
白皮书

802.11AX

aruba
a Hewlett Packard
Enterprise company

目录

Wi-Fi 市场和 802.11AX 的起源	3
802.11AX 的技术特性	7
使用模式：我们能用 802.11AX 做什么？	27
后向兼容性、部署注意事项和升级策略	28
强制和可选功能	28
性能估计	29
信道化	32
结论	32
附录（现有功能和推迟到 802.11AX Wave 2 的新功能）	33

Wi-Fi 市场和 802.11AX 的起源

无论是在家里还是在工作场合，Wi-Fi 现在已经成为从电脑或手机接入互联网的主要方式。2018 年，也就是

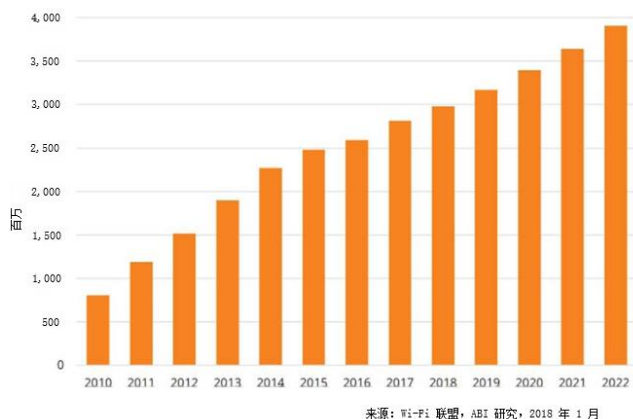
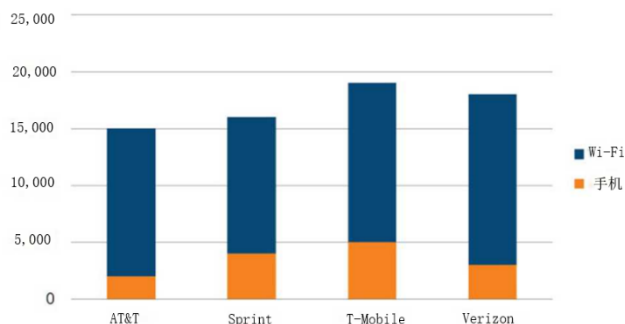


图 1a: Wi-Fi 设备年出货量

考虑到已经发货的大约 180 亿台 Wi-Fi 设备，80 亿台正在使用，以及每年新增的 30 亿台，我们应该很难找到任何没有 Wi-Fi 信号的地方了。即使是通过 LTE、小型蜂窝和固定速率数据计划来提高速度和容量的手机网络，也需要依赖 Wi-Fi 来满足用户的流量需求。如今很难想象没有 Wi-Fi 的手机会是什么样。



STRATEGY ANALYTICS

来源：战略分析，2018 年 2 月

图 2: 按运营商划分的每月平均数据使用量

2018 年 1 月 (安卓用户，单位：MB)

Wi-Fi 标准起源于电气和电子工程师协会 (IEEE)，802.11 工作组每年召开 6 次会议，以及许多临时的电话会议，推动各个专项任务工作组更新和扩展支持 Wi-Fi 的技术标准。在 IEEE 制定标准后，焦点转移到 Wi-Fi 联盟，Wi-Fi 联盟是拥有“Wi-Fi”商标的行业商业论坛，通过一系列

Wi-Fi 联盟第一次会议召开 19 年后，Wi-Fi 承载了 50% 以上的互联网流量。

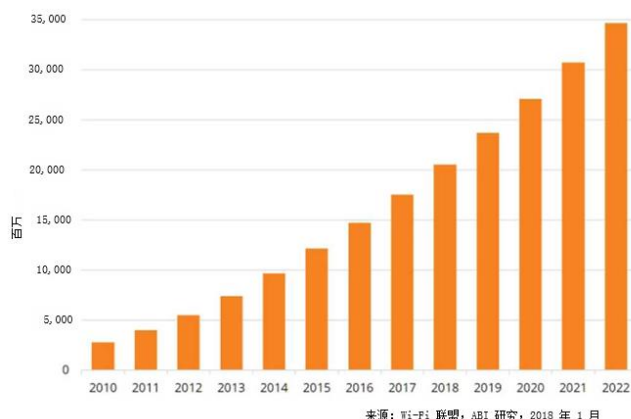


图 1b: Wi-Fi 设备累计出货量

兼容性插拔测试支持互操作测试方案和认证计划的拟定。这就是 Wi-Fi 行业如何在整个生态系统中所有不同的供应商之间确保 Wi-Fi 客户端与 Wi-Fi 接入点相互兼容的方法。

最近一次主要的“PHY”或物理层认证是 802.11ac，“Wave 1”商用产品从 2014 年开始发货，“Wave 2”商用产品从 2016 年开始发货。但是对 802.11ac 开展的工作可以追溯到 2008 年：这项工作的酝酿期持续了很长时间。

因此，甚至在 802.11ac Wave 2 产品开始商用之前，IEEE 就开始研究下一个“PHY”标准，命名为“802.11ax”。该项目于 2014 年 3 月正式启动，截至 2018 年初，通过一系列“信函投票”：标准的范围现已确定，随着每次修订，细节变得越来越扎实。预计在 2019 年底 IEEE 会最终批准 802.11ax 标准，在此之前数月这个标准就已经被有效冻结。

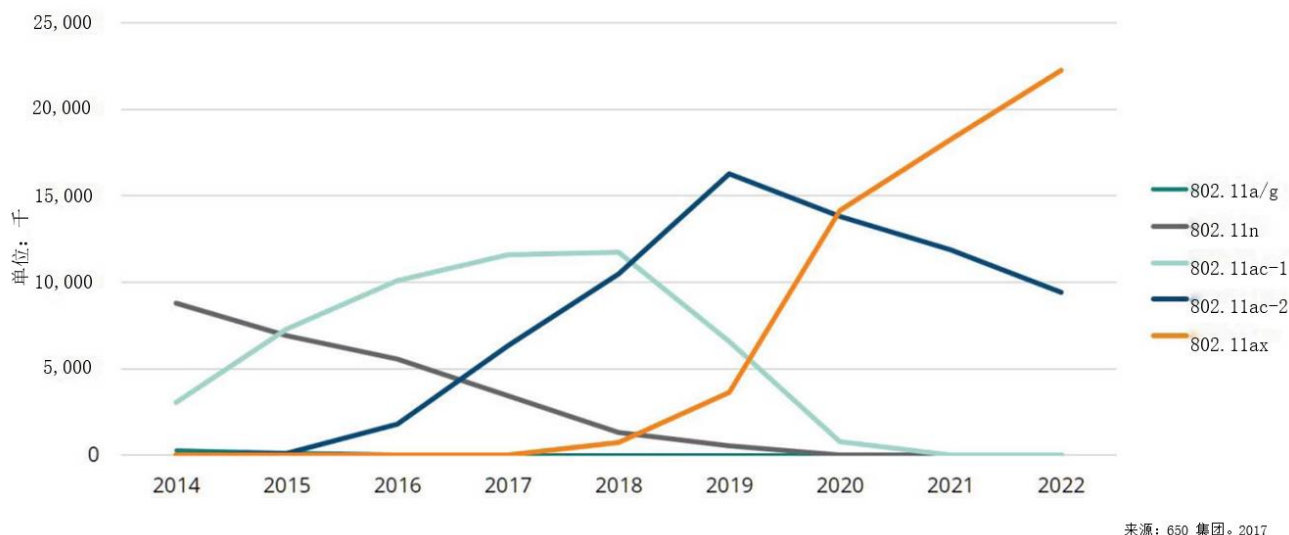


图 3：企业接入点发货量

早期对 802.11 的物理层修正开创了一个先例，Wi-Fi 联盟与 IEEE 并行开始工作，以加速上市时间，802.11ax 同样遵循这一时间表：有关“Wi-Fi CERTIFIED AX™”认证计划的工作已经开始；第一次兼容性插拔大会在 2018 年初举行，正式认证预计将在 2019 年某个时候推出。

认证路径与标准化工作的这种重叠对于缩短上市时间非常重要，并且由于标准组织和设备供应商在以前的物理层修订方面具备经验，因此风险可以被理解并最小化。

802.11ax 的设计目标

在决定如何在当前的 802.11ac 版本之上对 Wi-Fi 做进一步改善时，IEEE 和 Wi-Fi 联盟调查了 Wi-Fi 的部署和使用情况，以确定阻碍 Wi-Fi 获得更广泛使用的障碍以及用户群体不满的原因。

结论是要脱离以前的升级途径（即在“良好”的现场条件下提高峰值数据速率），更多关注“真实”的现场条件，不仅要提高峰值性能，还要提高真实环境下的平均和最差性能。

这些年来，现实世界的情况发生了变化，很大程度上是得益于 Wi-Fi 的成功。接入点无处不在，甚至覆盖了许多户外空间。在许多地方，网络拥塞已经成为一个严重的问题。

例子包括繁忙的机场和火车站、多住宅公寓楼，甚至学校和大学环境。

所有这些示例都以多个接入点的重叠覆盖为特征，无论这些接入点是在同一网络中被管理的还是互不协同的，都服务于许多需要数据的客户端设备。因此，IEEE 和 Wi-Fi 联盟着手改善每个人的性能，特别是在覆盖重叠的区域：在一些地方，通过接入点之间的协同可以减少干扰信号，而在另一些地方，通过增强协议功能使 Wi-Fi 信号具有更好的抗干扰性。

然而，用于手机和电脑的互联网接入服务并不是 Wi-Fi 的唯一用途。市场日益成长的物联网 (IoT) 传感器正在许多地方使用 Wi-Fi 进行连接，但是有一些因素限制了它的使用。因此，802.11ax 中的新功能允许为低数据速率连接有效分配资源，提高 IoT 传感器的电池寿命，并扩展 Wi-Fi 的信号覆盖范围。

Wi-Fi 也广泛用于无线互联网服务提供商 (WISP) 以及室外点对点链路，在这个领域 802.11ax 提供了延长传输距离、提高数据速率和减少干扰影响等功能。

时间表

802.11ax 的开发程序广泛遵循“PHY”协议（例如 802.11n 和 802.11ac）的先前实践这需要一定程度的并行开发，Wi-Fi 联盟在 IEEE 全面完成底层规范之前就开始了认证测试工作。与以前的物理层协议一样，商业压力将推动接入点和终端供应商在 Wi-Fi 联盟认证之前发布“预标准”设备：在 2018 年年中至年末，以及 2019 年年中 Wi-Fi 联盟认证发布之前，我们可以看到商业可用的设备上市。



图 4: 企业接入点发货量

虽然这种进度压缩不是推出复杂新协议的理想方式，但 802.11n 和 802.11ac 的先例表明，早期 802.11ax 设备成为孤立设备的风险非常低。供应商以前已经成功应对了这些挑战。

就像 802.11ac 一样，802.11ax 也被分成两“代”。功能的精确分布还没有最终确定，但是本文将集中讨论我们期望在 Wave 1 中看到的那些功能，在附录中讨论 Wave 2 中的功能。在 Wave 1（上图所示的时间线）和 Wave 2 上市之间可能会有两年的时间。

升级时间

新的物理层 Wi-Fi 标准需要新的硬件，因此 Aruba 经常被我们的客户问到“何时是升级的合适时间”？与 802.11n 到 802.11ac Wave 1 和 802.11ac Wave 2 一样，还是那个答案，就是在您准备好的时候升级。随着标准的进步，半导体技术变得更加强大，以及设备供应商持续增加功能，大约每两年就会有一款新的、更好的 Wi-Fi 接入点出现。在阅读了这样一篇文章后，一些客户能够确定他们需要的特定功能，并决定等待 802.11ax 早期发货，以便他们能够利用这一优势，但大多数客户由于受到预算和建设期限以及其他事件的影响，我们的建议是使用在做出购买决策时现有的最佳技术。

频谱和法规

虽然有许多倡议和游说努力，旨在开放新频谱以及消除对广泛采用类似 Wi-Fi 的无线技术限制，但只有少数改变能够及时完成并对 802.11ax 产生影响。自 802.11ac 以来，2.4 GHz 和 5 GHz 频段的法规没有显著变化。

一个新的发展是，虽然 802.11ac 仅支持在 5 GHz 频段工作（802.11n 协议适用于 2.4 GHz），但 802.11ax 适用于两个频段：它可以取代目前使用的所有 Wi-Fi。尽管许多人认为 2.4 GHz 频段在人口稠密的地区被过度使用，以致于无法利用，但 Wi-Fi 社区认为，这一频段仍有许多机会，特别是对于 IoT 来说，它的卓越的传播特性仍有利用价值。

如期望的那样，如果法规变化允许新频谱被分配给无需许可或轻量许可的用途，那么 IEEE 和 Wi-Fi 联盟将能够扩展 802.11ax 规范，以便 Wi-Fi 在这些新频段中运行。

此外，在讨论频谱时，不要忽视对 Wi-Fi 非常重要的第三个频段。使用 60 GHz 频段的“WiGig”协议现在已经被 IEEE 和 Wi-Fi 联盟采用，并且在 2.4 和 5 GHz 频段与 Wi-Fi 具有显著的通用性，允许连接在不同频段之间无缝切换。然而，由于毫米波频率的不同特性，WiGig 具有不同的物理层规范，不属于 802.11ax。

与 LTE 和 5G 的融合

这是一个通信行业大动荡的时期。一方面，蜂窝网络运营商（移动运营商）正在进行 4G 扩建，但同时已经在为 5G 做准备。他们不仅在传统的互联网和手机市场上看到了机遇，而且在很多其他市场上也看到了机遇，例如 IoT、智慧城市、住宅固定无线宽带接入以及面向企业客户的托管服务。这一点，以及新的许可频谱和新技术的出现，使得 5G 的适用范围比之前的 2G、3G、4G 要广得多。为了适应这些新的用例和市场，5G 标准组织已经扩大了他们的范围。

与此同时，5G 和 802.11ax 的无线电技术具有许多共同的特点：MU-MIMO、空间分集、波束成形、OFDMA、信道聚合等。这一方面因为频谱效率、高数据速率、长距离和良好电池寿命等驱动因素是蜂窝网络、专用网络和家用网络所共有的，另一方面也是因为这些都是最新的无线电技术，任何新的无线电标准都希望采用这些技术。

但是 5G 的另一个方面也许更有趣。为了覆盖新市场，尤其是企业网络，5G 标准现在包括了将 Wi-Fi 和相关认证协议集成到 5G 网络中的详细规范。这与适用于 LTE/5G 或 Wi-Fi 用途的轻量频谱一起，为未来的网络提供了更广泛的可能性。

因此，在 3GPP 和 Wi-Fi 联盟所瞄准的市场重叠日益增加的推动下，在无线电和系统层面，5G 和 Wi-Fi 越来越紧密地联系在一起。

相关的 Wi-Fi 标准和认证

802.11ax 作为新的 PHY，经过了一些 MAC 方面的修改，有几个认证先决条件。Wi-Fi 联盟将要求所有 Wi-Fi CERTIFIED AX™ 设备都是 Wi-Fi CERTIFIED AC™ 设备，也是 Wi-Fi CERTIFIED N™ 设备。它还需要 Wi-Fi CERTIFIED Agile Multiband™ 认证，一组允许客户端更广泛地了解网络负载的功能，以及移动（或被移动）到最佳频段和接入点的能力。大多数接入点和客户端设备已经支持 Agile Multiband 所需的功能，尽管这是一个相对较新的计划，而且并非所有当代设备都有认证。

所有 Wi-Fi 设备都必须满足新的认证、授权和加密安全标准。使用了很久的 WPA2 认证将在 2018 年被 WPA3 取代，预计所有 802.11ax 设备也应符合 WPA3，以支持最佳安全实践。

802.11ax 中的新功能

802.11ax 主要功能

1. 下行链路和上行链路 OFDMA
 2. 下行链路*和上行链路 MU-MIMO
 3. 更高阶调制
 4. 高级 OFDM 和编码
 5. 室外运行
 6. 降低功耗
 7. 空间再利用
 8. 发射波束成形*
 9. 单用户操作*
- （*在 802.11ax 中不是新功能）

图 5：802.11ax 主要功能（包括 Wave 1 和 Wave 2）

IEEE 802.11ax 标准中有 50 多项功能：并非所有功能都将被 Wi-Fi 联盟采用。以下是各种功能（包括 Wave 1 和 Wave 2 功能）的总结。

- **下行链路和上行链路 OFDMA：**OFDMA 是 802.11ax 中相对复杂的功能之一。它允许单次传输（对于下行链路 OFDMA，则为接入点传输）在信道内按频率分割，使得寻址到不同客户端设备的不同帧使用不同的子载波组。上行链路 OFDMA 等效于下行链路 OFDMA，但是在这种情况下，多个客户端设备在同一信道内的不同子载波组上同时传输。上行链路 OFDMA 比下行链路更难管理，因为必须协调许多不同的客户端：接入点发送触发帧来指示每个客户端可以使用哪些子信道。
- **下行链路和上行链路 MU-MIMO：**下行链路版本扩展了现有的 802.11ac 功能，其中接入点确定多径条件允许它在单个时间间隔内向不同的客户端设备发送帧。802.11ax 增加了下行链路 MU-MIMO 组的大小，允许更高效的操作。

上行链路 MU-MIMO 是 802.11ax 新增加的功能，但被推迟到 Wave 2：像上行链路 OFDMA 一样，接入点必须协调多个客户端的同时传输。

- **发射波束成形**：这是另一个现有功能，其中接入点使用多个发射天线使接收器的天线接收到最强信号。它提高了数据速率并扩大了信号覆盖范围。
- **更高阶调制**：802.11a/g 采用 64-QAM，802.11ac 采用 256 QAM：在 802.11ax 中，最高阶调制扩展到 1024-QAM。这增加了良好条件下（高信噪比）的峰值数据速率。
- **OFDM 信元、子载波间隔和 FFT 大小都被改变**，以允许小 OFDMA 子信道的有效操作：这些改变允许增加保护间隔长度，而不损失信元效率。

