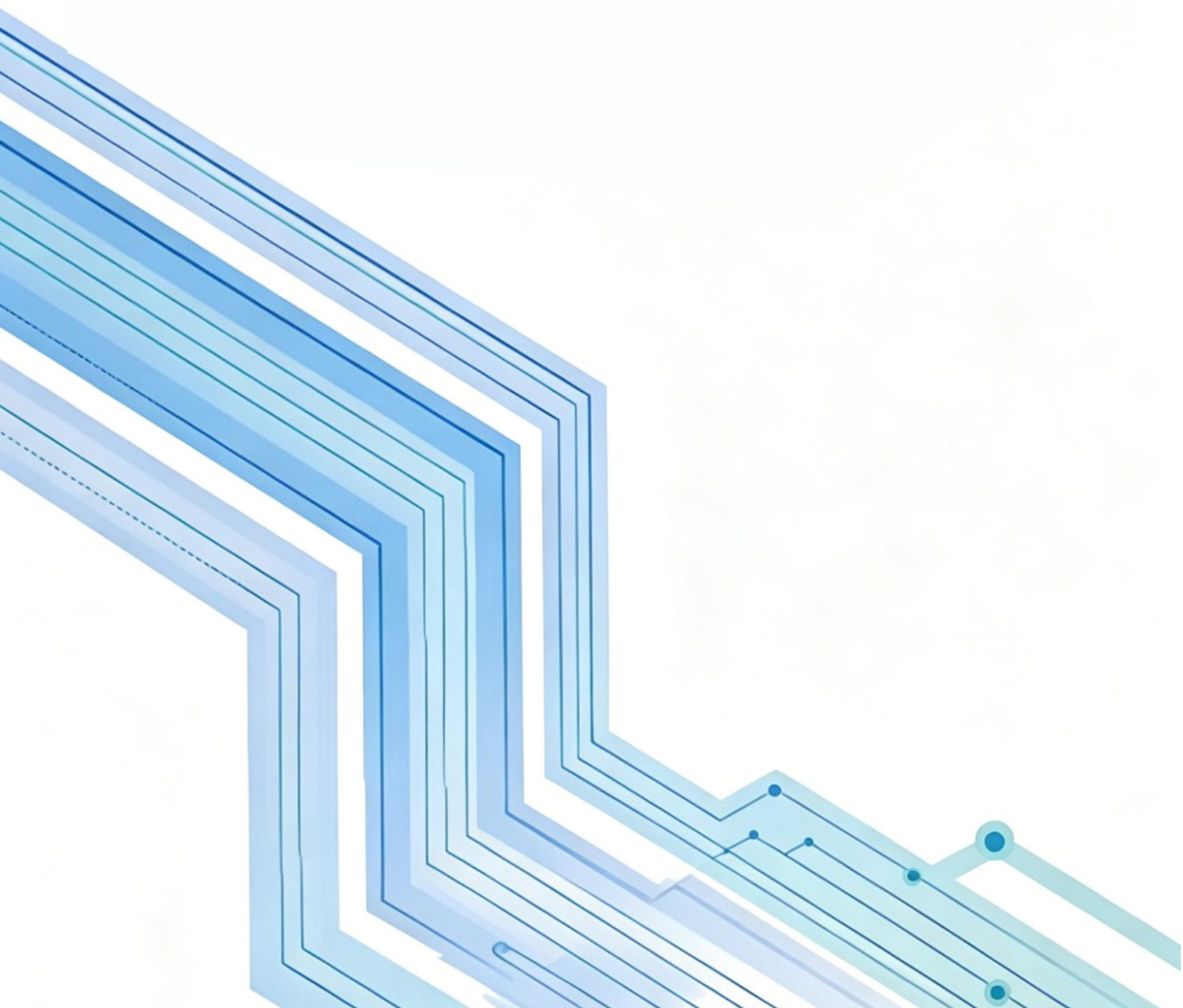


# 6G无蜂窝网络关键技术白皮书

## White Paper on Key Technologies for 6G Cell-Free RAN



## 目录

1 序言 .....	4
2 蜂窝网络高价值场景与性能需求 .....	4
2.1 蜂窝网络高价值应用场景分析 .....	4
2.1.1 改善用户体验一致性 .....	5
2.1.2 提升整体系统性能 .....	5
2.1.3 高可靠低时延场景 .....	6
2.1.4 通信感知一体化场景 .....	7
2.1.5 适应算网融合趋势 .....	7
2.2 蜂窝网络关键性能指标体系 .....	8
3 蜂窝网络系统架构与关键技术 .....	10
3.1 总体架构与高层设计 .....	10
3.1.1 矩阵式解耦小区演进 .....	11
3.1.2 云化网络架构与网元功能分解 .....	13
3.1.3 物理层切分与新型前传接口设计 .....	14
3.1.4 载波级联与多频段融合组网 .....	15
3.1.5 以服务为中心的移动性管理 .....	17
3.2 空口技术突破 .....	18
3.2.1 大规模 TRP 空口时频及相位同步 .....	18
3.2.2 基于层次化处理的分布式收发机整体设计 .....	26
3.2.3 广域覆盖下异步干扰消除 .....	31
3.2.4 多维灵活双工与全双工自适应协同传输机制 .....	34
3.2.5 智能调度与资源分配体系 .....	39
3.3 面向 6G 典型场景的低时延高可靠大规模连接 .....	43
3.3.1 面向极低时延与确定性的超可靠协同传输技术 .....	43
3.3.2 千万级免授权接入与分布式协同检测 .....	46
3.3.3 面向空天地一体化的集群卫星蜂窝系统 .....	48
3.3.4 蜂窝架构下的多层次协作通感一体化与多目标跟踪 .....	51
4 蜂窝网络标准化演进与潜在影响 .....	55
5 蜂窝网络技术试验与评估 .....	56
5.1 蜂窝网络试验床 .....	56
5.1.1 全集中式 CF-RAN 原型试验系统 .....	56

5.1.2 切分式 CF-RAN 原型试验系统.....	58
5.2 无蜂窝网络技术试验 .....	59
5.2.1 Sub-6G 频段试验.....	59
5.2.2 毫米波频段试验 .....	66
5.2.3 商用终端接入无蜂窝网络技术试验 .....	68
5.3 无蜂窝网络应用案例 .....	70
5.3.1 案例一：江苏广播电视塔“6G 专线”赛事直播应用.....	70
5.3.2 案例二：面向低空经济的“一塔一城”无蜂窝协同覆盖.....	71
6 未来展望 .....	73
7 缩略语表 .....	74
8 参考文献 .....	78
9 文档作者列表 .....	80

# 1 序言

2023年6月,国际电信联盟无线电通信部门(International Telecommunication Union Radiocommunication sector, ITU-R)正式发布《IMT面向2030及未来发展的框架和总体目标建议书》(ITU-R M.2160)<sup>[1]</sup>,标志着全球移动通信产业正式迈入第六代移动通信(Sixth Generation, 6G)时代。6G的愿景将从第五代移动通信(Fifth Generation, 5G)时代的“万物互联”全面跃迁至“万物智联”,旨在通过人、机、物的智能互联与协同共生,支撑物理世界、数字世界与生物世界的深度融合。在这一演进过程中,随着移动人工智能(Artificial Intelligence, AI)和具身智能的快速发展,通信领域的需求也正在发生深刻变化。移动AI设备算力和算法不断提升,使得越来越多的智能应用从云端转向边缘端运行,带来了对低延迟、高可靠网络连接的迫切需求。同时,具身智能系统通过与环境的实时互动,需要网络提供具备快速精确感知、分布式协作和场景化快速决策的能力。这些趋势对6G网络提出了更高的智能化和连接能力要求。

然而,传统以基站为中心的蜂窝网络拓扑在面对6G的极致性能要求时,正暴露出诸多结构性瓶颈。天线阵子数量的激增带来物理尺寸与部署成本的挑战,频谱向毫米波、太赫兹延伸则加剧了小区边缘效应与覆盖空洞,而高频次越区切换所引发的业务中断,更难以支撑移动AI与具身智能对微秒级延迟和超高可靠性的严苛需求。这些因素共同表明,传统蜂窝架构亟需突破性演进。在此背景下,6G FuTURE论坛成立无蜂窝网络工作组,汇聚产学研力量,系统探索无蜂窝网络在6G时代的潜在价值。本白皮书由TG2(技术研究任务组)主导撰写,旨在全面梳理无蜂窝网络的底层技术原理、系统架构设计、标准化路径及产业应用前景。我们期望通过这份白皮书,向业界客观呈现无蜂窝技术在重构6G无线接入网中的关键作用,并致力于推动学术界的前沿成果向产业界落地转化,为构建泛在智联的6G网络提供有益的技术参考与探讨。

## 2 无蜂窝网络高价值场景与性能需求

### 2.1 无蜂窝网络高价值应用场景分析

无蜂窝网络技术打破传统蜂窝架构的物理小区边界,以用户为中心构建专属服务簇,通过海量分布式接入点(Access Point, AP)协同服务,从技术机理上解决了传统蜂窝网络的痛点,契合ITU-R为6G系统确立的可持续性、泛在智能、

安全与韧性、连接未连接四大设计原则，成为重构 6G 无线接入网物理层底座的核心使能技术。以下从五大核心场景深入分析其应用价值：

### 2.1.1 改善用户体验一致性

#### （一）沉浸式业务场景

在全息视频、扩展现实（Extended Reality, XR）等沉浸式业务中，传统蜂窝网络的小区切换会导致业务中断，难以满足帧率 120fps 以上的稳定传输需求。无蜂窝网络通过高密度分布式接入节点部署，构建以用户为中心的动态服务簇，在同一时频资源上为用户提供相干或非相干协同服务。随着用户移动，服务簇平滑动态更新，底层消除了物理小区边界带来的切换信令开销与业务中断，将小区间干扰转化为有用的联合传输信号，确保全域用户尤其是小区边缘用户能获得连续、稳定的 Gbps 级沉浸式数据流体验。

#### （二）超高速移动场景

在高铁等超高速移动场景下，传统蜂窝网络的链路稳定性差，切换频繁。无蜂窝网络的多节点预测性波束追踪与无缝“软接力”机制，能在信道极速变化状态下保障链路连续性，即使用户以 500km/h 以上的速度移动，也能维持稳定的通信连接，为高速移动中的高清视频通话、实时数据传输等业务提供可靠支撑。

#### （三）复杂遮挡场景

传统单基站覆盖模式易受障碍物突发遮挡或深度衰落影响，链路脆弱性高。无蜂窝网络的空间分布拓扑建立了围绕终端的多重独立空间传输路径，原生支持极高阶的宏分集增益。当部分视距链路因动态障碍物被切断时，其他节点的非视距路径可无缝合并信号，彻底消除单点故障风险，确保在城市峡谷、室内复杂环境等场景下的通信可靠性。无蜂窝技术可以结合 Uplink-only TRP（Transmission and Reception Point, TRP）技术，支持极低上行信噪比的场景，提高上行覆盖性能，支撑救灾、矿井等深度覆盖场景。

### 2.1.2 提升整体系统性能

#### （一）超密集组网场景

无蜂窝网络具备分布式超密集网络（Ultra-Dense Network, UDN）特性，一方面通过海量天线实现极致空间并行多路复用，大幅提升空间维度的资源利用率；

另一方面，分布式节点的高密度部署提高了单位立体空间内的频谱复用效率，在同一时频资源上可支持更多用户同时接入。同时，分布式节点拉近了与用户的物理距离，减少了信道衰耗，提升了信号质量，进一步增强了系统的承载能力。

## （二）热点区域场景

在演唱会、大型展会、商业区等热点区域，传统蜂窝网络容易出现网络拥堵、速率下降等问题。无蜂窝网络通过分布式接入节点的协同服务，将网络容量进行分布式扩展，能够同时承载海量用户的高带宽业务需求，如高清视频直播、实时互动等，有效缓解热点区域的网络压力，提升用户的上网体验。

## （三）低空覆盖场景

针对低空专网和应急通信高空平台（High Altitude Platform Station, HAPS）场景，采用准共址的无蜂窝部署，可以实现大容量“一塔一城”广域覆盖。这种在较高海拔站址部署大规模 TRP 所形成的无蜂窝系统，可充分利用多个 TRP 的上行联合接收能力，是高效实现低空覆盖的关键技术途径。

### 2.1.3 高可靠低时延场景

#### （一）工业自动化场景

工业自动化对通信的可靠性和时延要求极高，如机器人协同作业、精准控制等业务需要微秒级的确定性低抖动传输。无蜂窝网络的分布式接入节点极大拉近了与终端的物理距离，降低了终端设备的发射功率要求，从根源上缓解了上行链路的干扰碰撞。同时，结合低物理层（Low Physical Layer, L-PHY）向边缘节点下沉的云化架构，无蜂窝系统大幅缩减了数据前传的往返路由时间，配合消除切换信令交互的固有优势，能够支撑微秒级的确定性低抖动传输，满足最高级别的工业自动化需求。

#### （二）车联网场景

车联网中的自动驾驶、车路协同等业务需要实时、可靠的通信保障，以实现车辆与车辆、车辆与基础设施之间的信息交互。无蜂窝网络的低时延特性可确保车辆在高速行驶过程中及时获取路况信息、交通指令等，其高可靠性则能避免因通信中断导致的交通事故。此外，无蜂窝网络的分布式架构还能为车联网提供更广泛的覆盖，支持更多车辆同时接入，提升车联网系统的整体性能。

### （三）低功耗物联网场景

无蜂窝网络通过拉近与终端的物理距离，降低了终端设备的发射功率要求，为低功耗甚至无源物联网（Ambient Internet of Things, A-IoT）设备的持续运作提供了理想的电磁环境。在智能抄表、环境监测、资产追踪等低功耗物联网应用中，无蜂窝网络能够以更低的能耗实现广域覆盖，延长设备的续航时间，降低运营成本，切实支撑万物智联的发展。

#### 2.1.4 通信感知一体化场景

##### （一）环境感知与重构场景

通信感知一体化（Integrated Sensing and Communication, ISAC）利用无线通信射频信号执行感知探测任务，实现目标测距、测速、定位与高分辨率环境重构。传统基于单站的感知系统易受视距盲区限制且易受多径杂波干扰，而无蜂窝系统凭借其天然的分布式拓扑，构建了超大规模的多基地联合感知网络。当发射感知信号时，多维度的散射回波能被广泛分布的多个周边节点精准捕获，通过对这些多视角的空间数据进行相干融合，可有效剥离环境杂波并消除遮挡盲区，在安防、家居、工业检测等领域具有重要应用价值。

##### （二）高精度定位场景

无蜂窝网络利用多节点的多视角到达角（Angle of Arrival, AoA）、离开角（Angle of Departure, AoD）联合测算，有效克服了传统单基站感知的非视距盲区，实现了厘米级甚至毫米级的高精度定位。在自动驾驶、物流仓储、室内导航等场景中，高精度定位能够为设备和人员提供更精准的位置信息，提升系统的智能化水平和运行效率。

#### 2.1.5 适应算网融合趋势

##### （一）AI 原生网络场景

6G 网络被定义为“AI 原生”系统，无蜂窝网络“分布式接入+泛在边缘计算”的物理架构，是承载通信 AI 一体化的完美底座。密集分布的接入节点既是多模态数据的采集触角，也是分布式的算力池。通过在边缘节点就近实施模型特征提取与联邦学习，各节点仅需与中央单元交互梯度或权重参数，大幅降低了前传网络的海量数据回传压力，同时在保障用户数据隐私的前提下，实现了 AI 代

理之间的微秒级高速交互与自适应闭环决策。

### （二）绿色节能场景

在海量分布式节点密集部署的背景下，无蜂窝网络结合 AI 驱动节点自适应动态休眠策略，可根据网络负载情况动态调整节点的工作状态，在提升系统频谱效率的同时实现整网能效的数量级跃升。在同等覆盖条件下，无蜂窝网络的能耗可比传统蜂窝网络降低一个数量级以上，积极响应全球信息通信产业的绿色降碳目标。

### （三）边缘智能场景

无蜂窝分布式的边缘单元不仅是通信载体，更演变为泛在的算力底座。通过优化基于多智能体的大规模分布式资源分配体系、探索基于轻量化 AI 模型的信道预测与环境感知能力，无蜂窝网络推动网络向自学习、自优化、自演进的全面智联与内生智能方向发展。在边缘计算场景中，无蜂窝网络能够为本地业务提供低时延、高算力的支撑，如智能视频分析、实时数据处理等，提升边缘应用的响应速度和处理能力。

## 2.2 无蜂窝网络关键性能指标体系

为全面支撑上述场景，6G 系统需在传统通信维度上实现数量级飞跃，并将感知精度、AI 算力服务及能量效率纳入一级关键绩效指标（Key Performance Indicator, KPI）体系。ITU-R M.2160 建议书已为 6G 技术确立了基础性的宏观牵引指标，2026 年 2 月 ITU-R WP5D 完成 IMT-2030 技术性能要求的技术报告，给出了 6G 无线空口的关键技术指标。无蜂窝网络以其独特的架构优势，为达成这些指标提供了切实可行的技术路径。

下表直观展示了 ITU-R M.2160 对于 6G 技术性能要求，并系统地阐述了无蜂窝架构实现这些指标的核心底层机制。

表 2-1 6G KPI 演进与无蜂窝架构达成机制

关键性能指标维度	ITU-R IMT-2030 技术性能指标	和 IMT-2020 相对倍数	无蜂窝架构的核心达成机制与支撑优势
峰值数据速率	18~38Gbps	1.8x	利用分布式节点拉近物理距离以克服传播损

			耗，叠加海量天线带来的极致空间并行多路复用
用户体验速率	50~300Mbps	UL:1x DL:3x	通过相干联合传输（Coherent Joint Transmission, CJT）消灭物理小区边界，将干扰转为叠加有用信号，实现全域无死角的均质化高速体验
区域流量容量	40Mbps/m <sup>2</sup>	4x	分布式 UDN 打破频谱碎片化，极大提升单位立体空间内的频谱复用效率
移动性支持	500km/h	1x	基于终端辅助校准与多节点协同的预测性波束软交接，有效对抗超音速移动带来的极强多普勒频移
空口端到端时延	用户面： 沉浸式通信:4ms; HRLLC: 1ms 控制面：20ms	1x	底层物理计算向边缘节点下沉，外加“无切换”特质彻底消除高层信令交互引起的中断和抖动
连接密度	10 <sup>6</sup> 设备/km <sup>2</sup>	1x	依赖系统提供的大规模渐近正交信道特征，支撑海量环境物联网设备的高并发免授权接入
定位与感知精度	米级	N/A	构建多视角、多基地的分布式雷达网络，融合多径散射数据以消除盲

			区并提升三维解像力
--	--	--	-----------

### 3 无蜂窝网络系统架构与关键技术

#### 3.1 总体架构与高层设计

在 6G 网络迈向“万物智联”与“数字孪生”愿景的演进路径中，以基站为核心的传统蜂窝网络拓扑正面临着物理与结构性瓶颈。随着频段向毫米波乃至太赫兹延伸，以及空口天线阵子数量的大幅增加，小区边缘效应、频段碎片化、跨区切换中断以及前传链路容量受限等问题，已成为制约网络实现多维目标的主要挑战。在标准化组织与工业界的最新共识中，网络架构的演进正从单纯追求峰值速率，转向保障全域一致性的用户体验，原生融合通、感、智、数、算，以用户为中心的无蜂窝网络演进。

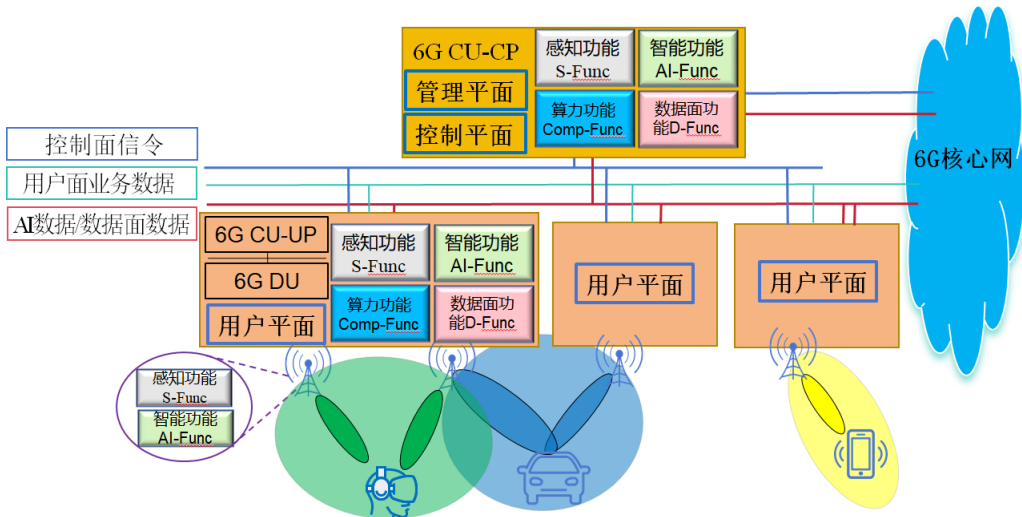


图 3-1 6G 无蜂窝网络总体架构

6G 无蜂窝网络总体架构如图 3-1 所示，基本网元包括 6G 集中单元 (Centralized Unit, CU)、6G 分布单元 (Distributed Unit, DU) 以及 TRP。为适配 6G 新技术演进与新型业务发展需求，架构中创新性引入感知功能单元 (Sensing Function, S-Func)、智能功能单元 (Artificial Intelligence Function, AI-Func)、算力功能单元 (Computing Function, Comp-Func) 与数据面功能单元 (Data Plane Function, D-Func)，以此为无蜂窝网络下多传输接收点 (multiple Transmission Reception Points, multi-TRPs) 的管理调度、组织协同及资源弹性配

置提供核心支撑，全面推动网络向云化、智能化方向升级。

无蜂窝网络通过打破物理小区边界、引入海量分布式 multi-TRPs，并重构底层物理资源与高层服务协议的映射关系，构建了“以用户为中心”的协作网络。

6G 无蜂窝网络设计深度融合了“矩阵式”小区解耦理念与云虚拟化技术，在逻辑层面将时、空、频多维资源统一池化以支持按需灵活编排；在物理层面，通过对传统 DU 进行云化分解，将其拆分为边缘分布式单元(Edge Distributed Unit, EDU) 和以用户为中心的分布式单元 (User-Centric Distributed Unit, UCUDU)，从而有效缓解大规模协作带来的算力与信令开销问题。这一多维度、跨层级的全新架构体系，不仅为后续的空口技术突破提供了物理载体，更在宏观组网层面实现了确定性的无感移动体验与更优的频谱效率。

### 3.1.1 矩阵式解耦小区演进

传统的移动通信系统自诞生以来，长期沿用“烟囱式”的单结构小区模型。在该模型下，特定频段的射频载波、基带物理信道、介质访问控制(Medium Access Control, MAC) 层传输信道以及上层的无线资源管理服务被垂直绑定于单一的物理基站或扇区实体上。这种强耦合特性在应对前几代常规宽带业务时展现出较好的稳定性,但在面对 6G 时代海量异构业务、低时延需求及多频段(Sub-6GHz、毫米波、太赫兹) 一体化组网时，其在资源调度弹性与跨节点协同开销等方面的局限性逐渐显现。

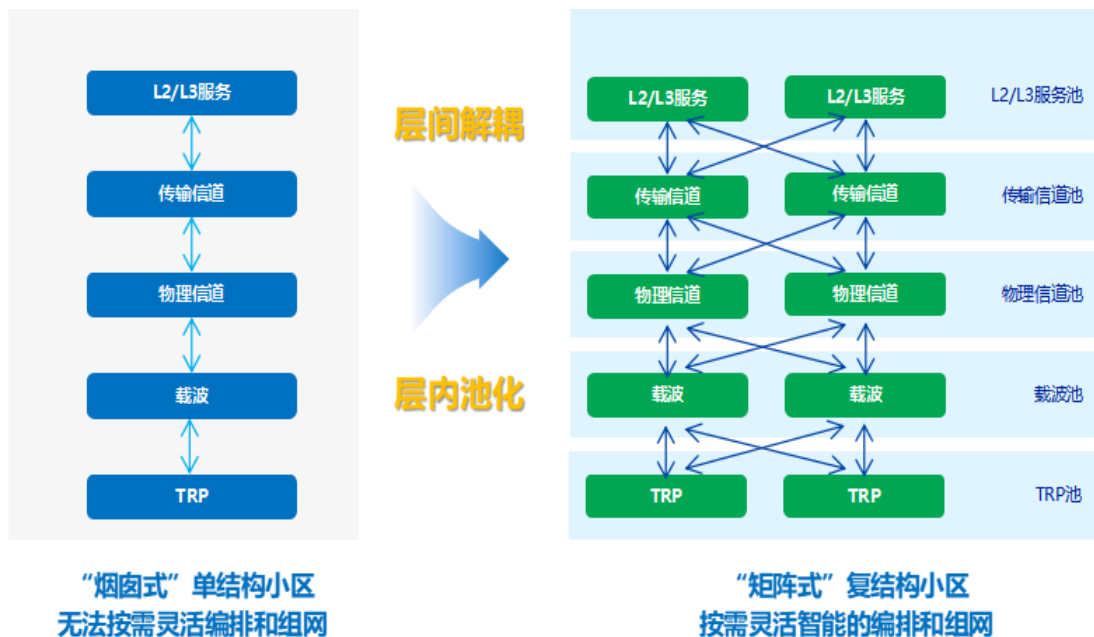


图 3-2 “烟囱式”单结构小区向“矩阵式”复结构小区的演进

如图 3-2 所示，为了解决传统通信的局限、更好地适配不同业务场景和服务类型，6G 无蜂窝网络的顶层设计引入了解耦、池化和虚拟化的核心思想。网络架构从传统的“烟囱式”单结构向“矩阵式”复结构演进，使设计方案具备资源可编排、资源与服务关系可编排、上下行链路关系可编排的重要技术特征。

