW。WFA 提出了新的命名方案, 将 802.11ax 命名为 Wi-Fi 6, 同时新的命名方案也适用于 802.11ac (Wi-Fi 5) 和 802.11n (Wi-Fi 4) [1]。与过去 20 年的技术演进关注吞吐量不同, Wi-Fi 6 关注提升在高密度设备部署的 WLAN 中系统和局部吞吐量性能以提升频谱效率 [2]。Wi-Fi 6 技术最大吞吐量为 9.6Gbps, 相比 Wi-Fi 5 提升了 1.5 倍。Wi-Fi 6 相较 Wi-Fi 5 的改进主要集中在以下几个方面:

1. **OFDMA 技术引入:** Wi-Fi 6 最重要的改变之一是引入了 OFDMA 技术, 允许同一信道同时为多个上/下行用户服务, 单个用户最小带宽仅为 2 MHz。为了支持 OFDMA 技术, Wi-Fi 6 定义了触发帧机制, 使得 AP 能够将 TXOP 分配给多个用户进行传输, 而不是像传统的 Wi-Fi 技术中各用户需要独立竞争信道, 这样的分配方式提高了传输的可靠性。
2. **OFDM 波形改进:** Wi-Fi 6 对 OFDM 波形进行了改进, 采用 78.125kHz 的 SCS 并改变 GI 的选取, 更新 MCS 表格。Wi-Fi 6 支持 1024-QAM 调制, 提升了传输容量。Wi-Fi 6 采用 RU 作为频谱调用单位, 优化了多用户资源调度, 进一步提升了频谱利用率。这一改动参考了 5G 的 OFDM 波形和混合调制。
3. **MIMO 功能改进:** Wi-Fi 6 进一步改进了 MIMO 功能, 支持上下行 MU-MIMO。同 Wi-Fi 5 类似, 尽管 Wi-Fi 5 支持 8 个空间流, 但实际设备仅支持最多 4 个空间流, Wi-Fi 6 尽管声明支持 8 个空间流, 但实际设备依然仅支持最多 4 个空间流。
4. **重新支持 2.4 GHz 频段:** 相比 Wi-Fi 5 只支持 5GHz, Wi-Fi 6 重新支持 2.4 GHz 频段, 因为该频段的覆盖范围更广且功耗更低, 可提升 Wi-Fi 信号覆盖范围。同时, Wi-Fi 6 结合 OFDMA 技术在 2.4 GHz 频段为低带宽需求的物联网设备提供服务。
5. **采用 LDPC 码作为信道编码:** 在 Wi-Fi 4 和 Wi-Fi 5 中, 采用卷积码作为必选方案, LDPC 仅作为可选方案, 而在 Wi-Fi 6 中, 除了卷积码, 还强制采用 LDPC 码作为信道编码方案。相比卷积码, LDPC 码为 Wi-Fi 6 传输带来了约 1.5 dB 的 SNR 增益。

6. **SR 和降低功耗探索：**Wi-Fi 6 在 SR 和降低功耗方面做了初步探索，也成为后续研究可靠性、低能耗和网络整体性能的起点。针对多 AP OBSS 同信道干扰，Wi-Fi 6 通过 BSSC 技术在空间上分离信道，提升了 SR 能力。对于传输能量有限的智能设备（如智能家居 Wi-Fi 设备），Wi-Fi 6 通过 AP 和 STA 协商的方式降低 STA 功耗。但是，这两项技术在 Wi-Fi 6 中仅作为可选项，受限于兼容性和厂商互通难度。

## 1.8. 小结

综上所述，我们可以得出以下结论：

1. Wi-Fi 标准通常在 5 年左右进行一次演进。
2. 从始至终，Wi-Fi 技术的演进都以名义最大吞吐量性能为核心卖点，这也是 Wi-Fi 技术成功的关键，而对实际用户体验的提升并不明显。
3. 调制阶数和大带宽是 Wi-Fi 性能提升的关键因素。在调制阶数难以进一步提升的情况下，提升带宽对吞吐量性能至关重要。目前国内尚未开放 6 GHz 频段，同时在 5GHz 也只开放了 5.1GHz 和 5.8GHz 频段，对大带宽业务的支持有限。因此，传统 Wi-Fi 演进策略已无法适应实际的带宽受限的情况。Wi-Fi 6 尝试从网络整体性能的角度进行优化，以提升网络性能和用户体验。
4. 新兴应用场景对 Wi-Fi 技术发展推动效果明显。Wi-Fi 技术的演进与物联网行业发展和家庭 WLAN 中多 AP 业务的发展需求密切相关，比如在 Wi-Fi 6 中定义 TWT 技术和 SR 技术，提升对 IoT 设备的支持和多 AP 网络的管理，这也是 Wi-Fi 未来发展的方向。

下一章，我们将介绍当前 Wi-Fi 7 标准制定现状。

## 第二章 Wi-Fi 7 技术现状

2018 年，802.11 标准工作组创建了 802.11 EHT SG，负责探索下一代 Wi-Fi 技术标准的物理层和媒体接入控制层的演进。与此同时，Wi-Fi 6 标准发布至 D3.0 版本，技术内容确定且不再进行新技术内容的扩充。随后，802.11 EHT SG 在 2019 年晋级为 TG，即 802.11 TGbe，也就是 Wi-Fi 7 标准制定任务组，代号 EHT，旨在进一步提升 Wi-Fi 的吞吐量性能。Wi-Fi 7 与前两代 Wi-Fi 标准的时间线如表 2-1 所示。

表 2-1 802.11 标准制定时间线

时间节点	802.11ac	802.11ax	802.11be
第一次 SG 会议	May 2007	May 2013	May 2018
PAR 通过	Sep 2008	Mar 2014	Mar 2019
第一次 TG 会议	Nov 2008	May 2014	May 2019
草案 0.1 版本	Jan 2011	Mar 2016	Sep 2020
草案 1.0 版本	June 2011	Jan 2017	May 2021
802.11 WG 最终审批	Nov 2013	Sep 2020	Mar 2024

在 D2.0 版本，Wi-Fi 7 的新特性已经明确，不再有新提案产生。截至 2023 年 11 月，Wi-Fi 7 标准已经更新到 D5.0 版本，目前技术特性已经固定，等待后续的 802.11 WG 的最终审批流程。同时，WFA 也完成了 Wi-Fi CERTIFIED R1 测试认证标准内容，预计于 2024 年第一季度完成 Wi-Fi 7 认证标准的发布。依据以往的时间线推算，Wi-Fi 8 的技术任务组预计将在 2023 年底成立。在 Wi-Fi 7 的最初讨论中，曾包括多 AP 协同、HARQ 等议题，但在后续版本中将其搁置，只保留了 MLO 特性，成为 Wi-Fi 7 最重要的特性。相较于 Wi-Fi 6 技术，Wi-Fi 7 的主要贡献点为：

1. **MLO 提升吞吐量、时延和漫游性能：**Wi-Fi 7 引入了 MLO 技术，通过允许 MLO 设备在多条链路多个射频上的信道监听和传输，极大提升了端到端的传输速率和时延性能。不同于传统的多链路通信实质独立的在不同射频链路传输，MLO 同时在多条射频链路联合做信道监听和传输。MLO 功能通过 MLD（多链路设备）实现，根据 MLO 实现采用的射频链路数和信道监听、传输方式，MLO 的实现类型如表 2-2 所示。Wi-Fi 7 采用 MLO 技术可显著提升用户体验，实现高速率、高可靠性和低时延性能。同时，与传统的漫游切换技术相比，MLO 共享频段的方式可以增强无感漫游体验。
2. **6GHz 频段功能增强：**WFA 基于 802.11ax 发布的 Wi-Fi 6E(Extended) 首次采用 6GHz 频段，该频段为 5925 MHz 到 7125 MHz。相比 Wi-Fi 6E 仅支持 160MHz 最大带宽调用，Wi-Fi 7 在 6 GHz 频段支持最大 320MHz 带宽，可拥有三个连续的 320 MHz 带宽，支持更高的吞吐量。Wi-Fi 7 最大可达 30 Gbps 吞吐量，相较 Wi-Fi 6 的 9.6 Gbps 吞吐量提升 3 倍。然而，由于国内暂未开放 6 GHz 频段，该功能在国内无法使用。
3. **Wi-Fi 6 技术点功能增强：**它采用了更高阶的 4096-QAM 调制，提升了传输容量。802.11be 支持更灵活的 MRU OFDMA 资源调度。强制支持 PP 技术，支持最大 320MHz 带宽的 PP 技术。结合 MRU 技术和 PP 技术，Wi-Fi 7 可以支持非连续信道调用，实现更精细化的网络管控。