- **室外运行**：许多功能提高了室外性能。最重要的是一种新的数据包格式，其中最敏感的字段现在被重复使用，以便提高坚固性。有助于更好室外运行的其他功能包括更长的保护间隔和引入冗余以允许纠错。
- **降低功耗**：现有的省电模式辅以新机制，允许更长的休眠间隔和预定的唤醒时间。此外，对于 IoT 设备，引入了 20MHz 的纯信道模式，允许只支持该模式的更简单、功能更弱的芯片。
- **空间再利用**：当争夺传输机会时，允许在远方设备占用频率资源的同时进行传输，而在以前所有设备必须等待资源被释放。这通过在给定的地理区域允许更多的同时传输来增加网络容量。

802.11n (2008):	802.11ac (2012):	802.11ax (2018):	802.11 ax 项目的目标:
<ul style="list-style-type: none">• 支持 2.4 和 5 GHz• 更宽的信道 (40 MHz)• 更好的调制 (64-QAM)• 额外的空间流 (最多 4 个)• 波束成形 (显式和隐式)• 后向兼容 11a/b/g	<ul style="list-style-type: none">• 仅限 5 GHz• 更宽的信道 (80、160 MHz)• 更好的调制 (256-QAM)• 额外的空间流 (最多 8 个)• 波束成形 (显式)• MU-MIMO• 后向兼容 11a/b/g/n	<ul style="list-style-type: none">• 支持 2.4 GHz 和 5 GHz• OFDMA 上行链路和下行链路• 扩展和推广 OFDM• 引入资源单位 (RU) 的概念• 大规模并行• 更好的调制 (1024-QAM)• 上行链路 MU MIMO• 空间再利用 (BSS 颜色)• 后向兼容 11a/b/g/n/ac	<ul style="list-style-type: none">• 支持 2.4 和 5 GHz 频段 (802.11 ac 仅限 5 GHz)• 在密集部署情况下，每个站点的平均吞吐量至少提高 4 倍 (802.11 ac 聚合吞吐量，无特定情况)• 对于室外和室内网络• 场景包括基于无线的公司办公场所、室外热点、高密度住宅公寓、体育场• 保持或提高客户端设备的能效

图 6: Wi-Fi 标准进展

对照历史，802.11ax 中的新功能主要是对以前工作的扩展或改进——除了 OFDMA 和空间再利用这两个例外。

802.11AX 的技术特征

下一节将详细介绍主要的技术改进。

新的子载波间隔和信元持续时间

OFDM 信元是 Wi-Fi 传输的基本组成部分。它是子载波调制波形的一小段时间，携带信息：信元的变量越多，它能携带的信息（二进制位）就越多。基本特征：在给定固定信道宽度的情况下，快速傅立叶变换 (FFT) 的大小、子载波间隔和 OFDM 信元持续时间是相关联的。在 802.11ax 中，子载波间隔减少 4 倍，而 OFDM 信元持续时间增加 4 倍。

表 1: 从 802.11ac 到 802.11ax 的 OFDM 特征

	802.11ac	802.11 ax
频段	仅限 5 GHz	2.4 GHz 和 5 GHz
信道	20、40、80、80+80、160 MHz	20、40、80、80+80、160 MHz
FFT 大小	64、128、256、512	256、512、1024、2048
子载波间距	312.5 KHz	78.125 KHz
OFDM 信元	3.2 微秒	12.8 微秒
OFDM 信元循环前缀	0.8 或 0.4 微秒	0.8 或 1.6 或 3.2 微秒
最高调制	256 QAM	1024 QAM
空间流	1-8（超过 4 后不实施）	1-8（可以实施）

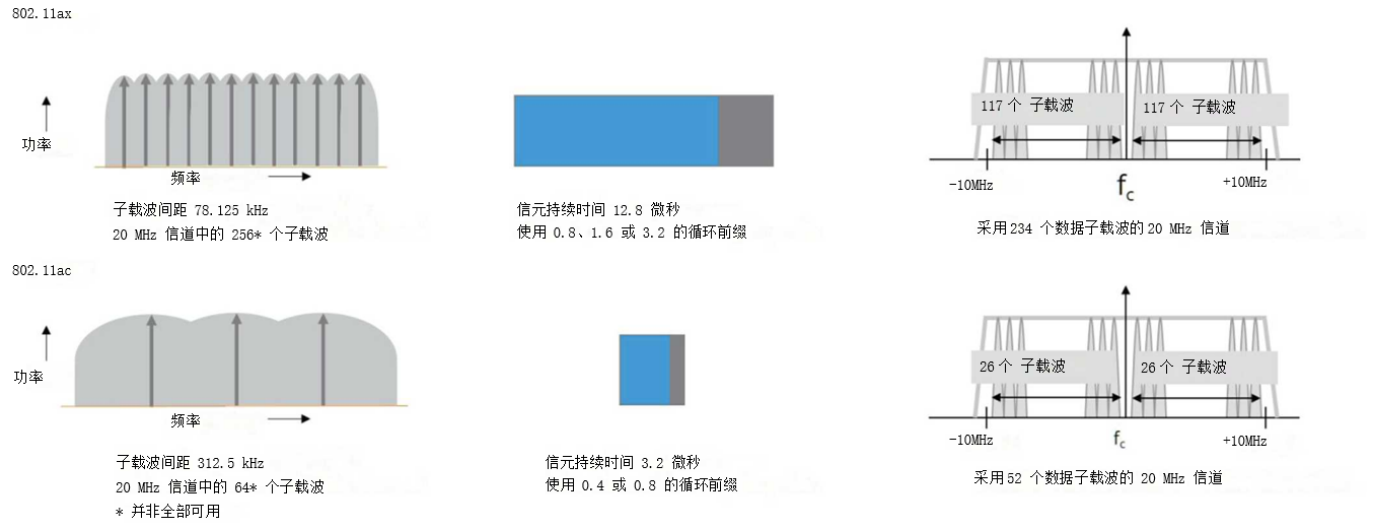


图 7: OFDM 信元持续时间和子载波

子载波间距变化的主要推动力是允许 OFDMA（见下文）扩展到小的子信道。每个子信道需要至少一个（通常两个）导频子载波，并且最小子信道大小为 2 MHz。时，较小的子载波间隔会使导频损失的总带宽百分比更小。

还有其他优势。信道上的保护子载波和空子载波的数量可以减少为可用子载波数量的百分比，再次增加给定信道中的有效数据速率。上图显示，考虑 4 倍系数后，可用子载波比 802.11ac 增加了约 10%。

更长的 OFDM 信元允许在不牺牲频谱效率的情况下增加循环前缀长度，这反过来能够提高对长延迟扩展的抗扰度，尤其是在室外条件下。循环前缀占信元时间的百分比可以减少到更小，从而提高频谱效率，同时对多径条件下的传输更加稳健。并且它降低了上行链路多用户模式的抖动敏感性。

当然，也有一些副作用。成功解调间隔更近的子载波所需的频率精度更严格。此外，快速傅立叶变换 (FFT) 需要稍微复杂一点的芯片。但是自从 802.11 首次使用 312.5 kHz / 64 点 FFT 以来，距现在已经大约 20 年，这些影响被认为是可以控制的。

OFDMA 优势

正交频分多址 (OFDMA) 是 802.11ax 中的两种多用户模式之一，另一种是 MU-MIMO（Wave 1 中仅有下行链路）。OFDMA 是一项已经在其他系统中使用了很多年的技术，例如蜂窝 LTE。它通过将传输在频率维度上进行划分来实现，成对的设备被分配到主射频信道的子信道或资源单元 (RU) 中发送和接收。

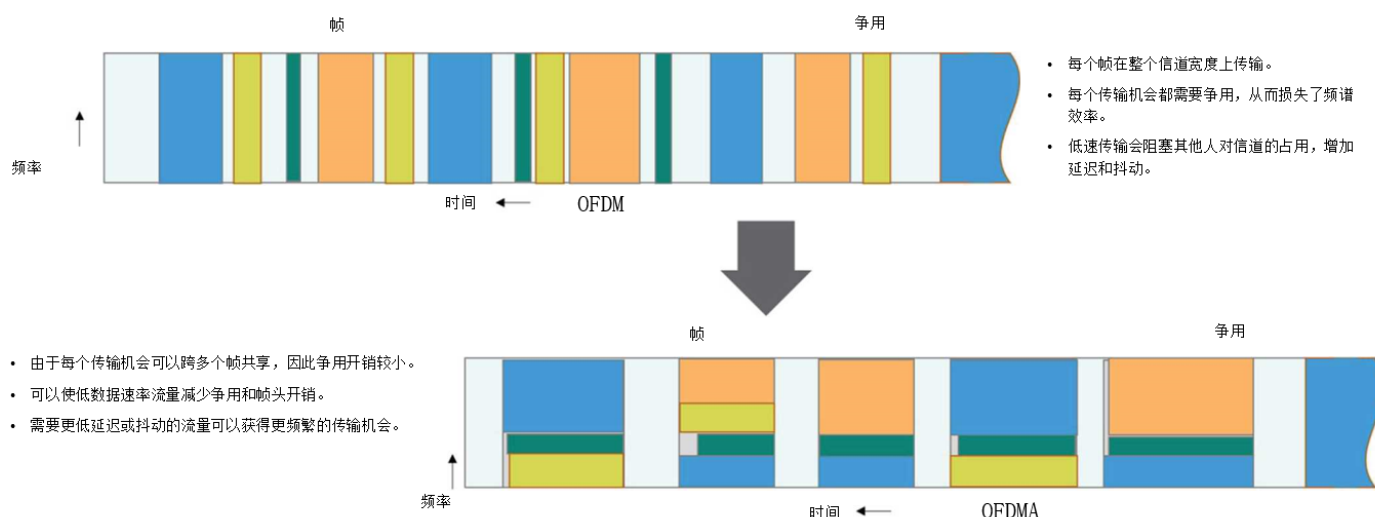


图 8：OFDMA 与单用户 OFDM 的比较

这允许接入点（对于下行链路 OFDMA）在单个发射机会中同时发送采用不同子信道的多个帧，而客户端则通过把射频调谐到各自的子信道以接收它们各自的数据。

乍看之下，OFDMA 并没有比使用完整信道的单用户 OFDM（在 802.11ax 中仍然可用）提供更多的优势。如果链路传输速度没有差异，假设在一个长时间周期内需要向多个站点传输数据，并且每个站点传输相同数量的数据：当 OFDMA 采用 1/2 宽度的子信道时，需要花费两倍的传输时间，看起来没有任何节省。然而，经过更仔细的检查后，您会发现效率得到了很大的改善。

在 802.11 CSMA/CA 媒体访问控制协议中，每次传输机会争用的过程都会导致空口时间的浪费。这种空口时间的损失，降低了网络总容量和频谱效率。而使用 OFDMA 时，多个站点的数据传输并发进行，减少了传输相同数据量所需的传输机会的竞争次数，从而提高了频谱效率。此外，随着客户端数量的增加，CSMA/CA 的效率也会降低——如果 5 个并发客户端可以达到每个客户端 100 Mbps，50 个并发客户端时，每个客户端将无法达到 10 Mbps，而 802.11ax 的一个目标是在客户端数量密集的大规模部署时仍然能够提高性能。OFDMA 在公平管理大量客户端方面特别有用，资源争用开销的减少意味着随着客户端数量的增加，容量几乎不会降低。

这对于能力较弱的设备也有好处。随着链路速度的提高，以最大速率传输对于一些设备而言并非是最好的。采用 OFDM 时，所有设备必须占用整个信道，尽最大努力进行传输，而 OFDMA 则允许他们降低最大速率，不需要占满整个信道。这有助于简化硬件实现，并能够提高电池潜在寿命，类似于应用在 IoT 传感器的 20 MHz-Only（见下文）的概念。

OFDMA 还提供了应用 QoS 的机会，特别是对于要求低延迟或抖动的流量。在单用户 OFDM 系统中，设备可能需要等待很长时间才能获得传输机会，但是 OFDMA 允许设备“少而频繁”地传输，从而减少延迟和抖动。

OFDMA 也带来了一些微妙之处。如上所述，当接入点争夺传输机会时，802.11 的逐帧传输要求它必须把多个不同长度的帧捆绑在一起并行传输。当某些帧比传输机会的长度短时，需要添加填充位，这当然会导致可用带宽的损失。此外，如前所述，每个 OFDMA 子信道必须为导频保留一两个子载波，不能用于数据传输。因此，接入点必须充分考虑其提供的负载和缓冲队列中的帧，以及客户端分布和链路速度，以此计算 OFDMA 的最佳组合方式，。

OFDMA 为流量管理开辟了许多新的维度，但它也需要更复杂的控制机制，因为接入点必须选择如何分配子信道，并在与使用它的客户端进行协调；我们稍后将更详细介绍这方面的内容。

下行链路 OFDMA

802.11ax 在下行链路和上行链路方向都引入了 OFDMA。但也有一些不同之处：因为接入点控制下行链路 OFDMA 的所有传输，所以实施起来可能更简单。

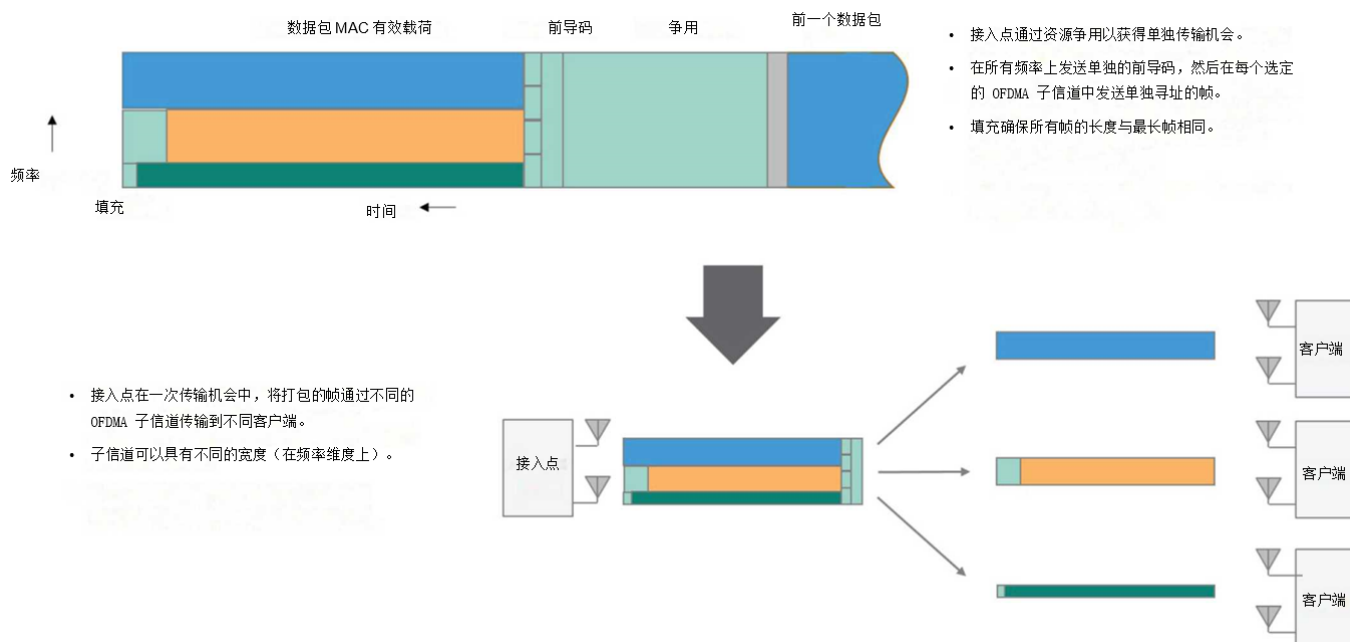


图 9：下行链路 OFDMA 传输

我们首先介绍下行链路 OFDMA 传输，稍后再介绍控制，我们知道，接入点首先以通常的方式争夺传输机会。然后，它为不同的客户端组装多个帧，但是在多个分配的子信道上分别进行调制。

当某个子信道的帧比其它子信道中最长的帧短时，会增加填充位以使所有子信道的帧长度一致。这种带宽损失可以通过为帧分配较小的子信道，使较短帧传输更长的时间来降低，但是为了使用完整的信道带宽，需要将更多的帧捆绑到一起进行传输。

802.11ax 中分配的最小子信道是 26 个子载波 (2 MHz)。20 MHz 信道中有 9 个可用的 26 个子载波构成的子信道，允许多达 9 个不同的帧和接收者并行传输。

IEEE 使用术语“资源单元” (RU) 来指代子信道。上面的 26 个子载波构成的资源单元被称为 RU-26，例如：完整的集合是 RU-26、RU-52、RU-106、RU-242、RU-484 和 RU-996。