“矩阵式”复结构小区将原本紧耦合的空口资源与网络服务解耦为五个高度独立且可灵活映射的层级，自下而上构建了全面的虚拟化资源池：

1) TRP 资源层：该层级打破了传统基站天线面板的物理隔离，将广域分布的大规模收发阵列（如 64TR、128TR 的宏站形态）与轻量化微型节点（如 4TR、8TR 的微站形态）统一纳入全局资源池。系统通过 multi-TRPs 技术的演进，根据用户实时空间位置，动态聚合最优的 TRP 集合形成服务簇，将网内干扰转化为空间相干增益。

2) 载波资源层：该层级实现了底层频谱资产的融合。FR1（Sub-6GHz）、FR2（毫米波）、时分双工（Time Division Duplexing, TDD）频段、频分双工（Frequency Division Duplexing, FDD）频段以及非授权频段载波被抽象为统一的频谱资源池。网络可针对特定用户需求实施跨频段组合与弹性伸缩，为实现多频谱原生奠定基础。

3) 物理信道层：不仅囊括了各类物理信道和参考信号资源，还支持同一种物理信道或信号资源在不同空间物理节点上的多重实例并发。这是实现大规模多点相干与非相干联合传输的核心前提。

4) 传输信道层：为 MAC 层的数据流复用与映射提供实例池。支持不同服务质量（Quality of Service, QoS）要求的数据流在高度动态的物理资源集上进行切片化传输。

5) L2/L3 服务层：底层数据通道与上层协议栈服务被解耦。调度、混合自动重传请求（Hybrid Automatic Repeat Request, HARQ）等 L2 服务，以及无线资源管理（Radio Resource Management, RRM）、移动性管理等 L3 服务，均被抽象为独立于底层物理拓扑的微服务模块。为实现无缝移动性提供了上层保障。

### 3.1.2 云化网络架构与网元功能分解

在“矩阵式”小区模型实现逻辑层面资源灵活编排的基础上，为支撑海量节点协同，系统的底层信号处理架构与网元实体也相应向云化方向演进。在面向去蜂窝化的网络设计中，如何合理划定 CU 与 DU 的物理及逻辑边界尤为关键。

传统 5G 架构中，DU 作为核心基带处理单元，承担全量实时基带处理任务。而在无蜂窝网络中，若成百上千个 TRP 联合服务全网用户并沿用传统 DU 架构，所有节点的海量原始射频数据必须汇聚至中心节点进行全局计算。这种“全集中式”处理不仅会带来极大的前传带宽压力，还会因多用户多输入多输出（Multi-User Multiple-Input Multiple-Output, MU-MIMO）计算复杂度过高而导致算力严重受限。

为兼顾系统协作性能与工程实现复杂度，本白皮书提出一种具有内生可扩展特性的全新物理架构——无蜂窝无线接入网（Cell Free Radio Access Network, CF-RAN），如图 3-3 所示。该架构将传统基站网元进行深度云化解耦，重新划分为四个核心层级：射频拉远单元（Remote Radio Unit, RRU）、EDU、UCDU 以及云化集中式单元（Cloud-CU）。其核心逻辑在于将物理层高实时性信号处理与全局逻辑资源调度及分发进行分离与重构。

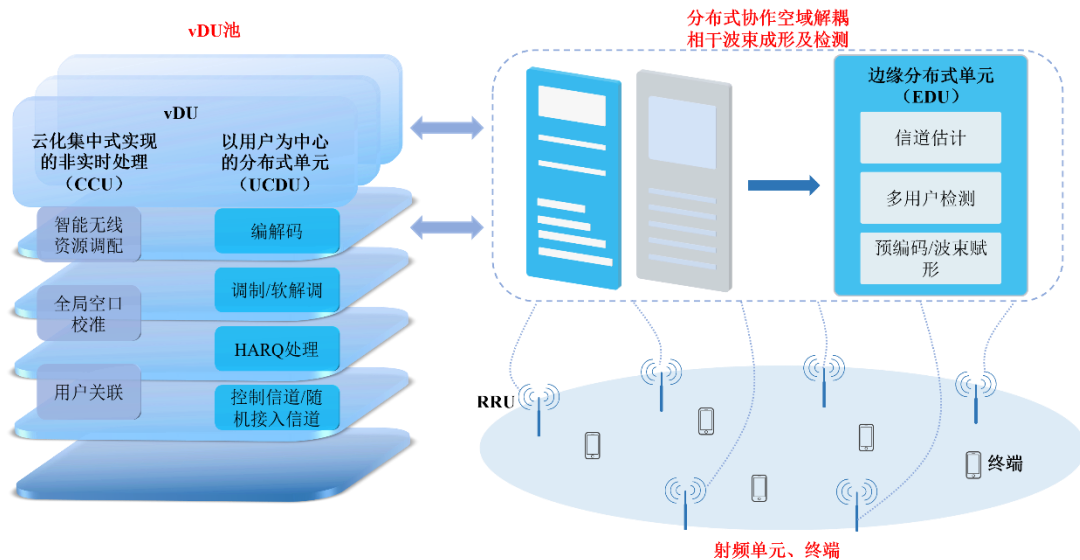


图 3-3 新型 CF-RAN 架构图

在 CF-RAN 体系中，传统 DU 的 PHY 功能被按“实时性强弱”与“全局性需求”精准切割为两部分：

1) EDU: 部署于网络边缘、靠近射频端, 承担实时性高的 L-PHY 任务, 如快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT)/ 逆快速傅里叶变换 (Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)、信道估计、波束赋形以及基于最小均方误差 (Minimum Mean Square Error, MMSE) 的多数据流局部检测与预编码。

2) UCDCU: 上收至云端资源池, 承担共性高物理层 (High Physical Layer, H-PHY) 任务与 MAC 层调度。UCDCU 的核心使命是“以用户为中心”执行跨 EDU 节点的数据流合并与分发。

在 UCDCU 之上, Cloud-CU 进一步剥离了高实时性底层处理, 专注于层 2 及层 3 协议的云化。这种解耦使得 Cloud-CU 可部署于通用云基础设施中, 提供了较高的扩展弹性。

### 3.1.3 物理层切分与新型前传接口设计

无蜂窝网络对接入网的物理层处理提出了新的架构要求, 传统以“小区”为边界的前传接口在面对大规模天线协作时易造成链路阻塞。系统的联合信号处理需要将部分检测与预编码能力下沉。为此, CF-RAN 架构定义了 L-PHY 与 H-PHY 之间的全新切分点, 并引入了 S1 和 S2 两级前传接口, 如图 3-4 所示。

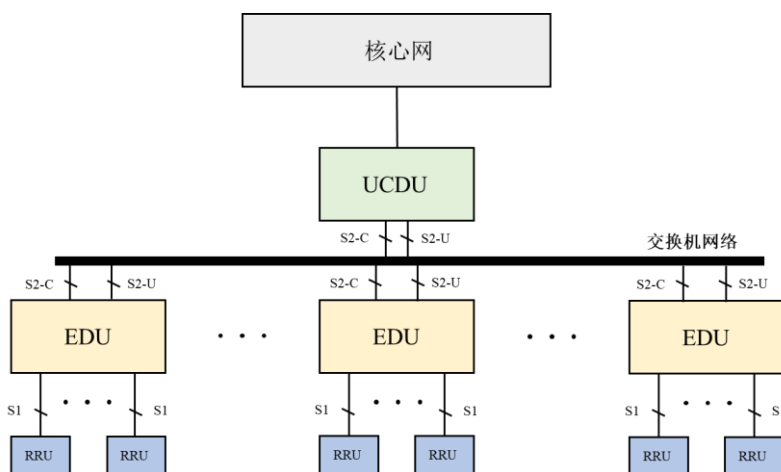


图 3-4 新型的切分接口

其中, S1 接口连接 RRU 与 EDU, 主要传输时域或频域的底层数据, 以此保留底层射频硬件的通用性。S2 接口作为 EDU 与 UCDCU 之间的核心切分接口, 细分为用户面 (S2-U) 和控制面 (S2-C)。在该接口上交互的不再是原始天线采样点, 而是经过 EDU 空间滤波与降维处理后的“用户级”特征流。交互信息主要

包括：UCDU 下发的调度与预编码策略（S2-C）、EDU 回传的边缘测量与互易性校准信息（S2-C），以及上下行用户数据流（S2-U）。通过这一设计，计算密集型的天线域处理保留在边缘，全局协作控制上收至云端，在提升协作效率的同时避免前传拥塞，如图 3-5 所示。



图 3-5 EDU 与 UCPU 之间的接口

### 3.1.4 载波级联与多频段融合组网

在确立了物理网元的算力切割与前传接口后，如何在上层实现多维资源的高效利用是决定系统容量的核心命题。6G 新型小区组网架构呈现为“可编排小区模型 + 分布式多频段组网 + 灰度演进式组网”的特征。其中，载波级联构成了实现多频谱原生的技术底座。

#### (1) 载波级联与基带-射频深度解耦

传统基带与射频载波一一对应，跨频段调度开销大。“矩阵式”小区模型引入载波级联，将频域上零散分布的射频载波（如 FDD/TDD 重耕产生的碎片化频段）在逻辑层统一映射为一个连续的大带宽基带载波，其设计方案如图 3-6 所示。

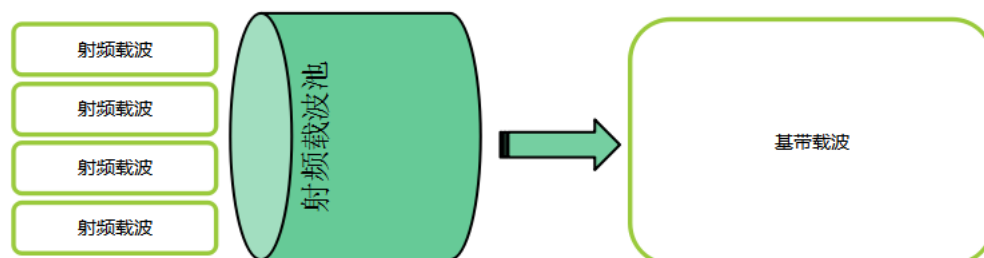


图 3-6 针对多频谱原生设计的载波级联方案示意图

该架构带来以下效益：

- 非连接态的集约化：仅在锚点载波发送公共消息（如同步信号块（Synchronization Signal Block, SSB）、系统信息块（System Information Block, SIB）），用户设备（User Equipment, UE）自主选择最优频段接入，节省空口资源、降低能耗、提升接入成功率。
- 连接态的宽带化调度：基于单一“大带宽基带载波”统一下发调度与资源分配，多个射频载波复用同一控制信令，减少控制开销、提升数据容量。
- 网络运维降本增效：底层级联的多个碎片化载波在逻辑上仅为一个元小区实例，免去频繁的载波配置与切换参数维护。

## （2）演进式频谱使用与融合组网

为集成现网并保护已有投资，依托基带-射频解耦特性，提供三种灰度演进场景，如图 3-7 所示：

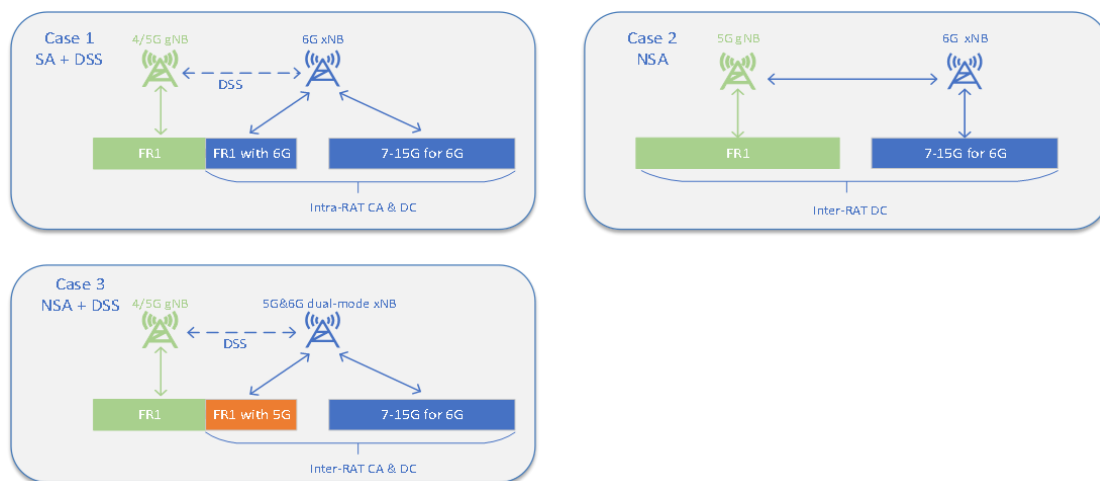


图 3-7 演进式频谱使用和融合组网的三种场景

1) 独立组网 (Standalone, SA) 与动态频谱共享 (Dynamic Spectrum Sharing, DSS): 6G 基站同时集成中频与低频，低频段与现网 4G/5G 基站实施动态频谱共享 (DSS)，实现平滑过渡。

2) 非独立组网 (Non-Standalone, NSA): 6G 基站中频段与现网 5G 基站低频段双连接，利用 5G 低频提供控制面锚点，6G 中频无蜂窝簇提供数据吞吐。

3) NSA+DSS 融合演进: 5G/6G 双模基站同时驱动多频段，其 5G 射频单元

继续与传统基站共享，最大限度降低过渡期阻力。

### 3.1.5 以服务为中心的移动性管理

在以网络为中心的蜂窝网架构中，终端移动性过程具体为切换过程或主小区变更过程，由于终端与小区的绑定关系，移动性过程可能导致传输延迟、损失甚至中断，影响用户的服务体验。

为了提升用户体验，无蜂窝网络引入了以服务为中心的移动性机制，如图 3-8 所示。该机制的核心理念是：实现服务与物理资源的深度解耦，将移动性的锚点从传统的物理小区转移至 L2/L3 服务层。

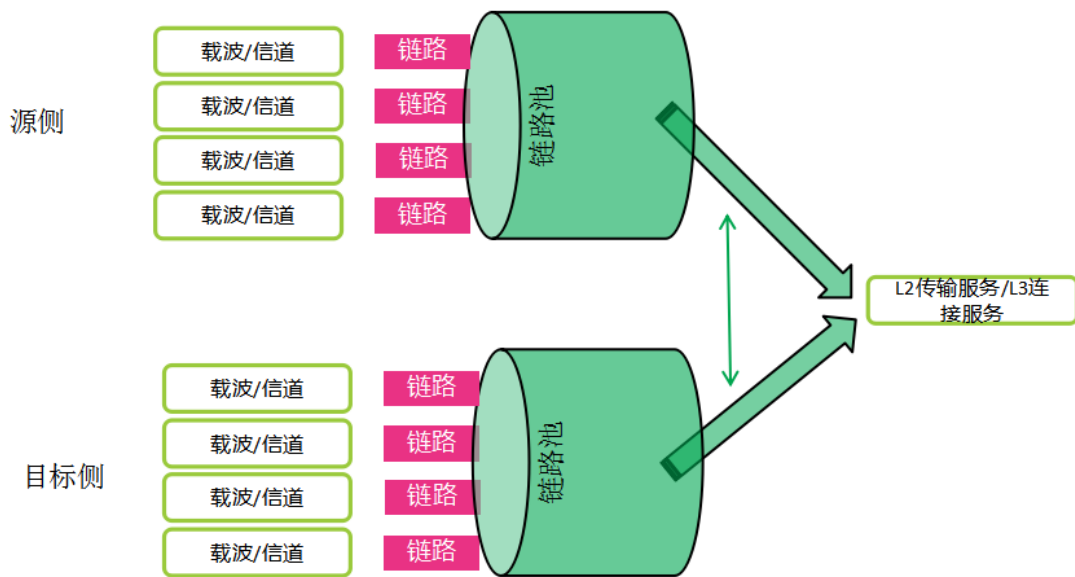


图 3-8 针对移动性需求的 L1 链路和 L2/L3 服务的解耦

通过底层 L1 链路和 L2/L3 服务的解耦以及 L1 链路的池化，当终端在服务区域内移动导致底层载波或 TRP 发生变化时，上层的业务传输服务仍可保持连续运转。在高层锚点不变的情况下，最大程度地保证了平滑的业务连续性，实现了真正的无缝移动。这一范式转移主要体现在以下两个维度的解耦：

#### (1) 服务与载波解耦

在以服务为中心的移动性方案中，网络侧通过高层信令为终端预先配置一个包含多个候选载频的载频集，终端可根据网络指示或自身情况激活其中若干个载频，并在这些激活的载频间进行灵活切换。

当网络侧判断需要进行载频切换时，会直接向终端发送低延迟的 L1 信令，终端从指示字段中获取目标载频信息后，迅速执行底层载频切换并同步更新对应的载波参数。这种基于 L1 信令的动态灵活切换机制避免了复杂的重配流程，在保障网络强覆盖能力的同时维持了较高的链路质量。

## **(2) 服务与 TRP 解耦**

在无蜂窝的超密集组网中，终端的 TRP 更替频繁。通过服务与 TRP 的解耦，网络将传统的跨小区流转降维为底层的波束切换。当服务 TRP 发生变化、收发节点改变时，终端的高层协议栈（PDCP/RLC）不需要进行重建，MAC 实体也不进行重置。终端的传输上下文通过 DU 接口进行后台传输与同步，从而使移动性流程对用户侧所承载的业务完全透明。

综上所述，通过“矩阵式”小区资源池化的思想指引，结合高维云化算力架构、新型前传接口设计以及以服务为中心的移动性管理，6G 无蜂窝网络打破了传统的物理小区边界，在三维电磁空间内构建了一张随用户而动、无缝协同的确定性网络底座。

## **3.2 空口技术突破**

### **3.2.1 大规模 TRP 空口时频及相位同步**

在 6G 无蜂窝网络架构下，传统的以基站为中心的覆盖范式被彻底打破，转而以用户为中心提供泛在的相干增益。为了实现成百上千个分布式 TRP 在逻辑上表现为一个巨型虚拟基站，空口同步技术从传统的时频粗对齐演进为相位级精同步。在 TDD 模式下，由于上下行空口信道的互易性，MIMO 的下行信道信息可以根据上行信道信息获取，进而可以避免反馈，降低开销。但实际上信号经过的信道还包含射频发送通道系数与接收通道系数，由于射频收发通道系数的存在，导致了整体信道不互易。经过基站侧的通道校准可以利用上行信道计算下行预编码，消除用户之间的干扰。但是我们也应该看到，由于终端侧收发通道的不互易，学术界关于无蜂窝大规模 MIMO 无需下行预编码导频的假设在实际系统中通常不能直接工作。因此，在实际系统中，下行解调导频仍然是必选的。

#### **3.2.1.1 时频同步模型**

在无蜂窝大规模 MIMO 系统中，分布式部署的 TRP 通常通过前传链路连接至中央处理单元。然而，由于各 TRP 拥有独立的射频前端和本地振荡器，即便

有高精度有线时钟,如 IEEE 1588v2 精确时间协议(Precision Time Protocol, PTP)等的分发,物理层在毫米波甚至太赫兹频段仍面临严峻的去相干挑战。

如图 3-9 所示,信道的互易性受到收发节点之间的时间同步、本振相位、收发通道系数的影响。发射通道和接收通道的不一致将导致 TDD 系统中采用上行信道进行下行预编码采用严重的性能损失。

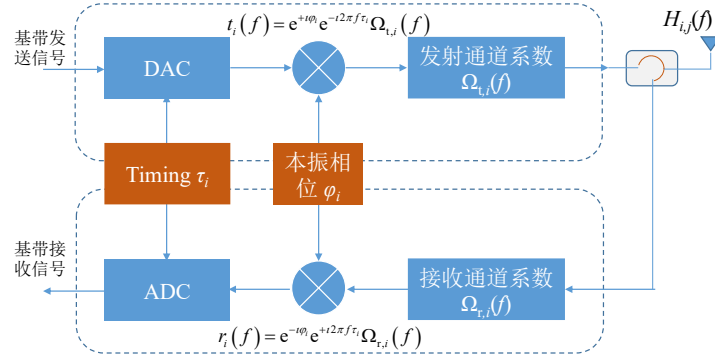


图 3-9 发射通道和接收通道增益及空口信道建模

不同节点之间的时间差与系统的参考时间的获取方法有关。通常,如果节点均自由选择时间参考,节点之间是异步的,必须有相应的同步机制以实现同步。如果每个节点独立地从全球定位系统(Global Positioning System, GPS)/北斗中恢复时间,那么节点之间仍可能存在数十纳秒甚至百纳秒的误差,并且由于各个节点独立恢复时间,时间的抖动也是需要考虑的一个问题。

假设系统中存在统一的时间基准,例如采用 GPS/北斗获取精确的时间(Time of Day, TOD)和秒脉冲(pulse per second, PPS),并通过有线的方式发送给各个节点,则可以实现节点之间的时间同步。在当前的电信网络中,IEEE 1588 PTPv2 以太时间同步机制被广泛采用。主设备从定位系统获取绝对时间后,通过以太分发的形式可以使得多个从设备获得时间同步。通常,这种机制可以使误差降低至 30ns 以内。因此,以太时间同步被广泛应用于电信网络系统。

如果两个节点之间存在本振频偏,将影响本振相位  $\phi_i$  和  $\phi_j$ :

$$\phi_i(t) - \phi_j(t) = 2\pi\Delta f_{i,j}t + \phi_i - \phi_j$$

式中,  $\Delta f_{i,j}$  是天线  $i, j$  之间的频偏,  $\phi_i$  和  $\phi_j$  是天线  $i, j$  的本振初相位。不同节点之间的通道校准系数将随时间变化。节点的本振信号生成可以通过共本振时钟、共参考时钟、独立的本振等三种方式实现。

对于同一个节点内的多根天线之间通常是共本振的，因此通常一个 RRU 内的多个天线之间相位的变化具有较好的一致性。多个物理位置相距较远的节点之间可以通过光纤传送本振信号，但是这种方式的成本较高。

实际中，更常用的方式是多个节点采用公共的参考时钟，每个节点根据参考时钟采用独立的锁相环生成本振信号。SyncE 是一种以太方式实现的参考时钟分发协议，被广泛应用于电信网络。对于这种方式，虽然节点之间没有频偏，但是由于各节点采用独立的锁相环，受到锁相环器件实现的影响，节点之间存在随时间变化的相位漂移（短时间内也可以认为是频偏）。

如果节点之间没有公共的参考时钟，那么节点之间将存在随机的频偏。为了实现 CJT，需要考虑信道受频偏的影响。

共参考时钟和独立本振产生的相位漂移或频偏与 RRU 采用的晶振有关。晶振漂移的指标通常用 ppm 或 ppb 度量。例如，按照第三代合作伙伴计划（3rd Generation Partnership Project, 3GPP）要求的晶振的频率稳定度指标为 $\pm 0.05\text{ppm}$ ，考虑最坏的情况，以 2GHz 载频为例，

$$\Delta f_{i,j} = 2 \times 0.05 \times 10^{-6} \times 2 \times 10^9 = 200$$

那么，仅在 0.4167ms 内相位变化  $30^\circ$ ，这对相干传输来说是不可接受的。因此，为了获得更好的相干传输性能，RRU 需要采用稳定度指标更好的晶振。

上面的三种实现中，共参考时钟是一种较为现实的部署方式。图 3-10 展示了采用目前电信行业常用的以太时钟和时间分发机制实现的多个节点之间的时间和时钟同步。

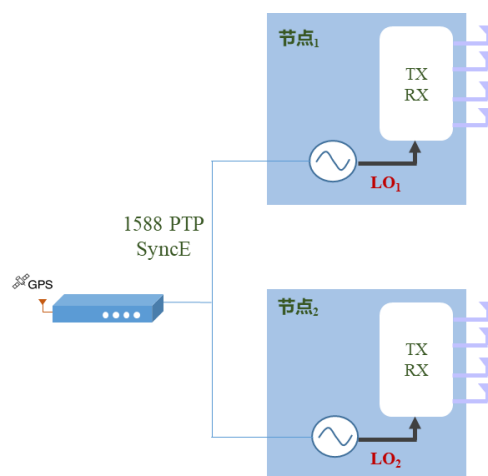


图 3-10 多节点之间的时频同步方案

需要说明的是，对于集中式的大规模多输入多输出（massive MIMO，mMIMO），由于天线射频单元在相同的物理位置，采用共本振和共参考时间，其校准与分布式多输入多输出（Distributed MIMO，D-MIMO）有一定的区别。集中式 mMIMO 通常采用额外的参考通道实现多个射频通道之间的单侧校准，即发射通道校准和接收通道校准。经过这种校准，上下行信道具有互易性，波束同样具有互易性。

对于分布式部署，上下行互易性校准可以在网络侧通过自校准实现，即节点之间互发校准信号，估计节点的收发通道的互易性校准系数，也可以通过终端反馈，由网络侧根据反馈计算节点的校准系数。

从上述描述可以看到，信道的互易性受到两个节点之间的时间同步、本振相位、收发通道系数的影响。

### 3.2.1.2 基站侧自校准

采用与校准天线之间互相发送校准信号的方法被称为 Argos 校准。这种方法容易受到收发链路之间的距离及信噪比的影响。为了获得更好的性能，本节将介绍两种在网络侧实现的分组校准方法。

图 3-11 为一种快速的多节点协作校准方法，它将网络侧节点分成两组，两组之间互相收发导频，估计出组间双向信道，以总体最小二乘算法求解校准系数。

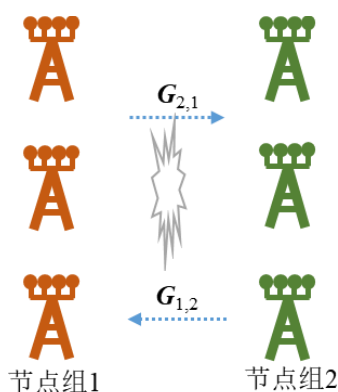


图 3-11 分组校准

为了实现大规模节点的相干协作传输，所有节点需要共相位参考，因此要求全网节点的校准。当节点规模较大时，需要研究如何以较低的实现复杂度，快速

地实现全网校准。为了快速校准，可以将分组校准和中继校准相结合，实现快速的大规模节点校准。

### (1) 分簇

为了实现快速校准，可以将参与校准的节点分簇。分簇以邻近为原则，例如可以采用 K-means 聚类的方法，将邻近的 RRU 视为一簇。分簇中 RRU 的个数，需要根据 RRU 的分布、校准信噪比、距离远近等合理地选取。

