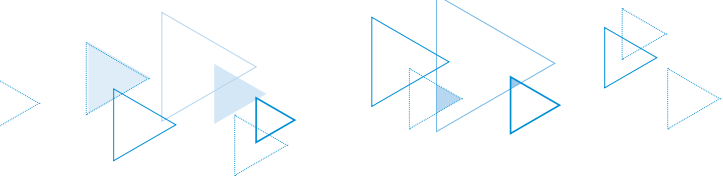


ZTE中兴

# 5G Massive MIMO

## 网络应用白皮书





# 目录

## 01

### Massive MIMO 是第五代移动通信的核心技术

---

## 02

### Massive MIMO 在 5G 网络部署中面临的挑战

03 阶段一：全场景覆盖

03 阶段二：全空间体验

04 阶段三：全价值挖掘

---

## 05

### Massive MIMO 支持 5G 网络持续发展

05 多波束与波束赋形，奠定更优的覆盖基础

08 SU-MIMO 与场景化算法增强，实现随时随地的最佳用户体验

09 MU-MIMO 与多用户多流配对算法，实现系统容量最大化

---

## 11

### Massive MIMO 依托数字孪生，实现物理网络的智能价值进化

## 13

### 总结与展望

---

## 14

### 缩略语

---

### 图目录

---

02 图 2-1 5G 网络发展各阶段与部署目标

03 图 2-2 5G 网络典型覆盖场景

05 图 3-1 4G 广播信道与 5G SSB 对比

06 图 3-2 全场景立体覆盖方案示意图

07 图 3-3 SSB 天线权值智能优化流程

12 图 4-1 数字孪生网络与物理网络的映射模型

### 表目录

---

04 表 2-1 5G 网络发展各阶段特点 / 挑战 / 技术关键点总结表

# Massive MIMO 是第五代移动通信的核心技术

Massive MIMO, 即大规模天线技术, 是第五代移动通信 (5G) 中提升网络覆盖、用户体验、系统容量的核心技术。

与传统设备的 2 天线、4 天线、8 天线相比, 采用 Massive MIMO 技术的通道数可达 32 或者 64, 天线阵子数可做到 192、512 甚至更高, 其增益大大超越传统设备。与此同时, 传统设备在做覆盖规划时, 主要关注和满足水平方向覆盖, 信号辐射形状是二维电磁波束, 而 Massive MIMO 在水平维度空间覆盖基础上增加垂直维度空间的覆盖, 信号辐射形状是灵活的三维电磁波束。所以 Massive MIMO 能深度挖掘空间维度资源, 使得基站覆盖范围内的多个用户在同一时频资源上利用大规模天线提供的空间自由度与基站同时进行通信, 提升频谱资源在多个用户之间的复用能力, 从而在不增加基站密度和带宽的条件下大幅提高网络容量。

Massive MIMO 技术于 Pre5G 时代引入移动通信网络, 目前随着全球 5G 网络的部署, 得到了规模且广泛的应用。

# Massive MIMO 在 5G 网络部署中面临的挑战

Massive MIMO 技术对系统容量的提升效果显著，但在实际网络部署中，依然有不少需要解决的问题。

以同步广播信道 (SSB) 配置为例，SSB 决定了网络的基础覆盖性能。4G 广播信道以一个固定的宽波束发送，其覆盖范围基本不会再变。而 5G SSB 根据帧结构的不同，最多可配置 7 个 (2.5ms 帧结构) 或者 8 个 (5ms 帧结构)。SSB 数量的增加带来配置的灵活性，既可水平多波束配置，也可水平 + 垂直波束组合。各个波束可灵活配置不同的宽度和高度，这使得 5G SSB 波束的配置能支持丰富的场景，更精准地匹配差异化的覆盖需求。然而灵活度的增加也带来配置复杂度的大幅增加，5G SSB 波束的权值配置组合高达上万种。如何在上万种权值中快速准确地找到最适合当前场景的配置且能随着场景和用户行为模式的变化而快速精准匹配，是一个巨大的挑战。

基于大规模天线阵列构成的多用户信道间的准正交特性，Massive MIMO 可通过空分复用方式大幅提升网络容量。由于无线信道传播的复杂性、用户分布与业务的随机性，基站侧需要设计出性能优越的下行发送与上行接收算法，以获得稳定的多用户空分复用增益与抗干扰性能。在给定的天线数目下，Massive MIMO 算法复杂度随着用户数与 MU-MIMO 最大复用层数的增加而迅速增加，成为影响容量的关键挑战之一。

