

第 1-6 代 Wi-Fi 协议的发展史

引言

本文将介绍历代 Wi-Fi 协议，按照顺序依次为 802.11a/b/g/n/ac/ax，本文旨在对几代 Wi-Fi 协议能有一个粗略的认识，并不涉及过深的专业知识，同时文章本身不短，请各位读者耐心阅读。

小编注：802.11 系列协议应用非常广泛，协议本身也非常复杂庞大，本文只涉及上述的 6 种协议和 802.11ad 协议共计 7 种。

什么是 Wi-Fi？

既然是讲 Wi-Fi 协议，那么首先讲的必然就应该是 Wi-Fi 了。Wi-Fi 其实说白了就是一种让包括电脑手机平板在内的电子设备能够连接到一个无线网络的技术。但很多人都不知道的是，Wi-Fi 本身是一个品牌或者说是商标，由 Wi-Fi 联盟所持有。Wi-Fi 联盟的前身是 1999 年成立的无线以太网兼容性联盟 WECA(Wireless Ethernet Compatibility Alliance)。而 Wi-Fi 联盟一直在使用的这个 802.11 系列的无线通信协议标准，是由 IEEE 下属的 802.11 工作组所制定的。

下面进入正文。

802.11——过于平庸的一代

二战之后，世界科技进入迅猛发展时期，人们对于无线通讯的需要开始爆发性地增长，IEEE 在 20 世纪 90 年代初成立了专门的 802.11 工作组，专门研究和定制 WLAN（无线局域网）的标准协议，并在 1997 年 6 月推出了第一代 WLAN 协议——IEEE 802.11-1997。

小编注：此处的 802.11 指的是 IEEE 制订的第一代协议，并非是整个系列协议，在 802.11 之后的协议都加入了字母后缀来进行区分。

作为 IEEE 最初制定的一个无线局域网标准，802.11 协议定义了物理层工作在 ISM 的 2.4G 频段，数据传输速率设计为 2Mbps。很遗憾的是，由于它在传输速度和传输距离上的表现都不尽如人意，因此并未被大规模使用。

802.11a——生不逢时的一代

1999 年，IEEE 吸取了上一次的教训，这一次就直接下了猛药。在制定 802.11a 标准的时候，直接将频段定在了 5GHz（频率越高最高传输速度越快），物理层的最高速率也随之水涨船高到了 54Mbps。相比前一代来说，不可谓不给力。但是，802.11a 协议也并没有被市场认可，相对来说表现的更出色的反而是几乎和它同时制订的 802.11b 协议。

尽管 2003 世界无线电通信会议让 802.11a 在全球的应用变得更容易，不同的国家还是有不同的规定支持。美国和日本甚至都已经出现了相关规定对 802.11a 进行了认可，但是在其他地区，如欧盟却因为标准的问题被禁止使用。再加上 802.11a 产品中 5GHz 的组件研制成功太慢，等其开始大规模推广的时候，市场早已被大批的 802.11b 产品占领，802.11a 没有被广泛的采用。再加上 802.11a 的一些弱点，和一些地方的规定限制，使得它的使用范围更窄了。

802.11b——奠定基础的一代

802.11b 协议可以说是 802.11a 的同胞兄弟了。但它本身却是基于 2.4GHz 频率，同时最大的传输速度相比 802.11a 来说也只有 11Mbps。11Mbps 的传输速率在现在看来肯定算不了什么，但在 2000 年的时候，虽然不是翘楚，但也已经能够满足大部分人的需求了。更何况基于 2.4GHz 的 802.11b 在传输距离和穿墙能力上本来就比基于 5GHz 的 802.11a 协议要有优势（高频率波传输距离和穿墙能力较低频率波差），加上当时 802.11a 的核心芯片研发进度缓慢，802.11b 就此抓住了机会，占领了市场，为日后称霸天下打下了坚实的基础。

