



中兴通讯

# 5G毫米波(mmWave)技术 白皮书

# 目录

## 毫米波技术是第五代移动通信的核心技术之一 / 1

### 毫米波技术的发展现状 / 2

全球毫米波频段的分配 / 2

标准化组织的发展节奏 / 3

产业链情况 / 4

运营商部署计划及现状 / 4

应用场景 / 5

### 毫米波关键技术和挑战 / 7

子载波带宽和帧结构 / 7

大规模天线技术 / 8

波束管理 / 11

组网架构 / 15

毫米波性能 / 16

毫米波天线的硬件架构 / 20

半导体材料及工艺 / 22

毫米波的测试和度量 - OTA / 24

### 毫米波技术演进和展望 / 26

3GPP 标准演进 / 26

毫米波技术的未来演进 / 27

缩略语 / 29

参考文献 / 30

## 图目录

图 2-1 5G 毫米波频段全球部署情况 / 2

图 2-2 支持毫米波频段 5G 设备一览 / 4

图 2-3 热点覆盖应用场景 / 5

图 2-4 FWA 场景示意图 / 6

图 2-5 企业园区专网场景 / 6

图 3-1 毫米波帧结构示意图 / 7

图 3-2 毫米波三种常用帧结构 / 8

图 3-3 2 流、4 流单用户 MIMO / 9

图 3-4 基于模拟波束的硬空分多用户 MIMO 模式 / 10

图 3-5 混合波束赋形示意图 / 11

图 3-6 波束扫描和波束跟踪过程示意 / 13

图 3-7 SA 网络架构 / 15

图 3-8 NSA 网络架构 / 15

图 3-9 3.5 GHz 和 26 GHz 覆盖对比 / 17

图 3-10 不同帧结构和调制阶数的下行峰值速率 / 18

图 3-11 不同站间距容量对比 / 19

图 3-12 ping 包时延示意图 / 20

图 3-13 5G 毫米波基站混合波束赋型架构 / 21

图 3-14 化合物半导体典型器件类型与工艺制程 / 22

图 3-15 不同工艺材料和性能的关系示意图 / 23

图 3-16 基于 LTCC 和有机基板封装的 AiP 应用 / 23

图 3-17 基于框架和圆片级扇出封装的 AiP 应用 / 23

图 3-18 Rayleigh 优化采样 (左) 和采用该技术的毫米波紧缩场暗室 (右) / 25

图 4-1 多 TRP 实现示意图 - 单 DCI (图左) 和多 DCI (图右) / 26

图 4-2 IAB 原理示意图 / 27

## 表目录

表格 2-1 3GPP 定义的 FR1 和 FR2 / 2

表格 3-1 3.5 GHz 和 26 GHz 不同材料的穿透损耗 (dB) 对比 / 16

表格 3-2 不同频段对应的时隙长度 / 20

表格 3-3 5G 毫米波 OTA 指标及类型 / 25

# 毫米波技术是第五代移动通信的核心技术之一

5G 技术的发展正在对世界产生深远的影响。每天我们看到 5G 带来的更高速率，更低时延的商用部署案例，让我们更坚信我们正步入万物互联的新时代。根据 GSMA 的估算，5G 毫米波作为高速接入、工业自动化、医疗健康、智能交通、虚拟现实等方面的核心使能技术之一，预计将在 2035 年之前对全球 GDP 做出 5650 亿美元的贡献，占 5G 总贡献的百分之二十五<sup>1</sup>。

回顾即将过去的 2020 年，全球经历了新冠肺炎的前所未有巨大的冲击，各行各业呈现出的更坚定地拥抱数字转型的决心和共识也为 5G 在社会经济更广泛层面的部署和延伸提供了强劲的驱动力。

## 和之前 2/3/4G 主力的低中频段相比，毫米波具有以下优势：

- 毫米波频谱资源非常丰富，而且通常是连续带宽，这将给用户带来前所未有的高速体验；
- 毫米波可以提供更低的时延；
- 毫米波的天线尺寸更小，设备轻量化，从而部署更为便捷。

与此同时，由于本身频段的自然属性，毫米波也带来路径损耗大，传播距离短等现实的挑战。

本白皮书将从毫米波的发展现状、关键技术及挑战来阐述如何在毫米波的宽频段、大带宽、低时延的优势和传输距离的受限中取得平衡。最后我们也对毫米波未来的技术演进提出展望和预测。

# 毫米波技术的发展现状

## 全球毫米波频段的分配

3GPP 定义了两类频率范围：FR1 (Frequency Range1) 和 FR2 (Frequency Range2)。FR1 定义的是低频部分，即通常所说的 Sub-6G；而 FR2 定义的是高频部分，即毫米波的频段。

频率范围定义	对应的频段范围
FR1	410 MHz ~ 7125 MHz
FR2	24250 MHz ~ 52600 MHz

表格 2-1 3GPP 定义的 FR1 和 FR2

2019 年 12 月结束的世界无线电通信大会 (WRC-19) 确定了 24.25 GHz-27.5 GHz、37 GHz-43.5 GHz、66 GHz-71 GHz 为 5G 全球毫米波统一工作频段，同时 45.5 GHz-47 GHz 和 47.2 GHz-48.2 GHz 为区域性毫米波频段。

根据 GSA 的统计，截止 2020 年 6 月全球有 97 个运营商 (来自于 17 个国家和地区) 已经拥有毫米波频段的频谱许可，其中 22 个已经完成了毫米波频段的商用部署<sup>2</sup>。

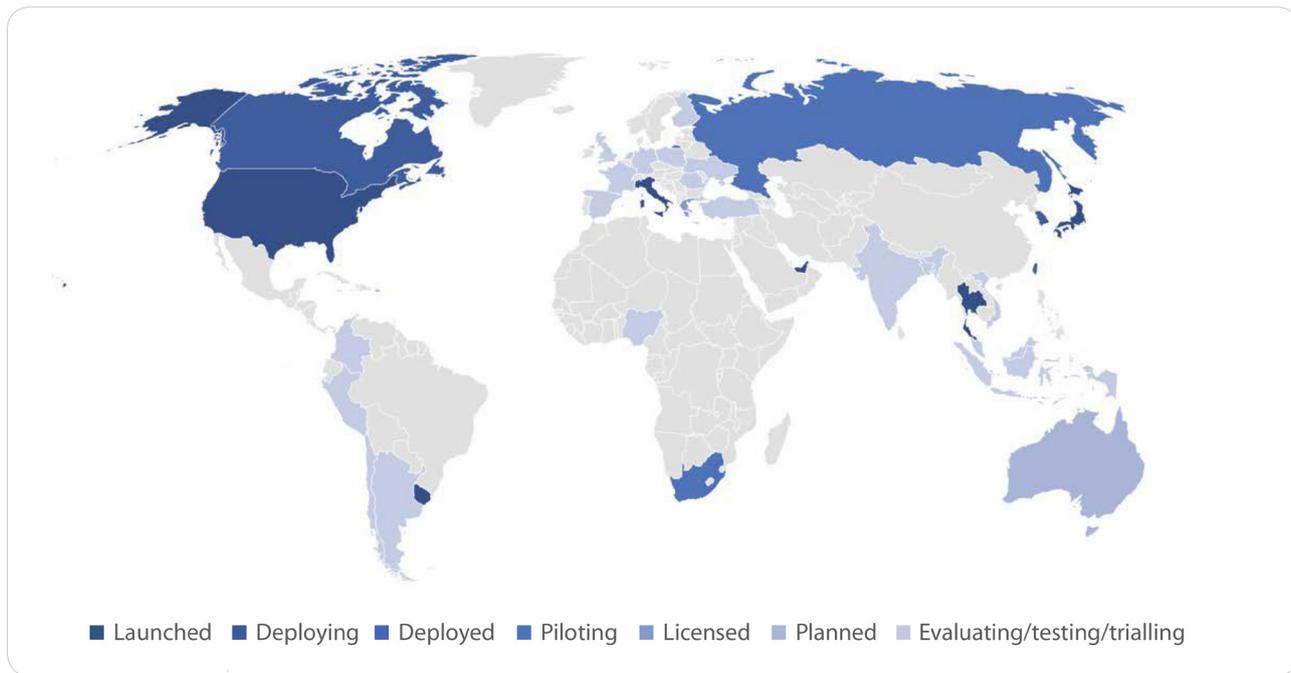


图 2-1 5G 毫米波频段全球部署情况

## 标准化组织的发展节奏

从 3GPP 针对 5G 的总体规划情况来看, 截止目前 5G 国际标准 R16 版本已全部完成, R17 版本预计在 2021 年 6 月冻结( 发布时间为 2021 年 12 月 )。

### R15 版本

该版本除了明确 NR 的核心技术和总体架构外, 定义了 FR2 的 5 个频段 ( n257, n258, n259, n260, n261 )。同时就高频不同于低频的物理特性, 如子载波间隔、帧结构、单用户 MIMO 和多用户 MIMO 的支持、双连接和载波聚合的支持进行了定义。

### R16 版本

该版本主要从网络优化角度考虑, 在 R15 定义的基础上进行了增强或补充特性, 主要可以概括为以下几个部分:

- **物理层增强特性:** 包括两步 RACH, 多 TRP, 集成接入回传等
- **MIMO 增强特性:** 包括基于 MAC 控制信息更新的上行功率控制, 多波束 ( 层 1 CSI-RS SINR ), 低功率峰均比的解调参考信号增强等
- **UE 节能特性:** 包括 PDCCH 唤醒信号, 跨时隙调度适配等
- **移动性增强特性:** 包括非同步 NR-NR 双连接, 早期测量上报, SCell 休眠, 基于 RRC Resume 的 MCG SCell 和 SCG 配置, 快速 MCG 链路修复, 不同参数集的跨载波调度等

### R17 版本

该版本将主要在业务上进行一些拓展, 针对毫米波来说主要是 FWA 业务上及 DC 增强上进行优化。如引入 n257/n258 频段 FWA 终端最大 TRP 可以达到 23dBm, 多 RAT 的 DC 增强, 涉及针对单个 SCG 和 SCell 的更高效激活化和去激活特性, 以及针对有条件 PSCell 变更和添加的支持等。