### (2) 簇内分组校准

每一个簇内的多个 RRU 可以再次分为两组，在簇内两组 RRU 之间，设计正交导频，估计两组之间互相发送时的空口信道。为了获得更好的校准信噪比，簇内 RRU 的分组，需要进一步优化。直观上，两组 RRU 以交织的方式进行分组，可以获得更好的校准性能。这种交织的方式，应尽可能地将邻近的 RRU 分别划分在不同的组中。文献采用遗传算法获得了一种优化的分组方法。

### (3) 簇间间接校准

为了获得全网校准，还需进行簇间的相对校准。每个簇进行簇内校准时，簇间可采用正交的校准参考信号，例如，在时间上错开。簇间的相对校准可在相邻簇内选择两个距离最近的节点，通过它们使得两个簇的所有天线形成公共的参考。除了上述的分簇和分组校准方法外，还可基于生成树的方式进行校准。这种方法源自中继校准的思路，根据节点之间的拓扑，选择最优的校准路径，对大规模节点完成校准。但是这种方法校准的时间开销较大。

#### 3.2.1.3 终端辅助校准

由于基站侧自校准要求额外设计校准参考信号，基站天线互发校准参考信号的时隙/符号内无法与 UE 进行通信，占据的通信开销较高。并且，当系统内存在异厂商的 RRU 设备时，需要制定基站间空口校准信号交互的接口协议。这增加了设备间联调的难度。当前，5G 的 Release 19 采用了 UE 辅助校准。UE 辅助校准需要由基站向 UE 发送下行参考信号，UE 进行信道估计之后将采用相应的反馈策略，基站根据反馈得到校准系数。另外，由于收发通道的幅度不一致对下行多用户预编码的性能影响较小，标准中仅考虑校准 RRU 之间的频率和相位(包含 RRU 之间的时间差)。下面，我们介绍两种终端反馈的校准方法。

一种 UE 反馈校准的方法是下行信道量化反馈。对于参与协作的多个 RRU，基站发送传统的正交信道状态信息参考信号（Channel State Information Reference Signal, CSI-RS）给 UE，UE 估计出多个 RRU 的下行信道后反馈给基站，基站根据该 UE 的上行信道（通过探测参考信号（Sounding Reference Signal, SRS）获得）和反馈的下行信道，计算出 RRU 之间的校准系数。这种 UE 辅助校准的难点在于如何在反馈开销尽可能小的前提下准确上报下行信道。

### （1）全反馈

这种反馈方式要求 UE 反馈来自所有基站天线的信道，即需要反馈  $LM$  维的信道向量。显然这种反馈方式的反馈空间巨大，对码本集合的大小要求较高。

### （2）部分反馈

这种反馈方式的前提是 RRU 内部通道已完成相对校准，因此只需要完成 RRU 间的校准。UE 只需反馈来自每个 RRU 某一根天线的信道，即反馈  $L$  维的信道向量，基站侧根据上行信道以及反馈的部分下行信道可以估计出 RRU 间的校准系数，然后联合 RRU 内部校准系数最终得到整体的校准系数。显然这种方式的反馈空间明显减小，因此对码本的大小也可以减小，但是当 RRU 内部通道未校准时，此种反馈方式退化为全反馈。

### （3）两步反馈

两步反馈是指先进行 RRU 内部相对校准，再进行 RRU 间校准。对于某个 RRU 而言，内部校准可以通过多个 UE 反馈来自这个 RRU 所有天线的信道进行。RRU 间校准则可以延续前面一步部分反馈的方法。这种方案的一个好处在于，通常 RRU 内部通道共本振信号，内部校准系数是慢变的，若 RRU 内部通道间一致性较好，我们可以对长时间的 RRU 内部系数进行平均，得到更好的内部校准系数。另一个好处是，这种方案对码本要求较宽松，因为它将原本的  $LM$  维向量分成  $L$  维和  $M$  维向量反馈回基站。但是这一定程度上加大了 UE 反馈的难度，因为 UE 不仅要反馈一个或多个 RRU 内部的  $M$  维信道向量，还要反馈 RRU 间校准需要的  $L$  维信道向量。但是若内部校准系数是稳定的，进行一定时间内部校准并求得平均后，得到较精确的内部校准系数，则可以停止反馈 RRU 内部的  $M$  维信道向量。

针对 TDD 系统，R19 版本引入了终端辅助的互易性校准机制，使网络侧能

够获取各 TRP 之间的校准系数。该版本主要提出了两种在网络侧获得校准参数的方法。第一种方法则由终端直接反馈下行信道的统计特性，网络侧基于该反馈信息计算得到各 TRP 间的校准系数，称为非预编码终端辅助校准。第二种方法基于上行 SRS 进行信道估计，网络侧依据所得的 CSI 新增发送一种经过预编码的 CSI-RS, 作为下行校准的参考信号。终端在接收该信号后，测量获得 multi-TRPs 之间的校准系数（包括时间差及收发通道的相位差），并将其反馈至网络侧，称为预编码终端辅助校准。

**非预编码终端辅助校准：**非预编码终端辅助校准可以复用现有的导频设计，终端侧和网络侧各自承担一部分校准计算量，具体实现方案如图 3-12 所示。首先终端侧发射 SRS 等探测导频，网络侧各 TRP 利用终端导频完成各自的上行信道估计，并且根据上行信道估计结果计算网络侧测量得到的待同步 TRP 与参考 TRP 之间的相位差。然后，网络侧的 TRP 各自发射正交的 CSI-RS 等参考导频，终端侧完成各 TRP 的下行信道估计，并且计算待同步 TRP 与参考 TRP 之间的相位差。终端上报终端侧计算得到的 TRP 间相位差给待同步 TRP。待同步 TRP 利用终端测量的 TRP 间相位差减去网络侧测量的 TRP 间相位差，实现待同步 TRP 与参考 TRP 之间的同步。可选的，如果 TRP 之间的时间差较大，网络侧需要根据上行信道结果测量待同步 TRP 与参考 TRP 之间的时间差，终端需要上报根据下行信道结果测量的待同步 TRP 与参考 TRP 之间的时间差，待同步 TRP 根据终端侧测量时间差减去网络侧测量时间差，实现待同步 TRP 与参考 TRP 之间的时间同步。非预编码终端辅助校准方案的测量由于没有消除空口信道的影响，在 TRP 之间非准共址（Quasi Co-Location, QCL）时，容易出现较大的测量误差，进而影响校准结果。

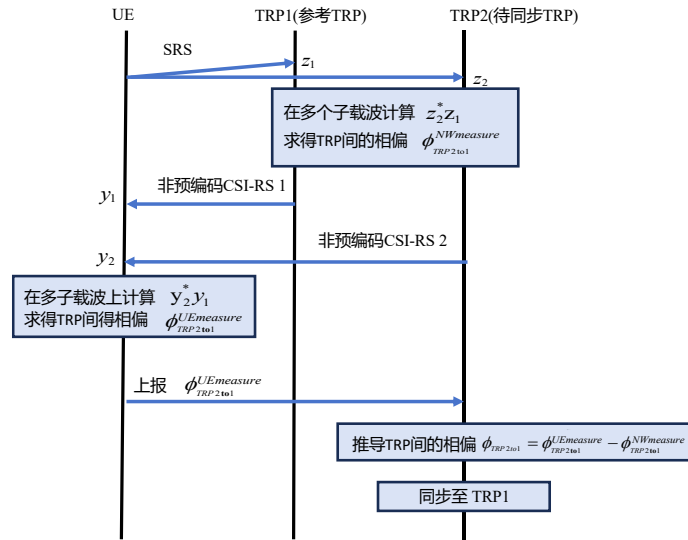


图 3-12 非预编码终端辅助校准

**预编码终端辅助校准：**预编码终端辅助校准需要网络侧在现有的 CSI-RS 等参考导频上进行共轭预编码，校准计算由终端侧完成，具体实现方案如图 3-13 所示。首先终端侧发射 SRS 等探测导频，网络侧各 TRP 利用终端导频完成各自的上行信道估计，并且根据上行信道估计结果对各自的 CSI-RS 等参考导频做共轭预编码。终端侧根据各 TRP 预编码 CSI-RS 完成校准信道估计，并且计算待同步 TRP 和参考 TRP 之间的时偏和相偏。终端侧上报时偏和相偏给待同步 TRP，实现待同步 TRP 与参考 TRP 之间的同步。预编码终端辅助校准利用互易性消除了空口信道的影响，可以推广至 TRP 之间非 QCL 等场景。进一步地，可以利用多终端进行联合预编码终端辅助校准，提升校准估计精度和同步性能。

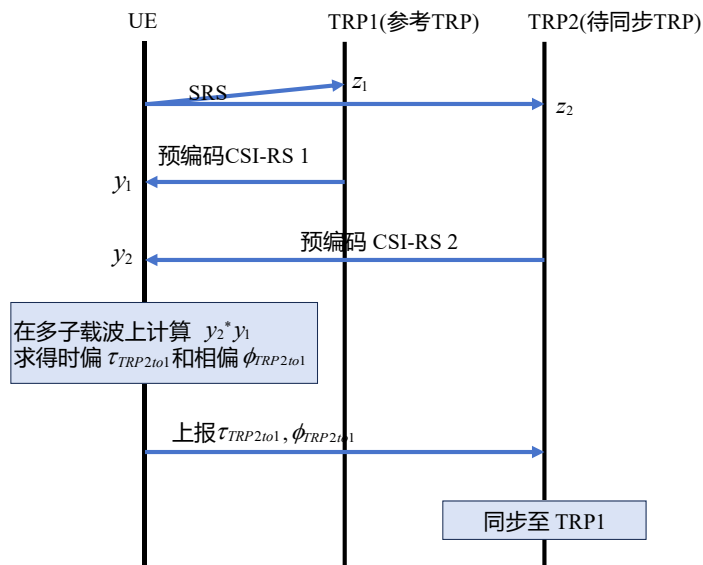


图 3-13 预编码终端辅助校准

#### 3.2.1.4 自校准与终端辅助校准的适用场景

针对低频段 TDD 系统，当各 TRP 之间存在空口链路且网络侧具备自校准能力时，可实现高性能的多用户协作传输，系统容量与传输可靠性均可获得显著提升。由于自校准过程对终端透明，因此无须在终端侧进行标准化定义。基于此，若网络设备厂商支持 TRP 间的自校准功能，不仅可简化现有 QCL 与传输配置指示（Transmission Configuration Indication, TCI）所涉及的复杂流程，降低终端的测量与反馈开销，还能够有效提升系统整体性能。当网络中参与协作的 TRP 数量较多时，各 TRP 之间的时间同步精度要求随之提高。目前，采用 IEEE 1588 PTP 可在一定程度上实现较高精度的时间同步。然而，随着分发时间信息的交换机级联层数增加，时间同步精度会出现下降。因此，需要进一步提升 IEEE 1588 协议在级联场景下的时间同步精度。

在高频段实现下行 CJT 对参与协作的 TRP 之间的时频同步提出了更为严格的要求。对于采用模拟预编码的毫米波系统，由于模拟通道的校准存在一定误差，导致波束旁瓣的互易性较差。此外，受 TRP 物理位置部署因素的影响，多个 TRP 指向同一用户的波束之间可能不存在直达链路。上述因素共同制约了高频段下自校准机制的性能表现。因此，终端辅助校准是高频段实现 CJT 的关键技术途径。对于高频段，为了获得波束赋形增益并降低射频前端实现的复杂度，通常采用混合预编码，射频前端配置了较多的有源射频通道。为了获得较好的互易性，实现空分复用传输，需要对每个 TRP 的每个收发射频通道进行互易性校准，包括每个模拟射频通道。因此，需要采用多终端辅助的数模混合 TRP 的校准。

#### 3.2.2 基于层次化处理的分布式收发机整体设计

在 6G 云网融合架构中，无蜂窝大规模 MIMO（Cell-Free massive MIMO, CF-mMIMO）系统通过分布式部署大量 AP 联合服务所有 UE，有效消除小区边界效应。全集中式信号处理需要极高的前传链路开销和计算能力。本节针对如图 3-14 所示的层次化前传架构，分别介绍上行接收和下行预编码的分布式设计方案，通过将 AP 分组并由分布式中心（Distributed Center, DC）进行局部协调、中央处理单元（Central Processing Unit, CPU）进行全局优化，实现性能与复杂度的有效平衡。

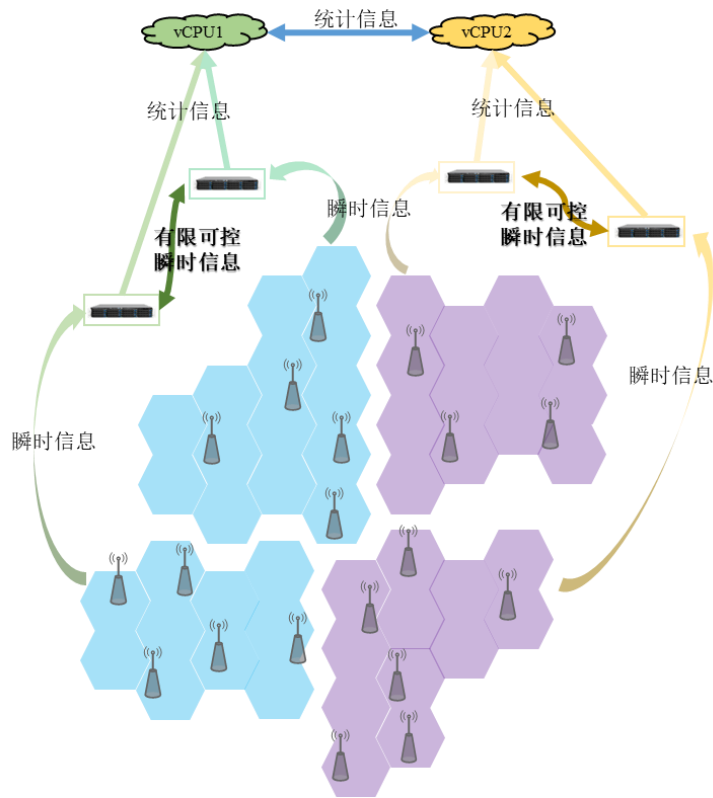


图 3-14 层次化处理的无蜂窝大规模多入多出系统架构

### 3.2.2.1 基于分组联合互补的分布式上行接收架构

下面介绍上行接收架构的核心技术原理。

#### (1) 分组联合互补统一框架

分组联合互补提供一个统一数学框架，将全局联合 MMSE 和 AP 本地 MMSE 作为两种极端情况包含其中。在该框架下，所有 AP 被划分为若干个组，每个组内的 AP 由对应的 DC 进行联合处理。设系统共有  $L$  个 AP，每个 AP 配备  $N$  根天线，服务  $K$  个用户。将 AP 划分为  $G$  个组，第  $g$  个组包含  $L_g$  个 AP，组内天线数为  $L_g N$ 。分组联合互补均衡器可表示为在每个组内执行局部 MMSE 均衡，组间干扰通过后续协作处理进行抑制。

#### (2) 分组联合 MMSE 互补理论

分组联合 MMSE 互补揭示分组 MMSE 与全局联合 MMSE 的数学关系。设  $\mathbf{V}_{G,g}$  为第  $g$  个组的分组 MMSE 均衡矩阵， $\mathbf{V}_{J,g}$  为对应的全局联合 MMSE 均衡矩阵，则两者之间存在互补关系： $\mathbf{V}_{J,g} = \mathbf{V}_{G,g} \cdot \mathbf{Z}_g$ ，其中  $\mathbf{Z}_g$  称为互补核，是  $K \times K$  的复矩阵。互补核包含组间协作所需的关键信息，通过计算和传输互补核，各 DC

可以将本地最优的分组 MMSE 均衡结果转换为全局最优的联合 MMSE 均衡结果。

### (3) 列空间等价理论

列空间等价理论指出：只要各组选择的局部均衡器位于分组 MMSE 均衡器所张成的列空间中，就可以通过设计互补核达到全局联合 MMSE 性能。该理论的重要意义在于允许各 DC 独立选择局部均衡器，只要这些均衡器满足列空间条件，CPU 端就可以通过统一的互补核计算实现全局最优。

基于分组联合互补理论，提出四种分布式上行接收方案：

#### (1) 线性合并分组 MMSE

各 DC 计算分组 MMSE 均衡器，CPU 基于等效信道计算互补核并完成合并。该方案能达到全局联合 MMSE 性能，同时将计算复杂度分散到各 DC。

#### (2) 最大比 (Maximum Ratio, MR) 分组 MMSE

在满足信道条件时，采用 MR 均衡器作为局部均衡器，各 DC 仅需执行共轭操作即可完成本地检测，计算复杂度极低。

#### (3) 压缩匿名均衡分组 MMSE

利用信道矩阵奇异值分解，仅使用对应于较小奇异值的奇异向量作为均衡器，将前传开销从  $K \times K$  降低为  $K_g \times K_g$  ( $K_g$  小于  $K$ )。

#### (4) 静态分组 MMSE

利用信道硬化特性，将互补核设计为仅依赖统计信息的固定矩阵，大幅降低前传开销。

从计算复杂度角度分析，全局联合 MMSE 需要在 CPU 端执行与总天线数三次方成正比的矩阵求逆运算，复杂度为  $\mathcal{O}(L^3 N^3)$ ，在大规模系统中难以承受。基于分组联合互补的方案将计算分散到各 DC，每个 DC 仅需处理本组 AP 的信号，计算复杂度为  $\mathcal{O}(L_g^3 N^3)$ 。通过合理设置组大小，可以将 DC 的计算复杂度控制在可接受范围内。CPU 端的计算主要涉及互补核的计算和最终合并，复杂度为  $\mathcal{O}(GK^2 + K^3)$ ，与组数和用户数相关，与总天线数无关。

从前传开销角度分析，全集中式方案需要将所有 AP 的原始接收信号传输至

CPU，开销与总天线数和信道相干块长度成正比。基于分组联合互补的方案各 DC 只需传输均衡后的  $K$  个符号和  $K \times K$  的辅助信息矩阵，与组数和用户数平方成正比，与总天线数无关。

### 3.2.2.2 面向分层前传的级联鲁棒下行预编码

下面介绍分层鲁棒预编码的核心技术原理。

#### (1) 团队决策理论框架

团队决策理论是处理多智能体系统中分布式决策问题的数学工具。在 CF-mMIMO 系统中，各 DC 视为独立的决策智能体，每个智能体仅掌握局部观测信息（本地 CSI 估计），但需要通过协作实现全局优化目标（最小化所有用户的均方误差）。下行预编码的优化目标为：在满足各 DC 只能基于局部信息设计预编码器的约束下，最小化所有用户接收信号与发送符号之间的均方误差。这是一个典型的二次团队决策问题，其最优解满足特定的平稳条件。

#### (2) 级联预编码结构

为兼容层次化前传架构，级联团队 MMSE 采用三级级联预编码结构。整个预编码器分解为三个级联部分：基本预编码器  $\mathbf{B}_{dc}$ 、瞬时簇预编码器  $\mathbf{C}_{dc}$  和协作簇预编码器  $\mathbf{D}_d$ 。最终预编码向量为  $\mathbf{w}_{dck} = \mathbf{B}_{dc} \cdot \mathbf{C}_{dc} \cdot \mathbf{D}_d \cdot \mathbf{e}_k$ 。其中  $\mathbf{B}_{dc}$  在每个 DC 本地计算，仅依赖本地 CSI 估计，采用局部 MMSE 设计准则； $\mathbf{C}_{dc}$  在 DC 端计算，可利用来自其他 DC 的共享信息，实现 DC 间协作； $\mathbf{D}_d$  在 CPU 端计算，基于统计信息协调不同 DC 之间的干扰。

#### (3) 团队 MMSE 平稳条件

利用二次团队决策问题的平稳条件，推导出分布式预编码器的最优结构。设  $S_{dc}$  为 DC  $c$  可用的信息集合，包括本地信道估计  $\mathbf{H}_{dc}$  和来自其他 DC 的边信息，对于二次团队决策问题，团队理论给出了最优条件为二次团队问题对于每个智能决策量偏导的平稳点在决策量上的条件期望。

#### (4) 嵌套最优结构

级联预编码结构基于嵌套最优结构。该结构表明：在层次化架构中，要实现全局最优，必须首先满足低层级的最优条件。具体到 CF-mMIMO 系统，瞬时簇预编码器必须首先达到最优，然后在此基础上设计协作簇预编码器。嵌套最优结

构的物理意义在于：DC 层面的协作（通过瞬时簇预编码器）是 CPU 层面协调（通过协作簇预编码器）的基础。只有当各 DC 之间实现了有效的干扰抑制，CPU 才能在此基础上进一步优化整个协作簇的性能。

下面介绍详细的实现方案。

### （1）开-关共享策略

为实现 DC 间协作，设计开-关共享策略：每个 DC 可选择开启状态，向同协作簇内其他 DC 共享本地等效信道；或选择关闭状态。定义共享比例  $\eta$  为开启 DC 数量与总 DC 数量之比。 $\eta$  是关键设计参数，直接决定系统性能与前传开销的权衡。当  $\eta$  等于 1 时，所有 DC 共享信息，性能最优但开销最大；当  $\eta$  等于 0 时，无信息共享，开销最小但性能受限。

### （2）预编码器计算流程

第一阶段，基本预编码器计算。各 DC 基于本地 CSI 估计，采用局部 MMSE 准则计算基本预编码器  $\mathbf{B}_{dc}$ 。该预编码器设计目标是在假设无 DC 间协作的情况下，最小化本地服务用户的均方误差。第二阶段，瞬时簇预编码器计算。各 DC 以概率  $\eta$  选择开启状态，将本地等效信道共享至同协作簇内的其他 DC。基于收集到的共享信息，各 DC 构建并求解线性方程组，得到瞬时簇预编码器  $\mathbf{C}_{dc}$ 。第三阶段，协作簇预编码器计算。各 DC 将统计信息上报至 CPU，CPU 计算协作簇预编码器  $\mathbf{D}_d$ 。

### （3）前传容量约束与最优共享比例

前传链路容量约束决定了最大可行的共享比例。设系统时延容忍为  $t_{tr}$ ，每条前传链路容量为  $C_{cns}$ ，协作簇内 DC 数量为  $C_{cls}$ ，则前传容量约束为  $16 \times 8 \times \eta \times C_{cls} \times L_{cls} \times N_{ap} \times K$  小于等于  $C_{cns} \times t_{tr}$ 。由此可得最大共享比例  $\eta_{\max} = C_{cns} \times t_{tr} / (128 C_{cls} \times L_{cls} \times N_{ap} \times K)$ 。

从计算复杂度角度分析，级联团队 MMSE 将计算任务分散到 DC 和 CPU 两个层级，复杂度为  $\mathcal{O}(K^3 D^3)$ 。与全集中式 MMSE 预编码的  $\mathcal{O}(K^3 N^3)$  相比，级联团队 MMSE 显著降低了 CPU 端的计算负担。集中式方案需要处理与总天线数三次方成正比的矩阵求逆，而级联团队 MMSE 的 CPU 端仅需处理与用户数和 DC 数相关的矩阵运算。

从可扩展性角度分析，级联团队 MMSE 满足 CF-mMIMO 系统的两个关键扩展性要求：一是 DC 复杂度不直接与网络规模成正比，通过增加协作簇数量可以控制每个 DC 的计算负担；二是 CPU 复杂度也不与网络规模成正比，因为 CPU 之间交换的是统计期望的和而非原始 CSI。

从前传开销角度分析，级联团队 MMSE 的前传开销包括三个部分：AP 到 DC 的导频传输  $L_{cls}N_{ap}\tau_p$ 、DC 到 CPU 的统计信息上报  $CK$ 、以及 DC 间的等效信道共享  $\eta(C/D - 1)K^2$ 。通过调节  $\eta$ ，可在性能和开销之间灵活权衡。当  $\eta$  等于 1 时，所有 DC 共享等效信道，性能最优；当  $\eta$  等于 0 时，无信息共享，前传开销最小。

### 3.2.3 广域覆盖下异步干扰消除

#### 3.2.3.1 基于异步信漏噪比的异步干扰抑制预编码设计

在广域无蜂窝正交频分复用（Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM）系统中，由于分布式接入点与用户之间的几何距离不同，下行信号在空口传播过程中不可避免地存在到达时延差异，系统接收过程不可避免地面临异步接收问题。与传统同步假设不同，异步特性不仅会引入相位失配，还可能进一步导致载波间干扰（Inter-Carrier Interference, ICI）和符号间干扰（Inter-Symbol Interference, ISI），在大范围覆盖场景下对系统频谱效率和协同增益产生显著影响。相关研究表明，在面向广域部署的无蜂窝 OFDM 系统中，异步干扰已成为影响系统性能和工程实现的重要因素，需要在预编码设计中予以重点考虑。

针对上述问题，构建了面向异步场景的集中式与分布式预编码技术框架，将接收信号统一刻画为有效传输分量、跨载波干扰分量和跨符号泄漏分量，并在此基础上建立异步预编码分析模型。该框架突破了传统同步预编码方法的适用边界，为广域无蜂窝系统中的异步协同传输提供了统一建模基础，也为频谱效率优化、干扰抑制和可扩展实现奠定了理论支撑。

在集中式实现方面，提出了基于信号与异步泄漏加噪声比（Signal to Asynchronous Leakage plus Noise Ratio, SALNR）的预编码方法。该方法在保留异步干扰表征能力的同时，降低了预编码设计的求解复杂度，能够较好兼顾性能与实现可行性。研究结果表明，集中式异步预编码方案能够有效缓解异步干扰带来的性能损失，在不同异步程度和用户规模下均表现出较好的稳健性，整体性能

可逼近理想同步条件下的高性能预编码基准。

在分布式实现方面，面向多 CPU 协同架构提出了异步团队最小均方误差（Asynchronous Team MMSE, AT-MMSE）预编码方法。该方法基于局部信息处理和有限协同交换，实现了异步场景下的分布式预编码设计，可在不依赖完整全局信息的条件下完成多点协同传输。相较于全集中式处理，AT-MMSE 更符合广域无蜂窝网络对可扩展性、分层协同和工程部署灵活性的要求，也使异步预编码从理论分析进一步走向可实施的系统方案。该方法在同步条件下可自然退化为已有的 T-MMSE 框架，因此具有较好的理论兼容性与工程延续性。

