

# 综述 | Wi-Fi 7：标准、技术原理和商用进展

临菲信息技术港

“预计到 2025 年，Wi-Fi 的全球经济价值将达到 5 万亿美元，每年出货的设备将达到数十亿台，Wi-Fi 是技术时代最成功的故事之一。” ——摘译自 Wi-Fi 联盟官网

## 一、Wi-Fi 联盟

Wi-Fi 联盟（Wi-Fi Alliance, WFA），发展基于 IEEE802.11 标准的无线局域网技术，进行 Wi-Fi 认证与商标授权，推动全球 Wi-Fi 的采用和发展。

“Wi-Fi 联盟致力于扩大 Wi-Fi 的使用范围和可用性，并将不懈的精力放在提供卓越的用户体验上，这是当今 Wi-Fi 成功的基础。” （译自 Wi-Fi 联盟官网）



Wi-Fi Alliance® is the worldwide network of companies that brings you Wi-Fi®, one of the world's most valued communications technologies. Our vision is to connect everyone everywhere.

Wi-Fi 联盟，来源：Wi-Fi 联盟官网

Wi-Fi 遵循 IEEE 802.11 标准。Wi-Fi 联盟使用了简化的代际名称为 Wi-Fi 命名。从 Wi-Fi 4 到 Wi-Fi7 对应的技术标准（支撑技术）如下：

通用名称	支撑技术
Wi-Fi 7	802.11be (正在开发中)
Wi-Fi 6	802.11ax
Wi-Fi 5	802.11ac
Wi-Fi 4	802.11n

## 二、IEEE 802.11be

当前商用的最新一代 Wi-Fi 设备是基于 IEEE 802.11ax 标准，就是广为人知的 Wi-Fi 6，其中包括可以在 6GHz 频段上运行的设备，称为 Wi-Fi 6E。

Wi-Fi 7 对应的标准是 IEEE802.11be。该标准目前还在开发中，授权请求有效期至 2023 年 12 月 31 日。预计 2024 年上半年正式发布 IEEE 802.11be 标准。

### P802.11be

**Type of Project:** Amendment to IEEE Standard 802.11-2020

**Project Request Type:** Initiation / Amendment

\* **PAR Request Date:** 18 Jan 2019

\* 注

**PAR Approval Date:** 21 Mar 2019

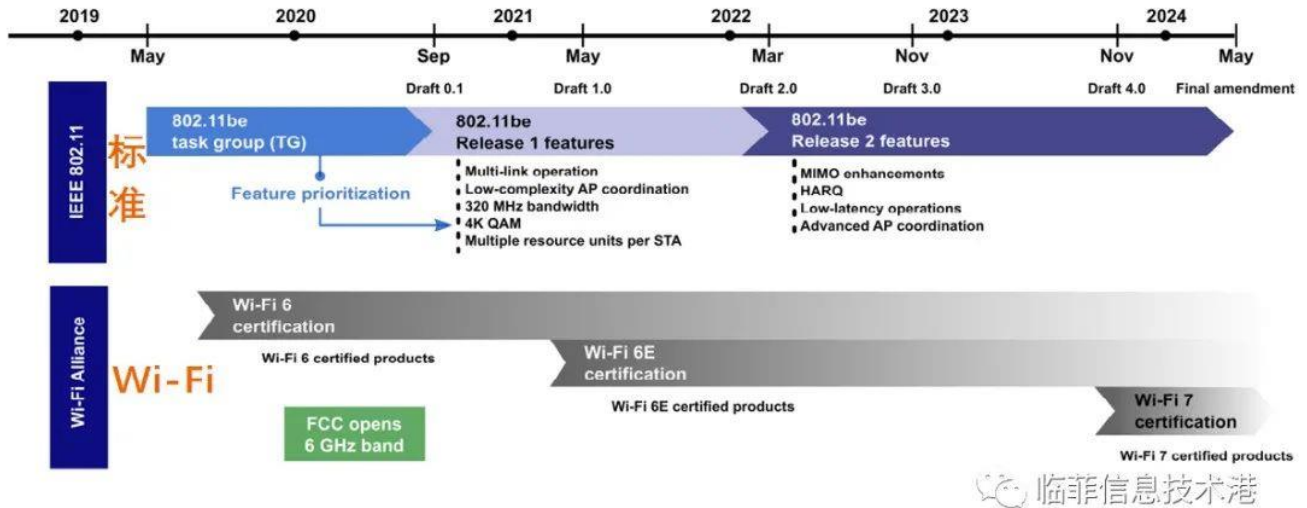
**PAR: Project Authorization Request**

**PAR Expiration Date:** 31 Dec 2023

**PAR Status:** Active

临菲信息技术港

来源: [2]



Wi-Fi 7 标准化、认证和商业化时间表 [5]



Standards	Products & Programs	Focuses	Get Involved	Resources	MAC ADDRESS
<p>P802.11be</p> <p><b>Standard for Information technology--Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks--Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment: Enhancements for Extremely High Throughput (EHT)</b></p> <p>临菲信息技术港</p>					

IEEE 802.11be: 无线局域网介质访问控制(MAC)和物理层(PHY)规范修正案:极高吞吐量(EHT)增强, 图来源: IEEE 标准官网

IEEE 802.11be 称为“极高吞吐量增强(Enhancements for Extremely High Throughput, EHT)”, 能够支持至少 30 Gbps 的最大吞吐量, 并且提供低时延接入保障。

从 802.11n (HT) 到 802.11be (EHT) 的物理层标准如下:

名称	Wi-Fi 4	Wi-Fi 5	Wi-Fi 6	Wi-Fi 7
标准	802.11n (HT)	802.11ac (VHT)	802.11ax (HE)	802.11be (EHT)
频段	2.4, 5 GHz	5 GHz	2.4, 5, 6 GHz	2.4, 5, 6 GHz
信道带宽 (MHz)	20, 40	20, 40, 80, 80+80, 160	20, 40, 80, 80+80, 160	20, 40, 80, 160, 320
子载波间隔 (kHz)	312.5	312.5	78.125	78.125
符号时间 (us)	3.2	3.2	12.8	12.8
循环前缀 (us)	0.8	0.8, 0.4	0.8, 1.6, 3.2	0.8, 1.6, 3.2
MU-MIMO	No	Downlink	Uplink & Downlink	Uplink & Downlink
调制	OFDM	OFDM	OFDM, OFDMA	OFDM, OFDMA
子载波调制	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM, 1024-QAM	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM, 1024-QAM, 4096-QAM
编码	BCC (Mandatory) LDPC (Optional)	BCC (Mandatory) LDPC (Optional)	BCC (Mandatory) LDPC (Mandatory)	BCC (Mandatory) LDPC (Mandatory)

Wi-Fi 物理层标准，截图来源：根据[3]截图翻译整理

比较上面的标准，我们发现，IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6) 与 802.11be (Wi-Fi 7) 的频段、子载波间隔、符号时间、循环前缀、MU-MIMO、OFDM 调制和编码等都相同，明显的改变只是带宽和子载波调制：

