

Wi-Fi 技术及产业发展动态（上）

智慧信息中心 雷微露

摘要

Wi-Fi 技术属于短距离无线技术，是一种网络传输标准。自 1999 年诞生至今，其应用价值及商业价值被行业广泛认可，日常生活中 Wi-Fi 在智能手机和笔记本电脑中的配置率已经接近 100%。根据国内外技术发展的新趋势、新动态，阐述 Wi-Fi 技术及产业发展情况。

1 引言

随着无线技术的更新迭代，2018 年，为了更好地打造 Wi-Fi 生态系统，便于 Wi-Fi 标准的宣传和使用，也便于非专业用户有效区分 Wi-Fi 标准，Wi-Fi 联盟更改标准命名规则，将之前的标准 802.11n 改名为 Wi-Fi4，标准 802.11ac 改名为 Wi-Fi5，后期标准依次进行命名。

2 Wi-Fi 技术的标准化历程

Wi-Fi 网络基于 IEEE 802.11 标准。1997 年 6 月，IEEE 发布了第一代 802.11 标准，即 IEEE 802.11-1997。802.11-1997 可运行在 2.4 GHz 非授权频段，使用直接序列扩频（Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS）调制，最大提供 2 Mbps 的物理层传输速率。这样的数据传输率难以撼动当时 100 Mbps 以太网的地位，因此该标准没有得到广泛的应用，但该标准奠定了 Wi-Fi 网络的基础。

Wi-Fi 1（IEEE 802.11b）：1999 年 9 月 IEEE 推出 802.11b，使用了带补码键控（Complementary Code Keying, CCK）的高速率 DSSS（High Rate DSSS, HR/DSSS），主要采用直接序列扩频（DSSS）技术，工作在 2.4GHz 频段，最高传输速率提高到 11Mbps，标志着 Wi-Fi 技术开始进入民用阶段。但其存在明显局限性，覆盖范围较小，在室内一般为 35-100 米，且抗干扰能力较弱，容易受到同频段其他设备干扰，数据传输稳定性欠佳，安全性方面仅支持 WEP 加密，存在较大安全漏洞。

Wi-Fi 2（IEEE 802.11a）：同年发布 802.11a 修正案，工作在 5GHz 频段，带宽 20MHz，且在物理层引入了正交频分复用（Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM）技术，将最高传输速率提升至 54Mbps，数据传输稳定性有所增强。不过由于 5GHz 频段的穿透性较差，其覆盖范围比 802.11b 更小，室

内约为 30 米左右，并且与 802.11b 不兼容，限制了其广泛应用。

Wi-Fi 3 (IEEE 802.11g)：2003 年 3 月，IEEE 将 OFDM 技术引入了 2.4GHz，推出 802.11g 修正案使最高传输速率达到 54Mbps。它在一定程度上改善了覆盖范围和抗干扰能力，室内覆盖范围约为 50-100 米。但随着使用设备增多，2.4GHz 频段拥堵问题逐渐凸显，影响了网络性能。

Wi-Fi 4 (IEEE 802.11n)：此后 IEEE 工作组将重心放到了提高吞吐量上，并于 2009 年 10 月正式发布 802.11n 修正案。802.11n 引入多输入多输出(Multiple Input Multiple Output,MIMO) 技术，支持 2.4GHz 和 5GHz 双频段，最大支持 4 条空间流进行数据传输，最高传输速率可达 600Mbps，覆盖范围和信号稳定性大幅提升，室内覆盖范围可达 70-150 米。其安全性升级至 WPA2 加密，显著增强了网络安全性。不过，在多用户并发场景下，性能表现仍有待提高。

Wi-Fi 5 (IEEE 802.11ac)：2014 年 1 月，IEEE 又发布了超高吞吐量 (Very High Throughput, VHT) 802.11ac 修正案。802.11ac 延续了 802.11n 提高吞吐量的思路，将 MIMO 支持的空间流数量增加到了 8 条，最大带宽增加到了 160 MHz。除此之外，802.11ac 还引入了更高阶的正交振幅调制 (Quadrature Amplitude Modulation, QAM)，从 802.11n 的最高 64-QAM 提高到了 256-QAM。通过这些改进最高传输速率可达 6.9Gbps，大幅提升了网络容量和传输效率。它能更好地支持多用户同时在线，有效降低网络拥堵。但是 802.11ac 仅支持 5 GHz 频段，不再支持 2.4 GHz 频段，这限制了其在低成本设备中的应用。

Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax)：高效率 (High Efficiency, HE) IEEE 802.11ax 修正案于 2021 年 2 月通过，不同于前两代标准，802.11ax 的目标主要是提高高密度场景下的接入效率，而非提高峰值速率。为此 802.11ax 引入了正交频分多址 (Orthogonal Frequency Division Multiple Access,OFDMA), 该技术允许多个用户在不同频率的子载波上同时传输，提高了接入效率，降低了时延。虽然提升峰值速率不是 802.11ax 的主要目标，但通过引入 1024-QAM 和更低的 OFDM 符号保护间隔开销，802.11ax 的最大物理层数据传输率相较于 802.11ac 仍然提升了 37%。除此之外，802.11ax 重新支持了 2.4 GHz 频段，这使得其应用范围更加广泛。其安全性进一步升级，采用 WPA3 加密标准，提升了数据传输的安全性和隐私保护。此外，Wi-Fi 6 还具备更好的节能特性，延长了设备续航时间。

Wi-Fi 7(IEEE 802.11be):2024 年 1 月极高吞吐量(Extremely High Throughput, EHT) 802.11be 正式发布, Wi-Fi 7 正式步入全球商业化元年, 开启了无线网络的新篇章。新增支持 6GHz 频段, 同时支持 2.4GHz 和 5GHz 频段, 三个频段可同时工作。引入了更先进的多链路操作 (MLO)、增强型 MU-MIMO 等技术, 理论最高传输速率可达 46Gbps, 极大提升了网络带宽和传输效率, 进一步降低延迟, 显著提高网络容量, 可满足更多设备同时高速稳定连接的需求, 尤其适用于 8K 视频、云游戏、虚拟现实等高带宽低延迟应用场景。据 IDC 和 Wi-Fi 联盟的预测, 随着 Wi-Fi7 的商业化落地, 市场将迎来一轮新的增长热潮。2024 年有超过 2.3 亿台 Wi-Fi7 设备投放市场, 到 2027 年全球 Wi-Fi7 设备的占比将高达 65%。

标准	发布年份	调制方式	频带 (GHz)	最大带宽 (MHz)	最大物理层速率 (Mbps)
802.11	1997	DSSS	2.4	11	2
802.11b	1999	HR/DSSS/CCK	2.4	11	11
802.11a	1999	OFDM	5	20	54
802.11g	2003	HR/DSSS/CCK, OFDM	2.4	20	54
802.11n	2009	OFDM	2.4, 5	40	600
802.11ac	2013	OFDM	5	160	6933
802.11ax	2021	OFDMA	2.4, 5	160	9608
802.11be	2024	OFDMA	2.4, 5, 6	320	46120

图 1 IEEE 802.11 标准主要版本技术特征总结

3 Wi-Fi 7 技术特点

Wi-Fi 7 是在 Wi-Fi 6 的基础上引入了 320 MHz 带宽、4096-QAM、Multi-RU、多链路操作、增强 MU-MIMO、多 AP 协作等技术, 使得 Wi-Fi 7 相较于 Wi-Fi 6 将提供更高的数据传输速率和更低的时延。Wi-Fi 7 预计能够支持高达 46 Gbps 的吞吐量, 大约是 Wi-Fi 6 的 3-4 倍。

3.1 物理层技术

(1) 320 MHz 带宽

Wi-Fi 7 覆盖 3 个频段, 而且在 6GHz 频段支持从 5.925~7.125 GHz 高达 1200MHz 的频段范围。在 2.4GHz 和 5GHz 两个频段, 真正授权使用的频段范围是很有限的, 但是 6GHz 这次开放的频谱就非常慷慨, 这也为 Wi-Fi 7 进行更高

的吞吐量设计提供了底层支撑。具体而言，Wi-Fi 7 的信道带宽包括：20MHz、40MHz、80MHz、160MHz、240MHz 和 360MHz，其中 160MHz、240MHz 和 360MHz 这些信道带宽可以是连续的，也可以是不连续的。不连续信道带宽并非 Wi-Fi 7 独有，而是从 Wi-Fi 6（802.11ax）继承下来的能力。6 GHz 频段支持多达 6 个重叠的 320 MHz 信道和 3 个非重叠信道。