参考全球 5G 网络的推进节奏和建设目标，结合 Massive MIMO 要应对的技术挑战，

5G 网络的发展可分为三个阶段，如下图所示。

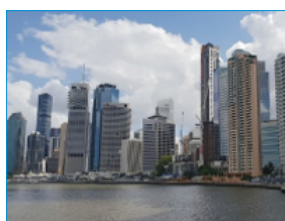


图 2-1 5G 网络发展各阶段与部署目标

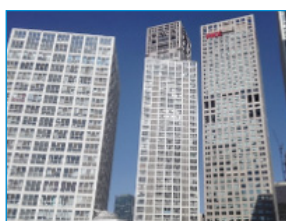
## 阶段一：全场景覆盖

### 该阶段主要解决各种场景下的网络覆盖

与 4G 网络类似，5G 覆盖从业务密集的城区开始逐步向外拓展与辐射。密集城区 / 城区的无线环境非常复杂多变，有高楼林立的 CBD，有高低错落的各类商业综合体，有商业中心与居民区紧密结合的复合式社区，也有广场、城市主干道等无线环境迥异的场景，覆盖方案需能够智能精准匹配各种场景。Massive MIMO 的 SSB 需具备场景匹配的准确性与覆盖调优的智能化，为后续的体验优化、价值挖掘等奠定坚实基础。



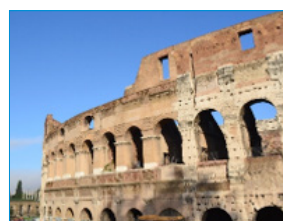
CBD



高层住宅



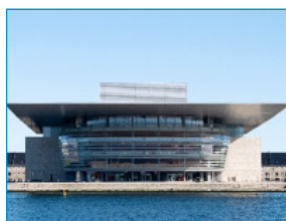
普通居民区



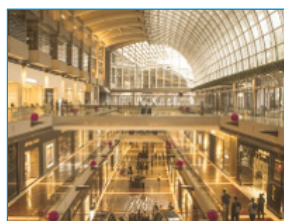
风景区



城市主干道



展览中心



商业综合体



广场

图 2-2 5G 网络典型覆盖场景

## 阶段二：全空间体验

### 该阶段针对用户的体验优化，弥补弱场环境下的体验短板，从而提供随时随地的优质体验。

一般来说，用户距离基站越远，其能接收到的信号越弱，根据资源调度算法，能给予信号弱的用户资源也较少，因此用户速率较低。小区边缘也成为网络中典型的弱场环境。Massive MIMO 可形成更精准、能量更聚焦的波束赋形，一方面增强边缘用户的信号强度，另一方面也降低了对邻区的干扰，从而显著改善了边缘用户速率体验。

另一个用户体验洼地出现在高速移动场景。Massive MIMO 系统的优势是建立在基站拥有质量可靠的信道状态信息的基础上，需要通过信道估计等算法及时获取准确信道状态信息。中高速移动环境下，用户与基站间的相对运动导致当前的信道与信道状态信息检测时的信道发生了较大的变化，出现了信道老化问题，对用户速率产生了较大的负面影响。网络需要能精确、及时地检测到中高速移动环境下的信道状态信息，并匹配相应的算法策略和参数配置，如缩短参考信号的发送周期，提高信道状态信息的反馈速度及精度，使得业务信道赋形更精准以保证用户体验。

此外，一些低时延特性的业务，比如大型交互类游戏或者工业 4.0 场景的机械臂控制等，也需要依据业务的特性有针对性地优化。例如低时延业务的用户优先采用 SU-MIMO 发送，减少 MU-MIMO 配对干扰可能引起的重传。

## 阶段三：全价值挖掘

该阶段用户数量和业务类型均呈爆炸式增长，这是 5G 网络中最具价值的阶段。

这一阶段主要解决如何在频谱受限的情况下进一步挖掘空间维的潜力，以满足接入用户和业务的增长趋势。同时随着网络的逐步成熟与各类业务应用的丰富，用户行为相对成型与稳定，可通过差异化 QoS 管理与智能资源分配，提供精细化用户级服务能力，聚焦高价值用户，充分挖掘网络的长期经营潜力。例如，对于用户密集区域，通过 MU-MIMO 空分复用算法的优化，增加并发用户数，提升传输效率，同时减少网络处于数据发送状态的时长，降低网络能耗；对于运动轨迹相对固定的用户，选择最佳的切换路径，保障用户体验的平滑性；对于潮汐效应明显的业务区域，采用智能波束管理策略，使波束始终对准业务价值区域和价值用户，提升网络运营效益。