可以注意到，Wi-Fi 7 依然关注提升单 AP 网络的传输性能。由于频谱资源的有限性，这种方式对网络性能提升越发有限。Wi-Fi 7 未能解决多 AP 协同问题。随着家庭网络多 AP 部署和 EasyMesh 技术在 WLAN 中的广泛应用，解决多 AP 协同提升网络整体性能成为下一代 Wi-Fi 的重点研究方向。在最初的 Wi-Fi 7 标准草案中，多 AP 协同曾作为重要议题，但由于其复杂性，该特性已被推迟至 Wi-Fi 8 标准。

表 2-2 MLO 类型

MLO 类型	Wi-Fi 7 链路数	特点
MLSR	1	同一时刻 MLD 在一个频段发送或者接收
EMLSR	1	增强 MLSR，实现同时监听多个链路
NSTR MLMR	$\geq 2$	实现在多个链路上同时发送或者接收
STR MLMR	$\geq 2$	实现多链路上发送和接收随时切换
EMLMR	$\geq 2$	射频链路可以动态调整工作频段

# 第三章 下一代 Wi-Fi 技术 Wi-Fi 8 现状

## 3.1. Wi-Fi 8 用例讨论

在 2022 年 7 月，802.11 WG 批准成立了关于下一代 Wi-Fi 技术标准讨论的学习组 802.11 UHR SG。802.11 UHR SG 旨在提高下一代 WLAN 的连接可靠性、降低延迟、增强网络的可管理性、提高系统吞吐量(在不同信噪比下)并降低设备功耗。为此，该兴趣组需要确立下一代 Wi-Fi 标准的 KPI、用例、工作频段、潜在技术点以及未来任务组的名称。802.11 UHR SG 将最终产出 PAR 和 CSD 以通过 802.11 工作组的审批成立相应的 TG。

802.11 UHR SG 的首次会议启动于 2022 年 9 月。众多国际厂商均发布了对 Wi-Fi 8 技术标准的展望，并预估了 Wi-Fi 8 标准制定时间表。802.11 UHR SG 网页列出了最突出的贡献点。提供贡献点的相关的厂商不多，可以汇总如下，

1. **芯片厂商**：高通(Qualcomm)、博通(Broadcom)、英特尔(Intel)、华为(Huawei)、联发科(MediaTek)；
2. **终端厂商**：三星(Samsung)、LG、索尼(Sony)、海尔(Haier)；
3. **应用厂商**：Meta Platform (原 Facebook)；
4. **运营商**：日本电报电话公司(Nippon Telegraph & Telephone, NTT)；
5. **技术研发和专利授权厂商**：Interdigital。

### 3.1.1. Wi-Fi 8 发展方向

关于 Wi-Fi 8 发展方向的讨论，在 802.11 UHR SG 网页汇总了 17 个提案，时间跨度从 2022 年 1 月到 2022 年 7 月，基本确定了 SG 的 PAR (项目授权请求) 和 CSD (项目草案) 内容，以及 SG 到 TG 的转变时间。这些提案已整理在表 3-1 中。可以注意到，不同厂商的参会积极性和贡献度存在差异，其中，华为、博通、英特尔(Intel)和高通分别贡献了 3 项、2 项、2 项和 2 项提案，其他厂商均为 1 项。华为贡献了两个重要技术方向，分别是毫米波和 ML 的应用。博通积累了很多技术点，他主推的 6GHz 频段使用增强也成为了 UHR SG 确立的技术方向。英特尔、三星主推的 P2P 管理也是新一代 WLAN 技术的重要讨论方向。

表 3-1 厂商贡献汇总

时间	提案编号	公司	内容
2022/01/DD	22/0032	博通	讨论新一代 Wi-Fi 的 KPI、用例、预估时间线
2022/1/10	22/0030	华为	讨论新一代 Wi-Fi 的 KPI、用例、毫米波、ML 应用
2022/01/11	22/0046	Intel	讨论新一代 Wi-Fi 的 KPI、用例、预估时间线

2022/01/17	22/0059	高通	讨论新一代 Wi-Fi 的 KPI、用例、预估时间线
2022/03/01	22/0418	MTK	讨论新一代 Wi-Fi 的 KPI、用例
2022/05/04	22/0697	海尔	讨论 XR 的应用市场、使用场景，建议增强多 AP 协同管理网络
2022/05/09	22/0685	LG	汇总新一代 Wi-Fi 的 KPI 要求、用例，预估时间线
2022/05/09	22/0723	华为	讨论机器学习在下一代 Wi-Fi 应用的可行性
2022/05/10	22/0694	Interdigital	总结了新一代 Wi-Fi 的 KPI 要求，汇总潜在技术点
2022/05/10	22/0734	博通	建议用好 6GHz 频段以支持更大带宽，建议运用好次信道功能，总结了 802.11be 留存的技术点
2022/05/10	22/0729	Intel	讨论多 AP 协作、P2P 管理、毫米波频段运用
2022/05/16	22/0779	Meta	关注 VR/元宇宙，关注和元宇宙相关的 KPI，关注拥塞网络管理，建议增强 P2P 管理
2022/07/DD	22/0961	NTT	汇总新一代 Wi-Fi 的 KPIs 要求、用例，建议 WLAN 和 6G 融合
2022/07/08	22/0932	Samsung	讨论新一代 Wi-Fi 的 KPIs、用例、关键技术点
2022/07/11	22/1083	华为	讨论毫米波频段在下一代 Wi-Fi 应用的可行性
2022/07/12	22/0965	Sony	讨论新一代 Wi-Fi 的 KPI、用例，关注多 AP 协作
2022/07/12	22/0708	高通	总结新一代 Wi-Fi 的 KPI 和时间线

从表格中可观察到议题随时间的变化。在 2022 年 1 月到 3 月期间，议题关注新一代 WLAN 的 KPI 和用例；在 2022 年 5 月到 7 月，议题转向潜在技术点。不同厂商关注点存在差异，各类型厂商的关注点可以总结如下：

芯片厂商方面，英特尔和华为关注工作频段的使用问题。博通主推 6GHz 频段，在现有 Wi-Fi 7 基础上进一步提升。华为和英特尔建议新增 45GHz 以上的毫米波频段，这对不支持 6GHz 频段的中国而言更有吸引力。联发科保持沉默，未就技术点和工作频段进一步输出提案，仅说明了 KPI 和关键用例。

生态厂商如 Meta、海尔关注增强现实（AR）、虚拟现实（VR）、扩展现实（XR）及元宇宙等场景。他们致力于提升用户沉浸式网络体验和视频互动体

验，并期望增强吞吐量、降低时延和功耗，同时改善 P2P 管理和多个接入点（AP）之间的协同作用。2019 年成立的实时应用 (Real Time Application, RTA) TIG 调研了实时应用对 Wi-Fi 网络的性能要求和可能的解决方案。

作为唯一的运营商，NTT 关注新一代 Wi-Fi 技术与 6G 在用例和 KPI 要求上的相似性。他们认为 Wi-Fi 技术正逐渐从传统的 B2C 模式向 B2B 模式转变，尤其在工业物联网和机器人自动化领域的应用。NTT 认为新一代 Wi-Fi 技术与 6G 的融合或合作将为其提供更广阔的市场空间。

