



工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

工业互联网

Wi-Fi 6 技术白皮书

(2021 年)

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

工业互联网产业联盟 (AII)

2022 年 12 月

声 明

本报告所载的材料和信息，包括但不限于文本、图片、数据、观点、建议，不构成法律建议，也不应替代律师意见。本报告所有材料或内容的知识产权归工业互联网产业联盟所有（注明是引自其他方的内容除外），并受法律保护。如需转载，需联系本联盟并获得授权许可。未经授权许可，任何人不得将报告的全部或部分内容以发布、转载、汇编、转让、出售等方式使用，不得将报告的全部或部分内容通过网络方式传播，不得在任何公开场合使用报告内相关描述及相关数据图表。违反上述声明者，本联盟将追究其相关法律责任。

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

工业互联网产业联盟

联系电话：010-62305887

邮箱：aia@caict.ac.cn

编写说明

园区作为工业互联网企业集聚区，部署了大量基础设施，为企业用户提供了众多的公共服务。随着物联网和无线通讯的发展，工业园区的终端数量将会呈现爆发式增长，采用 5G、Wi-Fi 6 等新无线技术促进工业现场设备的全面联接，促进工业互联网的建设，帮助工厂降本增效非常有必要。

在此形势下，工业互联网产业联盟（以下简称“联盟/AII”）组织多家企业联合撰写了《工业互联网 Wi-Fi 6 技术白皮书》。本白皮书首先分析了无线连接工业互联网的前景，接着介绍了 Wi-Fi 技术的发展历程，什么 Wi-Fi 6，工业 Wi-Fi 6 的典型应用场景，以及工业互联网为什么需要 Wi-Fi 6，介绍了 Wi-Fi 6 与 5G 的融合共存关系，最后对工业 Wi-Fi 6 的未来发展进行了展望。

本白皮书编写过程中，得到了 AII 联盟成员及国内外众多技术专家的大力支持，为白皮书的观点形成与编写提供了有力支撑。后续我们将根据业界的实践情况和各界的反馈意见，在持续深入研究的基础上适时修订和发布的新版本。

牵头编写单位：华为技术有限公司

参与编写单位：中国信息通信研究院，中国电信集团有限公司，广东九联科技股份有限公司，重庆大学，江苏亨通信息安全技术有限公司，江苏亨通工控安全研究院有限公司。

编写组成员：（排名不分先后）

华为技术有限公司

中国信息通信研究院

中国电信集团有限公司

重庆大学

广东九联科技股份有限公司

江苏亨通信息安全技术有限公司

江苏亨通工控安全研究院有限公司

黄亮、邓海洋

张恒升

邵震、潘毅明

蔡岳平

何云华，戴林皓

陈夏裕

章明飞



工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

目 录

1.	无线连接工业互联网前景	5
2.	Wi-Fi 技术发展历程	6
3.	什么是 Wi-Fi 6?	9
3.1	Wi-Fi 6 核心技术	10
3.2	其他 Wi-Fi 6 新特性	23
4.	工业 Wi-Fi 6 的典型应用场景	26
4.1	研发制造云化协同	26
4.2	VR 虚拟设计及展示	27
4.3	仓储物流手持 PDA	28
4.4	云化物流 AGV	29
4.5	AR 辅助装配	31
4.6	产品固件无线升级	32
4.7	云化机器视觉检测	33
4.8	无线物联融合	34
5.	工业互联为什么需要 Wi-Fi 6	35
6.	工业 Wi-Fi 6 与 5G 的融合共存	36
6.1	流量费用	37
6.2	覆盖范围	37
6.3	网络容量	38
6.4	终端生态	38
6.5	能耗	39
6.6	技术演进	40

7. 工业 Wi-Fi 6 未来发展趋势	40
7.1 工业 Wi-Fi 6 与 TSN 的结合	40
7.2 工业 Wi-Fi 6 产业发展建议	41



工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

1. 无线连接工业互联网前景

工业 4.0 趋势下，制造商开始利用数字化技术，实现对生产流程更透明的管控，以提高生产效率、降低生产成本和为客户提供更多的价值。工业 4.0 的前提需要工厂拥有高效的连接解决方案，需要一个智能、稳定、安全的工厂网络，然后才能挖掘到所需的大数据，并将这些数据转换成价值。

在大多数工业网络环境中，工厂里 90% 以上的对象都需要连接网线。不过，这实现起来并不容易，尤其是老旧的生产设备成为信息孤岛，不允许对数据进行采集和分析，这样使得管理者无法进一步了解和管理这些设备。

过去的工厂网络大多采用有线连接方式，要改装设备的成本较高，重新架设线缆产生难以估计的成本，而且会花费大量的时间，甚至导致生产停机，造成生产力和收入的下降。因此，厂商必需考虑重新布线带来的价值和成本是否符合投资回报预期。

未来工厂大量设备都要联网，包括机器人、移动 AGV，机床及其它自动化设备，会让连接变得更复杂，对于有线连接方式来说将是一项巨大的工程。工厂需要一种易于部署、易于管

理和易于使用的连接解决方案，以实现现场设备快速、轻松地相互通信。

无线网络给制造业生产过程创造了较大的灵活性，大大减少了调试新生产线的时间，即使生产线转换调整也便利了许多，使得制造商能够更快地响应并满足不断变化的客户需求。

2. Wi-Fi 技术发展历程

Wi-Fi 已成为当今世界无处不在的技术，为数十亿设备提供连接，也是越来越多的用户上网接入的首选方式，并且有逐步取代有线接入的趋势。为适应新的业务应用和减小与有线网络带宽的差距，每一代 802.11 的标准都在大幅度的提升其速率。

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，。

随着人们对网络传输速率的要求不断提升，在 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。同年，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，由于 2.4GHz 频段已经被到处使用，采用 5GHz 频段让 802.11a 具有更少冲突的优点。

2003 年，作为 802.11a 标准的 OFDM 技术也被改编为在 2.4 GHz 频段运行，从而产生了 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)。

对 Wi-Fi 影响比较重要的标准是 2009 年发布的 802.11n，这个标准对 Wi-Fi 的传输和接入进行了重大改进，引入了 MIMO、安全加密等新概念和基于 MIMO 的一些高级功能（如波束成形，空间复用.....），传输速度达到 600Mbit/s。此外，802.11n 也是第一个同时工作在 2.4 GHz 和 5 GHz 频段的 Wi-Fi 技术。

然而，移动业务的快速发展和高密度接入对 Wi-Fi 网络的带宽提出了更高的要求，在 2013 年发布的 802.11ac 标准引入了更宽的射频带宽（提升至 160MHz）和更高阶的调制技术（256-QAM），传输速度高达 1.73Gbps，进一步提升 Wi-Fi 网络吞吐量。另外，在 2015 年发布了 802.11ac wave2 标准，

将波束成形和 MU-MIMO 等功能推向主流，提升了系统接入容量。但遗憾的是 802.11ac 仅支持 5GHz 频段的终端，削弱了 2.4GHz 频段下的用户体验。

然而，随着视频会议、无线互动 VR、移动教学等业务应用越来越丰富，Wi-Fi 接入终端越来越多，IoT 的发展更是带来了更多的移动终端接入无线网络，甚至以前接入终端较少的家庭 Wi-Fi 网络也将随着越来越多的智能家居设备的接入而变得拥挤。因此 Wi-Fi 网络仍需要不断提升速度，同时还需要考虑是否能接入更多的终端，适应不断扩大的客户端设备数量以及不同应用的用户体验需求。

新一代 Wi-Fi 需要解决更多终端的接入导致整个 Wi-Fi 网络效率降低的问题，早在 2014 年 IEEE 802.11 工作组就已经开始着手应对这一挑战，在 2019 年正式推出的 Wi-Fi 6 标准将引入上行 MU-MIMO、OFDMA 频分复用、1024-QAM 高阶编码等技术，将从频谱资源利用、多用户接入等方面解决网络容量和传输效率问题。

3. 什么是 Wi-Fi 6?