Massive MIMO 在 5G 网络发展各阶段应用的关键技术点总结如下表所示。

网络发展阶段	部署目标	主要特点	主要挑战与问题	Massive MIMO 技术应用关键点
全场景覆盖	覆盖与场景的精准匹配	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 整网负荷不高</li> <li>• 密集城区 / 城区 / 景点覆盖优先，逐步扩展到低密度地区 / 郊区</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 多样化场景的覆盖，尤其是高层写字楼、高低错落的商业综合体等</li> <li>• 解决各类干扰</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SSB 设置的准确性与智能化</li> <li>• 降干扰</li> </ul>
全空间体验	以用户为中心提供随时随地的优质体验	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 用户数逐步增加，用户行为和业务类型逐渐丰富</li> <li>• 易发现用户体验短板</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 已知弱场环境下的用户体验提升，如小区边缘、高速移动场景等</li> <li>• 其他体验维度的优化，如时延等</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 波束精准赋形，控制小区内 / 小区间的干扰</li> <li>• 参考信号 / 解调信号的合理配置，使得反馈信息更及时准确，业务信道赋形更精准</li> </ul>
全价值挖掘	有限频谱下网络容量挖潜 & 精细化业务服务能力	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 用户数爆发式增长，容量渐成瓶颈</li> <li>• 价值业务倾向愈渐清晰</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 支持更多用户、更多业务的接入</li> <li>• 聚焦高价值用户，充分挖掘网络的长期经营潜力</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 控制信道 &amp; 业务信道的空分复用，提升容量</li> <li>• 差异化 QoS 管理与智能资源分配，提供精细化用户级服务能力</li> </ul>

表 2-1 5G 网络发展各阶段特点 / 挑战 / 技术关键点总结表

# Massive MIMO 支持 5G 网络持续发展

## Massive MIMO 核心关键技术支持 5G 网络各个阶段的发展要求

全场景覆盖阶段：多波束与波束赋形，奠定更优的覆盖基础；

全空间体验阶段：SU-MIMO 与场景化算法增强，实现随时随地的最佳用户体验；

全价值挖掘阶段：MU-MIMO 与多用户多流配对关键算法，实现系统容量、体验、能耗等全维度价值的最大化。

## 多波束与波束赋形，奠定更优的覆盖基础

### ① 5G SSB 超越传统 4G 广播信道覆盖模式

传统 2/3/4G 制式无线网络的广播控制信道发送和覆盖方式基本上保持了一脉相承的特点，都是通过一个宽波束覆盖整个目标区域。

进入 5G 时代，引入了大规模天线阵列技术，通过天线阵列中的所有天线阵子和射频发射通道的共同作用，使得 5G SSB 具备窄波束赋形能力，SSB 可和 PDSCH 业务信道一样通过波束赋形发出窄波束，支持多个窄波束在时间域和空间域扫描发送，从而实现 SSB 与业务信道相同的覆盖性能以及水平 + 垂直维度的三维立体灵活覆盖形式。



图 3-1 4G 广播信道与 5G SSB 对比

支持 Massive MIMO 技术的五维天线权值包括水平波束宽度，垂直波束宽度，水平方位角，垂直俯仰角，以及 SSB 波束个数。

### 相对 4G 广播信道的固定宽波束，5G 小区的 SSB 发送方式有多种选择：

- 单个固定宽波束，与邻区错开发送：类似 4G 的方式；
- 单个固定宽波束，与邻区在相同资源位置上发送：干扰会增加，但相对节省资源；
- 多波束轮扫：在这种方式下，多波束 SSB 在时间域内错开，对准需要的空间域方向扫描发送。这样既保证了每一个 SSB 波束能量集中对准各自的方位，又可避免相邻小区之间的 SSB 波束间干扰。这是目前 5G 普遍使用的 SSB 配置方式。

多波束相对单波束 SSB 的覆盖有显著增益。在国内外场 1 的连片区域路测中，水平 8 波束（窄）相对水平单波束（宽）RSRP 提升 7-8dB，SINR 提升 7-8dB。其中，单波束覆盖性能最差 5% 的区域，采用多波束覆盖后，RSRP 提升 13-14dB，SINR 提升 7-8dB。在国内外场 2 的连片区域路测中，水平 7 波束（窄）相对水平单波束（宽）RSRP 提升 6dB，SINR 提升 6dB。