技术研发和专利授权方面，Interdigital 聚焦于可能的技术方向。他们担任了 2023 年关于人工智能（AI）和机器学习（ML）在 Wi-Fi 应用中的技术兴趣组（AIML TIG）的主席。

### 3.1.2. 新兴用例汇总

基于厂商讨论和文献调研结果，汇总的新兴用例如下：

**远程医疗、远程办公和远程教育：**远程办公、医疗和教育领域因新冠疫情而迅速崛起，已成为不可逆趋势。视频诊断、远程监测和医疗 AI 的普及显著改善了患者的诊断和治疗体验。远程办公和混合工作模式赋予员工在远程办公和办公室之间切换的自由，增强了工作的灵活性。远程教育的推广为学生提供更丰富的教育资源。

**AR/VR/XR 和元宇宙：**互联设备的广泛应用、医疗保健领域的技术进步以及企业、教育和工业领域的远程协作大规模采用，都为 AR 和 VR 技术的未来发展提供了强劲动力。尤其是新冠疫情的爆发，进一步推动了 AR 和 VR 应用的普及。AR/VR/XR 在家庭办公、娱乐和教育方面都将带来深远的影响。

**全 Wi-Fi 覆盖、高密度网络管理：**部署的 AP 数量的快速增加和 EasyMesh 技术的推广增加了网络中 Wi-Fi 设备的密度。这种大规模的 AP 部署一定程度上扩展了 Wi-Fi 网络的覆盖范围，但由于不可靠的信道环境和设备部署存在问题，网络死角仍然存在。因此，解决网络死角、实现 Wi-Fi 信号的全面覆盖成为 Wi-Fi 8 技术需要解决的重要问题。另一方面，随着网络设备数量的增加，无线局域网（WLAN）变得越来越拥挤，密集网络的管理成为关键挑战。

**工业物联网、机械控制：**“私有蜂窝网”是应用于厂商私有的蜂窝网技术，目的是将蜂窝网延伸到工业物联网和大规模机械控制领域，成为未来 6G 的重要应用场景。“私有蜂窝网”类似于 Wi-Fi，均为私有化网络。相比 6G，Wi-Fi 在工业物联网和机器人领域有着得天独厚的优势。由于无线传输的特性，6G 在室内遮挡物存在的情况下难以获得广覆盖，Wi-Fi 技术则适合室内场景。相比 6G 在室内场景还不成熟、成本高，Wi-Fi 的普及和高成熟度更便于应用。Wi-Fi 8 技术在工业物联网和机械控制领域的运用需要解决连接不可靠、传输时延大等问题。

**网络智能化、基于云/集中式管理：**WLAN 中网络设备的急剧增加，如在工业物联网、智能家居的场景的 IoT 设备，网络中实时流量巨大，对业务数据的收集和处理对吞吐量、可靠性、低功耗的要求提升。考虑到 WLAN 中差异化业务需求，数据的处理和分析需根据不同业务智能化定制，对传统算法的挑战大。为了解决该问题，Wi-Fi 8 还需要引入机器学习和人工智能等新技术提升对网络资源的管理。

### 3.1.3.KPI 要求

为了满足新兴应用的可靠服务，新一代 Wi-Fi 技术需要在各项性能指标上进一步提升。相应的 KPI 需求汇总如下表 3-2，由于部分内容尚在讨论阶段，KPI 具体要求还未确定。

表 3-2 KPI 和相关技术点汇总

KPIs	要求	相关技术点
吞吐量	AP: 100Gbps non-AP STA: 10Gbps	新频谱、16 个空间流
时延	1ms 0.1ms	更低的 CSI 反馈 A-PPDU、多 AP 协同、宽带宽
可靠性	99.999%	多 AP 协同、次信道接入、虚拟 BSS 新频谱
覆盖范围	实现全 Wi-Fi 覆盖	多 AP 协同、宽带宽、16SS、精细化 MCS 管理
移动性/漫游	—	多 AP 协同
功耗	—	r-TWT、多 AP 协同
管理能力	—	多 AP 协同、P2P 管理
连接能力	—	多 AP 协同、新频谱
扩展性	—	多 AP 协同

我们还将用例对 KPI 的需求总结如表 3-3。可以注意到，绝大多数新兴用例均关注吞吐量、频谱效率、时延性能，大多数用例关注可靠性和覆盖范围性能。

表 3-3 Wi-Fi 8 用例对 KPI 的要求

KPIs	用例					
	视频/云游戏	P2P	AR/XR/VR 元宇宙	AI/ML	拥塞网络环境	IIoT、机器人
吞吐量	✓	✓	✓	✓	✓	
频谱效率	✓		✓	✓	✓	✓

时延	✓	✓	✓	✓	✓	✓
可靠性	✓	✓	✓			✓
移动性 /漫游				✓	✓	✓
覆盖范围			✓	✓	✓	✓
功耗			✓		✓	✓
管理能力				✓	✓	✓
连接能力		✓			✓	✓
扩展性	✓			✓	✓	

### 3.2. Wi-Fi 8 时间线

802.11 UHR SG 成立于 2022 年 7 月，负责探索新一代 WLAN PHY 和 MAC 技术。802.11 UHR SG 的首次会议举办于 2022 年 9 月，此后每 2 个月举行一次会议，最近的会议时间为 2023 年 11 月，产出项目授权请求和标准研发准则并成功创建了任务组。

在标准制定时间安排上，与会厂商普遍认为 Wi-Fi 标准周期为 4~5 年，但关于具体的时间安排还未确定。我们将现有的 Wi-Fi 标准制定时间线总结如表 3-4。

表 3-4 各代 Wi-Fi 标准制定时间线

里程碑	802.11ac	802.11ax	802.11be	802.11bn(预估)
SG 成立	2007 年 5 月	2013 年 3 月	2018 年 7 月	2022 年 7 月
PAR 通过	2008 年 9 月	2014 年 3 月	2019 年 3 月	2023 年 3 月
首次 TG 会议	2008 年 11 月	2014 年 5 月	2019 年 5 月	--
D 0.1	2008 年 11 月	2016 年 3 月	2020 年 9 月	2024 年 9 月
D 1.0	2011 年 1 月	2017 年 1 月	2021 年 3 月	2025 年 5 月
启动工业交互相互	2013 年 6 月	2019 年 9 月	2023 年底	2027 年底
最终 802.11 工作组批准	2013 年 11 月	2020 年 9 月	2024 年 3 月	2028 年 5 月

在新一代 Wi-Fi 标准 SG 结束时间上，华为、Interdigital 认为可以延长在 SG 阶段的讨论时间，以在 TG 开始前就确定新一代 Wi-Fi 的主要特性和 KPI

要求，使得议题讨论更为集中。避免出现 802.11be 中讨论的特性太多、议题收敛慢点问题，最终不得不放弃了最初确立的多 AP 协同等特性。

最终结果是，802.11 UHR SG 于 2023 年 7 月通过 PAR，并于 2023 年 11 月正式成立 802.11bn TG 研究 Wi-Fi 8 的标准制定。

值得一提，802.11bn 在 KPI 和用例上同 6G 类似，都关注 AR/VR、工业物联网、AI/ML 场景，对提升吞吐量、功耗、时延、可靠性、覆盖范围等性能。6G 的用例和 KPI 如图 3-1 所示。在时间线上，6G 将于 2025 年完成技术性能要求、评估准则和方法论。考虑要形成对 6G 的竞争力，Wi-Fi 8 标准应在更早的时候完成标准制定并实现工业交互。