Wi-Fi 6 是下一代 Wi-Fi 6 标准的简称。随着 Wi-Fi 标准的演进，WFA 为了便于 Wi-Fi 用户和设备厂商轻松了解其设备连接或支持的 Wi-Fi 型号，选择使用数字序号来对 Wi-Fi 重新命名。另一方面，选择新一代命名方法也是为了更好地突出 Wi-Fi 技术的重大进步，它提供了大量新功能，包括增加的吞吐量和更快的速度、支持更多的并发连接等。根据 WFA 的公告，现在的 Wi-Fi 命名分别对应如下 802.11 技术标准：

发布年份	802.11 标准	频段	新命名
2009	802.11n	2.4 GHz 或 5 GHz	Wi-Fi 4
2013	802.11ac wave1	5 GHz	Wi-Fi 5
2015	802.11ac wave2	5 GHz	
2019	Wi-Fi 6	2.4 GHz 或 5 GHz	Wi-Fi 6

表格 3- 1 802.11 标准与新命名

和以往每次发布新的 802.11 标准一样，Wi-Fi 6 也将兼容之前的 802.11ac/n/g/a/b 标准，老的终端一样可以无缝接入 Wi-Fi 6 网络。

3.1 Wi-Fi 6 核心技术

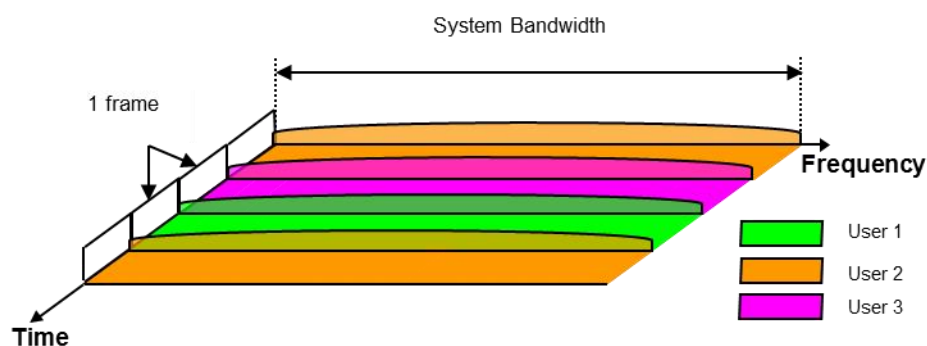
Wi-Fi 6(Wi-Fi 6)继承了 Wi-Fi 5(802.11ac)的所有先进 MIMO 特性，并新增了许多针对高密部署场景的新特性。以下是 Wi-Fi 6 的核心新特性：

- OFDMA 频分复用技术
- DL/UL MU-MIMO 技术
- 更高阶的调制技术 (1024-QAM)
- 空分复用技术 (SR) & BSS Coloring 着色机制
- 扩展覆盖范围 (ER)

下面详细描述这些核心新特性。

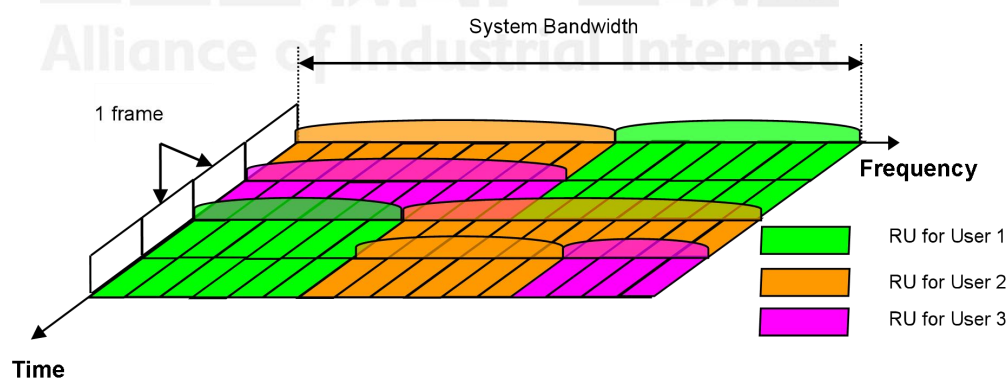
3.1.1 OFDMA 频分复用技术

Wi-Fi 6 之前，数据传输采用的是 OFDM 模式，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（如下图）。



图表 3- 1 OFDM 工作模式

Wi-Fi 6 中引入了一种更高效的数据传输模式，叫 OFDMA（因为 Wi-Fi 6 支持上下行多用户模式，因此也可称为 MU-OFDMA），它通过将子载波分配给不同用户并在 OFDM 系统中添加多址的方法来实现多用户复用信道资源。迄今为止，它已被许多无线技术采用，例如 3GPP LTE。此外，Wi-Fi 6 标准也仿效 LTE，将最小的子信道称为“资源单位(Resource Unit, 简称 RU)”，每个 RU 当中至少包含 26 个子载波，用户是根据时频资源块 RU 区分出来的。我们首先将整个信道的资源分成一个个小的固定大小的时频资源块 RU。在该模式下，用户的数据是承载在每一个 RU 上的，故从总的时频资源上来看，每一个时间片上，有可能有多个用户同时发送（如下图）。

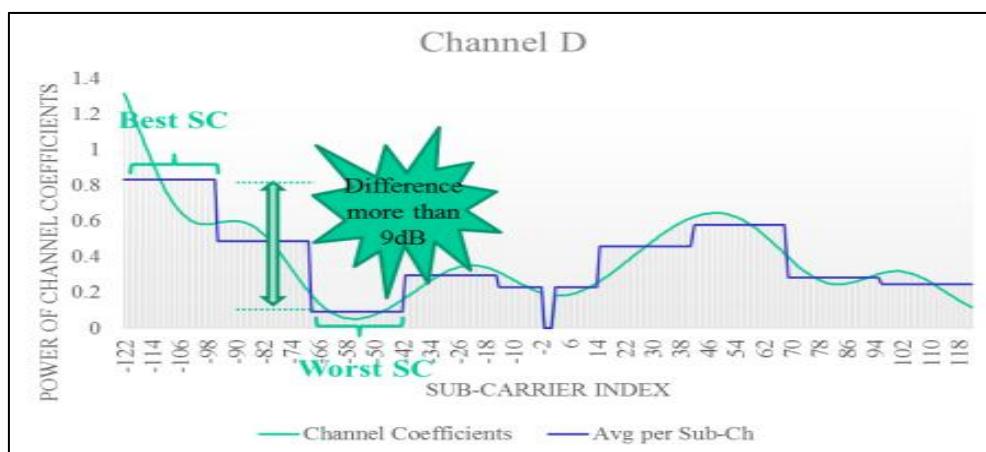


图表 3- 2 OFDMA 工作模式

OFDMA 相比 OFDM 一般有三点好处：

- **更细的信道资源分配。**

特别是在部分节点信道状态不太好的情况下，可以根据信道质量分配发送功率，来更细腻化的分配信道时频资源。下图呈现出了不同子载波频域上的信道质量差异较大，Wi-Fi 6 可根据信道质量选择最优 RU 资源来进行数据传输。