## ② 水平多波束基础覆盖向全场景立体覆盖演进

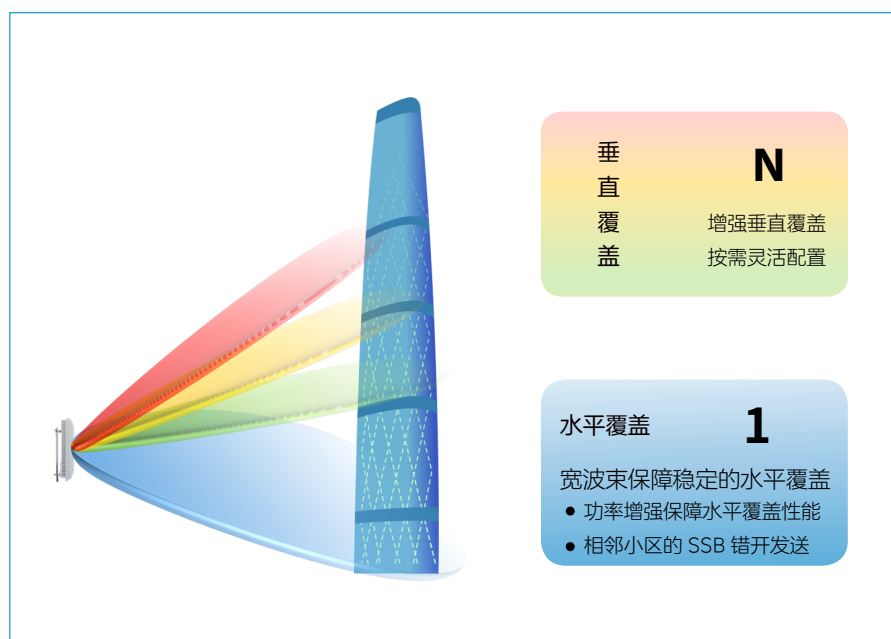


图 3-2 全场景立体覆盖方案示意图

在面对 CBD 这类高楼林立的密集城区场景，SSB 的覆盖不仅需要考虑水平维度，还需要兼顾垂直维度。

全场景立体覆盖方案，以 1 个功率增强的宽波束形成基础覆盖，并在时域上实现邻小区之间错开发送，达到与多波束基本相当的水平维度覆盖性能，同时按需配置 N 个垂直窄波束或宽波束，提升垂直覆盖率，大幅优化高层楼宇的覆盖性能。



### 全场景立体覆盖方案具备以下三个方面的优势：

- 在保证水平维度覆盖性能的基础上，增强垂直维度覆盖能力**  
 1 个宽波束保证稳定的水平基础覆盖，同时结合场景自适应的功率增强，达到与水平多波束相当的覆盖性能。同时根据需要配置垂直维度上的 N 个可宽可窄的波束灵活匹配立体覆盖需求。
- 更精简的 SSB 波束配置，节省资源，降低功耗**  
 相对于水平多波束，全场景立体覆盖方案的 SSB 波束配置数量有所减少，在不影响覆盖性能的基础上，降低了接入资源的开销占比，增加了可用业务信道资源；同时，SSB 波束的时隙占比降低，在轻载时段开启符号关断等节能功能时，可进一步降低设备能耗。
- 有效规避干扰**  
 在时域上错开发送功率增强的单个宽波束 SSB，可有效解决服务小区与相邻干扰小区之间的 SSB 相互的干扰问题。

在国内某外场选取包括高层楼宇、室外路面以及连片组网等在内的多个场景，对全场景立体覆盖方案进行验证。验证结果表明，功率增强的水平宽波束“1”可达到与 8 波束基本相当的水平覆盖性能，灵活的“N”垂直波束配置将高楼覆盖率提升 30% 以上。相对水平 8 波束方案，该方案在高负荷网络条件下，接入容量提升 30%、业务容量提升 5%，在低负荷网络条件下可将设备能耗降低 10%。

## ③ 5G SSB 的高效自动优化

SSB 波束的五维天线权值加上波束 / 小区 / 小区簇的组合，会带来上万种组合。在基站初始部署完成后，需要根据小区内的用户分布、流量分布的变化，以及重叠覆盖 / 弱覆盖 / 过覆盖小区的状态，高效精准地完成天线权值的优化以改善网络覆盖性能。SSB 波束的高效自动优化依托人工智能算法和大数据平台的智能优化工具，能快速收敛并锁定最优天线权值。