802.11g——融合前人的一代

时间来到了 2003 年 7 月，IEEE 制订了第三代 Wi-Fi 标准：802.11g。（为什么不是 C 呢？因为 802.11 协议还应用在其他很多领域，有些字母被用了，就只能排到 g 了）

802.11g 继承了 802.11b 的 2.4GHz 频段和 802.11a 的最高 54Mbps 传输速率。同时，它还使用了 CCK 技术后向兼容 802.11b 产品。此时开始，IEEE 在制订每一代新协议的时候都会将后向兼容考虑进去，毕竟换了新路由器旧手机就因为不支持新协议而连不上 Wi-Fi 这种情况谁都受不了。

说到这里，就还要再提一下在 802.11a 和 802.11g 上都有使用到的一种技术：OFDM。

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 即正交频分复用技术，是由 MCM (Multi-Carrier Modulation, 多载波调制) 发展而来的一种实现复杂度低、应用最广的一种多载波传输方案。OFDM 主要思想是：将信道分成若干正交子信道，将高速数据信号转换成并行的低速子数据流，调制到在每个子信道上进行传输。正交信号可以通过在接收端采用相关技术来分开，这样可以减少子信道之间的相互干扰 (ISI)。每个子信道上的信号带宽小于信道的相关带宽，因此每个子信道上可以看成平坦性衰落，从而可以消除码间串扰，而且由于每个子信道的带宽仅仅是原信道带宽的一小部分，信道均衡变得相对容易。

上面这段很难理解？没关系，看小编打个比喻你们就懂了。

假设我们现在有很多车要从 A 地到 B 地，没有使用 OFDM 技术之前，路是一条路，所有的车四处乱开，横冲直撞，结果谁都快不了。现在使用了 OFDM 技术，将一条大路划分为很多个车道，大家都按照车道驾驶，这样既可以提高速度，又能减少车与车之间的干扰。同时这条道的车多了，就匀一点到那条车少的道上去，管理上也方便很多。

OFDM 技术也因此被应用在之后的每一代 Wi-Fi 协议中。

802.11n——初露锋芒的一代

如果说 802.11b 是奠定了整个帝国的基础的一代，那么 802.11n 一定是给帝国开疆扩土的一代。

时间继续推进，这时的互联网已经开始出现了在线图片、视频、流媒体等服务，而随着 YouTube、无线家庭媒体网关、企业 VoIP Over WLAN 等应用对 WLAN 技术

提出了越来越高的带宽要求，传统技术 802.11a/g 已经无法支撑。用户需求呼唤着全新一代 WLAN 接入技术。

2009 年，IEEE 宣布了新的 802.11n 标准。传输速率最高可达 600Mbps。

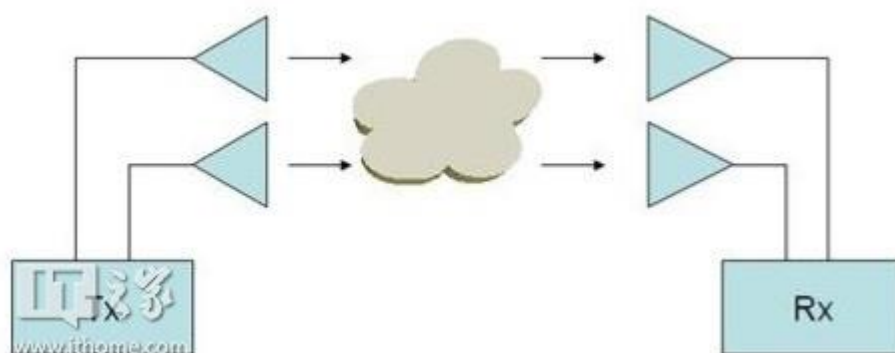
但是，802.11n 协议还是基于 2.4GHz 频段，速度怎么突然就快了这么多呢？正所谓事出反常必有妖，而这背后的“妖”，就是 MIMO、波束成形和 40MHz 绑定。