分配的子信道

在 OFDMA 中，上行链路或下行链路、子信道在标准中定义。信道被进一步以二进制方式细分，其中最小的组件由 26 个子载波构成，用于信道中正好无法被划分的空隙。

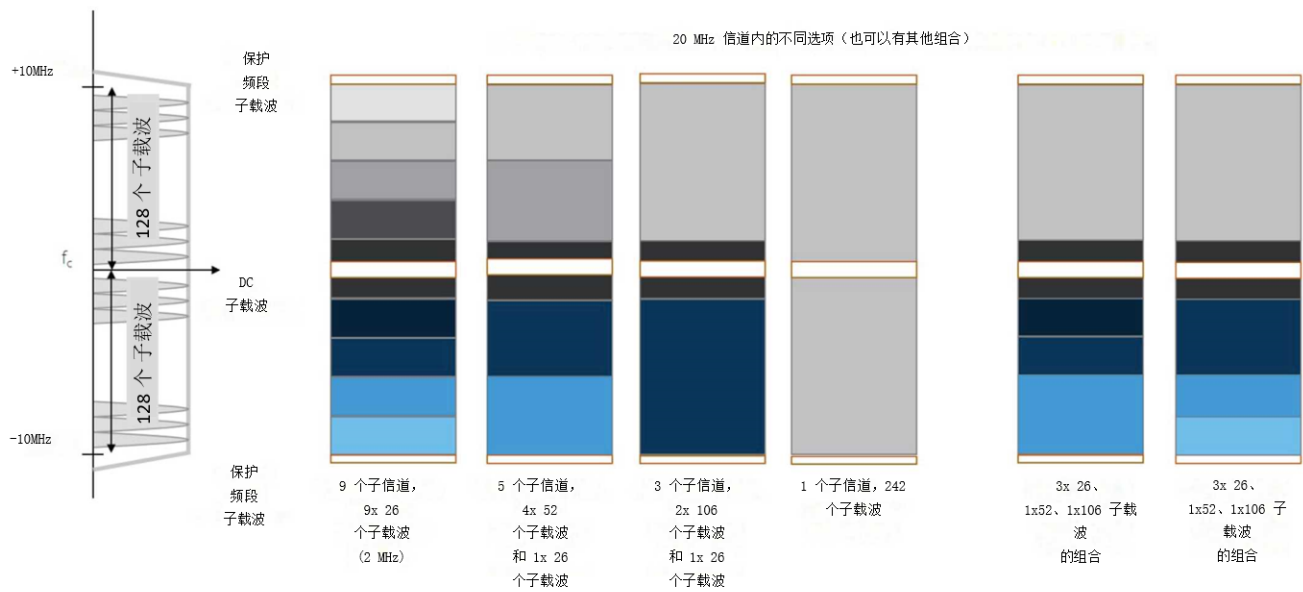


图 10: OFDMA 的子信道分配

与前几代 OFDM 一样，并不是信道中的所有子载波都可以用于传输数据。一些子载波被用于保护频宽，以免干扰相邻信

道或子信道之间的传输。其他用于 DC 或导频，以提供频率参考并允许精确解调信号。

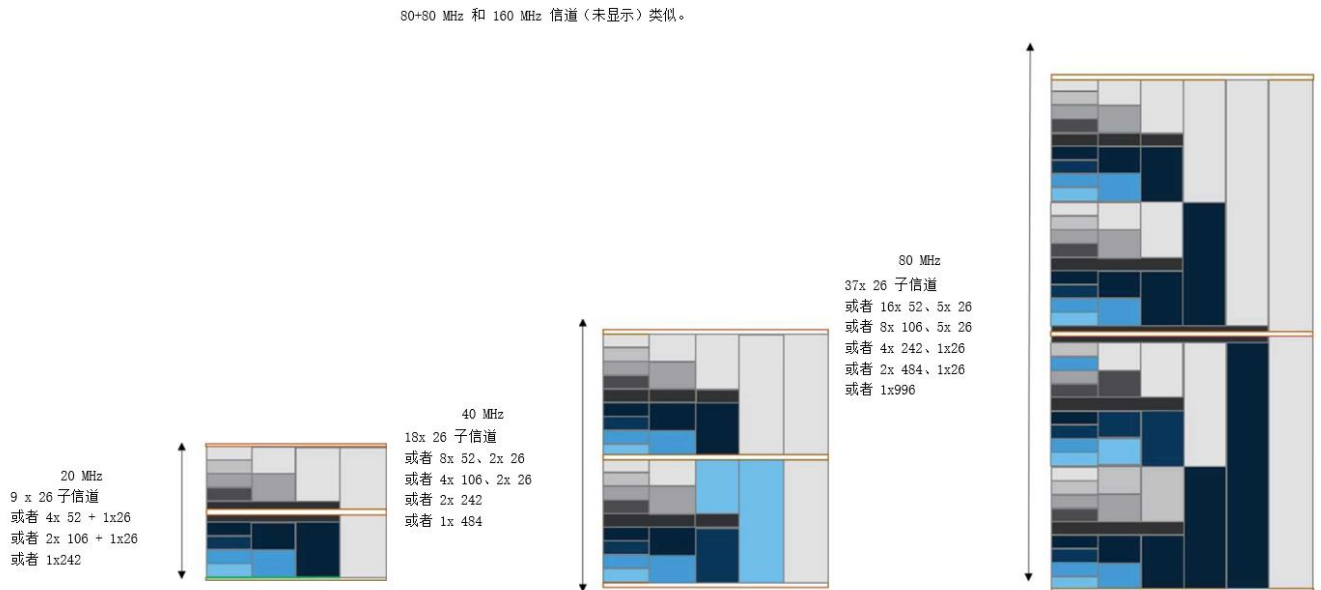


图 11: OFDMA 的子信道分配

OFDMA 的可用子信道、子载波和数据速率

下表列出了在 OFDMA 中，RU-N（例如 RU-26）子信道的选项菜单。这些 RU 可以移动，但只能在 802.11ax 中规定的特定配置下移动。

表 2：OFDMA 的可用子信道、子载波和数据速率

信道 (MHz)	分成子信道	最大子信道带宽	包括导频的数据子载波	不包括导频的数据子载波	低端保护子载波	高端保护子载波	DC 子载波	导频子载波	空子载波	总子载波
20	9x26	1.88 MHz	234	216	6	5	7	18	4	256
	4x52、1x26	3.91 MHz	234	216	6	5	7	18	4	256
	2x106、1x26	7.97 MHz	238	228	6	5	7	10	0	256
	1x242	18.3 MHz	242	234	6	5	3	8	0	256
40	18x26	1.88 MHz	468	432	12	11	5	36	16	512
	8x52、2x26	3.91 MHz	468	432	12	11	5	36	16	512
	4x106、2x26	7.97 MHz	476	456	12	11	5	20	8	512
	2x242	18.3 MHz	484	468	12	11	5	16	0	512
	1x484	36.6 MHz	484	468	12	11	5	16	0	512
80	37x26	1.88 MHz	962	888	12	11	7	74	32	1024
	16x52、5x26	3.91 MHz	962	888	12	11	7	74	32	1024
	8x106、5x26	7.97 MHz	978	936	12	11	7	42	16	1024
	4x242、1x26	18.3 MHz	994	960	12	11	7	34	0	1024
	2x484、1x26	36.6 MHz	994	960	12	11	7	34	0	1024
	1x996	76.6 MHz	996	980	12	11	5	16	0	1024

上行链路 OFDMA

除了客户端设备发送和接入点接收之外，OFDMA 在上行链路方向的工作与下行链路方向的工作非常相似。

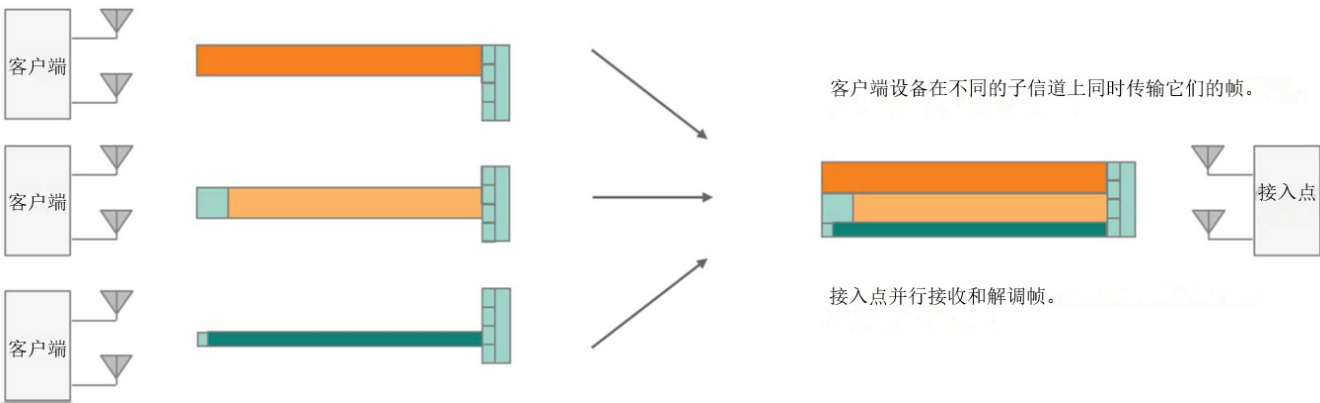


图 12：上行链路 OFDMA 传输

最困难的地方是接入点如何计算最佳的客户端分组，然后通知每个客户端应该何时发送，以及在哪个子信道上发送。我们稍后会详细介绍这部分内容。

此外，上行链路方向上导码信元的同步很复杂，因为每个前导码都是在整个 20 MHz 信道上传输的。这是 IEEE 中的一个实施决策，它要求接入点天线接收到的所有前导码波形在时间、频率和幅度上都是同步的。这推动了对 Wi-Fi 的许多新要求，包括校准信号强度测量、本地振荡器要求等，这些要求可能在其他领域有用。

即使在 OFDMA 分组体中，发射器保持频率精度、发射器线性度和其他参数，以避免对相邻 RU 中的传输造成干扰也是非常重要的：OFDMA 的实施比上面的简单图表所显示的要复杂

下行链路 MU-MIMO 传输

下行链路 MU-MIMO 是在 802.11ac (Wave 2) 中引入的，并在当前接入点和客户端设备中变得越来越广泛。它扩

展了空间分集和波束成形的概念，支持从接入点到多个客户端的同时传输。

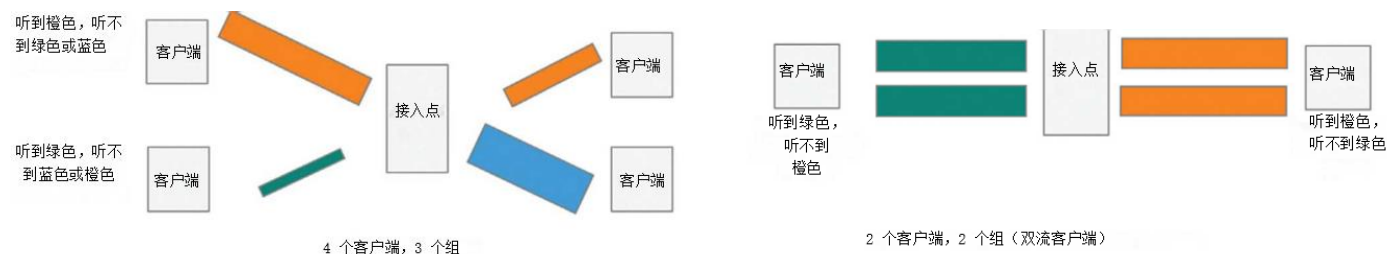


图 13: 下行链路 MU-MIMO 传输

只有当接入点确认在当前信号传播特性下，面向一个客户端或一组客户端优化后的信号传输不会被另一个客户端以显著的信号强度听到时，才可以实现 MU-MIMO，反之亦然。

这些条件满足时，无线接入点可以为每个客户端组构建单独的数据帧，并同时传输它们。

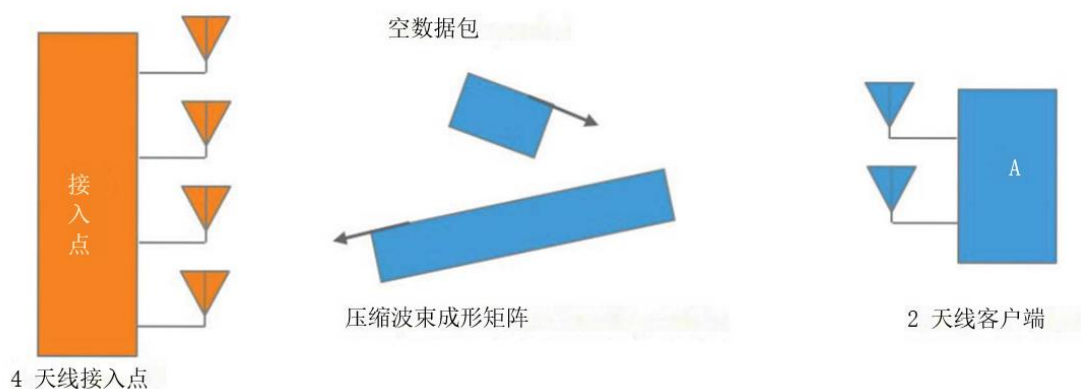


图 14: 下行链路探测

为了识别哪些 MU-MIMO 客户端适合并行传输，接入点执行探测操作，从其所有天线向客户端发送空的探测帧，客户端随后返回测量到的每根 AP 天线到客户端天线对的接收水平矩阵作为响应。探测用于波束成形和 MIMO。802.11ac 中的

多用户探测可能很耗时，因为波束成形报告矩阵可能很大，并且客户端设备必须错开响应以避免干扰：新的 802.11ax 多用户控制协议使其在同时响应时更加高效。

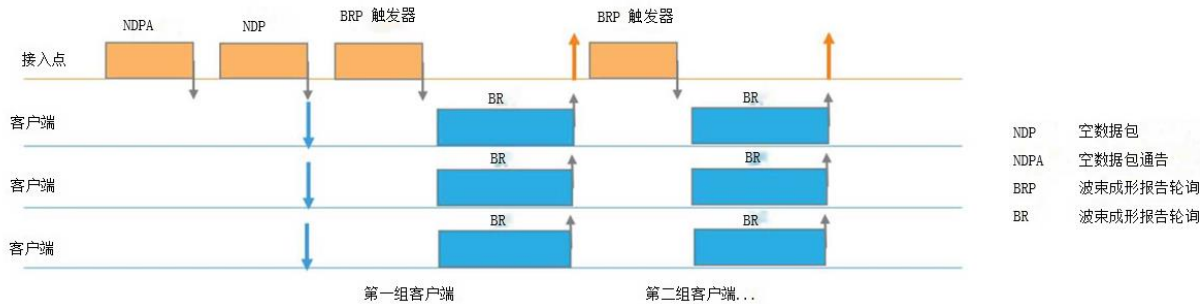


图 15：探测 — 波束成形显式反馈

802.11ac MU-MIMO 在实际部署中的经验揭示了一些局限性。例如，并不总是能够形成可用的组，即使在使用 4 天线接入点时，相对于单用户模式的性能提升有时也很小：在 802.11ax 中，更大的 MU-MIMO 组（从 4 个增加到 8 个客户端）将实现相当大的改进。

从上图中可以看出，802.11ax 可以通过对客户端分组并顺序处理组来容纳大量客户端设备。该示例显示了波束成形报告的客户端分组，但是该概念也扩展到其他数据包类型。

任何需要 ack 确认的链路或传输级协议，例如 TCP/IP，都将从改善的下行链路性能中获益，但仍可能受到上行链路的限制：这将在 802.11ax Wave 2 中添加上行链路 MU-MIMO 时得到解决。

上行链路 MU-MIMO 以及组合的 MU-MIMO 和 OFDMA

上行链路 MU-MIMO 和结合了 OFDMA 和 MU-MIMO 的数据传输都被推迟到 802.11ax Wave 2。尽管组合的下行链路 OFDMA 和 MU-MIMO 为接入点调度器提供了更多的可能性，然而这种组合在 802.11ax Wave 1 中还没有得到支持。

数据包前导码

在 802.11 协议中，数据包前导码包含接收器与输入信号同步的信息，并标识要遵循的子信道和数据包格式。下面的信息由发射器的 PHY 层编码。

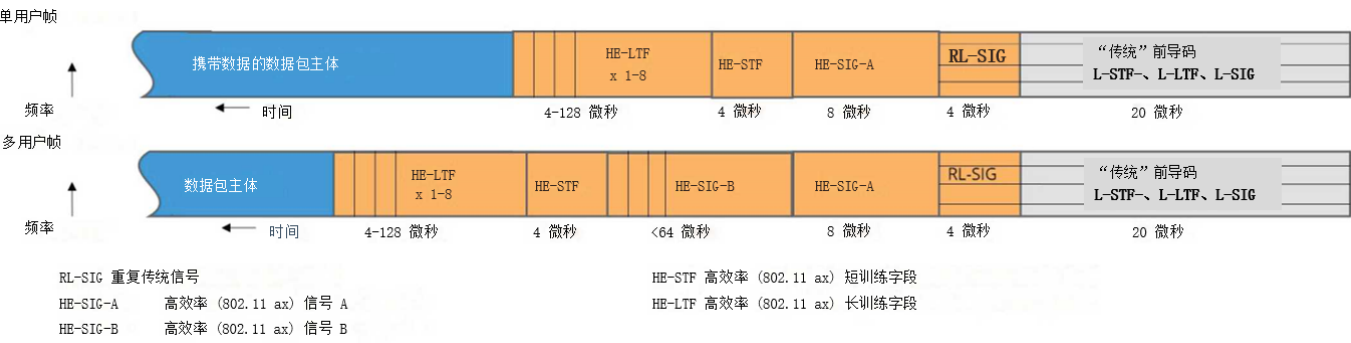


图 16：前导码和训练序列

802.11ax 帧以向后兼容的“传统”前导码开始：这些字段在 802.11n 之前就已经使用，并且允许较旧的设备识别广播中存在 802.11 帧。这使得 CSMA/CA 协议能够在 802.11ax 传输的情况下继续运行。

下一个字段是 RL-SIG，将是 802.11g 等旧协议中帧体的开始。它将帧标识为 802.11ax，而不是 802.11n 之前的帧。为了向后兼容，“传统”前导码和 RL-SIG 字段在用于后续传输的所有 20-MHz 子信道中并行传输。

后续字段用于 802.11ax 目的（“HE”是“高效率”，802.11ax 的 IEEE 802.11 名称），并使用混合信元格式，“传统”调制用于低速率字段和向后兼容，而其他字段则使用 802.11ax 的新的、紧密的子载波间隔和更长的 OFDMA 信元。

第一个是 HE-SIG-A 字段，它包含与后续的数据包有关的信息，包括它是下行链路还是上行链路、BSS 颜色、调制 MCS 速率、带宽和空间流信息，以及传输机会中的剩余时间。

对于单用户、多用户和基于触发器的帧，该字段具有不同的内容，并在 802.11ax 的“扩展范围模式”中重复出现。

HE-SIG-B 字段仅适用于多用户数据包。它包含所有收件人共有的信息，以及用户特定的其他字段，因此其长度取决于接收传输的用户数量。当使用 OFDMA 时，HE-SIG-B 用户特定字段是在用于后续数据包传输的每个子信道中并行发送的。我们稍后会详细介绍该内容。