Wi-Fi名称	Wi-Fi 6	Wi-Fi 7
信道带宽	160MHz	320MHz
子载波调制	1024-QAM	4096-QAM

802.11be 与 802.11ax 物理层标准主要差别

802.11be 适应在 2.4GHz、5GHz 和 6 GHz 频带内的固定和步行速度下的室内外操作。已讨论的主要候选特性包括[2]：

- 320MHz 带宽和更有效地利用非连续（非相邻）频谱
- 多频带/多信道聚合和操作

- 16 个空间流和多输入多输出 (MIMO) 协议增强
- 多接入点 (AP) 协作 (例如, 协作和联合传输)
- 增强的链路适配和重传协议 (例如混合自动重传请求 (HARQ))
- 如有必要, 适应特定于 6GHz 频谱的监管规则

#### 8.1 Additional Explanatory Notes: Item 5.2b:

The focus of this amendment is on WLAN indoor and outdoor operation with stationary and pedestrian speeds in the 2.4, 5 and 6 GHz frequency bands.

The main candidate features that have been discussed are:

- 320 MHz bandwidth and more efficient utilization of non-contiguous spectrum,
- Multi-band/multi-channel aggregation and operation,
- 16 spatial streams and Multiple Input Multiple Output (MIMO) protocols enhancements,
- Multi-Access Point (AP) Coordination (e.g. coordinated and joint transmission),
- Enhanced link adaptation and retransmission protocol (e.g. Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ)),
- If needed, adaptation to regulatory rules specific to 6 GHz spectrum.

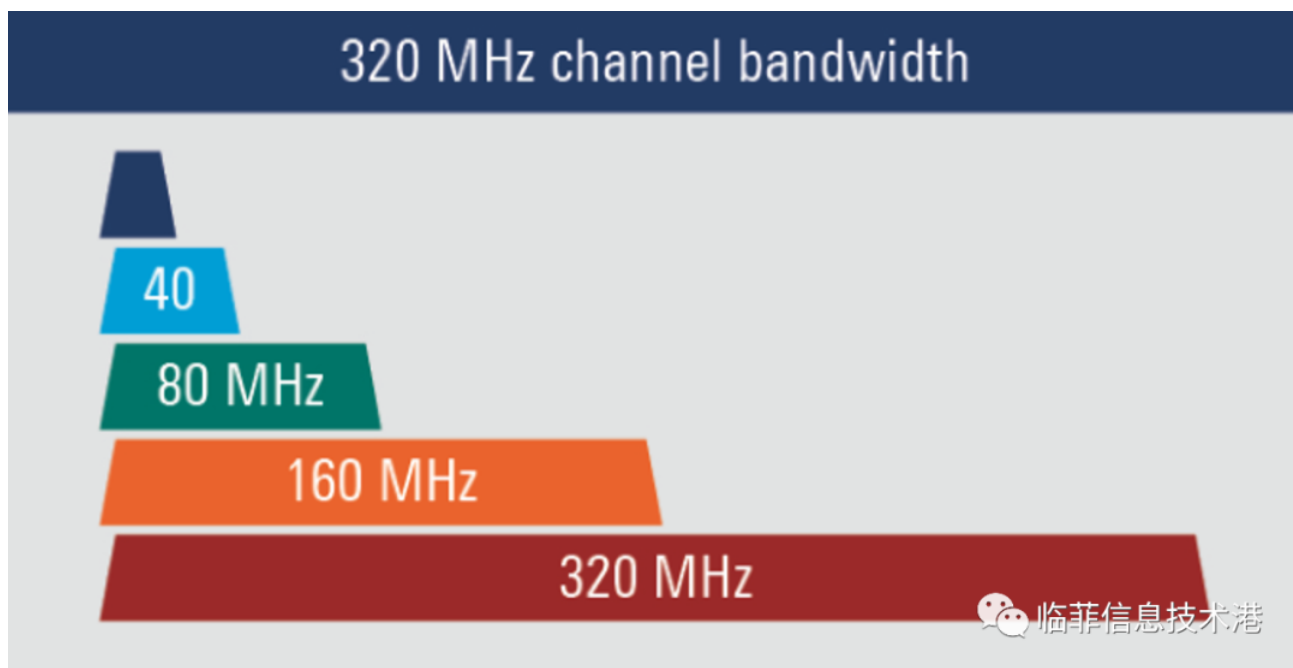
关于 802.11be 特性的说明, 图来源: [2]

### 三、Wi-Fi 7 的主要特性

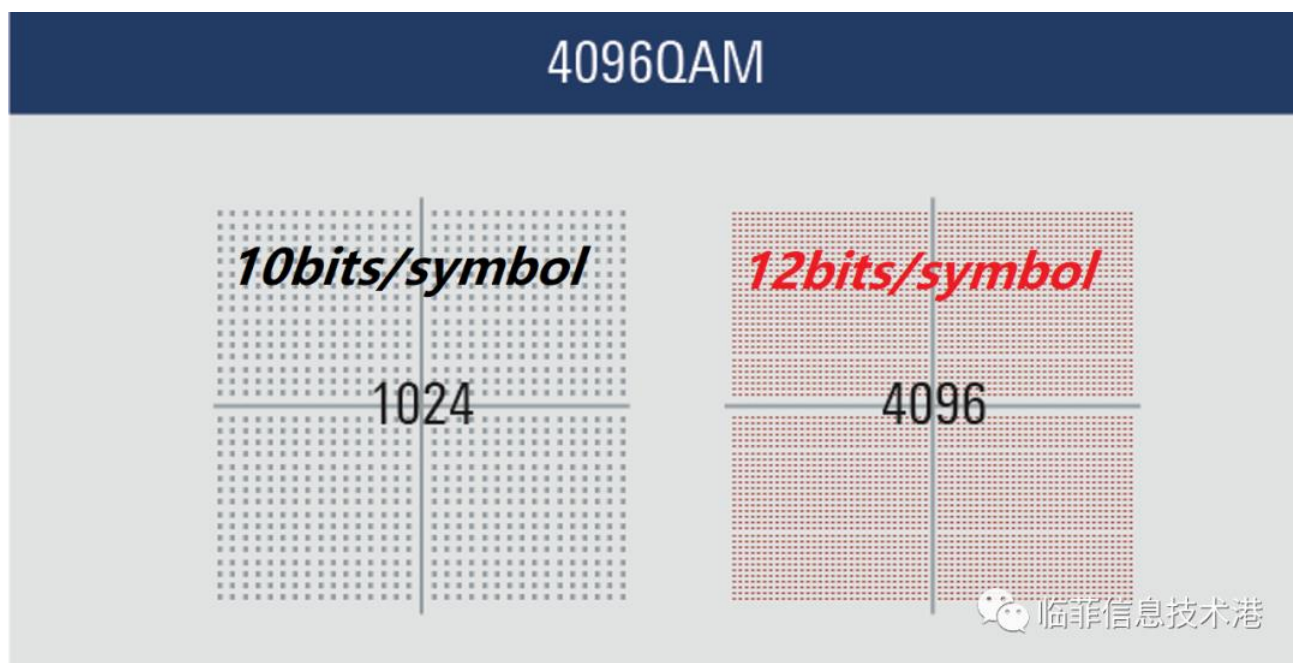
从上面 802.11be 的特性可见 Wi-Fi 7 的特性, 本节主要描述 EHT、MRU、MLO 和多 AP 协作四个特性。