该分布式框架的一个重要特点是支持前传开销的自适应调节。通过引入信息共享比例参数，系统可在性能增益与协同开销之间实现灵活折中：当前传资源受限时，可维持较低开销的分布式协同；当前传能力提升时，系统性能可进一步向集中式处理逼近。由此，异步分布式预编码不仅增强了系统对前传约束的适应能力，也为不同网络规模、处理能力和部署条件下的无蜂窝组网提供了更加灵活的实现路径。

从部署流程看，集中式 SALNR 方案主要依赖 CSI 汇聚与统一计算：各 CPU 首先收集所连接接入点的 CSI，再经前传链路完成信息交换，最终执行异步预编码计算。相比之下，AT-MMSE 采取更加分布式的流程：各 CPU 先基于本地 CSI 计算局部预编码，再仅交换经压缩后的协同统计量，最后由各 CPU 完成协作预编码求解。这种“局部计算+有限共享+协同更新”的处理模式，更符合广域无蜂窝系统对低时延、低前传负担和高可扩展性的需求。

异步集中式与分布式预编码技术为广域无蜂窝 OFDM 系统提供了面向实际部署的重要支撑。一方面，该技术突破了传统同步假设下的预编码设计框架，将异步传播时延及其引发的 ICI 和 ISI 统一纳入协同传输设计；另一方面，通过集中式高性能处理与分布式低开销协作两类实现模式，为未来 6G 无蜂窝网络在广域覆盖、弹性组网和受限前传条件下的演进提供了有价值的技术路径。

### 3.2.3.2 面向异步毫米波无蜂窝系统的逐波束定时提前混合预编码

在面向广域覆盖的毫米波无蜂窝 OFDM 系统中，多个分布式 AP 协同为用户提供服务。由于各 AP 与用户之间的几何位置不同，信号到达用户的传播时延天然存在差异，因此系统接收过程同样呈现异步特征。现有多数无蜂窝研究通常

建立在同步接收假设下，但在大范围覆盖场景中，该假设往往难以满足。当异步时延超过循环前缀长度时，系统不仅面临相位失配，还会进一步产生 ICI 和 ISI，显著削弱相干传输增益并导致频谱效率下降，该问题在毫米波场景中尤为明显。针对这一问题，逐波束定时提前（Per-Beam Timing Advance, PBTA）混合预编码架构为广域异步毫米波无蜂窝协同传输提供了一种新的实现思路。

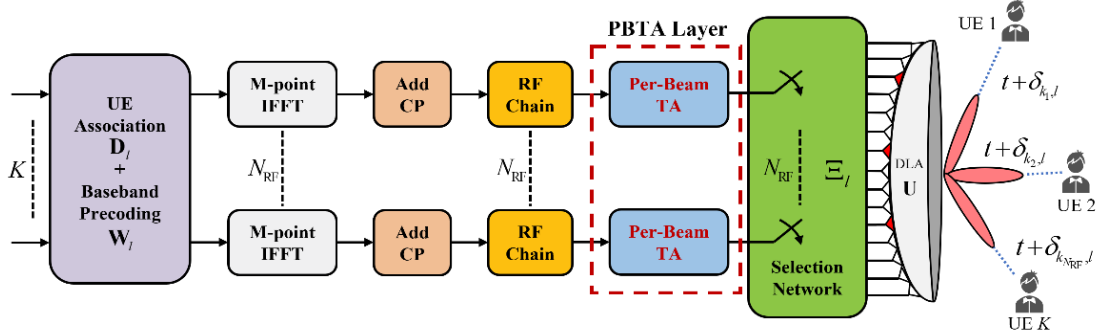


图 3-15 PBTA 混合预编码架构框图

PBTA 混合预编码架构如图 3-15 所示，其核心在于，将传统空间域的问题转化为波束域的逐波束对齐问题。该架构采用有源天线单元（Active Antenna Units, AAU）替代传统分布式接入点，每个 AAU 配置大规模天线阵列和有限数量的射频链路，并借助离散透镜阵列或移相器等混合预编码结构，将空间域信号转换到波束域进行传输，从而支撑不同用户在不同波束上的空分复用，并为逐波束实施时延补偿创造条件。不同于传统“一个节点只能对齐一个用户”的空间域定时提前方式，PBTA 架构在每条射频链上引入额外的逐波束定时提前单元，使各 AAU 能够针对不同波束独立配置定时提前量，以补偿异步传输带来的时延失配。结合波束与用户的匹配关系，来自不同 AAU、服务于同一 UE 的波束可在接收端实现近似同步到达，从而支持多用户的近似同步传输。

从实现流程看，PBTA 混合预编码主要包括波束域变换、波束选择与用户关联、逐波束定时补偿以及数字预编码协同四个环节。首先，AAU 利用统一酉矩阵变换将空间域信道映射到波束域；随后，结合大尺度衰落信息和波束域信道幅值信息，完成波束选择与用户关联；在此基础上，各 AAU 根据各用户的传播时延，在每条激活波束上施加特定的定时提前量，使来自多个 AAU 的相同目标信号在接收端尽可能对齐；最后，通过结合异步相位补偿的数字预编码进一步抑制残余多用户干扰，形成波束域同步与数字域干扰抑制相结合的联合传输框架。

与传统异步补偿方法相比，PBTA 的突出特点在于其不仅能够修正异步引起的相位偏移，还能够面向超出循环前缀范围的大时延失配，有效抑制由此带来的 ICI 和 ISI。现有方法多侧重于异步相位旋转补偿，对 ICI 和 ISI 的抑制能力有限，因此在广域场景下性能受限。而 PBTA 则在混合预编码框架中显式融入了波束级定时对齐机制，将同步粒度从“节点级”细化到“波束级”，更契合多节点、宽覆盖、毫米波与 OFDM 融合条件下的无蜂窝系统需求。

### 3.2.4 多维灵活双工与全双工自适应协同传输机制

双工技术是移动通信系统实现双向数据传输的基本资源配置技术。随着移动通信系统向更高频谱效率、更低时延和更大连接密度演进，双工技术的灵活性与干扰管理能力成为制约网络性能的关键因素。传统 TDD 和 FDD 在应对动态业务与密集组网场景时暴露出资源利用效率低、交叉链路干扰(Cross-Link Interference, CLI) 严重等问题。近年来，学术界和产业界提出了多种新型双工技术。网络辅助全双工 (Network-Assisted Full-Duplex, NAFD) 通过空间分离的接入点分别处理上下行信号实现同时同频传输；子带全双工 (Sub-Band Full Duplex, SBFD) 在 TDD 载波内划分非重叠的上下行子带以实现全双工能力；波分多址 (Beam Division Multiple Access, BDMA) 利用大规模天线阵列的高空间分辨率，为不同用户分配专属波束，通过分配正交波束资源实现同时同频双工。

#### 3.2.4.1 NAFD 框架

CF-RAN 系统的出现为多种双工技术的融合提供了理想的平台。CF-RAN 通过大量部署的 AP 与集中/分布式处理单元协同，打破了传统蜂窝边界，缩短了 AP 与 UE 的距离，可以有效消除蜂窝架构中的小区间干扰。

而无蜂窝网络辅助全双工 (Cell-Free NAFD, CF-NAFD) 是在 CF-RAN 的基础上，采用多节点协作传输，解决灵活双工、混合双工、同时同频全双工等在组网中面临的 CLI 问题<sup>[2]</sup>。CF-NAFD 架构如图 3-16 所示，包括 AP、EDU 和 CPU。EDU 负责上行多 UE 数据检测和下行多用户的预编码设计，在上行链路中，EDU 将处理后的基带信号通过回传链路发送到 CPU 处进行合并，在下行链路中，CPU 将数据流发送给相应 EDU，EDU 进行预编码处理后再发送给下行用户。CPU 可以根据 AP 和 UE 位置或信道先验信息确定 EDU 与 AP 关联状态和 UE 与 EDU 关联状态。

NAFD 这一全双工技术新途径，以统一的方式实现了灵活双工、混合双工、全双工和其他双工方式，并且可以解决 CLI 问题，从而得到真正意义上的灵活双工方式，将 NAFD 技术与其他新兴技术相结合，具有广泛的研究前景：

- 在 CF-NAFD 系统中，AP 可以通过 CPU 调度实现双工模式选择。相关研究表明，经过双工的工作模式选择，相比固定工作模式的双工技术，NAFD 的性能可以得到很大提升。
- NAFD 可以用于辅助 ISAC 系统设计。在 ISAC 系统需要同时支持信息数据和环境感知数据的传输，NAFD 通过灵活双工通信能力，有效管理上行和下行的干扰，利用交叉链路干扰消除、天线模式选择等技术提升 ISAC 系统的性能。
- NAFD 能够辅助 URLLC。NAFD 通过全双工通信满足 URLLC 对低时延的要求，并通过交叉链路干扰消除可以减少信道干扰，提供更稳定的传输。

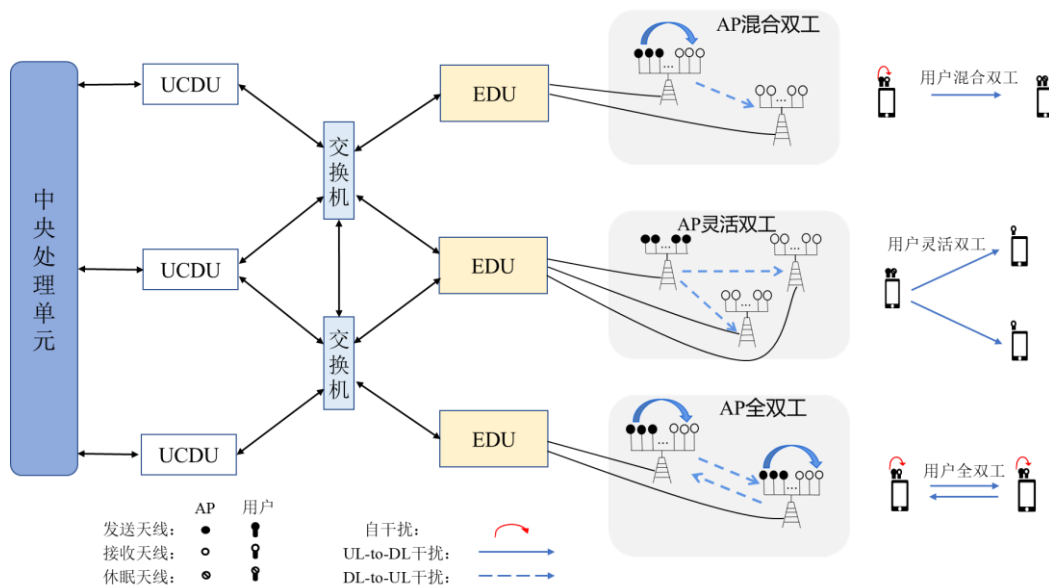


图 3-16 可扩展的 NAFD 系统

### 3.2.4.2 SBFD 与 NAFD

SBFD 是 5G-Advanced 中提出的一种 TDD 与 FDD 结合的全双工方案。SBFD 在 TDD 的下行链路时隙中分出一部分子带用于上行链路。在同一个基站（Base Station, BS）内的相同时隙，可以实现上行接收和下行发送，进而实现了全双工通信。

在 SBFD 模式下，由于每个 AP 都可以灵活划分上下行子带，这会产生两种 SBFD 部署模式：对齐子带部署和非对齐子带部署。这两种部署分别会引入不同形式的交叉链路干扰，如图 3-17 所示。对齐子带部署中所有 AP 的上行和下行子带在频域对齐。然而，由于一些资源专用于上行或下行子带，该方法系统资源利用的灵活性和效率较差。非对齐子带部署中不同的 AP 上下行子带的起始频率位置和带宽可以根据不同 AP 的上下行业务或信道环境调整。非对齐子带部署的 SBFD 是更加灵活、更有潜力的部署方式，但是非对齐子带引入的 CLI 是影响子带划分与调度技术的重要因素。

采用 CF-NAFD 可以较好地解决非对齐子带引入的 CLI。首先，可以通过 CPU 对相邻 AP 的下行子带引入的干扰进行检测，辅助每个 SBFD AP 的子带划分和调度。进一步，可以利用 CF-NAFD 的协作能力，根据 CPU 获知的干扰 AP 相应子带的发送信号及 AP 间的信道，采用干扰抵消，消除下行子带对上行子带的干扰。

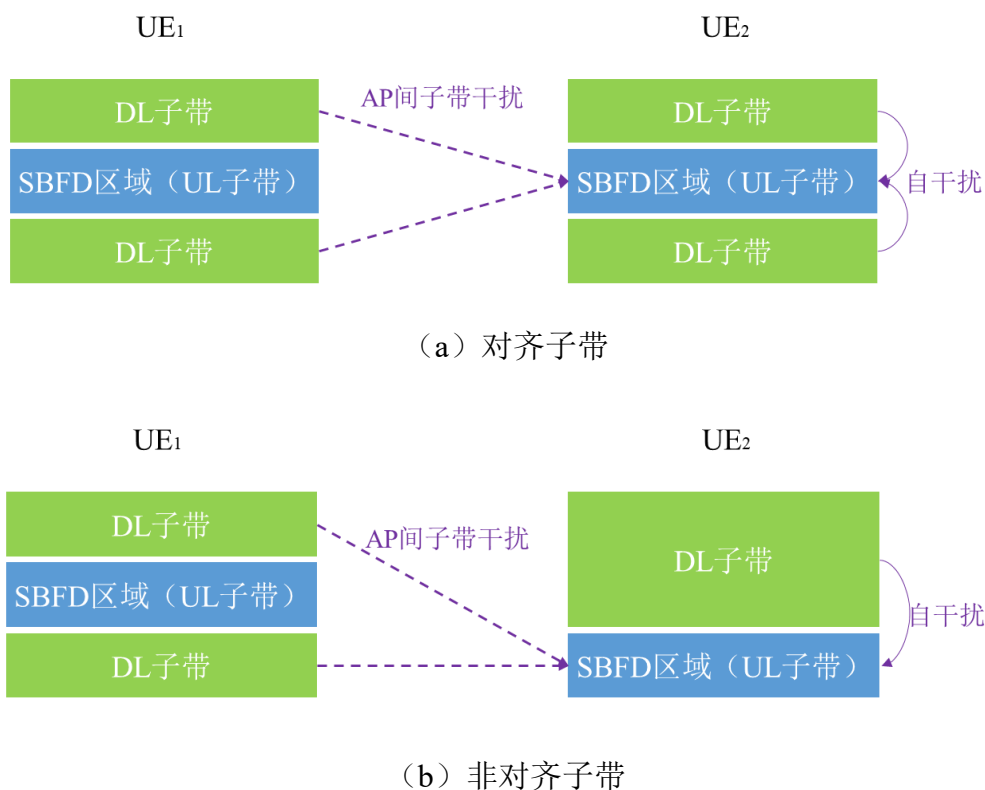


图 3-17 SBFD 交叉链路干扰

### 3.2.4.3 BDMA 与 NAFD

BDMA 是一种利用波束域资源实现多用户接入的技术，其核心思想是通过

波束成形得到可调度的波束资源，从而实现多用户同时通信。具体而言，BDMA在基站利用离散傅里叶变换将天线阵列的空间信道映射到相互正交的波束域，每个波束对应一个特定的角度方向，通过为不同用户终端分配互不重叠的波束，实现 UE 的多址接入。

通过为上行与下行用户分配正交的波束集合，BDMA 可直接用于全双工设计，使同一 AP 的不同波束可分别承载上行和下行传输。相关研究提出了 mMIMO 下的波束域全双工方案，在减轻自干扰的同时性能显著优于 TDD/FDD 大规模 MIMO 双工方案。

在传统蜂窝网络中，BDMA 的空间自由度受限于单一基站天线数量与信道状态信息精度。而在图 3-18 所示 CF-NAFD 架构中，BDMA 的应用可以得到扩展。由于 CF-RAN 中部署了大量 AP，所以 BDMA 能够在进行波束成形时调用大量的天线，进而在 CF-NAFD 系统中获得更高的空间自由度，进行更精细的波束成形与用户分组。

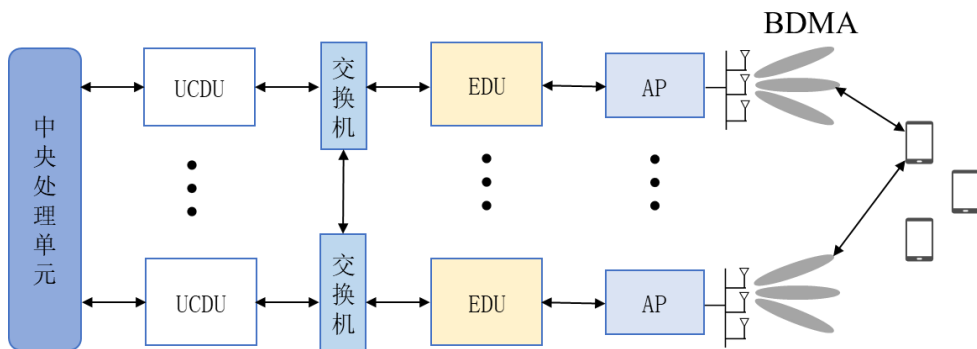


图 3-18 BDMA 用于 CF-RAN 架构

#### 3.2.4.4 大规模 MIMO 的全双工与多载波频谱融合

NAFD 允许在同一时隙内通过灵活调度多个 AP 以同时进行上行和下行数据传输，解决了传统网络中上行和下行的频谱资源分配问题。尤其是在大规模 MIMO 的支持下，系统可以通过波束成形技术，实现空间复用，提高系统容量和频谱效率。AP 可以在一个时隙内根据需要选择上行或下行模式，这样就能最大化系统的频谱利用率，同时避免了全双工技术中由于自干扰产生的性能损失。NAFD 的灵活双工模式选择使得每个 AP 可以根据网络的具体情况动态调整其双工工作模式。

NAFD 技术支持在同一波束上实现一个上行和一个下行的数据流传输。这种设计使得系统能够在同一频带内同时进行双向传输，从而显著提高频谱利用率。通过大规模 MIMO 技术，AP 能够精确控制信号的发送方向，避免不同用户之间的干扰，从而实现高效的上行和下行数据传输。具体来说，AP 可以在同一个时隙内调度上行接收和下行发送的双工模式，而大规模 MIMO 技术的波束成形能力使得同一波束上可以同时传输上行和下行信号，提升了频谱利用效率。AP 通过灵活选择波束方向来为上行用户和下行用户提供不同的信号传输路径。

频谱融合指的是将多个频段的资源结合使用，以进一步提高系统的频谱效率。NAFD 技术支持在单小区环境中融合不同频谱资源，通过多载波技术，使得同一个小区内的多个用户可以在不同的频段上同时进行通信。这一技术不仅提升了频谱的利用率，也提高了系统的总吞吐量和用户的服务质量。具体来说，多载波允许系统根据用户的需求和网络的负载动态分配上下行频率资源，避免了频谱浪费，特别是在高用户密度的环境中。结合 NAFD 的灵活双工模式，系统能够有效地调度频谱资源，使得上下行频谱资源的使用更加高效，进一步优化了网络性能。

#### 3.2.4.5 NAFD 与无蜂窝的融合

在 NAFD 模式下，干扰管理是提高系统性能的关键之一。AP 间干扰 (Inter Access point Interference, IAI) 和用户间干扰 (Inter User equipment Interference, IUI) 是影响全双工性能的主要因素。CF-RAN 架构通过灵活的协同处理方式和自适应功率控制，能够有效抑制 IAI 和 IUI。在该架构中，AP 与 EDU 协同工作，通过协调的预编码技术，可以减少由于不同 AP 之间的信号干扰而导致的性能损失。特别是在分布式部署的场景中，EDU 与 AP 之间的密切协作可以大幅度降低 IAI，提高系统的稳定性和数据传输效率。

NAFD 技术在 CF-RAN 架构中的应用不仅优化了系统的性能，还增强了网络的可扩展性。随着 AP 数量的增加，CF-RAN 架构可以灵活地调整 AP 的工作模式，使得系统能够支持更多用户同时接入，而不会因 AP 之间的干扰而导致性能下降。同时，NAFD 通过支持灵活的上行和下行模式切换，能够根据网络负载进行动态调度，从而保证了系统的高效运行。通过分布式的信号处理和集中式的处理单元协作，CF-RAN 架构使得 NAFD 能够在不同的应用场景下灵活调整上下行传输的模式与频谱分配，确保系统的高效运行和大规模扩展。

在 CF-RAN 中，NAFD 技术通过灵活的双工模式选择和频谱融合技术，使

得系统能够在—个波束上同时进行上行和下行数据传输，从而大大提高了频谱利用率。系统能够有效地融合多个频谱资源，提升整体的网络性能和容量。通过协同处理和干扰管理，CF-RAN 架构不仅优化了通信性能，还增强了网络的可扩展性，为未来的 6G 无线通信系统提供了可行的解决方案。

### 3.2.5 智能调度与资源分配体系

随着 6G 网络向云网融合与分布式架构持续演进，网络能力由单一连接服务逐步扩展为连接、计算与数据协同支撑的综合信息基础设施。在无蜂窝网络中，无线资源的调度呈现出多节点强耦合、高动态变化以及决策空间高维复杂等显著特征。随着网络规模持续扩大与业务需求日益多样化，传统集中式资源分配方式在计算效率、响应时延及系统扩展能力方面逐渐显现出局限性，难以适应复杂环境下的实时调度需求。

在此背景下，资源分配体系正向数据驱动与分布式决策方向演进。通过在网络中引入具备自主决策能力的分布式智能机制，各节点能够在局部信息基础上实现协同调度，从而提升整体资源利用效率与系统运行灵活性。在体系结构上，该体系采用集中训练与分布执行相结合的方式。训练阶段通过汇聚网络全局信息对策略模型进行统一优化，刻画多节点间的协同关系；执行阶段各节点仅基于本地观测独立完成决策，降低了对全局信息交互的依赖。

CF-mMIMO 场景下的用户与接入点配对调度面临着两项核心挑战：一是高维信道状态引发的状态空间爆炸，二是组合优化特性导致的动作空间指数增长。本节将详细阐述一种基于分层聚类与分支降维的智能调度实现方案，并以此为例展示 AI 原生机制如何深度融入分布式资源分配体系的各层架构之中。

#### 3.2.5.1 总体架构与分层协同机制

面向无蜂窝网络的智能资源分配体系在结构上可划分为数据驱动层、模型决策层与系统支撑层三个逻辑层级，如图 3-19 所示。各层之间通过标准化数据接口与控制信令实现松耦合协同，共同支撑大规模分布式智能决策的闭环运行。

- **数据驱动层：**负责多源异构数据的采集、清洗与结构化表达。该层通过边缘侧实时感知与核心层汇聚分析，为上层模型提供高质量的特征数据。针对调度任务中的高维状态问题，该层引入了基于信道相关性的聚类压缩机制，将原始物理层信息转化为低维结构化标签。

- 模型决策层：承担策略学习与决策下发功能。该层采用集中训练、分布执行的智能体架构，通过全局信息优化策略模型，并将轻量化推理引擎部署至各分布式节点。针对组合动作空间爆炸问题，该层引入了分支竞争网络机制以实现动作解耦与并行决策。
- 系统支撑层：提供算力调度与模型协同保障。该层根据任务的时延敏感性与计算复杂度，动态调配边缘与中心的算力资源，支撑模型训练、更新与推理的全生命周期管理。

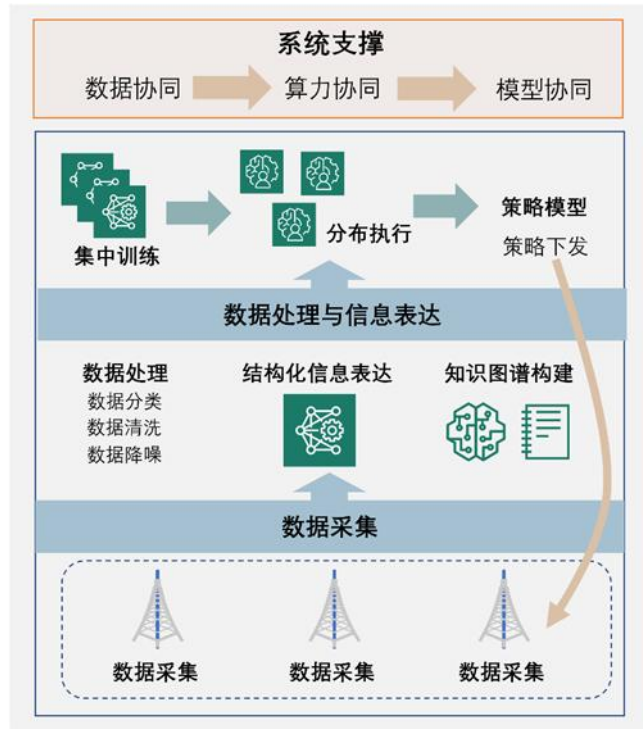


图 3-19 多智能体分布式资源分配框架图

在 CF-RAN 架构下，上述三层体系与具体网元拓扑紧密结合，如图 3-20 所示。智能调度引擎部署于 UCDCU 侧，通过与远端射频单元的信道状态交互及调度指令下发，形成从物理感知到智能决策的完整闭环链路。