SSB 最优天线权值的智能优化流程如右图所示。

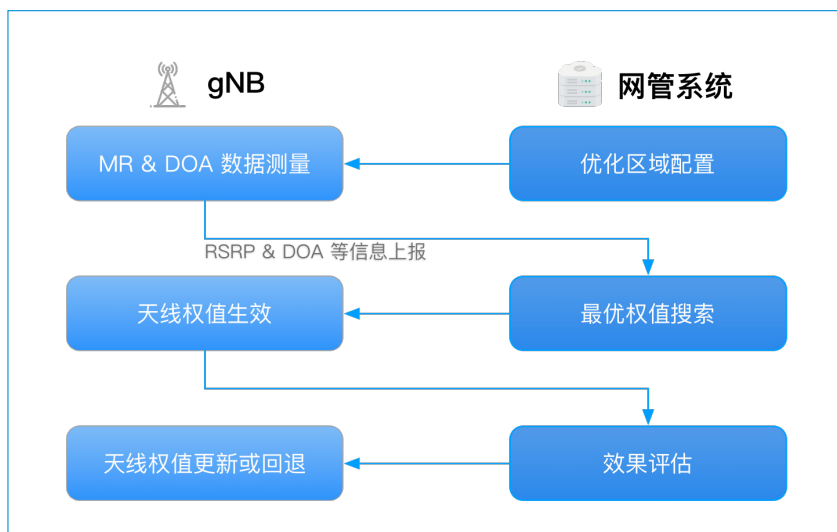


图 3-3 SSB 天线权值智能优化流程

# SU-MIMO 与场景化算法增强 实现随时随地的最佳用户体验

## ① SU-MIMO 是实现单用户极致体验的基础

SU-MIMO 通过上、下行多流的空分复用实现单用户上下行性能体验的增强。针对 2T4R 的商用终端，商用网络支持下行 PDSCH 业务信道最多 4 流，上行 PUSCH 业务信道最多 2 流。SU-MIMO 算法通过最大化流数和每流的频谱效率，实现单用户极致性能体验。

## ② 随时随地的用户体验保障

随着移动网络技术的不断发展和业务需求的不断提升，网络需要保障用户随时随地拥有优良的用户感知和业务体验，例如小区边缘等覆盖较差的场景以及高速移动场景。

### 增强小区边缘的用户体验

在移动蜂窝小区边缘，服务小区与相邻小区的 SSB 在这里形成较为复杂的干扰环境，在小区边缘区域的用户波束赋形的业务信道之间同样存在干扰的可能性。因此，在信号强度本身较弱的小区边缘，需要规避或降低 SSB 和业务信道的波束赋形干扰，改善和增强小区边缘的用户体验。

在小区近点和中点，无线条件良好，终端上行发射功率不受限，上行 SRS 可很好地被基站接收，因此基于 SRS 信道互易性的下行业务信道波束赋形，将获得更优的单用户下行性能体验。而在小区的远点边缘区域无线条件较差，终端的上行 SRS 基站无法准确收到，需要自适应到 PMI 闭环反馈完成下行业务信道的波束赋形。终端通过接收基站下发的 CSI-RS 参考信号，通过信道估计计算出 CSI（其中包含 PMI、CQI、流数等信息）并反馈发送给基站，由基站完成下行业务信道的波束赋形。因此在小区边缘基于 PMI 闭环反馈的波束赋形的性能更优。所以，基站系统需要判断终端所处的位置和无线条件，引入自适应的 SRS/PMI 下行波束赋形机制，来实现整个小区范围内的单用户性能体验最优。

此外还可通过一系列有效的算法来降低干扰：

1

相邻小区之间存在下行业务波束干扰，通过天线权值的调整及波束形态的改善来降低相邻小区的干扰，比如收缩旁瓣降低对邻小区的整体干扰水平，或者在被干扰用户方向的增益置零，降低对特定用户的干扰。

2

相邻小区之间存在上行业务波束干扰，通过天线权值的调整及波束形态的改善来降低相邻小区的干扰，比如收缩旁瓣降低邻小区引入的干扰，或者在干扰用户方向的增益置零，降低特定用户引入的干扰。

## 保障高速移动场景下的用户体验

随着交通工具的现代化发展，用户移动性场景越来越多，用户的平均移动速度也在加快。以 5ms 为周期的 SRS 可支持的移动速度为基线，随着移动速度的提升，可自适应调整 SRS 反馈周期，比如 2.5ms 或 1ms 等更短周期的 SRS 可支持 2 倍或 5 倍的移动速度。

相对于 4G 固定 DMRS 的方式，通过动态调整 DMRS，缩短信道状态的反馈周期，可支持更高的移动速度。以预置 1 个 DMRS 支持 30 公里 / 小时的移动速度为基线，自动额外插入 1-3 个 DMRS，分别可支持 30-120 公里 / 小时、120-300 公里 / 小时、300-500 公里 / 小时的移动速度。