## 产业链情况

截止 2020 年 6 月, 根据 GSA 的数据统计, 全球共有 84 款 5G 设备支持( 或计划支持 )毫米波频段, 其中 27 款已经发布商用。

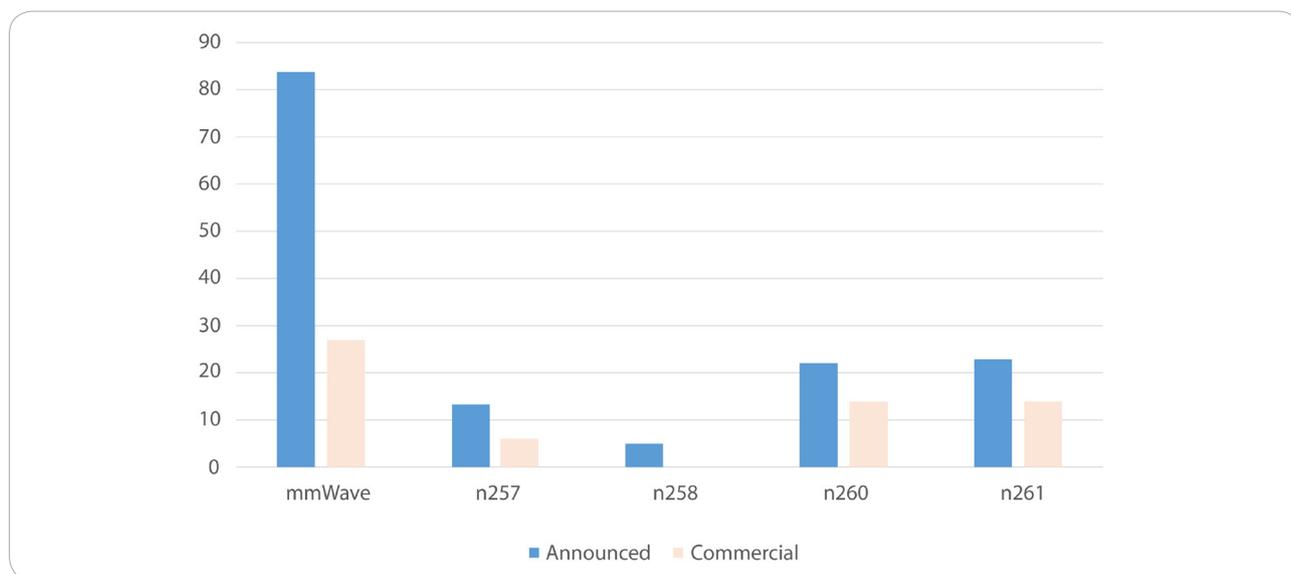


图 2-2 支持毫米波频段 5G 设备一览

目前已经发布支持 5G 毫米波芯片的厂商为高通、华为海思和三星（联发科已经发布计划在 2020 年内推出支持毫米波的芯片）。随着毫米波频谱的明确（WRC-19）和运营商逐步加大投资力度，必将加速相关产业链的发展和成熟，从而加速全球 5G 系统部署和商用的步伐。

## 运营商部署计划及现状

鉴于高频网络的特性，各运营商把高频网络作为容量补充的一个手段，与 4G 网络互为补充，提供更高的传输速率，更大的容量。具体来说：

1. 美国毫米波部署最为广泛，AT&T、Verizon 和 T-Mobile 从 2018 年起陆续在美国国内的城市开通利用毫米波频谱的 5G 商用网络。
2. 欧洲市场上毫米波的应用主要集中在前期已完成频谱拍卖的国家如意大利、芬兰和俄罗斯等（英国政府批准根据市场的需求开放 24.25 - 26.5 GHz 的毫米波频段用于室内业务<sup>3</sup>）。

## 毫米波技术的发展现状

3. 亚太市场的 5G 发展前期以 sub-6G 商用为主，中国、日本、韩国在毫米波的应用上都有考虑，其中

- 中国的三大运营商从 2017 年开始就不断联合各厂家进行了 5G 毫米波的关键技术测试和验证，随着 2020 年 3 月工信部推动 5G 加快发展的通知以及 2022 年冬奥会毫米波应用场景的预期，毫米波大规模商用的脚步越来越近。
- 日本已完成 27.0~29.5GHz 频段的拍卖。
- 韩国于 2018 年完成了 28GHz 频段频谱（共 2400 MHz）的拍卖程序。毫米波 5G 服务最初用于企业对企业细分市场，面向个人设备的毫米波 5G 网络将于 2021 年开始推出。

## 应用场景

根据 3GPP TR 38.913 定义，与高频段应用相关的几个场景分别为：室内热点、密集城区、宏覆盖、高速铁路接入与回传以及卫星扩展到地面。国外当前应用比较成熟的是美国和韩国的热点覆盖和 FWA（固定无线接入）的应用方案。

### 典型热点应用场景



图 2-3 热点覆盖应用场景

### FWA 应用场景

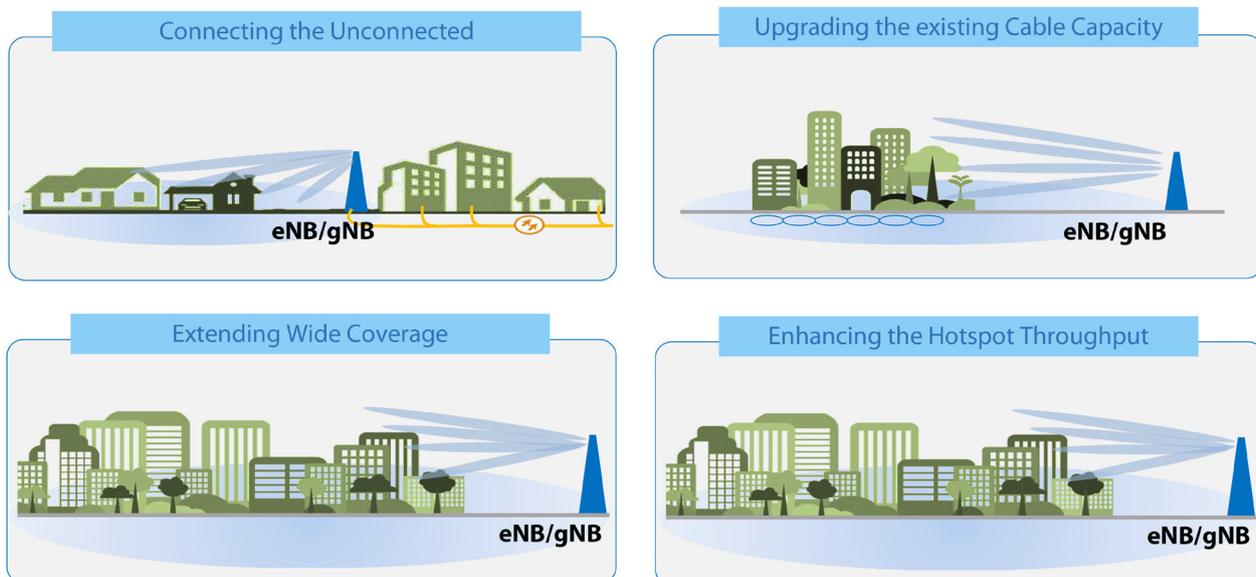


图 2-4 FWA 场景示意图

### 企业园区专网

通过和边缘计算、人工智能等前沿技术结合，5G 毫米波在大带宽网络基础上叠加丰富多样的增值服务，可以为像园区、厂区、码头、港口等覆盖区域提供定制化的园区服务。

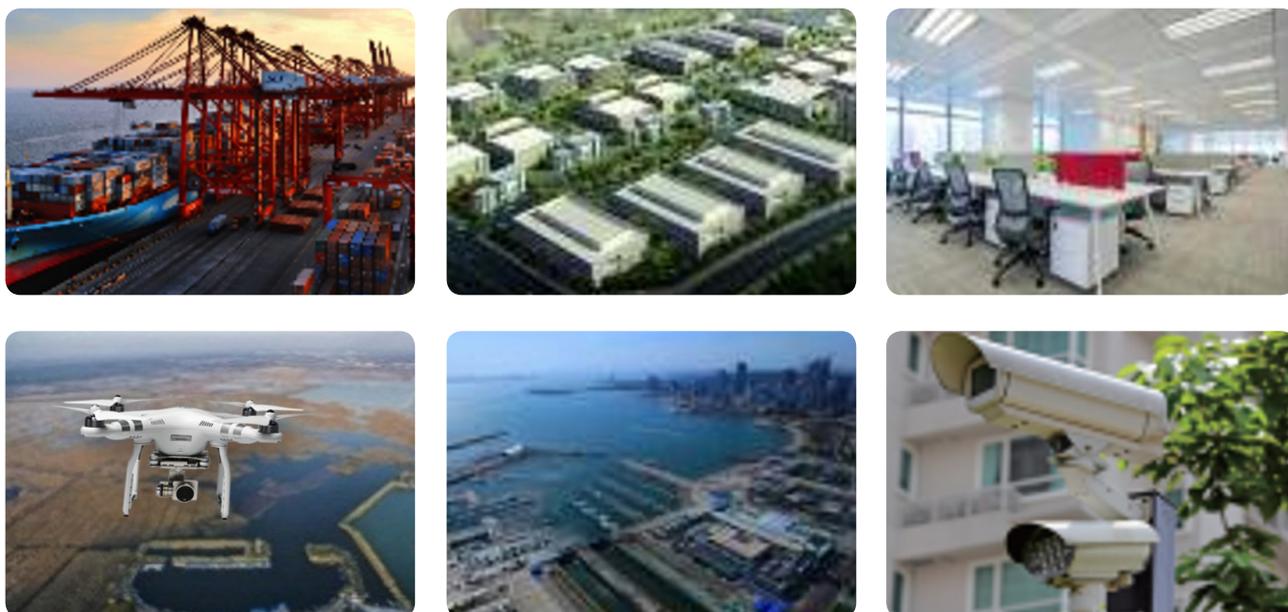


图 2-5 企业园区专网场景

# 毫米波关键技术和挑战

## 子载波带宽和帧结构

帧结构随着子载波间隔的选择而略有不同，以 120k Hz 子载波间隔为例：每帧由两个半帧组成，每帧包含 10 个子帧，每个子帧包含 8 个时隙，每个时隙含有 14 个 OFDM 符号（含 CP）。

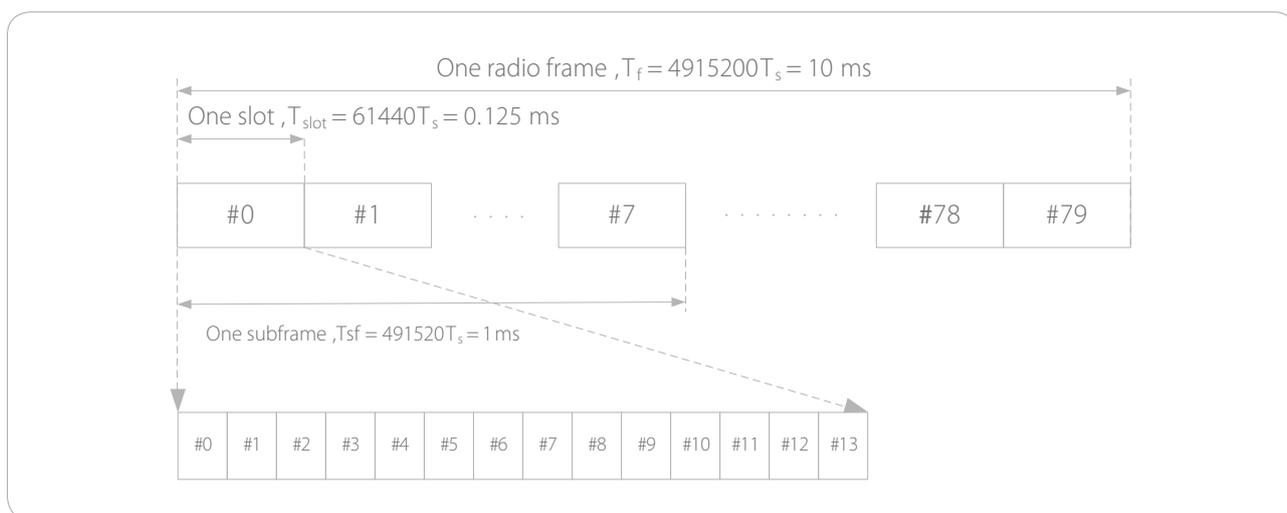


图 3-1 毫米波帧结构示意图

NR 标准支持通过 RRC 信令或 DCI 调度方式半静态或动态配置上下行比例。

高频帧结构大多为一个上下行转换周期中有 5 个时隙，如下图所示。根据需求不同选择不同的上下行配比，其中有纯下行时隙（标记为 D），纯上行时隙（标记为 U）和上下行转换的时隙（标记为 S）。在 S 时隙中，上下行切换会预留 GP 符号，GP 预留的符号数取决于 UE 侧上下行切换的时间和规划的小区半径。