MIMO

MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 的中文名称为多输入多输出技术，是指在发射端和接收端分别使用多个发射天线和接收天线，使信号通过发射端与接收端的多个天线传送和接收，从而改善通信质量。

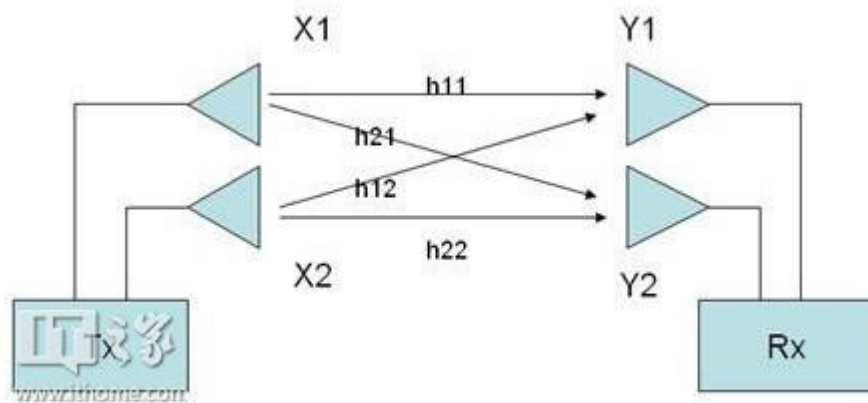
MIMO 技术最早是由马可尼于 1908 年提出的，它利用发射端的多个天线各自独立发送信号，同时在接收端用多个天线接收并恢复原信息，就可以实现以更小的代价达到更高的用户速率。MIMO 可大大提高网络传输速率、覆盖范围和性能。当基于 MIMO 而同时传递多条独立空间流时，系统的吞吐量可成倍地提高。

简单来说，MIMO 技术就是在信号的发射源和接收源都安装了多个天线，通过堆天线的方式来实现更高的传输速率，因此现在的买路由器看天线数量这一个说话虽然不可靠，但也不是没有历史渊源的。



▲通过 MIMO 传递多条空间流（图片来自网络）

MIMO 系统支持空间流的数量取决于发送天线和接收天线的最小值。如发送天线数量为 3, 而接收天线数量为 2, 则支持的空间流为 2。MIMO/SDM 系统一般用“发射天线数量 $\times$ 接收天线数量”表示。如上图 2*2 MIMO/SDM 系统。显然, 增加天线可以提高 MIMO 支持的空间流数。但是综合成本、实效等多方面因素, 当时业界的 WLAN AP 都普遍采用 3 $\times$ 3 的模式。而现在的旗舰级路由器都轻松的堆到 8 $\times$ 8 或者更高。



▲ 图为 MIMO 利用多径传输数据（图片来自网络）

波束成形

而至于波束成形技术, 它本身并不是什么新名词, 波束成形是天线技术与数字信号处理技术的结合, 目的用于定向信号传输或接收。在 20 世纪 60 年代, 波束成形技术就已经在军事应用上得到了相当高的重视。

只不过, 由于早年半导体技术还处在微米级, 所以它没有在民用通信中发挥到理想的状态。

而发展到无线通讯阶段, 特别是应用在消费级产品中, 信号传输距离和信道质量以及无线通信的抗干扰问题便成为瓶颈。提高传输速率是 WLAN 技术发展历程的关键。802.11n 主要是结合物理层和 MAC 层的优化, 来充分提高 WLAN 技术的吞吐。此时, 波束成形才有了用武之地。

波束成形技术的具体原理很复杂, 小编在这里用图片给大家简单展示一下, 波束成形就是将原本发散的波聚合, 再往指定的方向发送, 从而提高传输距离。



▲波束成形技术增加传输距离的示意图（图片来自网络）

但是波束成形技术固然能改善系统性能，增加接收距离，但同时也会增加设备成本和功耗。在多天线都处于连接的状态下，即使在严重的衰落情况下，它提供的信号增益也可获提高，但要求信号处理能力也要很强。所以，多天线带来的问题是要求数据处理速度高，控制成本，并降低功耗。