#### 1、EHT (极高吞吐量)

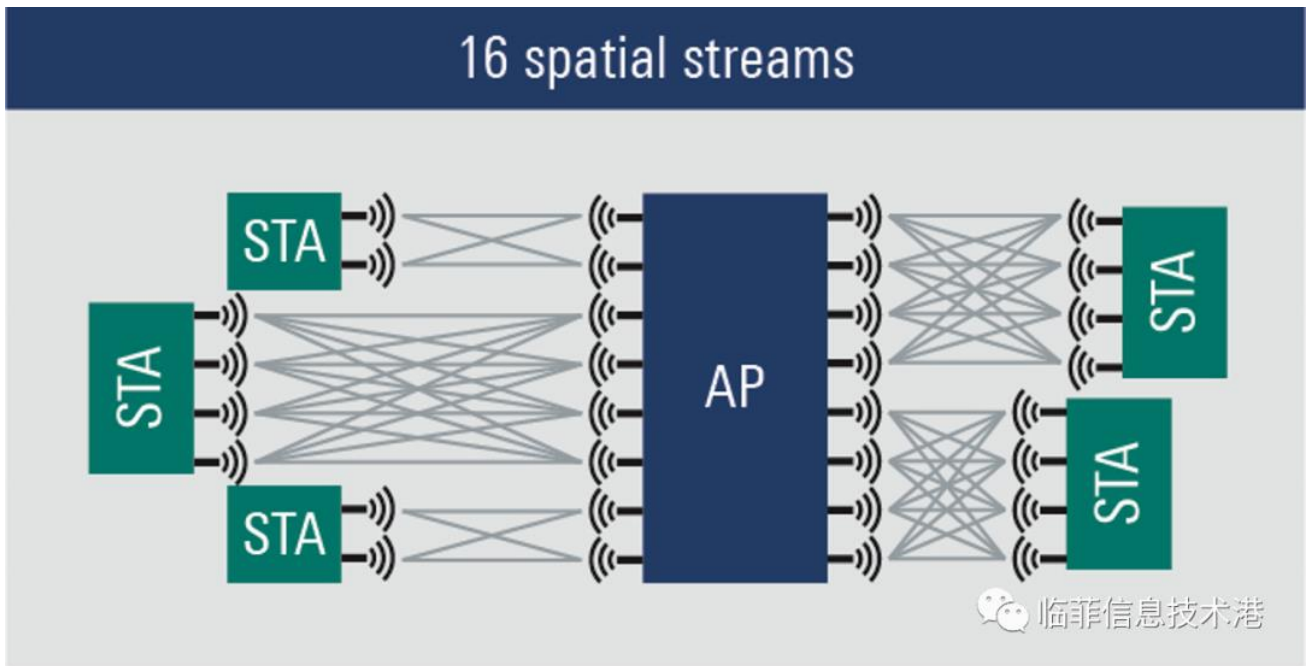
Wi-Fi 6 最高速率 9.6Gbps 为参考, 先来粗略估计一下 Wi-Fi7 理想情况下的最高速率。首先, Wi-Fi 7 的带宽是 Wi-Fi 6 的 2 倍、空间流也是 Wi-Fi 6 的 2 倍; 4096-QAM 比 1024-QAM 的传输效率增加了 20% (1024-QAM 每符号 10 比特, 4096-QAM 是每符号 12 比特)。于是, 在理想假设下 (不考虑由于以上变化后可能需要的增强技术对速率的影响), Wi-Fi7 的最大速率可达:  $9.6\text{Gps} \times 2 \times 2 \times 1.2 = 9.6\text{Gps} \times 4.8 = 46.08\text{Gbps}$ , 它是 Wi-Fi 6 的 4.8 倍。



(a) 带宽



(b) 409-QAM 子载波调制



(c) 16×16 空间流

Wi-Fi 7 基本特性，图片来源：[3]

## 2、MRU（多资源单元）

Wi-Fi 6 的 OFDMA 是将频率资源按子载波数目划分为较小的资源单元（Resource Unit, RU），可以同时向多个用户发送较小的数据包，从而在密集环境中提高吞吐量并减少延迟。但 Wi-Fi 6 AP 仅向每个 STA 分配一个 RU。而 Wi-Fi 7 可以向一个 STA 分配多个 RU，称为 MRU（多资源单元）。

Wi-Fi 7 的 RU 如下图所示。小于 242-tone 的 RU 称为小尺寸 RU (Small-size RU)，242-tone 以上的称为大尺寸 RU (Large-size RU)。

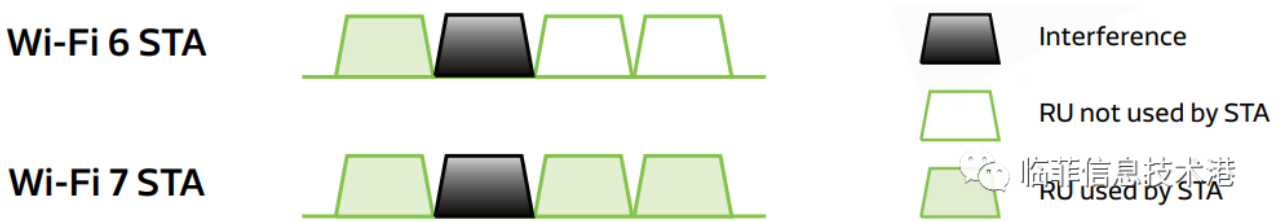
26-tone	52-tone	106-tone	242-tone	484-tone	996-tone	2×996-tone	4×996-tone
Small-size RU				Large-size RU			