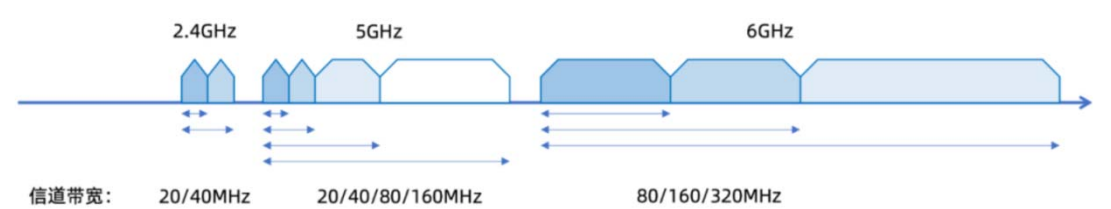


图 2 信道带宽示意图

（2）4K-QAM 调制技术

Wi-Fi 7 引入了 4K-QAM（正交振幅调制）技术，QAM 是一种数字调制技术，可以将数字信号映射到多个幅度和相位不同的载波上，以实现高速数据传输。Wi-Fi 7 将 Wi-Fi 6 的 1024-QAM 提升至 4096-QAM。调制阶数的增加，使得每个符号能够携带更多的比特数据，从而在相同频谱资源下实现更高的传输速率。

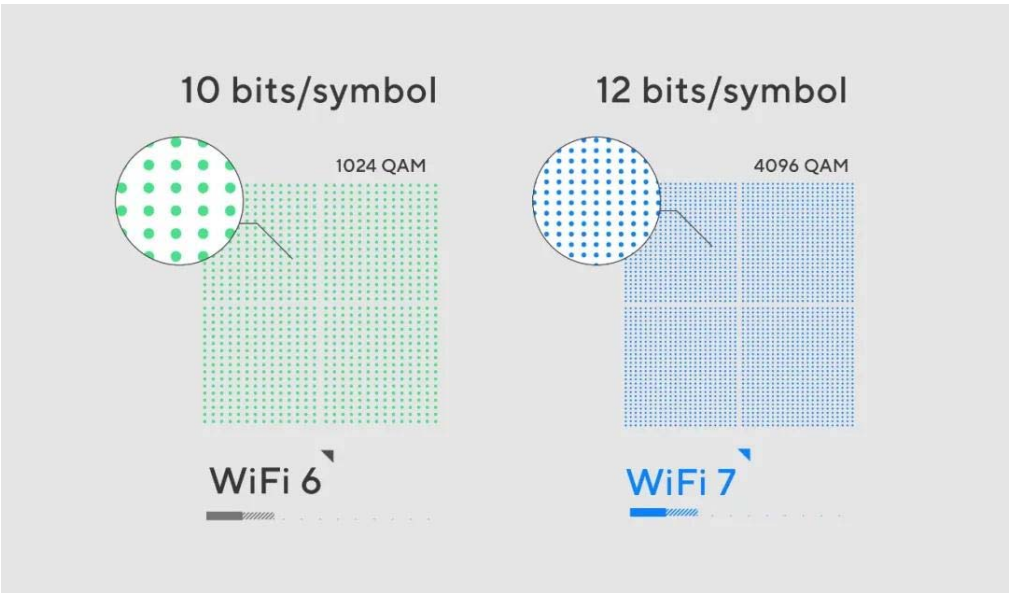


图 3 QAM 调制示意图

（3）OFDMA 技术加持 MRU 技术

OFDMA 技术将 Wi-Fi 信道分为多个子信道，每个组作为独立的资源单元（RU）承载数据并传输，在下行方向，不同的 RU 承载不同终端的接收数据，

在上行方向，RU 承载不同终端的发送数据。这种并行传输的方式使得资源调度的粒度更小、更灵活，提高了信道的利用率，降低了终端传输的响应时间，提高了网络的吞吐量和速度。