40Mhz 绑定

事实上，802.11n 协议还使用了 40Mhz 绑定技术。这个技术最容易理解，对于无线技术来说，提高所用频谱的宽度，可以最为直接地提高吞吐。就好比是马路变宽了，车辆的通行能力自然提高。传统 802.11a/g 使用的频宽是 20MHz，而 802.11n 支持将相邻两个频宽绑定为 40MHz 来使用，所以可以最直接地提高吞吐。



▲图左为 802.11a/g，图右为 802.11n

MCS

802.11n 引进了如此多的新技术，导致它的速率也会因为配置方法不同而不同。在 802.11a/b/g 时代，配置 AP 工作的速率非常简单，只要指定特定 radio 类型（802.11a/b/g）所使用的速率集，速率范围从 1Mbps 到 54Mbps，一共有 12 种可能的物理速率。到了 802.11n 时代，由于物理速率依赖于调制方法、编码率、空间流数量、是否 40MHz 绑定等多个因素。这些影响吞吐的因素组合在一起，将产生非常多的物理速率供选择使用。

对此，IEEE 直接推出了 MCS (Modulation Coding Scheme)，MCS 可以理解为将上述影响速率因素的完整组合，每种组合用整数来唯一标示。给每种情况标码，然后直接看对应的 MCS 码就可以知道准确的速率。

802.11n 小结

总的来说，MIMO 和 40MHz 绑定技术使得传输速率大大提升，而波束成形则增大了传输距离。

802.11ac——锋芒毕露的一代



随着时代的继续发展，人们身边拥有着越来越多的无线设备，而 2.4GHz 这个频段，因为本身的优越性，被各种协议使用（常见的蓝牙 4.0 系列协议，无线键鼠等），已经变得拥挤不堪，IEEE 此时就将新的第五代 Wi-Fi 协议制订在了 5GHz 的频段上。现在说的很多双频 Wi-Fi，其实就是 2.4GHz 和 5GHz 的混合双频 Wi-Fi，而这种路由器常见的四天线设计，一般都是两根天线基于 2.4GHz，两根基于 5GHz。

802.11ac 在提供良好的后向兼容性的同时,把每个通道的工作频宽将由 802.11n 的 40MHz,提升到 80MHz 甚至是 160MHz,再加上大约 10%的实际频率调制效率提升,最终理论传输速度将由 802.11n 最高的 600Mbps 跃升至 1Gbps。当然,实际传输率可能在 300Mbps~400Mbps 之间,接近目前 802.11n 实际传输率的 3 倍(目前 802.11n 无线路由器的实际传输率为 75Mbps~150Mbps 之间),完全足以在一条信道上同时传输多路压缩视频流。

MU-MIMO

实际上,802.11ac 协议还分为 wave1 和 wave2 两个阶段,两者的主要区别就在于后者提升多用户数据并发处理能力和网络效率。而这背后的功臣,就非 MU-MIMO 莫属了。

