



中国联通 Wi-Fi6 技术白皮书

中国联合网络通信有限公司

中兴通讯股份有限公司

2020 年 3 月

目录

1	引言	3
2	Wi-Fi 发展历程	4
3	Wi-Fi6 关键技术	5
	3.1 OFDMA	6
	3.2 MU-MIMO	7
	3.3 1024QAM	8
	3.4 BSS-Coloring 技术	9
	3.5 TWT 技术	10
4	Wi-Fi6 与 5G	10
	4.1 应用场景	10
	4.2 技术指标	11
5	Wi-Fi6 应用场景	12
	5.1 智慧家庭应用	12
	5.1.1 4K/8K/VR 等大带宽视频的承载	12
	5.1.2 网络游戏等低时延业务的承载	13
	5.1.3 智慧家庭智能互联	13
	5.2 行业应用	14
6	Wi-Fi6 技术评测	16
	6.1 多场景测试	17
	6.1.1 近距离最佳吞吐	17
	6.1.2 远距离吞吐	18
	6.1.3 穿墙吞吐	18
	6.1.4 距离 vs 吞吐性能对比	19
	6.1.5 干扰环境下距离 vs 吞吐性能对比	19
	6.2 Wi-Fi6 核心技术测试	20
	6.2.1 MU-MIMO	20
	6.2.2 OFDMA	21
7	2020 年将是 Wi-Fi6 大规模发展的元年	22
	7.1 技术标准逐渐成熟	22
	7.2 Wi-Fi6 产业链发展	22
	7.3 Wi-Fi6 占有市场指日可待	24

1 引言

Wi-Fi 技术自诞生以来以其便捷有效的特性使人们摆脱了有线连接的束缚，迅速成为了用户上网的首选方式。在过去的二十年中，Wi-Fi 使数十亿人能够轻松连接到互联网，享受在线视频、游戏、教育等丰富的媒体资源，彻底改变了人们获取信息的方式，更好的与外界沟通互联。

近些年，随着无线技术以及智能家居的快速发展，越来越多的设备需要加入家庭无线网络，除了智能手机和笔记本电脑之外，新型设备如无线音箱、监控摄像头、恒温器、冰箱以及无数其他智能家电和机器都加入了家庭无线网络中。以传统 Wi-Fi 标准（802.11a / b / g / n / ac）运行的现有无线基础设施不足以应对连接的增加和带宽需求的提高，因此，急需引入新一代 Wi-Fi 技术，Wi-Fi6 就此应运而生。

Wi-Fi6 具有更高的传输速率、更大的并发、更低的时延。这种特性使得其应用场景更加丰富，既满足智慧家庭 4K、VR、网络游戏、智能家居互联等业务的高效承载，也适用于行业应用中高密办公、生产无线、智慧教学、智慧传媒以及城市和企业的数字化等。Wi-Fi6 技术，将为室内无线网络带来一次革新，彻底改变物联网和智能家居的实现方式，给人们带来前所未有的网络体验。

2 Wi-Fi 发展历程

Wi-Fi (Wireless Fidelity) 是一种允许电子设备连接到一个无线局域网 (WLAN) 的技术, 从 1997 年第一代 Wi-Fi 技术产生, 至今已有 20 多年的历史。随着人们对网络传输速率的要求不断提升, Wi-Fi 技术截止目前进行了 6 代的革新发展。

1997 年 IEEE 制定出第一个无线局域网标准 802.11, 数据传输速率仅有 2Mbps, 但这个标准的诞生改变了用户的接入方式, 使人们从线缆的束缚中解脱出来。

1999 年 IEEE 发布了 802.11b 标准。802.11b 运行在 2.4 GHz 频段, 传输速率为 11Mbit/s, 是原始标准的 5 倍。

1999 年, IEEE 又补充发布了 802.11a 标准, 采用了与原始标准相同的核心协议, 工作频率为 5GHz, 最大原始数据传输率 54Mbit/s, 达到了现实网络中等吞吐量(20Mbit/s)的要求。

2003 年, IEEE 发布 802.11g, 其载波的频率为 2.4GHz(跟 802.11b 相同), 原始传送速度为 54Mbit/s, 净传输速度约为 24.7Mbit/s(跟 802.11a 相同)。

2009 年, IEEE 发布 802.11n, 同时工作在 2.4 GHz 和 5 GHz 频段, 重大改进, 引入了 MIMO、安全加密等新概念和基于 MIMO 的一些高级功能传输速度达到 600Mbit/s。

2013 年, IEEE 发布 802.11ac, 工作频率为 5GHz, 引入了更宽的射频带宽(提升至 160MHz)和更高级的调制技术(256-QAM), 传输速度高达 1.73Gbps, 进一步提升 Wi-Fi 网络吞吐量。

2019 年, IEEE 发布 802.11ax, 同时工作在 2.4 GHz 和 5 GHz 频段, 引入上行 MU-MIMO、OFDMA 频分复用、1024-QAM 高阶编码等技术, 将用户的平均吞吐量相比如今的 Wi-Fi 5 提高至少 4 倍, 并发用户数提升 3 倍以上。

Wi-Fi Alliance (WFA) 在 2019 年, 将“Wi-Fi+数字”的方式呈现的方式把 802.11ax 命名为 Wi-Fi6。并将前两代技术 802.11n 和 802.11ac 分别更名为 Wi-Fi 4 和 Wi-Fi 5。同时还更新了 Wi-Fi 的图标, 当我们在使用 Wi-Fi 时, 像手机上会变化的 3G 和 4G 信号标识一样, 可根据后面的数字来判断当前使用的技术标准和速率等级。

3 Wi-Fi6 关键技术

根据 WFA 的命名规则，IEEE 802.11ax 标准简称 Wi-Fi 6。与 Wi-Fi 5（802.11ac）相比，Wi-Fi 6 在很多技术指标上有着突破性的提升，具体表现在：最高 9.6Gbps 的传输速率、更高的并发能力、更低（10ms 以内）的业务时延、更大的覆盖范围、更低的终端功耗。

Wi-Fi6 为什么最高速率可达 9.6Gbps？根据空间速率的计算公式，空口速率 = 空间流数 * 子载波数 * 单子载波编码比特率 * 调制方式编码率 / 码元时间，可知影响 Wi-Fi 速率的四大因素：空间流、子载波数量、信号传输时间、编码方式。

表1. 支持 802.11ax 调制和编码

MCS index	Modulation type	Coding rate	Data rate(in Mb/s)							
			20MHz channels		40MHz channels		80MHz channels		160MHz channels	
			1600 ns GI	800 ns GI	1600 ns GI	800 ns GI	1600 ns GI	800 ns GI	1600 ns GI	800 ns GI
0	BPSK	1/2	8	8.6	16	17.2	34	36.0	68	72
1	QPSK	1/2	16	17.2	33	34.4	68	72.1	136	144
2	QPSK	3/4	24	25.8	49	51.6	102	108.1	204	216
3	16-QAM	1/2	33	34.4	65	68.8	136	144.1	272	282
4	16-QAM	3/4	49	51.6	98	103.2	204	216.2	408	432
5	64-QAM	2/3	65	68.8	130	137.6	272	288.2	544	576
6	64-QAM	3/4	73	77.4	146	154.9	306	324.4	613	649
7	64-QAM	5/6	81	86.0	163	172.1	340	360.3	681	721
8	256-QAM	3/4	98	103.2	195	206.5	408	432.4	817	865
9	256-QAM	5/6	108	114.7	217	229.4	453	480.4	907	961
10	1024-QAM	3/4	122	129.0	244	258.1	510	540.4	1021	1081
11	1024-QAM	5/6	135	143.4	271	286.8	567	600.5	1134	1201

表2. 802.11ax 子载波数目

RU大小	26	52	106	242 CBW20	484 CBW40	996 CBW80	2*996 CBW160	载波间隔(KHz)
数据子载波	24	48	102	234	468	980	1960	78.125
导频子载波	2	4	4	8	16	16	32	78.125
保护子载波	NA	NA	NA	14	28	28	56	78.125
子载波总数	NA	NA	NA	256	512	1024	2048	78.125

- 空间流数，即 MIMO 数，收发两端天线数相关，Wi-Fi 6 最大空间流数目为 8；
- 编码比特率和调制有关，比如 Wi-Fi 6 支持 1024-QAM， $1024 = 2^{10}$ ，即一个子载波可以携带 10bit；
- 子载波数和带宽以及子载波的间隔有关。11n 和 11ac 子载波间隔为 312.5KHz，11ax 中子载波间隔为 78.125kHz； Wi-Fi 6 支持 160MHz 频宽，子载波数目为 $160M/78.125K = 2048$ ，可以传输数据的子载波为 1960 个；
- 码元时间为一次频谱数据传输时间，为固定值，Wi-Fi 6 一次码元传输时间为 12.8us，短帧间隔 GI 为 0.8us，共计耗时 13.6us；

