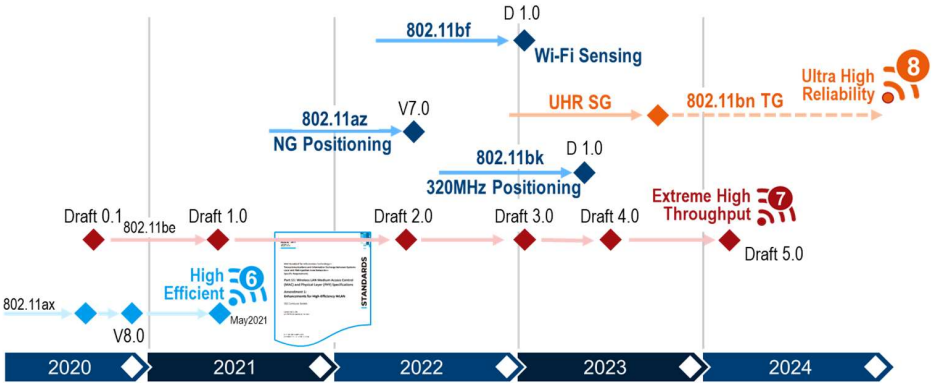
未来已来：
探索Wi-Fi 8的无限可能

1 前言

在Wi-Fi 7设备正在如火如荼的爆发性增长的时候，Wi-Fi的下一代标准也早已开始早期研究。Wi-Fi 8又称为802.11bn，也称为UHR(Ultra High Reliability)超高可靠Wi-Fi。从时间线上看，UHR SG(Study Group)早在2022年7月就成立了，旨在讨论并制定新的项目授权请求 (PAR：Project Authorization Request)，定义802.11be之外需要考虑的一组目标、频段和技术。其研究成果转入在2024年11月成立的UHR TG(Task Group)，为Wi-Fi 8的初期版本做准备。预计基于Wi-Fi 8的产品将于2028年左右面世。

图1：Wi-Fi技术演进时间表



从UHR的名称定义就可以知道Wi-Fi 8的主要应用将针对于对吞吐量、延迟和可靠性要求苛刻的场景，比如虚拟现实、智慧工程、物联网和企业网应用等。

UHR的目标包括：

- ▶吞吐量增加25% (MAC测吞吐量)；
- ▶与802.11be相比，延迟进一步降低25%；
- ▶即使在具有移动性和重叠基本服务集 (OBSS：Overlapping Basic Service Sets) 的场景中，也可将95%的数据包延迟减少25%，并将 MAC 协议数据单元 (MPDU：MAC Protocol Data Unit) 丢失率减少25%；
- ▶降低AP功耗并改善点对点通信。

针对以上目标，早期标准研究针对物理层和MAC层做了很多课题研究。

图2：Wi-Fi 8标准早期研究课题

2 分布式RU (DRU)

和802.11be相比，802.11bn基本的物理层参数变化并不大。除了资源单元增加了DRU (Distributed Resource Unit) 之外，频率、带宽、子载波间隔、调制方式、MIMO层数、MLO传输均与802.11be相同。需要着重提及的一点是802.11bn修正案适用于1 GHz至7.250 GHz （**请注意：Wi-Fi从802.11be开始将6 GHz频段扩展到7.250 GHz**）之间的载波频率并保证其向后兼容性。这也意味着6 GHz频段将在Wi-Fi 8继续得以沿用。

图3：Wi-Fi 6/7/8物理层参数对比

	IEEE 802.11ax *High Efficiency (HE)*	802.11be *Extreme High Throughput (EHT)*	802.11bn *Ultra High Reliability (UHR)*
Supported bands	1.0…7.125 GHz	1.0…7.250 GHz	1.0 …7.250 GHz
Channel bandwidth (MHz)	≤ 160 MHz	**≤ 320 MHz**	≤ 320 MHz
Resource Units	RRU	RRU, **MRU**	RRU, MRU, **DRU**
Subcarrier spacing	78.125 kHz	78.125 kHz	78.125 kHz
Modulation (highest)	1024QAM (10 bit)	**4096QAM (12 bit)**	**4096QAM (12 bit)**
Spatial streams	8x8	8x8	8x8
Multi Link Operation	N/A	MLO	MLO