前面已经跟大家介绍过了,IEEE 在 802.11n 协议时代就引入了 MIMO 技术,而 MU-MIMO 技术可以理解为它的升级版或者是多用户版本。

为什么这么说呢?看下面的图片大家就明白了。

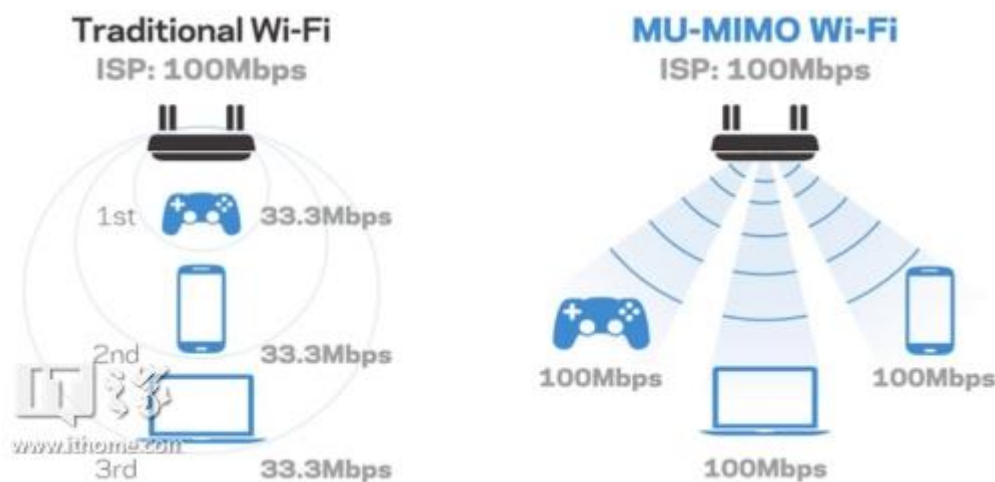


▲高通官方展示 MU-MIMO 技术所用的图片

MU-MIMO 是 Multi-User Multiple-Input Multiple-Output (多用户-多输入多输出)的英文缩写。顾名思义, MU-MIMO 能让路由器同时和多个设备进行沟通,这极大的改善了网络资源利用率。

通俗来说,以前在 802.11n 上面的 MIMO 只能说是 SU-MIMO (Single-User),传统的 SU-MIMO 路由器信号呈现一个圆环,以路由器圆心,呈 360 度向外发射信号,并依据远近亲疏,依次单独与上网设备进行通讯。当接入的设备过多时,就

会出现设备等待通讯的情况，网络卡顿的情况就由此产生；更为严重的是，这种依次单独的通讯，是基于设备对 AP（路由器或热点等）总频宽的平均值。也就是说，如果拥有 100MHz 的频宽，按照“一次只能服务一个”的原理，在有 3 个设备同时接入网络的情况下，每个设备只能得到约 33.3MHz 频宽，另外的 66.6MHz 则处于闲置状态。即在同一个 Wi-Fi 区域内，连接设备越多宽频被平均得越小，浪费的资源越多，网速也就越慢。



▲图为 SU-MIMO（左）和 MU-MIMO（右）的对比

MU-MIMO 路由器则不同，MU-MIMO 路由的信号在时域、频域、空域三个维度上分成三部分，就像是同时发出三个不同的信号，能够同时与三部设备协同工作；尤其值得一提的是，由于三个信号互不干扰，因此每台设备得到的频宽资源并没有打折扣，资源得到最大化的利用，从路由器角度衡量，数据传输速率提高了 3 倍，改善了网络资源利用率，从而确保 Wi-Fi 无间断连接。

MU-MIMO 技术就赋予了路由器并行处理的能力，让它能够同时为多台设备传输数据，极大地改善了网络拥堵的情况。在今天这种无线联网设备数量爆发式增长的时代，它是比单纯提高速率更有实际意义的。

这里放一张到 ac 为止各代协议的主要参数对比图（图片来自网络）：

标准号	IEEE 802.11b	IEEE 802.11a	IEEE 802.11g	IEEE 802.11n	IEEE802.11ac
标准发布时间	1999年9月	1999年9月	2003年6月	2009年9月	2012年11月
工作频率范围	2.4-2.4835GHz	5.150—5.350GHz 5.475—5.725GHz 5.725—5.850GHz	2.4—2.4835GHz	2.4—2.4835GHz 5.150—5.850GHz	5GHz
非重叠信道数	3	24	3	15	
最大传输速率	11Mbps	54Mbps	54Mbps	600Mbps	单通道1Gbps
频宽	20MHz	20MHz	20MHz	20MHz/40MHz	40MHz/80MHz/160MHz (可选)
调制方式	with home@G/DSSS	OFDM	CCK/DSSS/OFDM	BPSK/QPSK/16-64QAM	BPSK/QPSK/16-256QAM
兼容性	802.11b	802.11a	802.11b/g	802.11a/b/g/n	802.11a/g/n