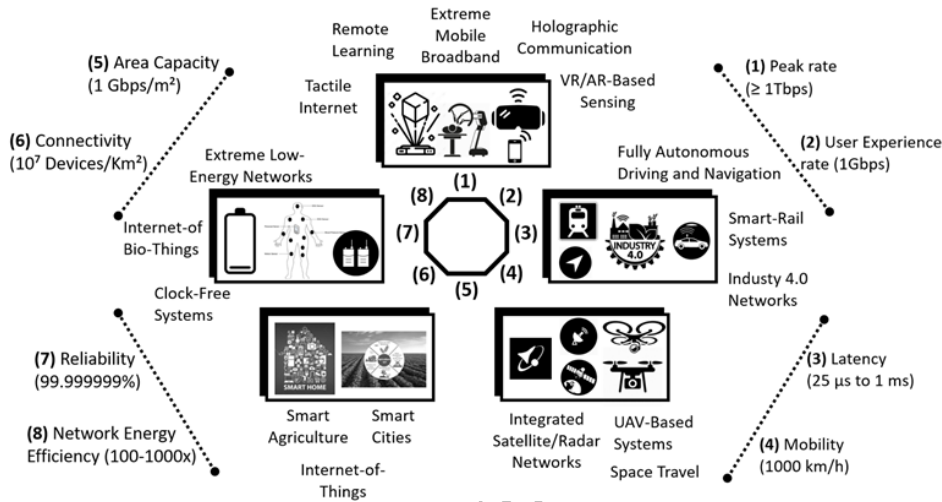


图 3-1 6G 用例和 KPI

### 3.3. Wi-Fi 8 关键技术点

为了满足市场新兴用例的需求，WALN 需要应用新的赋能技术。在 802.11 UHR SG 中已有一些提案正在讨论，主要特性集中在：多 AP 协同、A-PPDU、更宽带宽、HAQR、P2P 管理增强以及应用 AI/ML 算法等。这些技术点对 KPI 能力的提升汇总如表 3-5。接下来，我们将重点介绍多 AP 协同、更宽带宽、HARQ、P2P 管理以及 AI/ML 特性。

表 3-5 Wi-Fi 8 技术点和 KPI 关系汇总

特性	峰值吞吐量	系统吞吐量	时延	覆盖范围	可靠性
多 AP 协同	✓	✓	✓	✓	✓
次信道接入		✓	✓		✓
更宽的带宽	✓	✓	✓	✓	

AI/ML		✓	✓	✓	✓
TB-Punctured PDU		✓	✓		
A-PPDU		✓	✓		
HARQ			✓		✓
多层传输		✓	✓		✓
更低 CSI 反馈		✓	✓		
BA 修正		✓			✓
增强长距				✓	✓

### 3.3.1. 多 AP 协同

随着 WLAN 中部署的 AP 和 STA 越来越密集，网络整体性能，如时延、网络吞吐量等的优化对提升用户体验越来越重要。WFA 针对多 AP 网络提出了 EasyMesh 技术。但 EasyMesh 技术基于单 AP 网络管理的方式，也就是同一时刻单个 STA 只同 1 个 AP 通信，同时无法区分来自邻居 AP 的干扰。多 AP 协同允许多个 AP 和 STA 在同一个 TXOP 时间内在相同信道中传输，可以显著提升网络的整体性能，降低多 AP 传输的干扰。

多 AP 协同确定了 4 个主要技术点，分别是协同空间复用 (Coordinated Spatial Reuse, CSR)、联合传输 (Joint Transmission, JTX)、协同波束赋形 (Coordinated Beamforming, CBF)、协同 OFDMA (Coordinated OFDMA, C-OFDMA)。其中，JTX、C-OFDMA、CBF 都对网络的同步精度要求较高，CSR、JTX、C-OFDMA、CBF 都要求 WLAN 内及时的控制信息同步和反馈。因此，实现多 AP 协同需要定义新的网络管理协议。

**多 AP 协同网络架构：**多 AP 协同网络中定义了三种网络设备，即为：协调者、从 AP、STA。多 AP 协同网络的所有设备构成了多 AP 候选集。协调者可以分为两类，分别是主控制器 (Master Controller, MC) 和主 AP (Master AP, MA)。MC 是一种软件定义的组网功能 (Software Defined Networking Function, SDNF)，通常在网关实现。MA 是网络中选举产生的 AP，能和所有邻居 AP 相连。根据协调者的不同，多 AP 协同网络可以分为两种架构，分别是基于的 MC 多 AP 协同网络和基于 MA 的多 AP 协同网络。在基于的 MC 多 AP 协同网络中，MC 通过有线链路或者专用的无线回传链路和从 AP 连接，MC 不和 STA 直接连接，从 AP 和 STA 通过无线方式连接。在基于 MA 的多 AP 协同网络中，主

AP 通过无线链路和从 AP 连接，也可以直接和 STA 连接。从 AP 通过无线方式和 STA 连接。这两种多 AP 协同网络架构如图 3-2 所示。

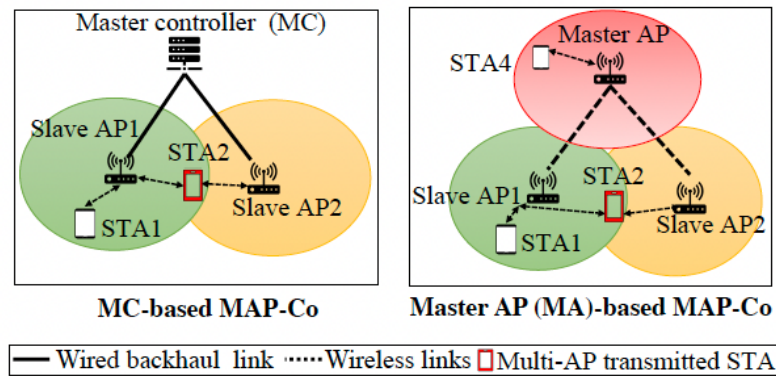


图 3-2 多 AP 协同架构

对比两种方式可以发现，基于的 MC 多 AP 协同网络在网络管理效率上优于基于的 MA 多 AP 协同网络，原因是它采用专用链路控制从 AP，避免网络拥塞，同时控制信息交互更简便有效。而基于的 MA 多 AP 协同网络没有专用链路传输控制信息，且需要同时完成从 AP 的管理和下挂 STA 的管理，控制信息交互复杂，效率低。但基于的 MA 多 AP 协同网络可以随时组网，不依赖有线连接，成本低，网络灵活性高。基于的 MC 多 AP 协同网络需要在 MC 和从 AP 之间建立有线连接或专用回传链路，成本高，降低网络可用信道资源。

**多 AP 协同网络信道探测 (Channel Sounding)：**信道探测用于获取 AP 和 STA 之间的信道质量用于随后的数据传输，比如实时调整 MCS 以及波束赋形。信道探测影响数据传输的有效性。信道探测的过程是获取 CSI 的过程。在传统的单 AP 网络中，信道探测的过程分为三步。以下行方向为例，AP 向 STA 发送 CSI 反馈请求，STA 反馈空信号，AP 根据接受到信号估计 CSI。上行方向的 CSI 过程同下行类似，只是变成 STA 向 AP 发送 CSI 反馈请求。信道探测基于是否采用信道互易性 (Channel Reciprocity) 可以分为显式信道探测和隐式信道探测。多 AP 协同网络的信道探测过程比传统的单 AP 网络的信道探测过程要复杂得多，原因是在多 AP 协同网络中需要考虑多 AP 多 STA 之间的信道探测。为此，多 AP 协同网络定义了 MC 和 MA 方式下的信道探测技术。

以显式信道探测为例，在基于 MC 的多 AP 协同网络的信道探测可以分为按照顺序的信道探测方式和并发的信道探测方式。同样的分类方式也适用于基于 MA 的多 AP 协同网络。我们以按照顺序的信道探测方式为例介绍多 AP 协同网络的信道探测。在第一步，MC 发送空数据包声明 (Null Data Packet Announcement, NDPA) 发送给所有下挂的从 AP。在第二步，根据 MC 发送的轮询 (Poll) 帧通知从 AP 执行的顺序。轮询的从 AP 发送 NDPA 给所有下挂的 STA。等待 1 个 SIFS 后，从 AP 发送空数据包 (Null Data Packet, NDP) 给所有下挂 STA。在第三步，MC 向从 AP 发送波束赋形回应轮询 (Beamforming Response Poll, BRP) 帧，从 AP 收到 BRP 帧后通知下挂 STA 反馈压缩波束赋形 (Compressed Beamforming, CB) 帧。在第四步，MC 通过触发帧让从 AP 反馈收集的 CSI 信息。其他信道探测方式的图解见图 3-3。

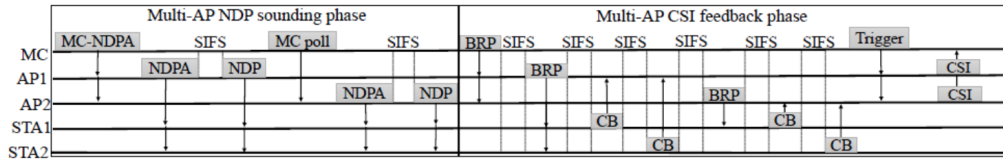


Figure 4: Multi-AP MC-based sequential explicit channel sounding.