DRU传输专门针对6 GHz频段的低功率室内 (LPI: Low Power Indoor) 设备，允许在更宽的带宽上分配已分配的Tones，从而减少每MHz的Tones数量。这一变化能够显著提高上行OFDMA传输功率，有效扩展了传输范围并提高了这些设备的整体性能。图4举例说明LPI设备使用DRU后的发射功率对比（假设-1 dBm/MHz）。同样的52-tone无线资源单元，rRU每MHz包括13个tone，dRU每MHz包括3个tone，发射功率提高4.33倍，功率增加6.37 dB。

图4：使用DRU传输后的上行发射功率对比变化

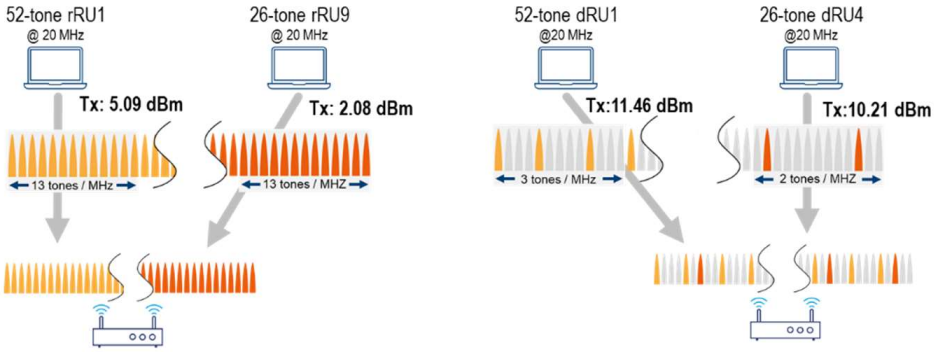


表1是针对不同的tones和带宽，使用DRU技术之后可能带来的Tx发射功率提升。

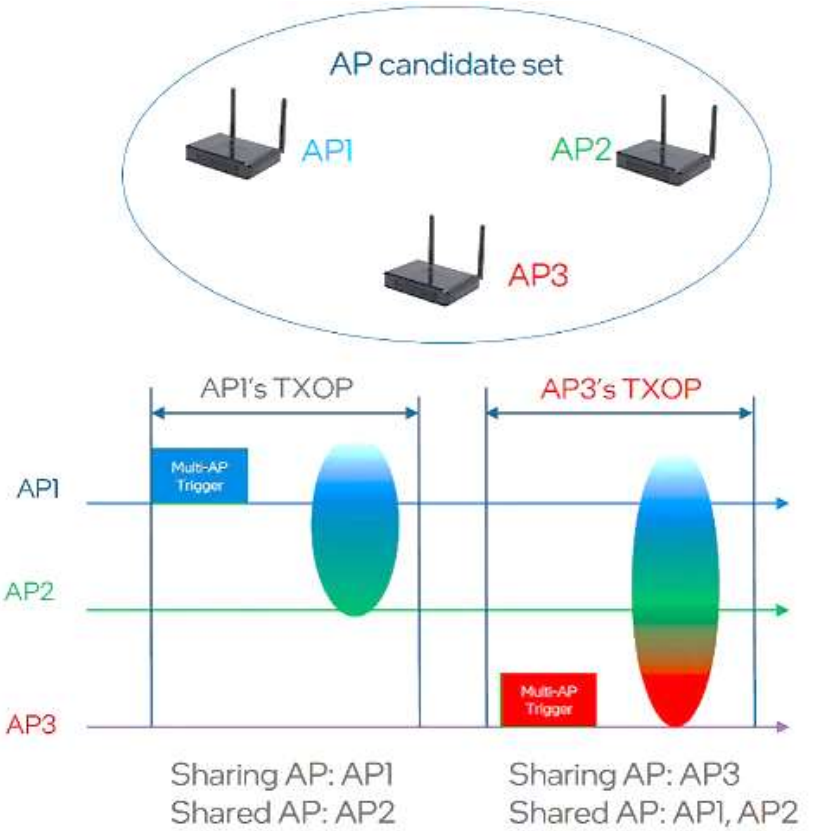
表1：使用DRU后可能的发射功率提升值

Tones	BW20	BW40	BW80
26	8.13 dB	11.14 dB	11.14 dB
52	6.37 dB	8.13 dB	11.14 dB
106	3.56 dB	6.37 dB	8.13 dB
242	n/a	2.69 dB	5.12 dB
484	n/a	n/a	2.69 dB