按照计算公式，Wi-Fi 6 8×8 160M MCS11 计算速率为： $8 \times 1960 \times 10\text{bit} \times (5/6) / (13.6\text{us}) = 9.6\text{Gbps}$ ，为最大

空口速率。

此外，Wi-Fi6 还引入了更高阶的频谱利用技术和频谱干扰优化等技术，从而可以提高网络容量、降低时延，提升用户体验感知。

3.1 OFDMA

在 802.11ac 时，数据传输采用 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)即正交频分复用技术。用户是通过不同时间片段区分出来的。每一个时间片段，一个用户完整占据所有的子载波，并且发送一个完整的数据包。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。

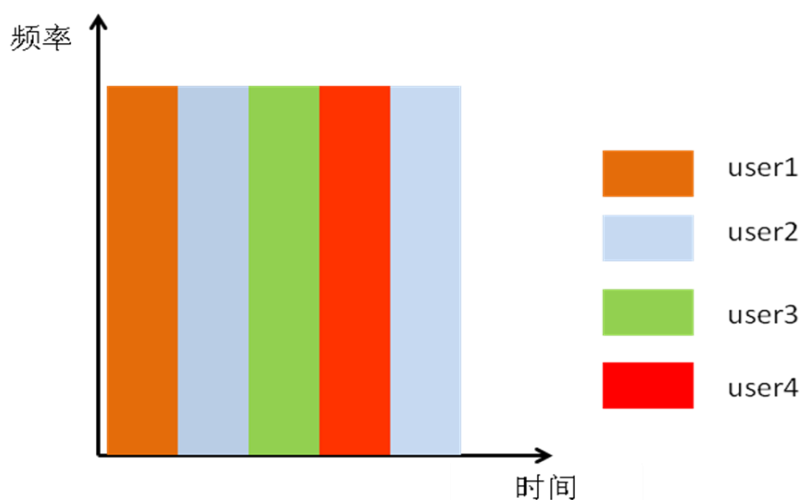


图1. OFDM 技术

OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) 正交频分多址，是将无线信道划分为多个子信道（子载波）形成一个个频率资源块，用户数据承载在每个资源块上，而不是占用整个信道，实现在每个时间段内多个用户同时并行传输。

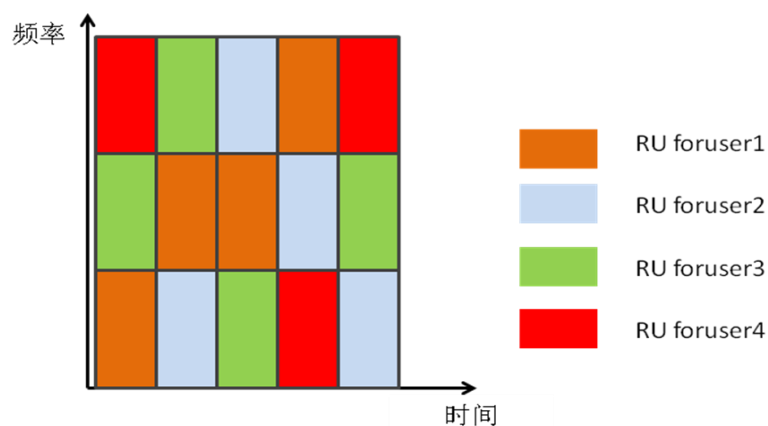


图2. OFDMA 技术

在 OFDMA 中，通过将把 Wi-Fi 信道划分为更小的专用子信道-RU（Resource Unit）资源单位，可以在多个 OFDMA 用户之间共享 802.11ax Wi-Fi 信道。RU 有多种类型，802.11ax 中最小 RU 尺寸为 2.031MHz，最小子载波带宽是 78.125KHz，因此最小 RU 类型为 26 子载波 RU。802.11ax 给出了不同大小 RU 所包含的子载波数量，包括有 26/ 52/ 106/ 242/ 484/ 996/ 2*996 等多种规格。

Wi-Fi 信道划分为 OFDMA 的多个 RU 的示例如下：

表3. 不同带宽下的 RU 数量

RU 类型	CBW 20M	CBW 40M	CBW 80M	CBW 160M
26 子载波	9	18	37	74
52 子载波	4	8	16	32
106 子载波	2	4	8	16
242 子载波	1	2	4	8
484 子载波	N/A	1	2	4
996 子载波	N/A	N/A	1	2
2x996 子载波	N/A	N/A	N/A	1

根据表 3，可知对于每 20MHz 带宽，最多可容纳 9 个 RU，此时最多同时接入 9 个用户。RU 越大，同时接入的用户数也越大。

20M 信道一共有 256 个子载波（子载波频宽 78.125KHz），实际 26-tone RU 总共只使用了 234（26*9）个，相差 22 个子载波，这些子载波是用来做保护间隔，其中包括 DC 保护（7 个）、空子载波（4 个）和保护子载波（5+6 个）。



图3.20M 带宽的 RU 数量

3.2 MU-MIMO

常规的 MIMO 可以称为 SU-MIMO，即“单用户多进多出”，其虽然可以通过多链路同时传输的方式，

提升路由器与客户端设备之间的网络通讯速率，但在同一时间和同一个频段内，路由器只能够与一个客户端设备通信。因此即便客户端设备不能完全占用路由器的无线带宽，那路由器也无法将剩余带宽分配给其它设备使用。

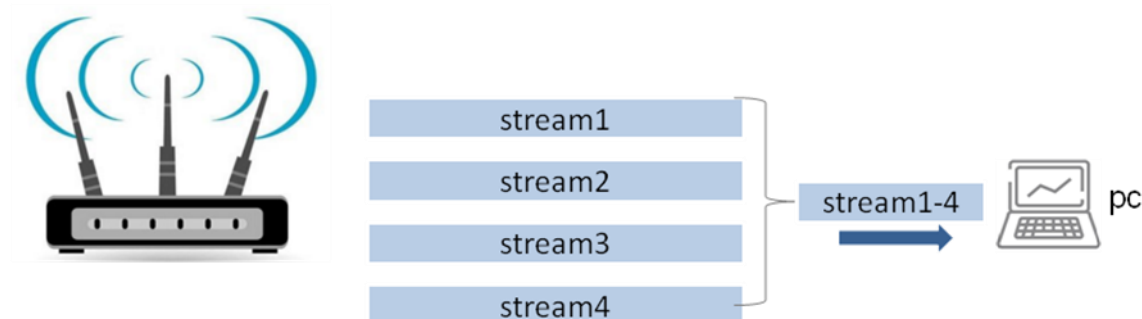


图4. SU-MIMO 技术

MU-MIMO (Multi-User Multiple-Input Multiple-Output) 多用户多入多出技术，即允许路由器同时与多个设备通信，而不是依次进行通信，提升了整个系统容量。MU-MIMO 使用信道的空间分集来在相同带宽上发送独立的数据流，所有用户都使用全部带宽，从而带来多路复用增益。

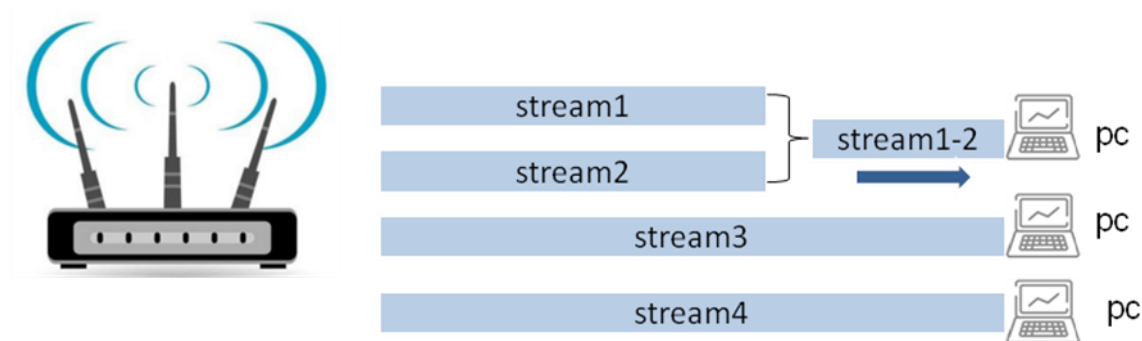


图5. MU-MIMO 技术

MU-MIMO 技术在 802.11ac Wave2 中已经有所应用，不过只应用在下行，最多同时支持 4 个用户同时传输。在 802.11ax 中，增加了下行 MU-MIMO 的数量，可以达到 8 个，支持 8 根天线，最多同时传输 8 个用户同时传输。