Wi-Fi 7 在 OFDMA 技术上加持 MRU（Multiple Resource Unit，多资源单位技术），这一机制允许将多个 RU 设置分配给一个非 AP 用户，与 Wi-Fi 6 中 AP 只能给每个用户分配一个 RU 相比，此举进一步提高了频谱利用效率。它可根据用户需求，灵活地进行带宽（QoS，服务质量）控制。从而更有效地利用带宽资源，提升网络传输效率。

同时 OFDMA 模式下，既支持小的 MRU，也支持大的 MRU，让 RU/MRU 的分配更加灵活，能更好地适配不同设备的性能与业务需求。为了实现这一机制并平衡实现复杂性和频谱利用率，标准规范对 RU 组合施加了一定的限制。例如，小型 RU（包含少于 242 个载波）只能与小型 RU 组合，而大型 RU（包含大于或等于 242 个载波）只能与大型 RU 组合。这样的限制确保了 RU 组合的合理性，避免了不同大小 RU 之间的不兼容问题，从而保证了网络性能的稳定性和可靠性。



图 4 MRU 技术示意图

3.2 链路层技术

(1) MLO 技术

MLO（Multi-Link Operation）多链路聚合技术，通过使用多个物理层链路和共享的 MAC 层协调，可以有效地管理和分配不同频段的网络资源，以实现在不同频段、不同无线链路上同时并行的数据传输。通过同时使用多个链路，MLO 可以增加容量，提供更高的数据传输速率和更好的用户体验。简单地讲是指我们

的设备可以同时连多个 Wi-Fi 热点，比如 2.4G+5G+6G 来实现更快的吞吐量。Link1、Link2、Link3 的网速聚合，也可以获得更高的网速，更低的网络延迟。同时网络 Wi-Fi 链接可以动态切换，当其中一路遇到干扰时，可以动态切到另外一路更好的 Wi-Fi 链接。

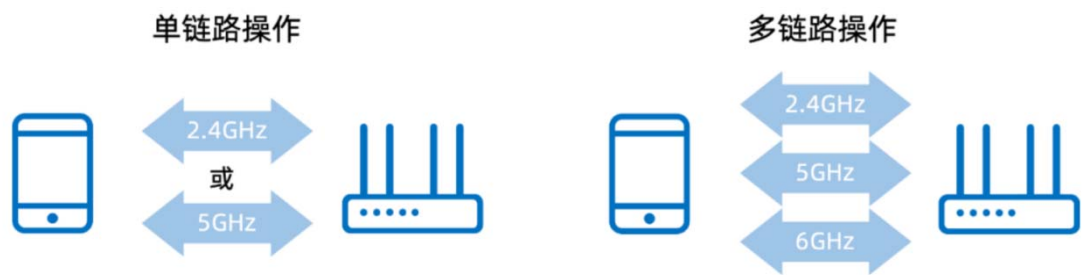


图 5 MLO 技术示意图

(2) HARQ 技术

HARQ（混合自动重复请求）是一种数据传输的高效方式，可以将数据分成小块进行传输，并在每个小块的传输之后立即进行确认。如果某个小块传输失败，则可以在后续传输中进行重传，从而提高数据传输的可靠性和效率。是一种结合 FEC (Forward Error Correction, 前向纠错) 与 ARQ (Automatic Repeat reQuest) 方法的技术。具体操作是：当发送方将数据发送给接收方时，接收方会检查数据的准确性。如果接收方发现数据有错误或丢失，它会发送一个 NACK 给发送方，表示需要进行重新发送。发送方在收到 NACK 后会重新发送数据，直到接收方收到正确的数据并发送一个确认信息（ACK）。这个重传过程会一直持续，直到数据被正确接收。

增强型链路适配和重传协议并不是 Wi-Fi 7 中首次提出的技术，它们在之前的 Wi-Fi 版本中也已经有应用。不过在 Wi-Fi 7 中，这些技术得到了进一步的优化和改进，以提高 Wi-Fi 网络的性能和可靠性：采用更高效的重传协议：Wi-Fi 7 引入了一种名为“复杂度自适应混合自动重传请求（CA-HARQ）”的协议，该协议可以根据信道质量和网络负载情况动态地调整重传的次数和时间间隔，从而提高传输效率和性能。增量冗余技术：每次数据重传都包含与先前传输不同的信息。换句话说，在每次重传时，接收方都会获得额外的信息。