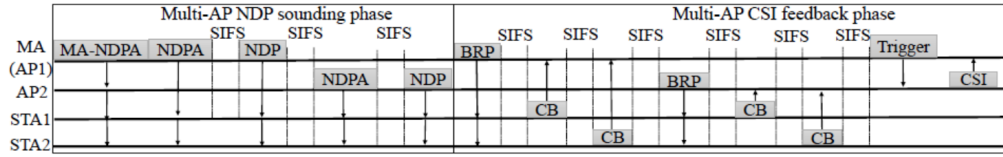


Figure 5: Multi-AP MA-based sequential explicit channel sounding.

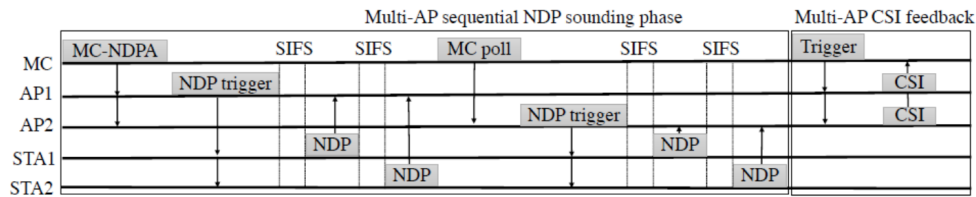


Figure 6: Multi-AP MC-based implicit sequential channel sounding.

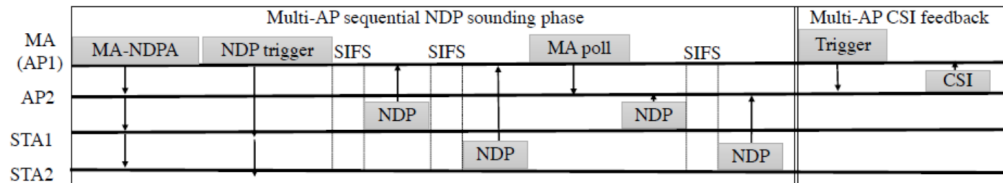


Figure 7: Multi-AP MAP-based implicit sequential channel sounding.

### 图 3-3 多 AP 协同网络信道探测

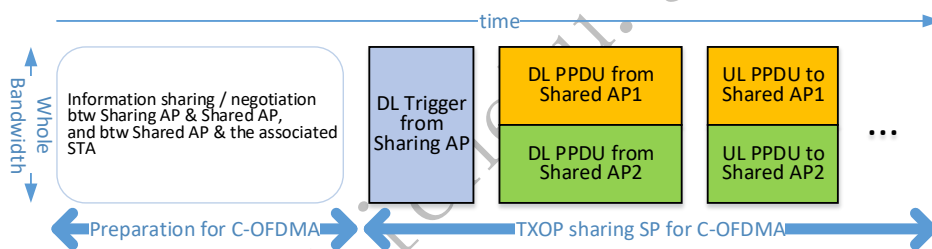
可以注意到，多 AP 协同网络信道探测需要所有设备均支持 NDP sounding 和 CSI 反馈的协议流程。当网络中存在不支持多 AP 协同网络协议的设备时，该方案失效并可能影响多 AP 协同网络的正常运行，这也是多 AP 协同需要关注的重要问题。

接下来，我们将介绍多 AP 协同的 4 个主要技术点。总结如下：

- 1) **CSR**: SR 技术在 802.11ax 中提出，采用功率和 MCS 调整来降低密集网络部署时的信道干扰，提升频谱效率和网络并行传输用户数。通过 OBSS coloring 配置 AP 在 OBSS 和自身 BSS 上的动态 CCA/CS 阈值（自身 BSS 的阈值小，OBSS 阈值大，降低来自 OBSS 信号的干扰），使得 AP 在自身 BSS 和 OBSS 的信道监听不相互影响。SR 技术是一种被动方案，只能独立调整当前 AP 的功率和 CCA/CA 阈值，而无法同其他 AP 协同，导致实际使用时，当前 AP 连接 STA 的等效 SINR 减小，传输性能受损。因此需要协同多个 AP 的 SR 功能才能真正实现对整体网络性能的提升。通过 CSR 协同控制不同 AP 的传输功率，达到对不同 STA 的 SINR 需求。CSR 技术还可以同其他多 AP 协同的技术点结合，进一步提升性能。
- 2) **JTX**: JTX 允许多个 AP 同时和同一个 STA 通信，提升 STA 的吞吐量、可靠性和降低传输时延。通过 JTX 还可以实现无缝漫游。该特性同 802.11bn 采用分布式 MIMO 相关。对于在重叠基础服务集 (Overlapping Basic Service Sets, OBSSs) 的 STA 而言，采用 JTX 的好处是提升传输吞吐量和无缝漫游性能。JTX 分为协调上行和下行传输两种方式。考虑到 JTX 要求多 AP 完全同步，在实现上难度较大。为了实现 JTX，需

要先进行专门的信道探测，同之前介绍的多 AP 协同信道探测不同。JTX 信道探测只针对同 JTX 相关的从 AP 和 STA 之间的链路，减少通信开销和时延。在多址接入情况下，JTX 通过 C-OFDMA 和 CBF 的方式实现。

- 3) **CBF:** CBF 协同联合设计多个 AP 的波束方向，提升网络的空间复用性能。通过多 AP 联调，在空间层面消除多 AP 信号干扰。CBF 在蜂窝网技术中已得到广泛关注。相比于以往波束成形只考虑最优化单个 AP 下的最优传输 STA 的 SNR，多 AP 协同的 CBF 考虑的是最小化网络干扰，消除对特定 STA 的信道干扰。CBF 操作过程可以分为三个阶段：多 AP 协同请求、信道探测和协同波束赋形。在 CBF 中关注干扰抑制问题。
- 4) **C-OFDMA:** OFDMA 技术提出于 802.11ax，允许多个 STA 共用相同频谱资源，有效提升传输吞吐量和降低时延。OFDMA 以 RU 为资源调度单元。相比于传统的 OFDMA 技术，C-OFDMA 允许 AP 和 STA 在同一个信道的 TXOP 时间内共享 RU 资源，并避免共用 RU 导致的干扰，有效提升系统吞吐量。C-OFDMA 配置资源的两种方式为：允许多个 AP 采用相同的 OFDMA 信道的不同 RU、不同 AP 采用不同的信道。C-OFDMA 的传输过程分为连接建立、传输调度和传输三个部分，见图 3-4。在连接建立阶段，MA/MC 同从 AP 分享可用资源信息，从 AP 反馈需求。在传输调度阶段，MA/MC 配置从 AP 的带宽、传输时长、最大 MPDU 长度、数据传输速率等信息。在分配配置信息后，从 AP 将在各自分配的信道上传输数据。