图表 3- 3 不同子载波频域上的信道质量

- **提供更好的 QOS**

因为 802.11ac 及之前的标准都是占据整个信道传输数据的，如果有一个 QOS 数据包需要发送，其一定要等之前的发送者释放完整信道才行，所以会存在较长的时延。在 OFDMA 模式下，由于一个发送者只占据整个信道的部分资源，一次可以发送多个用户的数据，所以能够减少 QOS 节点接入的时延。

- **更多的用户并发及更高的用户带宽**

OFDMA 是通过将整个信道资源划分成多个子载波（也可称为子信道），子载波又按不同 RU 类型被分成若干组，每个用户可以占用一组或多组 RU 以满足不同带宽需求的业务。Wi-Fi 6 中最小 RU 尺寸为 2MHz，最小子载波带宽是 78.125KHz，因此最小 RU 类型为 26 子载波 RU。以此类推，还有 52 子载波 RU，106 子载波 RU，242 子载波 RU，484 子载波 RU 和 996 子载波 RU，下表显示了不同信道带宽下的最大 RU 数。

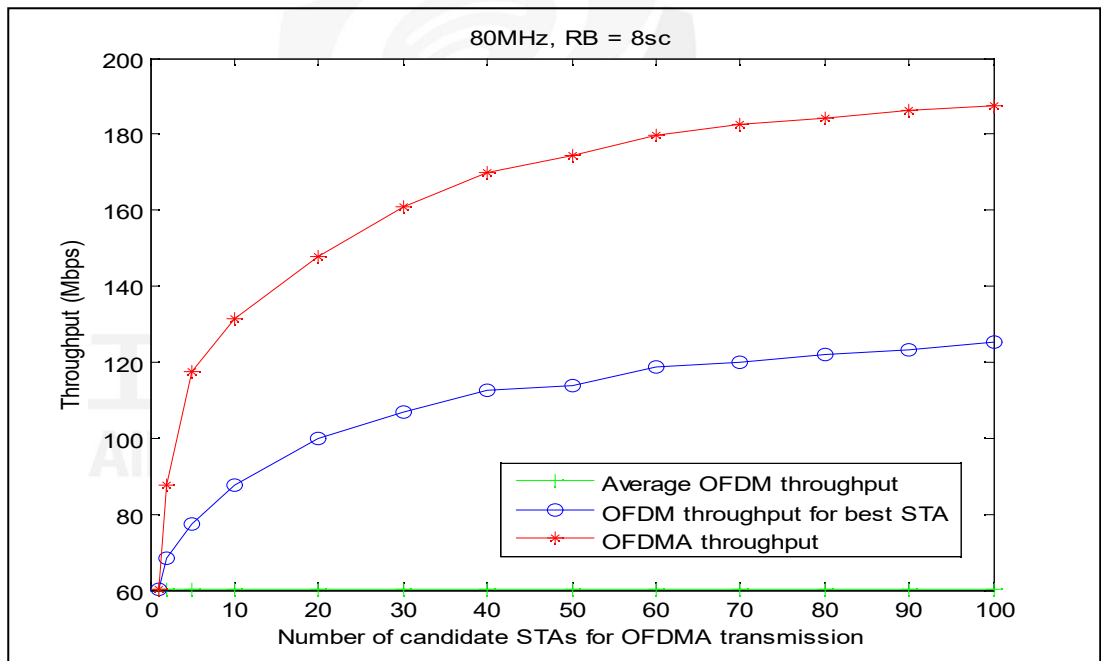
RU type	CBW20	CBW40	CBW80	CBW160 and CBW80+80
26-subcarrier RU	9	18	37	74
52-subcarrier RU	4	8	16	32
106-subcarrier RU	2	4	8	16
242-subcarrier RU	1-SU/MU- MIMO	2	4	8
484-subcarrier RU	N/A	1-SU/MU- MIMO	2	4
996-subcarrier RU	N/A	N/A	1-SU/MU- MIMO	2
2x996-subcarrier RU	N/A	N/A	N/A	1-SU/MU-MIMO

表格 3- 2 不同频宽下的 RU 数量



图表 3- 4 RU 在 20MHz 中的位置示意图

RU 数量越多，发送小包报文时多用户处理效率越高，吞吐量也越高，下图是仿真收益：



图表 3- 5 OFDMA 与 OFDM 模式下多用户吞吐量仿真

3.1.2 DL/UL MU-MIMO 技术

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，与 OFDMA 不同，所有用户都使用全部带宽，从而

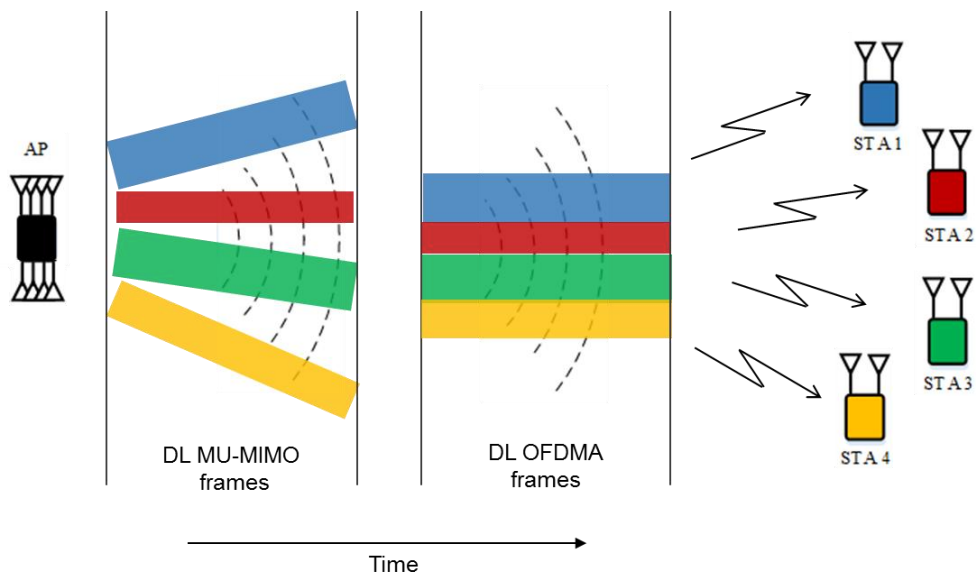
带来多路复用增益。终端受天线数量受限于尺寸，一般来说只有 1 个或 2 个空间流（天线），比 AP 的空间流（天线）要少，因此，在 AP 中引入 MU-MIMO 技术，同一时刻就可以实现 AP 与多个终端之间同时传输数据，大大提升了吞吐量。