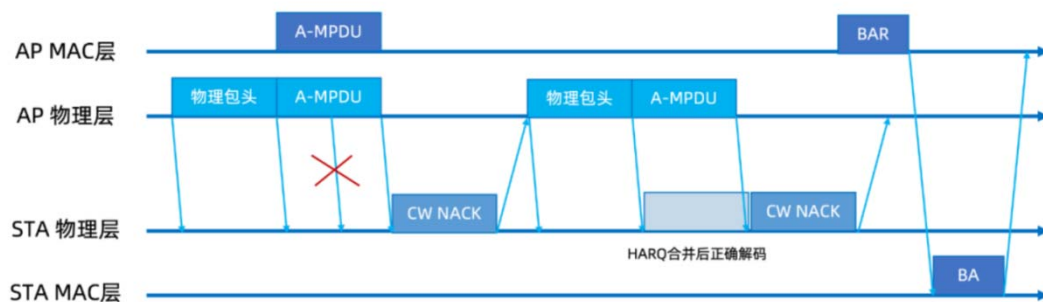


图 6 HARQ 技术示意图

3.3 空间复用技术

(1) MU-MIMO 技术

Wi-Fi7 将 MU-MIMO 技术升级至 16×16 , 相比 Wi-Fi6 的 8×8 , MU-MIMO 数据流数量翻倍。传统的 SU-MIMO (单用户多输入多输出) 技术只能在同一时间与单个设备进行多流数据传输, 而 MU-MIMO 技术允许接入点同时与多个设备进行多流数据传输。例如在办公室环境中, 支持 Wi-Fi7 的路由器可以同时与多台电脑、手机建立多条数据链路, 每台设备都能独立享受高速数据传输, 极大提升了网络容量和整体传输效率, 满足大量设备同时在线的需求。也能保持更稳定的速度和性能。



图 7 MU-MIMO 技术示意图

(2) 前导码穿孔技术

前导码穿孔技术 (Preamble puncture) 的作用是, 当从信道忙时, 仅将忙的信道剔除, 继续使用剩余非连续的从信道。更精细的频谱利用, 可跳过有干扰的

小段频段，提升抗干扰能力或干扰环境下无线性能。

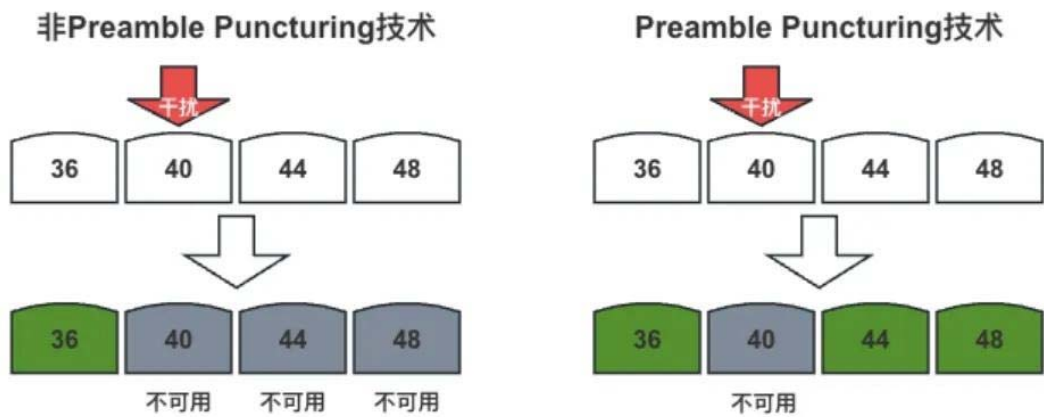


图 8 前导码穿孔技术示意图

3.4 多 AP 协同优化

目前在 802.11 的协议框架内，AP 之间的协作仅仅只有信道优化选择、AP 发射功率调整、负载均衡、空间复用等等，AP 之间实际上是没有太多协作的关系。为了进一步实现一定区域内射频资源利用最大化，Wi-Fi 7 增加了多 AP 间的协同调度，包括小区间的在时域和频域的协调规划，小区间的干扰协调，以及分布式 MIMO，可以有效降低 AP 之间的干扰，极大的提升空口资源的利用率。