802.11ax 除了沿用 802.11ac 下行 MU-MIMO 技术之外，还新增了上行 MU-MIMO，通过发射机和接收机多天线技术使用相同的信道资源在多个空间流上同时传输多个用户的数据，最多支持 8 个用户同时上行传输数据。

3.3 1024QAM

正交振幅调制 QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 是二维点阵调制方式，调制即将数据信号“01”转换为无线电波。802.11ac 采用的 256-QAM 正交幅度调制，每个符号传输 8bit 数据 ($2^8=256$)，802.11ax 将采用 1024-QAM 正交幅度调制，每个符号位传输 10bit 数据 ($2^{10}=1024$)，从 8 到 10 的提升是

25%，也就是相对于 802.11ac 来说，802.11ax 的单条空间流数据吞吐量又提高了 25%。

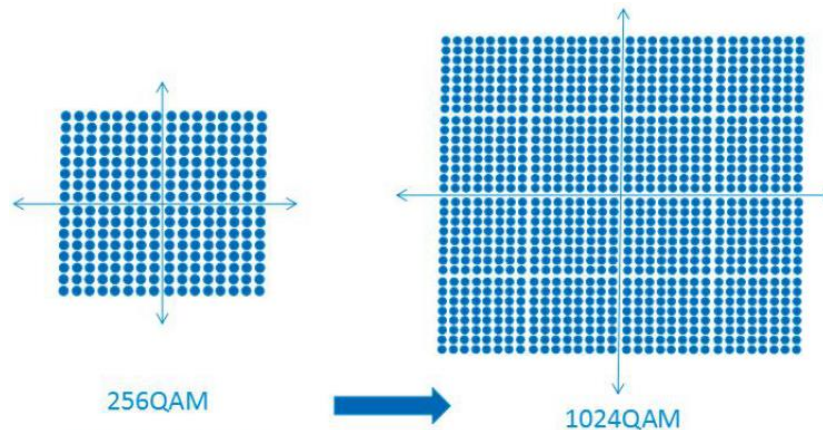


图6. 256-QAM 与 1024-QAM 的星座图对比

3.4 BSS-Coloring 技术

一直以来，Wi-Fi 采用 CSMA/CA（载波侦听多路访问 / 冲突避免）机制，即每次在传送数据之前，会监听无线信道上有无其他 AP 也在传送数据，如果有，先避让，等下个时间段再传送。这意味着多个 AP 工作于同一信道时，由于采用轮流单独通信的方式，会大幅降低网络容量。

802.11ax 中引入了一种新的同频传输识别机制，叫 BSS Coloring 着色机制，“BSS 着色”（Basic Service Set coloring）机制。为每个 AP “着色”，即在数据报头增加 6bit 的标识符区分不同 AP，这样一来，当路由器或设备在发送数据前侦听到信道已被占用时，会首先检查该“占用”的 BSS Coloring，确定是否是同一 AP 的网络。如果颜色相同，则认为是同一 BSS 内的干扰信号，发送将推迟；如果不是，则不用避让，从而允许多个 AP 在同一信道上运行，从而有效缓解多路由场景下同信道干扰退避的问题，提升频谱资源利用率。



图7. BSS-Coloring 技术

3.5 TWT 技术

目标唤醒时间 TWT (Target Wakeup Time) 是 802.11ax 引入的资源调度功能, 它允许设备协商他们什么时候和多久会被唤醒, 然后发送或接收数据。允许设备在 beacon 传输周期之外的其他周期唤醒。此外, Wi-Fi AP 可以将客户端设备分组到不同的 TWT 周期, 从而减少唤醒后同时竞争无线介质的设备数量。终端设备仅在收到自己的“唤醒”信息之后才进入工作状态, 而其余时间均处于休眠状态, 从而大大提高了电池寿命。

802.11ax AP 可以和 STA 协调目标唤醒时间(TWT)功能的使用, AP 和 STA 会互相交换信息, 当中将包含预计的活动持续时间, 以定义让 STA 访问介质的特定时间或一组时间。如此一来, STA 就可控制需要访问介质的客户端之间的竞争和重叠情况。802.11ax STA 可以使用 TWT 来降低能量损耗, 在自身的 TWT 来临之前进入睡眠状态。另外, AP 还可另外设定调度程序并将 TWT 值提供给 STA, 这样一来, 双方之间就不需要存在个别的 TWT 协议, 此操作称为“Beacon TWT 操作”。

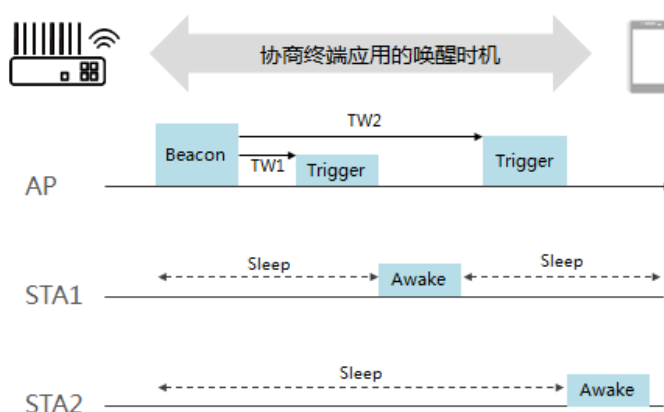


图8. TWT 技术

4 Wi-Fi6 与 5G

长期以来, Wi-Fi 与蜂窝网络彼此竞争且势均力敌, Wi-Fi 主要应用于室内, 蜂窝主要应用室外, Wi-Fi 以其流量便宜的特点, 一直是蜂窝网络室内覆盖的补充。目前两种技术已经分别发展到第五代和第六代, 技术已经成熟, 未来, 这两种技术在特定场景会存在互补替代, 但仍将长期共存。

4.1 应用场景

2G 时代主要承载语音业务, 早期 Wi-Fi 11a/b/g 主要承载数据业务, 在当时的应用场景下两者基本上是互补关系。从 3G 时代大量承载数据业务开始, 到 4G 时代移动互联网应用的蓬勃发展迎来移动数据量的爆发性增长。在人流密集的高铁站、体育场馆、商场、咖啡厅等场景 4G 和 Wi-Fi 11n/ac 出现了一定程度的竞争。随着 VoIP 技术的成熟, 许多场景下 Wi-Fi 也对语音业务进行了一定程度的渗透, 逐渐形成了

4G 和 Wi-Fi 5 两种技术既竞争又互补的应用格局。总体而言 4G 偏重移动性应用和广域网场景，而 Wi-Fi 5 则偏重高带宽和局域应用场景。

随着 5G 和 Wi-Fi6 技术的互相学习和互相追赶，预计未来两种技术的主战场不会发生变化，但是可能产生细分差异。除了传统移动性要求高场景以外，预计在偏重低干扰、高 QoS、高安全、低延时、海量连接的场景 5G 会受到青睐。而对于偏重大带宽、低移动性以及组网成本、业务资费比较敏感等应用场景，Wi-Fi6 则大有可为。

表4. 5G&Wi-Fi6 主要场景差异

场景关注点	5G	Wi-Fi6
频段干扰	授权频段干扰可控★	频段非授权干扰不可控
QoS	可靠物理层重传★	Mac 重传，尽力而为承载
安全性	自底层而上，各级都有★	依赖 MAC 以上层
大带宽	兼顾	有优势★
低延时	空口非竞争延时小★	空口竞争延时大
移动性	有优势★	较差
广覆盖	有优势★	较差
组网成本	较贵	有优势★

4.2 技术指标

5G 和 Wi-Fi6 的主要技术都是 OFDMA，甚至用户面编码上都采用了 LDPC。可以说两种技术越来越趋同，频谱利用率也非常接近。但是由于偏重的应用场景差异，一些细微的技术差异仍然存在。

Wi-Fi 的竞争接入一直是 Wi-Fi 的不足，直接导致空口延时巨大、多用户性能难以提高。Wi-Fi6 采用上行 OFDMA 和 MU-MIMO 等技术以后，提供多用户同时发送的能力。如果对标 5G，需要在时钟精度、时间精度上做提高。为了保证所有 STA 发送功率到达 AP 天线口大小差不多（底噪相同），需要闭环功控技术配合。