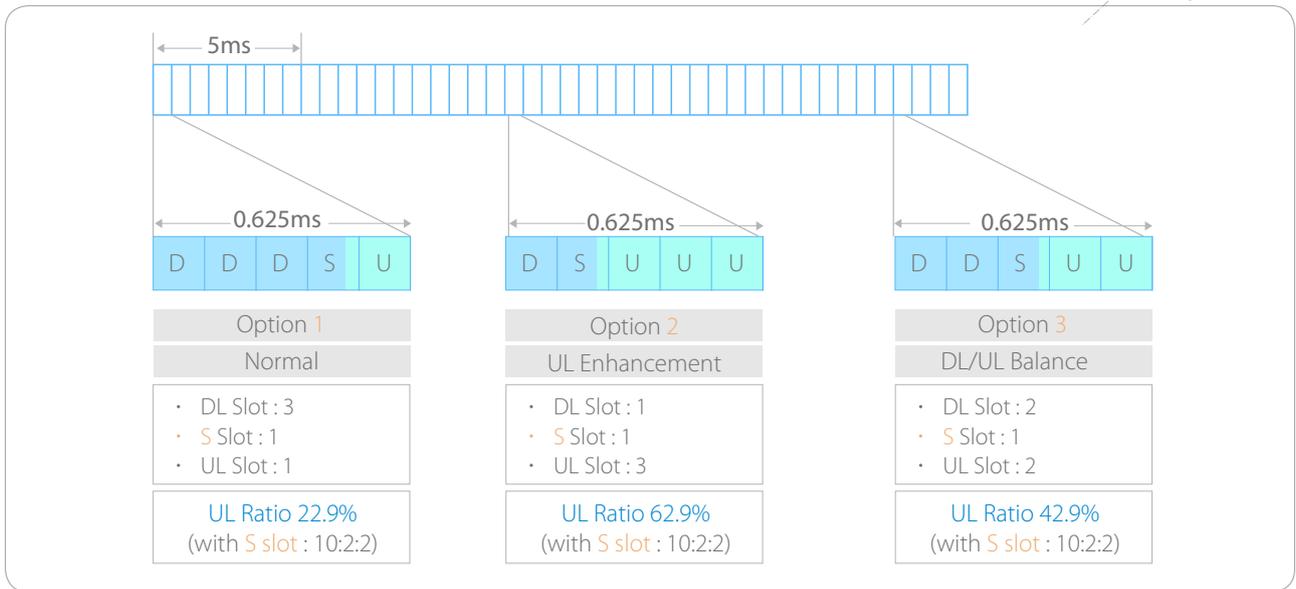


图 3-2 毫米波三种常用帧结构

三种帧结构相比而言 DDDSU 在下行覆盖和容量上占优，DSUUU 在上行覆盖和容量上占优，DDSUU 则较为均衡，时延方面 DDDSU 和 DSUUU 因为上下行占比不均衡，时延相对 DDSUU 更大。

帧结构的设计和应用场景密切相关。如果高频基站主要用于下载业务占优的场景例如普通公网，下行占优的帧结构更适合。如果主要用于上行补热，大流量视频上传等场景，可以考虑采用上行占优的帧结构，对于上下流量都有一定需求的场景则采取用均衡型的帧结构更好。

## 大规模天线技术

MIMO，即多输入多输出（Multiple Input Multiple Output），是一种利用发射与接收端的多天线获取分集增益、提升频谱利用率的技术。基于大规模 MIMO 的无线传输技术能够深度利用空间维度的无线资源，进而显著提升系统频谱效率和功率效率，也具有提高信道容量和改善系统性能等优点。

### 单用户 MIMO

高频终端大多数都是 2 发 2 收天线（一个 H 极化和一个 V 极化成对使用）。基站侧的发送天线可以是 2 发，4 发或 8 发，也是 H 极化和 V 极化成对使用。所以对于单个终端来说上下行业务一般是 1 流或者 2 流。在 LOS 径场景，一组 HV 天线如果隔离度足够好，天然支持 2 流。但是在一些 NLOS 场景，尤其是由于反射造成了 H 和 V 的极化旋转，就会导致一组 HV 天线只能支持 1 流。

如果 UE 可以支持多 panel，4 发 4 收，在有些场景，同时存在 LOS 径和 NLOS 径，那么单 UE 最多可以达到上下行 4 流。

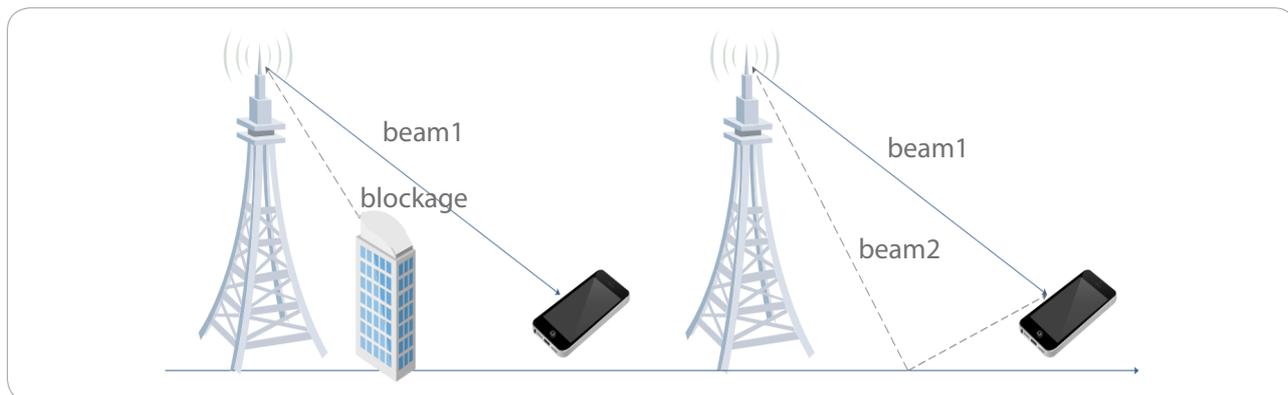


图 3-3 2 流、4 流单用户 MIMO

下行的单用户 MIMO 模式可以支持基于 PMI 反馈的单用户 MIMO 和基于 SRS 测量的 BF 单用户 MIMO。

基于 PMI 反馈的单用户 MIMO，基站发送用于 PMI 测量的 CSI-RS，UE 进行下行信道质量的测量，向基站反馈 PMI、CQI、RI 信息，基站根据 UE 的反馈选择最优的 PMI 码本进行波束赋型。

基于 SRS 测量的 BF 单用户 MIMO，利用 TDD 系统的互易性，基站通过上行 SRS 测量，获得信道的空间信息，用估计出的信道  $H$  来计算波束赋形的 BF 权值。然后在发送下行数据时乘上计算出来的 BF 权值。

上行的单用户 MIMO 模式可以支持基于码本模式的单用户 MIMO 和基于非码本模式的单用户 MIMO。

基于码本模式的单用户 MIMO，UE 在基站配置好的资源上发送 SRS，SRS 资源配置的端口数要和 PUSCH 使用的端口数一致。

UE 发送 SRS 使用的波束可以通过 RRC 指示也可以通过 DCI 指示，基站通过接收 SRS 信号来决定调度 PUSCH 的层数以及 TPMI 码本，通过 DCI 通知 UE。

基于非码本模式的单用户 MIMO，也是利用了上下行信道的互异性，UE 首先会在指定的 NZP CSI-RS 资源上，通过测量下行信道，计算出一个上行的 BF weight 的权值，然后 UE 会把这个权值乘在上行 SRS 信号上。每个用于测量非码本的 SRS 资源都只能配置成 1 端口，所以每个 SRS 资源上的 SRS 信号都是乘了上行权值的信号。基站接收 SRS，根据每个 SRS 资源上信号能量的大小决定调度上行 PUSCH 的层数，通过 SRI 来指示 UE 采用那个 SRS 资源的端口和权值来发送 PUSCH。

## 多用户 MIMO

高频的多用户 MIMO 可以是基于模拟空分，也可以是模数混合的空分两种模式。当模拟通道的阵子数比较多，模拟波束比较窄，那么模拟波束和模拟波束之间在空间上天然就有隔离，我们用隔离度来度量模拟波束彼此在空间上的距离，当一个波束在另一个波束上的能量投影很小，我们就认为这个波束对另一个波束的干扰很小，隔离度比较好。反之，一个波束在另一个波束方向上投影的能量比较大，我们就认为这个波束对另一个波束的干扰大，隔离度不好。

波束设计的越窄，彼此隔离度越好，越适合用模拟空分，但是波束设计的太窄不利于移动场景的波束跟踪。对于波束宽度很宽，波束互相交叠的较多的场景，单纯依靠模拟空分的策略就不能满足多用户 MIMO 的要求，流间干扰比较大，这是就需要考虑模数混合的空分模式。

基于模拟空分多用户 MIMO 模式，根据 3GPP R16 协议，可以通过给 UE 配置 CMR 和 IMR 资源来测量波束之间的干扰，可以把 UE 的业务波束配置成 CMR，把需要配对的波束配置成 IMR，根据 UE 上报的 L1-SINR 来决定这个 UE 可以和哪些波束上的 UE 做多用户 MIMO，以及配对之后，选择什么样的调制方式和码率。

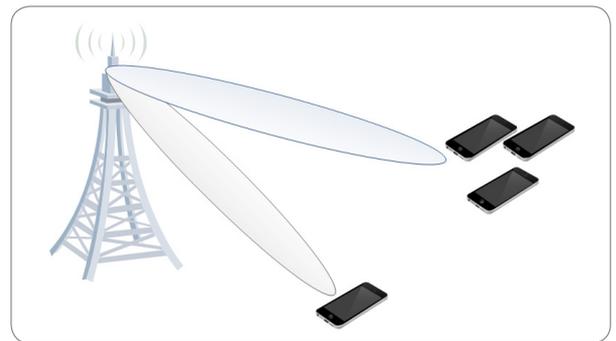


图 3-4 基于模拟空分多用户 MIMO 模式

基于模数混合的多用户 MIMO 模式，当配对的 UE 波束间干扰比较大的情况，就需要考虑数模混合的多用户 MIMO 策略。基站通过 SRS 信道的测量，分别得到配对 UE 的信道，然后通过干扰消除算法，计算出下行 BF 权值，配对的 UE 在发送下行数据时乘上计算出来的 BF 权值，这样通过数字权值和模拟波束来达到更好的空分效果。