图表 3- 6 SU-MIMO 与 MU-MIMO 吞吐量差异

- **DL MU-MIMO 技术**

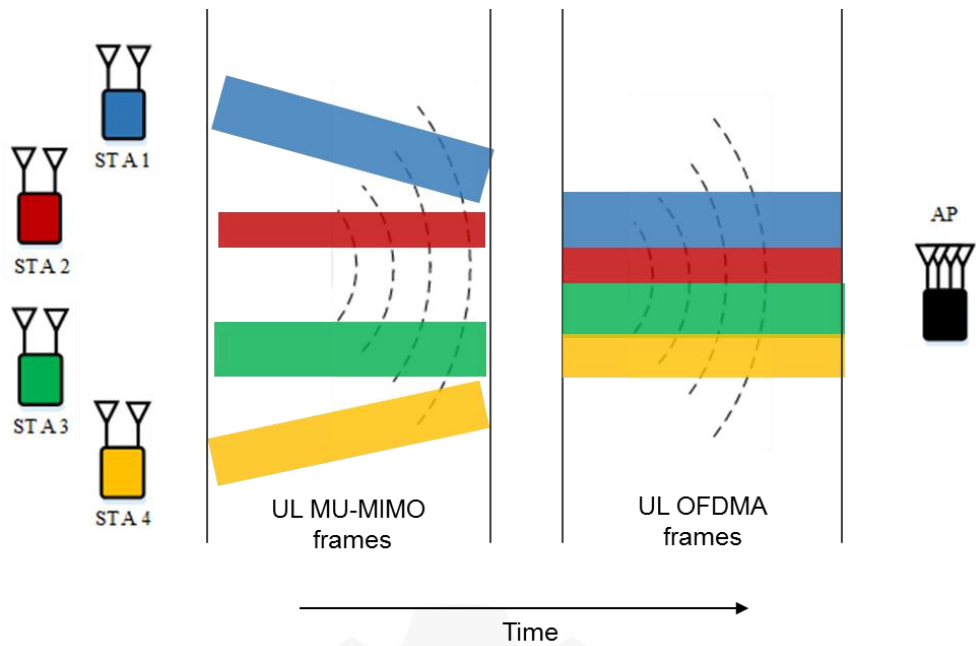
MU-MIMO 在 802.11ac 就已经引入，但只支持 DL 4x4 MU-MIMO（下行）。在 Wi-Fi 6 中进一步增加了 MU-MIMO 数量，可支持 DL 8x8 MU-MIMO，借助 DL OFDMA 技术（下行），可同时进行 MU-MIMO 传输和分配不同 RU 进行多用户多址传输，既增加了系统并发接入量，又均衡了吞吐量。



图表 3- 7 8x8 MU-MIMO AP 下行多用户模式调度顺序

• UL MU-MIMO 技术

UL MU-MIMO (上行) 是 Wi-Fi 6 中引入的一个重要特性, UL MU-MIMO 的概念和 UL SU-MIMO 的概念类似, 都是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数据, 唯一的差别点在于 UL MU-MIMO 的多个数据流是来自多个用户。802.11ac 及之前的 802.11 标准都是 UL SU-MIMO, 即只能接受一个用户发来的数据, 多用户并发场景效率较低, Wi-Fi 6 支持 UL MU-MIMO 后, 借助 UL OFDMA 技术 (上行), 可同时进行 MU-MIMO 传输和分配不同 RU 进行多用户多址传输, 提升多用户并发场景效率, 大大降低了应用时延。



图表 3- 8 多用户模式上行调度顺序

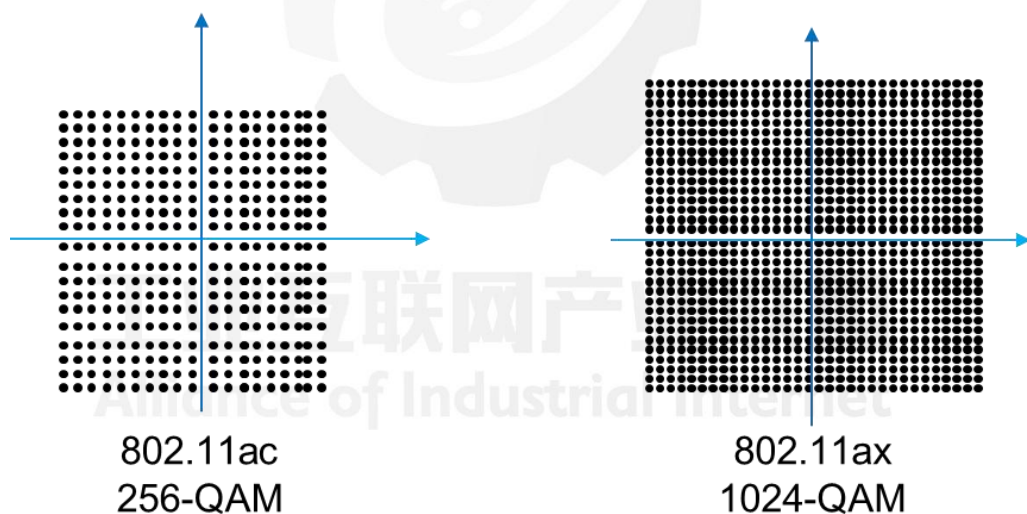
虽然 Wi-Fi 6 标准允许 OFDMA 与 MU-MIMO 同时使用，但不要 OFDMA 与 MU-MIMO 混淆。OFDMA 支持多用户通过细分信道（子信道）来提高并发效率，MU-MIMO 支持多用户通过使用不同的空间流来提高吞吐量。下表是 OFDMA 与 MU-MIMO 的对比：

OFDMA	MU-MIMO
提升效率	提升容量
降低时延	每用户速率更高
最适合低带宽应用	最适合高带宽应用
最适合小包报文传输	最适合大包报文传输

表格 3- 3 OFDMA 与 MU-MIMO 对比

3.1.3 更高阶的调制技术 (1024-QAM)

Wi-Fi 6 标准的主要目标是增加系统容量，降低时延，提高多用户高密场景下的效率，但更好的效率与更快的速度并不互斥。802.11ac 采用的 256-QAM 正交幅度调制，每个符号传输 8bit 数据 ($2^8=256$)，Wi-Fi 6 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，Wi-Fi 6 的单条空间流数据吞吐量又提高了 25%。



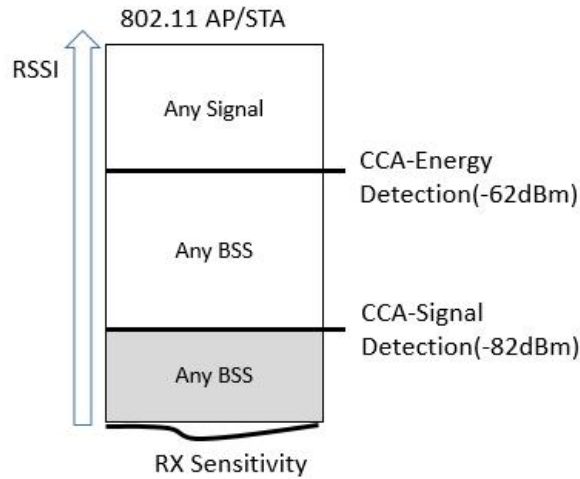
图表 3- 9 256-QAM 与 1024-QAM 的星座图对比

需要注意的是 Wi-Fi 6 中成功使用 1024-QAM 调制取决于信道条件，更密的星座点距离需要更强大的 EVM（误差矢量幅度，用于量化无线电接收器或发射器在调制精度方面的性能）和接受灵敏度功能，并且信道质量要求高于其他调制类型。

3.1.4 空分复用技术 (SR) & BSS Coloring 着色机制

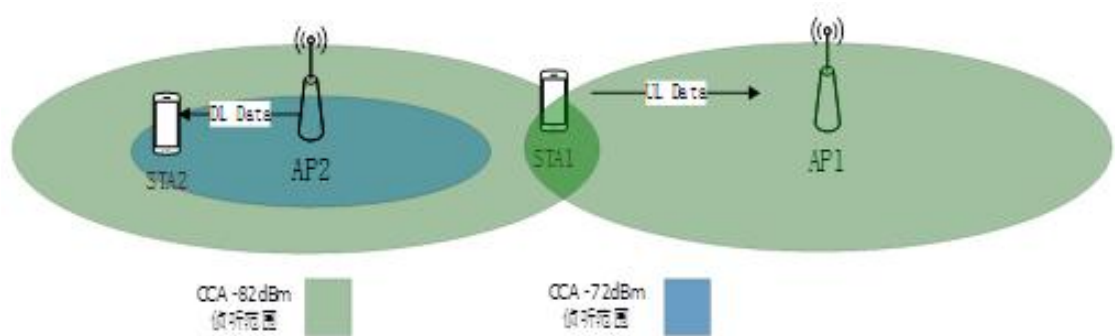
Wi-Fi 射频的传输原理是在任何指定时间内，一个信道上只允许一个用户传输数据，如果 Wi-Fi AP 和客户端在同一信道上侦听到有其他 802.11 无线电传输，则会自动进行冲突避免，推迟传输，因此每个用户都必须轮流使用。所以说信道是无线网络中非常宝贵的资源，特别在高密场景下，信道的合理划分和利用将对整个无线网络的容量和稳定性带来较大的影响。Wi-Fi 6 可以在 2.4GHz 或 5GHz 频段运行（与 802.11ac 不同，只能在 5GHz 频段运行），高密部署时同样可能会遇到可用信道太少的问题（特别是 2.4GHz 频段），如果能够提升信道的复用能力，将会对提升系统的吞吐容量。