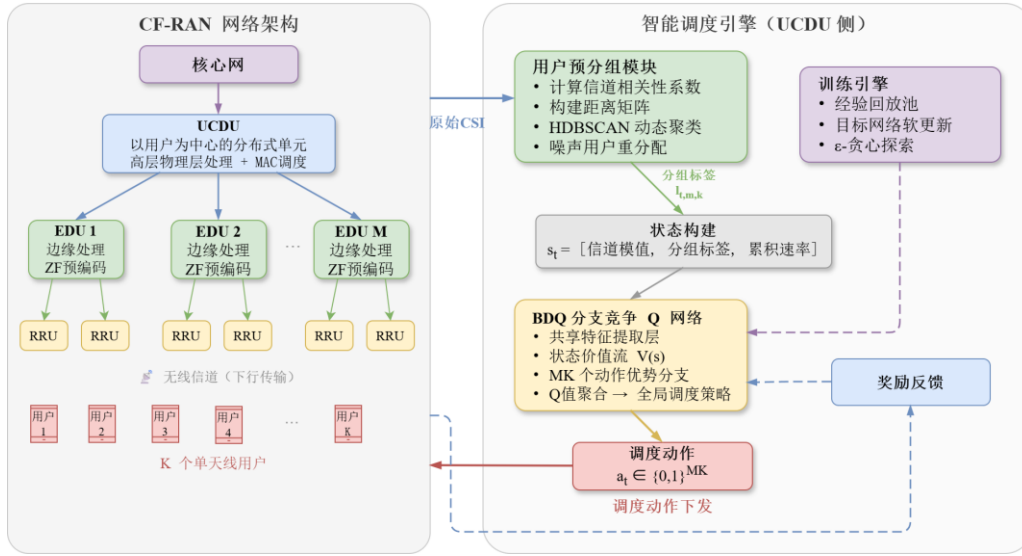


图 3-20 无蜂窝智能调度方案系统设计

### 3.2.5.2 数据驱动层：基于信道聚类的高维状态压缩

在 CF-mMIMO 系统中，若将原始高维信道状态信息矩阵直接作为深度强化学习模型的输入，将导致神经网络参数量剧增、训练难以收敛且极易陷入局部最优。为解决状态空间爆炸这一瓶颈，数据驱动层在完成基础数据清洗与特征构建后，进一步引入了面向调度任务的结构化信息表达机制，即基于层次密度聚类的用户预分组技术。

该机制的处理流程如下。首先，系统针对每个边缘处理单元覆盖范围内的任意用户对计算其信道相关性系数，并据此构建反映潜在同频干扰强度的距离矩阵。信道相关性越高，表明用户间空间相似度越大，并发调度时的干扰风险也越高，在距离矩阵中对应的距离值则越小。随后，该距离矩阵被输入层次密度聚类算法，算法通过构建最小生成树并提取稳定的层次结构，自适应地将用户划分为若干动态簇，并将部分离群用户就近归并至核心簇中，最终生成完整的用户分组标签向量。

通过上述机制，原始的高维物理层信道状态信息被压缩为低维的离散化分组标签。这一过程在最大程度保留用户间干扰拓扑关键信息的前提下，将后续模型决策所需的状态空间维度降低了数个数量级，为上层高效的分布式策略学习奠定了轻量化数据基础。

### 3.2.5.3 模型决策层：基于分支降维的分布式调度策略

在数据层完成状态压缩后，模型决策层面临的核心挑战在于动作空间的组合爆炸。在包含多个边缘处理单元且每单元服务大量用户的场景下，所有可能的调度组合数量随规模呈指数级增长。传统深度 Q 网络因输出单一全局动作索引，难以直接求解此类组合优化问题。

为此，模型决策层在集中训练阶段引入了分支竞争深度 Q 网络（Branching Dueling Q-Network, BDQ）架构，如图 3-21 所示。该架构设计包含两大核心组件。

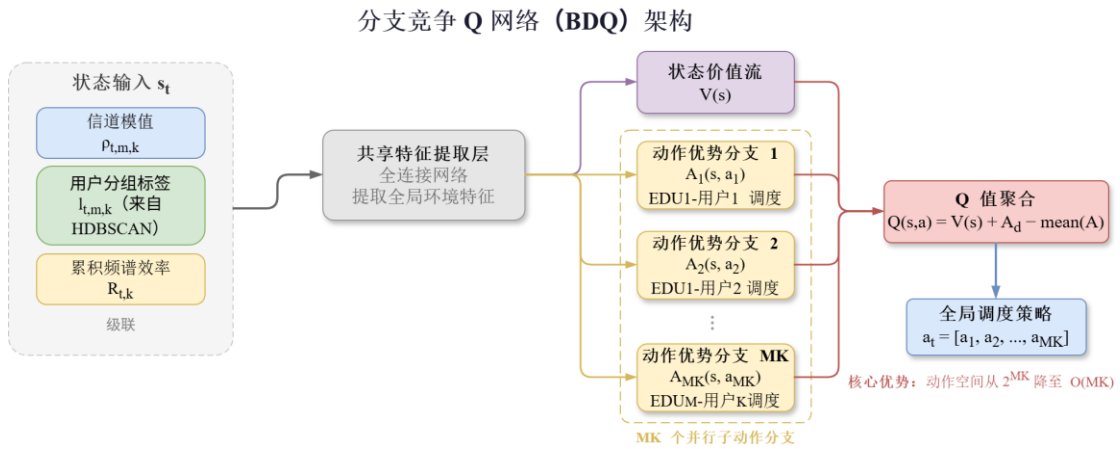


图 3-21 BDQ 网络架构图

第一是共享特征提取层，位于网络前端，负责从压缩后的系统状态（包含信道质量指示（Channel Quality Indicator, CQI）、用户分组标签及历史性能统计）中提取全局环境特征，为后续并行决策提供统一的上下文感知。

第二是并行动作优势分支，网络后端被分解为与调度维度数量相等的多个独立分支。每个分支对应一个具体的用户与接入点配对决策，并独立输出该维度动作的价值评估。所有分支的输出经聚合后共同构成全局调度策略。

这一“全局特征共享、局部动作解耦”的机制，将原本指数级增长的联合动作搜索问题转化为线性复杂度的并行子动作决策问题。在分布式执行阶段，中心训练收敛后的策略模型被轻量化部署至各分布式单元。各节点仅需基于压缩后的本地观测信息进行一次前向推理，即可在毫秒级时间内独立完成用户选择与资源配对，全程无需依赖实时全局信息交互。该机制在保障系统整体频谱效率与用户公平性的同时，极大降低了前传链路信令带宽的占用，有效支撑了无蜂窝网络的

大规模可扩展部署。

### 3.2.5.4 系统协同与分层演进机制

上述数据驱动与模型决策机制并非孤立运行，而是与本节前述的通用资源分配体系深度融合，形成持续演进的分层优化闭环。

在时间尺度协同方面，非实时层利用长周期历史数据执行聚类更新与策略模型的周期性重训练，以适应网络拓扑与用户分布的中长期变化；实时执行层则基于各分布式节点的毫秒级观测快速响应无线环境的瞬时波动，完成低时延调度。

在算力与数据协同方面，系统支撑层根据聚类任务的计算密度与推理任务的低延迟需求，将算力任务在边缘与中心之间动态分配。训练数据通过汇聚与脱敏后用于全局优化，而推理仅需极少量本地特征，实现了数据利用效率与隐私保护的平衡。

综上，基于分层聚类与分支降维的智能调度体系从数据层与模型层两个维度协同解决了 CF-mMIMO 场景下的高维决策难题。该体系通过状态空间压缩与动作空间解耦，在不牺牲系统性能的前提下显著降低了计算复杂度与信令开销，为 6G 分布式自治网络的内生智能设计提供了一条可行的技术路径。

## 3.3 面向 6G 典型场景的低时延高可靠大规模连接

### 3.3.1 面向极低时延与确定性的超可靠协同传输技术

伴随 6G 时代的到来，无线通信正从“提供连接”走向“提供确定性服务”。在工业自动化、智能交通、远程医疗和沉浸式增强现实/虚拟现实（Augmented Reality/Virtual Reality, AR/VR）等典型场景中，通信系统不仅要支持高速率和大连接，更要在极短时间内完成稳定、可靠的数据交互。尤其是在工业生产环节，系统往往需要微秒级极低时延、极低抖动以及 99.999% 至 99.99999%（5~7 个 9）以上的可靠性，才能支撑闭环控制、设备协同和安全保护等关键任务。ITU 及 IMT-2030 相关文件已将极低时延与极高可靠性作为 6G 面向未来的重要目标，这也是 6G 从工业现场外围应用走向生产核心环节的基础能力，典型应用场景和其需求包括：

- 工业自动化控制：工厂生产线和控制系统要求微秒级的响应延迟和 99.999% 以上的可靠传输。

- 自动驾驶与车联网：车辆之间和车辆与基础设施间的通信需要亚毫秒时延，以及极高的链路稳定性，以便及时传递制动、避障等安全关键指令。
- 远程医疗与手术：远程诊断和手术机器人系统需要亚毫秒甚至更低的端到端时延和极高可靠性，通常要求至少 99.999%。
- 沉浸式 AR/VR 交互：大带宽的增强/虚拟现实应用期望延迟需要毫秒级以保证交互流畅，同时需要稳定的连续连接。

在这一背景下，可拓展无蜂窝网络通过去除传统小区边界、采用多接入点协同服务的方式，为低时延高可靠通信提供了新的实现路径。与传统蜂窝网络相比，无蜂窝架构能够利用更丰富的空间自由度，在更大范围内形成协同覆盖和分布式分集，从而增强链路稳定性、降低重传概率，并减轻单点覆盖失效带来的性能波动；同时可拓展架构的边缘分布式处理，可以将计算任务下沉到接入侧，从而极大地缩短数据处理链路。可拓展的无蜂窝架构为低时延高可靠带来的潜在增益包括：

- 多点覆盖与宏空间分集：在物理层面信号在空间上分布传输，实现了巨大的宏空间分集增益，网络对超可靠低时延通信的支持能力显著增强。
- 联合波束与协同传输：通过分布式的波束协作和信号合并，提高了链路信噪比和稳定性，使得系统能够在物理层直接降低错误率。
- 负载均衡与无缝切换：无蜂窝架构的多点接入使得多个 AP 可动态分担负载，有效消除了蜂窝切换延迟，提升了系统整体稳定性和响应速度。
- 可拓展的边缘协同处理：用户数据可在最近的边缘单元处理，大大缩短了数据链路的传输时延，因为减少了远端故障对业务的影响。

通过上述机制，无蜂窝架构利用空间维度的冗余为系统提供了强大的可靠性保护与时延优化能力。工程角度看，无蜂窝架构的关键优势在于：它把原本分散、独立的空间资源组织成一个面向用户的协同网络，使“可靠性提升”和“时延降低”不再完全时域资源，而可以更多地通过空间维度来实现。这为 6G 低时延高可靠业务提供了新的系统设计空间。

另外，随着信息论的发展，在速率、可靠性、时延的“不可能三角”约束下，引入在可拓展 CF-mMIMO 系统下的空域资源使用，可以为通信的“不可能三角”提供了新的维度进行权衡。在传统无线通信中，为了提高系统的可靠性往往采用时间冗余，即长信道编码块以及数据重传等机制。但在低时延场景下，时间冗余

本身会导致不可接受的延迟。“空时互换”思想由此提出，如图 3-22 所示，其核心含义是：当系统具备较丰富的空间资源时，可以用空间冗余替代部分时间冗余，从而在不显著增加时延的前提下提升通信可靠性。

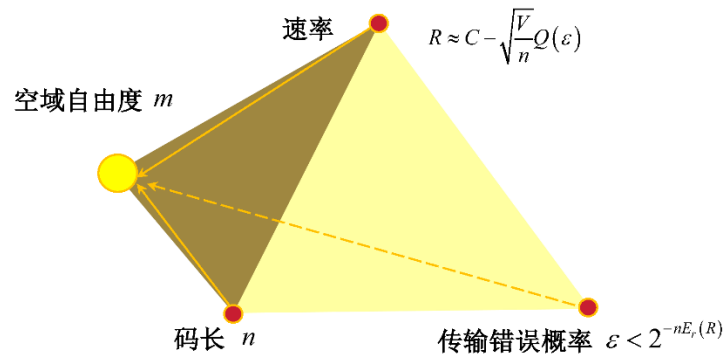


图 3-22 空时互换理论对通信“不可能三角”的影响

空时互换能够充分发挥可拓展蜂窝网络“大规模、分布式、可协同”的特点，意味着能够以更灵活的方式在时延与可靠性之间进行权衡，即空间资源越丰富，系统越有可能在不增加空口等待时间的情况下提高传输成功率。这也是蜂窝网络支撑低时延高可靠场景的重要原因。在设计空时互换的策略时，需要兼顾：

- AP 部署密度与拓扑：提高 AP 部署密度可增强空间自由度，可采用分布式网格状或“无线条带”等形式，既可保障覆盖，也便于同步与布线。
- 同步与时钟分发：系统应保证所有 AP 的时间同步以纳秒级精度，可以使用有线同步如以太网 PTP 时钟协议。
- 边缘协同处理：将物理层数据处理任务下沉到接入侧边缘节点，以减少端到端时延，实现对延时敏感任务的即时响应。
- 轻量级调度与资源预留：为低时延高可靠业务预留专用资源并使用快速接入机制，尽量减少握手信令和调度延迟。
- 多点协作传输策略：设计多点发射和接收策略充分利用空间冗余，实践中可依据业务类型采用不同级别的多点策略。
- 链路监测与快速恢复：建立实时链路质量监测机制，能够在通信质量下降时立即触发恢复措施，与多点接入结合，实现无缝故障切换和链路校正。

蜂窝网络通过分布式接入、用户中心化服务和更丰富的空间自由度，为这一能力提供了新的技术基础；空时互换思想则进一步说明，在极短时延约束下，

可以通过空间资源来弥补时间冗余的不足,从而在不显著增加时延的前提下提升可靠性。面向未来,随着边缘计算、协同调度和高精度同步技术的进一步成熟,可拓展的无蜂窝网络有望成为 6G 确定性通信的重要实现形态。

### 3.3.2 千万级免授权接入与分布式协同检测

在 6G 网络演进中,海量机器类通信(massive Machine Type Communication, mMTC)要求网络能够支撑每平方公里千万级设备的并发接入,同时兼顾高频谱效率与连接密度。这一目标对传统蜂窝网络基于正交多址与集中式调度的物理层设计提出了挑战。CF-mMIMO 系统通过打破物理小区边界、实现全域泛在协同的架构优势,为突破上述瓶颈提供了技术基础。通过将海量 AP 经前传网络连接至 CPU 或边缘分布式计算节点,无蜂窝架构原生提供了较高的空间自由度(Spatial Degrees of Freedom, DoF)与宏分集增益,并有效缩短了终端到 AP 的物理距离,为实现海量并发接入提供了物理基础。然而,在无蜂窝架构上真正实现大规模连接,仍需要在鲁棒活跃用户检测、边缘云协同的可扩展算力架构以及三维空间资源的非正交多址调度等方面进行系统性设计。

#### (1) 复杂未知信道环境下的鲁棒活跃用户检测与信道估计

在大规模连接场景中,免授权随机接入(Grant-Free Random Access, GFRA)是降低信令开销的主流方式。在此机制下,活跃用户直接发送非正交导频序列与数据,系统需在导频碰撞严重且信道先验信息不充分的条件下,完成活跃用户检测(Active User Detection, AUD)与信道估计(Channel Estimation, CE)。无蜂窝网络中,不同 AP 接收到的同一用户信号经历的大尺度衰落差异显著,呈现独立非同分布(i.n.i.d.)特性,增加了检测与估计的复杂度。

针对这一问题,可采用基于稀疏信号处理与贝叶斯推断的检测框架。通过将多用户检测问题建模为稀疏向量重构,利用近似消息传递(Approximate Message Passing, AMP)类算法在系统状态演进中实现多用户信号的有效分离。为进一步降低对精确大尺度衰落系数的依赖,可引入用户定位圆模型(User Localization Circle Model, ULCM),仅利用用户分布的粗略区域信息构建信道先验分布,在短导频条件下保持较高的检测与估计性能。在更复杂的部署环境中(如包含视距链路、用户活跃概率不均等),可采用全贝叶斯推断架构,利用广义双曲先验与变分推断方法,在无需精确先验参数的前提下,融合各 AP 观测信息,实现活跃

状态的一致判别与信道估计的稳健求解<sup>[3]</sup>。此类方法在算法层面将高度耦合的多点检测问题解耦为多个可并行处理的子问题，为后续分布式计算奠定了基础。

## (2) 边缘云协同的可扩展检测架构

尽管基于贝叶斯推断的方法具有理论上的稳健性，但在千万级设备并发场景下，完全由 CPU 进行全局迭代计算将面临前传链路负载与算力瓶颈。为此，可在无蜂窝架构中引入边缘云协同的计算机制，将检测任务下沉至靠近 AP 的边缘节点。

具体地，根据地理拓扑将 AP 划分为多个局部服务簇，每个簇部署边缘计算单元（或称空间扩展单元（Space Expansion Unit, SEU））<sup>[4]</sup>。各 SEU 负责本簇内 AP 接收信号的本地处理，利用一维卷积神经网络（One-Dimensional Convolutional Neural Network, 1-D CNN）等轻量化深度学习模型，从短导频叠加信号中提取活跃用户特征，并输出局部预测概率。针对海量物联网中活跃用户比例极低所导致的样本不平衡问题，可采用专门设计的损失函数（如零边界对数和指数成对排序损失函数（Zero-bounded Log-sum-exp & Pairwise Rank-based Loss, ZLPR））提升模型对稀疏正样本的识别能力。各 SEU 仅将压缩后的局部检测结果（而非原始信号）上传至 CPU，CPU 通过迁移学习或集成学习模型融合各簇信息，完成全局决策。这种“边缘高维计算、中心低维融合”的架构，有效降低了前传带宽与中央处理器的计算压力，为系统提供了良好的扩展能力。

## (3) 基于空间可分离的非正交多址与快速上行授权

在活跃用户检测的基础上，如何高效分配上行资源是实现大规模连接的另一关键环节。传统免授权接入需依赖复杂的干扰消除算法处理碰撞数据，而快速上行授权机制则利用预测结果为用户提前分配资源，但预测误差可能导致资源浪费。

在无蜂窝架构下，可利用空间稀疏性与有利传播特性，引入空间可分离非正交多址接入（Spatially Separable NOMA, SSNOMA）机制<sup>[5]</sup>。该机制将传统时频资源扩展为包含导频特征的三维资源最小传输单元，允许多个在空间上可分离的用户共享相同的时频资源。由于不同用户受不同 AP 子集主导，其信道向量在空间近似正交，即便发生导频碰撞，各 AP 簇仍可独立解码所属用户，从而在空间域隔离干扰。这一设计突破了导频数量的限制，同时使快速上行授权中的资源分配不再严格依赖于预测精度——若某个最小传输单元被错误分配给休眠用户，其

资源仍可被共享该最小传输单元的其他活跃用户利用，从而提升了资源利用率。

为实现对海量 SSNOMA 资源池的有效管理，可采用分层调度架构：上层控制器负责用户调度，基于多臂老虎机（Multi-Armed Bandit, MAB）等强化学习方法在探索与利用之间平衡，动态选择待服务的用户子集；下层控制器负责资源映射，将三维资源单元与功率等级分配给空间可分离的用户群，采用多智能体强化学习（如多智能体深度确定性策略梯度（Multi-Agent Deep Deterministic Policy Gradient, MADDPG））协调不同资源单元之间的干扰。通过物理域的聚类划分，确保资源复用严格限制在互不干扰的空间子系统内，从系统设计上控制了多维资源复用带来的耦合复杂度。

### 3.3.3 面向空天地一体化的集群卫星无蜂窝系统

广域泛在连接是 6G 的六大典型场景之一。非地面网络（Non-Terrestrial Network, NTN）尤其是卫星通信，将为 6G 全域泛在连接提供关键支撑。当前，Starlink 计划向太空发射超过 40000 颗卫星以构建全球覆盖的通信网络<sup>[6]</sup>，我国也相继提出开启了 GW 星座、G60 星座、鸿鹄三号等万星星座发展规划。

在 6G NTN 技术中，手机直连卫星（Direct-to-Cell, D2C）被视为实现 NTN 与地面网络真正融合的热点技术方向。为了弥补星地之间的路径损耗，即使对于低地球轨道（Low Earth Orbit, LEO）D2C 系统仍需要部署数十平方米甚至百平方米的有源天线阵。对于同步轨道卫星，则需要超一万平方米的天线阵。在低成本约束条件下，如何容纳、发射和部署大型相控阵列是 D2C 的重大挑战。

采用集群卫星（Satellite Swarm）的分布式阵列形成编队天线阵列（Formation-of-Arrays, FoA），是实现超大规模阵列和极窄波束的有效途径。星群中的小型卫星可显著降低生产和发射成本，而分布式特性赋予其可扩展性和容错性等优势<sup>[6]</sup>。当前，星载分布式合成孔径雷达已有成熟应用，例如我国的宏图一号（HT-1）和高景二号。因此，基于集群卫星的超大规模分布式阵列被视为实现 D2C 的有效技术途径。

如前所述，对于地面无蜂窝系统，通常利用其近场的大容量和高可靠等特性。对于分布式卫星系统，当星间距较大时，由于传播路径时延差问题，采用相干收发机的系统设计较为复杂。但是对于星间距较小的集群卫星 FoA 则工作在远场，充分利用分布式阵列所形成的窄波束特性，可获得协作的相干波束赋形增益。因

此，基于 FoA 的 D2C 实现可借鉴无蜂窝的分布式协作基带信号处理技术。

基于 FoA 的分布式卫星架构如下图，由 1 颗主卫星(primary Satellite, P-Sat) 与  $L$  颗相邻的次卫星 (secondary Satellite, S-Sat) 构成，所有主-次卫星之间通过无线前传链路连接<sup>[6]</sup>。P-Sat 通常配置馈电链路或星群之间的星间链路以及星群内的短距离星间链路。P-Sat 还需具备编队飞行几何构型控制和星群内收发通道的时频及相位校准。S-Sat 通常仅配置星群内的短距离星间链路和分布式相控阵。与地面的无蜂窝系统类似，星群 FoA 系统的收发波束赋形同样可以采用集中式和分布式实现。

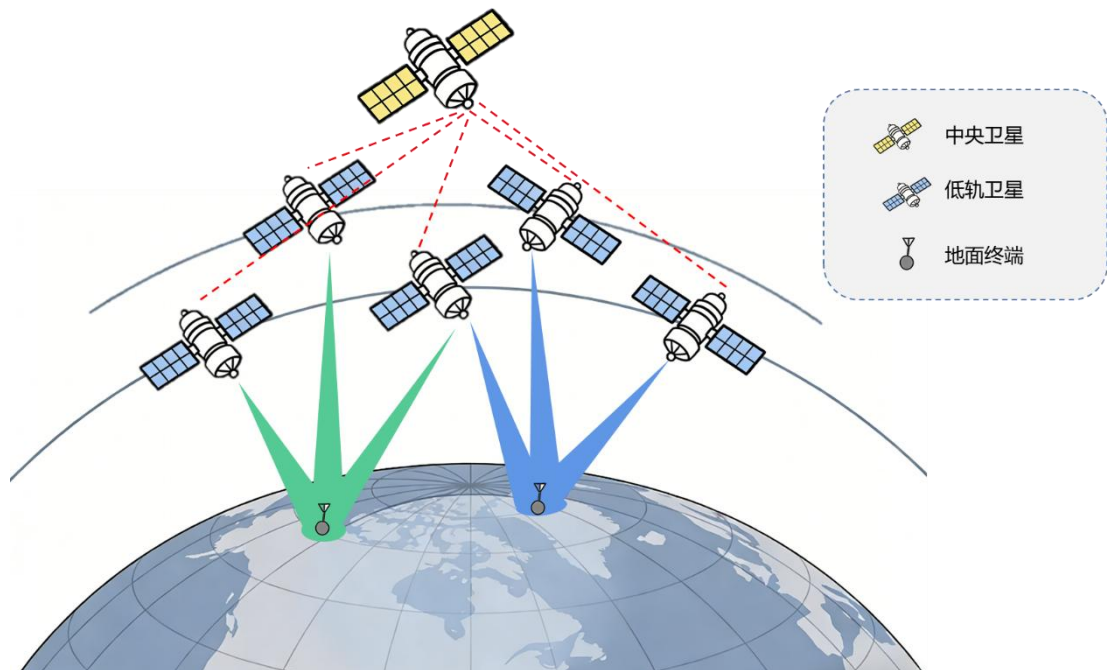


图 3-23 无蜂窝分布式低轨卫星架构

对于集中式实现，馈电链路的信号经过 P-Sat 实现波束赋形后分发给  $S$  个 S-Sat 的  $N$  个通道的相控阵。系统中的波束赋形由 P-Sat 实现，S-Sat 仅完成数模转化和信号发送。当星群具备基带处理功能时，可以采用分布式基带信号处理实现上下行信号的收发，如图 3-24 所示。对于下行传输，P-Sat 将  $K$  个波束待发送的信息比特经过编码后，经星群内的星间链路发送给所有的 S-Sat，在 S-Sat 分别实现波束赋形。对于上行链路，S-Sat 经过接收波束赋形，得到  $K$  个波束的信号，进一步将均衡后的符号或软解调后的比特似然比发送给 P-Sat，在 P-Sat 实现合并。S-Sat 的发送和接收的波束赋形算法可参考文献[6]。可以看到，集中式实现时星群内星间链路承载的是  $N$  通道的 IQ 数据，通常需要较大容量的无线

链路,而分布式基带处理仅需承载信息数据,通常对星群内的星间链路要求较低。

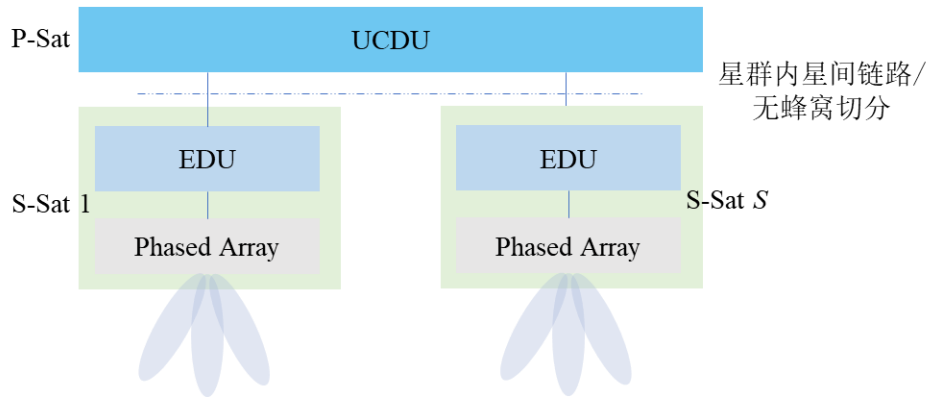


图 3-24 集群卫星 FoA 的分布式协作传输

集群卫星编队阵列无蜂窝系统存在如下技术挑战：(1) 集群内星间的相位相干的一致性；(2) 分布式阵列波束赋形的旁瓣抑制问题和频率选择性问题。

为了获得分布式卫星之间的相干发送和接收波束赋形增益, 需要实现 S-Sat 之间的校准。通常, 每个卫星配置的相控阵内的自校准可通过内部参考通道实现。除此之外, 每个卫星采用独立时钟源, 星间存在定时偏差、频率偏差以及相位偏差。更具挑战的是, 由于卫星时刻处于高速运动且编队控制存在一定的误差, 星间的相对位置存在一定的抖动, 该抖动将对星间的时间偏差估计产生影响。考虑到 D2C 系统中终端与卫星之间的上行信道质量较差, 当前 Release 19 所采用的终端辅助校准较难实现 S-Sat 之间的通道校准。并且, 与通常采用 TDD 的地面无蜂窝系统不同, 频分双工的校准需要分别实现发射端的校准与接收端校准。但是, 与 TDD 空口校准类似, S-Sat 之间的校准仍可采用 P-Sat 与 S-Sat 之间双向互发校准参考信号实现。