Wi-Fi 7 RU 划分

MRU 的构成只能是大尺寸 RU 与大尺寸 RU 结合，或者小尺寸 RU 与小尺寸 RU 结合，小尺寸 RU 和大尺寸 RU 的混合是不允许的[6]。

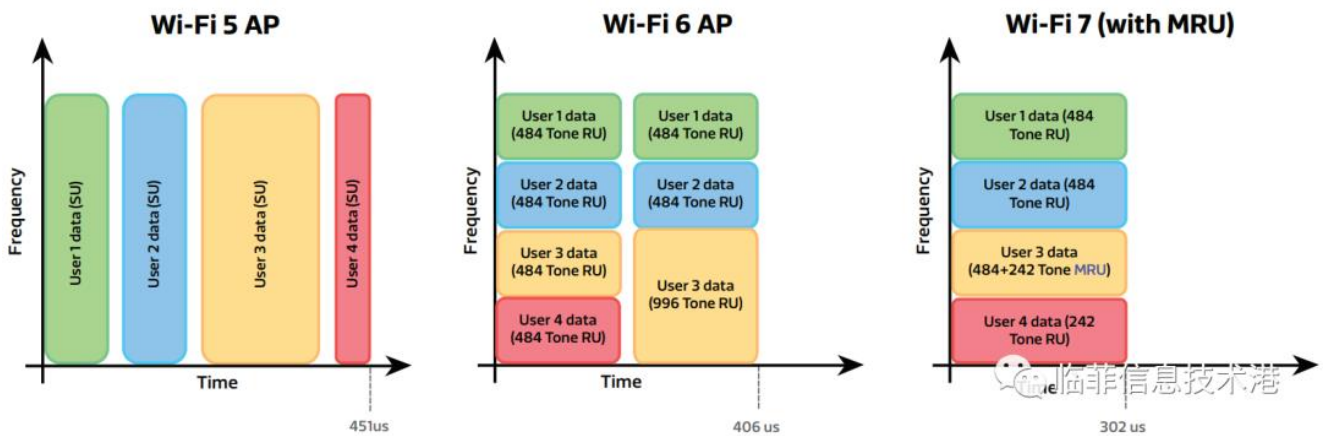
MRU 实际上实现了非连续（非相邻）频谱聚集。通过为每个 STA 分配打孔 RU（打孔粒度为 20MHz），提供更多种类的 RU 大小来提高 OFDMA 效率，而具有非连续频谱的新 RU 也支持前导

打孔。因此，MRU 可以减轻干扰对系统的影响，提高 OFDMA 效率。例如下图显示，MRU 可以将干扰损失从 75%降至 25%。



使用 MRU 提高频谱使用效率[15]

此外，具有 MRU 的 AP 还显著减少了多个用户同时传输数据时的延迟。例如，四个不同的用户传输不同的数据长度：用户 1 到 2 到 3 到 4 的数据长度比例分别为 2:2:3:1。图 4 显示了具有 MRU 的 Wi-Fi 7 AP 如何以更有效的方式分配 RU，与 Wi-Fi 5 和 Wi-Fi 6 AP 相比，实现了最短的端到端延迟，延迟分别减少了 33%和 25%。



Wi-Fi 5、Wi-Fi 6、Wi-Fi 7 端到端延迟比较 [15]

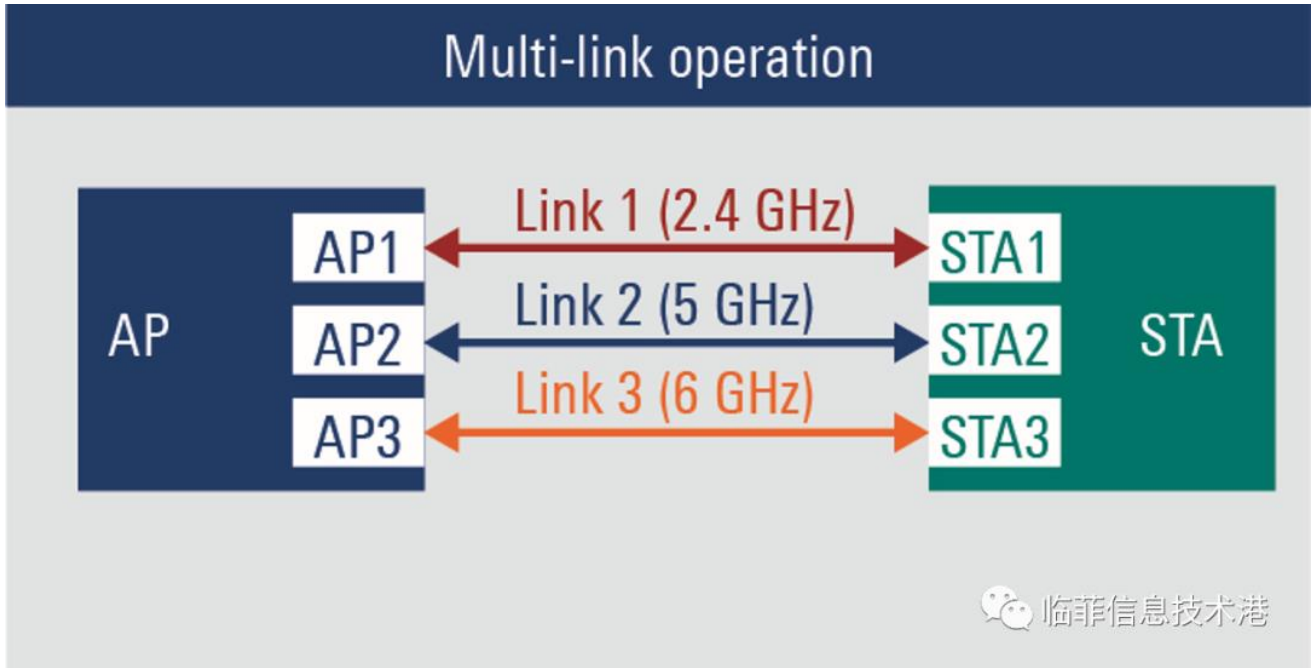
### 3、MLO（多链路操作）

MLO (Multi-Link Operation)，多链路操作。聚合多个物理链路以改善数据吞吐量、延迟和可靠性。

多链路操作可以聚合不同宽度的各种数量的链路，例如，160MHz+20MHz

MLO 使多链路设备 (Multi-Link Devices, MLD) 能够在 2.4GHz、5GHz 和 6GHz 的单个或多个频带上在多个信道中同时进行数据传输和接收。通过根据流量要求在 MAC 层中跨不同 PHY 链路执行链路聚合和频带切换,MLO 允许 Wi-Fi 支持越来越多具有严格延迟和 QoS 要求的用例，例如，视频通话、无线 VR/AR 耳机、云游戏和物联网设备，等。





多链路操作 (MLO) 示意图 来源: [3]