由于 Wi-Fi6 不需要高速移动，多普勒效应不明显，信道估计算法相对简单且相对 5G 可获得较好的 SINR，可以通过采用较高的 1024QAM 调制方式来提高下载速率。Wi-Fi6 覆盖范围较 5G 小，可以采用较短的 GI。而且由于 Wi-Fi 是上下行异步双工方式，可以在单位时间只做下行来获得较高的下载速率，因此直接比较最高下行速率略显优势，更短的 GI 也有助于提高下载速率。

表5. 5G&Wi-Fi6 主要技术指标差异

技术指标	5G	Wi-Fi6
工作频段	700MHz/2.6GHz/3.5GHz	2.4GHz/5.8GHz
系统最大下载速率	20Gbps@64T64R/100MHz	9.6Gbps@8T8R/160MHz
典型下载速率	850Mbps@2T2R/100MHz	950Mbps@2T2R/80MHz
时分复用方式	TDD 同步	TDD 异步
频分复用方式	OFDMA	OFDMA
编码方式	LDPC/Polar	LDPC
最大调制	256QAM	1024QAM
子载波间隔	30kHz/60kHz	312.5KHz/78.125KHz
典型符号长度	35.68us/17.84us	12.8us
典型 CP/GI	2.34us/1.17us	0.8us
MU-MIMO	Yes	Yes
接入网延时	0.5~5ms	10~50ms
最大覆盖范围	100km@50dBm/2.6G	100m@20dBm/2.4G
最大用户数	300~1000	32~256
典型远端成本	1000RMB@2T2R/24dBm	300RMB@2T2R/20dBm

5 Wi-Fi6 应用场景

5.1 智慧家庭应用

5.1.1 4K/8K/VR 等大带宽视频的承载

视频类业务驱动超宽带的发展，也逐渐改变用户的行为和需求，运营商也从关注连接转向关注体验。视频业务的码率的不断提高，从标清到高清，从 4K 到 8K，直至现在的 VR 视频。

从网络传输角度看，影响视频质量的关键因素包含带宽、时延、丢包，其中带宽直接影响视频的码率、分辨率、色深等，也就是图像的真实感，是用户体验的关键要素；丢包则直接影响画面的卡顿和流畅与否，也就是用户体验的愉悦感。

随着各类移动终端的普及，每个家庭预计均有几十部移动终端，从用户体验的角度看，用户更喜欢、更经常在移动终端上观看视频，特别对于 VR 类视频，无线接入是最佳的选择，摆脱了 VR 头盔的有线束缚，给用户带来极佳的体验愉悦感。

Wi-Fi6 技术支持 2.4G 和 5G 频段共存，其中 5G 频段支持 160MHz 频宽，速率最高可达到 9.6Gbps 的接入速率，且 5G 频段相对干扰较少，更适合传输视频业务，同时可以通过 BSS 着色技术、MIMO 技术、动态 CCA 等技术降低干扰，降低丢包率，以带来更好的视频业务体验。

表6. 不同视频标准指标对比

技术/分类	入门 4K	优质 4K	极致 4K	入门 8K	优质 8K	极致 8K	VR	VR+
分辨率	3840*2160	3840*2160	3840*2160	7680*4320	7680*4320	7680*4320	3840*2160	7680*4320
帧率	30P	60P	120P	30P	60P	120P	120P	120P
色深	8bit	10bit	12bit	8bit	10bit	12bit	12bit	12bit
压缩算法	H. 265	H. 265	H. 265	H. 265	H. 265	H. 265	H. 265	H. 265
平均码率	15M	30M	50M	60M	120M	200M	200M	800M
带宽需求	22. 5M	45M	75M	90M	180M	300M	300M	1200M
丢包率	1. 7E-4~1. 7E-5							

5.1.2 网络游戏等低时延业务的承载

网络游戏类业务属于强交互类业务，游戏要对用户的操作或动作做出及时反应，近年来兴起的 VR 游戏，甚至云 VR 游戏，均在带宽、时延等方面提出了更高的要求，如云 VR 游戏的带宽要求从 80Mbps-1Gbps，时延要小于 20ms-8ms、丢包率要小于 1E-5-1E-6。

对于 VR 游戏，目前最好的接入方式是 Wi-Fi 无线方式；因为目前家庭内部的移动终端数量繁多，业务种类不尽相同；Wi-Fi 受到干扰因素也非常多，这些综合起来会影响到游戏业务的体验，构建一个高速率、低时延、可靠的家庭无线网络，是提升用户游戏体验的不二选择。Wi-Fi6 不仅仅是速率的提升，而且采用 OFDMA、MU-MIMO 等技术，极大地提升了信道利用率，满足多用户场景下的业务应用，平衡家庭网络中多部移动终端之间的资源协调；通过 BSS 着色技术、MU-MIMO 技术、动态 CCA 等技术降低干扰，也可以采用 Wi-Fi6 的信道切片技术提供游戏的专属信道，降低时延，满足游戏类业务，特别是云 VR 游戏业务对低时延传输质量的要求。

5.1.3 智慧家庭智能互联

智慧家庭智能互联是智能家居、智能安防等业务场景的重要因素，家庭互联技术主要考虑三个方面，一是能否连接足够的设备数量，目前智能家居中传感器设备数量可达几十甚至百台以上；二是功耗是否低，很多智能设备都是没有充足电源供给、依靠电池供电长时间工作的低功耗设备，如智能门锁；三是互操作性是否友好，及用户是否可以使用普遍使用的终端去实现对智能家居设备的控制。

当前家庭互联技术有多种，如 Zigbee、Z-wave、BT、Wi-Fi，但都有不同的局限性，例如 Zigbee、Z-wave 属于低功耗技术，但产业链分散、碎片化、或产业链单一，而且用户一些常用的移动终端并不支持这些技

术,互操作性困难;对于 BT、Wi-Fi 技术来说,相应的标准组织也推出了低功耗版本规范,如 LBT、802.11ah,但由于兼容性不足,并没有形成规模产业链,因此目前的智慧家庭互联方面还是比较繁杂的,且没有统一技术标准。

Wi-Fi6 技术的出现,将会给智慧家庭互联带来技术统一的机会,首先 Wi-Fi6 将成为下一代 Wi-Fi 技术的主流,支持 Wi-Fi6 的网关、路由器、手机及一些智能设备,如雨后春笋般出现;同时 Wi-Fi6 技术能够适应密集、高密度场景的接入,可以利用 Wi-Fi6 实现家庭内部的万物互联,并将家庭物联网和家庭无线局域网融合在一起,便于用户使用任何设备、在任何地方操控家居设备,提升用户业务体验。

Wi-Fi6 适合用于家庭互联,还有另外一个重要因素,即 Wi-Fi6 技术借鉴 802.11ah 标准,引入了目标唤醒时间功能(TWT),允许设备之间协商什么时候和多久被唤醒,然后发送和接收数据;通过分配不同 TWT 周期,减少唤醒后竞争无线介质的机会;TWT 还设置了睡眠时间,对采用电池供电的大量智能设备来说,大大延长了电池寿命。

可以看出 Wi-Fi6 将高密度、大数量接入、低功耗优化集成在一起,同时又能与用户普遍使用的各种移动终端兼容,提供良好的互操作性,Wi-Fi6 是未来在智慧家庭智能互联领域中一个极具前景的技术选择。



图9. Wi-Fi6 应用于智能家居

5.2 行业应用

Wi-Fi6 不仅仅是简单的速率提高(最高可达 9.6Gbps),通过引入 DL/UL MU-MIMO、OFDMA 技术,满足多用户、密集场景下的接入需求,提升了无线网络的整体效率;依靠子载波的间隔收窄、符号长度的延长、BSS 着色、动态 CCA 等技术提高了抗干扰的能力,满足视频、游戏等业务对低时延的传输需求,在很多领域,可以利用 Wi-Fi6 技术构建无线接入网络。

例如在园区网络中采用 Wi-Fi6 技术构建无线接入,可以带来低成本、广覆盖、高质量的移动办公接入,

据此开展各类视频办公协作业务，改善员工网络体验，提升工作效率。

同时 Wi-Fi6 技术还可以用于室内外大型公共场所的无线接入覆盖，例如机场应用属于典型的高密度、密集接入的公共场所，机场在向旅客提供 Wi-Fi 无线接入服务时，除了网络运维管理方面，还应该重点考虑下述几个方面，第一个方面是考虑如何在不降低整个无线网络效率的前提下，实现大量终端用户的接入。Wi-Fi6 标准通过引入上行 MU-MIMO、OFDMA 频分多址复用、1024-QAM 高阶编码等技术，从频谱资源利用、多用户接入等方面解决网络容量和传输效率的问题，在密集用户环境中，将用户的平均吞吐量相比如今的 Wi-Fi5 提高至少 4 倍，并发用户数提升 3 倍以上，Wi-Fi6 也被称为高效 Wi-Fi（HEW）。