由于分布式阵列之间的间距远大于半波长, 形成的波束存在较为严重的旁瓣。借鉴经典稀疏阵设计, 通过编队稀疏化, 实现锥削加权, 有助于改善近旁瓣的控制。另外, 当系统带宽与载波频率的比值较大时, 分布式阵列由于口径较大, 会导致波束在频域产生频率选择性, 进而导致波束斜视 (beam squint)。通常, 将系统带宽分为多个子带, 进行子带级的波束赋形可以缓解该问题。

未来, 随着地面网络和 NTN 的深度融合, 在多节点协作技术的框架下, NTN 的多波束/多小区之间的协作将为系统性能的提升提供重要的支撑。

### 3.3.4 无蜂窝架构下的多层级协作通感一体化与多目标跟踪

作为 6G 的典型场景之一，通信感知融合将打破传统通信与感知系统独立设计运行的现状，利用相同硬件设备与频谱资源同时完成数据传输和环境感知，提高频谱利用率，降低硬件成本。通过支持自动驾驶，设备监测，仓储管理等应用，通感一体化将赋能智慧交通，智能物流等新场景，推动低空经济，工业互联网等产业发展。

相比以雷达探测为主要目的，基于雷达脉冲实现的双功能雷达通信，利用广泛分布的通信设备，在现有通信波形基础上实现感知的方式有望提供更高的传输速率。近年来，通过利用传输速率，频谱效率，通信信噪比等指标衡量通信性能，检出率，感知信噪比等指标衡量感知性能，利用资源分配等策略联合优化两种功能，通信与感知的权衡方式不断演进。在通信与感知的深度融合下，一方面，6G 无蜂窝网络利用通信信号与设备实现对环境的广覆盖，多角度，高精度感知，为相关应用提供支持。另一方面，包含环境、用户、干扰信息在内的感知结果可以指导波束管理，资源分配，降低信道信息获取所需频谱资源，使通信更具灵活性。

#### (1) 无蜂窝通感一体化协作感知机制

无蜂窝网络中的节点可以获知其余节点发送的信号，利用由发送节点自身或其余节点接收回波信号，无蜂窝网络天然具有进行单基与双基感知的潜力，通过共享用户信息，还可以进一步拓展感知模式。在分布式网络中，协作感知被认为是提升感知精度与鲁棒性的关键技术路径。协作感知融合多个节点的感知结果，可以减轻噪声，衰落与干扰带来的影响<sup>[7]</sup>，利用分布式放置的多个节点提供的多角度观测信息，有助于提高感知结果的稳定性与精度。无蜂窝网络架构有效解决了多节点同步等实现协作感知的关键问题，在较大区域内部署大量分布式节点服务所有用户的特点保证了节点之间距离足够近，便于实现多角度，连续覆盖的网络化感知。

在通信网络中，CF-mMIMO 网络可以分为 4 种协作层级，为了实现通信感知功能的一体化，在通信 4 种协作层级和功能切分的基础上提出协作感知的 4 种协作层级，并且推广可拓展通信网络的概念至可拓展通感网络。

#### **Level4: 全集中式协作**

在全集中式处理中，通信网络将所有的导频信号和通信信号传输至 CPU 处

理。在通感网络中，感知基于导频信道估计进行感知。假设网络中存在  $Q$  个散射体，则可以通过  $Q$  维的匹配滤波直接完成  $Q$  个散射体的检测。如果散射体的数量未知，那么则不能完全消除干扰，未知的散射体会对已知的散射体的检测和识别产生干扰。但是实际上  $Q$  维匹配滤波将导致维度爆炸，因此实际上采用 1 维匹配滤波结合恒虚警率（Constant False Alarm Rate, CFAR）检测算法完成目标的检测和定位。即使采用一维匹配滤波，集中式处理的张量间将具备更好的正交性，因此性能远优于 Level3/2/1。

### **Level3: 部分协作**

对于通信而言，每个 TRP 只利用自身的信道估计完成信道的估计，但是在 CPU 侧联合完成信号的检测。CPU 侧的加权系数与用户数量  $K$  有关，则称之为 Level3。对于感知而言，TRP 不再向 CPU 传输  $M$  维的向量，每个 TRP 只将自身的匹配滤波结果传输到 CPU 进行最终的参数感知。也就是说，每个 TRP 侧将  $N$  个发射机的信号进行感知。其中需要格外注意的是，由于匹配滤波是  $N$  个发射机的联合匹配滤波，该算法在每个 TRP 侧接收机算法的处理复杂度与发射机  $N$  的数量相关，因此实际上是不可实现的。

### **Level2: 全分布式协作**

对于通信而言，每个 TRP 只利用自身的信道估计完成信道的估计和信号的检测。CPU 的联合检测只是  $L$  个 AP 检测的简单平均，则称之为 Level2。因此 CPU 侧联合检测的加权系数与用户数量  $K$  无关。对于感知而言，TRP 不再向 CPU 传输  $M$  维的向量，每个 TRP 只将自身的匹配滤波结果传输到 CPU 进行最终的参数感知。每个 TRP 将逐个对  $N$  个发射机的信号进行感知，而不是对  $N$  个发射机做联合感知。

### **Level1: 小小区协作**

对于通信而言，每个 UE 只接入一个 TRP，每个 TRP 只利用自己的信道估计完成信号的检测。对于感知而言，因为每个 TRP 只利用自己的信道，每个 TRP 自身做局部的匹配滤波，并且将自身感知的时延和多普勒参数传递给 CPU。

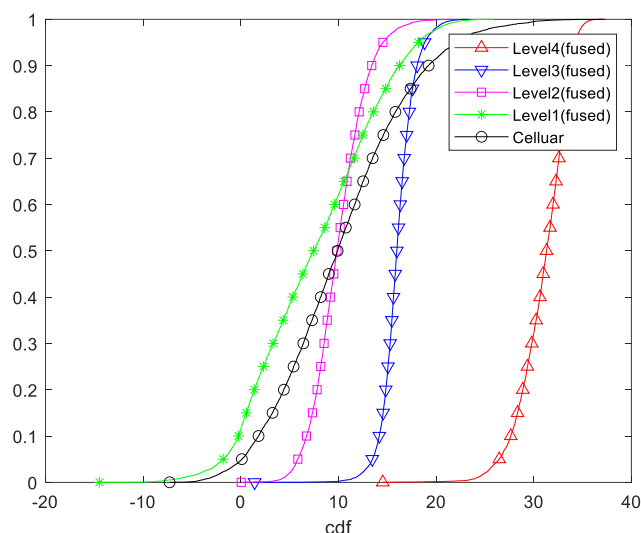


图 3-25 Cell-free 不同协作层级的感知信干噪比 CDF 图

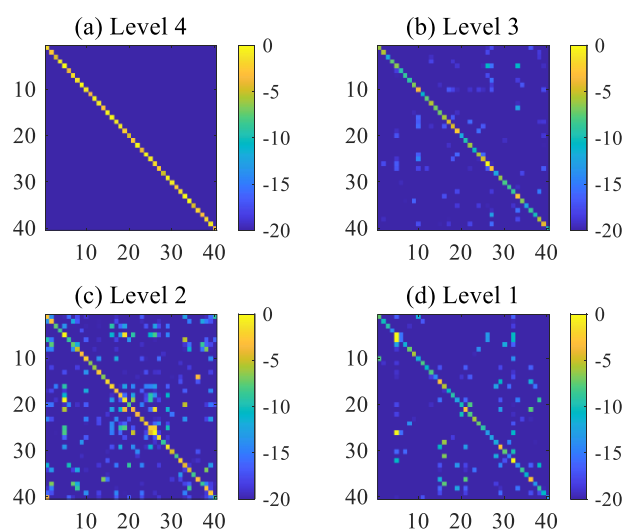


图 3-26 Cell-free 不同协作层级的干扰示意图

经过如图 3-25 所示系统仿真不难发现，无蜂窝不同层级的协作性能存在极大差异，全集中式无蜂窝系统（Level4）可以获取最佳的感知信干噪比，但是处理负担极大。而本地化处理的 Level3 和 Level2 分别会损失约 20dB 和 10dB 感知信干噪比。但是仍然优于小小区（Level1）和蜂窝系统。

图 3-26 画出了不同协作层级的归一化协方差矩阵，可以发现协作等级越高，干扰相比于信号越弱，不同散射体之间越趋近于正交。这主要来源于多个发射节点和多个接收节点分布式放置带来的波束赋形增益。

## (2) 无蜂窝多目标跟踪与数据关联方法

无蜂窝架构下，融合方案的设计是实现高性能感知的关键。多节点观测信息融合的通用流程如图 3-27 所示，各节点分别计算局部信息并传递给 CPU，CPU 通过融合局部信息计算全局信息，并反馈给各节点。利用无蜂窝架构提供的灵活，根据延迟，前传，CPU 运算量等方面的需求，各节点传递给 CPU 的可以是原始接收回波信号，经过分布式预处理的局部信息或经过部分节点协作预处理的半全局信息。

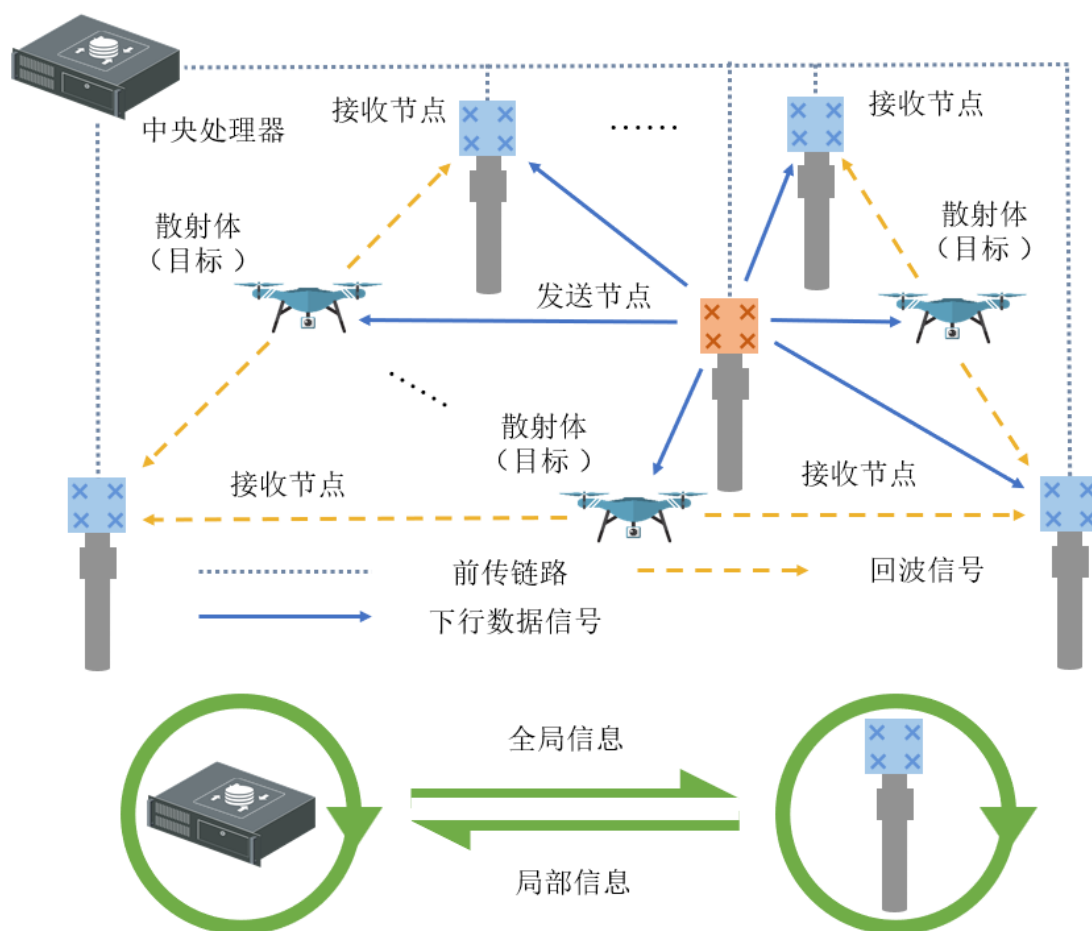


图 3-27 多节点观测信息融合

传统的多目标跟踪架构包括但不限于最近邻、联合概率数据关联、多假设跟踪，这些跟踪架构依赖具有位置信息的点云数据进行处理，难以推广至没有位置信息的点云数据。区别于雷达单站，通信基站往往采用数模混合相控阵结构，角度分辨力较差，仅可获知面向的扇区或者粗糙的角度信息。可以提出一种 ISAC-简单在线实时跟踪（Simple Online and Realtime Tracking, SORT）多目标检测框架，借鉴视觉领域的实时跟踪框架，提出了基于检测-预测-关联-融合的多目标检测框架，实现了多目标跟踪，并且可以有效利用时序信息改善目标鬼影问题，从

而实现多目标全程跟踪，如图 3-28 所示，多目标跟踪框架整体由一个级联的多目标管理器构成，可以拆分为两个多目标管理器，其中检测级多目标管理器 A 部署在 EDU 侧，主要负责多目标检测和关联。而航迹级多目标管理器 B 部署在 SCUDU 侧，主要负责多航迹管理和关联。

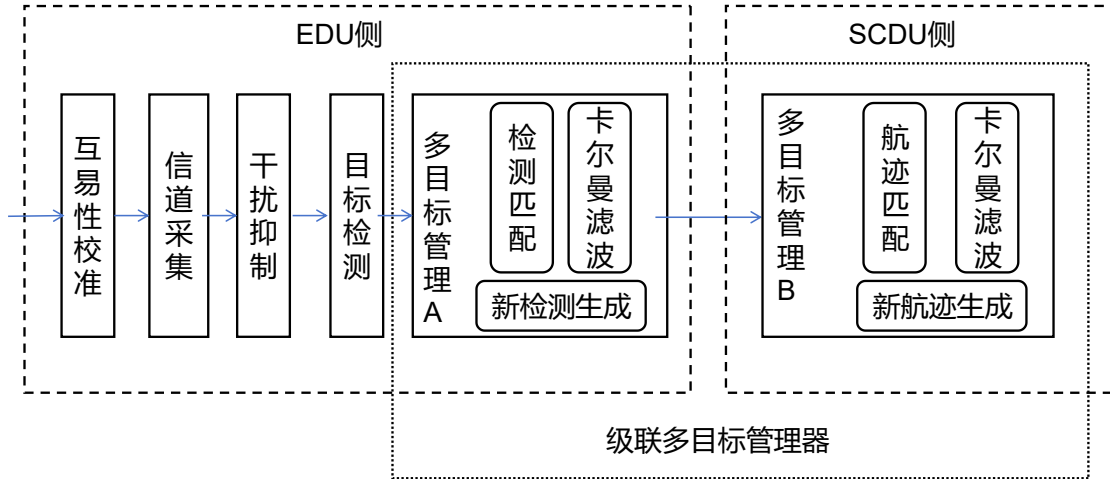


图 3-28 基于 CF 架构的 ISAC-SORT 多目标跟踪框架

多目标管理模块主要分为匹配模块和状态管理，匹配模块主要负责将检测和跟踪关联起来。对于检测级多目标管理器，其主要是将感知信号的 CFAR 检测的输出与时序上历史的检测匹配起来，并且预测下一个时刻可能出现的距离-多普勒 (Range-Doppler, RD) 检测点位置。而对于航迹级多目标管理器，其主要是将检测级输出的 RD 检测与历史航迹关联匹配起来，并且利用多节点的 RD 检测信息采用融合算法确定目标的位置和轨迹，并且给出下一个时刻的位置预测。由此，级联形成于检测-预测-关联-融合的多目标跟踪框架。

## 4 无蜂窝网络标准化演进与潜在影响

6G 标准化工作已进入实质性推进阶段，前期关于场景需求和最小性能指标的制定工作已基本就绪。2026 年 2 月，ITU-R WP 5D 第 51 次会议正式完成《IMT-2030 (6G) 最小技术性能需求》报告<sup>[8]</sup>，系统定义了 20 项关键最小性能指标。2026 年 3 月，3GPP SA1 工作组已基本完成 6G 服务与用例需求研究，输出 3GPP 第一个 6G 研究报告 TR 22.870<sup>[9]</sup>，涵盖多个 6G 典型应用场景，为后续 6G 技术研究奠定基础。3GPP RAN 工作组同步开展 6G 空口研究，定义 6G 场景和需求，输出 3GPP TR 38.914<sup>[10]</sup>，在最小性能指标方面与 ITU 基本达成共识。

在传统通信指标方面，相比 5G，6G 峰值速率提升至 1.8 倍，平均和边缘频谱效率提升至 3 倍，下行用户体验速率提升至 3 倍，区域流量密度提升至 4 倍，移动性首次考虑了 Airplane 的支持（1000/1200km/h），而在用户面和控制面时延、连接密度，可靠性等指标方面，6G 与 5G 基本持平，整体更加强调需求牵引和经济理性。在架构和移动性需求方面，明确提出支持 multi-RAT 频谱共享、支持共址或非共址的 multi-TRPs 连接、支持共址或非共址的上下行频谱聚合、支持控制面与用户面分离。

目前，3GPP 6G 标准化工作正处于 3GPP R20 阶段的无线空口技术研究阶段（Study Item, SI）。2025 年 6 月，在 3GPP RAN 第 108 次全会上，6G 研究项目（6G SID）正式定稿<sup>[11]</sup>，标志着 6G 标准化研究工作正式启动。从当前会议讨论进展来看，multi-TRPs 传输、6GR 移动性、组网架构等与无蜂窝网络密切相关的特性受到广泛关注，有望在 6G SI 阶段进一步开展讨论和研究，涉及调度和资源分配、预编码、CSI 获取、初始接入、信道信息获取与测量机制、时频同步与空口校准、动态协作簇管理和移动性管理等各方面技术，正在各个组展开讨论。

无蜂窝网络正逐步从学术理论研究走向标准化进程，受到业界广泛关注，有望成为 6G 新的增长点，为 6G 带来显著性能增益，是机遇也是挑战。multi-TRPs 传输的核心难点在于协调多个 TRP 之间的资源分配、干扰管理和联合调度，尤其随着 TRP 数量的增加，调度与协调的复杂度呈指数级上升。密集部署的 TRP 之间需要频繁进行信息交互，这对前传与回传网络的传输容量和延迟性能提出了极高要求。与此同时，在分布式部署场景下，TRP 的信道状态信息获取以及时频同步变得更为复杂，不仅加大了系统信令开销，也对硬件器件的精度与一致性提出了更苛刻的要求。

## 5 无蜂窝网络技术试验与评估

### 5.1 无蜂窝网络试验床

#### 5.1.1 全集中式 CF-RAN 原型试验系统

全集中式 CF-RAN 原型试验系统采用全集中式基带处理+分布式接入点的逻辑架构构建，通过多个远端射频单元与集中式基带处理单元协同工作，实现多节点协作通信。

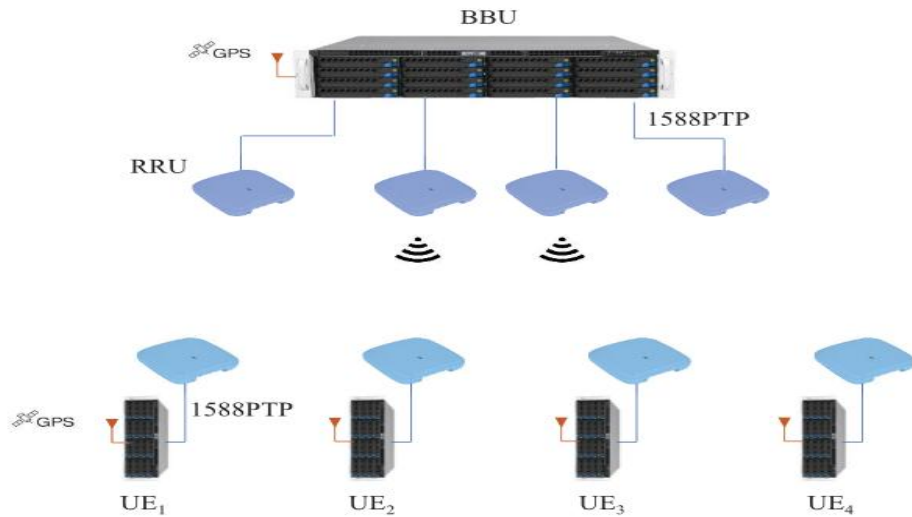


图 5-1 全集中式 CF-RAN 原型试验系统示意图

系统总体架构如图 5-1 所示，由基带处理单元（BaseBand Unit，BBU）、多个分布式部署的 AP 及原型 UE 构成。其中，原型 UE 由用于 UE 基带处理的服务器和射频单元组成，该射频单元与 AP 使用相同类型的设备。基站侧所有 AP 通过高速交换机连接至基带处理服务器，形成集中控制、分布式射频的 CF-RAN 结构。终端侧的射频单元同样连接至 UE 基带处理服务器，实现完整的空口收发链路。系统整体采用基于可扩展无线接入网络（Extensible Radio Access Network，XRAN）的前传架构，通过高速前传网络连接，各 AP 能够与中心基带平台进行实时数据交换，从而支持多节点协同通信与统一资源调度。基站侧和终端侧的基带处理均采用基于 X86 服务器作为计算平台，并搭载前传接口卡与光模块，用于实现高速光电转换与数据传输。

全集中式 CF-RAN 原型试验系统支持 Sub-6G 和毫米波频段技术试验。对于 Sub-6G 频段，采用 4T4R 的商用 RRU 作为 AP，支持时分双工模式及 3GPP Option 8 切分，发射功率最高 250 mW，工作频段为 3.3-3.5GHz/4.8-4.9GHz，带宽 100MHz，子载波间隔为 30kHz。对于毫米波频段，采用紫金山实验室自研的毫米波 AAU 模块作为 AP，工作频段 24.75 - 27.5 GHz，支持时分双工模式，并配置双极化相控阵天线阵列及射频前端；每个 AAU 包含 2 发 2 收射频通道，可支持双载波传输，系统信号带宽达到 400 MHz；AAU 的有效全向辐射功率（Effective Isotropic Radiated Power，EIRP）约为 40 dBm 以上，水平波束扫描范围不小于  $\pm 60^\circ$ ，垂直方向扫描范围不小于  $\pm 15^\circ$ ；采用兼容 3GPP 5G NR 标准的帧结构，中心频率设置在 26 GHz，子载波间隔为 120 kHz，对应时隙长度为 125  $\mu$ s，每个时隙包

含 14 个 OFDM 符号。

为保证 CF-RAN 原型系统的协同运行能力，采用多种同步机制保证 BBU、AP 和 UE 间的时间和频率同步，包括基于 GNSS 的卫星授时以及基于 IEEE 1588 PTP 的网络时间同步。系统通过卫星授时获取标准时间和参考时钟，通过 IEEE1588 PTP 协议对各 AP 进行时间同步，并通过参考时钟分发机制实现频率锁定，从而避免频率偏移问题，降低频偏估计复杂度并提高系统稳定性。

### 5.1.2 切分式 CF-RAN 原型试验系统

全集中式 CF-RAN 的基带处理单元承担着信道估计、波束赋形、编解码、资源调度等全量基带处理任务，逐渐暴露出算力瓶颈、干扰抑制能力不足、频谱适配性受限等问题。考虑到 AP 的规模 and 实际部署成本，在系统性能与实现复杂度间的综合权衡下，设计切分式 CF-RAN 系统架构。将传统 DU 物理层功能按“实时性”与“全局性”拆分，引入 EDU 负责本地实时处理，实现高低频的解耦及空域用户数据流分离，引入 UCDCU 负责全局协同优化，实现数据流的合并/分发。

切分式 CF-RAN 原型试验系统架构如图 5-2 所示，由 1 套核心网，2 个 EDU、1 个 UCDCU、16 个分布式 AP 以及 12 个原型 UE 组成。核心网由 2 台 x86 通用服务器构成，分别承担控制面功能和用户面功能，可兼容 5G 商用终端入网。UCDCU 与 EDU 均由搭 x86 服务器构建，其中 UCDCU 集成前向纠错(Forward Error Correction, FEC) 编解码加速卡，并实现包括 H-PHY、MAC 调度、L2/L3 以及 Cloud-CU 等功能；EDU 实现 L-PHY 处理，并配备前传加速卡。EDU、UCDCU 和核心网通过高速交换机互联。高精度时钟服务器通过以太链路向全网设备分发 IEEE 1588 PTPv2 和 SyncE 信号。切分式 CF-RAN 原型试验系统支持 Sub-6G 和毫米波频段技术试验，与全集中式 CF-RAN 原型试验系统使用相同的设备作为 AP，设备特性和配置也相同。