HE-STF 训练字段允许接收器在解码数据包主体之前与输入帧的定时和频率同步，而 HE-LTF 对于信道估计很重要，支持波束成形和 MIMO 空间分集。

数据包尾部 — 填充、尾部位和数据包扩展

802.11ax 的新结构 and 应用意味着在数据包末尾添加了一些新字段。

数据包扩展尾部比特位填充

携带数据的数据包主体

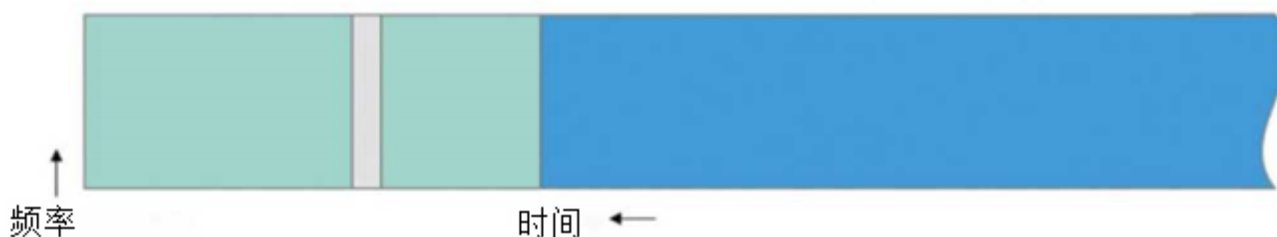


图 17：填充、尾部位和数据包扩展

填充可以添加在数据包有效载荷之后。当使用 OFDMA，并且由发射器构建的帧不够长时，这是必需的，以填满协商的传输机会。确定最佳带宽利用率的计算由接入点执行，它改变分组传输中帧的子信道、MCS 速率和发射功率，以确保所有传输同时开始和结束。这一点很重要，因为信道上的其他设备，包括 802.11ax 发布之前的设备，必须看到充满信道的特定功率电平的信号，才能使 CSMA/CA 争用机制正常工作。填充可以包括在前向纠错 (FEC) 计算中，或者在计算后添加。

如果接入点工作良好（假设系统在满负荷运行），将使用非常少的填充。如果它有一个“短”帧，它总是可以降低 MCS 速率来改善传输的差错率，并且持续更长的时间。

尾部位可以添加在数据字段之后。它们仅在使用 BCC 纠错时才是必要的，不适用于 LDPC。该字段存在于 802.11ax 之前。（二进制卷积码 (BCC) 在 802.11 早期的纠错标准中使用。随着数据速率的增加，BCC 解码器变得复杂，现在更高的数据速率使用低密度奇偶校验 (LDPC) 编码，这是一种复杂性较低的替代方案。）

数据包扩展字段可以添加在帧的末尾。它用于允许接收器在用自己的帧响应之前有额外的时间来处理帧的内容，在 802.11 中第一次认识到，一些芯片可能会将某些功能移动到较慢的软件层来处理，而不是快速计算的硬件。需要额外时间来处理接收帧的客户端必须向接入点发送其要求：允许的数据包扩展值为 0、4、8、12 或 16 微秒。

数据包聚合

数据包聚合在 802.11n 中被引入，并且已经被广泛使用，特别是在流媒体视频通过 Wi-Fi 传输的情况下。



图 18: MAC 聚合

MAC 聚合的价值在于更有效地利用空中接口，提高吞吐量和容量。这源于两个效应。

A-MSDU 聚合只要求序列的第一个数据包有完整的 MAC 报头，从而减少报头开销。这带来显著的效应，但是更大的好处在于消除数据包的资源争用：通过 A-MSDU 和 A-MPDU 聚合，发射器能够协商用一个传输机会发送许多数据包，大大降低争用开销。

802.11ax 的数据包聚合特性没有改变，仍然在优化网络容量方面发挥着重要作用。它与 MU-MIMO 和 OFDMA 结合使用：对于本文中的所有 OFDMA 示例，子信道内的数据包通常是聚合数据包。

多用户模式的控制

802.11ax 包括两种多用户模式：空间维度的 MU-MIMO 和频率维度的 OFDMA。这两种模式都允许接入点和多个客户端设备之间同时进行双向通信，802.11ax 提供通用控制机制。

下行链路和上行链路不同：前者没有先前的信令，接入点只是开始以适当的模式发送，而接收器在数据包到达时同步。但是多用户上行链路业务需要一个特殊的“触发”帧，在该帧中，接入点将 MU-MIMO 组和 OFDMA 资源单元分配给其客户端，并通知它们分配情况，这又要求接入点轮询客户端的上行链路流量需求。

下行链路多用户控制

下行链路多用户控制没有预先信令：所有相关信息都包含在数据包报头中，特别是下行链路多用户帧的 HE-SIG-B 字段中。



图 19: 多用户下行链路模式的控制

HE-SIG-B 是一个复杂的字段。它有可变的长度，这取决于接入点正在寻址的客户端数量，以及两种不同类型的信息 - 公共的和用户特定的信息。

公共字段标识将要使用的 OFDMA 子信道或 RU 的结构，例如 18x 26 RU 或 2x 242 RU。它包括所有传输共有的其他信息。

公共字段后面有许多用户特定的字段。接入点使用这些字段来准确标识它将如何向每个客户端传输，包括空间流的数量、它将使用的 MCS 以及它是否将使用波束成形。

802.11ax 规范要求发射器在多个 20 MHz 信道中分别构造 HE-SIG-B 字段，取决于分配信道的总带宽。因此，如果接入点使用 80 MHz 信道，它将传输 4 个 HE-SIG-B 字段，每个 20 MHz 子信道中一个。

HE-SIG-B 字段提供所有必要信息（客户端设备使用它们判断自己是不是后续帧的预期接收方），以及接收和解码该帧所需的信息。

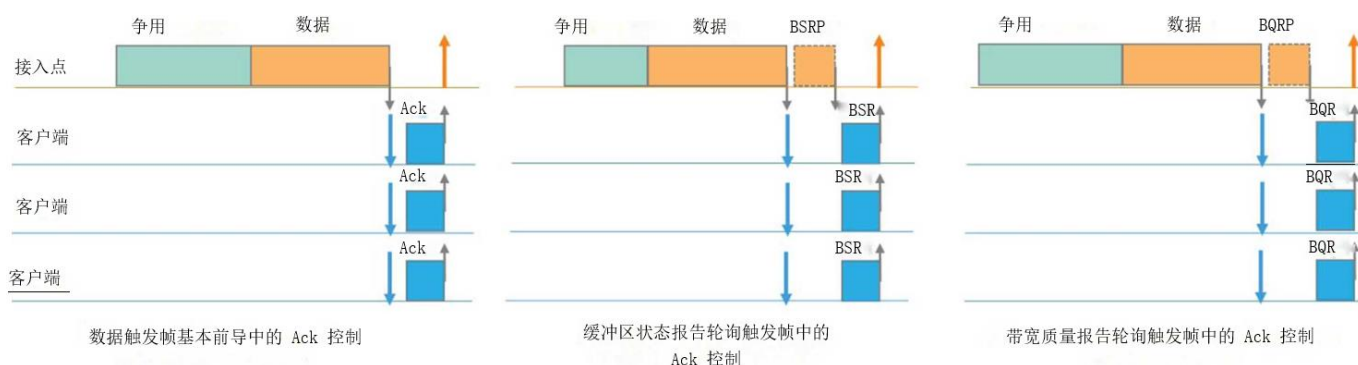


图 20: 多用户下行链路模式的控制

在图 20 中，下行链路显示了多用户帧如何遵循简单的格式，不需要触发或信令帧。然而，管理确认变得更加困难，因为这些是上行链路传输，并且在多用户模式下，需要来自接入点的协调和触发帧。

可以选择的触发帧包括基本数据包前导码中的 BlockAck 请求 (MU-BAR)、缓冲器状态报告 (BSRP)、带宽查询报告 (BQRP) 和上行链路多用户响应调度控制字段。

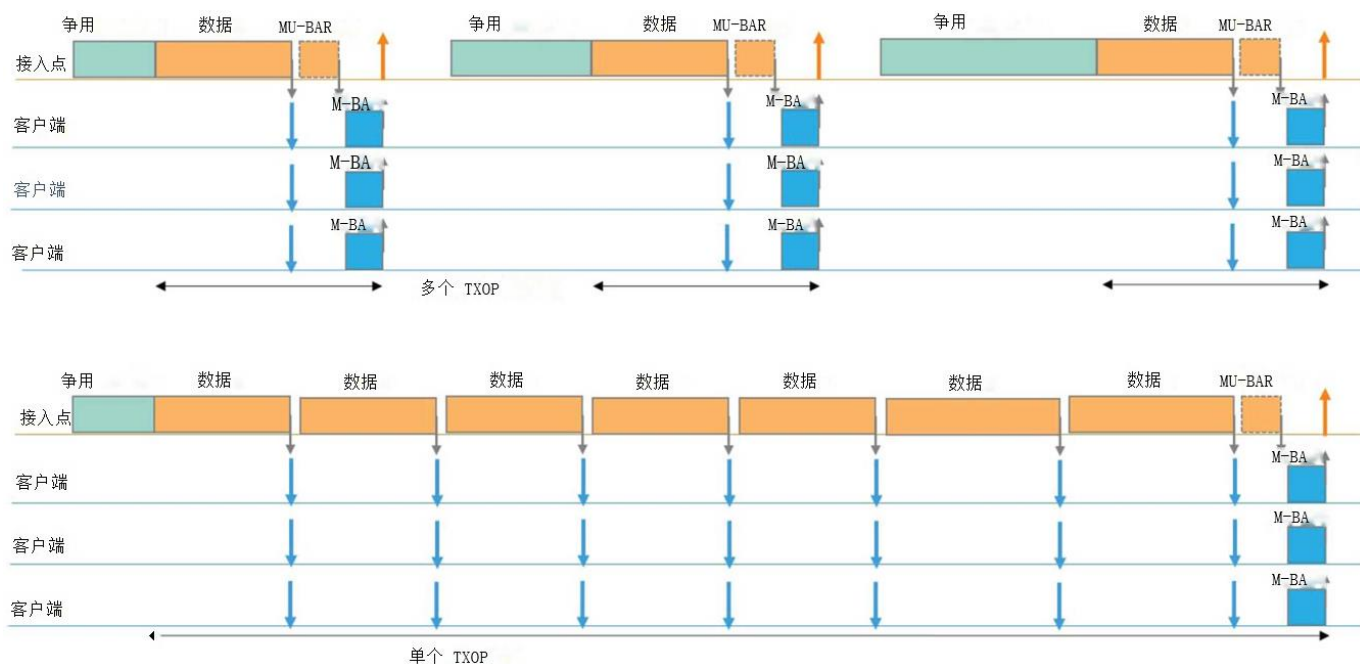


图 21: 多用户下行链路模式的控制

BlockAck 可以与下行链路 MU 模式结合使用, 允许一组 MU BlockAck 被延迟到一组下行链路数据帧的末尾, 在相同的传输机会中发送, 最迟不超过 4.096 毫秒的 TXOP 限制。这将资源争用和多个 Ack 的开销降至最低。

(802.11ac 引入了下行链路 MU-MIMO, 但没有上行链路多用户模式, 因此下行链路 MU 传输的接收方不得不一个接一个地确认, 浪费了广播时间。802.11ax 方法是对 802.11ac 的改进。)

上行链路多用户控制

上行链路比下行链路更复杂, 因为接入点首先必须发现客户端准备传输什么流量。在此之后, 它必须计算 MU-MIMO 组和 OFDMA RU 的最佳分配, 然后将分配信息发送给其客户端, 并使它们同步以同时传输。

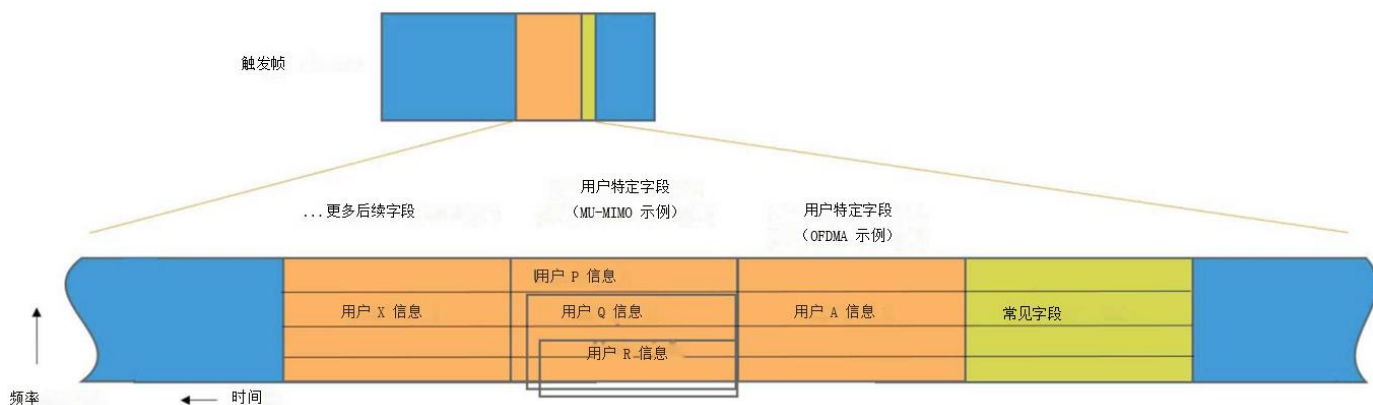


图 22: 多用户上行链路模式的控制

触发帧格式如上所示。它包含以下信息。

- 上行链路传输窗口的长度
- 哪些客户端设备可以开始传输
- 每个客户端设备将使用哪个 OFDMA RU
- 每个客户端设备将使用多少空间流
- 每个客户端设备将使用哪个 MCS 调制级别
- 是否要在上行链路上使用像 STBC 这样的功能
- 接入点所需的客户端发射信号强度（这由客户端使用接入点的发射功率电平、客户端的接收 RSSI 电平和信道互换假设来计算）
- （上行链路 MU-MIMO 被推迟到 Wave 2，但是所有必需的字段已经在 802.11ax 标准中定义。）

这是一个非常通用的框架，因为它可以与其他几个功能连接，如下所示。

- **基本触发帧：**这没有额外的功能。它指定客户端设备应该如何响应以及何时响应。
- **波束成形报告轮询 (BRP)：**这向客户端设备请求波束成形报告。用户信息字段指定波束成形报告的格式。此帧中没有公共字段。

- **多用户 BlockAck 请求 (MU-BAR)：**此触发帧同时从多个客户端设备请求 BlockAck。用户信息字段指定要确认的帧。
- **多用户 RTS 请求 (MU-RTS)：**该触发帧用于在传输前清除空间，与单用户 RTS-CTS 相同。
- **缓冲区状态报告轮询 (BSRP)：**该触发帧允许接入点获得客户端设备排队要传输的流量，从而允许接入点高效地调度上行链路流量。
- **带宽查询报告轮询 (BQRP)：**该触发帧请求客户端设备报告 20 MHz 射频信道的占用情况，从而允许接入点有效控制上行链路信道的使用。
- **带重试的群播多用户 BlockAck 请求 (GCR MU-BAR)：**当接入点正在建立多播组并向该组的每个成员请求 BlockAck 时，使用该帧。

每当接入点希望发起一组上行链路多用户帧时，都需要某种触发帧。

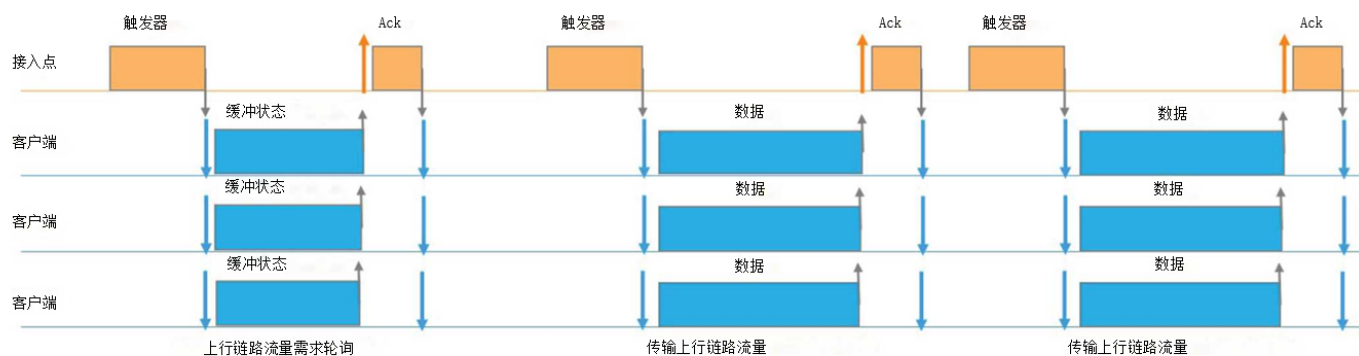


图 23：多用户上行链路模式的控制

触发帧用于将客户端映射到它们各自的 OFDMA RU 和 MU-MIMO 组，并且包括定时和 MCS 调制速率信息以及传输功率指导。

在指定的时间，客户端设备开始在其分配的 RU 组或 MIMO 组中进行传输。

接入点通常在上行链路数据帧之后发送确认帧。这可以通过多用户传输向客户端分别发送块确认 (BA) 帧，也可以通过包含在 802.11ax 之前或 802.11ax 帧中的 “multi-STA BlockAck” 帧来进行确认。