第二个方面要考虑如何向旅客提供稳定、高质量的无线传输，随着越来越多的视频应用，如影视、游戏、VR/AR 应用、移动视频办公等，这些业务对网络传输质量提出了更高的性能要求：高带宽、低时延、低误码率。Wi-Fi6 通过子载波的间隔收窄、符号长度的延长、BSS 着色、动态 CCA 等技术提高了抗干扰的能力，保障稳定高质量的无线接入传输，提升用户业务体验。



图10. Wi-Fi6 应用于园区

第三个方面要考虑如何向旅客提供安全的接入，特别是在开放的环境下，如何向用户提供安全的数据接入和传输，虽然 Wi-Fi6 标准本身并没有指定任何新的安全功能或增强，但 WFA（Wi-Fi 联盟）推出了新一代的安全加密标准：WPA3，这是一种更安全的加密方式，已经成为 Wi-Fi6 的标准配置。WPA3 针对接入开放性网络，提出通过个性化数据加密增强用户隐私的安全性，是对每个设备和 AP 之间的连接进行加密的特征。因此通过采用 Wi-Fi6 及 WPA3 技术，可以为机场旅客提供安全接入保障。

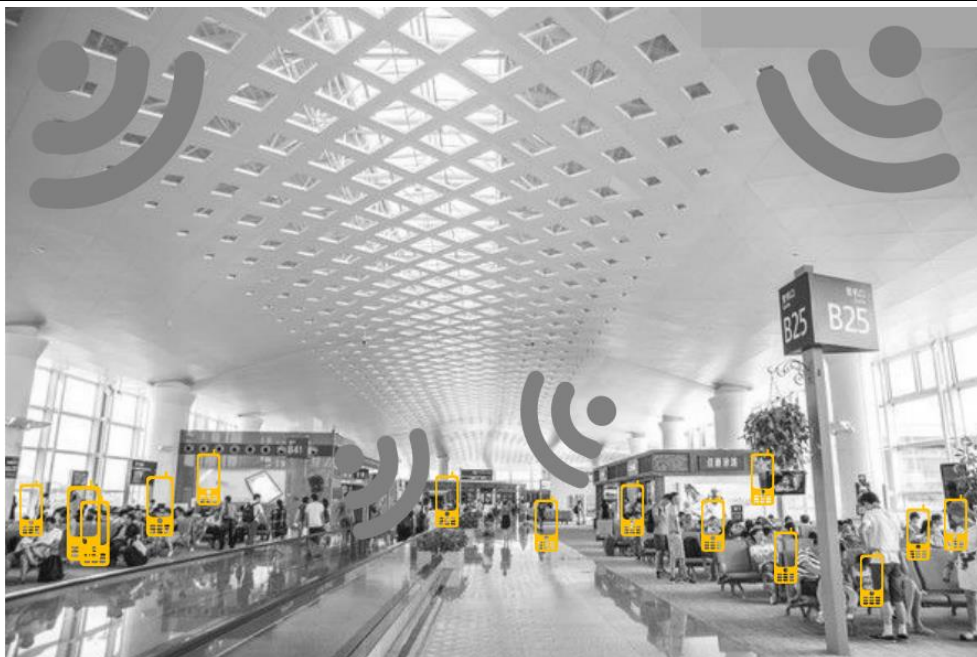


图11. Wi-Fi6 应用于机场

Wi-Fi6 作为新一代高速率、多用户、高效率的 Wi-Fi 技术，将会在各种行业领域中得到广泛地应用。

6 Wi-Fi6 技术评测

2019 年 9 月，WFA 正式发布了 Wi-Fi6: 802.11ax 技术规范，并宣布启动 Wi-Fi6 认证流程，意味着 Wi-Fi6 走向正式商用，中国联通网络技术研究院随之启动 Wi-Fi6 芯片级别的实验室测试，联合国内知名芯片厂商对 Wi-Fi6 芯片产品进行了技术评测。

围绕用户使用场景以及 1024QAM 高阶调制、OFDMA、MU-MIMO 等 Wi-Fi6 新技术，此次实验室测试主要包括各种场景（包括近距离、远距离、穿墙、有邻频同频干扰环境）下的性能测试，以及针对 Wi-Fi6 核心技术 MU-MIMO、OFDMA 的针对性测试。让我们可以直观的看到与以往几代无线技术的相比，Wi-Fi6 的技术赋能带来的性能和效率的提升以及不一样的体验。

此次测试覆盖 Wi-Fi6 产品的 2 x 2、4 x 4、8 x 8 的不同规格的终端范围。测试配置的设置默认 2.4GHz 采用 20MHz 频宽，5GHz 采用 80MHz 频宽；测试结果采用各芯片厂商的均值呈现。

■ 评测总结：

- （1）在大部分场景下 Wi-Fi6 终端对于 Wi-Fi5 终端的性能都有大幅的提升；Wi-Fi6 的 2 x 2 终端的吞吐性能和 Wi-Fi5 的 3 x 3 终端几乎一样，尤其在近距离场景；Wi-Fi6 4 x 4 和 8 x 8 终端在所有场景下相对于 2 x 2 终端性能都可获得成倍的增长。
- （2）对于 Wi-Fi6 的两大重要技术 MU-MIMO 和 OFDMA 技术确实如预期一样为我们带来前所未有的性能提升。
- （3）从 MU-MIMO 技术的测试结果来看，Wi-Fi6 4 x 4 终端和 Wi-Fi6 8 x 8 终端都从 MU-MIMO 技

术中获得了非常大的增益，显著提高了网络总吞吐量和总容量。

(4) 从 OFDMA 技术测试结果来看，多用户场景下，OFDMA 对于时延降低的作用比单用户更加明显，同时 Wi-Fi6 4 x 4 终端和 Wi-Fi6 8 x 8 对于时延降低的效果更加惊人。

(5) Wi-Fi6 的高性能不可否认，随着 4K/8K 超高清视频应用、智能家居、VR/AR 等业务的发展，Wi-Fi6 在这些需要高并发用户接入、大带宽、低时延的多元化场景下将发挥重要作用。

6.1 多场景测试

6.1.1 近距离最佳吞吐

该项测试主要比较了单个用户近距离场景下 Wi-Fi5 (11ac/11n) 的 2 x 2、3 x 3 终端以及 Wi-Fi6 (11ax) 2 x 2、4 x 4、8 x 8 终端产品在 2.4G 和 5G 频段下的吞吐性能。

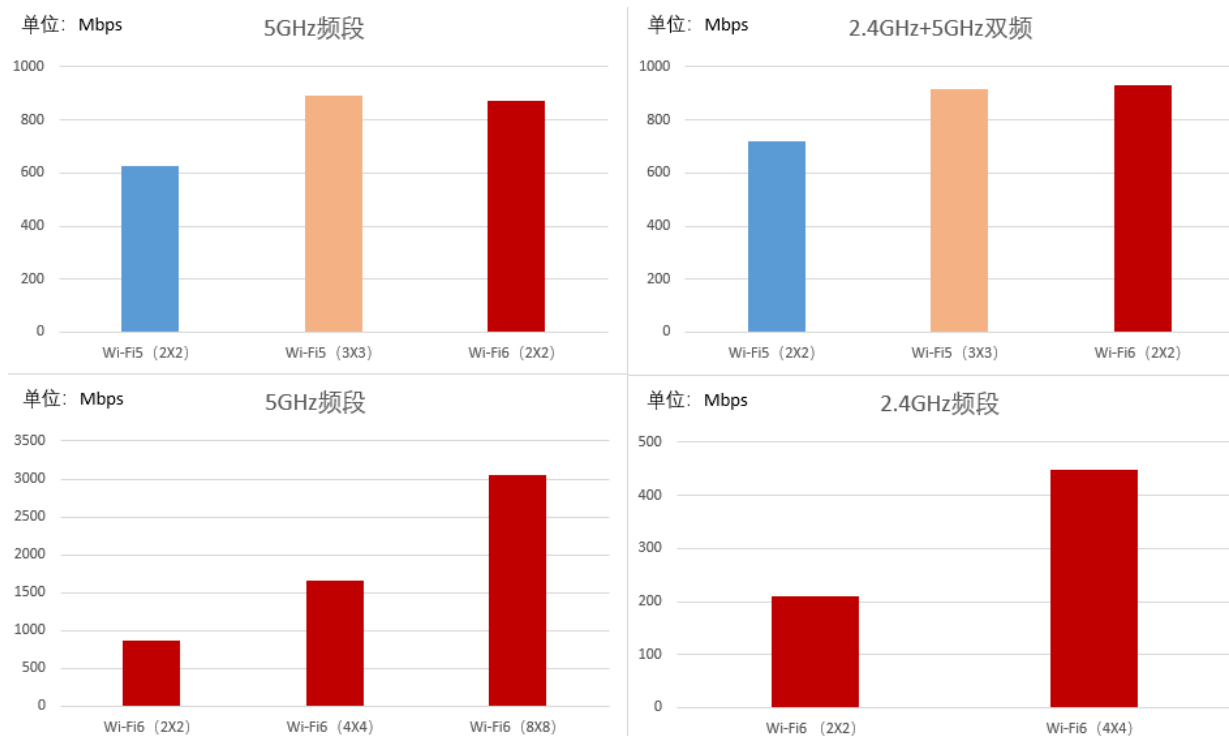


图12. 近距离场景吞吐性能

该场景测试结果显示：

Wi-Fi6 的 2 x 2 终端和 Wi-Fi5 的 3 x 3 终端吞吐性能几乎一样；Wi-Fi6 的 2 x 2 终端比 Wi-Fi5 的 2 x 2 终端吞吐性能综合提升 30%左右。