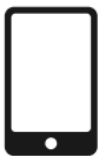
### Wi-Fi 6 Single Link



2G 5G 6G



Link1



### Wi-Fi 7 Multi Link



2G 5G 6G



Link1



Link2



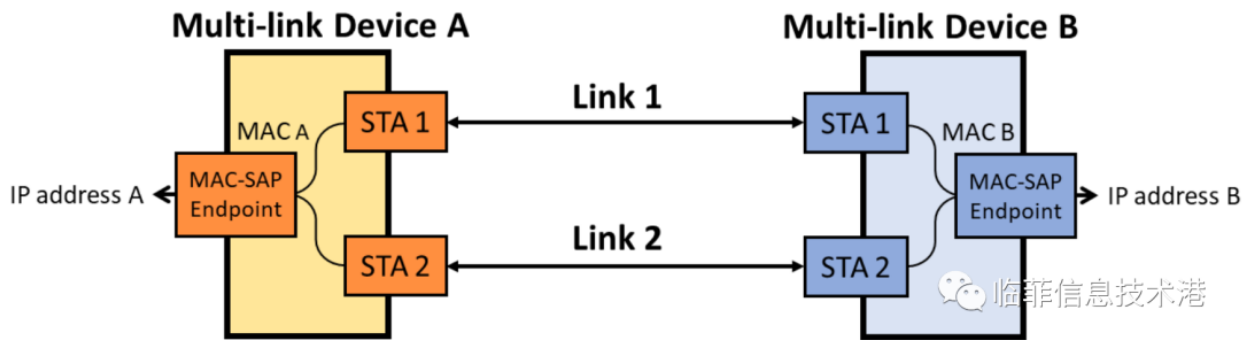
Link3



临菲信息技术港

多链路操作 (MLO) 示意图 来源: MediaTek

多链路设备（MLD）的概念见下图所示，它由几个所谓的附属 Wi-Fi 设备组成，每个设备都有一个到无线媒体的 PHY 接口，但上层协议将 MLD 视为单个设备。尽管具有多个物理无线电接口，MLD 具有单个 MAC 地址，序列号是从相同的序列号空间中唯一生成。此解决方案简化了片段和数据包重组、重复检测和动态链路切换。它们允许在任何链路上重传分组，而不管分组的初始传输的链路如何。



多链路设备（MLD）示意图[4]

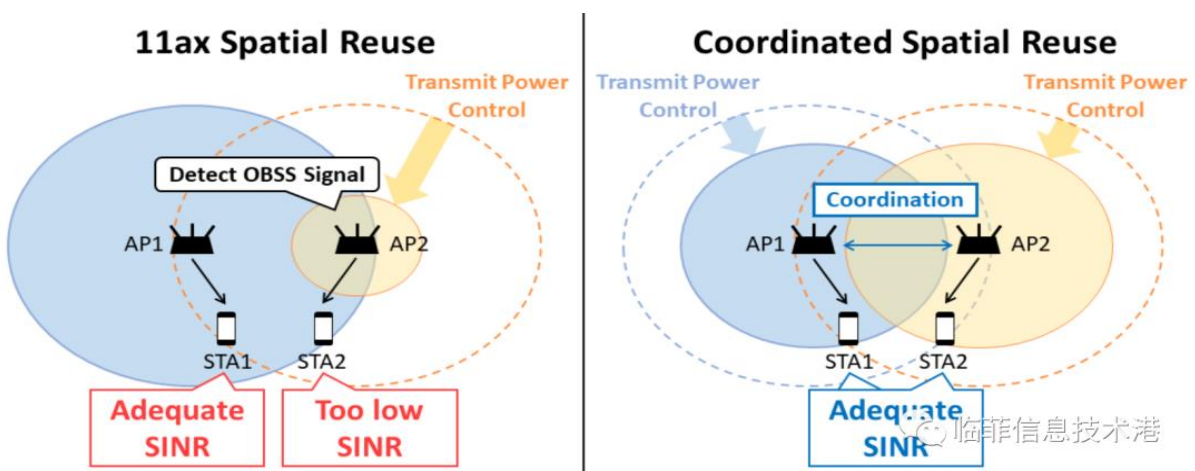
#### 4、MULTI-AP（多 AP 协作）

多 AP 之间协作，可以降低 AP 之间的干扰，极大的提升空口资源的利用率。

IEEE 802.11be 任务组 (Task Group BE, TGbe) 考虑了两种类型的多 AP 系统: 协作 (Coordinated) 和联合 (Joint)。协作系统通过单个 AP 发送/接收数据的每一部分，而联合系统通过多个 AP 发送/接收数据。

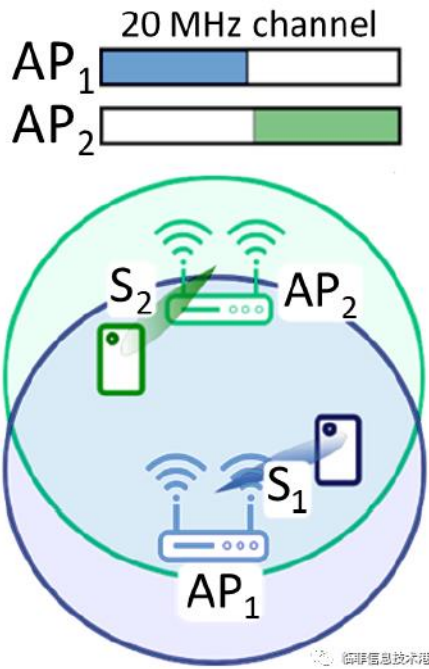
所考虑的多 AP 系统主要有：

#### 协作空间复用 (Coordinated Spatial Reuse, CSR)



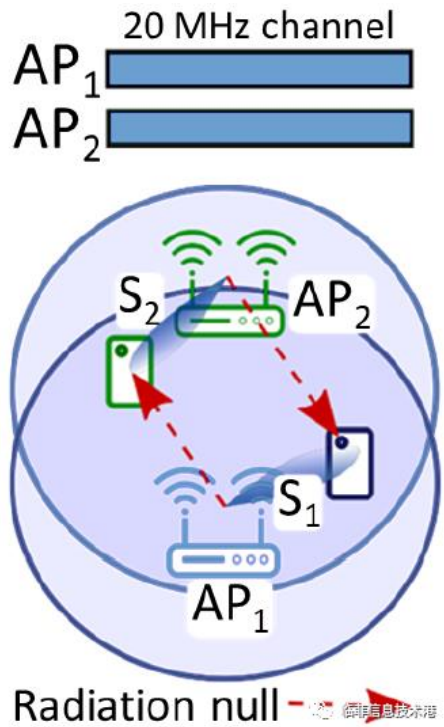
802.11be 协作空间复用（CSR）与 802.11ax 空间复用的对比[4]

### 协作 OFDMA (Coordinated OFDMA, CO-OFDMA)



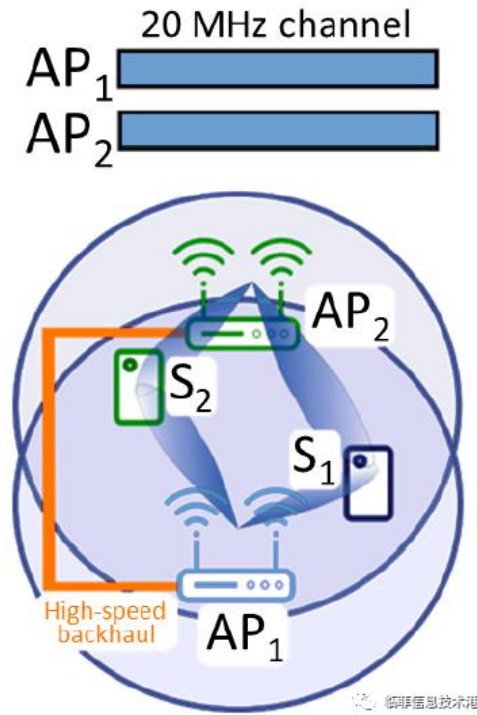
协作 OFDMA [4]