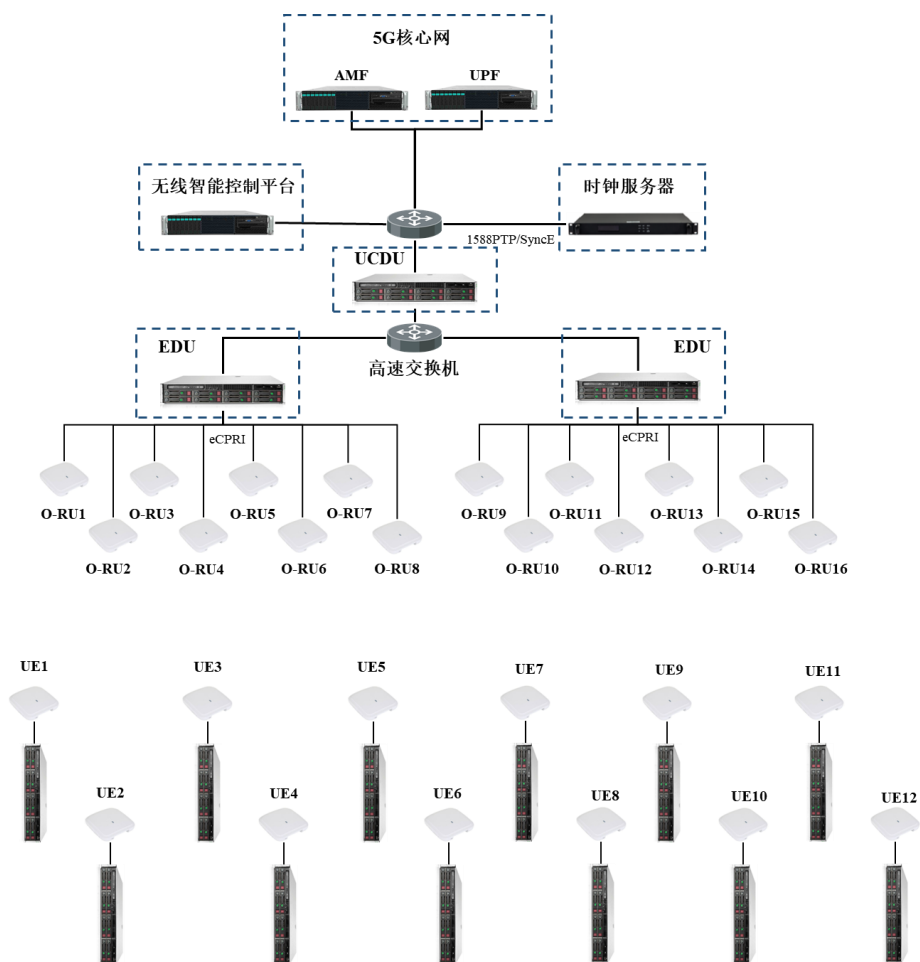


图 5-2 切分式 CF-RAN 原型试验系统示意图

## 5.2 无蜂窝网络技术试验

为验证无蜂窝网络技术性能，使用模拟终端和商用终端在真实环境中开展技术试验，包括 Sub-6G 频段试验、毫米波频段试验和商用终端接入试验。

### 5.2.1 Sub-6G 频段试验

试验系统测试环境如图 5-3 所示。基于 5G-NR 标准，对 Type2 双前导解调参考信号（Demodulation Reference Signal, DMRS）进行了改进，实现了支持 24 和 48 正交端口的 DMRS 配置。在试验系统中，DMRS 信道估计算法采用基于均匀功率时延分布的维纳插值法，其所获信道估计结果用于同一时隙内所有 OFDM 符号的解调处理。

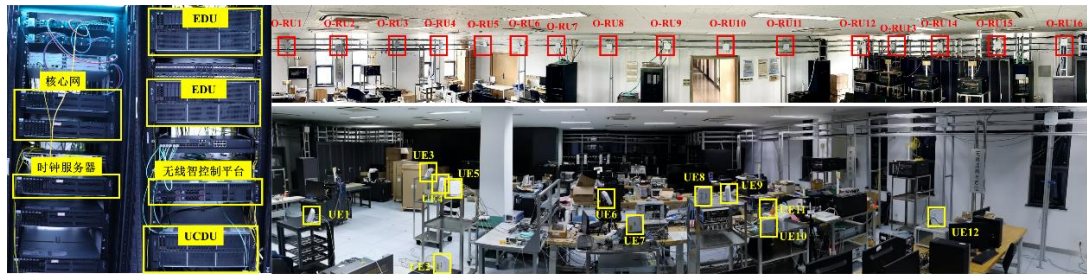


图 5-3 CF-RAN 试验系统测试场景

为评估系统在不同协作规模下的性能，分别考察了 EDU 连接 2 个、4 个和 8 个 AP 的场景，分别对应 8 根、16 根和 32 根天线，以及试验系统部署 8 个、4 个和 2 个 EDU。

此外，试验中对集中式处理、全分布式处理以及基于 EDU 的分布式处理的系统性能进行对比。通过收集真实环境数据，结合离线仿真分析进行系统性能评估。

首先介绍试验中使用的几种收发机方案。对于集中式处理，采用集中式联合 MMSE 收发机方案，该方案具有最优的系统性能，但其实现复杂度最高。对于全分布式处理，包括两种收发机方案，分别是联合 MRC/MRT 和全分布式实现的 MMSE 收发机，也被称为 L-MMSE。除此以外，还考虑了基于动态协作分簇（dynamic cooperation clustering, DCC）的收发机方案，其中 UE-O-RU-EDU 关联采用基于 Q-learning 的算法优化。为公平比较，基于 EDU 的分布式处理使用与 DCC 相同的关联策略。在 DCC 系统中，当只有部分 O-RU 服务 UE 时，相应的联合 MMSE 收发机、全分布式 MMSE 收发机或 MRC/MRT 分别称为部分 MMSE（P-MMSE）、本地部分 MMSE（LP-MMSE）和本地部分 MRC/MRT（LP-MRC/MRT）。对于 CF-RAN，当 EDU 关联所有 UE 时，在 EDU 执行 MMSE 检测和预编码的分布式收发机称为 EDU-MMSE；当仅部分 UE 关联至 EDU 时，则称为 EDU-PMMSE。为了便于理解，表 5-1 给出收发机方案及其对应缩写。

表 5-1 收发机方案

收发机方案	缩写
集中式联合 MMSE	joint MMSE
集中式联合 MMSE 软干扰消除	joint MMSE-SIC
集中式联合迫零（Zero Forcing, ZF）	joint ZF

联合 MRC/MRT	joint MRC/MRT
全分布式 MMSE	L-MMSE
基于 DCC 的联合 MMSE	P-MMSE
基于 DCC 的全分布式 MMSE	LP-MMSE
基于 DCC 的全分布式 MRC/MRT	LP-MRC/MRT
基于 EDU 的全关联 MMSE	EDU-MMSE
基于 EDU 和 DCC 的部分关联 MMSE	EDU-PMMSE

图 5-4 和图 5-5 展示了采用不同接收机方案时的上行总频谱效率。在试验中，模拟 UE 配置为两天线发送，采集了 DMRS 信道估计结果，并通过离线分析计算上行 24 流总频谱效率。其中，图 5-4 为总频谱效率的 CDF 曲线，图 5-5 为平均总频谱效率。在试验环境中，用户之间干扰较为严重，L-MRC 与 L-MMSE 在抑制干扰方面效果欠佳，但 L-MMSE 相比 L-MRC 仍有约 39% 的性能增益。当每个 EDU 所连接的天线数量翻倍时，相比 L-MRC 的性能提升分别约为 46%、109%、317%。当试验系统部署两个 EDU，即每个 32 天线时，性能可以达到联合 MMSE 接收机的 86%。考虑到系统中支持的总上行数据流数为 24，在 EDU 总天线数达到 32 时，相较于仅 8 天线配置，可获得最大的性能改善。

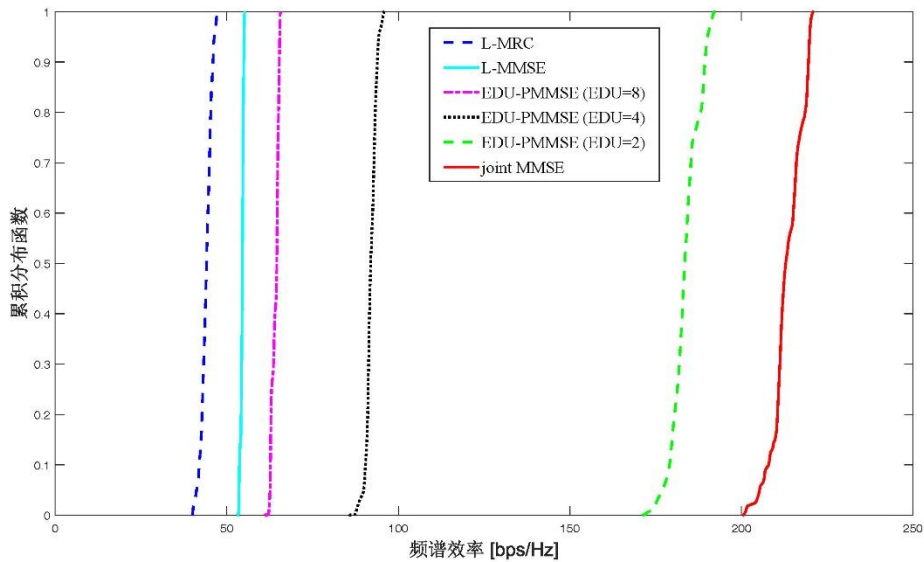


图 5-4 不同接收机方案时的上行总频谱效率对比

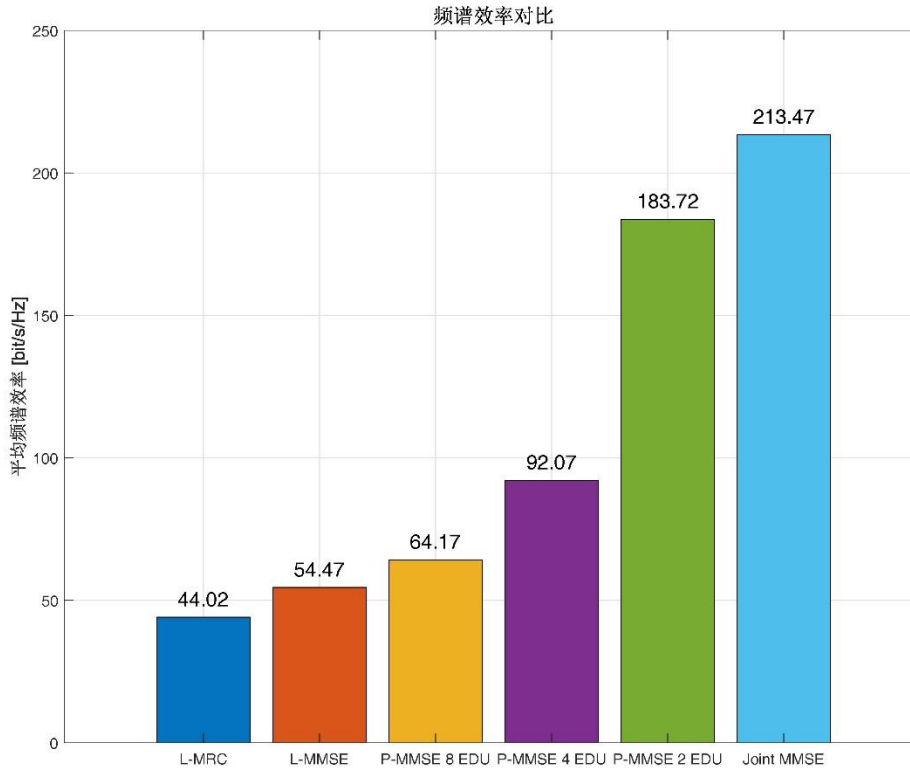


图 5-5 不同接收机方案时的上行平均频谱效率对比

模拟 UE 配置为 4 天线，12 个 UE 并行传输 48 个数据流，并在试验系统中使用 MMSE 串行干扰消除（MMSE - Successive Interference Cancellation, MMSE-SIC）检测。如图 5-6 所示，系统上行总频谱效率可达 425 bps/Hz。此外，在试验系统中部署了低复杂度平均 Argos 校准算法，并验证了其在下行多用户 MIMO 场景下的有效性。如图 5-6 所示，在下行 48 数据流配置下，该校准算法可达 UE 辅助 TLS 校准性能的 96%。对比上行联合 MMSE 检测，该校准算法的下行频谱效率可达上行链路的 86%，进一步验证了下行相干传输实现的可行性。

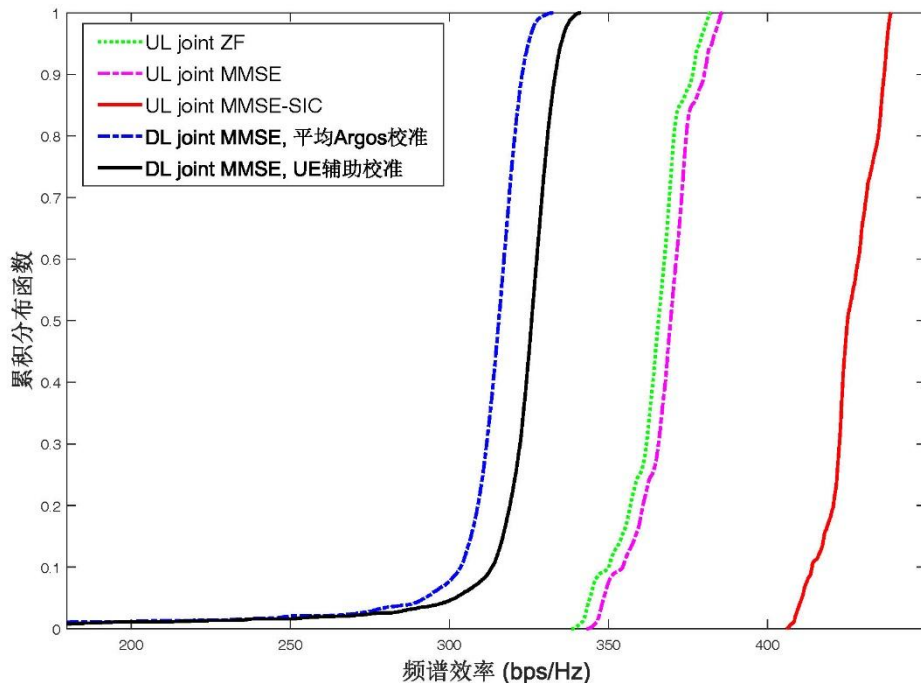


图 5-6 48 流并行传输配置时，不同收发机方案的上下行总频谱效率对比

图 5-7 展示了试验系统下行 24 流的总频谱效率。在下行传输中，系试验统采用了校准参考信号（calibration reference signal, CARS）配置及分组总体最小二乘（Total Least Square, TLS）自校准。由于 UE 辅助校准可视为理想信道状态信息反馈，基于 UE 辅助校准的联合 MMSE 预编码方案具有最优性能。若无特别说明，其他方案均默认采用分组 TLS 自校准。在两个 EDU 配置下，EDU-MMSE 的性能可以接近 UE 辅助校准的联合 MMSE 预编码性能的 80%。由于在实际系统中，不可避免地会存在校准时延。图 5-7 进一步给出了 5ms 校准时延下的性能对比，由于 LO 相位漂移，5ms 后 CSI 发生显著变化，联合预编码性能出现明显下降。而 EDU-MMSE 方案的性能损失相对更小，这表明基于 EDU 的实现方案相比联合处理在对抗校准时延方面具有一定优势。

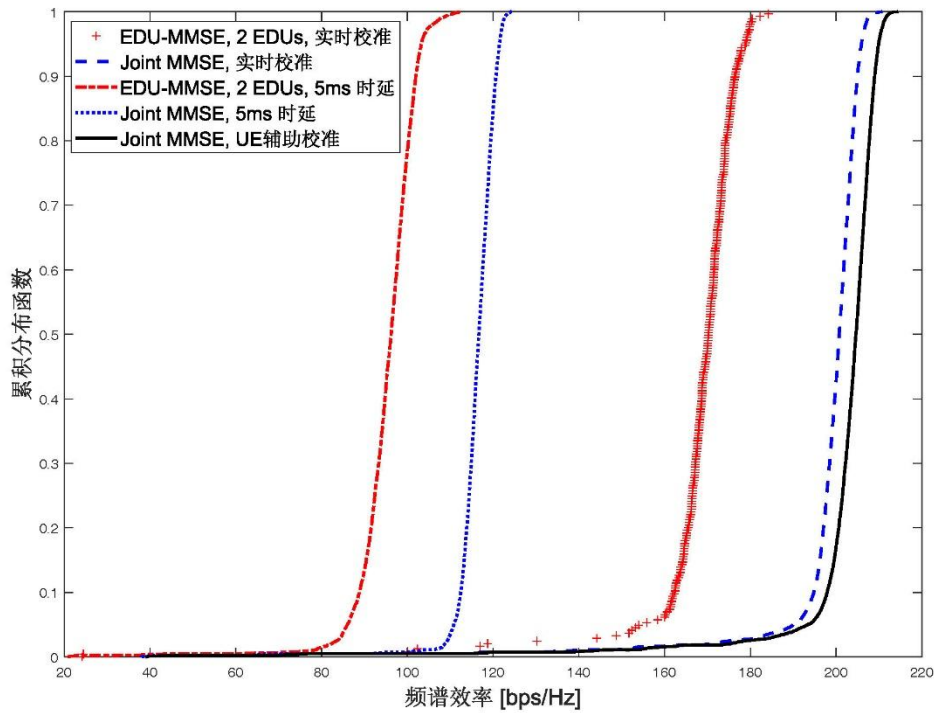


图 5-7 不同传输方案和校准时延时下行总频谱效率对比

图 5-8 进一步对比了系统实测上行频谱效率与理论可达值。在图 5-8 所示的试验场中，12 个 UE 的 48 个数据流均可以实现 64QAM 和 LDPC 码率 0.9。考虑导频和循环前缀开销后，如图 5-9 所示，系统的实测平均频谱效率超过 270 bps/Hz。基于试验中采集的信道数据，对 joint ZF、joint MMSE 和 joint MMSE-SIC 三种接收机方案进行了离线频谱效率分析。其中，joint MMSE-SIC 可实现最大频谱效率，被视作系统性能上限。如图 5-8 所示，joint MMSE 和 joint MMSE-SIC 的平均频谱效率分别约为 375.2 bps/Hz 和 425 bps/Hz。为了公平比较，忽略导频和循环前缀开销，系统的实测平均频谱效率等效值可达 337.5 bps/Hz，约为 joint MMSE-SIC 理论上限的 80%。相比同等部署规模的 5G 蜂窝系统，CF-RAN 系统在频谱效率上实现了 10 倍以上的提升。

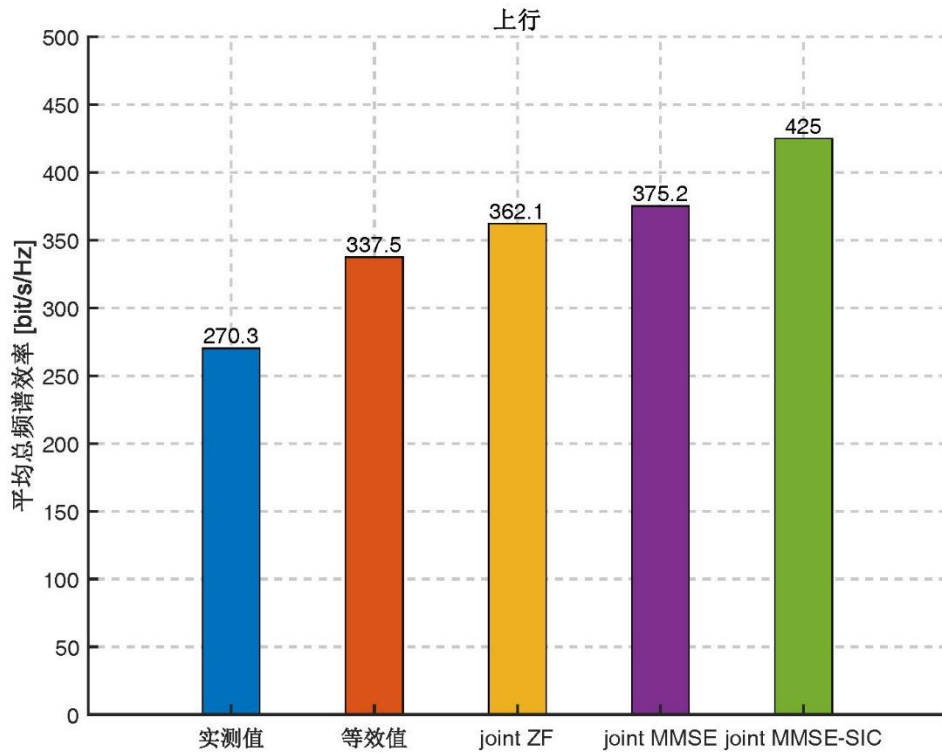


图 5-8 上行 48 流实测频谱效率与理论可达值对比

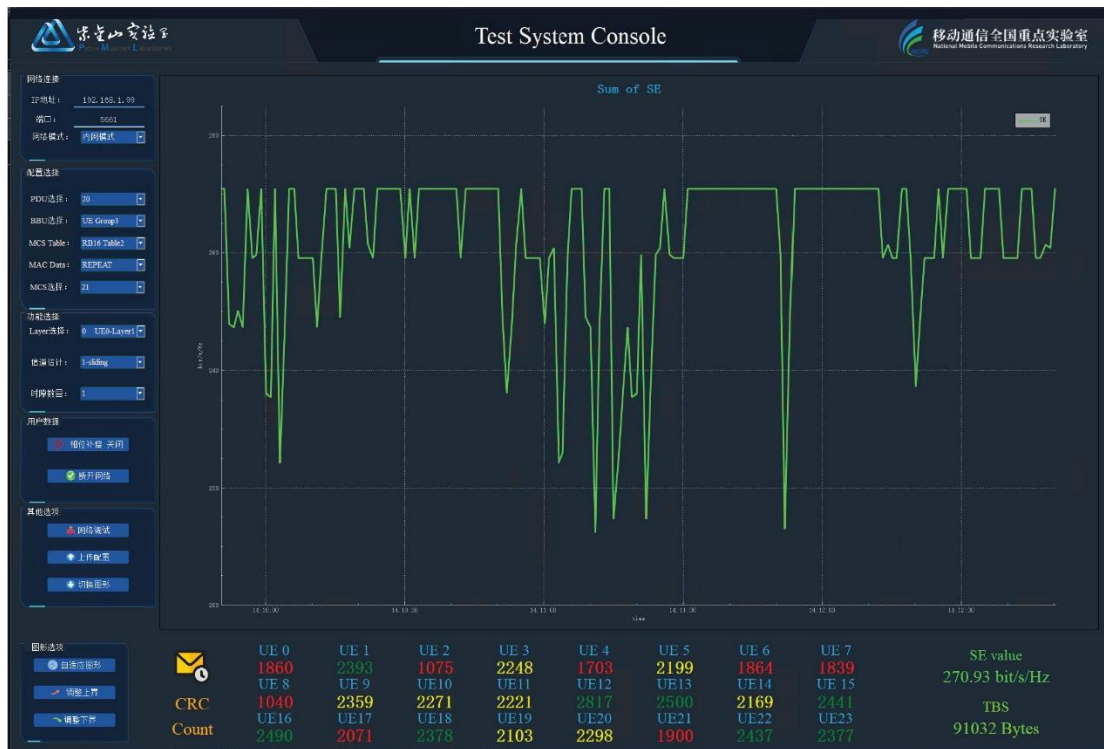


图 5-9 CF-RAN 系统上行 48 流实测频谱效率

## 5.2.2 毫米波频段试验

为验证无蜂窝架构在未来 6G 高性能无线接入中的技术潜力，在真实试验环境下对系统吞吐率、空口时延及通信可靠性开展了性能测试。

试验环境如图 5-10 所示。AAU 工作于 26GHz 毫米波频段，配置两个载波，每个载波带宽为 200 MHz，并采用双极化相控阵天线阵列。每个 AAU 支持两个射频通道，每个通道配置 64 天线阵元，以实现高增益波束成形与多流并行传输能力。系统共部署 8 个 AAU 以及 8 个模拟 UE，通过协作传输机制支持最多 16 个并行波束，从而形成大规模空间复用能力。系统空口参数遵循 5G NR 帧结构设计，子载波间隔为 120 kHz，对应时隙长度为 0.125 ms。试验系统采用 DMRS 导频和 CSI-RS 信道参考信号进行信道估计与链路测量，以支持上下行传输算法验证。为突出传输性能测试，本实验中采用固定波束方式进行通信，省略了波束搜索与对准过程，从而更加直接地评估系统的极限吞吐能力。



图 5-10 毫米波 CF-RAN 试验系统测试场景

针对空口传输信道，系统采用上行联合接收与下行预编码发送的传输机制，对系统频谱效率性能进行了测试。在上行 16 流业务传输场景下，基站侧采用 MMSE 联合接收算法。测试结果如图 5-11 所示，系统平均频谱效率可达到 179.6 bps/Hz，约为理想干扰抵消性能的 98%。

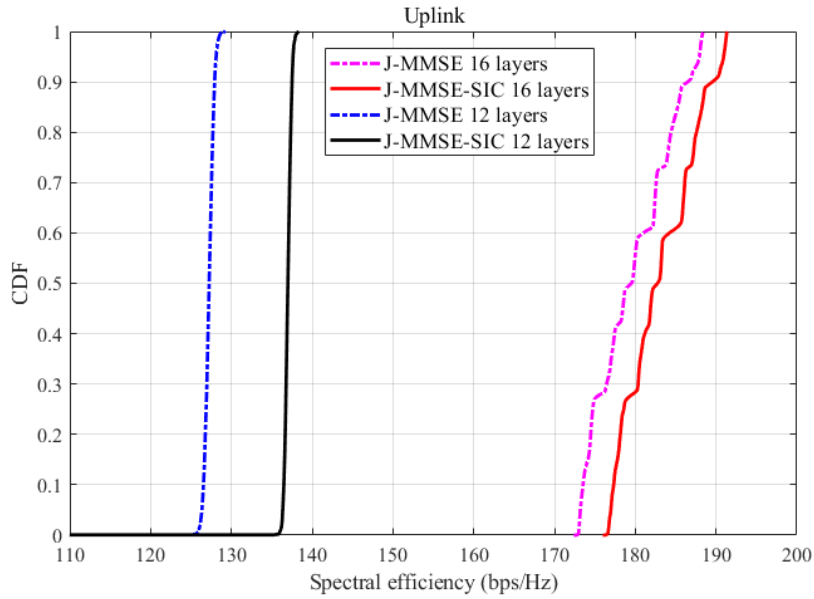


图 5-11 16 流毫米波上行联合接收测试性能

对于下行传输，通过前述空口信道校准与相位跟踪机制，仅需在数字域进行预编码处理，无需重构阵子级信道，即可保持良好的传输性能。由图 5-12 的测试结果可知，在 16 流、8 流和 4 流传输场景下，系统单流平均频谱效率分别为 4.5 bps/Hz、6.6 bps/Hz 和 7.9 bps/Hz。其中，在 4 流传输场景下，系统性能可达到理想预编码性能的 67%。