802.11ac 及之前的标准，通常采用动态调整 CCA 门限的机制来改善同频信道间的干扰，通过识别同频干扰强度，动态调整 CCA 门限，忽略同频弱干扰信号实现同频并发传输，提升系统吞吐容量。



图表 3- 10 802.11 默认 CCA 门限

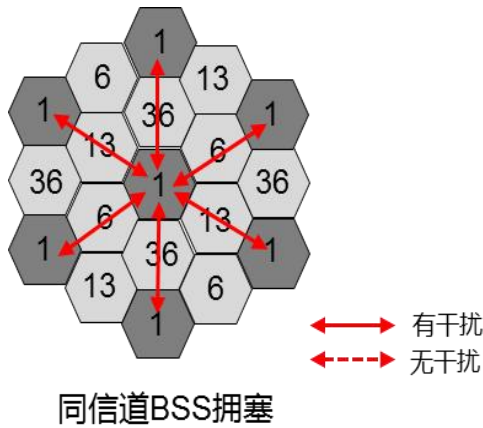
例如图 12，AP1 上的 STA1 正在传输数据，此时，AP2 也想向 STA2 发送数据，根据 Wi-Fi 射频传输原理，需要先侦听信道是否空闲，CCA 门限值默认 -82dBm，发现信道已被 STA1 占用，那么 AP2 由于无法并行传输而推迟发送。实际上，所有的与 AP2 相关联的同信道客户端都将推迟发送。引入动态 CCA 门限调整机制，但 AP2 侦听到同频信道被占用时，可根据干扰强度调整 CCA 门限侦听范围（比如说从 -82dBm 提升到 -72dBm），规避干扰带来的影响，即可实现同频并发传输。



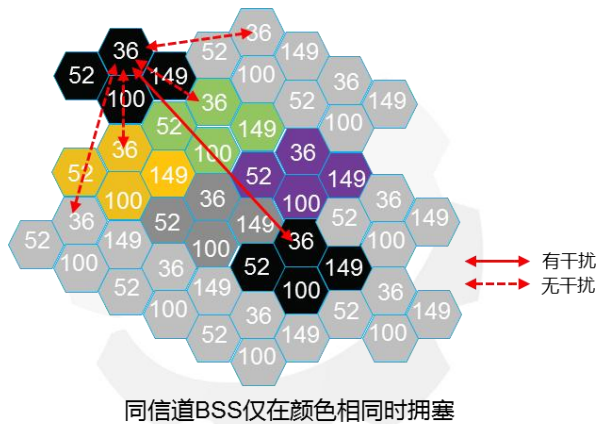
图表 3- 11 动态 CCA 门限调整

由于 Wi-Fi 客户端设备的移动性，Wi-Fi 网络中侦听到的同频干扰不是静态的，它会随着客户端设备的移动而改变，因此引入动态 CCA 机制是很有效的。

Wi-Fi 6 中引入了一种新的同频传输识别机制，叫 BSS Coloring 着色机制，在 PHY 报文头中添加 BSS color 字段对来自不同 BSS 的数据进行“染色”，为每个通道分配一种颜色，该颜色标识一组不应干扰的基本服务集（BSS），接收端可以及早识别同频传输干扰信号并停止接收，避免浪费收发机时间。如果颜色相同，则认为是一 BSS 内的干扰信号，发送将推迟；如果颜色不同，则认为两者之间无干扰，两个 Wi-Fi 设备可同信道同频并行传输。以这种方式设计的网络，那些具有相同颜色的信道彼此相距很远，此时我们再利用动态 CCA 机制将这种信号设置为不敏感，事实上它们之间也不太可能会相互干扰。



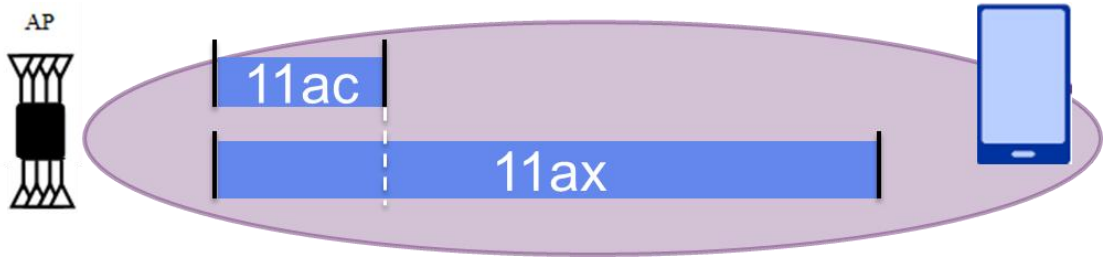
图表 3- 12 无 BSS Color 机制



图表 3- 13 有 BSS Color 机制对比

3.1.5 扩展覆盖范围 (ER)

由于 Wi-Fi 6 标准采用的是 Long OFDM symbol 发送机制，每次数据发送持续时间从原来的 3.2us 提升到 12.8us，更长的发送时间可降低终端丢包率；另外 Wi-Fi 6 最小可仅使用 2MHz 频宽进行窄带传输，有效降低频段噪声干扰，提升了终端接受灵敏度，增加了覆盖距离。



图表 3- 14 Long OFDM symbol 与窄带传输带来覆盖距离提升

3.2 其他 Wi-Fi 6 新特性

前面的几大核心技术已经足够证明 Wi-Fi 6 带来的高效传输和高密容量，但 Wi-Fi 6 也不是 Wi-Fi 的最终标准，这只是高效无线网络的开始，新标准的 Wi-Fi 6 依然需要兼容老标准的设备，并考虑面向未来物联网、绿色节能等方向的发展趋势。以下是 Wi-Fi 6 标准的其他新特性：

- 支持 2.4GHz 频段
- 目标唤醒时间 (TWT)

下面详细描述这些新特性。

3.2.1 支持 2.4GHz 频段

我们都知道 2.4GHz 频宽窄，且仅有 3 个 20MHz 的互不干扰信道（1,6 和 11），在 802.11ac 标准中已经被抛弃，但是有一点不可否认的是 2.4GHz 仍然是一个可用的 Wi-Fi 频段，在很多场景下依然被广泛使用，因此，Wi-Fi 6 标准中选择继续支持 2.4GHz，目的就是要充分利用这一频段特有的优势。

➤ 优势一：覆盖范围

无线通信系统中，频率较高的信号比频率较低的信号更容易穿透障碍物，而频率越低，波长越长，绕射能力越强，穿透能力越差，信号损失衰减越小，传输距离越远。虽然 5GHz 频段可带来更高的传播速度，但信号衰减也越大，所以传输距离比 2.4GHz 要短。因此，我们在部署高密无线网络时，2.4GHz 频段除了用于兼容老旧设备，还有一个很大的作用就是边缘区域覆盖补盲。