### 调零操作 (Null Steering)



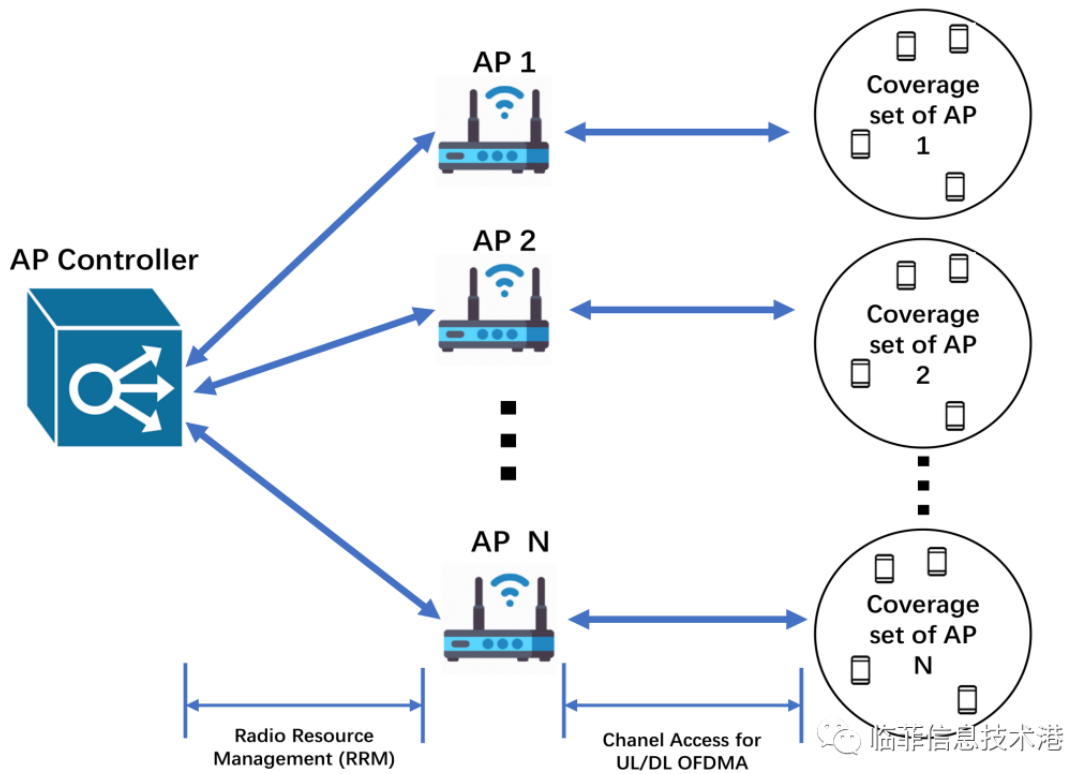
调零 [4]

### 联合发送和接收



联合发送和接收[4]

### 集中控制多 AP



降低信道接入碰撞概率的集中控制多 AP 协作[7]

## 四、商用进展

### TP-Link: Archer BE900、Archer BE800、Archer BE550 Wi-Fi 7 [8,9]

2022年11月14日-TP Link 举行了 Wi-Fi 7 产品发布会，宣布其 Wi-Fi 7 网络解决方案。三个 WiFi7 路由器在活动中亮相：

#### Archer BE900

Archer BE900 是四频 24 Gbps Wi-Fi 7。两个 5GHz 频段确保更多设备享受高速 Wi-Fi。全新的 6GHz 频段提供卓越的带宽和无拥塞信道。

双 10G WAN/LAN 端口。Archer BE900 配备两个 10G WAN/LAN 端口-一个 RJ45 端口和一个 RJ45/SFP+ 组合端口-为光纤和铜缆连接提供灵活的支持；四个 2.5G 端口和一个 USB 端口使其成为未来家庭网络的理想解决方案。

与带有外部天线的传统 WiFi 路由器不同，这款 WiFi 7 路由器采用了内部天线，以保持优雅的外观。12×最佳定位的内部天线实现了高增益、高隔离、高集成度和多向覆盖的效果。

#### Archer BE800

Archer BE800 是一款三频 WiFi 7 路由器，最高支持 19Gbps，配备 LED 屏幕、两个 10G 端口和四个 2.5G 端口，并且兼容 EasyMesh。

#### Archer BE550

Archer BE550 是另一款三频 WiFi 7 路由器，速度 9214Mbps，五个 2.5G 端口，与 EasyMesh 兼容。



(a) Archer BE900



(b) Archer GE800 Wi-Fi 7 for gamers



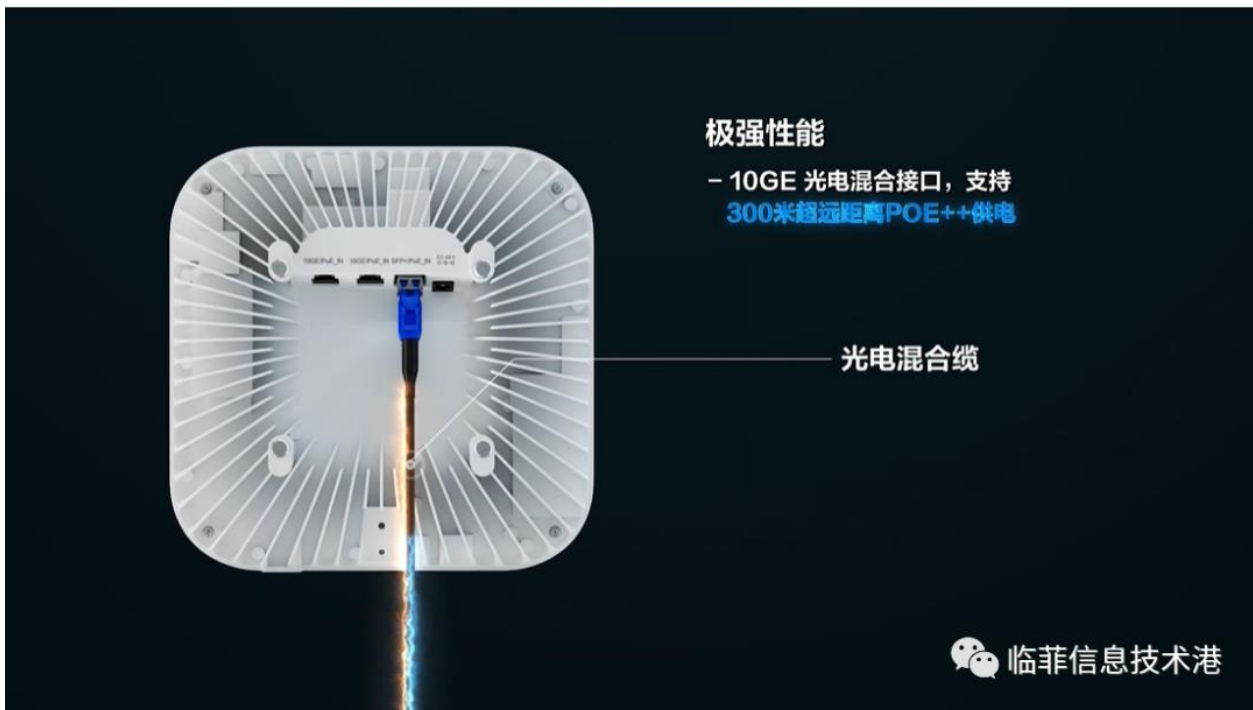
(c) Archer BE550

TP-Link 发布的三款 Wi-Fi 7 路由器[8]