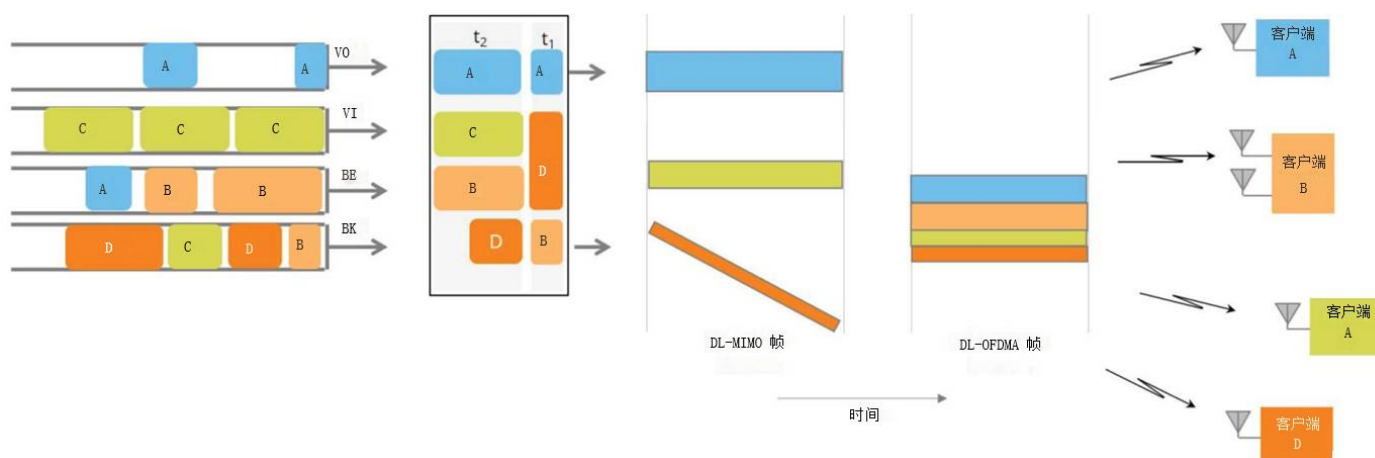


图 24: 下行链路多用户模式下的接入点调度

当 802.11ac 引入下行链路 MU-MIMO 时，接入点承担了监控其下行链路流量缓冲区的任务，并决定如何对各种数据包进行分组，以最大限度地利用 MU-MIMO 组在其客户群中的分布。例如，有时最好是进入缓冲区来填充传输组。

在 802.11ax 中，识别组变得更加复杂：考虑信号强度（与接入点的远近距离）可能会提高效率增益，并且在未来，随着来自真实世界部署的数据积累，大数据和机器学习将有机会分析性能并改进调度算法。

有了 OFDMA，下行链路流量疏导问题获得了一个新的维度：现在接入点必须站在缓冲区向前看，同时考虑 MU-MIMO 组和 OFDMA 信道（以及哪个客户端支持 802.11ax）以及数据包的重新排序和分组。

802.11ax 多用户模式的接入点调度

随着 OFDMA 和上行链路 MU-MIMO 的增加，接入点必须执行前几代 802.11 不需要的附加功能。下行链路和上行链路流量的调度对于重负载系统中的最佳性能优化变得至关重要。

但是上行链路更加复杂。尽管上行链路 MU-MIMO 将被推迟到 802.11ax Wave 2，上行链路 OFDMA 仍将是第一代 802.11ax 设备的重要特征。多用户操作要求接入点了解其客户端的缓冲状态和流量特性，然后对上行链路进行等效计算，再通知并协调上行链路多用户传输，以获得最佳系统性能。

这一功能已经在蜂窝系统中使用，在蜂窝系统中，基站将相当多的专业知识和知识产权纳入其调度算法。我们应该会在 802.11ax 接入点中看到类似的发展。

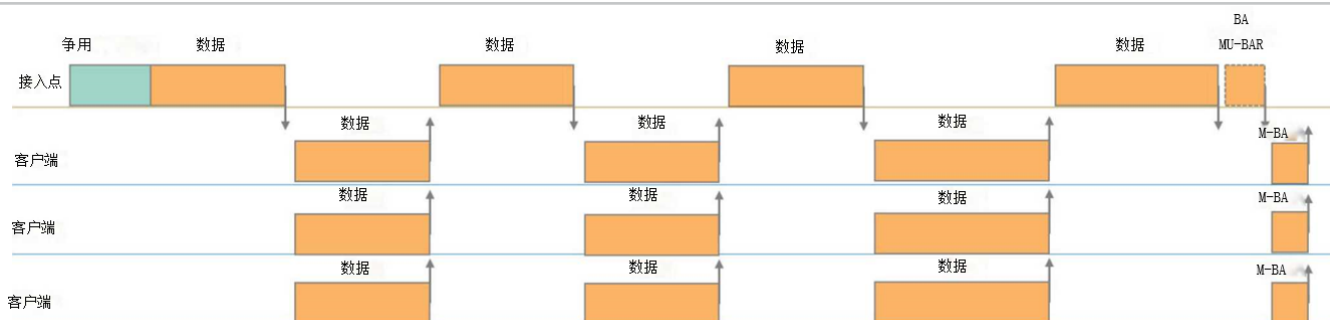


图 25：下行链路 - 上行链路多用户级联帧交换

接入点可用的最有效的多用户方案可以把多用户帧的上行链路和下行链路集合级联在一起，在空间上与 MU-MIMO 复用（如上所示，下行链路仅在波和 OFDMA 中）。下行链路数据包包括 Ack 和触发器，上行链路是基于触发器的帧，也携带 Ack，所有这些都由接入点控制和协调。

有趣的是，802.11ax 中新的多用户模式，以及接入点的高效调度，允许 Wi-Fi 系统以类似蜂窝网络的方式 (TDD + TDM/TDMA + OFDMA) 工作。接入点可以为上行链路和下行链路调度连续的多用户传输机会，在传输适当的数据流时，先前的 802.11 协议带来的每个数据包的开销变得非常小，甚至于几乎消失。同时，客户端数量的扩展和 OFDMA 带宽分配的粒度允许非常广泛的客户端密度和流量场景。

8 天线接入点和客户端设备

802.11ac 标准将接入点或客户端可以使用的最大天线数量扩展到 8 个。在这种情况下，虽然有许多 4 天线 802.11ac 接入点，但没有设备供应商敢超过 4 个。

802.11ax 标准保持了 8 个天线的上限，就像 5G 采用“大规模 MIMO”一样，从而可以构建最多 8 个天线的创新型 802.11ax 产品。除 MU-MIMO 之外，其他优势还包括波束成形和具有更多天线的 MRC，以及接入点对 1 天线和 2 天线客户端设备进行更高效的空间分组。

高密度接入点和客户端环境、对性能敏感的应用程序和点对点连接是一些可能的场景。未来仍然将会有大批量的 4 个或更少天线的接入点定位为中档产品，应用在家庭和企业环境。

在客户端侧增加天线数量的可能性似乎不大。许多智能手机和平板电脑支持 2 个空间流，这似乎足以满足它们的性能需求：额外天线的好处将体现在接入点能够支持的总容量上：比以前更多、并且速率更高的客户端。

更高阶调制

通过对 802.11 物理层进行修正提升最高调制级别已经成为一种传统，802.11ax 在 802.11ac 的基础上把最高调整速率提高两级，提升到了 1024-QAM。

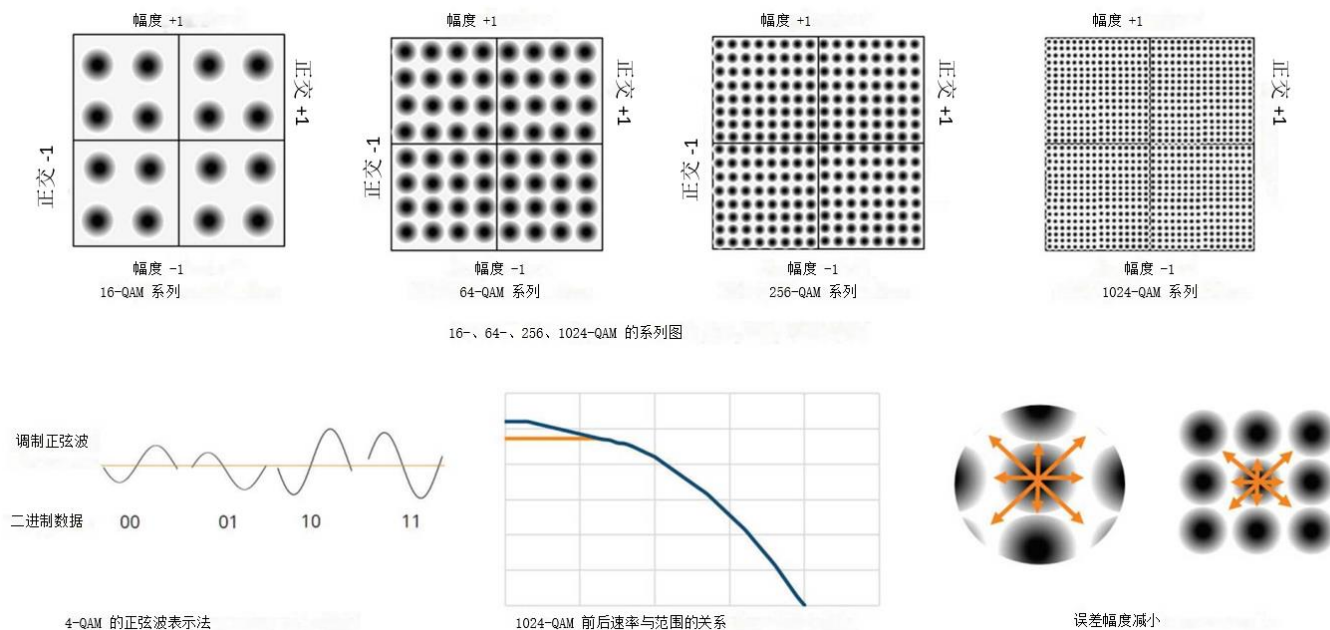


图 26: 1024-QAM 调制

从 256-QAM 提升到 1024-QAM 使每个 OFDM 信元携带的比特数从 8 增加到 10，数据速率和频谱效率提高了 25%。但是，和以前一样，这种改进只适用于最理想的射频条件，即信号强度足够高且噪声水平足够低。这是

因为接收器必须按照调制电平，沿每个轴（幅度和相位或正交）选择 32 种状态中的一种，而不像 256-QAM 选择 16 种状态中的一种，或 64-QAM 选择 8 种状态中的一种。

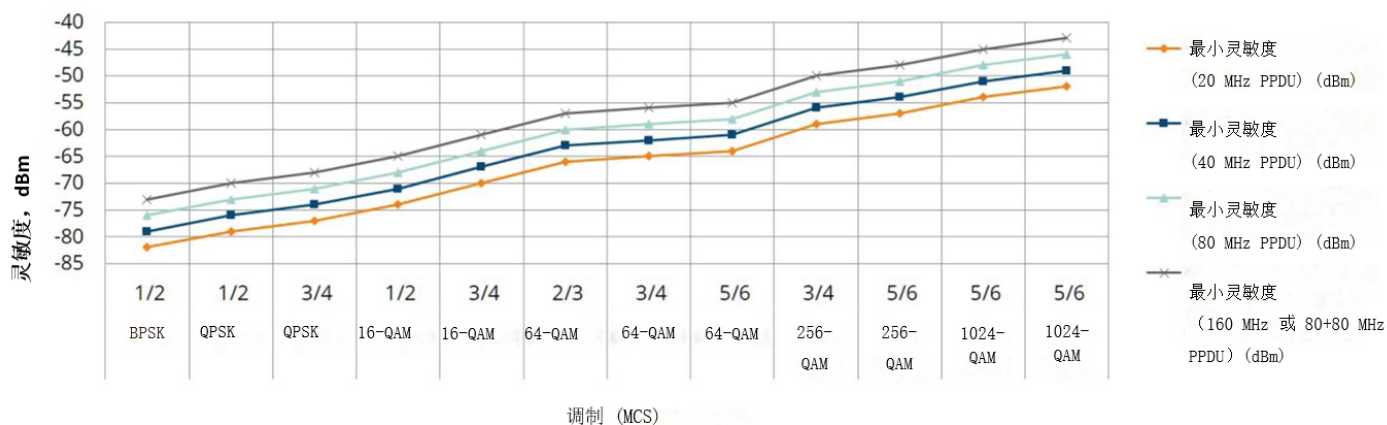


图 27: 802.11ax 接收灵敏度要求

下图显示了解码 80 MHz、1024-QAM 5/6、MCS-11 帧所需的接收信号强度接近 -45 dBm，这是一个非常高的电平。下面的一些表格说明了 802.11ax 速率是如何实现的（160 MHz 信道只有 2x 80 MHz）。

第一个表（表 3）显示了 20、40、80 MHz 信道的数据速率（以 Mbps 为单位，保护间隔较短）。

表 3：802.11ax 选定速率（Mbps，短保护间隔）

MCS	调制和速率	20 MHz 1xSS	20 MHz 2x SS	20 MHz 4x SS	20 MHz 8x SS	40 MHz 1x SS	40 MHz 2x SS	40 MHz 4x SS	40 MHz 8x SS	80 MHz 1xSS	80 MHz 2x SS	80 MHz 4x SS	80 MHz 8x SS
0	BPSK1/2	8.6	17.2	34.4	68.8	17.2	34.4	68.8	137.6	36.0	72.1	144.1	288.2
1	QPSK1/2	17.2	34.4	68.8	137.6	34.4	68.8	137.6	275.3	72.1	144.1	288.2	576.5
2	QPSK3/4	25.8	51.6	103.2	206.5	51.6	103.2	206.5	412.9	108.1	216.2	432.4	864.7
3	16-QAM 1/2	34.4	68.8	137.6	275.3	68.8	137.6	275.3	550.6	144.1	288.2	576.5	1,152.9
4	16-QAM 3/4	51.6	103.2	206.5	412.9	103.2	206.5	412.9	825.9	216.2	432.4	864.7	1,729.4
5	64-QAM 1/2	68.8	137.6	275.3	550.6	137.6	275.3	550.6	1,101.2	288.2	576.5	1,152.9	2,305.9
6	64-QAM 3/4	77.4	154.9	309.7	619.4	154.9	309.7	619.4	1,238.8	324.3	648.5	1,297.1	2,594.1
7	64 QAM 5/6	86.0	172.1	344.1	688.2	172.1	344.1	688.2	1,376.5	360.3	720.6	1,441.2	2,882.4
8	256-QAM 3/4	103.2	206.5	412.9	825.9	206.5	412.9	825.9	1,651.8	432.4	864.7	1,729.4	3,458.8
9	256-QAM 5/6	114.7	229.4	458.8	917.6	229.4	458.8	917.6	1,835.3	480.4	960.8	1,921.6	3,843.1
10	1024-QAM 3/4	129.0	258.1	516.2	1,032.4	258.1	516.2	1,032.4	2,064.7	540.4	1,080.9	2,161.8	4,323.5
11	1024-QAM 5/6	143.4	286.8	573.5	1,147.1	286.8	573.5	1,147.1	2,294.1	600.5	1,201.0	2,402.0	4,803.9

（具有 8x SS 和 MCS 11 的 160 MHz 信道的最大速率现在是 9607.8 Mbps）

下表显示了子信道的数据速率（以 Mbps 为单位，保护间隔较短）。

表 4：802.11ax 选定速率（Mbps，短保护间隔）

MCS	调制	RU-26	RU-52	RU-106	RU-242	RU-484	RU-996
		2.0 MHz	4.1 MHz	8.3 MHz	18.9 MHz	37.8 MHz	77.8 MHz
0.0	BPSK1/2	0.9	1.8	3.8	8.6	17.2	36.0
1.0	QPSK 1/2	1.8	3.5	7.5	17.2	34.4	72.1
2.0	QPSK 3/4	2.6	5.3	11.3	25.8	51.6	108.1
3.0	16-QAM 1/2	3.5	7.1	15.0	34.4	68.8	144.1
4.0	16-QAM 3/4	5.3	13.2	28.1	51.6	103.2	216.2
5.0	64-QAM 2/3	7.1	14.1	30.0	68.8	137.6	288.2
6.0	64-QAM 3/4	7.9	15.9	33.8	77.4	154.9	324.3
7.0	64-QAM 5/6	8.8	17.6	37.5	86.0	172.1	360.3
8.0	256-QAM 3/4	10.6	21.2	45.0	103.2	206.5	432.4
9.0	256-QAM 5/6	11.8	23.5	50.0	114.7	229.4	480.4
10.0	1024-QAM 3/4				129.0	258.1	540.4
11.0	1024-QAM 5/6				143.4	286.8	600.5

多用户模式下的传输功率控制

802.11ax 中的多用户模式允许对传输功率电平进行更多的控制，并且大多数控制通过接入点来实现。这有助于延长客户端电池寿命和限制同道干扰。例如，在密集多接入点部署中，即使接入点降低了功率，客户端仍然倾向于以最大功率传输，从而增加了干扰半径。

借助于显式的探测过程，接入点可以了解到其客户端接收信号的质量，这使它能够估算出路径损耗和射频信道条件。因此，它可以调整其传输功率，以使客户端接收到的信号符合特定的信号强度，或者某个指定的信号-干扰和噪声（SINR）水平。由于 MCS 和差错率与 SINR 有关，因此它可以选择通过降低误差水平或增加 MCS 和/或发信功率来提高数据速率和减少空口时间。

一个有趣的可能性是，增加在某些 OFDMA RU 中的发信功率，同时减少在其他单元中的发信功率。这很有趣，因为它为“充水”打开了一个机会，充水是一种向最有效的接收方分配资源的技术，同时也允许接入点在某些子载波上传输超过允许的功率电平 (EIRP)，同时减少其他子载波的功率。只要 20 MHz 信道上的整个 EIRP 在限制范围内，这种配置将被法规所允许。

有了新的多用户信令机制，接入点现在可以控制客户端的传输特性。在 Wave 1 中，这仅适用于 OFDMA，但在 Wave 2 中，上行链路 MU-MIMO 也将受到控制。借助于接入点期望的 SINR 字段，通过控制上行链路多用户操作，使得接入点可以间接指定客户端的发信功率，客户端可以从路径损耗的探测估计中导出该发信功率。除此之外，接入点还规定了要使用的空间流数量、MCS、OFDMA RU 和其他应该使