Wi-Fi6 的 4 x 4 终端和 8 x 8 终端相对于 2 x 2 终端的吞吐性能将获得成倍的巨幅增长。

6.1.2 远距离吞吐

该项测试比较了单个用户 30 米直线远距离场景下 Wi-Fi5（11ac/11n）的 2 x 2 终端、 3 x 3 终端以及 Wi-Fi6（11ax）2 x 2、4 x 4 终端在 5G 频段下的吞吐性能。

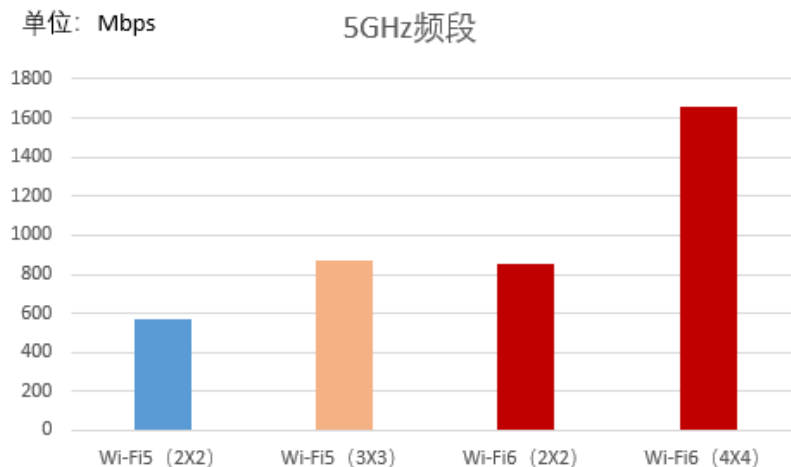


图13. 远距离场景吞吐性能

该场景测试结果显示：

5G 频段下，Wi-Fi6 的 2 x 2 终端和 Wi-Fi5 的 3 x 3 终端吞吐性能几乎相同； Wi-Fi6 的 2 x 2 终端比 Wi-Fi5 的 2 x 2 终端吞吐性能综合提升 50%左右。

Wi-Fi6 的 4 x 4 终端相对于 2 x 2 终端的吞吐性能将获得成倍的巨幅增长。

6.1.3 穿墙吞吐

该项测试比较了单个用户 20 米穿墙远距离场景下 Wi-Fi5（11ac/11n）的 2 x 2、 3 x 3 终端以及 Wi-Fi6（11ax）2 x 2、4 x 4 终端在 5G 频段下的吞吐性能。

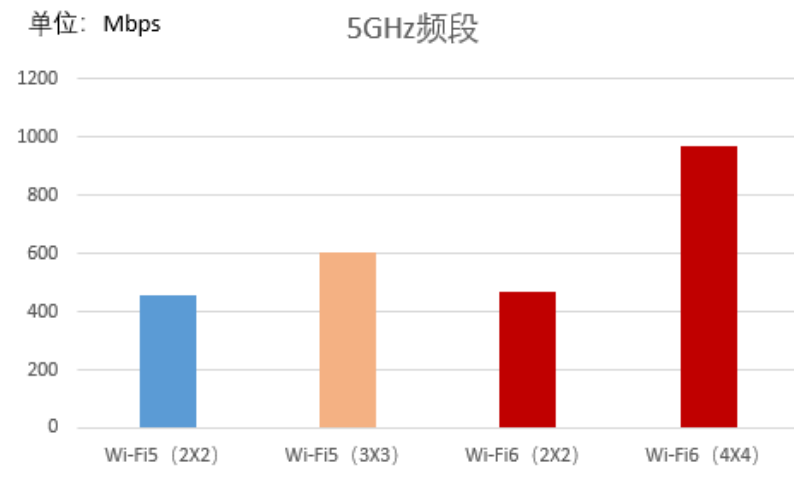


图14. 穿墙场景吞吐性能

该场景测试结果显示：

Wi-Fi6 的 2 x 2 终端吞吐性能略逊色于 Wi-Fi5 的 3 x 3 终端； Wi-Fi6 的 2 x 2 终端相对于 Wi-Fi5 2 x 2 终端吞吐性能略有提升。

Wi-Fi6 的 4 x 4 终端相对于 2 x 2 终端的吞吐性能仍有成倍增长。

6.1.4 距离 vs 吞吐性能对比

该项测试比较了在无干扰不同距离场景下单用户 Wi-Fi5(11ac/11n)的 3 x 3 终端, 以及 Wi-Fi6(11ax) 2 x 2、4 x 4 终端在 5G 频段下的吞吐性能, 这里不同距离采用信号衰减来模拟。

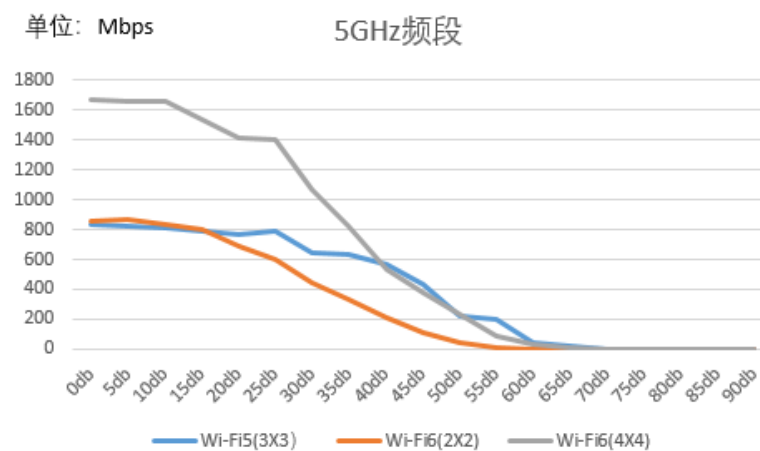


图15. 不同距离场景吞吐性能

该场景测试结果显示：

5G 频段下，Wi-Fi6 的 2 x 2 终端和 Wi-Fi5 的 3 x 3 终端吞吐性能比较相近，尤其在近距离场景下；

Wi-Fi6 的 4 x 4 终端相对于 2 x 2 终端的吞吐性能仍有成倍增长，尤其是在近距离场景下。

6.1.5 干扰环境下距离 vs 吞吐性能对比

该项测试比较了在同时有邻频和同频干扰时不同距离场景下单用户 Wi-Fi5 (11ac/11n) 的 3 x 3 终端, 以及 Wi-Fi6 (11ax) 2 x 2、4 x 4 终端在 2.4G 和 5G 频段下的吞吐性能, 这里不同距离采用信号衰减来模拟。