➤ 优势二：低成本

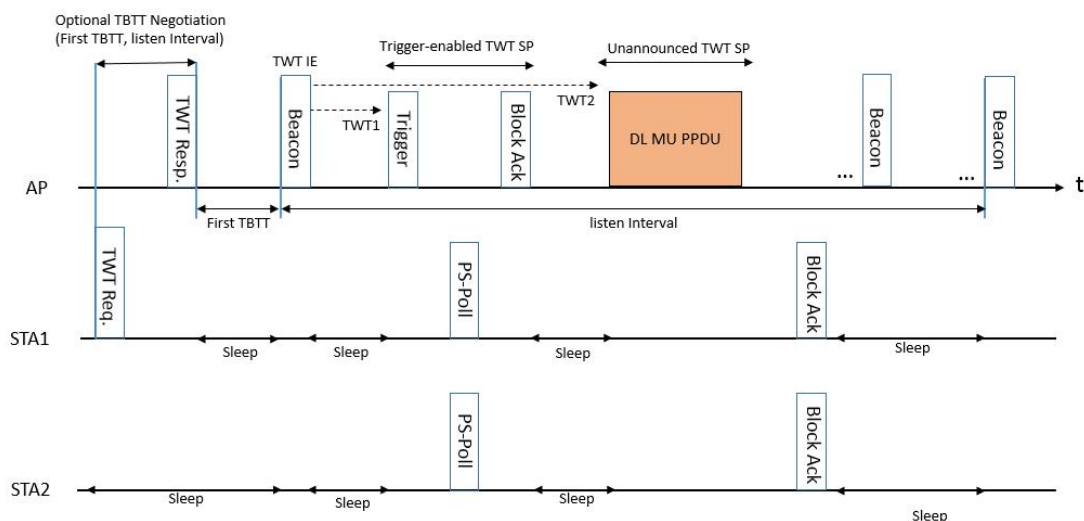
现阶段仍有数以亿计的 2.4GHz 设备在线使用，就算如今成为潮流的 IoT 网络设备也使用的 2.4GHz 频段，对有些流量不大的业务场景（如电子围栏、资产管理等），终端设备非常多，使用成本更低的仅支持 2.4GHz 的终端是一个性价比非常高的选择。

3.2.2 目标唤醒时间 (TWT)

目标唤醒时间 TWT (Target Wakeup Time) 是 Wi-Fi 6 支持的另一个重要的资源调度功能，它借鉴于 802.11ah 标准。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。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。TWT 还增加了设备睡眠时间，对采用电池供电的终端来说，大大提高了电池寿命。

Wi-Fi 6 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，这样就可以避开多个不同 STA 之间的竞争和重叠情况。另外，支持 Wi-Fi 6 标准的 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。AP 还可另外设定 TWT 编排计划并将 TWT 值提供给 STA，这样双方之间就不需要存在个别的 TWT 协议，此操作称为“广播 TWT 操作”。



4. 工业 Wi-Fi 6 的典型应用场景

Wi-Fi 诞生起就因为其高带宽、频段免申请，性价比高等特点广泛应用于工业生产，根据 HMS 统计，是目前应用于工业最广泛的无线技术，占每年新增工业无线连接的 60%以上。

工业 Wi-Fi 目前已经广泛应用于工业设计研发、办公、物流、生产制造等各个方面：

4.1 研发制造云化协同

Wi-Fi 已经广泛用于日常办公、生产网络，通常运行企业的邮件系统，即时通讯系统，网页电子流系统，研发、生产强相关的云化 CAD、CAE、MES 等系统。由于生产环境信号干扰等无线网络的不确定性较强，需要 Wi-Fi 网络能保证网络上各种业务的服务质量，避免因带宽原因导致应用缓慢，避免因服务质量保证能力不足影响实时语音/视频类业务导致沟通不畅；同时无线办公网络需要引入认证服务器，由企业自主控制使能网络设备上的用户接入控制，解决内外部用户无线接入安全性问题。

典型应用	通信带宽	通信时延	应用范围
办公应用	10Mbps-100Mbps	100ms	即时通讯、网页、邮件、办公 OA
云化 CAD	50Mbps-100Mbps	50ms	云化 CAD、CAE、桌面云等
准入控制及权限管理	-	-	用户接入认证、安全策略控制

图表 4- 1 企业办公对于 Wi-Fi 网络的技术需求

注：数据来源于某汽车集团研发办公大楼项目

4.2 VR 虚拟设计及展示

虚拟现实（VR），是一种可以创建和体验虚拟世界的计算机仿真系统，利用计算机生成一种模拟环境，使用户沉浸到该环境中。虚拟现实技术就是利用现实生活中的数据，通过计算机技术产生的电子信号，将其与各种输出设备结合使其转化为能够让人们感受到的现象，并通过三维模型表现出来。目前 VR 的在工业互联网中主要应用在虚拟装配、虚拟培训、虚拟展厅等场景：VR 虚拟装配是工业设计必不可少的审核环节，可以在设计接口、部件外观大小等方面最大化优化产品实际装配时的能效；VR 虚拟培训相较于传统的课堂更能全面、及时反馈，相比于教科书里面难懂的文字和需要考验学生想象力的平面图，虚拟现实的场景表达更直观，并传递更多的信息；VR 虚拟展厅

将展厅及展示产品 3D 化，带给观展者足不出户就能身临现场的体验。

典型应用	沉浸等级	速率要求	时延	应用范围
VR 虚拟应用	初步沉浸	25Mbps	<40ms	虚拟展示等静态展示
	部分沉浸	100Mbps	<30ms	虚拟培训等交互场景
	深度沉浸	400Mbps	<20ms	虚拟装配等强交互场景
	完全沉浸	1Gbps	<20ms	强交互，全沉浸场景

图表 4- 2 VR 对于 Wi-Fi 网络的技术需求

注：数据来源于华为 iLab 《面向 Cloud VR 的承载网络白皮书》

4.3 仓储物流手持 PDA

仓储物流信息管理系统可以提高供应链管理的透明度和库存周转率，有效减少缺货损失，提高企业内的仓储物流效率。工作人员可通过操作集成 RFID 读卡器、二维码扫描等功能的手持终端（PDA），在作业现场直接完成入库/出库/盘点管理、基本/系统信息管理和数据统计分析等各个环节，降低人工操作

的效率和差错率; 利用 Wi-Fi 网络的方式进行数据交互, 通过对数据权限控制管理, 数据处理具备完善的纠错机制, 能够及时发现和处理差异数据, 具有灵活的数据处理机制。物流 PDA 已经广泛应用仓储、车间, 终端普遍采用 Wi-Fi 4/5 技术, 兼容存量终端。

典型应用	速率要求	时延	应用范围
PDA 终端	2Mbps	<100ms	仓储、生产现场

图表 4- 3 PDA 对于 Wi-Fi 网络的技术需求

注: 数据来源于某大型仓储物流企业智慧物流项目

4.4 云化物流 AGV

自动导引运输车 (AGV), 指装备有电磁或光学等自动导引装置, 能够沿规定的导引路径行驶, 具有安全保护以及各种移载功能的运输车。AGV 不需驾驶员, 以可充电之蓄电池为其动力来源, 一般可透过电脑来控制其行进路线以及行为。AGV 的活动区域无需铺设轨道、支座架等固定装置, 因而在自动化物流系统中能充分地体现其自动性和柔性, 实现高效、经济、灵活的无人化生产。在制造业, 多台 AGV 组成柔性生产搬运系统, 运行路线可以随着生产工艺流程的调整而及时调整, 大大提高了生产的柔性和企业的竞争力。对于港口、码头和机场