用的功能。接入点可以这样做来优化 OFDMA 数据包的组合，作为可选项，出于延长电池寿命或干扰优化的目的，它可以寻求降低特定客户端使用的传输功率。

802.11ax 中的节能机制

802.11Ax 的目标之一是在保持电力需求不变或进一步改善的同时将性能提高 4 倍。随着 IoT 市场的兴起，性能指标另一端的节能机制也成为特别关注的焦点。

在先前的 802.11 标准中已经存在几种节能机制：这些机制仍然存在，并辅以一种新的机制“目标等待时间”(TWT)。(TWT 在 802.11ah 中引入，这是对低功耗、长距离 IoT 传输的修正；但是由于 802.11ah 芯片和设备还没有被市场广泛采用，所以，它对 Wi-Fi 设备的使用者来说是新的机制。) TWT 对于不常通信的电池供电设备特别有用。

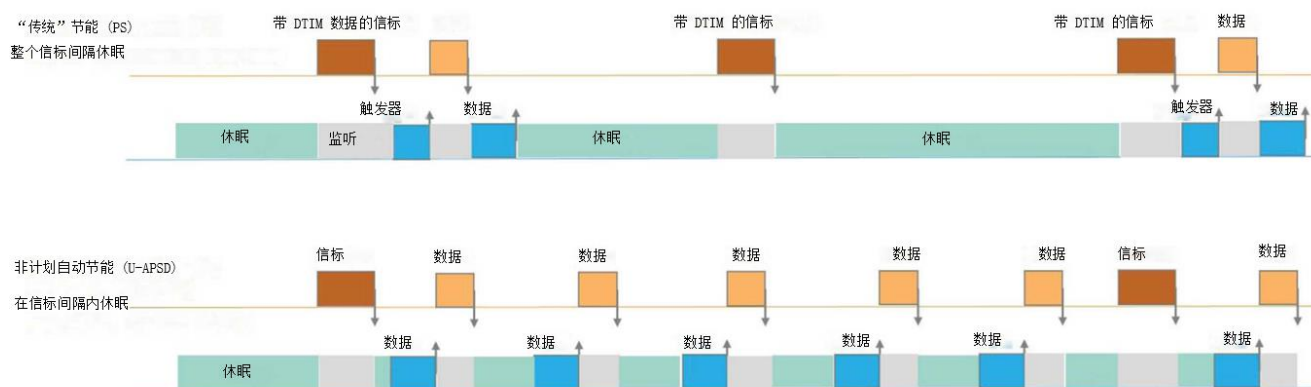


图 28: 802.11ax 之前的节能选项

自 802.11b（第一个广泛使用的 Wi-Fi 标准）以来，现有的“传统 PS”机制一直在使用。客户端可以在接入点信标或多个信标之间休眠，当它们有数据要传输，或者接收到携带了传送流量信息图 (DTIM) 的信标时才会醒来（它们可以在任何时间传输，接入点不休眠），DTIM 中的位图表明接入点缓存了下行链路数据，需要传输给特定客户端。如果某个客户端对应的 DTIM 位设置为 1，它可以通过在信标之后立即向接入点发送触发帧来检索其数据。PS 是一种有效的机制，但只允许客户端按照少量信标间隔休眠，通常客户端每秒必须唤醒几次才能读取 DTIM。

由于 802.11e 增加了显式 Wi-Fi 语音支持，IEEE 认识到支持语音的设备需要新的节能机制，因为语音数据包需要以比信标周期更短的时间间隔进行传输，通常为 20 毫秒。非计划自动节能交付 (U-APSD) 功能允许客户端可以按照小于一个信标周期的间隔休眠。与在 PS 中一样，接入点缓冲下行链路流量，直到客户端唤醒并请求它。对于语音等对称流量，客户端通常可以在同一个唤醒间隔内发送和接收帧。

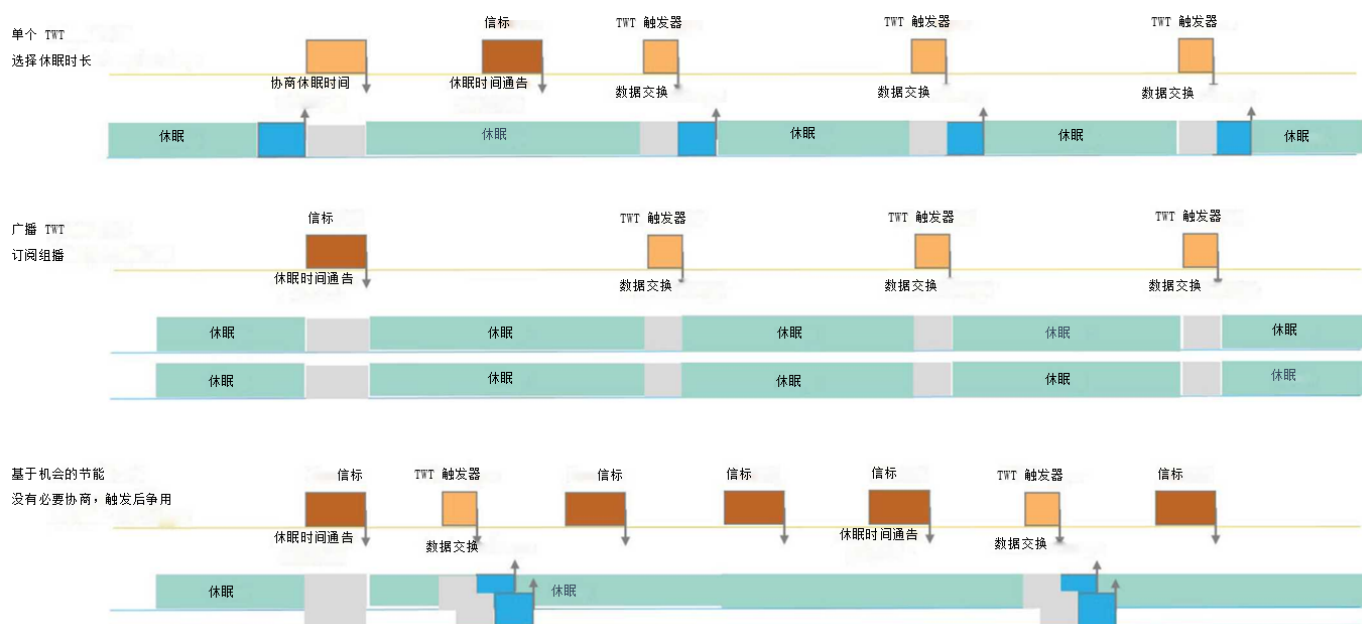


图 29: 802.11ax 中的 TWT 节能选项

802.11ax 中的新 TWT 机制允许更灵活、长期甚至多客户端的休眠安排。

首先，客户端和接入点之间相互协商为客户端的唤醒和通信设置一个商定的时间表。时间表通常是周期性的，两次动作之间跨越多个信标间隔，时间间隔可以很长（几分钟，也许几小时或几天）。当到达其指定的时间时，客户端醒来，等待来自接入点的轮询触发帧（在多用户模式下需要），并交换数据，随后返回休眠状态。由于接入点与每个客户端单独协商，因此它可以分组或分别按计划发送，以实现最佳流量效率或适应来自其他客户端的流量要求。

该标准允许上述单个 TWT 存在多种变化。许多客户端希望接收的多播流量可以由接入点按照信标中发布的时间表进行设置。机会性节能功能允许接入点公布任何客户端即便在 OFDMA 环境下也可以醒来并请求数据包交换的时间间隔。还有一些机制可以让无关联的客户端了解他们可能感兴趣的信息何时会被广播。

TWT 还可以被用于多种多用户模式，这使得一些选项相当复杂。但是直接的目标是实现灵活和长期的休眠间隔。

802.11ax 非常省电：除了 TWT 之外，它还有许多其他功能，可以延长 IoT 传感器和其他客户端的电池寿命。

- 上行链路/下行链路位用于标识由接入点或客户端设备发送的帧。它包含在每个前导码中。这很有用，因为客户端设备不需要从其他客户端接收帧，并且可以在它们看到前导码中的“上行链路”位时关闭它们的无线电电路。
- 20 MHz-only 的选项允许简化芯片的设计，以延长电池寿命。它还为专业设备中的主流 Wi-Fi 芯片提供低功耗模式。
- 多用户信令允许接入点向客户端指示它期望在它们的传输中接收到的信号强度，并指定要使用的 MCS。如果接入点了解其客户端，它可以针对功率受限的设备优化这些设置。
- BSS 着色功能允许客户端停止接收帧，并在识别出自己不感兴趣的帧后立即返回休眠模式。这是 802.11ax Wave 2 中的功能（参见附录）。
- “接收操作模式”和“发送操作模式”允许客户端减少用于数据传输的发送和接收空间流的数量以及信道宽度。客户端可以通过它来降低发送和接收数据的峰值功率需求。尽管较低的数据速率意味着传输时间会延长，但电能消耗方面的节约对于 IoT 传感器来说是物有所值的。

20 MHz-only 选项

由于 802.11ax 是在 IoT 时代开发的，所以，它提供的不仅仅是对低成本、电池供电的客户端设备的接入。Wi-Fi 芯片每年的出货量高达数十亿，这使得制造商能够将此类复杂芯片的单位成本降至非常低的水平，但与蓝牙或 Zigbee 等替代产品相比，Wi-Fi 对于 IoT 传感器来说仍然是一个更为昂贵的选择。另外，Wi-Fi 芯片的耗电量也是普通芯片的数倍。

多年来，多家专业芯片供应商已经推出了专为 IoT 应用而改进的 802.11 芯片（例如，Wi-Fi 资产标签），这类芯片以尽

可能多的方式最大限度地降低了功耗要求，但由于这些特殊芯片的市场容量很小，相关设计受到与包括接入点在内的其他无线设备互操作需求的限制。

因此，802.11ax 的开发人员（其中许多人就职于芯片供应商）试图以多种方式缩小新标准在复杂性和电池寿命方面的差距。新的 TWT 节能协议允许基于 Wi-Fi 的 IoT 传感器以低得多的功耗工作：这将缩小电池寿命的差距，但 Wi-Fi 芯片的复杂性和物理尺寸仍然使它们在极低成本传感器方面处于劣势。

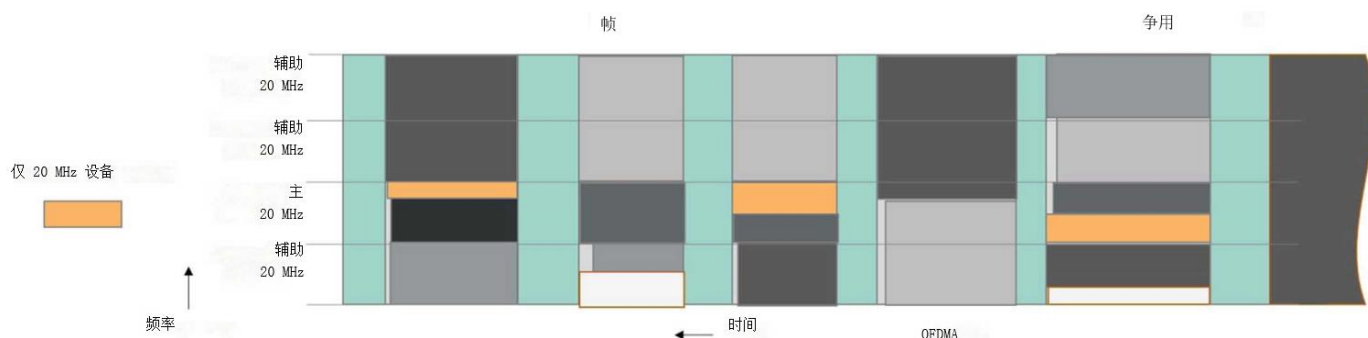


图 30: 20 MHz-only 选项

802.11ax 通过为一种新型芯片打开大门来降低复杂性。如果供应商可以跟随 IEEE 标准，并构建这种新的 Wi-Fi 芯片，他们将从中受益匪浅。

20 MHz-only 的设备能够在指定的主信道上，包括 2.4 或 5 GHz 频段上运行，但最高只能以 20 MHz 频宽运行。除此之外，几乎 802.11ax 的所有其他强制性特性都适用于这种新型芯片，

包括 OFDMA 选项, 从而允许此类设备在小得多的子信道上发送和接收数据。当然, 20 MHz 的信道上限限制了可以支持的数据速率, 但这对于 IoT 应用来说不应该是个问题。

(接入点必须支持 2.4 GHz 频段中的全部 20 MHz 信道和 5 GHz 频段中的 20、40 和 80 MHz 信道, 并由 Wi-Fi 联盟认证: 20 MHz-only 仅适用于客户端设备。)

使用模式：我们能用 802.11AX 做什么？

802.11ax 商业利益	802.11ax 主要用例
<ul style="list-style-type: none">• 增加总网络吞吐量• 增加无线覆盖范围• 增加峰值链路吞吐量• 降低开销• 提高高密度网络的效率• 增强户外连接的坚固性• 降低功耗• 增强 多 Wi-Fi 共存能力	<ul style="list-style-type: none">• 机场和车站• 教育• 购物中心• 无线办公• 智能汽车• 体育场• 智能城市• 密集的公寓楼• 密集的郊区住宅

图 31：使用模式

密集部署和重叠覆盖

802.11ax 的主要目标可能是提高密集网络的性能。密集网络可以是不同的形式：小区域内的大量客户端，或密集的接入点，有时重叠的接入点可能具有共同或完全独立的管理。新标准和认证为所有这些场景提供了解决方案。

对于一个相对独立，并且有少量高速率客户端的接入点，802.11ax 可以提高数据速率和改善 MU-MIMO 操作，尽可能实现同步传输。当数据流包括许多短帧的时候，多用户 OFDMA 能够实现低得多的资源争用和前导开销。

当接入点重叠时，通过 BSS 着色的空间重用减少了接入点的同信道干扰半径，改善了较大范围内的并发传输能力，从而提高了网络容量。

并且，在客户端群体因不同的数据速率和帧长度而异的情况下，来自接入点的 OFDMA 和多用户上行链路控制可以进一步推动性能的提高。

低功耗、大规模：物联网

无论它是否被称为“IoT”，该行业都期待在 802.11ax 时代可以连接更广泛的 Wi-Fi 客户端。人们希望新的 Wi-Fi 联盟认证涵盖节能特性，特别是 TWT、20 MHz-only、甚至一些多用户控制功能和 OFDMA，这些功能都将有助于延长电池寿命，从而进军新兴 IoT 市场。

除了低功耗要求，IoT 肯定会增加家庭、办公楼甚至零售店中的 Wi-Fi 设备数量。802.11ax 中的一些功能扩展了可以与接入点相关联的客户端设备的数量，更重要的是，扩展了同时在线的活跃客户端的数量。具体来说，OFDMA 允许频域被切得更薄，有利于大量具有低数据速率和长休眠时间的设备，这正好是 IoT 所需要的。

远程室外操作

户外点对点、点对多点和 Mesh 市场往往没有家庭和企业无线 WLAN 市场那么耀眼，但它们代表了一个规模可观且可持续的 Wi-Fi 设备市场，并将受益于 802.11ax 的若干改进。

来自蜂窝世界的 5G 项目的一个重要目标是“固定无线接入”(FWA)，通过无线 Mesh 网络向城市和农村的家庭提供宽带互联网服务。这个市场需要长距离链路、高数据速率和低成本设备：802.11ax 在前两个方面有所改进，第三个则一直是 Wi-Fi 的优势之一。事实上，早期 FWA 进入者将他们的设备吹捧为“标准化前的 5G”，而实际上他们使用的是频移 802.11ac：有了 802.11ax，使用 Wi-Fi 芯片的可能性会更大。人们希望 802.11ax 对远程室外工作的改进将刺激 Wi-Fi 更多地进入这一市场和其他新市场。

向后兼容性、部署注意事项和升级策略

Wi-Fi 有着近乎完美的向后兼容能力。由于每个数据包前导码中的传统训练字段，即使是 15 年前的 802.11g 设备也能够解码 802.11ax 帧。虽然 802.11n 标准包括一个可选的“greenfield”模式，但它从未在商用设备中实施过，从那时起就没有“greenfield”选项。

即使是由于双信标和其他特殊帧而与旧设备不兼容的远距离室外功能，也可以通过共同使用“传统”接入点信标来实现兼容。

这允许在将 802.11n 或 802.11ac WLAN 升级到 802.11x 时采用不同的策略。有些人可能喜欢在黑白相间的拓扑中散布新的接入点，而另一些人可能更愿意一次升级整个楼层或建筑物的每个角落。两者都可行。

802.11ax 接入点持续吞吐量的增加也可能会促使上联链路升级。虽然许多接入点支持双 1 Gbps 以太网连接，但从长远来看，向 2.5 和 5 Gbps 以太网的转移似乎很有吸引力。

强制和可选功能

表 5：802.11ax 主要功能：强制和可选

接入点		客户端	
强制	可选	强制	可选
下行链路 OFDMA 发送		下行链路 OFDMA 接收	
上行链路 OFDMA 接收		上行链路 OFDMA 发送	
下行链路 MU-MIMO 发送（如果 4+ SS）	下行链路 MU-MIMO 发送（如果 < 4 SS）	下行链路 MU-MIMO 接收（最多 4 个 SS）	
发送波束成形（如果 4+ SS）		接收波束成形	
SU MIMO 发送和接收，最多 2 个 SS	SU MIMO，带 3+ SS	SU MIMO 发送和接收	
如果支持 5 GHz，则工作频宽为 20、40、80 MHz		如果支持 5 GHz，则工作频宽为 20、40、80 MHz	
如果支持 2.4 GHz，则工作频宽为 20 MHz		如果支持 2.4 GHz，则工作频宽为 20 MHz	
宽带 OFDMA 的 20 MHz-only 工作模式			单个 TWT
单个 TWT			
BSS 着色	空间再利用	BSS 着色	空间再利用
发送和接收工作模式		发送和接收工作模式	
	MCS 8、9、10、11（256 和 1024-QAM）		
	工作频宽 160 MHz（如果支持 5 GHz）		