## 模数混合波束赋形技术

波束赋形是一种基于天线阵列的信号预处理技术，基站通过 UE 的 CSI 反馈或者对上行信号的测量（TDD 系统），调整天线阵列中每个阵元的加权系数产生具有指向性的波束，从而能够获得明显的阵列增益。因此，波束赋形技术在扩大覆盖范围、改善边缘吞吐量以及干扰抑制等方面都有很大的优势。为了提高小区边缘用户的吞吐量和覆盖性能，需要基站侧支持天线阵列的波束赋形功能。

在 NR 高频中，考虑有限数量数字通道 MIMO 技术方案，来减少能耗和降低设备成本，即通过数字域和模拟域进行联合波束赋形，即模数混合波束赋形。如下图所示，发射机（或接收机）由多个子阵列组成天线阵列，其中每个子阵列能够独立使用 RF 移相器控制波束。在模拟域，通过低成本的移相器，实现高频信号单个传播方向波束赋形；在数字域，通过使用基带处理器，实现多个传播方向的波束联合赋形。

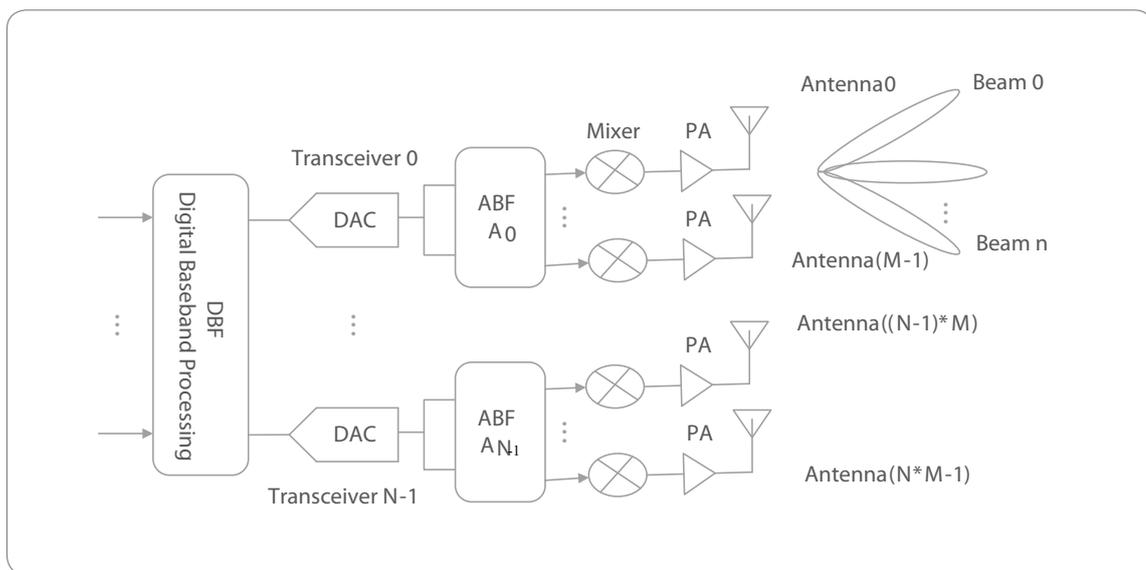


图 3-5 混合波束赋形示意图

## 波束管理

波束管理包括波束扫描、波束跟踪、波束阻塞、波束恢复等功能。波束管理的目的是提升基站和 UE 的信号传输增益，降低干扰，从而提升系统的数据传输速率，增强覆盖。

### 波束方案

毫米波频段衰减大，传播距离短等特点会给覆盖和容量带来负面的影响，一般通过模拟波束赋形增益来补偿衰减，同时针对不同的信道设计对应的模拟波束。下面分别就广播和业务信道来介绍对应的波束方案。

### 广播信道的波束方案

广播信道主要是用于 UE 小区选择和下行同步，所以在满足一定的覆盖要求即可。协议规定在每个 20 毫秒周期的前 5 毫秒内，最多可以发送 64 个 SSB。UE 通过扫描 SSB，选择一个能量最强的 SSB 对应的 RO 资源上发送 preamble 达到接入和同步的目的。SSB 的个数过多，会占用过多的下行资源，影响系统吞吐量。SSB 的个数过少，会影响覆盖，导致基站覆盖的面积过小，所以 SSB 的个数应该取决于能够满足覆盖要求的最少波束个数。对于相同的覆盖范围，SSB 的个数越少，则每一个 SSB 的波束就宽，那么每个波束的增益就会越小。SSB 的个数越多，每一个波束的宽度就越窄，同时增益也越大。

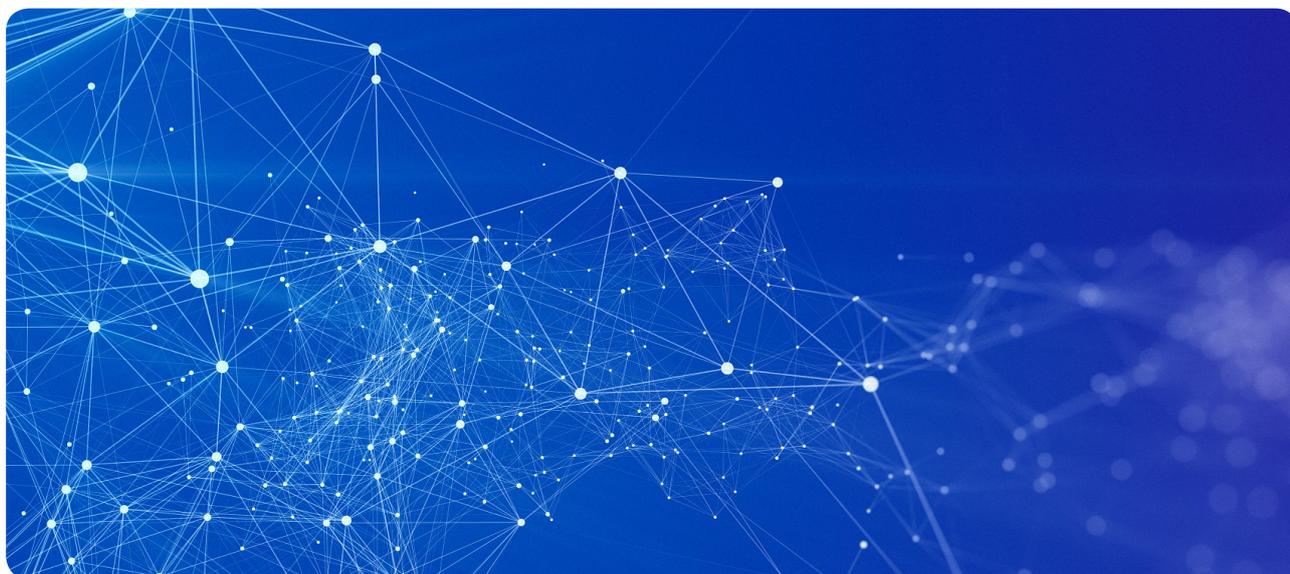
波束的覆盖场景由水平 3dB 波宽和垂直 3dB 波宽，倾角可调范围和方位角可调范围四个要素共同决定。针对不同的场景，有不同的波束设计，比如对于室外 FWA 场景，要求覆盖的面积比较大，我们可能设计水平 8 个波束方向，垂直 8 个波束方向，在 3D 空间一共形成最多 64 个 SSB 波束方向。对于室内热点，由于路损比较小，所以波束可以设计的宽一些，比如水平 4 个方向，垂直 4 个方向，在 3D 空间一共形成 16 个 SSB 波束方向。

### 业务信道的波束方案

业务信道波束方案上可以选择是否和 SSB 保持一致，其主要的考量是能否满足系统容量的要求。

如果和 SSB 保持一致，可以用 SSB 的波束 ID 来指示 PDSCH 信道的 QCL 关系。如果业务信道的波束是独立设计，那么需要配置专门的 CSI-RS 信号来做业务波束的跟踪和扫描，业务信道波束的 QCL 关系也只能关联到 CSI-RS 信号上。

基于以上的设计原则同时结合毫米波的发展阶段和实际部署复杂程度逐步增加的考虑，现阶段波束一般是通过静态配置，根据不同的场景，在 AAU 预置波束码本来实现，后续可以采用基于 AI 在线实时自适应权值优化的实现方式。



## 波束扫描与跟踪

为保证最终得到足够的信号增益，大规模天线阵列所产生的波束通常需要变得很窄，基站需要使用大量的窄波束才能保证小区内任意方向上的用户都能得到有效覆盖。在此情况下，遍历扫描全部窄波束来寻找最佳发射波束的策略显得费时费力，与 5G 所期望的用户体验不符。

为快速对准波束，5G 标准采取了分级扫描的策略，即由宽到窄扫描。分级扫描可以根据每个用户的需要随时开展，不断切换最佳波束，最佳波束会随着用户的位置不同而发生变化。同时，为了更好地跟踪用户，需要用到波束跟踪策略。

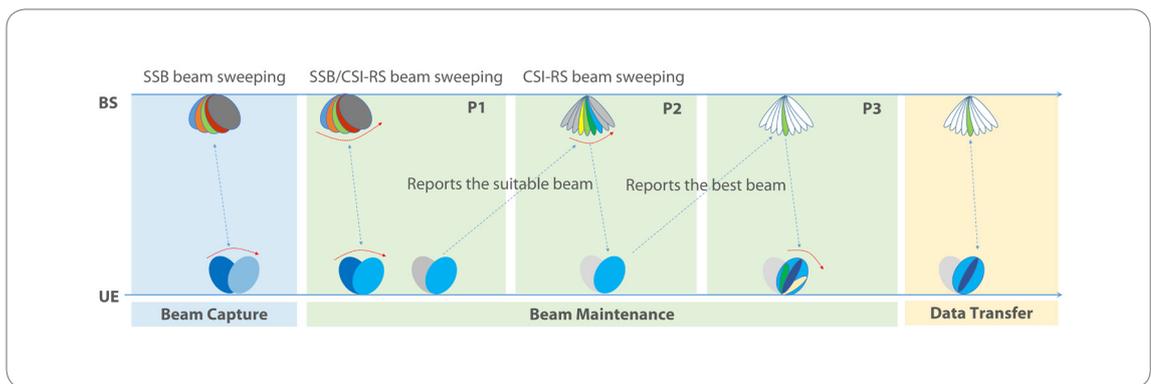


图 3-6 波束扫描和波束跟踪过程示意

### 接入阶段的波束捕获

空闲态的终端通过轮扫 SSB 信号，找到基站侧信号质量最好的 SSBID 和终端侧最好的接收波束，然后终端会在这个 SSBID 对应的 RO (Rach Occasion) 资源上发送 Msg1，基站收到 Msg1，就知道使用哪一个波束和这个终端通信，后面整个同步和接入过程都使用这个 SSBID 对应的波束。