< An example of C-OFDMA procedure >

图 3-4 C-OFDMA 传输过程

针对多 AP 协同，目前的提案关注内容主要是不同多 AP 协同技术点的性能评估和传输机制的研究。比如，有提案评估 CSR 和 C-OFDMA 等技术点结合在系统级网络仿真中的效果。还有提案研究多 AP 协同应当采用的最小带宽，评估带宽分配的粒度对系统性能的影响。我们从以上的分析还可以发现，MC 方式接近目前的 AC+AP 结构和 EasyMesh 架构，管控简便、安全性高，缺点是需要配套好 MC 和从 AP。MA 方式则是采用无线的方式组网，管控困难，且无线回传占用带宽，降低网络吞吐量，但优点是便宜、布置简单。基于公司组网业务和 FTTR 业务发展趋势，建议在条件允许的情况应优先采用 MC 架构实现多 AP 协同。

### 3.3.2. 更宽带宽

作为 Wi-Fi 8 的重要用例，AR/VR/XR 和 8K 视频的无线传输要支持更高的吞吐量，如表 3-6 所示。要实现 4K 的 VR 视频需要超过 100Gbps 的非压缩传输速率，要实现 8K 的无线投屏也需要 100 多 Gbps 的速率[3]。提升吞吐量的重要方式是多空间流 MIMO、高阶调制和大带宽。在 Wi-Fi 8 的讨论中，将从 Wi-Fi 7 的 8 个空间流提升到 16 个空间流，最大吞吐量由此提升 1 倍。Wi-Fi 7 调制

阶数已经达到 4096-QAM，再次提升系统成本太高且带来的吞吐量提升效果不大。已知 Wi-Fi 7 的峰值速率为 34 Gbps，Wi-Fi 8 要实现 100Gbps 的峰值速率，还需要比 Wi-Fi 7 提升 1.94 倍，支持更大带宽成为支持更高吞吐量的重要讨论方向。

表 3-6 4K/8K 无线传输速率需求 [3]

视频格式	应用	分辨率	颜色深度	帧率	未压缩速率 Gbps	当有 20%开销和 4/5 码率情况下的非压缩速率 Gbps
4K	无线投屏	3840*2160	10 bits *3 (RGB)	90	17.92	26.88
	无线投屏	3840*2160	10 bits *3 (RGB)	120	29.86	44.79
	VR	3840*3840	10 bits *3 (RGB)	90	79.63	119.44
	VR	3840*3840	10 bits *3 (RGB)	120	106.17	159.25
8K	无线投屏	7680*4320	10 bits *3 (RGB)	90	89.58	134.37
	无线投屏	7680*4320	10 bits *3 (RGB)	120	119.44	179.16
	VR	7680*7680	10 bits *3 (RGB)	90	318.50	477.75
	VR	7680*7680	10 bits *3 (RGB)	120	424.67	637.01

目前大带宽讨论有两个方向，一个是合理利用 sub7GHz 频段，另一个是采用 45GHz 以上的毫米波频段。讨论结果是在 2023 年 3 月投票表决确定 45GHz 毫米波频段暂时不作为 Wi-Fi 8 的特性。同时，关于成立毫米波学习组 (Integrated mmWave, IMMW) 的投票得到强烈赞同。随后工作组提出将在创建的 IMMW 学习组讨论毫米波频段的集成问题。随即 Wi-Fi 8 中大带宽的讨论聚焦在了 sub7GHz 频段的使用上。

在 5GHz 频段，博通建议新增 5350MHz 到 5470MHz 和 5825 到 5925MHz 频段，可增加 240MHz 带宽，如图 3-3。在 6GHz 频段，博通建议新增 480MHz、560MHz 和 640MHz 的带宽分配模式，增强对高传输速率的需求，如图 3-4。考虑到目前 5GHz 中频和 6GHz 频段暂未在国内对 Wi-Fi 开放，网络吞吐量难以通过增加带宽实现。工信部在 2023 年 6 月 27 日发文的新版《中华人民共和国无线电频率划分规定》中将 6GHz 高频 (6425~7125MHz) 的全部或部分频段划分给 5G/6G 系统。在 6GHz 频段的划分上，各国采用的政策各不相同，大家普遍将 6GHz 划分为 6GHz 低频和 6GHz 高频。2020 年，美国、英国、韩国和日本将整个 6GHz 频段做为非授权频段，可用于 WLAN 通信。欧盟在 2021 年宣布将 6GHz 低频 (5925~6425MHz) 做为非授权频段，可用于 WLAN 通信。非洲、中东国家也大多跟随欧盟。在国内，6GHz 低频或成为 Wi-Fi 通信的潜在频段。

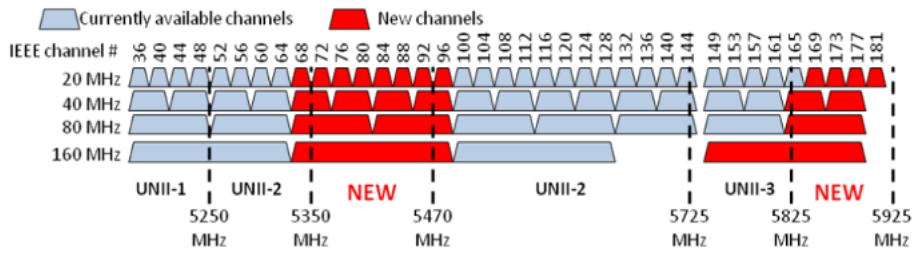


图 3-3 5GHz 新增频段

UNII5						UNII6	6,7	UNII7			7,8	UNII8	
80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
160		160		160		160		160		160		160	
320-1				320-1				320-1					
320-2				320-2				320-2					
480-1						480-1							
480-2						480-2							
560						560							
640						160		160		160			
160		160		160		640							

图 3-4 6GHz 频段调用方式

### 3.3.3. HARQ

由于实际无线信道具有多径效应，导致信道随频率选择性衰落。在移动场景下，用户的移动改变无线信道环境，引起信道时间选择性衰落，传输可靠性难以保障。通常，为了适应实际信道环境，在无线传输过程中会较为谨慎的设置 MCS。这是因为当 MCS 过低时，传输速率低于信道容量，导致信道利用不充分；当 MCS 过高时，传输丢包率上升，有效传输速率下降，传输不可靠，也不能满足传输需求。为了提升传输可靠性，目前 Wi-Fi 技术主要采用前向纠错码提升接收机误码率性能。同时，在 Wi-Fi 技术中也采用信道竞争重传的方式将未正确接收的数据包重新传输。比如，在 A-MPDU 中采用 BACK 机制对正确接收的 MPDU 确认。当传输出现错误时，只需要重传未收到 ACK 的 MPDU。然而，数据包重传以 MPDU 为单位，每次都需要重新竞争信道，导致传输效率低。HARQ 机制广泛应用于 4G 和 5G 通信，是基于数据重传和数据合并的传输机制。HARQ 机制是 Wi-Fi 8 中的链路增强机制，对于提升传输可靠性、传输速率和覆盖范围都有一定增益。

HARQ 有两种实现方法。第一种方法叫做追逐合并(Chase Combining, CC)，简单的重传原始数据。在接收机侧会对重传数据和原传输数据合并解码，提升解码 SNR。第二种方法叫做增量冗余 (Incremental Redundancy, IR)，

它是在每次重传的过程中不断增加冗余编码的比率，提升解码的可靠性。通常，在低 SNR 的情况下，CC 方式可以显著提升系统性能，在高 SNR 的情况下，IR 方式更有吸引力，原因是 IR 方式通常采用更低的冗余编码比率，传输效率更高。