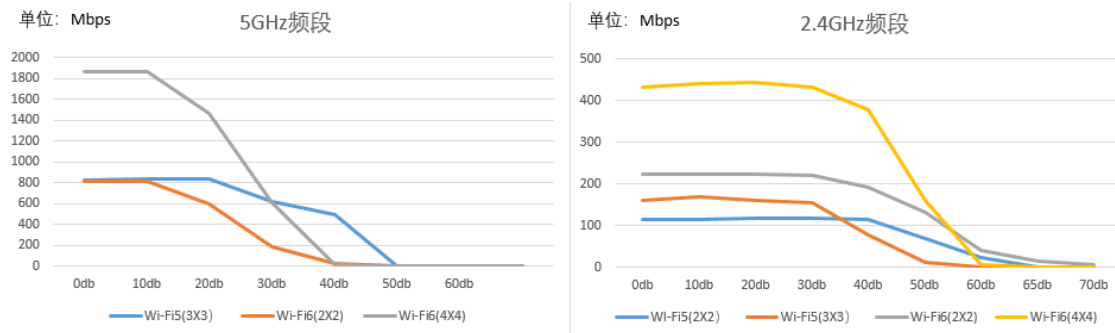


图16. 干扰环境下不同距离场景吞吐性能

该场景测试结果显示：

5G 频段下，Wi-Fi6 的 2 x 2 终端和 Wi-Fi5 的 3 x 3 终端吞吐性能比较相近，尤其在近距离场景下；

2.4G 频段下，Wi-Fi6 的 2 x 2 终端的吞吐性能相对于 Wi-Fi5 的 2 x 2 终端以及 3 x 3 终端的性能都有极大提升；

无论是在 2.4G 频段还是 5G 频段，Wi-Fi6 的 4 x 4 终端相对于 2 x 2 终端的吞吐性能都有成倍增长。

6.2 Wi-Fi6 核心技术测试

Wi-Fi6 有两项关键核心技术 MU-MIMO 和 OFDMA，这两项技术都是允许多用户终端同时传输的技术，但他们适用的场景却不同，MU-MIMO 适合在合负荷重，容量需求大的场景使用，而 OFDMA 却适合在高密度环境中应用，二者相互补充，分别在频率和空间上提供多路并发技术，为用户带来了网络性能与速度的极大提升以及良好的用户体验。

6.2.1 MU-MIMO

MU-MIMO（多用户多入多出技术），即允许 AP 同时与多个 WLAN 终端通信，而不是依次进行通信，它主要适用于大数据包的并行传输，可以提升空间流的利用率，并显著提高网络总吞吐量和总容量。

该项测试比较了 Wi-Fi6 4 x 4 终端关闭 MU-MIMO 和开启 MU-MIMO 的情况下在 2.4G 和 5G 频段下的吞吐性能获得的增益情况。

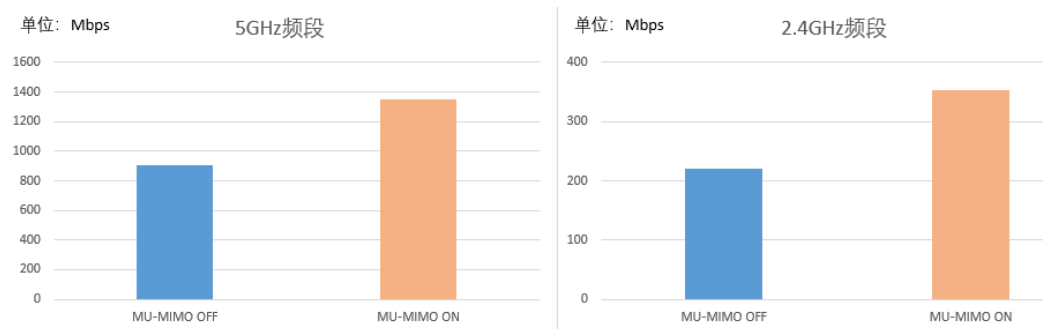


图17. MU-MIMO 技术获得的吞吐性能增益

该场景测试结果显示：

无论是在 2.4G 频段还是 5G 频段，Wi-Fi6 终端获得 MU-MIMO 增益非常大，网络的总吞吐量显著增加。

6.2.2 OFDMA

OFDMA 技术实现在每个时间段内多个用户同时并行传输，不必排队等待、相互竞争，提升效率，降低了排队等待时延。

该项测试比较了设备关闭 OFDMA 和开启 OFDMA 的情况下，信道中充满背景流量时 Wi-Fi6 终端在 2.4G 和 5G 频段下的时延情况，该项测试中分别使用了单用户和多用户进行了对比。

Wi-Fi6 2 x 2 终端在 2.4G 和 5G 频段下的单用户和多用户在 OFDMA 开启和关闭的时延对比：

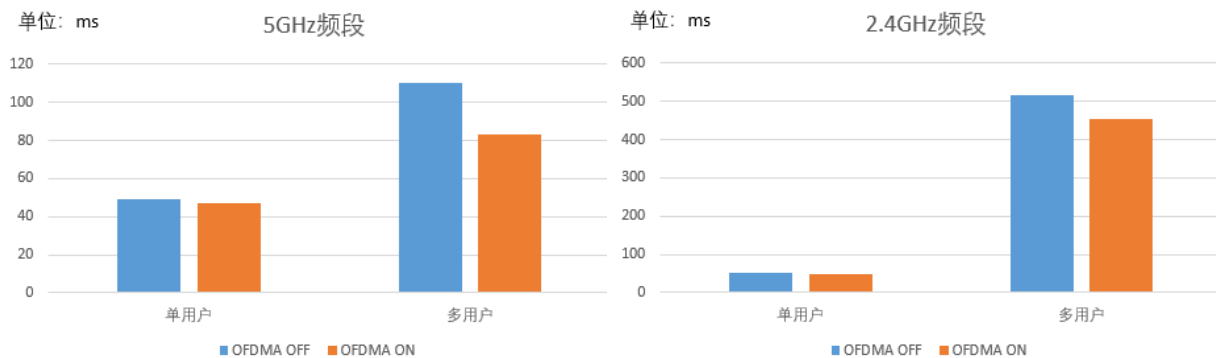


图18. Wi-Fi6 2x2 终端单用户 vs 多用户的时延性能对比

Wi-Fi6 4 x 4 终端在 2.4G 和 5G 频段下的单用户和多用户在 OFDMA 开启和关闭的时延对比：

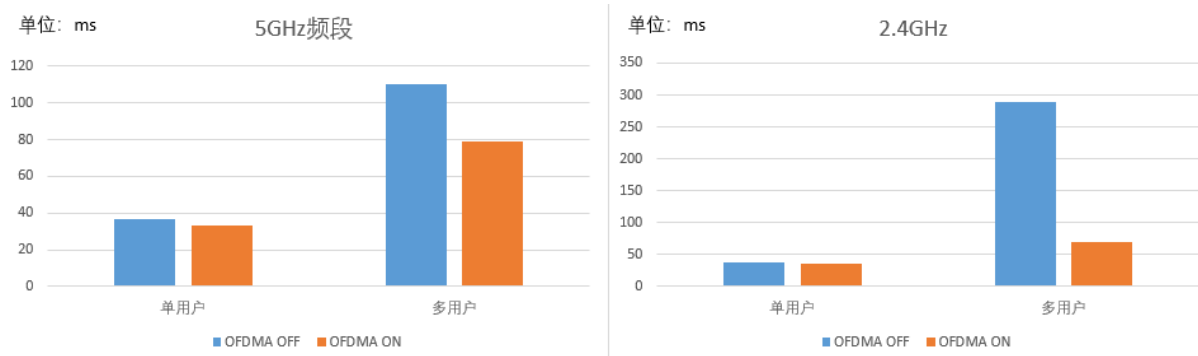


图19. Wi-Fi6 4x4 终端单用户 vs 多用户的时延性能对比

Wi-Fi6 8X8 终端在 2.4G 和 5G 频段下的单用户和多用户在 OFDMA 开启和关闭的时延对比：

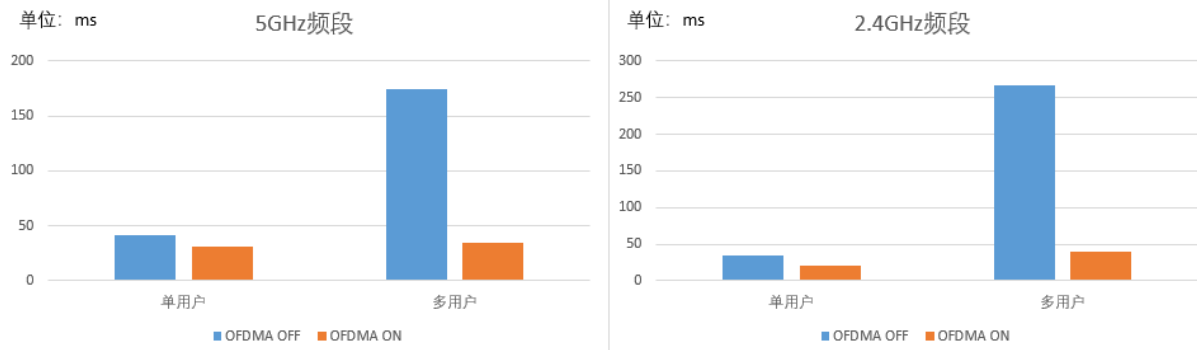


图20. Wi-Fi6 8x8 终端单用户 vs 多用户的时延性能对比

该场景测试结果显示：

OFDMA 技术对于单用户时延降低效果并不太明显，对于多用户的时延性能降低效果明显，尤其对于 Wi-Fi6 的 4 x 4 终端和 8 x 8 终端。

7 2020 年将是 Wi-Fi6 大规模发展的元年

7.1 技术标准逐渐成熟

IEEE 的 802.11ax 标准协议已基本定稿到 D6.0 版本，预计 9 月份封版，Wi-Fi6 已是正式标准，WFA 也已经开始做认证。

7.2 Wi-Fi6 产业链发展

随着 Wi-Fi6 的标准诞生和技术逐步成熟，业界对 Wi-Fi6 高速率、广覆盖的技术优势是认可的，但是在 Wi-Fi4 技术并未退出市场、Wi-Fi5 技术满足目前市场需求已全面铺开并成熟应用的局面下，2019 年大多数设备厂家对 Wi-Fi6 的全面升级仍持保守态度，2019 年之前真正在助推和布局 Wi-Fi6 市场的主力军是各芯片厂家。