### 华为: AirEngine 8771-X1T [10]

整机空口速率: 18.67Gbps; 10GE 光电混合接口; 5GHz/6GHz 频段按需切换; 内置动态变焦智能天线, 全向/高密场景自适应。









华为 Wi-Fi 7, 来源: [9]

### Qualcomm(高通) : FastConnect™7800 [11,12]

2022 年 11 月, 高通在一年一度的“骁龙峰会”(Snapdragon Summit)上, 发布了新款骁龙 8 (Snapdragon 8 Gen2), 支持 FastConnect™ 7800 Wi-Fi 7。这可能意味着首批 Wi-Fi 7 手机将于 2023 年 2 月底在巴塞罗那举行的世界移动大会上发布。

高通公司 FastConnect 7800 是一款先进的 14nm Wi-Fi 和 Bluetooth®连接系统, 提供超高速 (高达 5.8 Gbps\*)、持续低延迟 (2 毫秒) 和优质蓝牙音频。

FastConnect 7800 在保持符合最新的 Wi-Fi 6/6E 和 Wi-Fi 7 标准的同时, 还拥有超越标准基准的先进创新。高频段同时 (HighBandSynchronous, HBS) 多连接是它的重要特性。HBS 多连接技术独特地利用了 5 和 6GHz 频带的潜力, 为需要吞吐量和延迟敏感的应用提供了高频带性能的多个链路, 消除了对相对狭窄和拥挤的 2.4GHz 频带的依赖。

## With Wi-Fi 7 HBS Multi-Link 320MHz becomes even more achievable

delivering the fastest and lowest-latency  
Wi-Fi 7 performance

临菲信息技术港

\* Speed claims refer to maximum physical layer (PHY) rate

## In regions and environments where 6GHz is not available

FastConnect 7800 can harness up to 240MHz  
of the global 5GHz band

临菲信息技术港

\* Speed claims refer to maximum physical layer (PHY) rate

高通 Wi-Fi7 HBS Multi-Link 来源: [12]

### Broadcom (博通) & Intel (英特尔) : Wi-Fi7 在 FCC 测试 [13,14]

博通和英特尔向 FCC 展示了 Wi-Fi7 连接。FCC 主席杰西卡·罗森沃塞尔 (Jessica Rosenworcel) 和几位 FCC 委员参加了速度测试，测试的 Wi-Fi 7 数据速率超过 5Gbps。

博通和英特尔表示，Wi-Fi 7 连接将带来变革性体验，包括“沉浸式 AR/VR 协作、超高清 16k 媒体流”等。他们还表示，未来在 FCC 的演示将展示 Wi-Fi 7 的两个标志性功能：多资源单元（MRU）打孔和多链路操作（MLO）。

## Over-The-Air Wi-Fi 7 Cross-Vendor Interoperability

Key Features:	Key Benefits:
<ul style="list-style-type: none"> <li>1) 320 MHz Channels (6 GHz)</li> <li>2) 4K QAM Modulation</li> </ul>	<p><b>Today's Demo #1:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Multi-Gig PC Wi-Fi Speed (&gt;5Gbps)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>3) Multi-Resource Unit Puncturing</li> <li>4) Multi-Link Operation</li> </ul>	<p><b>Future Demo #2:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ultra-low / Deterministic Latency</li> <li>• Enhanced Reliability / Efficiency</li> </ul>

Wi-Fi 7 is right around the corner

临菲信息技术港

intel + BROADCOM

## Wi-Fi 7 – Improves Network Performance

Capacity	Determinism: (Latency + Reliability)		Coverage
 <b>5X</b> Network Capacity <sup>1</sup>	 <b>100X</b> Worst Case Latency Improvement <sup>2</sup>	 <b>15X</b> Improved AR/VR Latency <sup>3</sup>	 <b>18dBm</b> Std. TX Power vs. Indoor (LPI) 6 GHz Wi-Fi

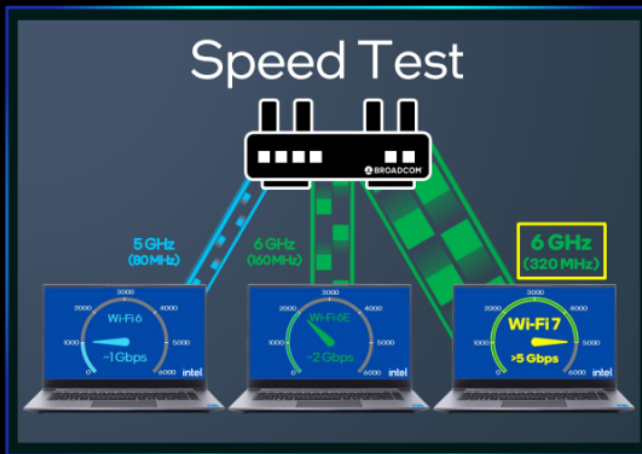
New experiences, more connected, lower cost/bit

1 – (Scenario described in IEEE 11-13/10810) 20 apartments on a single floor, 1 AP and 1-4 WLAN devices per apartment; compares 80 MHz Wi-Fi 6E devices vs. 320 MHz MLO-capable devices  
 2 – Congested apartment scenario compares best effort latencies for Wi-Fi 6 and MLO-capable Wi-Fi 7 clients; simulation comparison is improvement in number of times latency requirement is met  
 3 – similar set-up as #2, but run for AR/VR latency

临菲信息技术港

intel + BROADCOM

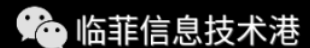
## Over-The-Air Wi-Fi 7 Cross-Vendor Interoperability



### Multi-Gig Wi-Fi 7 speeds (>5Gbps) enable...

- Immersive AR/VR collaboration
- Ultra-high definition 16K media streaming
- Maximized multi-gig broadband utilization
- Massive file sharing in a few seconds
- Huge capacity for many high-speed devices
- Enhanced battery life via energy efficiency

## Transformative Experiences



intel + BROADCOM

图片来源: [14]