802.11ad——先天不足的一代

在确定第六代的 Wi-Fi 协议标准的时候，有一段时间，大家都认为会是 802.11ad 协议，说这个名字大家可以不太熟悉，它另一个名字叫 WiGig。



相比我们熟知的 802.11n（工作在 2.4GHz 和 5GHz 频段）和 802.11ac（工作在 5GHz 频段），802.11ad 则是工作在 60GHz 频段，且无线传输速率可高达 7Gbps！当然，802.11ac 标准也可以通过堆 BUFF（8x8 MIMO、256 QAM 调制和信道绑定 4 个 40 MHz 信道）达到 7Gbps 的理论无线传输速率；但是，11ad 达到 7Gbps 的速度，仅需通过一个空间流、64QAM 调制和单个信道即可实现。此外，802.11ad 还在容量、功耗和延迟方面有着 11ac 无法比拟的优势，特别是在延迟方面，其延迟通常仅有 10 微秒，堪比有线！

但可惜，802.11ad 协议有着它的先天不足——60GHz，这么高的频率注定它的传输距离和穿墙能力弱到不堪一击，而在一些知名评测媒体的评测中，人们惊人地发现只需要一个纸皮箱就能隔绝 802.11ad 协议路由器的信号。真是可谓成也萧何，败也萧何。

802.11ax——肩负使命的一代



802.11ax 协议基于 2.4GHz 和 5GHz 两个频段，对，就是两个频段，并非是 ac 双频路由器那样不同的频段对应不同的协议，ax 协议本身就支持两个频段。这显然迎合了当下物联网、智能家居等发展潮流。对于一些对带宽需要不高的智能家居设备，可以使用 2.4GHz 频段去连接，保证足够的传输距离，而对于需要高速传输的设备，就使用 5GHz 频段。这看起来和现在的 ac 双频路由器是一样的，但实际上，ax 作为第六代 Wi-Fi 协议的扛把子，可不只这两把刷子。

802.11ac 与 802.11ax 主要参数对比		
	802.11ac	802.11ax
频段	5GHz	2.4GHz+5GHz
通道频宽	20MHz, 40 MHz, 80 MHz, 80+80 MHz, 160 MHz	20 MHz, 40 MHz, 80 MHz, 80+80 MHz, 160 MHz
FFT 大小	64、128、256、512	256、512、1024、2048
子载波间隔	312.5kHz	78.125kHz
理论速率	433Mbps (80MHz 1SS) 6933 Mbps (160MHz 8SS)	600.4Mbps (80MHz 1SS) 9607.8 Mbps (160MHz 8SS)

802.11ax 又被称为“高效率无线标准”（High-Efficiency Wireless, HEW），将大幅度提升用户密集环境中的每位用户的平均传输率，即在高密环境下为更多用户提供一致且稳定的数据流（平均传输率），将有效减少网络拥塞、大幅提升无线速度与覆盖范围。其实，设计 802.11ax 的首要目的是解决网络容量问题，因为随着公共 Wi-Fi 的普及，网络容量问题已成为机场、体育赛事和校园等密集环境中的一个大问题。

此处要介绍两个新技术，上行 MU-MIMO 和 OFDMA。

上行 MU-MIMO

MU-MIMO 技术在前面已经提到过, 802.11ac 协议中的 MU-MIMO 技术只是单纯的下行 MU-MIMO, 只有在路由器给设备传输数据的时候才可以用, 而如今随着智能设备的发展, 人们对于上行速率的要求也在提高, 传个超清视频图片什么的已经是家常便饭了。上行 MU-MIMO 技术就是为此而生, 改善了设备在向路由器传输数据时的拥堵情况, 提高了网络资源利用率。