### 连接态下的波束扫描和跟踪

P1 过程：基站侧和 UE 侧都使用比较宽的波束，UE 侧进行波束轮扫，然后通过 CSI report 通知基站，UE 接收基站的哪一个宽波束的信号质量最好。

P2 过程：有时为了满足边缘用户的流量要求，会为远端 UE 设计一些更窄的波束，我们称为精细化波束。通过 P1 过程，我们先确定 UE 的接收波束，然后通过 P2 过程，确定精细化波束。P2 过程是 UE 侧的接收波束不变，基站轮发精细化波束，UE 通过 CSI report 通知基站哪一个精细化波束的信号质量最好，基站在业务信道可以使用精细化波束和 UE 通信，从而获得更高的增益。

P3 过程：有时终端侧也设计了精细化波束，这时通过 P3 过程，确定终端使用的精细波束。P3 过程是基站侧的发送波束不变，UE 切换接受波束，然后选择信号质量最好的波束作为业务信道的波束，UE 侧的波束选择和切换，基站侧不感知。

## 波束恢复

在高频系统中基站和终端都是使用定向天线，当两者的波束方向互相匹配时，业务信道可以获得比较高的增益，数据传输的吞吐量也比较高。但是，当基站和终端的波束方向不匹配时，业务信道获得的增益就非常小，甚至会出现无线链路故障（RLF）的情况。

高频由于信道和传播特性决定，在移动的 NLOS 场景下，信道的传输路径可能会变化非常快，由于遮挡可能会造成径的快速生灭，所以可能造成波束跟踪失败。为了可以快速恢复链路，避免流量掉沟，可以启动波束快速恢复流程。

### 波束失败恢复的流程主要分为四个步骤

#### ① 波束失败检测过程

首先，UE 会在当前 PDCCH 关联的下行参考信号上周期测量，所测的信号质量持续低于一定的门限值，UE 侧认为波束已经失败了。

#### ② 新波束的发现过程

然后 UE 会通过周期的 SSB 进行波束轮扫，发现信号质量最好的波束。

#### ③ 波束恢复请求过程

然后 UE 会在对应的 RO 资源上通过 RACH 来通知基站，发起波束恢复请求。

#### ④ 波束恢复请求响应过程

最后基站收到波束恢复请求后，在指定的 BFR 搜索空间上使用 UE 波束恢复指示的新波束发送波束恢复响应，波束恢复响应为该 UE 的 C-RNTI 加扰的 PDCCH，并且 DCI 的内容可以为 DL grant，也可以是一个 UL grant。

# 组网架构

## NSA/SA 架构

在 NR 的网络架构，定义了独立的 SA 架构和与 LTE 网络相结合的 NSA 架构。

### SA 架构

指的是完全新建 NR 网络，包括新基站、回程链路以及核心网。SA 引入了全新网元与接口的同时，还将大规模采用网络虚拟化、软件定义网络等新技术。

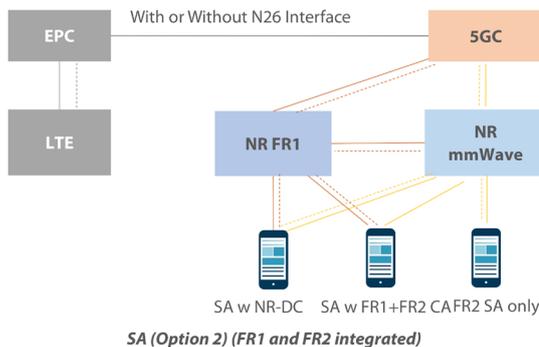


图 3-7 SA 网络架构

### NSA 架构

NSA 非独立组网指的是使用现有的 LTE 基础设施，进行 NR 网络的部署。基于 NSA 架构的 NR 网络承载用户数据，其控制信令主要通过 4G 网络传输。

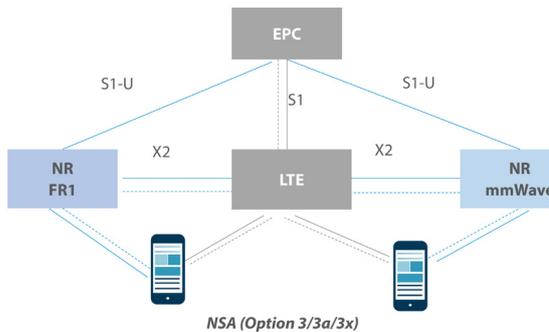


图 3-8 NSA 网络架构

综合 SA 和 NSA 的差异，SA 或者 NSA 架构的选择，依赖于运营商对于 5G 建网部署规划和商务投资的计划，以及产业链的成熟度等因素。选择 NSA 架构可以在初期帮助运营商迅速的进行 5G 建网，但由于 NSA 架构不能完全适配 5G 的性能业务需求，后续为了支持 5G 的业务需求，必然需要向 SA 架构演进。而相对于 SA 架构建网，采用先 NSA 后 SA 的建网方式在资金支出上会明显高于直接 SA 组网。

## 高低频混合组网方案

如上所述，运营商在早期的 5G 部署中大都采用了 LTE 和 NR 的双连接（EN-DC）。毫米波自身频段高，传播损耗大等特点导致的毫米波覆盖参差不齐，EN-DC 对于不同性质的无线多信道的支持，使其成为毫米波早期部署的自然选择。

随着 5G 核心网的部署逐步展开，我们预期将会有更多的选择（NR 和 NR 的高低频双连接，NR 和 NR 的高低频载波聚合等）来使能 UE 充分使用多频和多信道技术，从而在提高频段的灵活性的同时获得更高的速率。

相比而言，NR 和 NR 的高低频载波聚合由于高频下行数据的 HARQ 依赖于低频的 PUCCH 反馈，和 NR 和 NR 的高低频双连接对比，理论计算单 UE 下行峰值速率要降低 30%–35% 左右（注：高频帧结构采用 DDDSU，低频帧结构采用双 2.5ms 帧结构，SCS=30 kHz），同时高低频载波聚合在不共站场景下性能会由于站间时延进一步恶化。

## 毫米波性能

### 覆盖

5G 毫米波频段高、传播损耗高、绕射和衍射能力弱，遇到建筑物、植被、雨雪、人体或者车体等阻挡的影响较大，从室外到室内的穿透损失较大，覆盖相对受限，这是 5G 毫米波通信系统面临的巨大挑战。

根据毫米波的传播特性来看，毫米波适合于基本 LOS 场景（如室外或室内 LOS、室外富反射场景）和近似 LOS 低穿透场景（如室外植被穿透、室内玻璃穿透两种），难以覆盖室外建筑物阻挡、室内高穿透损耗等场景。

毫米波传播过程中的路径损耗较大，自由空间损耗与载波频率成正相关，在相同路损模型下毫米波 26 GHz 载波比 3.5 GHz 载波的路损高约 17.42dB，理论传播距离只有 3.5 GHz 的六分之一左右。高频相对于低频，建筑物的反射和衍射损耗更大，如混凝土反射损耗在 10dB 左右，衍射损耗通常大于 18dB。高频室外环境受到树木等植被的影响也非常明显，受到天气（尤其是大雨场景）的影响也更大。高频从室外到室内的穿透能力更差，对于单玻璃、木头、冰雪等材质能够穿透，对于混凝土材质以及室内多层墙体等，极端情况 26 GHz 比 3.5 GHz 的穿透损耗要高接近 100dB。高频信号受到人体遮挡的影响比较大，如果终端周围存在多个人体阻挡，信号衰减非常明显。

	普通多层玻璃	IRR 玻璃	混凝土	木头	树衰（树深 2 米）	雨衰（大雨 10mm/hr）	雪	冰	人体损耗
3.5G	2.7	24.05	19	5.27	7.67	0.00	0	0	3
26G	7.2	30.8	109	7.97	16.46	1.57	4	2	9-13

表格 3-1 3.5 GHz 和 26 GHz 不同材料的穿透损耗（dB）对比

## 毫米波关键技术和挑战

除了上述的传播特性之外，毫米波的实际的覆盖也受到系统配置参数的影响。通常情况下，毫米波可以通过降低SCS、增加上行或下行资源、增加收发天线数、增加天线增益、提高发射功率、优化RB资源分配等手段来扩展覆盖。

对于毫米波的单站覆盖来说，整体覆盖取决于上下行控制信道和上下行业务信道的综合覆盖效果。控制信道覆盖主要看极限覆盖距离，其中下行控制信道需要考虑SSB

(PSS/SSS/PBCH)和PDCCH，上行控制信道需要考虑PRACH、PUCCH和SRS。业务信道覆盖需要根据目标边缘速率来确定覆盖距离，不同上行和下行边缘速率目标对应不同的覆盖距离，可以通过降低边缘速率要求来规划覆盖。通常情况下，上行覆盖相对下行覆盖受限，业务信道相对于控制信道受限，最终多以上行PUSCH业务信道的覆盖来衡量整体覆盖。

对于毫米波的组网覆盖来说，高频毫米波在视距场景覆盖良好，但信号受遮挡影响比较严重。和3.5 GHz相比，以RSRP不低于-110dBm为基准，26 GHz的总体覆盖（按面积计算）只能达到3.5 GHz的62%。

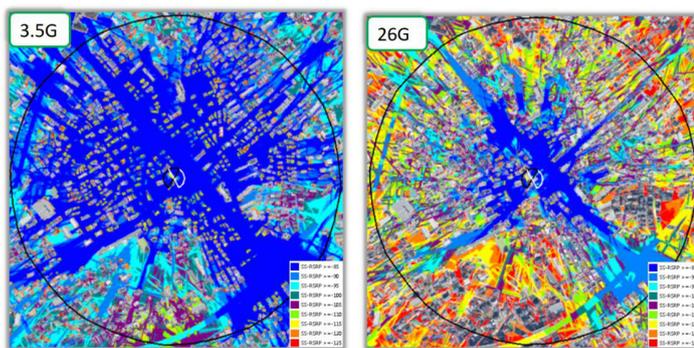


图 3-9 3.5 GHz 和 26 GHz 覆盖对比



## 峰值速率

5G 毫米波技术频率资源丰富、带宽大、峰值速率极高，这是 5G 毫米波系统的最大优势之一，适用于大量 4k/8k 视频业务的场景。

基于 3GPP TS 38.306 峰值速率计算方法如下：

$$\text{峰值速率 (Mbps)} = 10^{-6} \cdot \sum_{j=1}^J \left( v_{\text{Layers}}^{(j)} \cdot Q_m^{(j)} \cdot f^{(j)} \cdot R_{\text{max}} \cdot \frac{N_{\text{PRB}}^{\text{BW}(j), \mu} \cdot 12}{T_s^{\mu}} \cdot (1 - \text{OH}^{(j)}) \right)$$