### MediaTek(联发科): Filogic880&380chips [15,16]

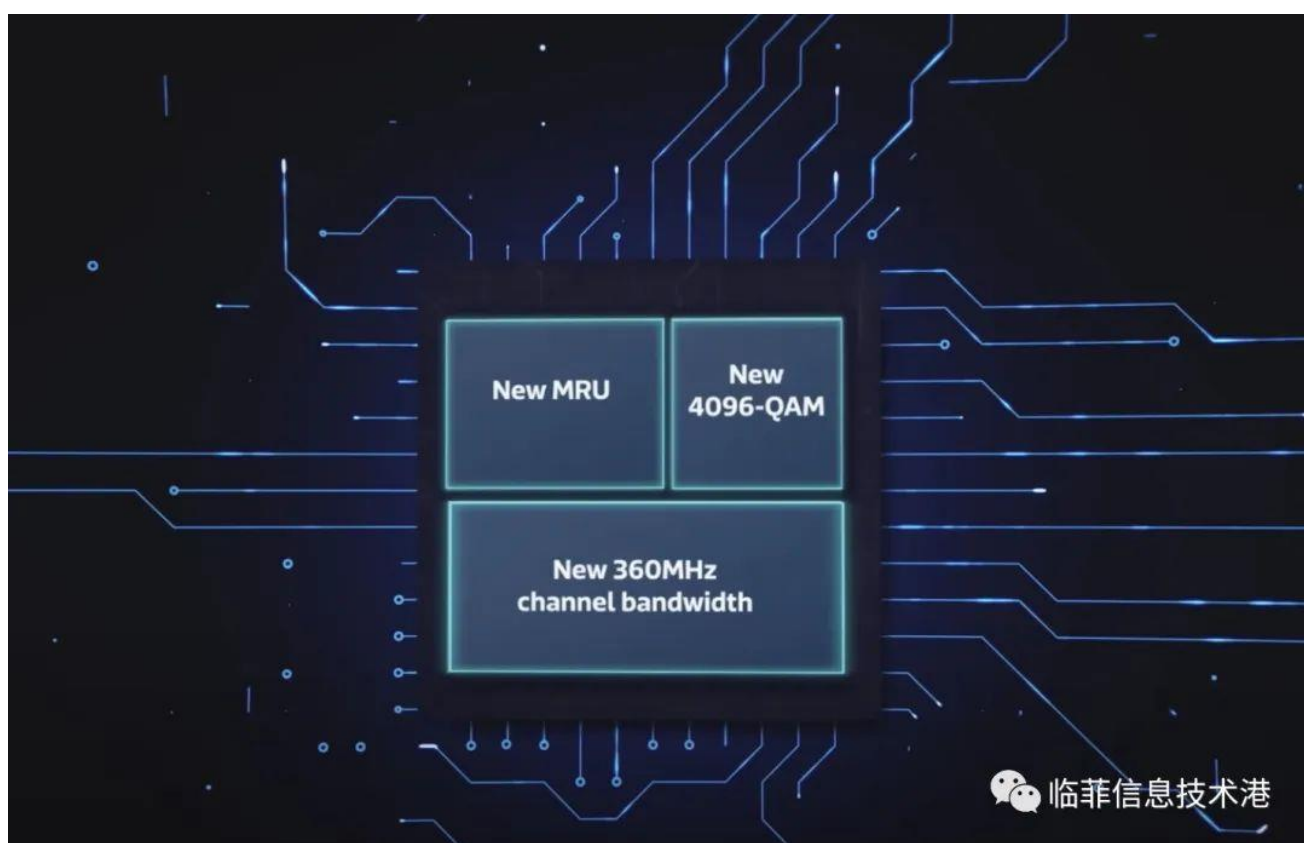
2022年1月,联发科向主要客户和行业合作伙伴展示了两个Wi-Fi 7演示,展示了该技术的超速度和低延迟传输。联发科的现场演示展示了其Wi-Fi 7技术如何实现IEEE 802.11be及其多链路操作(ML0)技术定义的最高速度。

Filogic880是Wi-Fi 7平台的旗舰产品,速率高达36Gps,用于路由器、中继器、mesh、网关和接入。独特的天线设计4T5R(quad-transmit, penta-receive)配置,使性能和范围最大化。高度集成的芯片设计,内置一流的四核CPU专用网络处理单元,确保最低延迟连接的新技术,以及全面的wifi7功能。

Filogic380适用于智能手机、平板电脑、笔记本电脑、个人电脑、可穿戴设备或其他需要最快无线连接的个人设备。这个单芯片Wi-Fi 7和蓝牙5.3客户端组合解决方案采用了最新技术。此外,联发科的创新共存设计确保用户能够最大限度地利用Wi-Fi和蓝牙,所有这些都装在一个6纳米芯片内。



联发科 Wi-Fi 7 芯片



Filogic880 主要特性示意图，来源：MediaTek 视频截图



Filogic380 主要特性示意图，来源：MediaTek 视频截图

### 参考资料:

- [1] Wi-Fi 联盟官网: <https://www.wi-fi.org>
- [2] IEEE P802.11be, <https://standards.ieee.org/ieee/802.11be/7516>
- [3] Rohde & Schwarz, Application Note, HINTS FOR IEEE 802.11BE EVM MEASUREMENTS, <https://www.rohde-schwarz.com/appnote/1EF114>
- [4] E. Khorov et al., Current Status and Directions of IEEE 802.11be, the Future Wi-Fi 7, IEEE Access, Volume 8, 2020
- [5] Adrian Garcia-Rodriguez, et al., IEEE 802.11be: Wi-Fi 7 Strikes Back, IEEE Communications Magazine, 2021, 59(4):102-108
- [6] Cailian Deng, et al., IEEE 802.11be Wi-Fi 7: New Challenges and Opportunities, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol.22, No.4, 2020

- [7] Lyutianyang Zhang, et al., Multiaccess Point Coordination for Next-Gen Wi-Fi Networks Aided by Deep Reinforcement Learning, IEEE Systems Journal, 2022, Early Access Article
- [8] TP-Link launches seven consumer-grade Wi-Fi 7 APs, two Wi-Fi 7 routers for ISPs, and two for enterprise, <https://wifinowglobal.com>
- [9] TP-Link Unveils the World's 1st Complete WiFi 7 Networking Solution for Homes and Enterprises at the WiFi 7 Product Launch , <https://www.tp-link.com/en/press/news/20273/>
- [10] (多媒体) 华为 Wi-Fi 7 AP 全球首发: AirEngine 87 , <https://support.huawei.com/enterprise/zh/doc/EDOC1100278588>(发布时间:2022-11-25)
- [11] Latest Qualcomm platform release could mean first Wi-Fi 7 phones only months away, <https://wifinowglobal.com/>
- [12] FastConnect 7800, <https://www.qualcomm.com/>
- [13] Broadcom & Intel demonstrate 5Gbps Wi-Fi 7 to the FCC in WashingtonDC, <https://wifinowglobal.com/>(发布日期: November 1, 2022)
- [14] Broadcom Intel Attachment (Oct292022).pdf(fcc.gov)
- [15] Key Advantages of Wi-Fi 7: Performance, MRU & MLO , Mediatek White Paper
- [16] <https://www.mediatek.com/technology/wi-fi-7>



临菲信息技术港



临菲信息技术港(公众号)



腾讯·临菲课堂



临菲编程(公众号)