此外，以下算法可从更多角度来实现高速移动场景下的业务感知改善和提升：

### 相对稳健的内环策略：

针对移动用户采用稳健的调度策略，提高一次性传对数据的成功率，提升移动性能。

### 固定循环码本：

针对高速移动的用户，其信道状态难以跟踪，使用固定循环天线权值码本可以获取相对稳定的性能。

### 宽波束优化：

相对于窄波束，采用更宽的波束能够在一定程度上对抗高速移动场景下波束丢失问题引起的性能下降。

### 信道估计修正：

利用历史移动轨迹和信道信息，对当前信道估计的结果进行修正，提升移动场景下波束赋形性能。

## MU-MIMO 与多用户多流配对算法 实现系统容量最大化

### ① MU-MIMO 是基础，多用户多流配对优化进一步提升系统容量

MU-MIMO 空分复用包括 PDCCH 控制信道和 PDSCH/PUSCH 业务信道的多用户空分复用：

PDCCH 的 MU 空分调度能成倍增加用户可接入数量。

PDSCH/PUSCH 上下行业务信道的 MU-MIMO 空分复用调度能力，是最大化小区系统容量、大幅度提升 5G 频谱效率的基础功能。

在中、高负载场景下，通过以下几个方向的算法增强，可以提升用户之间空分配对效率和成功率，增加空分配对的流数，进而提升小区吞吐率。

#### 大小包配对优化：

5G 业务类型多样化，存在较多的小包数据发送场景。该功能允许不等长资源块的终端可进行空分配对增加配对流数，提高系统容量。

#### 空间高隔离度用户快速配对优化：

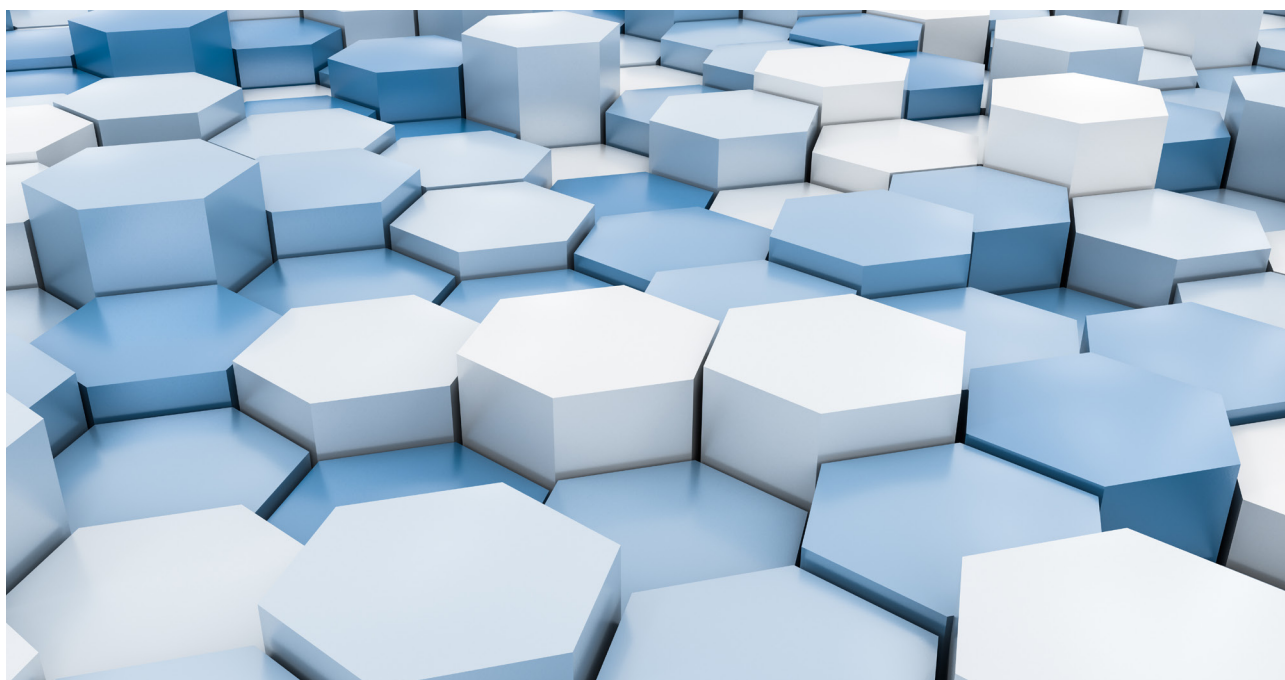
根据终端所在波束信息折算用户相关性，参考配对成功的历史数据，对于隔离度较大波束下的终端直接进行空分配对，大大加速和简化空分配对的计算过程，提升空分配对成功概率，提升频谱效率以及小区容量。

#### 智能下行功率分配：

MU-MIMO 空分复用的多个终端中，小区近点终端可将多余的功率借给边缘终端，提升边缘终端的性能，进而提高空分配对成功概率。

## ② 基于 QoS 的精细化智能调度

采用智能 QoS 调度策略，对不同的用户或业务采用差异化调度策略。例如，对时延或可靠性要求高的业务或 VIP 用户，优先采用 SU-MIMO 发射，或采用 MU-MIMO 发射但设置相对严格的空分复用门限，在保障 GBR 用户 QoS 的前提下，提升空分配对成功概率。反之，对时延或可靠性要求不高的业务，优先采用 MU-MIMO 空分调度，提高系统容量，提升频谱利用效率。



# Massive MIMO 依托数字孪生 实现物理网络的智能价值进化

Massive MIMO 技术引入后，无线网络从二维空间演进到三维立体空间，无线电波传播模型、用户位置与业务分布、波束测量与赋型算法等更加灵活但不易准确预测。现有网络中问题的定位，应对方案的有效与否，新功能的作用与影响，随着网络规模的增加变得愈加复杂。这使得传统无线网络设计与产品迭代演进流程变得愈发难以部署与实现。