3 多接入点协调MAPC (Multi-AP Coordination)

MAPC顾名思义是指管理多个相邻的无线接入点，通过无线技术协调其频率、时间和功率资源，避免信道争用，改善共享资源，以达到更高的吞吐量，降低最差情况时延。传统Wi-Fi技术主要侧重于单AP技术，缺乏AP到AP的协调机制，无法实现有效的资源共享和优化覆盖范围。虽然Wi-Fi 7定义了MLO技术，可以有效提高吞吐量，降低时延。但是这种增强仍然是有限的。Wi-Fi 8中的MAPC是一种有效的PHY和MAC层机制，可将多AP管理提升到一个全新的水平。

图5：MAPC的几个概念



几个概念：

▶TXOP:

– 传输机会 (TXOP) 是802.11中的一项MAC功能，它通过在一段时间内提供无争用信道访问来增加高优先级数据的吞吐量。

▶AP候选集：

– 可以发起/参与MAPC的所有AP集合。

– 定义MAPC的可信区域，只有同一候选集内的AP才能相互执行MAPC。

▶Sharing AP：

– 获取 TXOP并在其拥有的TXOP中发起特定类型MAPC的AP。

▶Shared AP：

– 由sharing AP协调MAPC传输的AP。

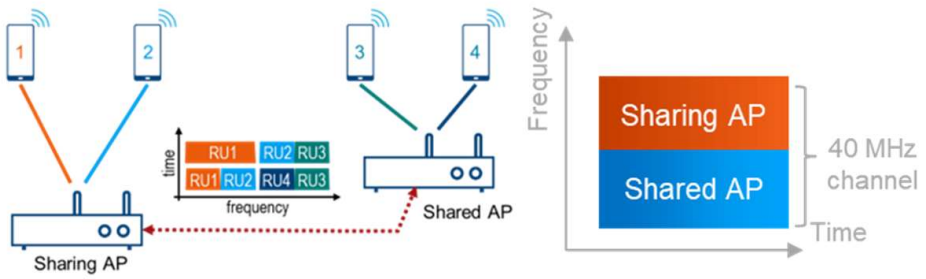
– 一个TXOP中可能存在多个shared AP。

MAPC技术有很多，今天我们简单介绍下面四种。

3.1 协调OFDMA (C-OFDMA)

C-OFDMA是一种由MAC层驱动的多AP协调技术。C-OFDMA允许多个AP在不同的20 MHz信道或OFDMA资源单元(RU)上同时传输。如图6所示，TXOP由sharing AP获取，并可能根据自己的逻辑决定与其他Shared APs共享OFDMA RU。

图6：协调OFDMA

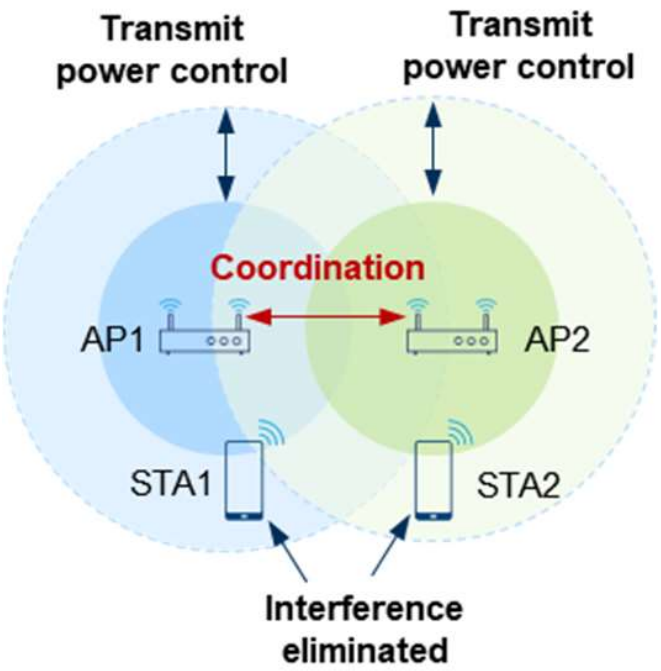


其他由MAC层驱动的技术还包括C-TDMA (Coordinated-TDMA) 和C-SR (Coordinated SR)。C-TDMA允许多个AP在同一信道上轮流传输（多个AP在不同时间传输）。TXOP仍然由sharing AP获取，并在整个信道上与其他shared APs共享TXOP的子间隔。如果说C-TDMA是多AP之间的时分技术的话，C-OFDMA就是多AP之间的频分技术。

3.2 协调空间重用 (C-SR)

空间复用是IEEE 802.11ax中引入的一种机制，其中一个AP以最大发射功率进行发射，而其他AP则降低其发射功率。这种机制的主要问题是：降低其发射功率的AP可能没有关于发射AP发射功率的准确信息。这可能导致AP的传输效率低下，并可能影响其数据传输。

图7：协调空间复用



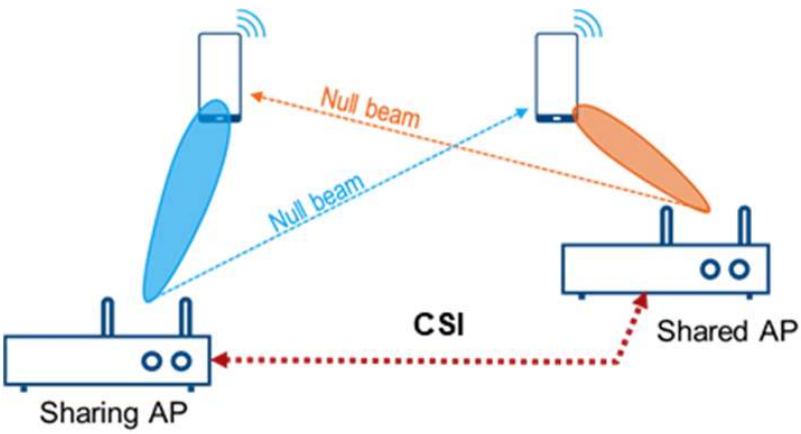
协调空间重用 (C-SR) 是一种最初在IEEE 802.11be中讨论的机制，目前已被接受为IEEE 802.11bn规范框架文档中的多AP协调模式之一。在C-SR中，sharing AP和shared APs在同一信道上同时传输，并在整个信道上与其他shared APs共享TXOP。sharing AP 控制shared APs的发射功率。这消除了shared APs对sharing AP的干扰，同时提高了shared APs的增益。在AP开始控制发射功率之前，有一个协调阶段，使AP能够获取有关其他同信道AP的信息。此信息包括路径损耗和信噪比(SNR)，可帮助sharing AP计算所有AP在最大吞吐量下的发射功率，然后sharing AP将其发射功率告知所有shared APs。如图7所示，其中两个STA都受益于多AP协调的C-SR方案。

802.11bn针对C-SR的不同方面提出了各种提案。这些方面包括增强SR、感知SR信噪比(SINR) 、零波束转向SR、新协议、可接受的干扰电平指示、减少开销、减少交叉干扰、基于服务周期的C-SR和性能评估等。

3.3 协调波束成形 (CBF)

协调波束成形 (C-BF) 是一种PHY层驱动的多AP协调技术。当BSS之间存在重叠时，某些STA可能会受到另一个AP传输的影响。这种情况下，sharing AP可以监听来自其自身STA和与其他shared AP关联的STA的信道，从而使得sharing AP的辐射波束朝向其关联的STA，而零波束朝向重叠BSS（OBSS）中的STA。如图8所示。当多个AP共享瞬时信道状态信息 (CSI) 时，它使它们能够执行数字波束成形，以便可以在相同的时间和频率资源上以最大允许天线发射功率进行同时传输。C-BF允许sharing AP和shared AP向其目标STA发送信号，同时向另一个AP的目标STA形成零波束。由于传输可以在相同的频率和时间以允许的最大天线发射功率进行，因此不会降低吞吐量。

图8：协调波束成形

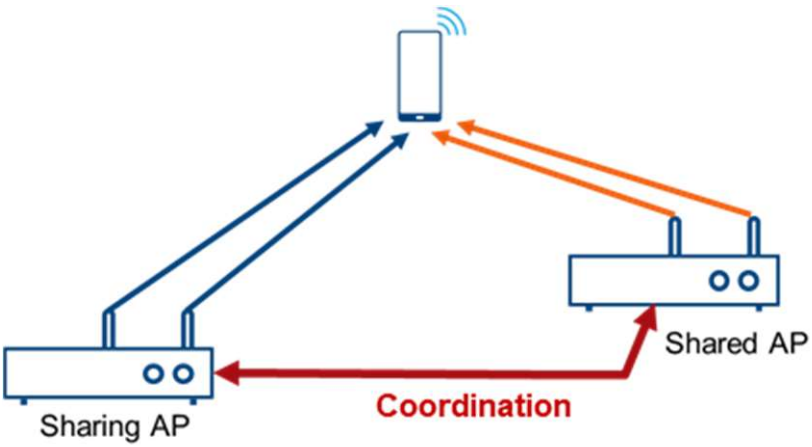


802.11bn针对C-BF的不同方面提出了各种提案。这些方面包括平滑波束成形、信道信息反馈、触发波束成形、在C-BF中共享TXOP、传输波束成形和性能评估等。

3.4 联合传输 (JTX)

如图9所示，JTX可视为由多个AP和多个STA组成的虚拟MIMO系统。该技术还能实现与最佳AP的快速关联，并提高用户在移动（例如办公室、热点、家庭场景）时的重新连接速度 。JTX旨在实现非共置时间/相位同步AP与时间/相位同步STA之间的联合传输/接收。Sharing AP向 shared APs通过共享调度和其他控制信息来进行联合传输，所有AP同时向同一个STA发送数据。STA在接收到数据后向自己关联的所有AP发送反馈信息。

图9：联合传输



JTX可用于上行或者下行传输。UL JTX可以在各种场景中提供更高的可靠性，EHT任务组已经讨论了不同的方法，包括分布式干扰消除（可改善UL数据传输）和联合接收（要求所有AP联合处理从所有STA接收到的数据）。对于DL JTX，可以在由所有分布式AP的发射天线组成的组合阵列上应用一个用于多个STA并发传输的巨型预编码器。

4 其他研究

并行的正在进行Wi-Fi标准研究还包括如下两个主要的方向。

- IEEE 802.11 AI/ML TIG (Topic Interest Group)：其目的是讨论人工智能 (AI) /机器学习 (ML) 用例和技术可行性，探讨未来Wi-Fi需要实现哪些功能以支持基于AL/ML应用。目前讨论的技术包括基于神经网络的CSI (Channel State Information)反馈压缩、基于AI/ML的漫游增强、基于深度强化学习的信道接入以及基于AI/ML的多AP协调方案。
- IEEE 802.11集成毫米波研究组 (IMMW SG：Integrated mmWave Study Group)：该研究组成立的动机来源：尽管Wi-Fi 6 GHz频段可以提供总共1325 M（5.925 GHz – 7.250 GHz）的频谱资源，但是由于各个地区的频谱分配的不同，很难在6 GHz上找到大于320 M带宽的频谱。而中国由于不支持6 GHz频段用于非授权，使得Wi-Fi只支持160 MHz带宽。为了确保Wi-Fi的长期发展，支持更多的高端应用，IEEE开始研究45 GHz和60 GHz用于Wi-Fi的可行性。由于高频段所带来的快速信号衰减以及更严重的阻塞，毫米波Wi-Fi将主要针对移动性弱的大带宽场景。IEEE正在研究重用802.11be/bn的物理层技术来支持毫米波

5 结束语

802.11bn的各种潜在技术非常丰富，未来标准落地如何定义还需等待。但是罗德与施瓦茨通用矢量信号源和频谱分析仪都可以支持更高频段甚至毫米波，未来必然也能支持802.11bn信号的产生和分析。而R&S面向未来的综合测试仪CMX500 OBT (One Box Tester)以其卓越的硬件架构和软件设计能够很容易的向后兼容未来的802.11bn技术。

参考文献:

[1] IEEE 802.11be Wi-Fi 7: New Challenges and Opportunities
[2] IEEE 802.11 Transmit Opportunity
[3] IEEE Xplore Multi-AP Coordinated Spatial Reuse for Wi-Fi 8: Group Creation and Scheduling
[4] Giovanni Geraci: What will Wi-Fi 8 be? A primer on IEEE 802.11bn Ultra High Reliability
[5] Serhat Erkucuk: Coordination of Multiple Access Points in Wi-Fi 8
[6] ScienceDirect Beyond Wi-Fi 7: Spatial reuse through multi-AP coordination