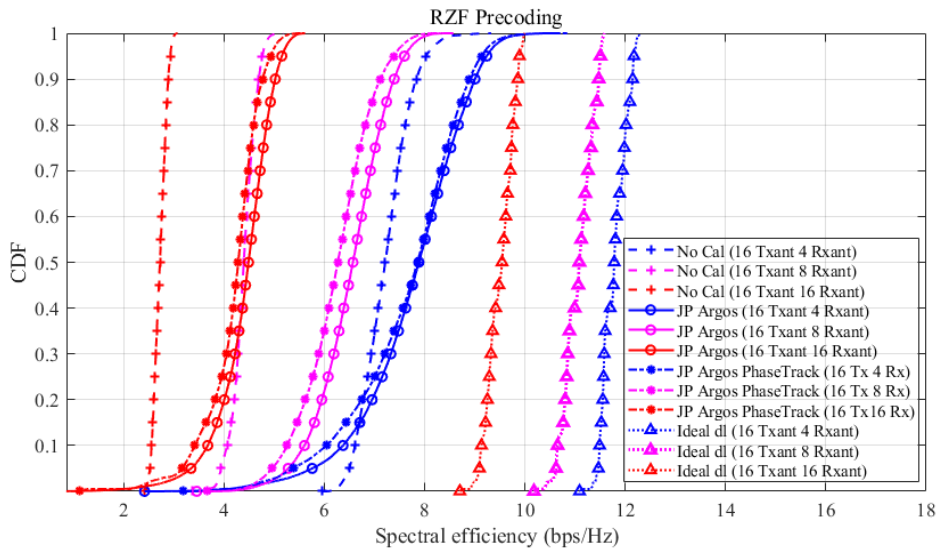


图 5-12 16 流毫米波下行预编码测试性能

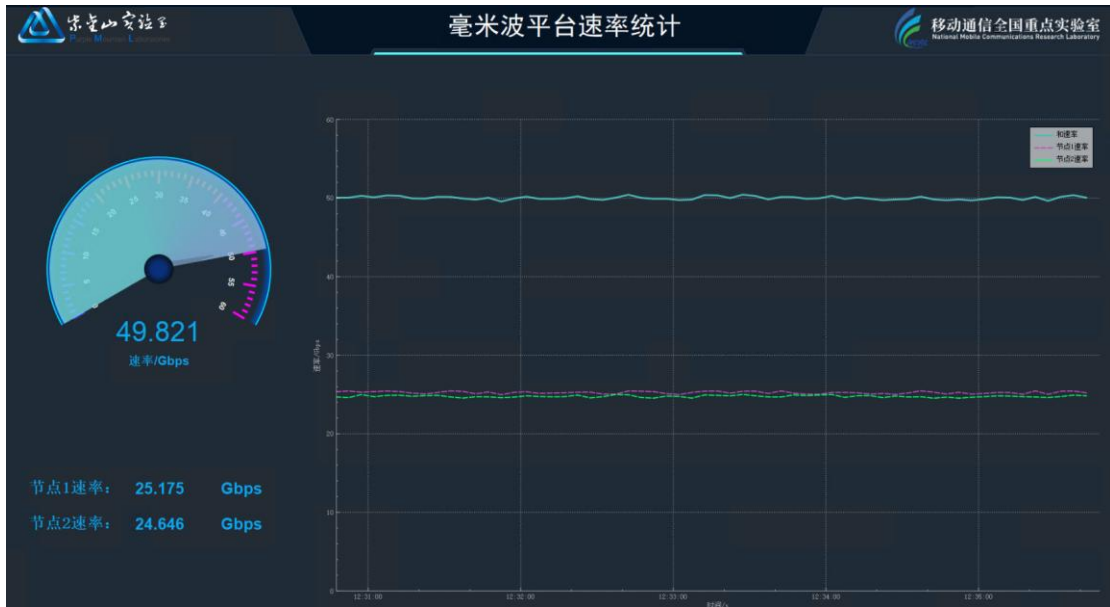


图 5-13 16 流毫米波 CF-RAN 试验系统

在实际测试中，系统通过同时调度多个数据流实现大规模并行传输。测试结果表明，在 32 个并行数据流条件下，系统可实现约 50 Gbps 的无线吞吐率，如图 5-13 所示。该结果充分验证了无蜂窝毫米波大规模 MIMO 系统在高频宽、大规模天线阵列和协作传输机制支持下具备显著的容量优势。

### 5.2.3 商用终端接入无蜂窝网络技术试验



图 5-14 商用终端接入无蜂窝网络测试环境

在中国电信研究院北京园区实验室内，采用 BBU+RRU 方式部署蜂窝和无蜂窝网络，使用 5G 商用 4T4R RRU，小区覆盖半径设置为 10 米，测试环境如图 5-14 所示。测试中预先选择一个无蜂窝网络的 RRU（作为中心 RRU）和距离其最近的其他 3 个 RRU 作为无蜂窝接入点，RRU 之间距离为 2~3 米。考虑对上行速率要求较高的应用场景，蜂窝网络与无蜂窝网络的无线帧时隙配置均使用 2D7U，带宽 100MHz。测试中，分别配置单个蜂窝小区和两个蜂窝小区的试验

环境，以对比终端在不同干扰情况下的性能。终端在接入蜂窝网络后，在距离蜂窝小区中心 4 米、6 米、8 米和 10 米的位置进行空口物理层上行吞吐率测试；终端在接入无蜂窝网络后，在距离中心 RRU 4 米、6 米、8 米和 10 米的位置进行空口物理层上行吞吐率测试。

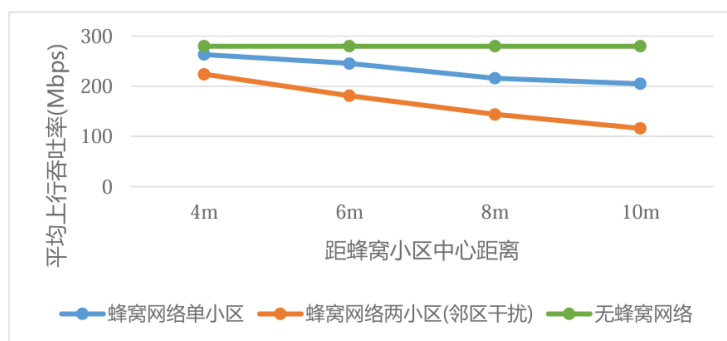


图 5-15 蜂窝与无蜂窝接入平均上行吞吐率对比测试结果

图 5-15 展示了终端接入蜂窝和无蜂窝网络的平均上行吞吐率测试结果。从测试结果显示，在 4、6、8 和 10 米的位置上，终端用户接入无蜂窝网络相比接入单小区蜂窝网络，上行吞吐率分别提升 6.3%、14.1%、29.7%和 36.5%；相比接入两小区蜂窝网络（模拟强邻区干扰场景），上行吞吐率分别提升 24.9%、54.5%、94.6%和 140.9%；终端接入无蜂窝网络的平均上行吞吐率约为终端在蜂窝小区边缘（距蜂窝小区中心 10 米）的 2.4 倍。上述结果表明，用户接入无蜂窝网络可获得吞吐率方面的增益，特别是相比于用户在蜂窝小区边缘时。在密集组网和密集用户场景下，用户位于蜂窝小区边缘是常见的，且更容易出现邻区干扰现象。由测试结果可知，无蜂窝网络对于在密集用户场景下提供高吞吐率具有优势。

测试结果也显示，终端接入无蜂窝网络，在不同位置的上行吞吐率保持稳定，而接入蜂窝网络则出现明显下降，这表明用户接入无蜂窝网络后在移动过程中也可获得稳定的吞吐率。对于不同的位置，由测试结果计算获得终端接入无蜂窝网络、单小区蜂窝网络和两小区蜂窝网络的上行吞吐率标准差平均值为 0.5 Mbps、17.1 Mbps 和 22.5 Mbps。终端接入无蜂窝网络的上行吞吐率标准差小于接入蜂窝网络，且远小于其上行吞吐率（280 Mbps），进一步说明无蜂窝具有保障用户吞吐率的能力。

## 5.3 无蜂窝网络应用案例

### 5.3.1 案例一：江苏广播电视塔“6G 专线”赛事直播应用

如图 5-16 所示，紫金山实验室在江苏南京广播电视塔（紫金塔）部署无蜂窝通信系统，通过 6G 远距无蜂窝系统+毫米波/自组网组成的“6G 专线”，解决苏超转播中视频高质量无线传输难题。为城市远距移动视频信号传输和人群密集聚集场景下提供了一种解题范例。

紫金塔部署 32 个大功率 RRU 射频单元，东西南北每个方向 8 个 RRU，以确保做到 360 度覆盖南京主城区。无蜂窝系统采用切分式架构部署，使用通用服务器部署 CU、UCDU 和 EDU，每个 EDU 支持 4 个 RRU 的信号处理。每个方向的 8 个 RRU 组成 1 个无蜂窝接入簇，空口信号进行协作处理，充分利用空间分级增益，克服蜂窝系统随着小区分裂而导致的干扰越来越大的问题。



图 5-16 江苏电视塔无蜂窝网络接入点分布

综合考虑场馆遮挡和转播上行发射功率受限问题，场馆高层使用大功率 CPE 与紫金塔基站建立通信链路，江苏广电 ITV-U 传播设备使用大功率 CPE 接入无蜂窝网络，实时传输多机位多角度“苏超”联赛高清视频转播画面，实现单站广覆盖高清视频转播任务。如图 5-17 所示，实际应用中，网络上行传输速率可达 280Mbps，直线覆盖半径 7 公里，具有移动远距场景下 1080p、60 帧视频无损传输优势，已支持包括苏超决赛在内的四场苏超比赛直播。

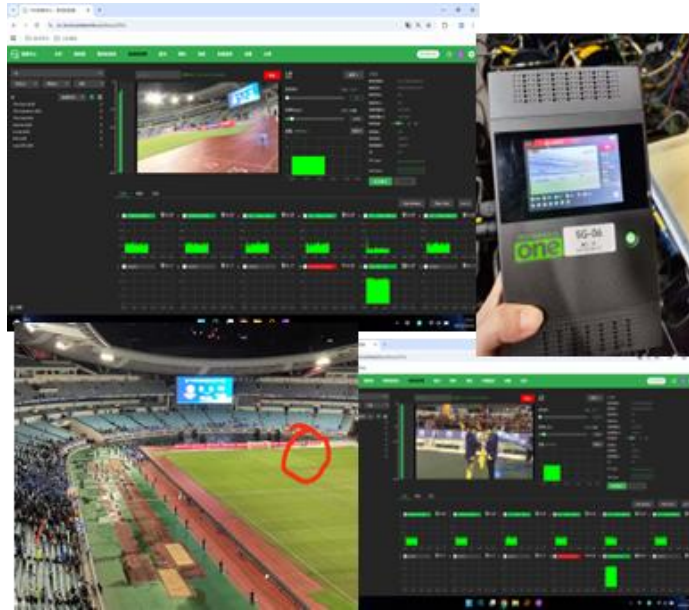


图 5-17 苏超赛事转播

### 5.3.2 案例二：面向低空经济的“一塔一城”无蜂窝协同覆盖

低空经济作为国家战略性新兴产业，对通信与感知基础设施提出了三维立体覆盖与高精度管控要求。传统地面蜂窝网络主要为二维平面设计，直接复用至低空空域面临天线下倾导致高空信号盲区、视距传播引发严重同频干扰、频繁“乒乓切换”威胁飞行安全、为消除盲区而大量建设对空基站成本高昂等四大物理瓶颈。针对上述问题，产业界基于无蜂窝技术提出了“一塔一城”创新范式，利用城市现有制高点（如广播电视塔、高山瞭望塔等）集中部署大规模分布式天线阵列，构建覆盖方圆数十公里的“超大尺度连续协作域”。

近期外场原型验证初步证明了该方案的有效性：

#### （1）云南怒江复杂山地试验

在地形崎岖的泸水市，依托单一制高点部署的 6G 无蜂窝基站，成功构建了辐射全市的广域低空智联通信网。测试结果显示：在 15 公里距离上，单架无人机上行图传速率稳定保持在 10Mbps 以上；极限测试中，40 公里处上行边缘速率仍维持在 5Mbps 以上。如图 5-18 所示，该网络同时支撑了 10 架多旋翼无人机密集编队集群飞行，控制指令响应达到亚毫秒级，高清视频流并发传输全程无干扰。试验结果全面刷新多项通信性能极限。



图 5-18 云南省怒江州 10 架多旋翼无人机集群编队飞行

## (2) 南京上秦淮试验场低空感知测试

如图 5-19 所示，在南京上秦淮试验场中，基于无蜂窝 ISAC 技术，系统对非合作微型飞行器实现了厘米级精确定位与机型特征识别，感知响应时间仅 0.1 秒，并实时上报至城市低空空域智能管控“大脑”系统，触发自动预警。

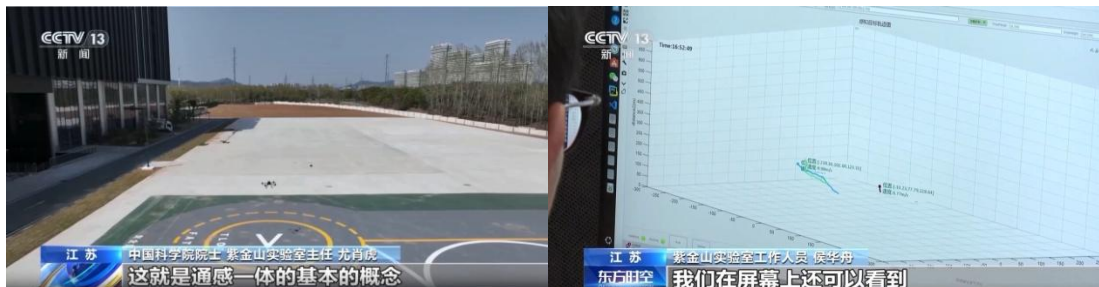


图 5-19 6G 无蜂窝和毫米波通感一体技术应用于低空领域的试验与应用示范

上述试验表明，无蜂窝架构通过分布式节点联合处理与动态服务簇机制，能够有效突破传统蜂窝网络在低空立体覆盖中的物理瓶颈，为低空经济的规模化运营提供坚实的技术底座。

## 6 未来展望

面向 6G “万物智联” 的宏大愿景，无蜂窝网络以其打破物理小区边界、以用户为中心的范式优势，已成为重构 6G 无线接入网物理层底座的核心使能技术。尽管在云化架构解耦、底层物理技术突破以及典型场景验证等方面已取得显著进展，但无蜂窝网络从理论走向全面商用落地，仍需在标准制定、核心技术及产业生态等维度持续演进与探索：

- **标准化推进与开放生态构建：**随着 3GPP Release 19 及后续 6G 研究项目的启动，无蜂窝网络的核心机制将迎来标准化的关键窗口。未来需要在终端辅助校准机制、新型多点协作信令框架、增强型开放前传接口等方面凝聚全球产业共识。打破传统厂商壁垒，构建跨厂商设备的互操作性与开放生态，是无蜂窝网络实现规模化部署的前提。
- **AI 内生与网络的深度自治：**未来的无蜂窝架构将与 “AI on RAN” 理念深度融合。分布式的边缘单元不仅是通信载体，更将演变为泛在的算力底座。进一步优化基于多智能体的大规模分布式资源分配体系、探索基于轻量化 AI 模型的信道预测与环境感知能力，将推动网络向自学习、自优化、自演进的全面智联与内生智能方向发展。
- **空天地海与异构网络的深度协同：**未来的无蜂窝架构需要向更广阔的空间维度延伸。特别是在与低轨卫星星座等 NTN 结合时，如何克服超大尺度下的星间/星地时频精同步、长时延及高多普勒频移挑战，实现地面与非地面节点的无缝协同与全域覆盖，是构建 6G 空天地一体化网络的关键命题。
- **高频段器件演进与绿色低碳通信：**向毫米波乃至太赫兹等更高频段扩展是 6G 获取极致容量的重要途径。在海量分布式节点密集部署的背景下，探索低成本、高能效的射频前端器件与混合预编码架构，结合基于 AI 的网络级节点动态休眠策略，在提升系统频谱效率的同时实现整网能效的数量级跃升，是落实 6G 可持续发展原则的必由之路。

当前，业界对 6G 无蜂窝网络的探索正逐步迈向深水区。要实现从局部试验向全网协同的跨越，无法仅凭单一技术的突破，更需要运营商、设备商、终端厂商、科研院所及测试机构的通力协作。未来，6G FuTURE 论坛将继续携手产学研各界力量，依托商用级原型试验网的持续迭代，推动无蜂窝网络关键技术的攻

关与生态繁荣，共同迎接 6G 智能信息基础设施的全面到来。

## 7 缩略语表

英文缩写	英文全称	中文全称
1-D CNN	One-Dimensional Convolutional Neural Network	一维卷积神经网络
3GPP	3rd Generation Partnership Project	第三代合作伙伴计划
5G	Fifth Generation	第五代移动通信
6G	Sixth Generation	第六代移动通信
AAU	Active Antenna Unit	有源天线单元
AI	Artificial Intelligence	人工智能
AI-Func	Artificial Intelligence Function	智能功能单元
A-IoT	Ambient Internet of Things	无源物联网
AMP	Approximate Message Passing	近似消息传递
AoA	Angle of Arrival	到达角
AoD	Angle of Departure	离开角
AP	Access Point	接入点
AR	Augmented Reality	增强现实
AT-MMSE	Asynchronous Team MMSE	异步团队最小均方误差
AUD	Active User Detection	活跃用户检测
BBU	BaseBand Unit	基带处理单元
BDMA	Beam Division Multiple Access	波分多址
BDQ	Branching Dueling Q-Network	分支竞争深度 Q 网络
BS	Base Station	基站
CARS	Calibration Reference Signal	校准参考信号
CE	Channel Estimation	信道估计
CF-NAFD	Cell-Free NAFD	无蜂窝网络辅助全双工
CF-RAN	Cell-Free Radio Access Network	无蜂窝无线接入网
CF-mMIMO	Cell-Free Massive MIMO	无蜂窝大规模多输入多输出
CFAR	Constant False Alarm Rate	恒虚警率
CJT	Coherent Joint Transmission	相干联合传输
CLI	Cross Link Interference	交叉链路干扰
Cloud-CU	Cloud Centralized Unit	云化集中式单元
Comp-Func	Computing Function	算力功能单元

CPU	Central Processing Unit	中央处理单元
CQI	Channel Quality Indicator	信道质量指示
CSI	Channel State Information	信道状态信息
CSI-RS	Channel State Information Reference Signal	信道状态信息参考信号
CU	Centralized Unit	集中式单元
CU-CP	Centralized Unit Control Plane	集中式单元控制平面
CU-UP	Centralized Unit User Plane	集中式单元用户平面
D2C	Direct-to-Cell	手机直连卫星
DC	Distributed Center	分布式中心
DCC	Dynamic Cooperation Clustering	动态协作分簇
D-Func	Data Plane Function	数据面功能单元
D-MIMO	Distributed MIMO	分布式多输入多输出
DMRS	Demodulation Reference Signal	解调参考信号
DSS	Dynamic Spectrum Sharing	动态频谱共享
DU	Distributed Unit	分布式单元
EDU	Edge Distributed Unit	边缘分布式单元
FDD	Frequency Division Duplex	频分双工
FEC	Forward Error Correction	前向纠错
FFT	Fast Fourier Transform	快速傅里叶变换
FoA	Formation-of-Arrays	编队天线阵列
GFRA	Grant-Free Random Access	免授权随机接入
GNSS	Global Navigation Satellite System	全球导航卫星系统
GPS	Global Positioning System	全球定位系统
HAPS	High Altitude Platform Station	高空平台
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request	混合自动重传请求
H-PHY	High Physical Layer	高阶物理层
IAI	Inter Access point Interference	接入点间干扰
ICI	Inter-Carrier Interference	载波间干扰
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform	逆快速傅里叶变换
IMT	International Mobile Telecommunications	国际移动通信
ISAC	Integrated Sensing and Communication	通信感知一体化
ISI	Inter-Symbol Interference	符号间干扰
ITU	International Telecommunication Union	国际电信联盟
ITU-R	ITU Radiocommunication Sector	国际电信联盟无线电通信部门

IUI	Inter User equipment Interference	用户间干扰
KPI	Key Performance Indicator	关键绩效指标
LEO	Low Earth Orbit	低地球轨道
L-PHY	Low Physical Layer	低物理层
MAB	Multi-Armed Bandit	多臂老虎机
MAC	Medium Access Control	介质访问控制
MADDPG	Multi-Agent Deep Deterministic Policy Gradient	多智能体深度确定性策略梯度
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output	多输入多输出
mMIMO	massive MIMO	大规模多输入多输出
mMTC	massive Machine Type Communication	海量机器类通信
MMSE	Minimum Mean Square Error	最小均方误差
MMSE-SIC	MMSE - Successive Interference Cancellation	最小均方误差串行干扰消除
MR	Maximum Ratio	最大比
MRC	Maximum Ratio Combining	最大比合并
MU-MIMO	Multi-User MIMO	多用户多输入多输出
NAFD	Network-Assisted Full-Duplex	网络辅助全双工
NSA	Non-Standalone	非独立组网
NTN	Non-Terrestrial Network	非地面网络
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	正交频分复用
PBTA	Per-Beam Timing Advance	逐波束定时提前
PDCP	Packet Data Convergence Protocol	分组数据汇聚协议
PPS	Pulse Per Second	秒脉冲
P-Sat	primary Satellite	主卫星
PTP	Precision Time Protocol	精确时间协议
QCL	Quasi Co-Location	准共址
QoS	Quality of Service	服务质量
RAN	Radio Access Network	无线接入网
RD	Range-Doppler	距离-多普勒
RLC	Radio Link Control	无线链路控制
RRC	Radio Resource Control	无线资源控制
RRM	Radio Resource Management	无线资源管理
RRU	Remote Radio Unit	射频拉远单元
SA	Standalone	独立组网

SALNR	Signal to Asynchronous Leakage plus Noise Ratio	信号与异步泄漏加噪声比
SBFD	Sub-Band Full Duplex	子带全双工
SDAP	Service Data Adaptation Protocol	服务数据适配协议
SEU	Space Expansion Unit	空间扩展单元
S-Func	Sensing Function	感知功能单元
SIB	System Information Block	系统信息块
SID	Study Item Description	研究项目描述
SORT	Simple Online and Realtime Tracking	简单在线实时跟踪
SRS	Sounding Reference Signal	探测参考信号
S-Sat	secondary Satellite	次卫星
SSB	Synchronization Signal Block	同步信号块
SSNOMA	Spatially Separable NOMA	空间可分离非正交多址接入
SyncE	Synchronous Ethernet	同步以太网
TCI	Transmission Configuration Indication	传输配置指示
TDD	Time Division Duplex	时分双工
TLS	Total Least Square	总体最小二乘
TOD	Time of Day	日时
TRP	Transmission Reception Point	传输接收点
UCDU	User-Centric Distributed Unit	以用户为中心的分布式单元
UDN	Ultra-Dense Network	超密集网络
UE	User Equipment	用户设备
ULCM	User Location Circle Model	用户定位圆模型
URLLC	Ultra-Reliable Low-Latency Communication	超高可靠低时延通信
VR	Virtual Reality	虚拟现实
XR	Extended Reality	扩展现实
XRAN	Extensible Radio Access Network	可扩展无线接入网络
ZF	Zero Forcing	迫零
ZLPR	Zero-bounded Log-sum-exp & Pairwise Rank-based Loss	零边界对数和指数成对排序损失函数

## 8 参考文献

- [1] ITU-R. IMT-2030 framework [R]. Recommendation ITU-R M.2160-0, 2023.
- [2] Wang D, Wang M, Zhu P, et al. Performance of network-assisted full-duplex for cell-free massive MIMO [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(3): 1464-1478.
- [3] Zhang H, Lin Q, Li Y, et al. Activity detection for massive connectivity in cell-free networks with unknown large-scale fading, channel statistics, noise variance, and activity probability: A Bayesian approach [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2024, 72: 942-957.
- [4] Diao L, Wang H, Li J, et al. A scalable deep-learning-based active user detection approach for SEU-assisted cell-free massive MIMO Systems [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(22): 19666-19680.
- [5] Wang J, Li J, Zhu P, et al. Spatial-separable NOMA-based intelligent hierarchical fast uplink grant for mURLLC over cell-free networks [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(19): 31974-31987.
- [6] Guidotti A, Vanelli-Coralli A, Amatetti C. Federated cell-free MIMO in nonterrestrial networks: Architectures and performance [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2024, 60(3): 3319-3347.
- [7] Meng K, Masouros C, Petropulu A P, et al. Cooperative ISAC networks: Opportunities and challenges [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2024, 32(3): 212-219.
- [8] ITU-R, Draft new report ITU-R M.[IMT-2030.TECH PERF REQ] - Minimum requirements related to technical performance for IMT-2030 radio interface(s) [R]. Document 5/116, Feb. 2026.
- [9] 3GPP. Study on 6G use cases and service requirements [R]. TR 22.870, Release 20, Nov. 2025.
- [10] 3GPP. Study on 6G scenarios and requirements [R]. TR 38.914, Release 20, Mar. 2026.

[11] NTT DOCOMO. New SID: Study on 6G radio [R]. RP-251881, 3GPP TSG RAN Meeting #108, Prague, Czech Republic, June 9-13, 2025.

## 9 文档作者列表

贡献者	单位
黄永明、王东明、吴越、曹阳、张子扬、夏心江、尤建洁	紫金山实验室
李福昌、张忠皓、马青阁、李露	中国联通
郭婧、薛俊礼	中国电信
湛丽、高秋彬	中信科移动
谢峰、张康杰	中兴通讯
高路、许昌龙	高通
张铖	东南大学
曾捷	北京理工大学