## 如何在日益复杂的现实网络遇到问题之前，就能预测并提前找到最优解决方案？ “数字孪生”成为最有可能的解决之道。

“数字孪生”概念产生于上世纪中后期，以计算机辅助为基础进行数字化设计探索，在本世纪前 20 年完成了一部分工业领域的率先应用，出现了仿真驱动设计、基于模型的系统工程等方面的设计范式。“数字孪生”的内涵是充分利用物理模型、传感器更新、运行历史等数据，集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程，在虚拟空间中完成映射，从而反映相对应的实体装备的全生命周期过程。数字孪生是一种超越现实的概念，可被视为一个或多个重要的、彼此依赖的装备系统的数字映射系统，其目标是实现物理世界和信息世界的交互融合，并通过大数据分析、人工智能等新一代信息技术在虚拟世界的仿真分析和预测，以最优的结果驱动物理世界的运行。目前在国内外应用最深入的是工程建设领域，关注度最高、研究最热的是智能制造领域。

**数字孪生是个普遍适应的理论技术体系方法论，引入到移动通信领域，在 Massive MIMO 这类复杂问题场景中，数字孪生需要经历三个环节：**

### ① 网络画像

5G 比以前能够收集到更多的测量量，如 DOA、RSRP/SINR、负荷、业务特征等。对各个网元实体的外部环境 with 业务特征等进行数字化建模，形成“基站画像”、“用户画像”等，进而组成“网络画像”，将物理世界发生的一切，准确映射到数字空间中。

### ② 孪生仿真

将 5G 产品核心算法甚至实现代码以 1:1 真实建模到数字孪生仿真平台，被“网络画像”真实输入数据流所激励，最大限度模拟真实产品特性，力求 1:1 复现产品在复杂外场环境下的真实性能。孪生仿真将是仿真应用的新巅峰。

### ③ 智能闭环

真实信息和仿真分析在各个层面的闭环，是数字孪生的核心生命线。它突破了单纯的建模 -> 仿真 -> 反馈的传统式冗长机制，而是强化实时、互动，让虚拟数字世界的系统融合人工智能作为大脑，自我生长，修正自身，将结论实时作用于真实物理世界，两者共生共存。数字世界为了服务于物理世界而存在，物理世界因为有数字世界而高效有序。