Wi-Fi 7 提出了多 AP 的协同调度 (Multi-AP Coordination)，包括：协同正交频分复用多址接入 (Co-OFDMA，Coordinated Orthogonal Frequency Division Multiple Access)、协同空间复用 (Co-SR，Coordinated Spatial Reuse)、协同波束成形 (Co-BF，Coordinated Beamforming) 和协同数据发送 (Co-JT，Coordinated Joint Transmission)、协同时间分割多址接入 (Co-TDMA，Coordinated Time Division Multiple Access)、BSS (Basic Service Set) Coloring 技术以及清晰信道评估 CCA (Clear Channel Assessment) 技术等。

(1) 协同正交频分复用多址接入 (Co-OFDMA)

协同正交频分复用多址接入 (Co-OFDMA) 通过在不同 AP 之间协调和分配子载波资源，使得多个 AP 可以同时在不同的子载波上进行并行通信，实现在多个 AP 之间共享频谱资源，从而提高频谱利用效率和网络容量。

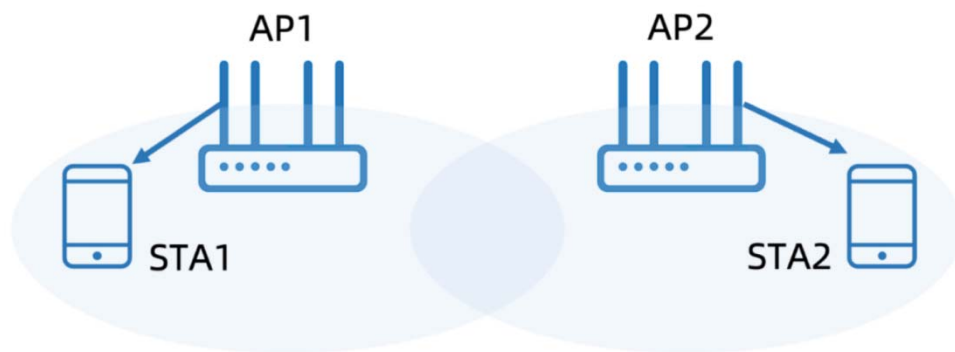


图9 Co-OFDMA 技术示意图

(2) 协同空间复用 (Co-SR)

协同空间复用 (Co-SR) 通过协调不同 AP 的发送和接收时隙，在空域上进行协调，实现不同 AP 在相邻的区域内同时传输数据，减少不同 AP 之间的干扰并提高空间复用效率、网络容量和吞吐量。

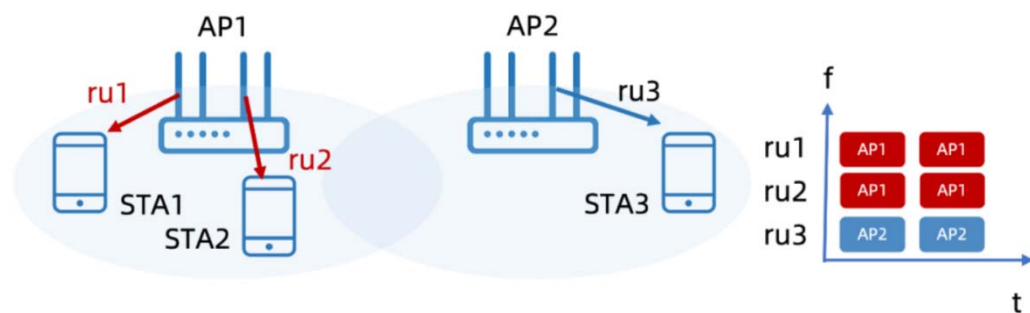


图10 Co-SR 技术示意图

(3) 协同波束成形 (Co-BF)

协同波束成形 (Co-BF) 通过协同波束成形，利用多个 AP 之间的协同工作，集中信号能量并改变天线辐射方向，将无线信号以更强的方向性发送给特定的用户设备，提供更强的信号覆盖、增强的链路质量和传输效率。