其中，峰值速率与载波数  $J$ 、阶数  $\mu$ 、空间复用层数  $v_{\text{Layers}}^{(j)}$ 、调制阶数  $Q_m^{(j)}$  比例因子  $F^{(j)}$ 、最大信道编码码率  $R_{\text{max}}$ 、评估带宽包含的 PRB 总数  $N_{\text{PRB}}^{\text{BW}(j), \mu}$  呈正相关，与 OFDM 符号持续时间  $T_s^{\mu}$  和系统开销  $\text{OH}^{(j)}$  呈负相关。5G 毫米波的峰值速率，可以从增加可用资源和降低开销两方面来提升。同时毫米波频段为 TDD 复用，不同 TDD 帧结构配置对应不同的上下行资源占比，从而直接影响上下行峰值速率。

5G 毫米波的用户峰值速率和小区峰值吞吐率，举例如下图所示。对于 26 GHz 连续 800MHz 频谱，目前单用户可以支持下行 8\*100M 或 4\*200M、上行 2\*100 或 2\*200M 的 SU-MIMO 载波聚合传输，小区可以支持上下行 800M 4 流 MU-MIMO 传输。

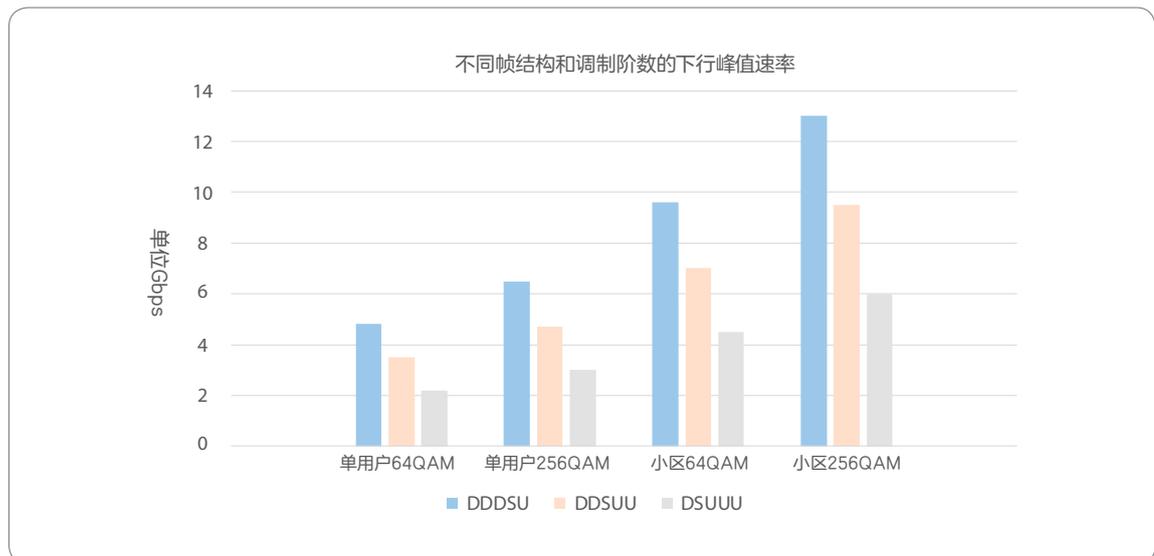


图 3-10 不同帧结构和调制阶数的下行峰值速率

## 容量

5G 毫米波的容量大，这是 5G 毫米波相对于 Sub-6G 的又一大优势。

高频容量性能，主要体现在用户数和小区平均吞吐率两个方面。其中用户数可以通过 RRC 连接用户数、CAPS 和每调度周期用户数来表征，小区吞吐率可以从平均吞吐率和边缘吞吐率来表征。

高频用户数受限于上下行控制信道的无线资源配置，可以从 PRACH、PDCCH、PUCCH、SRS 等信道容量的进行分析，从而评估哪个信道为受限瓶颈。通常情况下，PRACH 信道容量更容易成为小区容量受限的瓶颈。

高频在多小区和多用户场景下的小区吞吐率，主要受到组网环境和系统能力两方面的影响，其中组网环境包括场景、传播特性和用户分布等，系统能力包括带宽能力、MIMO 能力、多用户调度等。组网环境对小区吞吐率的影响非常明显，室内或室外热点场景的小区吞吐率要求明显要高于农村场景，LOS 传播环境的小区吞吐率明显高于 NLOS 环境，用户分布好点和中点的用户比例越高小区吞吐率也会越高。系统能力对小区吞吐率的提升尤为关键，增加系统带宽，优化 MU-MIMO 配对且提高 MU-MIMO 占比，优化多用户调度算法（如 EPF- 增强比例公平算法）且提升资源分配效率，从而进一步提升小区吞吐率。

下图为 3GPP UMa 场景不同站间距的容量仿真（CPE 发射功率为 40 dBm）。

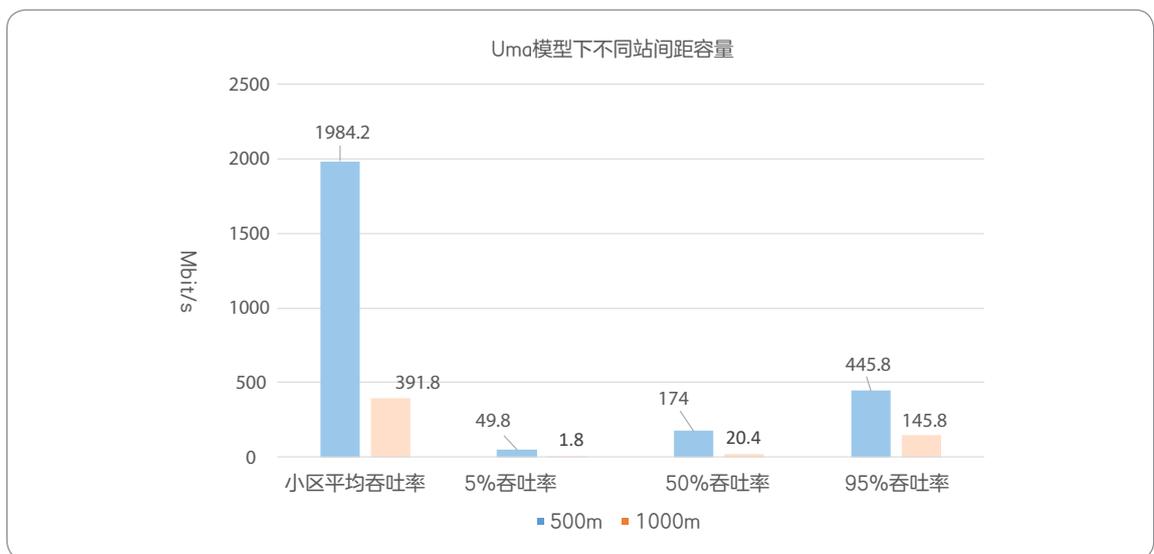


图 3-11 不同站间距容量对比

## 时延

5G 毫米波技术，相对于 Sub-6G 的空口时延显著降低，能够满足 5G 空口时延小于 1ms 的时延要求，适用于 5G 工业物联网、AR/VR 等场景。

通常来说，5G 网络中空口时隙长度越短，物理层的时延越小。5G 毫米波系统空口时隙长度最小可至 0.125 毫秒，是对应 5G 中低频系统的 1/4。

频段	子载波间隔	时隙长度
1 GHz	15/30kHz	1/0.5ms
1 GHz ~ 6 GHz	15/30/60kHz	1/0.5/0.25ms
24.25 ~ 52.6 GHz	60/120kHz	0.25/0.125ms

表格 3-2 不同频段对应的时隙长度

高频时延主要关注用户面时延，一般用户面时延主要是通过 Ping 包测试来实现的，ping 包的流程图如右图所示。

用户面时延一般通过对用户面 ping 不同大小包来进行分析。针对用户面时延，毫米波可以采用缩短 SR 周期，AMC 参数优化等多种手段达到降低时延的效果。

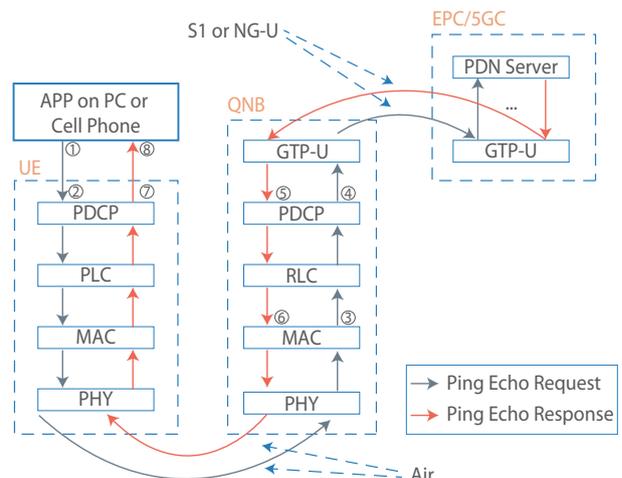


图 3-12 ping 包时延示意图

## 毫米波天线的硬件架构

毫米波天线技术应用于 5G 移动通信，既是缺点又是优点。因为超短的波长，使信号的传播距离受到严格限制，从而引发信号盲区和弱区。相反，超短的波长可以使毫米波天然地具有集成射频元器件、实现紧凑型封装的优势，可以把非常多的天线集中在非常小的区域内，方便使用高指向性的波束赋型技术，以补偿毫米波长距传播中的衰减损耗。同时新技术、新概念的介绍，也丰富着电控波束扫描的形式。

阵列天线当前看是最好的方案，阵列天线有两种架构：

全数字波束赋形 (BF) 的大规模 MIMO 系统可以产生最优性能。但硬件复杂度和成本 (射频通道的数目)、以及信号处理的复杂度和能耗迅速增加。

模拟波束赋形在经济上比数字波束赋形上更受欢迎，但性能达不到数字波束赋形性能的效果，也无法实现较优的 MIMO 性能。

因此在 NR 高频中使用模数混合波束赋形。如下图所示，发射机 (或接收机) 由多个子阵列组成天线阵列，其中每个子阵列能够独立使用 RF 移相器控制波束。在模拟域，通过低成本的移相器，实现高频信号单个 panel 的波束赋形；在数字域，通过使用基带处理器，实现多个 panel 方向的波束联合赋形。

毫米波信号的一个显著特性是空气中衰减大，绕射能力弱，所以毫米波天线需具备高增益的窄波束来抵消传播损耗和抑制干扰。同时，利用多波束天线的空分多址技术，在同一时频资源上服务多个用户，使扇区的总频谱效率和边缘用户的频谱效率得到大幅提升。