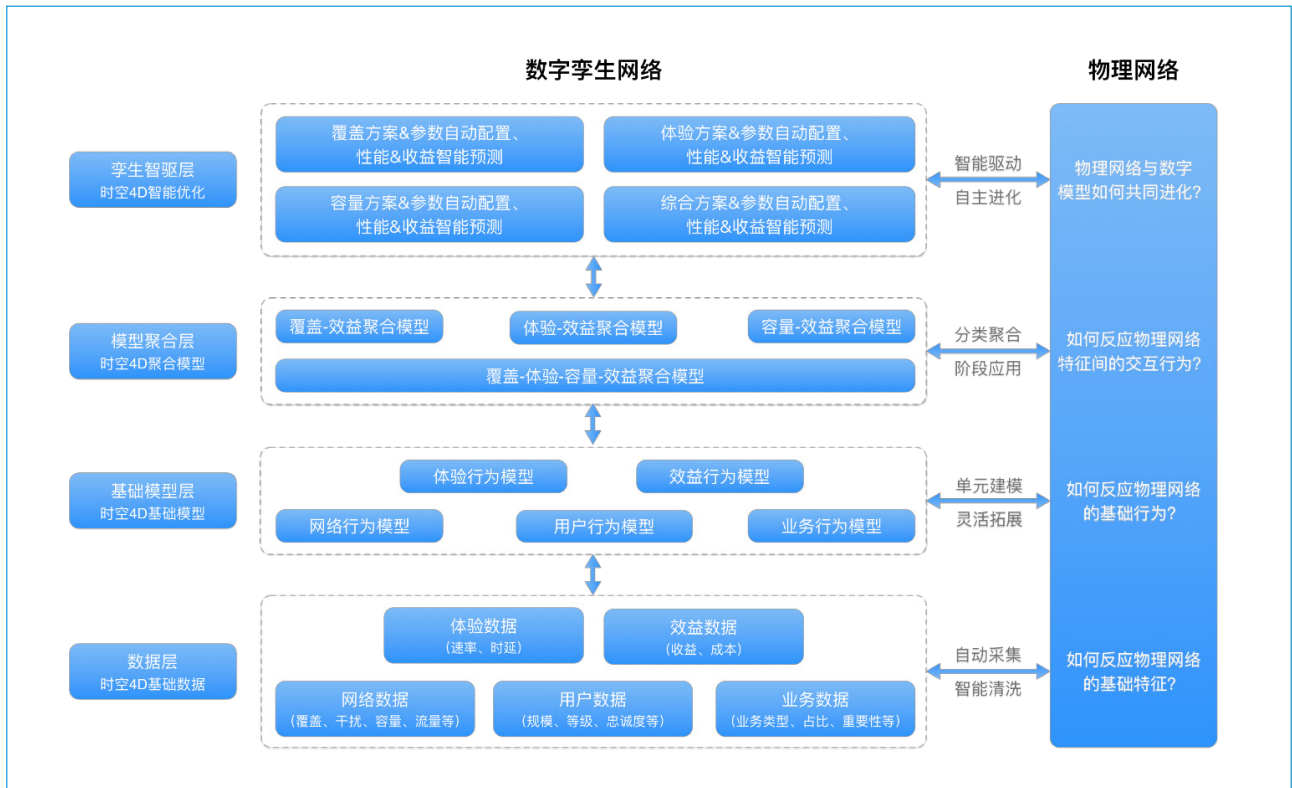


图 4-1 数字孪生网络与物理网络的映射模型

**数字网络与物理网络相互交融，实时互动，共同作用于以 Massive MIMO 技术为核心的网络设计与部署优化。其中：**

- ① 孪生网络所需要汲取的基础数据层，采集到全量全空间数据，经过必要数据清洗，向上形成模型层。
- ② 模型层是仿真技术的关键环节，分为基础模型层、模型聚合层，其中模型聚合层围绕 Massive MIMO 最关键的三个性能维度：覆盖、体验、容量，将其与运营商效益模型紧密挂钩，形成网络运营新范式。任何网络中的升级、改动，将以模型聚合层的网络运营新范式的输出为评价依据，实现运营商对网络整体性能可视化、可量化、可回溯。
- ③ 在海量真实数据、自优化的模型抽象基础上，人工智能最终引入到“孪生智驱”层，这将构成数字+物理网络的真实大脑，不断驱动两个世界的相互校对与系统融合。最终体现在网络经营价值方案不断涌现，为网络运营提供明确的新功能增益、网络演进路径，使得网络发展真实可预测，对产品改进提供明确论据。

Massive MIMO 依托数字孪生有美好可期的前景，同时也面临着巨大的技术挑战，包括海量数据的获取与清洗、用户环境与业务行为的预测、真实产品算法或者代码的模型融合、网络中诸多设备硬件细微特性的突发变化等。正是因为 Massive MIMO 网络的复杂性，使得对这张复杂网络的数字孪生化，存在更广阔的价值增益。数字孪生网络的支撑工具系统也在不断完善，包括网络数据采集系统、大数据运营分析工具、链路与系统仿真平台、网络模拟仪、自动控制系统等。随着数字孪生概念的落地，这些工具与平台将持续演进、融合，实现 Massive MIMO 网络的智能价值进化。

# 总结与展望

Massive MIMO 技术，以其强大的波束赋形能力，成为 5G 网络中的核心技术。从全场景覆盖，到全空间体验，再到全价值的挖掘，Massive MIMO 在网络的各个阶段中发挥着重要作用，为网络的持续发展和价值运营保驾护航。

同时，随着数字孪生概念的引入，物理世界中的网络行为、业务行为、终端行为、算法行为可被提取出来用于精准建模、精准参数调优、精准方案定制及自动化评估，使得网络资源能精准定位到价值最高的用户和业务上并实现资源效率最大化。例如基于波束级、栅格级的覆盖、流量、用户等参量的全面、综合的建模分析及价值计算能够将覆盖能力自动聚焦到价值最高的区域，通过虚拟世界中的高效方案定制和闭环评估快速生成可服务的方案，并通过物理世界和虚拟模型的交互实现方案 / 服务能力的快速迭代和进化。

展望未来，扩展可用频谱将成为网络发展的必然方向。3GPP 已经将 5G 系统频段扩展到 6~100GHz 的毫米波频段，在这个频率范围中，还有大量连续的空闲频段可使用，无线信号的覆盖更有挑战性。这就需要在复杂度、成本、功耗等因素的制约下，利用 Massive MIMO 形成高指向性、高增益的波束，来克服信号传输中的诸多非理想因素，保证覆盖距离和传输质量。不断丰富的业务类型也对网络提出了更高的性能指标要求。Massive MIMO 已在 5G 网络中大规模使用，并不断与新技术结合，必将成为推动网络持续长期演进的关键动因。

# 缩略语

缩略语	英文全称	中文全称
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
MU-MIMO	Multi User MIMO	多用户 MIMO
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
QoS	Quality of Service	服务质量
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
3GPP	3 <sup>rd</sup> Generation Partnership Project	第三代合作伙伴计划