802.11ax Wave 1 和 Wave 2

已经确定 802.11ax 将按照 Wave 1 和 Wave 2 推出，但各种功能的精确分割尚未冻结。这是撰写本文时（2018 年初）的观点。

表 6：802.11ax Wave 1 和 Wave 2 功能

Wave 1	Wave 2
下行链路和上行链路 OFDMA	上行链路多用户 MIMO
下行链路 MU-MIMO	
目标等待时间（TWT）	
BSS 着色	空间再利用
20 MHz-only	
	远距离 802.11 ax

在本文中，我们将 Wave 2 功能移到附录中，因为它们可能要等到 2020 年才能真正落地。

Wi-Fi 联盟对 802.11ax 的认证

截至 2018 年初，Wi-Fi 联盟计划根据“Wi-Fi CERTIFIED AX”认证，认证四种不同类型的设备（这些计划可能会有变化，认证预计将于 2019 年下半年推出）。

- **Wave 1 接入点：** 这将是熟悉的部署在住宅或企业环境中的接入点。
- **Wave 1 客户端设备：** 智能手机、PC 和其他消费和企业设备中的常见客户端。

- **移动接入点：**802.11ac 的认证包括一个特殊选项，适用于包含接入点功能的低功耗小型设备，802.11ax 继续包含该类别。它主要适用于功能和性能可能受到限制的电池供电移动接入点。移动接入点不需要“Agile Multiband”认证，并且 OFDMA 和 MIMO 的许多要求都有所放宽，允许移动接入点成为数据速率最高可达 MCS5 的单流设备。移动接入点可以是仅限 2.4 GHz 或双频段，但如果是双频段，它们必须支持 20、40 和 80 MHz 信道。

- **20 MHz-only 客户端设备：**这一类别打开了 IoT 传感器市场的大门。同样，标准客户端设备必须具备的许多功能成为可选功能，允许设备更加简单、电池寿命更长，但功能更少。

性能估计

802.11ax 没有非常明显地提高峰值数据速率，总体聚合性能的提升才是最重要的目标。为此，我们将在下一节对当前 Wi-Fi 性能面临的挑战进行一些解释，并预测性能将如何提高。

大量客户端

网络（BSS）容量与客户端数量的关系

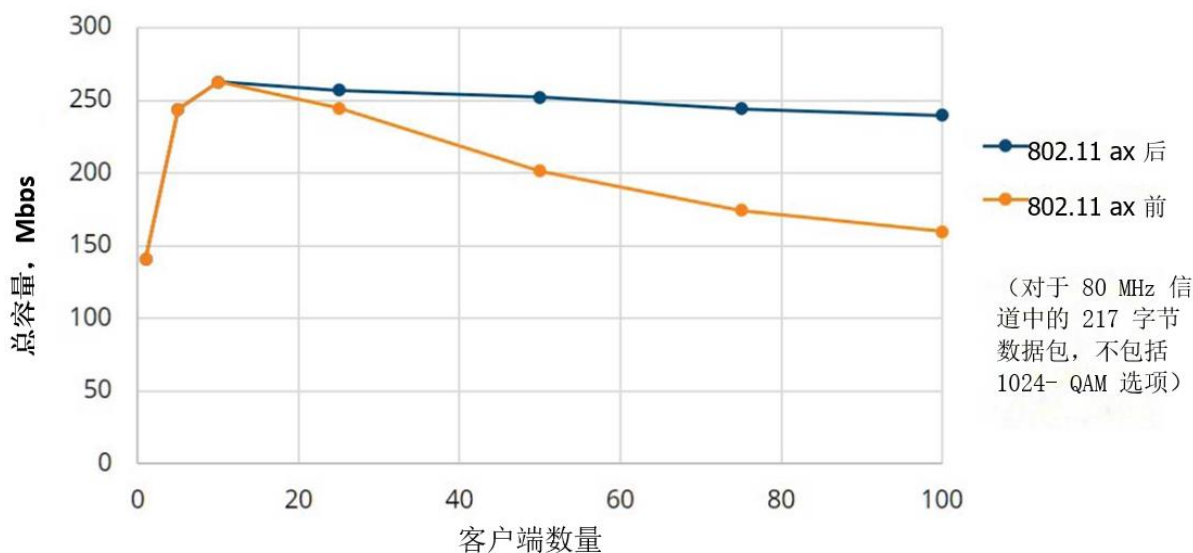


图 32：网络 (BSS) 容量与客户端数量的关系

众所周知，接入点的总数据吞吐量随着客户端设备数量的增加而下降。这一点可以使用资源争用开销来解释：随着争用传输机会的客户端数量的增加，平均等待时间也增加，用于数据传输的空口时间减少。

上图显示了刚开始网络容量持续增加，因为当客户端数量较低时，它们无法填满可用带宽。一旦超过这个阈值，当有 100 个客户端时，网络容量会下降多达 40%，而且趋势还会继续。Aruba 预测模型显示采用 802.11ax 之后会有显著的改善。（此图和后续图是针对 2x SS 测量的）。

短数据包

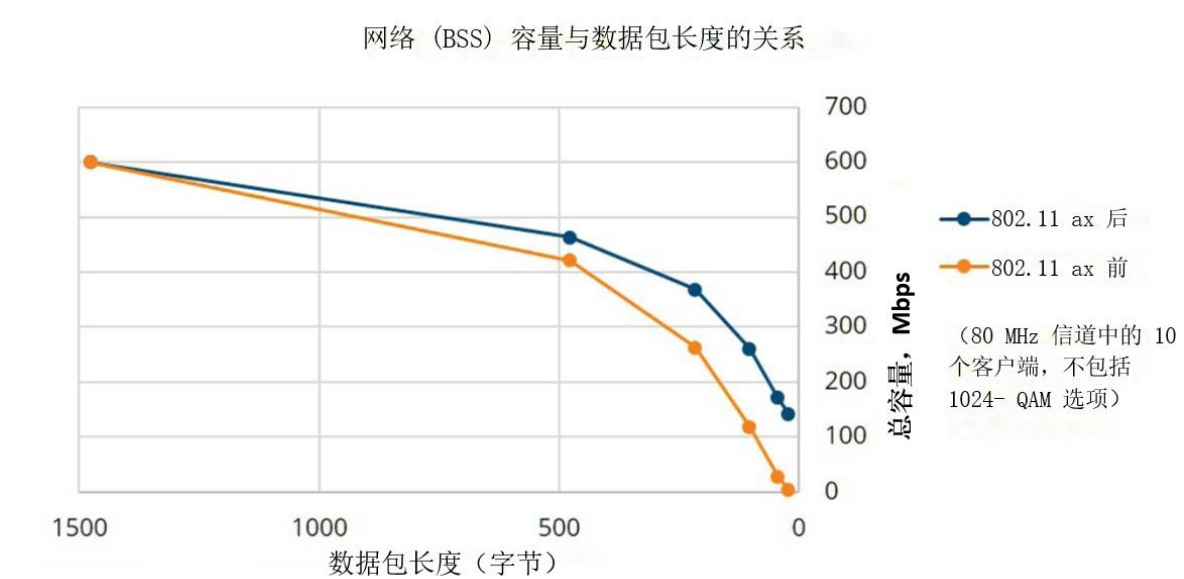
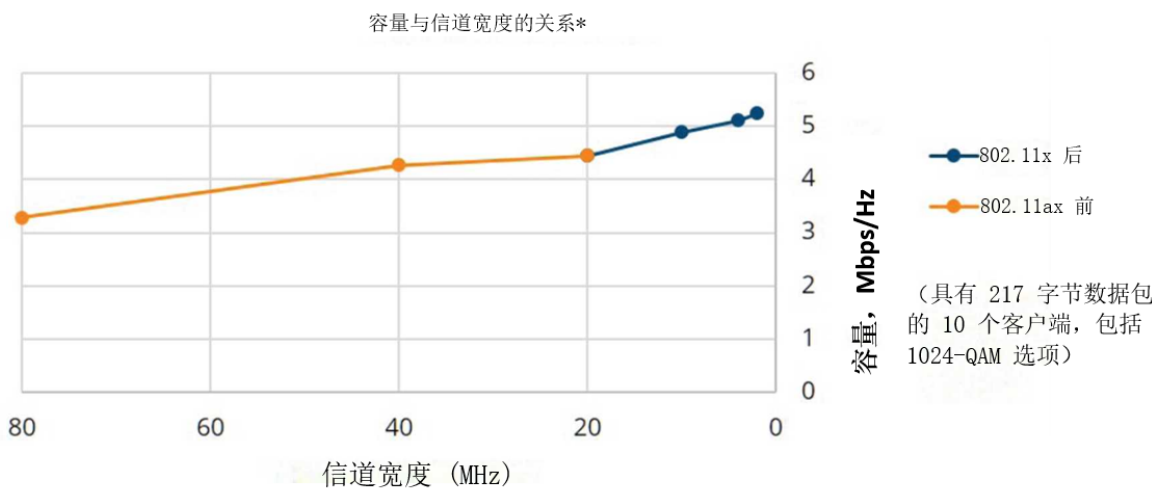


图 33: 网络 (BSS) 容量与数据包长度的关系

随着数据包长度的减少, 每个数据包的前导和争用开销字节保持不变。这增加了开销比例并降低了总体接入点容量。

802.11ax 包括许多措施来改善小数据包容量的减少: 上图显示了 Aruba 模型的结果。

窄信道 (OFDMA)



* OFDMA 不是完全相同的技术效果 - 模型和图表用于说明

图 34: 容量与信道宽度的关系

人们普遍认为，为了获得最高的总吞吐量，对于一个在小范围内存在许多接入点和客户端的密集网络，应该采用尽可能多的 20 MHz 信道而不是少数 40 或 80 MHz 信道。

这一方面是因为同信道干扰问题（在 802.11ax 中通过 BSS 着色来改善），另一方面也是因为这样可以减少每个接入点的客户端设备数量并使空口开销最小化。OFDMA 可被视为这一趋势的延续，我们期望它通过多种机制为系统级数据容量的提高做出贡献。

上图在技术上并不一致 - OFDMA 提供的增加的容量与小信道趋势并不完全相同，它只是用来说明 OFDMA 对网络容量的影响。

MIMO 和多用户效应

从不同的天线和设备同时发送数据或向不同的天线和设备发送数据带来的容量增加是非常巨大的。首先在 802.11n 中引入的单用户 MIMO，在 802.11ac Wave 2 中扩展到下行链路 MU-MIMO，在 802.11ax 中再次扩展到双向 OFDMA。

模拟表明，MU-MIMO 对于大数据包和高信噪比环境最为有效，而 OFDMA 在整个客户端密度和数据包大小分布范围内有效。

节能和电池寿命

模拟预测，TWT 的使用，特别是结合 20 Mhz-only 和 OFDMA 后，将延长电池寿命。一些估计表明，Wi-Fi 传感器的电池寿命可能接近蓝牙低能量 (BLE)，尽管这在芯片被装运，设备被制造和测试之前还只是猜测。

802.11 多年来的频谱效率，bps/Hz

随着最近人们对将 LTE 和 5G 应用到非授权频谱中越来越感兴趣，频谱效率（每赫兹频谱可实现的数据速率）这一主题重新引起了人们的讨论。

Wi-Fi 在频谱效率方面有非常好的表现，尽管如下图所示，这个数字在很大程度上取决于 MIMO 效应。

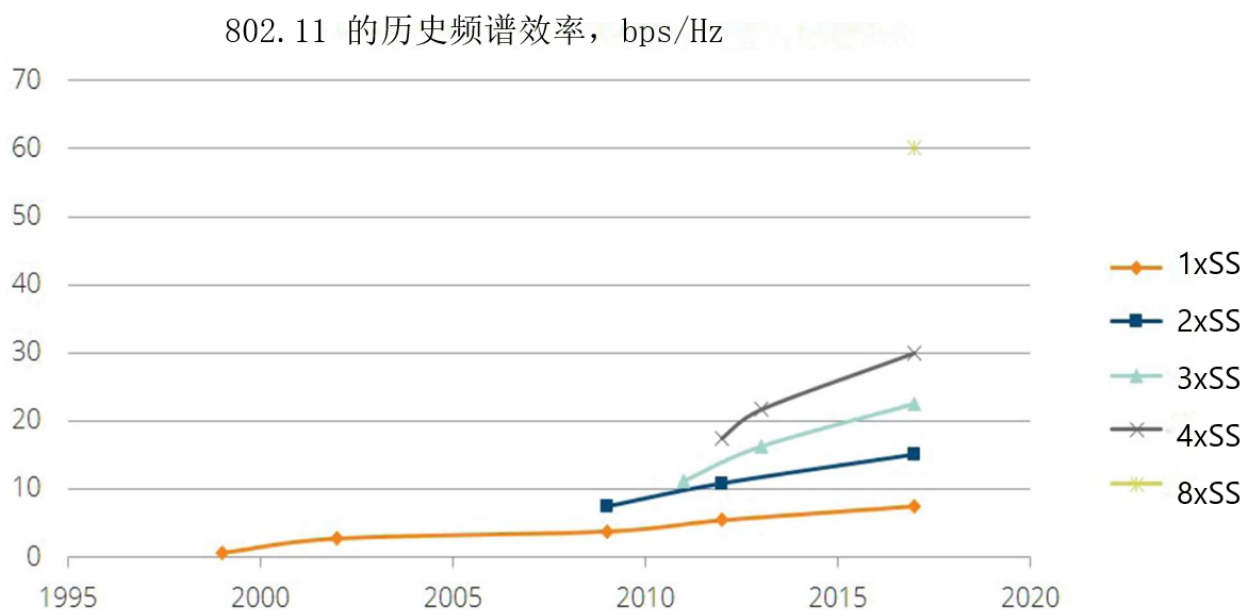


图 35：802.11 的历史频谱效率，bps/Hz

信道化

自 802.11ac 引入以来，大多数国家和地区的可用射频信道没有太大变化：在美国，联邦通信委员会 (FCC) 于 2014 年宣布了一些变化，现在允许使用 5150-5250 MHz 频段进行室外部署，并取消了使用 5600-5650 MHz 频段的临时禁令，但须通过修改后的 DFS 测试。

但是，着眼于未来，Wi-Fi 行业正在发起一些游说，让 Wi-Fi 可以使用更多的非授权频谱。

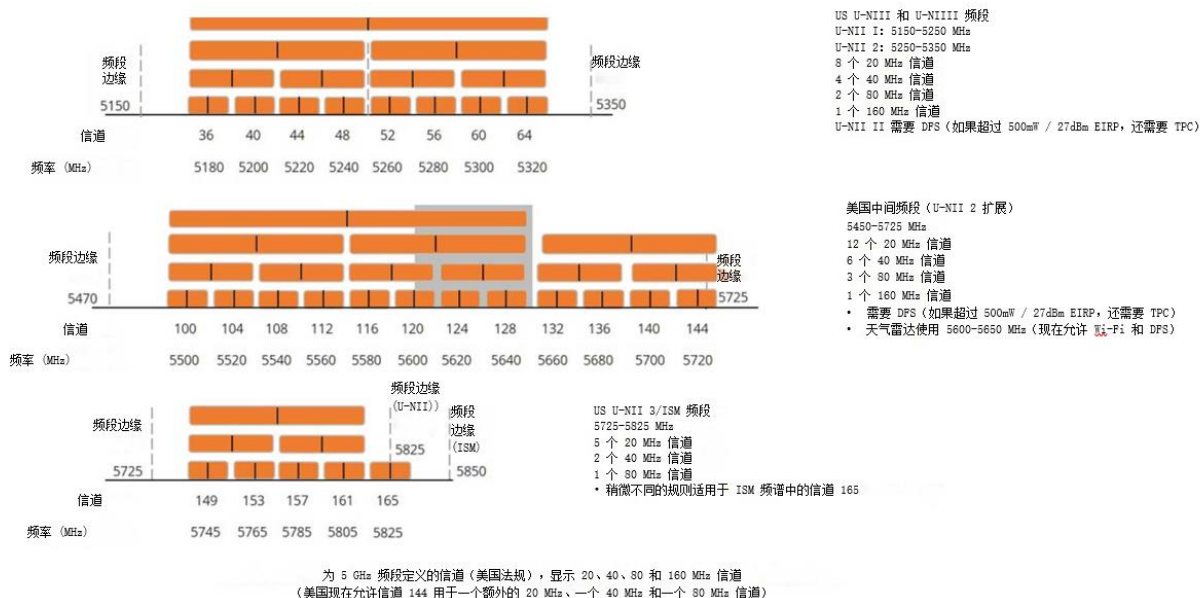


图 36: 适用于 802.11ax 的 5 GHz 信道 (美国)

结论

未来几年 Wi-Fi 拥有非常远大的前景，但也存在很大的不确定性。802.11ax 是 Wi-Fi 行业对这些机遇和挑战的回应，引领我们度过从 2019 年到 2024 年的未来五年以及迎接下一次 802.11 修正。

Wi-Fi 芯片以每年 30 亿个的发货量，安装基数已经达到 80 亿个。每部智能手机和 PC 都配有 Wi-Fi 芯片，每一个宽带家庭互联网都有 Wi-Fi 连接，这项技术发起于室外点对点链路，并进入了汽车行业和互联工厂。

但是，和每一个成功的行业一样，Wi-Fi 正在寻求更快的增长。一些应用场合正在开放，但为了满足它们的需要，必须进行改革。

众所周知，物联网 (IoT) 将在未来几年发展成为一个巨大的市场。但是 IoT 通常需要电池供电、延伸数百米的无线连接和成本非常低的小尺寸芯片。

Wi-Fi 对这个市场的第一次尝试是“扩展范围 ah”（基于 IEEE 802.11ah）。这是一个全面的标准，但已经停滞了几年：由于多种原因，芯片制造商没有生产“ah”芯片。因此，Wi-Fi 面临错过大部分 IoT 市场的风险。802.11ax 中的几项功能使其对 IoT 更具吸引力，但 Wi-Fi 是否会在这个市场赢得巨大的市场份额仍有待观察。