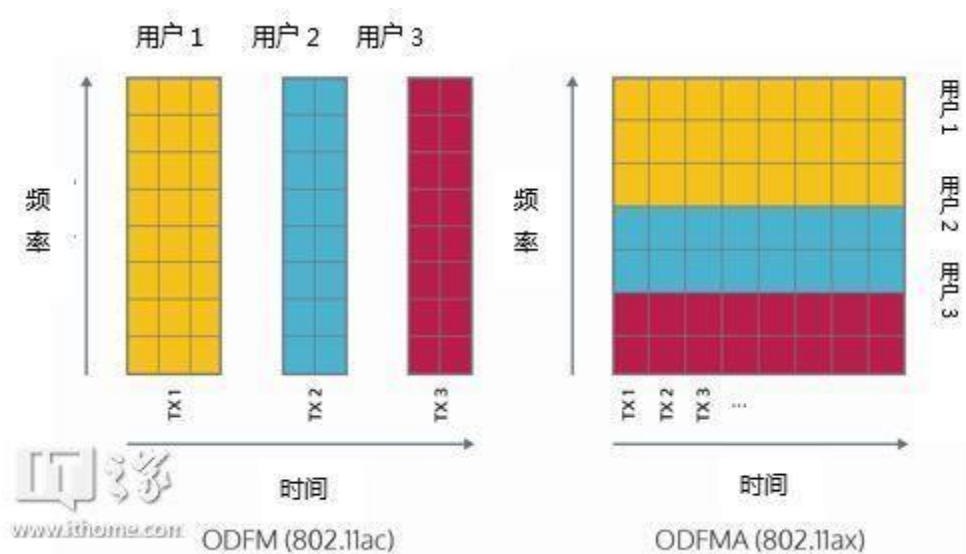
OFDMA

802.11ax 与以前的无线局域网 (WLAN) 系统相比最大的变化在于其是采用了“正交频分多址接入” (orthogonal frequency division multiple access, OFDMA)。

在 OFDM 系统中, 用户占用了整个信道。随着用户数量的增多, 用户之间的数据请求会发生冲突, 从而造成瓶颈, 导致当这些用户在请求数据 (特别是在流式视频等高带宽应用中) 时, 服务质量较差。

而在 OFDMA 中, 用户仅在规定时间内占用子载波的一个子集。OFDMA 要求所有用户同时传输, 因此每个用户都需要将其数据包缓冲为相同的规定比特数, 这样无论数据量有多少所有用户都能在时间上保持一致。此外, OFDMA AP 可根据用户对带宽的需求来动态地改变用户所占用频谱的数量。例如, 相比较对实时性能要求不高的电子邮件, 流媒体视频用户需要更多子载波 (频谱)。

不理解的话我们看下图:



▲用户在 OFDM 中占据整个信道，而在“正交频分多址接入”（OFDMA）中不是

我们还是用回马路开车的例子，假设现在有一条马路有三条车道，现在有甲乙丙三个车队要走这条路（每队都要走一个小时，走前需要半个小时准备），如果按照一次走一个车队的方法，甲乙丙依次走完需要四个半小时，而使用 OFDMA 技术，给他们一队一条道，则只需要三个半小时，省下了一个小时的准备时间。OFDM 和 OFDMA 在用户数量少的时候差距可能不大，但是一旦用户数量多了起来，差距可就不是一星半点了。

OFDMA 一路走来，其实就是“从无到有，再从有到善用”的演变历程。

802.11ax 小结

实际上，802.11ax 给 WLAN 连接带来的提升远不止此，其他的如更低的延迟、更精确的功耗控制等等也是不可忽略的一环。现在市面上使用 802.11ax 协议的产品并不是很多，只是零星的几款，但是好在它的太子身份已经确定，登基只是早晚的问题。而按照目前的进度来看，小编预计 2019 年 802.11ax 的产品就能实现不错的普及率。