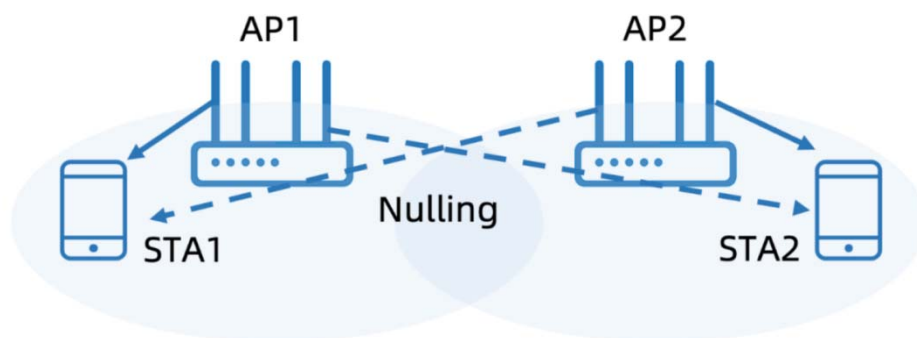


图 11 Co-BF 技术示意图

(4) 协同数据发送 (Co-JT)

协同数据发送 (co-JT) 允许多个 AP 的数据组合成一个更强大的信号, 在同一时间发送协同数据给同一个用户设备。可以提高用户设备的接收信号质量、传输速率和覆盖范围。

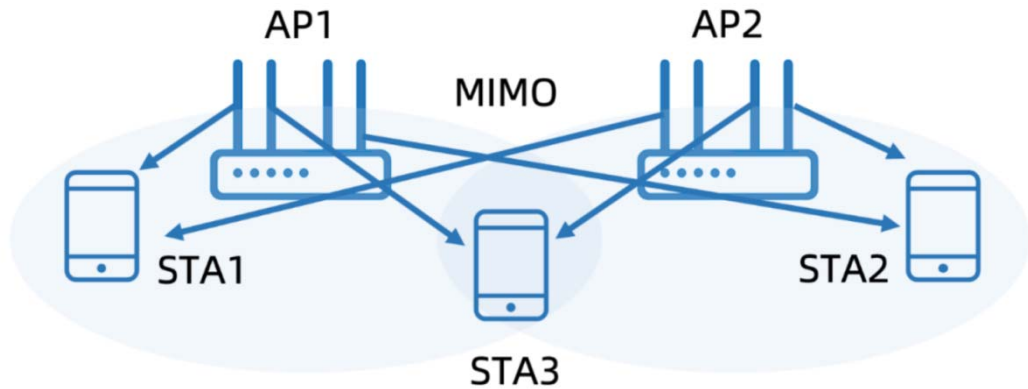


图 12 Co-JT 技术示意图

(5) 协同时间分割多址接入 (Co-TDMA)

协同时间分割多址接入 (Co-TDMA) 允许多个 AP 在不同的时间片段上发送数据, 通过协同调度和分配时间资源, 避免了 AP 之间的冲突和干扰, 减少传输延迟, 并提供更稳定和可靠的连接, 提高网络容量和频谱利用效率。

(6) 基本服务集着色机制 (BSS Coloring)

基本服务集着色机制 (BSS Coloring) 技术通过标识和区分不同的 BSS。在传统 Wi-Fi 网络中, 当多个 Wi-Fi 路由器或接入点 (AP) 在同一频道上运行时, 它们会相互干扰, 导致网络性能下降。在多个 Wi-Fi 热点覆盖的环境中会出现乒乓效应, 这种现象也称为"空气电路"。在这种情况下, Wi-Fi 终端设备会频繁地在不同的 Wi-Fi 热点之间进行切换, 这会导致连接不稳定和数据传输的延迟。当其他 Wi-Fi 设备接收到这个数据包时, 会根据这个标记识别这个数据包是否来自同一网络中的其他设备, 如果颜色相同, 则认为是同一 BSS 内的干扰信号, 发送将推迟; 如果颜色不同, 则认为两者之间无干扰, 两个 Wi-Fi 设备可同信道同频并行传输。可以避免干扰现象的发生, 提高 Wi-Fi 网络的性能和可靠性。