这种高增益、多分集的毫米波多波束天线常见实现方式有：相控阵天线和透镜天线，下面我们简单介绍这两种多波束天线。

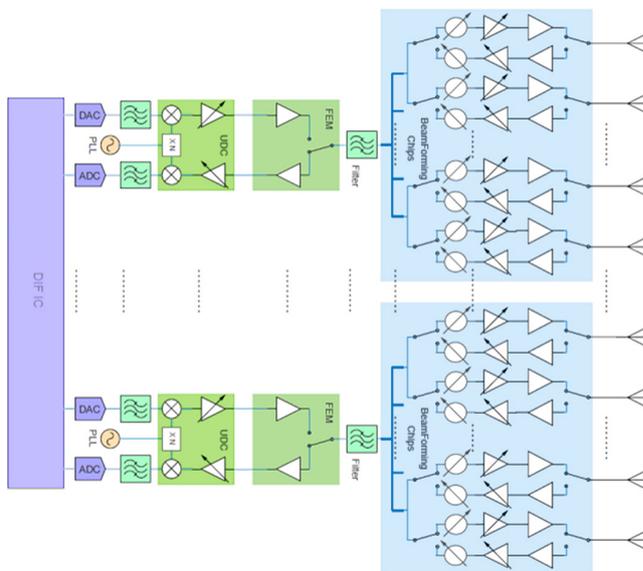


图 3-13 5G 毫米波基站混合波束赋型架构

## 相控阵天线

相控阵天线是一种辐射波束可控的阵列天线。它主要由天线阵、馈电网络以及波束形成控制器等组成，通过相移网络调节阵元的激励幅度和相位来改变辐射波束指向，并可灵活控制波束数目及形状，实现快速扫描和追踪。毫米相控阵天线单元以微带、波导缝隙、介质谐振器结构应用最为广泛。

## 透镜天线

相控阵天线虽然具有增益高，扫描速度快，灵活控制的优点，但是其波束覆盖范围有限，波束差异性较大，工作频带窄、损耗大，并且相移网络复杂、昂贵，这限制了相控阵天线在某些特定场景下的应用，而透镜天线是一种很好的替代。透镜天线是一类利用几何光学原理进行分析和设计的天线，它通过设计透镜形状或者介电常数分布，来校正天线口径面的相位差，从而得到优异的辐射性能。透镜天线具备低成本、宽频带、馈电网络简单的优点，且每个波束具有全口径增益，并能够实现大范围的波束扫描。而随着现代加工技术的革新和通信频率的提升，透镜天线设计复杂、体积大、重量大的弊端也逐步被克服，其必将会在 5G 高频天线领域与相控阵天线并驾齐驱。

## 半导体材料及工艺

5G 毫米波的需求反映到芯片、器件和工艺上又呈现出不同的需求，重点体现在工作于毫米波频段的高性能、低功耗、多通道芯片上。毫米波对半导体材料和工艺提出了更高的要求。

## 半导体材料

化合物半导体是指两种或两种以上元素形成的半导体材料，适用于 5G 毫米波的主要代表是 GaAs、InP 等第二代半导体材料和 GaN 等第三代半导体材料。

虽然化合物半导体制造工艺流程与硅基半导体类似，但由于材料特性、外延方式、制作环境等要求和硅工艺截然不同，化合物半导体集成电路往往需要专门的生产工艺和产线设备。

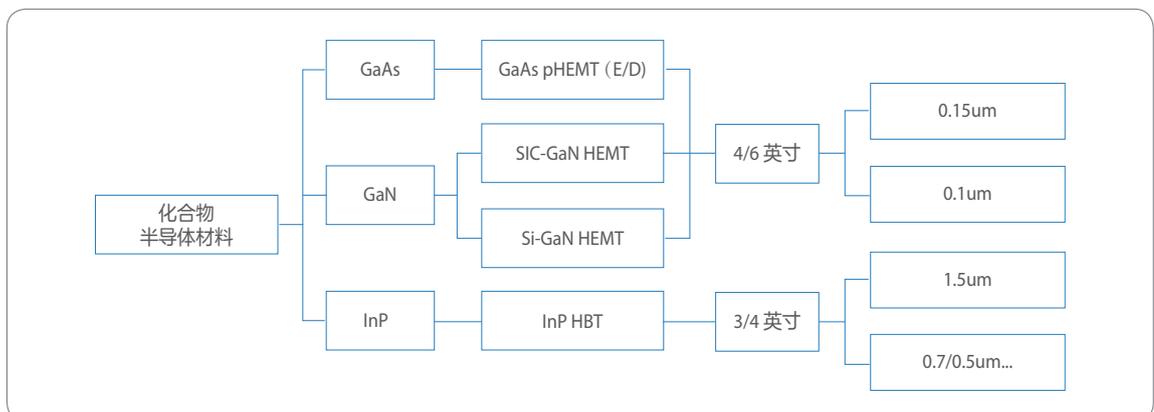


图 3-14 化合物半导体典型器件类型与工艺制程

针对不同工艺，  
RF 的性能差异如右图。

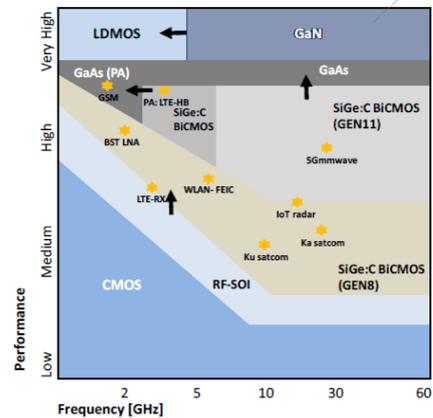


图 3-15 不同工艺材料和性能的关系示意图

## 工艺

为了适应 5G 毫米波系统高频应用、高集成度和批量低成本的需求，对封装技术提出了更高的要求。基于 5G 毫米波终端和基站两大应用需求，目前产业中普遍存在的包括有机基板封装、圆片级芯片尺寸封装和扇出型封装等多种形式。

5G 通信技术中，利用大规模 MIMO 天线阵列实现波束成形、扫描、追踪、锁定，是需要解决的核心技术之一。其中，随着毫米波系统应用频率越来越高，使得天线有可能在封装的尺度内集成实现，即以 AiP 技术实现高度集成。由于 AiP 技术能够很好的兼顾天线性能，而且提高了系统集成度，因此在很多应用场合都开始针对 AiP 技术的研究，比如 28GHz 无线通讯，60GHz 短距离无线通讯以及各类雷达芯片封装等应用。

实际上业内已经陆续发布了不同封装工艺下的 AiP 研究成果，诸如：IBM 公司基于 LTCC 陶瓷封装实现 60GHz AiP 设计，Qualcomm 基于有机封装实现 802.11ad 60 GHz AiP 设计；SUCCESS 合作团体基于框架封装实现 122GHz AiP 设计，奥德利 JKU 基于 eWLB 实现 160 GHz AiP 设计。

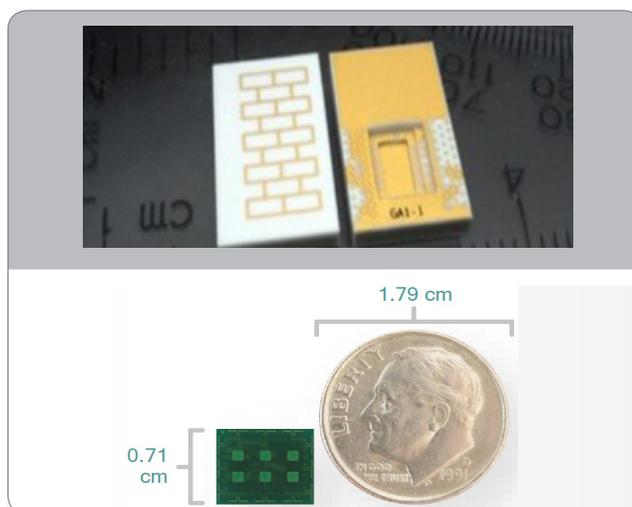


图 3-16 基于 LTCC 和有机基板封装的 AiP 应用

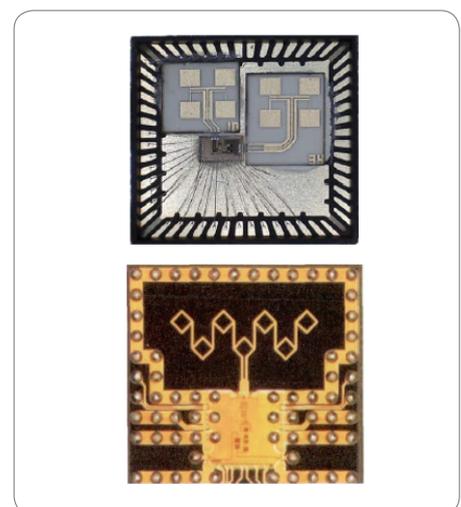


图 3-17 基于框架和圆片级扇出封装的 AiP 应用

## 毫米波的测试和度量 - OTA

5G 高频主要通过大规模天线 (Massive MIMO) 技术来提高系统的频谱效率和覆盖能力, 对于 5G 高频, 可以使用大规模天线技术特有的 OTA (Over the Air) 空口指标来衡量其射频指标。

由于射频线缆的损耗与频率成正比, 因此对于高频通信, 射频收发信机阵列与天线阵列间的连接的射频线缆会产生较大的损耗, 从而影响设备性能, 为了避免上述损耗, 需要设计将收发信机阵列与天线阵列整合为一个整体的有源天线系统 (AAS, Active Antenna System), 由于 5G 高频基站的高度密封性, 基站无法提供传统的传导口进行测试, 需要引入 OTA 射频要求和测试方法。

OTA 指标可以根据测试方法的不同可分为方向性指标, 比如 EIRP (Effective Isotropic Radiated Power); 非方向性指标, 例如 TRP (Total Radiated Power); 还有共址指标 (Co-Location)。方向性指标 (Directional) 主要是指影响组网和覆盖能力的关键指标和下行波束赋形与上行接收合并分集有关的指标, 例如 EIRP, EIS。非方向性指标 (TRP) 主要指影响整体系统的指标, 例如无用发射和带外辐射等。共址指标指由于天线耦合因素存在, 造成测试有难度的指标, 如共址辐射要求、发射互调和关断功率等。5G 高频的 OTA 发射和 OTA 接收指标名称及类型如下表所示。

	指标名称	指标类型
OTA 发射机特性	辐射发射功率	方向性指标
	OTA 输出功率动态范围	方向性指标
	OTA 占用带宽	方向性指标
	OTA 发射信号质量	方向性指标
	OTA 基站输出功率	非方向性指标
	OTA 相邻频道泄漏比	非方向性指标
	OTA 工作频带无用杂散	非方向性指标
	OTA 发射杂散	非方向性指标
	基站 OTA 共址杂散 (未定义)	共址指标
	基站 OTA 发射开 / 关功率	共址指标
	基站 OTA 发射互调 (未定义)	共址指标

	指标名称	指标类型
OTA 接收机特性	OTA 灵敏度	方向性指标
	OTA 参考灵敏度	方向性指标
	基站 OTA 动态范围（未定义）	方向性指标
	OTA 带内选择性和阻塞	方向性指标
	OTA 带外阻塞	方向性指标
	OTA 接收互调	方向性指标
	OTA 通道选择	方向性指标
	OTA 接收杂散	非方向性指标
	基站 OTA 共址阻塞（未定义）	共址指标