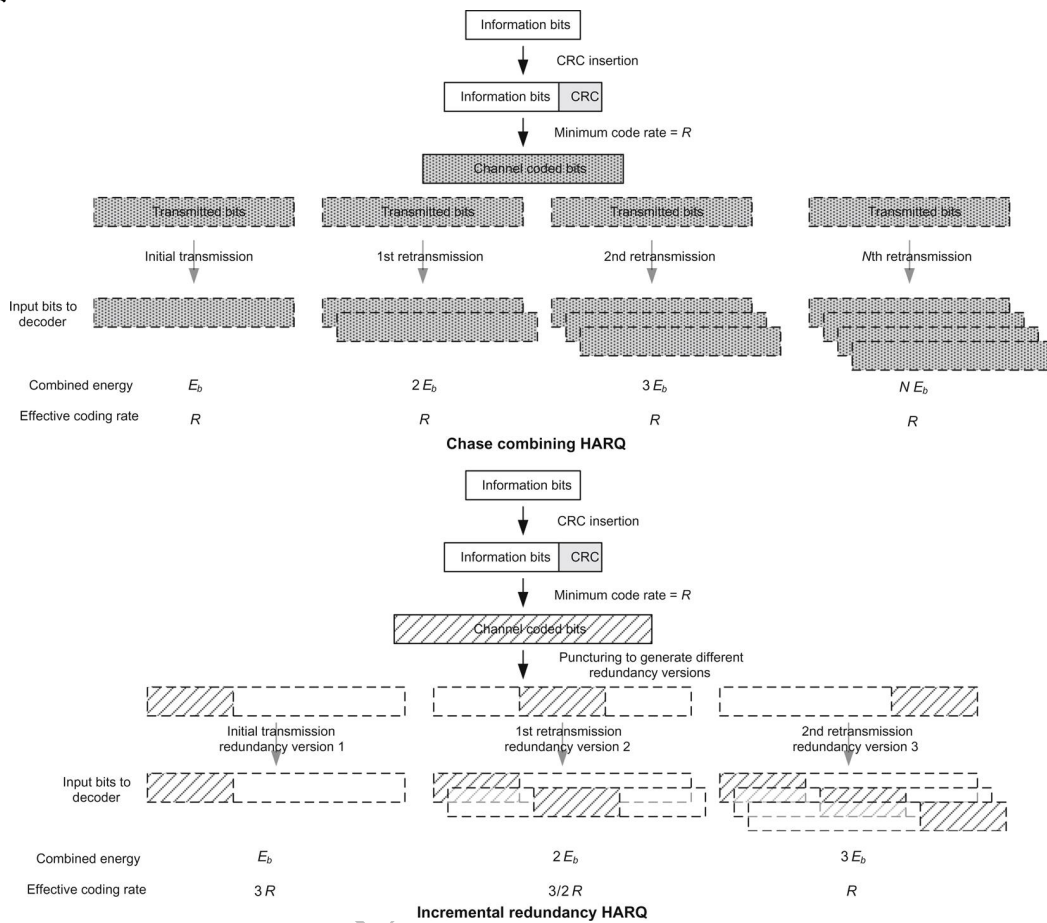


图 3-5 HARQ 实现方法

关于 HARQ 的讨论早在 2018 年 802.11be 的提案中出现。由于 802.11be 的特性角度，HARQ 的讨论在 2020 年后暂时搁置，放到了 802.11bn 的讨论中。关于 HARQ 的讨论内容可以分为以下几个方面：

- 1) **HARQ 性能评估：**分析 HARQ 机制实现的可行性，包括 a) 评估 HARQ 机制对系统性能的提升；b) HARQ 实现的复杂度。就性能而言，采用 HARQ 可以提升传输信噪比、链路自适应能力和覆盖范围。同时，HARQ 在用户移动场景下也能取得一定的性能提升。就复杂度而言，HARQ 需要的数据重传次数较少，带来系统开销低，且 HARQ 机制同现有的 802.11 技术匹配，对现有协议改动不大。
- 2) **HARQ 调度机制：**HARQ 调度机制的讨论吸引了较多关注。现有的提案总结了两大类调度方法，一种是基于 MPDU ACK 的调度方式，另一种是基于码字 (Codeword, CW) ACK 的调度方式。基于 MPDU ACK 的调度方式是将 MPDU 作为重传的单元，而基于 CW ACK 的调度方式则是将 CW 作为调度的单元。在调度方式上，高通支持 CW ACK 调度方式，而华为支持 MPDU ACK 的调度方式。采用 MPDU ACK 调度方式的优点是可以直接利用现有

的 A-MPDU 传输的 BACK 机制，简单方便，不需要改动太多协议，但缺点是 MPDU ACK 调度方式效率低，还需要改进，比如采用 MPDU 分片机制。相比而言，CW ACK 调度方式的优点是做软信息解码简单，考虑到 LDPC 码是在 PHY 解码的，MAC 的界定符、MPDU 边界和长度等信息对 PHY 不可知，采用 CW 方式天然的适合于 PHY。CW ACK 最大的缺点是 802.11 暂不支持基于 CW ACK 的反馈方式，因为 CW ACK 是在 PHY 反馈，而 ACK 帧本身在 MAC，导致的结果是 CW ACK 需要巨量的对每个 CW 的 ACK，这在实际中不可行。如果 CW ACK 调度方式要在 HARQ 中采用，还需要设计 MAC 和 PHY 之间的信息交互以及设计新的 PHY 反馈机制。

- 3) **HARQ 重传数据帧设计：**分析在不同调度机制下的数据重传方式。在重传机制方面，MPDU ACK 采用在同一个 TXOP 时间内传输原始数据和重传 HARQ PPDU，但会导致 TXOP 时间的利用率不高，只有在大数据流和传输错误多的情况有效，而基于信道竞争的重传方式会导致传输时延过高的问题。在重传数据格式方面，基于 MPDU ACK 调度方式效率低的问题，有提案提出了和现有 LDPC 编码方式匹配的重传数据帧格式，通过在重传数据帧中只传输信息位，不传输校验位的方式提高传输效率。还有提案建议位 HARQ 重传分配特定的 TXOP 保证传输可靠性。
- 4) **HARQ 和其他技术的结合：**HARQ 机制还可以和现有的速率自适应机制以及多层调制机制结合，进一步提升传输性能。速率自适应机制是基于信道状态信息反馈的传输速率调整算法，结合 HARQ，速率自适应算法可以尝试更高的 MCS，提升传输速率。多层调制机制是将高阶调制分解为多层的低阶调制，可以进一步提升传输数据容量和传输可靠性。HARQ 机制和多层调制机制的结合是爱立信主推的技术点。通过系统级仿真的方式，他们证明了 HARQ 和多层调制结合可以提高传输的稳定性。

#### 3.3.4. P2P 管理

P2P 通信是使 Wi-Fi 设备能直接同附近的设备建立链路而不经 AP 的通信方式。对 AR/VR 等应用场景很重要。因为 P2P 通信减少了和 AP 的数据交互，降低时延，同时 P2P 通信无需中转，距离更近，可以满足 AR/VR 的高吞吐量要求。尽管如此，P2P 通信依然不能脱离 WLAN 的框架，因为 P2P 采用相同的 Wi-Fi 信道，且 P2P 设备需要接入 AP 实现和外网的通信，P2P 通信需要考虑和常规 Wi-Fi 传输的共存问题以及性能的权衡。为了满足 P2P 传输要求，UHR 提出了在多 AP 协同框架下的 P2P 管理方案。目前的提案针对 P2P 通信的流程提出不同的优化方案。考虑 P2P 通信在同 AP 采用相同信道的条件下，有提案设计了多 AP 协同的推荐 P2P 通信信道和传输时间的概念。考虑 P2P 通信分配和 AP 不同的信道的条件下，有提案设计了 P2P 分群 (Grouping) 资源配置的方案。对 P2P 通信和多 AP 协同网络的共存、低功耗要求、传输安全性方面的研究是其中的重要方向。

### 3.3.5. AI/ML

AI/ML 算法发展迅速，并在众多领域取得应用，如：医疗诊断、语音识别、计算机视觉、机器人视觉与控制集成。AI/ML 算法也在众多应用，如：自动驾驶、语音翻译和人机交互中重要组件。传统的 AI/ML 技术基于集中式模型，需要在数据源和集中式服务器之间交换大量数据。而分布式 AI/ML 算法(如联邦学习)，允许在源上进行更多的分析，减少需要交换的数据量，尽管预期交换的数据量仍然很大。随着无线网络和通信的普及，许多交换的数据预计将通过无线网络，如无线局域网进行传输。研究表明，AI/ML 算法可以帮助提高无线通信网络的性能，在不断变化的环境中提供更好的资源使用、更低的能耗、更高的可靠性和更强的鲁棒性。随着这些算法变得更加成熟和经济有效，WLAN 可能会利用 AIML 来增强网络性能和用户体验。在新一代 Wi-Fi 标准中，有 3 个因素提升了 AI/ML 的重要性，

- 1) **网络资源管理困难：**WLAN 中 AP 和 STA 设备多、密度大，网络资源管理困难。需要多设备的协同，避免信道干扰、保障传输公平性和提升传输容量。
- 2) **设备性能差异大：**WLAN 中 AP、STA 的性能差异大，如天线数、处理能力等，且可能采用不同 Wi-Fi 协议代数，协同处理困难。
- 3) **业务需求差异大：**WLAN 中业务类型、业务流量需求差异大，各类新兴用例对速率、时延、可靠性、传输距离要求不同，需要实时满足多业务流传输需求，传统传输难以有效应付。

AI/ML 在无线通信系统中的应用已经成为重要的趋势。在 5G 网络和未来的 6G 网络中，AI/ML 是其中的重要用例和应用场景。2022 年 5 月，802.11 工作组成立了 TIG 以研究 AI/ML 在 WLAN 的使用场景和技术可行性，以及这些用例对标准影响。在 2023 年 9 月接收临时会议众多意见反馈后，AIML TIG 解决了部分意见，并增加到 AIML TIG 的技术报告中。目前，技术报告已有公开的版本可靠参考。考虑到传统深度学习模型对数据训练、数据交互过程中的传输需求，Wi-Fi 协议中还需要设计 AI/ML 模型数据交互和模型分享的传输协议，这也是目前 AI/ML 在 Wi-Fi 中应用的一大瓶颈，降低模型交互开销的讨论是 AI/ML 应用的前提，这一内容体现在技术报告中。除此之外，技术报告总结了 AI/ML 几个重要的用例，主要有：

- 1) **CSI 反馈开销压缩：**从 Wi-Fi 5 支持最多 4 个空间流，Wi-Fi 7 理论支持最多 8 个空间流，到 Wi-Fi 8 可能支持最多 16 个空间流，支持更高数量的空间流是 Wi-Fi 十多年来的发展趋势。理论结果表明，具有大量发射机天线和大量空间流(例如，16 个空间流)的 MIMO 在 SU-MIMO 和 MU-MIMO 两种情况下都能提供显著的系统性能增益。多 AP 协同是 Wi-Fi 8 的重要特性，如果应用 AP 之间的协同(如联合发射/接收、协调波束赋形)，大量的空间流结合协同可能会进一步增加信道探测的空时开销。大量的开销或长时间的信道探测过程可能会导致更大的时延，限制系统性能。因此，需要降低 CSI 反馈开销，特别是当发射机天线数增加或多个 AP 进行联合或协调传输时。采用 AI/ML 可以压缩信道探测矩阵、降低信道探测复杂度以减小 CSI 反馈时延。减少 CSI 反馈时延是 AI/ML 的重要应用场景。

- 2) **分布式信道接入增强：**在 802.11 中，STA 使用基于 CSMA/CA 的分布式协调函数作为基本的 MAC 信道接入方式。在接入前，STA 监听信道状态。如果 STA 发现信道在指定的最小时间内空闲，例如 DIFS，则允许 STA 在等待额外的随机回退时间后开始传输帧。如果 STA 发现信道被占用，将采用指数回退的方式增大信道竞争窗口，直到达到最大信道竞争窗口值，以进一步减少冲突。改进分布式信道接入以提升吞吐量和时延性能是 WLAN 发展的重要趋势。一些研究表明，基于 AI/ML 的信道接入方案可以有效地提高吞吐量/信道效率，并额外降低延迟和抖动。
- 3) **漫游增强：**多 AP 网络通常存在较多的漫游切换情况。在密集 AP 部署中，大量的漫游候选 AP 和正在使用的通道可能会导致 STA 扫描过程耗时较长，影响设备电池寿命和用户体验。AP 在 STA 请求时发送的 802.11k 邻居报告，主要通过提供信道子集和预扫描的 AP 候选列表，指示对辅助 STA 漫游决策有用的邻居 AP（BSSID、信道、PHY 类型和可选元素）的信息。然而，并非所有邻近 AP 都与 STA 做出最佳漫游决策同等相关。每个 AP 可以有多个不同远近的邻居 AP，STA 无法通过简单的机制来确定漫游的最好 AP。应用 AI/ML 技术，可以根据学习到的客户端漫游模式，确定 STA 漫游到特定 AP 的概率。
- 4) **多 AP 协同优化：**多 AP 协同也是 AI/ML 的重要应用场景。同信道干扰是多 AP 网络部署中难以避免的问题。多 AP 协同是提升有限信道资源利用率的必要手段，通常以整体网络吞吐量的增加来衡量。根据之前给出的多 AP 协同技术点可知，实现多 AP 协同需要对整体网络资源调度，涉及到各类传输参数和传输机制。AI/ML 在 CSR、C-OFDMA、CBF 以及 JTX 中的应用得到一定程度的研究。除了这些技术点外，对多 AP 协同网络的管理（集中式、分布式等）也是 AI/ML 的研究重点。针对多 AP 协同网络的管理，有研究工作提出了用于 WLAN 的分布式 MIMO，采用深度强化学习学习在动态 STA 分布下分布式 MIMO 的工作策略，从而使多 AP 协同网络的整体吞吐量提升 20%。也有研究工作提出了支持信道访问联邦学习的集中式信道分配体系结构。

## 第四章 标准布局可行性

当前，Wi-Fi 8 标准的用例、KPI 和演进方向已经确定，并已成立标准工作组，一些技术点的讨论刚刚开始。在标准布局方面，Wi-Fi 8 标准同 Wi-Fi 7 标准采用不同的演进路线。在 2022 年，Wi-Fi 7 D2.0 将最初的多 AP 协同和 HARQ 的讨论冻结，不作为 Wi-Fi 7 标准的特性，留到了 Wi-Fi 8 的讨论中。针对 Wi-Fi 7 标准内容技术点多、收敛慢的问题，Wi-Fi 8 预计在讨论初期就确定了技术点，加快收敛速度。目前，Wi-Fi 8 中多 AP 协同和 HARQ 已经有不少从 Wi-Fi 7 就布局好的提案，布局难度较大。在 P2P、虚拟基础服务集、6GHz 频段的使用、AI/ML 的应用、A-PPDU 等讨论还处于初期，布局可行性跟高。考虑到对家庭网络性能的提升，多 AP 协同、AI/ML、HARQ、P2P 管理可以做长期的提案跟踪，结合公司具体业务做一定的布局。

提案的流程通常走专利布局、提案撰写、投票表决等步骤。专利布局是其中的核心，而投票表决需要得到大多数的同意，需要考虑提案价值、个人威望和企业影响力。从长期角度考虑，有效提案不但能提升企业影响力还能带来实际的专利授权产出。短期来看，考虑到移动在标准布局上基础薄弱，还没有技术积累。因此，目前还需要

- a) 积累技术经验，提升行业洞察力；
  - b) 加强和其他公司的深度合作，深入技术点交流；
  - c) 并长期参与 IEEE 标准会议，提供有价值的意见，积累行业影响力。
- 在当前情况下，推动和其他厂商合作的共同提案更为实际。

## 参考文献

- [1] Wi-Fi Alliance®推出 Wi-Fi 6, 2018.10.03, <https://www.wi-fi.org/zh-hans/news-events/newsroom/wi-fi-alliance-tuichu-wi-fi-6>
- [2] Wiki: Wi-Fi 6, 2023.12.04, [https://en.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi\\_6](https://en.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi_6)
- [3] 11-22-0030-01-0wng-look-ahead-to-next-generation.pptx