等密集搬运场所，AGV 被赋予了更为强大的并行化、自动化、智能化等特性。在一些特殊环境要求的场景，如医药、食品、化工，甚至危险场所和特种行业，AGV 除了基本的搬运工作外，还自带多种传感器，可以执行检查、探测、自动识别等工作。

所谓云化 AGV，是把 AGV 上位机运行的定位、导航、图像识别及环境感知等需要复杂计算能力需求的模块上移到边缘服务器，以满足 AGV 日益增长的计算需求，而运动控制/紧急避障等实时性要求更高的模块仍然保留在 AGV 本体以满足安全性等要求。这相当于在云端为 AGV 增加了一个大脑，除 AGV 原有的复杂计算以外，各种各样的 AI 能力扩展成为可能。

典型应用	上行带宽	通信时延	应用范围
云化 AGV 调度通信	~1Mbps	<100ms	AGV 调度通信、状态管理等。
云化 AGV 实时通信需求 (SLAM)	1Mbps-200Mbps	20-40ms	通信调度及业务数据实时交互（网络需求按移动速度、终端传感器预处理方案不同而不同）
云化 AGV 集成其它视觉应用需求	10Mbps-1Gbps	10-100ms	AGV 集成其它应用通信（与终端传感器、应用密切相关）

图表 4- 4 云化 AGV 对于无线网络的需求

注：数据来源于华为南方工厂 AGV 调研

4.5 AR 辅助装配

增强现实（AR）是人工智能和人机交互的交叉的学科，是一种实时地计算摄影机影像的位置及角度并加上相应图像、视频、3D 模型的技术，也是一种把真实世界和虚拟世界信息有机集成的技术。AR 把原本在现实世界一定时空范围内很难体验到的实体信息（主要包括视觉和听觉信息）通过计算机模拟仿真后叠加，将虚拟的信息应用到真实世界并被人类感官所感知，从而达到超越现实的感官体验。AR 远程协助，后台专家可以通过语音视频通讯、AR 实时标注进行远程协作，实现了现场人员和远程专家的“零距离”沟通，大大提高了工业生产、设备维修、专业培训等价值链的效率。

典型应用	通信速率	通信时延	应用范围
维修指导	>50Mbps（下行）； >20Mbps（上行）	<50ms	工厂设备维保
辅助装配	>50Mbps（上行）	<50ms	设备辅助装配于远程协助

图表 4- 5 AR 远程协助对于 Wi-Fi 网络的需求

注：数据来源于某大型模具企业调研

4.6 产品固件无线升级

手机、PC、汽车、家电等传统产品数字化功能增强，受特斯拉的影响，全球汽车制造商开始提供在线升级能力，这几年来纯电动汽车基本都具备了在线升级能力。大多数数字化产品上都有 Wi-Fi 联网模块，可以让汽车等能够数据传输的软件、硬件实现上传、下载、代码更新等功能。

在产品生产过程中，通过 Wi-Fi 进行在线升级，可以减少线缆插拔的次数，可以减少操作人员，避免物理接口磨损，Wi-Fi 固件升级逐渐成为整机生产完成后进行软件加载环节的标配。

典型应用	通信速率	通信时延	应用范围
产品数据包 加载	>200Mbps	<200ms	车间整机测试

图表 4- 6 整机固件升级对于 Wi-Fi 网络的需求

注：数据来源于华为手机产线、某大型车企总装车间

4.7 云化机器视觉检测

机器视觉是人工智能的一个重要分支，在工业上的应用极为广泛，可以有效提高生产的柔性和自动化水平。适用于一些人工作业的危险工作环境或者人工难以满足要求的场合。目前机器视觉的应用主要包含五大类，包括图像识别、图像检测、视觉定位、物体测量、物体分拣等。

为了保证判别结果的准确性和应用的正常运作，整套系统的信号传输是一个关键的因素。通过 Wi-Fi 回传机器视觉工业相机数据，系统可以实现云化实时远程监测功能。依托 Wi-Fi 高速率、大连接特性，不用进车间即可通过移动终端和便携终端监视制造企业生产过程执行管理系统（MES），获取视觉检测系统的运行状态，如正常运行时间，有效运行时间，故障原因等。

典型应用	通信速率	通信时延	应用范围
图像信息实时上传	>250Mbps	<50ms	工业相机将需要处理的图片上传到边缘云处理服务器

MES 系统信息反馈	>1Mbps	<100ms	所有数据反馈应用场合
------------	--------	--------	------------

图表 4- 7 机器视觉对于 Wi-Fi 网络的需求

注：数据来源于华为手机产线

4.8 无线物联融合

由于生产车间使用大量终端，通过一种无线技术很难实现所有终端的全部接入，低功耗物联技术如: ZigBee、蓝牙、WirelessHART 等也广泛使用，用于人员、物料的高精度定位的 UWB 技术等；物联网终端的种类非常多,包括物联网网关、通信模块以及大量的行业终端，同时伴随着多而繁杂的通讯协议。如何实现灵活的物联扩展能力，使得各种协议的终端轻松接入网络。

典型应用	物联融合诉求
统一无线物联网关	减少物联基站部署，避免增加线缆铺设
装备、物料、人员高精度定位	定位精度<50cm
无纸化车间	电子墨水屏，无线 ESL 的应用

图表 4- 8 物联融合对于 Wi-Fi 网络的需求

注：数据来源于华为南方工厂、某汽车集团总装车间、某家电企业车间

5. 工业互联为什么需要 Wi-Fi 6

Wi-Fi 6 设计之初就是为了适用于高密度无线接入和高容量无线业务，在工业互联场景下的产品、产线的 VR 规划设计、AR 辅助装配、车间现场高清晰视频回传、高密度 AGV 无人仓、物联网全连接工厂等。

在这些场景中，接入 Wi-Fi 网络的客户端设备将呈现巨大增长，还在不断增加的语音及视频流量也对 Wi-Fi 网络带来挑战，我们都知道机器视觉质检（带宽要求 200Mbps/终端）、4K 视频流（带宽要求 30Mbps/终端）、语音流（时延小于 30ms）、VR 流（带宽要求 50Mbps/人，时延有小于 15ms）对带宽和时延是十分敏感的，如果网络拥塞或重传导致传输延时，将对用户体验带来较大影响。

而现有的 Wi-Fi 5 (802.11ac) 网络虽然也能提供大带宽能力，但是随着接入密度的不断上升，吞吐量性能遇到瓶颈。而 Wi-Fi 6 (802.11ax) 网络通过 OFDMA、UL MU-MIMO、1024-QAM 等技术使这些服务比以前更可靠，不但支持接入更

多的客户端，同时还能均衡每用户带宽。在工业制造场 Wi-Fi 6 网络将更容易应对。

6. 工业 Wi-Fi 6 与 5G 的融合共存

这不是一个新颖的话题，在 1999 年~2000 年间，就有人提出 2G 将替代 Wi-Fi 的观点;2008 年~2009 年也出现了 4G 将代替 Wi-Fi 的猜; 5G 与 Wi-Fi 的应用场景模式是不相同的，我们相信 Wi-Fi 和 5G 将长期共存下去。

在网络建设时，企业通常无法精确预估未来业务的发展，在做技术决策时往往难以选择，但是预留多种接口，根据应用场景选择多种技术融合是比较明智的选择。

在车间覆盖的时候统一考虑 Wi-Fi 6 与 5G 网络的覆盖，统一规划、根据业务需求分步骤实施建网，使用统一的无线网络规划工具可以很好的完成融合规划。

由于无线技术是通过空口进行信号收发，天然不如有线网络抗干扰能力强，特别是在生产这样对稳定性，单一的无线技术、无线频点始终存在干扰的可能性，5G + Wi-Fi 6 双频异构承载同时部署 5G 网络和 Wi-Fi 网络，提升无线网络的可靠性。