表格 3-3 5G 毫米波 OTA 指标及类型

5G 毫米波测试基于 OTA 的测试形态，测试系统主要包括微波毫米波暗室、测试仪器、相关配件以及主控单元。传统的等间隔采样方案，测试一副天线的所有指标需耗费十几个小时。针对该问题，中兴通讯和中国信息通信研究院提出了基于 Rayleigh 优化采样( Rayleigh Optimal Sampling Element ) 的测试系统，该系统采用小型紧缩场测试方案，测试效率提升 300 倍以上，同时支持 3GPP 规定的毫米波基站带内和带外射频指标的自动化测试。

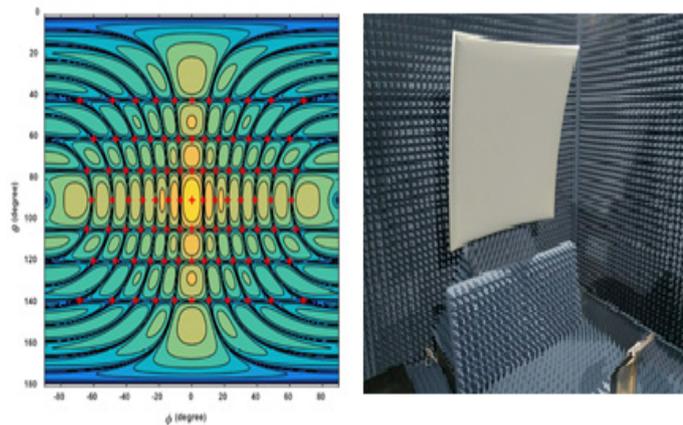


图 3-18 Rayleigh 优化采样（左）和采用该技术的毫米波紧缩场暗室（右）

# 毫米波技术演进和展望

## 3GPP 标准演进

### 多 TRP

R16 版本针对边缘用户的性能和链路健壮性等挑战提出了多 TRP 增强方案。多 TRP 技术可以按需求分别应用于 eMBB 和 URLLC 场景，其中用于 eMBB 的多 TRP 增强主要是为了提升边缘用户的性能，而用于 URLLC 的多 TRP 技术则主要关注提高可靠性。

多 TRP 技术实现分为基于单 DCI 和基于多 DCI。基于单 DCI 的多 TRP 是指基站只在其中一个 TRP 的 PDCCH 上调度一个码字，主要用于两个 TRP 具有理想回传的场景。基于多 DCI 的多 TRP 是在两个 TRP 上独立调度，分别发送各自的 DCI 和 PDSCH，多用于非理想回传场景。

用于 URLLC 场景的多 TRP 主要考虑单 DCI 的实现方式，R16 在协议设计了基于 SDM、TDM 和 FDM 复用技术的多种方案。

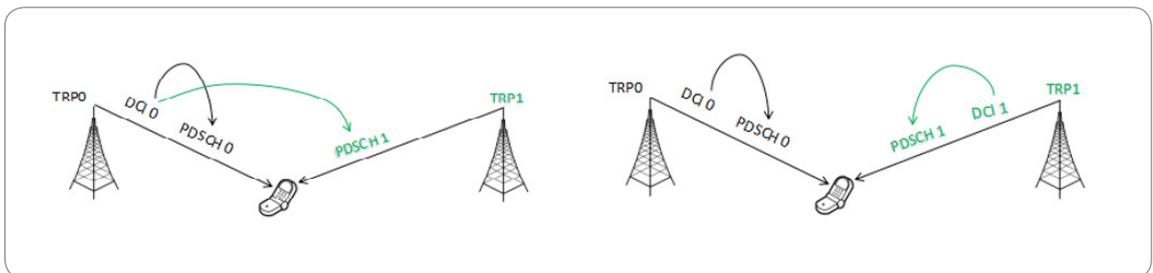


图 4-1 多 TRP 实现示意图 - 单 DCI (图左) 和多 DCI (图右)



## IAB

5G 系统的异构组网、微小区和毫米波技术，都具有覆盖较小，站点密度相比宏网基站高；同时部署区域通常针对性强，站址的安装需要机动灵活；而且 5G 网络数据传输速率大；这些特点使得部署这些技术对回传的容量、可获得性都有较高的要求。无线接入回传可以通过减少无线基站接入节点安装位置对有线回程可用性的依赖，实现更简单更灵活更快速的 5G 基站部署。3GPP 在 R16 标准化了基于 NR 的接入回传技术一体化技术（IAB）。

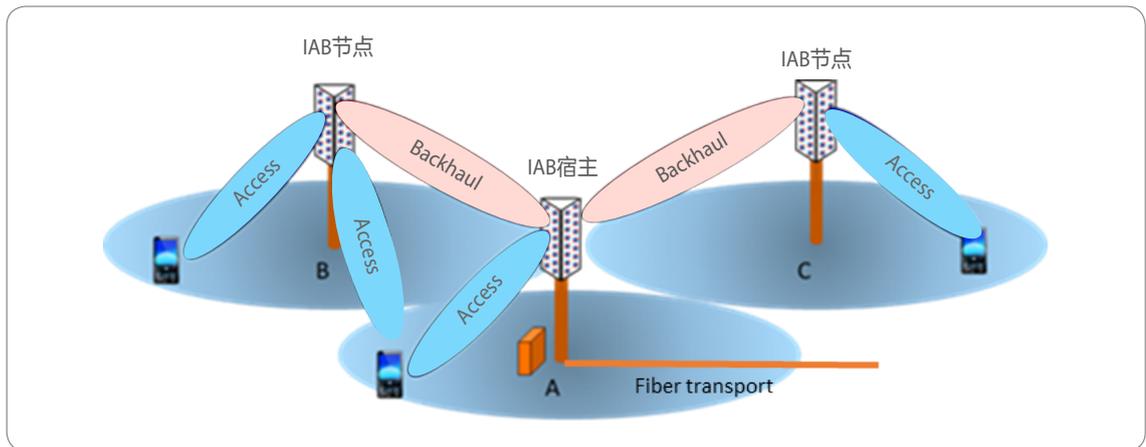


图 4-2 IAB 原理示意图

IAB 最大的特点是接入回传一体化，因此其应用场景是对接入和回传都有需求的场景，主要有以下两大类：

#### 对于回传，有线传输网络部署困难

例如欧美市场，光纤部署有难度，IAB 可以通过无线传输实现回传，减少对有线网络的依赖。

#### 对于接入，中继点也需要提供接入功能

这一点主要是针对例如微波系统的，微波系统为透传，中间节点只有中继的功能，若要实现更为密集的接入覆盖，需要在中继点同时提供接入服务，即只有 IAB 能实现这样的功能。

## 毫米波技术的未来演进

NR 高频未来演进有以下几个方向：

1. 和卫星通信相结合，形成天地一体化网络
2. 与更高频段的太赫兹通信结合，形成更高频段的通信网络

## 天地一体化

卫星互联网是基于卫星通信的互联网，通过卫星规模组网，构建具备实时处理信息能力的大卫星系统，主要用来提供宽带互联网接入等通信服务。其覆盖范围广，传输时延达几十毫秒级别，与 4G 网络相当。同时，在建设周期相近的情况下，卫星互联网相比 5G 基站部署具有一定的成本优势。

截至目前，包括 OneWeb、O3b、SpaceX、Telesat 等多家国外企业已推出卫星互联网计划。其中 SpaceX 公司拥有目前最多的商业卫星数量，重点打造的星链（Starlink）计划将在 LEO、极低轨分别发射 4425、7518 颗卫星进行组网，目前正在轨的卫星数达到 482 颗。

未来卫星互联网的核心应用场景将主要包括偏远地区互联通信、海洋作业、科考宽带、航空宽带和灾难应急通信等，这些地方地面网路架设难度大、成本高，而卫星互联网将可以很好地解决这方面的问题，对地面网络形成重要补充，极大地拓展网络的覆盖范围。

目前已部署或准备部署的宽带卫星通信多数上行频率采用 K 频段（有少部分在 Ku 频段），下行采用 Ka 频段。根据应用的不同及进一步拓宽卫星通信频谱的要求，其它的毫米波频段也进入考虑中，如 V 频段。正因为 5G 高频和当前的卫星频道接近甚至重合，因此在未来的天地一体化设计中起到重要作用。

## 太赫兹演进

后 5G 时代，通信系统对速率的需求将更为迫切。根据香农公式，速率直接体现在系统带宽上。而面向更高的速率需求，作为毫米波的下一代技术太赫兹技术作为下一代移动通信的重要研究方向。

太赫兹指频率在 0.1 THz-10 THz 的频段，对应波长范围 30um 到 3mm，介于毫米波与远红外光谱之间。对于一个载频为 300 GHz 的通信系统，其可用频谱带宽能达 10 GHz 左右，相比目前的 5G 毫米波系统，速率又有 10 倍以上的提升，可提供 100 Gbps 甚至更高的无线传输速率。因此考虑到 5G 毫米波通信定位为  $n \times 10$  Gbit/s 通信，太赫兹通信将定位于  $n \times 100$  Gbit/s 通信，届时终端用户能亲身感受到 1 秒内下载海量高清电影的极致体验。

# 缩略语

缩略语	英文全称	中文全称
CMR	Channel Measure Resource	信道测量资源
CQI	Channel Quality Indicator	信道质量指示
CSI-RS	Channel State Information Reference Signal	信道状态信息参考信号
DMRS	Demodulation Reference Signal	解调参考信号
DOA	Direction of Arrival	到达方向
GBR	Guaranteed Bit Rate	保证比特速率
IAB	Integrated Access Backhaul	集成接入回传
IMR	Interference Measure Resource	干扰测量资源
LOS	Line of Sight	可视径
MU-MIMO	Multi User MIMO	多用户 MIMO
NLOS	Non Line Of Sight	不可视径
PAPR	Peak to Average Power Ratio	功率峰均比
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel	物理下行链路共享信道
PMI	Precoding Matrix Indicator	预编码矩阵指示
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel	物理上行链路共享信道
QCL	Quasi Co-Location	准共址

缩略语	英文全称	中文全称
QoS	Quality of Service	服务质量
RLF	Radio Link Failure	无线链路故障
RSRP	Reference Signal Received Power	参考信号接收功率
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio	信号与干扰加噪声比
SRS	Sounding Reference Signal	探测参考信号
SSB	Synchronization Signal and PBCH block	同步信号和 PBCH 块
SU-MIMO	Single User MIMO	单用户 MIMO
TRP	Transmission and Reception Point	传输接受点
3GPP	3rd Generation Partnership Project	第三代合作伙伴计划

## 参考文献

1. 5G 毫米波技术白皮书 –GSMA Greater China
2. mmWave bands: global licensing and usage for 5G, GSA, June 2020
3. Ofcom: Enabling wireless innovation through local licensing, July 2019

## 中兴通讯版权所有

转载、编摘或利用其他方式使用本白皮书的全部或部分内容的，应注明来源违反上述声明者，著作权方将追究其相关法律责任。