与此同时，监管改革正在取得进展。作为一个具体的例子，美国联邦通信委员会发起的“公民宽带无线电服务” (CBRS) 倡议提供了一个轻量许可的频段，它曾经希望私人组织可以很容易地购买一个使用 3.5 GHz 频段的半独家许可证。人们围绕着 CBRS 已经开展了很多活动，由于规则仍然不是最终的，所以有些不确定性。尽管如此，公共和专用 LTE 和 5G 服务似乎将使用该频段，而 Wi-Fi 没有相关的产品计划，并放弃了这项计划。

其他更广泛的变化正在频谱和监管方面展开。在移动运营商争夺地盘、寻求更多 5G 频谱的过程中，政府和军方、卫星用户、雷达和其他方面正在推迟频谱共享提议，Wi-Fi 受到游说预算有限和两个频段（2.4 和 5 GHz）的困扰，这两个频段的频谱跨度相对较大，但越来越拥挤。事实上，Wi-Fi 面临的威胁之一是越来越多的人认为，由于过度使用，2.4 GHz 频段在高层建筑和城市中心已经是“垃圾频段”。该行业并不是消极的：2017-2019 年间，一项强有力的游说努力试图开放 6 GHz 范围内的频段，这些努力得到了监管机构的同情。但是所有这些线索的结果都是不确定的：为了确保 Wi-Fi 持续成功，针对所需频谱的竞赛还没有结束。

5G 愿景 - 强大、激进、有说服力和全面 - 笼罩着 Wi-Fi 的所有中短期计划。凭借其在 LTE 领域的优势，移动运营商寻求利用 5G 突破消费电话市场，进入当今 Wi-Fi 主导的许多市场，包括家庭宽带、联网汽车、工厂和城市以及企业网络。在许多方面，802.11ax 是 Wi-Fi 对 5G 愿景的回应，但是，由于 Wi-Fi 和移动运营商生态系统之间的差异，它更加狭窄、也不够详细。Wi-Fi 公司面临着一种短期看法，即 5G 是他们正在零星解决的许多问题的综合答案。

尽管存在这些挑战，但 Wi-Fi 仍然可以乐观地面对未来。在 20 年的时间里，它从无到有，变成了一个家喻户晓的名字，一种无处不在的技术。802.11ax 中包含的功能，在支持 Wi-Fi 的公司之间进行了大量辩论之后，不仅是为了在“最佳情况”下实现更快的标称数据速率，也是为了应对现实世界中的实际问题，而这些问题往往得益于 Wi-Fi 的巨大成功。

BSS 着色、多用户调度和向后兼容性等功能将极大地提高拥挤区域的性能，在拥挤区域，许多不协调的 Wi-Fi 接入点和客户端设备工作在非常接近的距离。

在接入点处于共同管理之下的地方，例如体育场、机场、演讲厅和会议中心，这些新功能提供了更强的控制能力，在用户群中实现了更高的网络容量和更均匀的性能。

OFDMA 是传输短数据包的客户端以及 IoT 传感器等低带宽设备的理想选择，这些设备也将受益于包括 TWT 在内的新节能特性。这些功能以及 20 MHz-only 功能应该会刺激专为这一市场定制的极低功耗芯片的产生。

室外点对点 and 点对多点无线网络是一个经常被忽视的 Wi-Fi 设备市场，扩展的传输范围和更高的抗干扰能力将推动这一市场的发展。事实上，针对农村社区家庭宽带服务的新一轮固定无线接入网络（以 5G 为目标）的早期竞争者，正在优先使用 Wi-Fi 芯片，而不是 4G 或 5G，因为它们具有优越的价格和性能。

结果会怎样？与手机世界相比，Wi-Fi 生态系统在协调性和管理性方面远远落后，但已经显示出它能够以意想不到的方式组合功能并解决新问题。802.11ax 中的功能为目前在 Wi-Fi 技术领域拥有丰富专业知识的公司提供了进军新兴市场 and 应对新机遇的工具。最有可能的结果是历史会重演，Wi-Fi 将在未来的变化中继续发展。

附录（现有功能和新的 802.11AX 功能推迟到 Wave 2）

附录 802.11ac 延续到 802.11ax 的 MIMO 功能

802.11ac 中用于 MIMO 和波束成形的所有功能都将延续到 802.11ax：为了完整起见，下面将对它们进行解释。802.11ax 在 Wave 1 中实施下行链路 MU-MIMO（具有新的控制结构），在 Wave 2 中实施上行链路 MU-MIMO。

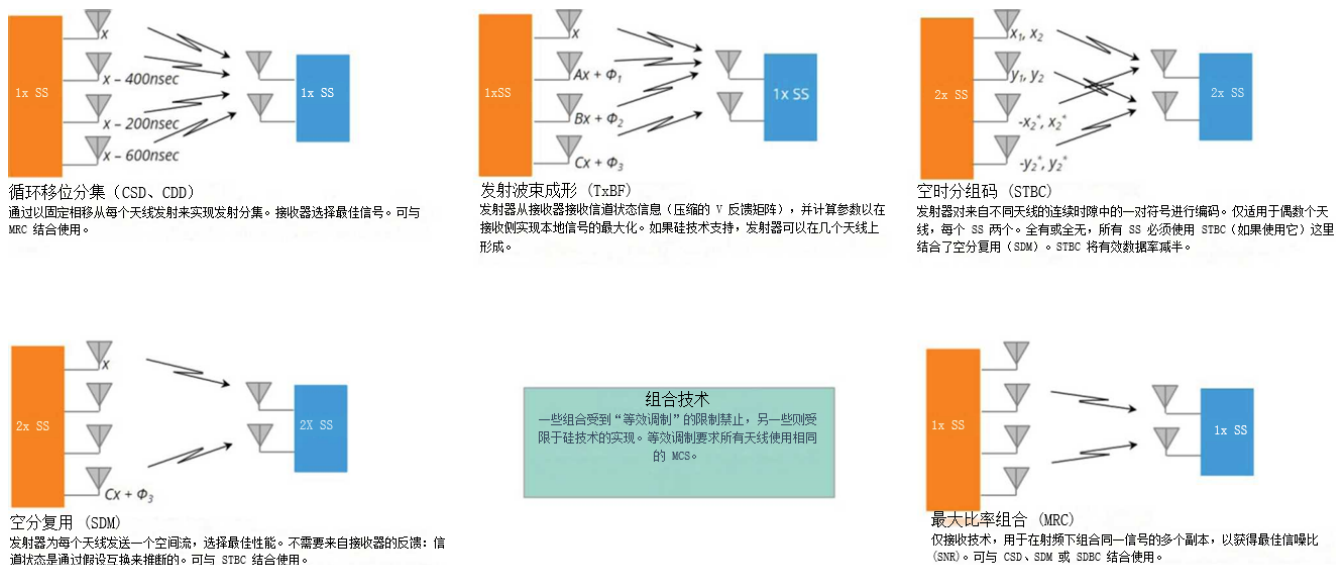


图 37: SU MIMO 技术、多天线客户端

802.11ax 中的波束成形使用从客户端设备到接入点的显式反馈来计算最佳的传输信号权重。这与 802.11ac 没有变化。



波束成形的隐式反馈 (802.11n, 而不是 802.11ac/ax)

- 1 (波束成形器) 向我发送探测帧
- 2 (波束成形接收器) 这是我听到探测帧
- 3 好，我会假设你听到我，就像我听到你一样来进行预编码

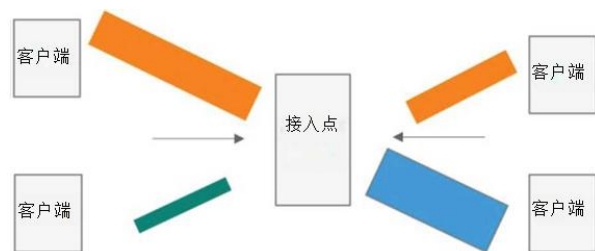
波束成形的显式反馈 (802.11n 和 802.11ac/ax)

- 1 (波束成形器) 这是我探测帧
- 2 (波束成形接收器) 这是我听到探测帧的方式
- 3 现在我将预编码以匹配你听到我的方式

图 38: 波束成形反馈

附录 802.11ax Wave 2 功能 — 上行链路 MU-MIMO

上行链路 MU-MIMO 不需要探测和天线加权，这一点比下行链路 MU-MIMO 更简单。



4 个客户端，3 个组

接入点可以在其接收天线上分离橙色、绿色和蓝色



2 个客户端，2 个组（双流客户端）

接入点可以在其接收天线上分离橙色、绿色

图 39: Uplink multi-user MIMO transmission

上行链路 MU-MIMO 中最困难的任务是当来自不同客户端的波形到达接入点的天线时，对它们进行同步。

当识别出此类用户组时，接入点会考虑它们的信号和流量等因素，然后指导它们恰当地进行同时传输。

这一功能在上行链路方向上使用与 OFDMA 相同的控制机制，但是由于其复杂性，被推迟到 Wave 2。

附录 802.11ax Wave 2 功能 — 结合 MU-MIMO 和 OFDMA

如上所述，MU-MIMO 和 OFDMA 在单个数据包中的组合虽然在理论上非常可能，但在实践中会非常复杂，因此被推迟到 Wave 2。

附录 802.11ax Wave 2 功能 — 空间重用

从一开始，Wi-Fi 就使用了一种叫做 CSMA/CA 的媒体接入协议，包括接入点在内的所有设备在有数据包要传输

时都会对空口进行检测。如果它们检测到能量超过某个功率阈值，或者有 Wi-Fi 帧在传输，它们会推迟自己的数据传输，并在稍后使用退避算法进行传输，以确保传输前无线信道是空闲的。CSMA/CA 协议在 Wi-Fi 方面非常成功。它是分布式的，这意味着每个设备独立地做出传输决定，这允许不同的、不协同的基本服务集（BSS 或蜂窝，每个 BSS 或蜂窝都有一个接入点）相互重叠。

正是由于 CSMA/CA，Wi-Fi 接入点可以彼此相邻设立，而无需协调信道或其他配置，并且每个接入点都可以支持与其客户端成功通信。Wi-Fi 非常擅长“共享”空间，不需要像蜂窝网络那样对蜂窝逐个进行管理。但是，当许多不协调的 BSS 在空间上相互重叠时，例如在城市中心或公寓楼中，从网络容量方面来看，CSMA/CA 的机制相当低效。

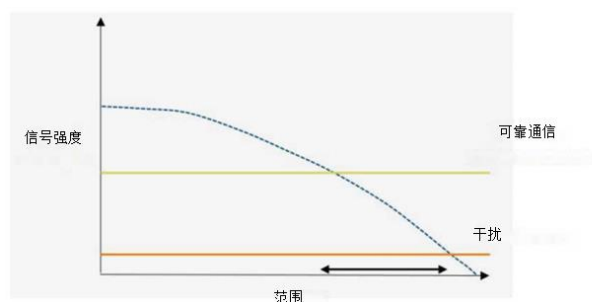
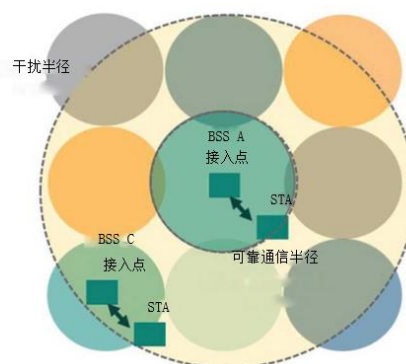


图 40: BSS 着色：同信道干扰

原因是无线信号并非我们想象的那样可以用圆圈或六边形被整齐地限制，而是会传播到很远的地方。如果接入点和客户端设备在 BSS 半径范围内进行可靠通信使用的传输功率足够强，它们的信号在“小区”边缘仍然很高，并传播到相邻小区，然后随着距离的延伸而衰减。在接入点被统一管理的企业网络中，射频信道规划试图把相同的频率分开，以便同一信道上的接入点相隔很远的距离，并且不会相互干扰。但是



随着 80MHz 信道（采用 802.11ac）的广泛使用，甚至 5 GHz 频段也只支持少数不重叠的信道。因此，即使在企业网络中，工作在同一信道上的相邻接入点有时也是不可避免的，并且当接入点不协调时，相邻信道或同信道干扰可能是常见现象。在此类情况下，即使存在两个或多个接入点和许多客户端设备，一次也只能有一个接入点或设备进行传输，因为 CSMA/CA 会导致所有其他接入点或设备推迟其数据传输。

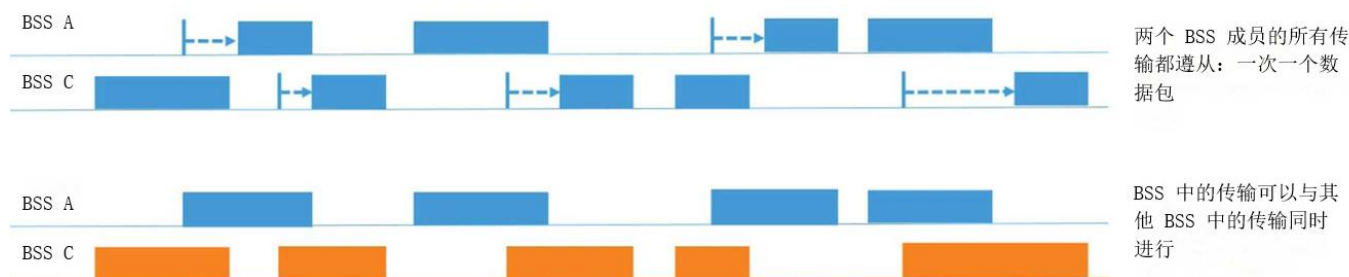


图 41: BSS 着色：之前和之后

BSS 着色通过区分“相同 BSS”和“远方 BSS”传输，并应用不同的 CSMA/CA 功率阈值来发挥作用。这允许客户端在不同蜂窝中同时传输，除了两个功率阈值之外，每个客户端设备都保持两个网络分配向量 (NAV)，这两个向量告诉它介质将被占用多长时间。

请注意，虽然在 802.11ax 传输中使用“BSS 颜色”标签的选项是标准的一部分，但是为接入点配置适当“颜色”的算法和机制留给设备供应商决定。随着 802.11ax 的推出，我们可能会看到一系列自动和半自动配置功能。

这种改变的积极效果有时候可能不那么明显：在某些情况下，由于信号-噪声和干扰比 (SINR) 的降低，同步传输可能会导致一个或两个帧在接收器一侧接收失败，但由于 802.11 重传机制可以对错误进行修复，根据模拟预测，在现实世界的 Wi-Fi 部署 BSS 着色会显著提高容量。

附录 802.11ax Wave 2 功能 — 室外和远距离工作

802.11ax 包括许多对室外和远距离工作有用的功能，主要针对点对点链路。主要创新是单用户扩展范围帧。



图 42：单用户扩展范围帧

为了更好地抵抗信号衰落和干扰，该帧在前导码中包括重复的 HE-SIG-A 字段。基于类似的原因，指定只使用一个空间流和低数据速率。

在远距离工作时，较长的循环前缀选项（1.6 和 3.2 微秒）可用于此帧，以对抗长延迟多径效应。

扩展范围的其他措施包括：

- 为数据包（106-RU 子信道）使用 10 MHz 带宽的选项

- 双信标，一个重复的信标（因为它不能被主流设备读取，这必须伴随一个传统的信标）
- 双子载波调制 (DCM)，把相同的信号在两个子载波上复制。这是 802.11ax 中的新功能。

所有这些技术很可能会被推迟到 Wave 2。

附录一 缩写

3GPP	第三代合作伙伴项目
AC	接入类别
ADI	关联标识符
A-MSDU	聚合 MAC 服务数据单元
A-MPDU	聚合协议服务数据单元
接入点	接入点
BAR	Block-Ack 请求
BCC	二进制卷积编码
BQRP	带宽查询报告轮询
BRP	波束成形报告轮询
BSRP	缓冲区状态报告轮询
CP	循环前缀
CSI	信道状态信息
CSMA/CA	具有冲突避免的载波监听多路访问
CTS	清除以发送
DCM	双子载波调制
DFS	动态频率选择
DL	下行链路
EIRP	等效全向辐射功率

ER	扩展距离
FCC	联邦通信委员会
FDD	频分双工
FFT	快速傅立叶变换
GCR	带重试的群播
GI	保护间隔
HE	高效率
HT	高吞吐量
HEW	高效率无线
LTF	长训练字段
MIMO	多输入多输出
NDP	空数据包
OFDM	正交频分复用
OFDMA	正交频分多址接入
L-	传统
LDPC	低密度奇偶校验
MAC	媒体访问控制
MCS	调制和编码方案
MU	多用户

NAV	网络分配向量	TDM	时分复用
NDP	空数据包	TDMA	时分多址接入
NDPA	空数据包通知	UL	上行链路
PE	数据包扩展	VHT	非常高吞吐量
PLCP	物理层汇聚协议	Wi-Fi	不是缩写
PPDU	PLCP 协议数据单元	WISP	无线互联网服务提供商
RF	无线电频率		
RSSI	接收信号强度指示		
RTS	请求发送		
RU	资源单元		
SINR	信号干扰噪声比		
SNR	信噪比		
STA	工作站		
STF	短训练字段		
STS	空时流		
STBC	空时分组编码		
SU	单用户		
TCP/IP	传输控制协议/互联网协议		
TDD	时分双工		

附录一 参考

- IEEE “15/0132r15 TGax 规范框架”，2016 年 5 月
- IEEE “P802.11ax™/D2.0 信息技术标准草案”，2017 年 11 月
- Wi-Fi 联盟 “Wi-Fi ax 互操作性测试市场需求文档”，版本 1.1，2017 年 11 月（不公开）
- Wi-Fi 联盟 “批准的 ax 产品互操作性测试市场需求文档，附录草案：ax 功能描述”，版本 1.4，2017 年（不公开）