2017 年 8 月 17 日，Broadcom（博通）发布了 802.11ax Wi-Fi6 芯片 BCM43684、BCM43694、BCM4375；主要应用于企业 AP、家庭 Wi-Fi 零售市场、智能手机；

2017 年 2 月 13 日，Qualcomm 宣布推出第一款面向网络基础设施的 IPQ8074 系统级芯片（SoC）解决方案以及第一款面向客户终端的 QCA6290 解决方案，主要用于企业 AP 的、家庭 Wi-Fi 零售市场、智能手机；并于 2019 年 MWC 展会上发布了用于汽车以及移动设备领域的 Wi-Fi6 芯片—QCA6696 及 QCA6390 连接 SoC。

Marvell 在 2017 年 12 月推出其一系列 802.11ax 产品：面向大型企业和高端零售 AP 的 88W9068、面向主流企业和零售 AP 的 88W9064 以及面向 OTT 机顶盒等的低端方案 88W9064S；并在 2018 年发布了全球首款针对汽车车载系统的 802.11ax Wi-Fi 解决方案芯片——88Q9098。

Intel 在 2018 年推出支持 802.11ax 的 WAV 系列芯片，用于电缆，xDSL 和光纤的主流 2x2 和 4x4 家庭

路由器和网关；在 2019 年 4 月发布支持 802.11ax 的网卡方案 AX200，广泛应用于笔记本电脑。这些芯片均是基于 Wi-Fi6 技术的产品，提供更高的性能传输，其中有应用于企业路由器的、有应用于家庭 Wi-Fi 零售市场、有应用于智能手机，还有应用于车辆的。

联发科、以色列智能 Wi-Fi 制造商 Celeno、华为海思以及瑞昱半导体也在陆续发布其 Wi-Fi6 的研究方案，后续将逐步推出相关产品及解决方案。

随着芯片厂家纷纷发力，行业及产业对 Wi-Fi6 的态度也从观望的态度变成积极参与，纷纷推出 Wi-Fi6 产品吸引客户。

在智能手机方面，小米前期发布了旗舰机小米 10 支持 Wi-Fi6，以及市面上已有的三星的 Galaxy S10 系列产品和 S20 系列产品、和苹果 iPhone11 系列手机等，支持 Wi-Fi6 的手机终端正在逐步增多。

表7. 支持 Wi-Fi6 智能手机终端系列

厂家	型号	频段
小米	小米 10	2.4GHz+5GHz
三星	Galaxy S10 系列	2.4GHz+5GHz
三星	Galaxy S20 系列	2.4GHz+5GHz
苹果	iPhone11 系列	2.4GHz+5GHz

在笔记本方面，目前市面上的产品并不多，但是使用支持 intel AX200 方案的无线网卡即可兼容 Wi-Fi6，2019 年国际消费电子展上联想公布了第 7 代 ThinkPad X1 Carbon 表示特定型号还支持 Wi-Fi 6 技术，在 CES2020 展会开幕前，联想发布了第八代 ThinkPad X1 Carbon 和第五代 Thinkpad X1 Yoga 笔记本，增加 Wi-Fi6 的支持，预计 2020 年底上市。

表8. 支持 Wi-Fi6 笔记本终端系列

厂家	型号	频段
联想	第 8 代 ThinkPad X1 Carbon	2.4GHz+5GHz
联想	第 8 代 ThinkPad X1 Carbon	2.4GHz+5GHz

在路由器方面，目前市面上的 Wi-Fi6 产品已经很多，比如华硕推出支持 11ax (TUF GAMING AX3000) 电竞路由器，小米的 MI AX3600，网件的 RAX40，TP-LINK 的 TL-XDR3020 等，价格目前在 500-1200 区间不等。

表9. 支持 Wi-Fi6 路由器终端系列

厂家	型号	客户群	适用频段
华硕	TUF GAMING AX3000	电竞	2.4GHz+5GHz
华硕	RT-AX88U	电竞	2.4GHz+5GHz; 2.4GHz、5GHz
华硕	RT-AX89X	电竞	2.4GHz+5GHz
华硕	ROG GT-AX11000	电竞	2.4GHz、5GHz
中兴	ZXHN E1607 AX1800	家庭	2.4GHz+5GHz
网件	RAX40	家庭	2.4GHz+5GHz; 2.4GHz、5GHz
网件	RBK852 AX6000	家庭	2.4GHz+5GHz; 2.4GHz、5GHz
网件	AX6000M	家庭	2.4GHz+5GHz; 2.4GHz、5GHz
网件	AX11000	电竞	2.4GHz+5GHz; 2.4GHz、5GHz
小米	MI AX3600	家庭	2.4GHz+5GHz
TP-LINK	TL-XDR3020	家庭	2.4GHz+5GHz
华为	AirEngine5760-10	企业	2.4GHz、5GHz

目前支持 Wi-Fi6 的芯片，终端侧智能手机主要是 1x1/2x2 天线规格，而笔记本电脑大部分是 2x2 天线规格，终端侧芯片 2.4G/5G 双模可选。对于 AP 侧，2x2、3x3、4x4、5x5、8x8 分别对应不同的区域细分市场，其产品会做到 2.5G&5G 双频并发，以既兼容老设备，也为新设备保留新的频段。未来随着 Wi-Fi6 规格发布，AP 产品还会扩展 2.4G/5G/6G 三频规格，市场目前在不断的逐渐扩大中。2020 年，中国联通将开展各类家庭终端的 Wi-Fi6 布局，率先推出支持 Wi-Fi6 的路由器设备，满足家庭业务的先行。智能网关、智能机顶盒等设备也会随之逐步推出。

7.3 Wi-Fi6 占有市场指日可待

随着 Wi-Fi6 芯片的成熟，Wi-Fi6 芯片发货量占比逐年提高，据 Gartner 预估，Wi-Fi6 到 2023 年的复合年均增长率为 114%，达到 52 亿美元。我们预计，2025 年，Wi-Fi6 产品占据 Wi-Fi 规格 90%以上，Wi-Fi 市场规模将达到 220 亿美元左右。

按照 IDC《中国 WLAN 市场季度跟踪报告 2019 年第三季度》报告分析，未来 Wi-Fi6 在中国市场的规模就将接近 2 亿美元。同时按照行业互联网访问百分比估算，随着 Wi-Fi5 的成熟发展，Wi-Fi 和移动设备的总流量访问约占整个互联网流量访问的 70%左右，虽然 Wi-Fi 流量目前不及比移动设备流量，但是

也在逐年增加，按照其增加的趋势，未来将有望持平，Wi-Fi6 将会成为助推这一趋势的发展。

目前 Wi-Fi6 产品价格普遍比较高，商品的价格主要由其价值决定，但是受供求关系也绝对影响着价格的发展，参考以往的产品价格发展趋势，随着芯片厂家的发力，设备芯片成本逐渐降低，价格也会同步下降，购买者顺应市场需求量增大的同时购买量增大，产品的价格也必然会有一定的下降。Wi-Fi6 在标准技术、应用场景以及市场逐渐完备的前提下，将以 2020 年为真正的起点逐步取代 Wi-Fi4、Wi-Fi5。

编写团队及成员：

中国联合网络通信有限公司产品中心

徐文韦、刘琛

中国联合网络通信有限公司网络技术研究院

张沛、李洁、刘雨涵、丁海、孙莉、王建平、朱晓雨、钟秀芳、张妮竞男、张玉桃、王逸凡

中国联合网络通信有限公司终端与渠道支撑中心（联通华盛）

王明奇、王喜、赵丽莹、盛大明、齐烁

中兴通讯股份有限公司

秦玉峰、陈飞、陈伟、张志刚、张海军、熊钢