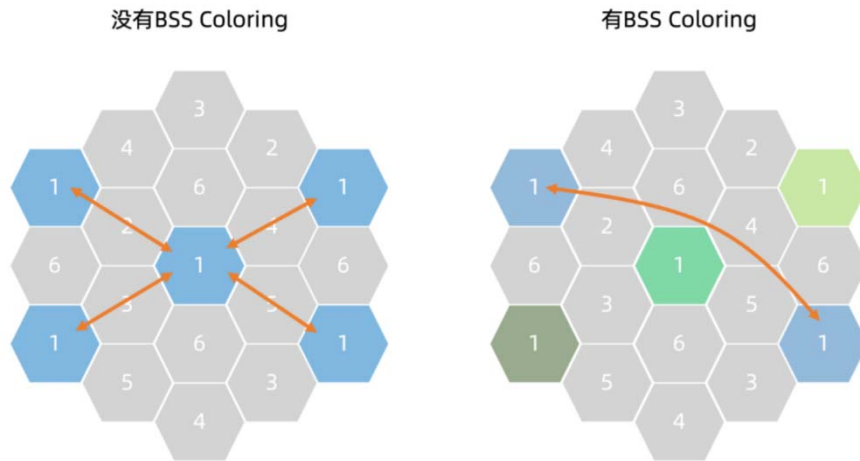


图 13 BSS Coloring 技术示意图

(7) 清晰信道评估 (CCA)

清晰信道评估 (CCA) 是一种动态信道监测技术，用于检测、感知并评估周围环境中的信道活动情况。根据实时的信道状态进行调整。这可以帮助 AP 选择相对空闲的信道以提供更好的性能，并减少与其他 AP 之间的干扰。

3.5 时间管理技术

(1) TSN 技术

TSN 是一组用于实时和时间敏感应用的网络技术标准，旨在通过以太网实现高可靠性、低延迟和确定性的通信。它为 Wi-Fi 网络提供了一种可靠地支持实时应用的方式，包括工业自动化、智能制造、车联网等领域。TSN 技术通过定义时间同步机制、流量调度和优先级控制等功能，实现了对实时数据传输的保证。

Wi-Fi 7 参考 TSN 的模式，完善当前无线局域网的机制。同时，也需要考虑受限的空口环境(例如，链路不可靠性、缺乏准确的时钟同步、不对称的路径延迟等等)，以及老产品的兼容性。

(2) TWT 技术

目标唤醒时间 (Target Wake Time, TWT)是指无线终端设备在与无线接入点 (AP) 通信时，通过协商设定睡眠和唤醒时间，实现设备节能的技术。在以往的 Wi-Fi 标准中，无线终端设备会在持续监听无线信道，随时准备接收 AP 发送的数据帧，这会导致设备的能耗较高。而在 TWT 技术的引入下，AP 可以告知设备在何时唤醒以接收数据，从而使设备在不需要进行通信时，可以进入睡眠状态以节省能源。同时，这也可以提高网络的吞吐量和响应速度，因为 AP 可以在指

定的时间将数据帧发送给设备，避免了设备的重复监听。它的引入在 Wi-Fi 6 中已经有所体现，但在 Wi-Fi 7 中进行了进一步的优化和改进，以提高设备的睡眠和唤醒效率，并进一步降低能耗。。

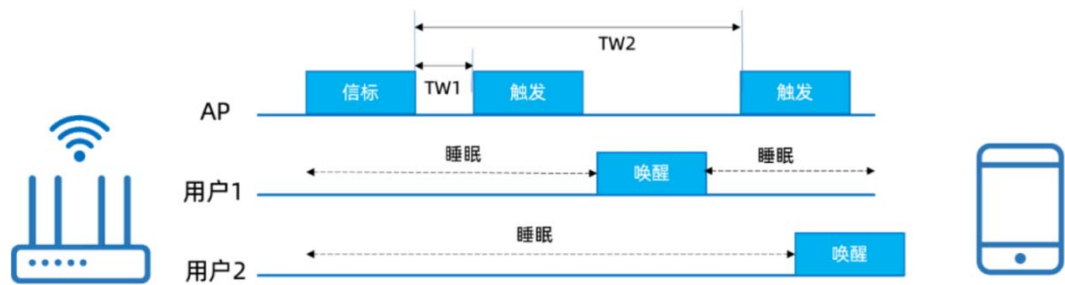


图 14 TWT 技术示意图