我们从以下几个角度进一步分析：

6.1 流量费用

假设 5G 技术取代 Wi-Fi，那么就**必须**推出无限流量的套餐，否则费用会远远大于宽带的使用的费用，目前光纤宽带的价格一年比一年低，使用 Wi-Fi 搭建企业内部无线网络总体成本更优。

当前的 4G 时代三大运营商都纷纷推出过无限流量的套餐，当时流量超出套餐的流量之后，网络会自动降为 2G 模式，最高速度只有 128Kbps，无法满足工业场景大带宽实时网络的带宽需求。

6.2 覆盖范围

5G 网络技术采用的是超高频频谱（5G 网络频段：24GHz~52GHz；4G 网络频段：1.8GHz~2.6GHz，不包括 2.4GHz），频率越高衍射现象越弱，穿越障碍的能力也就越弱，如果保持 5G 信号的覆盖需要比 4G 建设更多的基站。而且由于信号的衰减，如果在大楼的内部，隔着几道墙，信号衰减就更

加严重了。Wi-Fi 本身就是低成本室内覆盖的技术，通过高性价比 AP 的连续覆盖，可以很好解决室内遮挡问题。

6.3 网络容量

带宽 \times 频谱效率 \times 终端数量 = 总容量。5G 的优点在于它的载波聚合技术，提升了频谱利用率，大大提升了网络容量。在 3G/4G 时代，当用户在人群密集的场所如地铁、车站等地方使用手机上网时，可以明显感觉到上网延迟变大，网速变慢。而在 5G 时代，随着网络容量大幅提升上述现象带来的影响明显降低。也正是这样的特性，让人们觉得 5G 网络下可以无限量接入，但很多人忽视了一点，那就是随着物联网时代的到来，入网设备的数量也在大幅提升，如果真的所有的上网设备都直连区域内的基站，5G 有限的频带无法满足全部接入，而要想降低基站塔的负担，须依靠 Wi-Fi 来做分流。

6.4 终端生态

办公、物流、商业、智能家居等各行各业都在走向无线化，首先要做的就是设备、人员、终端等全部联网使用。现有智能无线终端基本都支持 Wi-Fi，5G 终端目前还比较少；同时工

厂现存大量 PDA、RF 等 Wi-Fi 4/5 设备，如果全部改造成 5G 几乎不可能完成，企业无线网络建设需兼容既有 Wi-Fi 终端。

6.5 能耗

大家都知道手机、pad 等移动终端都是用的电池，大家通常都认为电池的耐用性与安装的业务，和使用频率有关，但人们往往忽略了一点，终端的各种移动信号接入质量好与差也与电池耗电量有关。当信号变差时，移动终端为了确保给用户提供一个良好的体验，会自动增加发射功率来提升信号质量，这就导致电池耗电量增加。由于 Wi-Fi 的信号源基本是在室内范围，通常情况下 5G 的通信距离是 Wi-Fi 的几千倍以上，这样就需要手机的信号发射强度大大增加，这就增加了耗电量。曾经有人做过实验，以 4G 为例，使用网络数据半小时，Wi-Fi 会比移动网络节省 5% 的电量。另外，最新一代的 Wi-Fi 6 (Wi-Fi 6) 支持 TWT 功能，可以在业务需要时自动唤醒，在业务不适用时自动休眠，进一步节省了电量。

6.6 技术演进

5G 最重要的 3 个特征是高速度、大容量、低时延，其实最新一代的 Wi-Fi 也在不断演进，最新的 Wi-Fi 6 (Wi-Fi 6) 单流峰值速率 1.2Gbps (5G 网络峰值速率 1Gbps) ， 平均来看，Wi-Fi 每升级一代所用的时间大约只是移动网络的一半左右，未来 Wi-Fi 网络性能会持续提升。

综上所述，目前所面临的这些问题使得 5G 还无法彻底取代 Wi-Fi，更多的是 5G 与 Wi-Fi 进行深度融合，因此使用 Wi-Fi 的企业和用户并不用过于慌张。今天的 Wi-Fi 已不再是一个提供无线网络的设备，更多的应该被视为企业数字化转型的必备设施或中央枢纽。例如目前绝大部分的智慧零售、智慧物流、智慧办公等解决方案的中央枢纽就是 Wi-Fi 网络。

7. 工业 Wi-Fi 6 未来发展趋势

7.1 工业 Wi-Fi 6 与 TSN 的结合

时间敏感网络 (TSN) 是当前最热门的实现局域确定性网络的技术，通过 IEEE 802.1AS 时钟同步、IEEE 802.1Qbv 时隙调度、IEEE 802.1Qbu 报文抢占、IEEE 802.1Qcc 业务和网

络配置、IEEE 802.1CB 报文冗余、IEEE 802.1Qci 流预留、IEEE 802.1Qch 循环排队等技术保证链路层的确定性时延。

同样由 IEEE 主导的 802.11 Wi-Fi 技术也在向确定性方向发展，TSN 中调度、冗余等技术原理也可以用于 Wi-Fi 网络，增强 Wi-Fi 网络的可靠性，实现优先级调度，降低关键业务时延。同时未来 Wi-Fi 回传的有线网络也可以与由 TSN 交换机组成的工厂有线网络配合，实现工厂端到端的确定性。

7.2 工业 Wi-Fi 6 产业发展建议

工业对于无线连接的诉求，直接影响着生产网络的变革，以及包括柔性化生产、预测性维护、服务化延伸等在内的关键行业价值的兑现，供给侧和需求侧的双轮驱动，让 Wi-Fi 6、5G 在工业领域前景非常广阔。

随着 Wi-Fi 6 标准、终端、网络都已广泛成熟，工业企业开展更多 Wi-Fi 6 创新应用示范项目，以试带用，形成技术、标准、产业、应用的良性循环，可以协助企业经济、高效地提升企业的数字化水平，创造更多经济、社会价值。

附录：图表索引

图表 3- 1 OFDM 工作模式	10
图表 3- 2 OFDMA 工作模式	11
图表 3- 3 不同子载波频域上的信道质量	12
图表 3- 4 RU 在 20MHz 中的位置示意图	14
图表 3- 5 OFDMA 与 OFDM 模式下多用户吞吐量仿真	14
图表 3- 6 SU-MIMO 与 MU-MIMO 吞吐量差异	15
图表 3- 7 8x8 MU-MIMO AP 下行多用户模式调度顺序	16
图表 3- 8 多用户模式上行调度顺序	17
图表 3- 9 256-QAM 与 1024-QAM 的星座图对比	18
图表 3- 10 802.11 默认 CCA 门限	20
图表 3- 11 动态 CCA 门限调整	21
图表 3- 12 无 BSS Color 机制	22
图表 3- 13 有 BSS Color 机制对比	22
图表 3- 14 Long OFDM symbol 与窄带传输带来覆盖距离提升	23
图表 3- 15 广播目标唤醒时间操作	26
图表 4- 1 企业办公对于 Wi-Fi 网络的技术需求	27
图表 4- 2 VR 对于 Wi-Fi 网络的技术需求	28
图表 4- 3 PDA 对于 Wi-Fi 网络的技术需求	29
图表 4- 4 云化 AGV 对于无线网络的需求	31
图表 4- 5 AR 远程协助对于 Wi-Fi 网络的需求	32
图表 4- 6 整机固件升级对于 Wi-Fi 网络的需求	33

图表 4- 7 机器视觉对于 Wi-Fi 网络的需求	34
图表 4- 8 物联融合对于 Wi-Fi 网络的需求	35



工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet