



IMT-2030(6G)推进组

IMT-2030(6G)Promotion Group

分布式超大规模MIMO 技术研究报告



2023

2023 年 12 月

版权声明 **Copyright Notification**

未经书面许可 禁止打印、复制及通过任何媒体传播

©2023 IMT-2030 (6G) 推进组版权所有



目 录

1. 概述.....	5
1.1 技术原理.....	5
1.2 国内外研究现状.....	5
2. 应用场景、部署方式、网络架构.....	6
2.1 应用场景.....	6
2.2 部署方式.....	8
2.3 网络架构.....	11
3. 协同传输方案.....	14
3.1 初始静态协作簇接入.....	14
3.2 动态协作簇构建.....	17
3.3 动态协作预编码.....	23
3.4 协作接收算法.....	27
4. 通道校准.....	27
4.1 协作点间空口校准.....	28
4.2 基于 UE 辅助的校准.....	30
5. 时频同步.....	33
5.1 时间同步.....	33
5.2 频率同步.....	37
6. 原型验证.....	39
7. 总结及发展建议.....	43
参考文献.....	44
主要贡献单位.....	46



图目录

图 2.1 高校、CBD 等热点区域示图	6
图 2.2 大中型场馆、交通枢纽等应用场景示图	6
图 2.3 企业园区应用场景示图	7
图 2.4 低空覆盖应用场景示图	7
图 2.5 分布式超大规模 MIMO 星形部署方式示意图	8
图 2.6 分布式超大规模 MIMO 环形部署方式示意图	9
图 2.7 分布式超大规模 MIMO 星形环形结合部署方式示意图	9
图 2.8 分布式超大规模 MIMO 树形部署方式示意图	10
图 2.9 基于 A-ROF 实现前传链路示意图	10
图 2.10 双层分布式超大规模 MIMO 网络架构示意图	12
图 2.11 宏微组网分布式超大规模 MIMO 上下行服务节点解耦	13
图 2.12 上下行解耦网络架构的吞吐量性能增益	13
图 3.1 动态协作协作点簇架构	14
图 3.2 初始接入流程	16
图 3.3 协作 SSB 示意图	17
图 3.4 三层协作簇结构	18
图 3.5 协作簇测量	19
图 3.6 异频测量示意图	21
图 3.7 同频测量示意图	21
图 3.8 RSRP 测量结果比较	23
图 3.9 可扩展的分布式超大规模 MIMO 系统	24
图 3.10 某城区一个面积为 3 平方公里的区域的三维射线追踪模型（左）；接收器位置在品红色阴影区域，发射器用蓝色圆圈表示（右）。	26
图 3.11 不同 MIMO 方案的频谱效率比较：（左）单接收天线；（右）四接收天线	27
图 4.1 通道系数示意图	28
图 4.2 协作点/RRU 分组校准及校准信号	29
图 4.3 使用不同码书精度情况下的校准误差 CDF	31
图 4.4 使用多样点联合估计情况下的校准误差 CDF	32
图 5.1 上行定时同步协作点分组	35
图 5.2 协作点下行定时	36
图 6.1 低频段分布式超大规模 MIMO 无线接入网试验场景	40



图 6.2 低频段分布式超大规模 MIMO 无线接入网试验场景	40
图 6.3 48 个数据流时系统总频谱效率	41
图 6.4 12 个数据流时系统总频谱效率	42
图 6.5 不同方案的频谱效率对比	42
图 6.6 下行 24 个数据流的频谱效率	43
图 6.7 考虑校准时延的下行 24 个数据流的频谱效率	43

表目录

表 3.1 中心频率 4GHZ, 车速 60KM 场景下同频测量之效能比较	22
表 5.1 时频同步实现方法对比	39



1. 概述

1.1 技术原理

分布式超大规模 MIMO 系统是超大规模天线演进的重要方向，它融合了大规模 MIMO 和分布式天线技术的优势，有望通过更广域的节点间协作提供更高的空间分辨率和频谱效率，为终端（UE, User Equipment）提供更为优异的性能体验。

6G 网络中的分布式超大规模 MIMO 系统呈现天线数更多、分布地理范围更广、智慧协同作用更深的显著特征。在大规模 MIMO 技术基础上，分布式超大规模 MIMO 将原本集中式天线阵列分散在小区各个位置，以用户为中心，以站间智慧交互与智能协作为基础，融合多频段传输特性，在消除小区间干扰以及提高频谱资源利用率的同时，降低了传统集中式 MIMO 射频和天线数倍增的物理实现挑战，增强系统可扩展性和可靠性，从而使得无边界用户体验在 6G 网络下成为可能。

1.2 国内外研究现状

面向未来移动信息网络更高速率（Tbps）、更低时延（0.1ms）、更高可靠（99.99999%）等需求，分布式超大规模 MIMO 被认为是未来 6G 移动通信系统的候选技术方案之一，受到研究者的广泛关注。4G 时期的协作多点传输（CoMP）、5G 的多收发协作点（Multi-TRP）技术，都是分布式超大规模 MIMO 技术实践应用的早期探索。近几年来，无蜂窝大规模 MIMO（Cell-free massive MIMO）也引起了广泛关注，该技术是一种试图实现去小区化、无缝协作的无线通信技术，在 2017 年由 Marzetta 教授和瑞典林雪平大学的 Larsson 教授共同提出^[1]。从网络架构和物理实现上，无蜂窝大规模 MIMO 与分布式超大规模 MIMO 有较多相似之处。两者都可以采用集中式的中心处理单元实现系统中所有节点的协作。但为了实现无缝协作，无蜂窝大规模 MIMO 更多地强调协作传输的可扩展性，不仅需要物理层信号处理方法的可扩展性，还要求上层的实时调度具备可扩展性，并具备完善的移动性管理，这就要求物理层支持以用户为中心的有限集的动态协作簇。

当前，美国“下一代移动通信技术联盟（Next G Alliance）”发布了 6G Distributed Cloud and Communications Systems 的白皮书，欧盟“2020 地平线计划”和“Marie Skłodowska-Curie”计划设立了“An intelligent design of user-centric cell-free massive MIMO: A deep learning approach”项目，开展研究基于深度学习的智能化无蜂窝大规模 MIMO。国内产学研也开展了大量的分布式超大规模 MIMO 的基础理论、关键技术、原型验证等研究工作。可以看到，当前已有的研究更多聚焦分布式超大规模 MIMO 通信关键技术。然而，在从技术走向商用过程中，分布式超大规模 MIMO 还有许多实际问题需要进一步研究分析，例如动态协作、低复杂度预编码技术、高精度时频同步等。

2. 应用场景、部署方式、网络架构

2.1 应用场景

分布式超大规模 MIMO 主要应用于大容量场景，特别是人流量密集，数据业务爆发式增长的流量密集场景，例如高校、CBD 热点区域、大中型场馆以及交通枢纽等。同时，还可以联合部署不同类型的节点，以适应不同场景覆盖需求，例如除固定式基站外，还可以利用移动式基站、无人机基站、智能超表面等改善覆盖性能。

高校、CBD 等热点区域。该类场景的终端流量较大，但分布较为均匀，密度适中，移动性不高。典型的网络需求包含视频会议，网页浏览，数据下载等等。为提升容量，可采用室外覆盖室内的方式，将多个节点连接到基带处理单元，实现控制信道合并，数据信道复用。



图 2.1 高校、CBD 等热点区域示图

大中型场馆、交通枢纽等应用场景。该类场景的主要特点是人流量大，数据业务爆发式增长，需要提供高密度、高速率的网络连接。针对此类大中型场馆以及交通枢纽等室内密集场景，可通过室分系统升级，实现数据信道复用，提升容量。



图 2.2 大中型场馆、交通枢纽等应用场景示图

企业园区应用场景。一般为 ToB 业务的场景，例如智慧工厂，具有大量连接、高并发率、数据速率稳定等特点。通过分布式超大规模 MIMO，可满足上下行大带宽特定业务需求。例如，在智慧工厂的生产调度和状态监控中，可通过分布式超大规模 MIMO 系统，实时获取设备信息，一方面实现设备状态监控和安全维护，另一方面为建立调度模型和优化调度方案提供数据基础。



图 2.3 企业园区应用场景示图

低空覆盖应用场景。随着无人驾驶航空器（UAV, Unmanned Aerial Vehicle）相关产业的快速发展，其应用领域也逐渐向各个行业扩展，除军事用途外，还包括快递物流、农业植保、应急通信、气象监测、森林防火等多种用途。为满足无人机的覆盖要求，最主要的是增强垂直维度的覆盖效果。一种方案是直接增加指向空中的天线，另一种是增加 MIMO 天线在垂直维度的数量，即通过多个窄波束取代原有的宽波束，增加整体的垂直覆盖能力。然而，随着无人机飞行高度的提升，“可见”范围内的干扰源增多，当无人机位于服务小区边缘时，干扰信号与服务信号相似，会导致频繁切换或中断。为保证低空覆盖下的传输性能，可通过分布式超大规模 MIMO 化干扰为有用信号，提升低空覆盖性能。

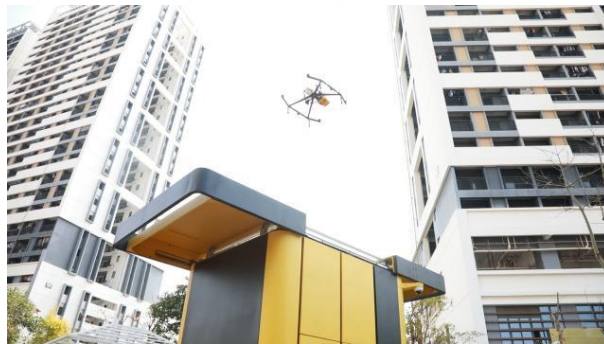


图 2.4 低空覆盖应用场景示图

为支持上述应用场景，6G 时代的分布式超大规模 MIMO 将融入多频段特性，即 6G 将是一个低中高多频段协同的全频谱通信系统，中低频将继续增强连接能力，毫米波、可见光和太赫兹等新频段可以利用其大带宽的优势提供极致容量，多频段协同为终端的快速接入与“零中断”传输提供有力保障。但分布式超大规模 MIMO 技术性能的发挥依赖于空口校准、调度方案、组网及协作簇等方案的实现能力。对于低频段而言，分布式超大规模 MIMO 相干传输可有效提升系统性能，其关键挑战包括动态协作、空口校准等。但对于高频段，由于器件工艺等问题引入相噪等非理想因素，使得空口校准变得极具挑战，因此高频段下的分布式超大规模 MIMO 可优先考虑非相干传输模式，重点解决动态协作、波束管理等问题。

2.2 部署方式

分布式超大规模 MIMO 的性能增益源于大规模天线的协作传输。应用分布式超大规模 MIMO 技术，可以灵活、有效地根据不同环境，构建星形、树形、链形、环形等拓扑结构的网络，有效消除干扰快速提升容量。考虑到协作点分布式部署和硬件实现的局限性，网络架构和部署方式与物理层的信号处理方法相互影响。

2.2.1 网络拓扑结构

- 星形部署

现网大多数以星形方式的部署，即中央处理单元（CPU，Central Processing Unit）连接多个协作点，在 CPU 实现集中式的联合处理。这种方式对 CPU 基带池的处理能力有较高的要求。如果协作点具有物理层信号处理能力，例如信道估计、检测、预编码等，结合动态分簇技术，CPU 的处理能力具有较好的扩展性。

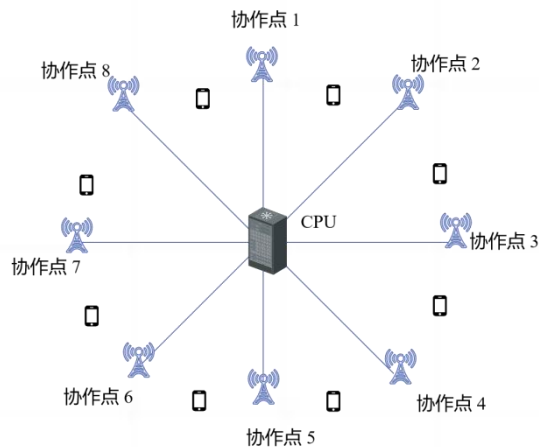


图 2.5 分布式超大规模 MIMO 星形部署方式示意图

- 环形部署

对于上行链路，当协作点具有信道估计、检测能力时，经过检测后的信号可以进行相干合并。相干合并可以采用串行实现，即一个协作点的检测输出到下一个协作点进行合并。对于下行链路，每个数据流的比特信息分发到各个协作点进行预编码。这种串行实现，可以采用文献^[2]提出了 Radio Stripes 形部署。

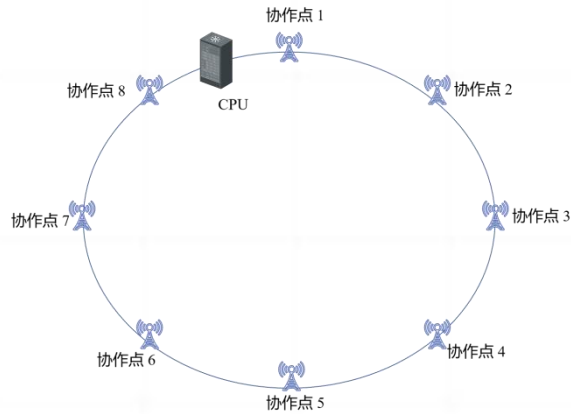


图 2.6 分布式超大规模 MIMO 环形部署方式示意图

- 星形与环形结合的部署

文献^[3]采用了星形和环形结合的方式进行部署。CPU 与协作点之间采用星形部署，CPU 之间采用环形部署。当 UE 处于两个 CPU 管理范围之间时，为了实现联合传输，需要 CPU 之间有较强的交互能力。

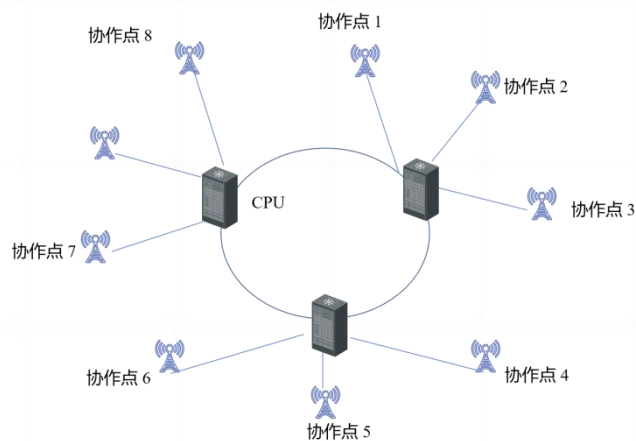


图 2.7 分布式超大规模 MIMO 星形环形结合部署方式示意图

- 树形分层部署

文献^[4]采用了树形的拓扑形式，虚拟化的中央单元（vCPU，virtual CPU）与多个边缘分布式单元（EDU，Edge Distributed Unit）连接，EDU 与多个协作点连接，vCPU 和 EDU 共同实现分布式基带信号处理。多个 vCPU 与云化的 CU 连接，在 Cloud CU 中实现用户的移动性管理。这种树形部署中，EDU 具有较强的联合处理能力，具备信道估计、检测和预编码的能力，这样 vCPU 同样具有较好的扩展性。

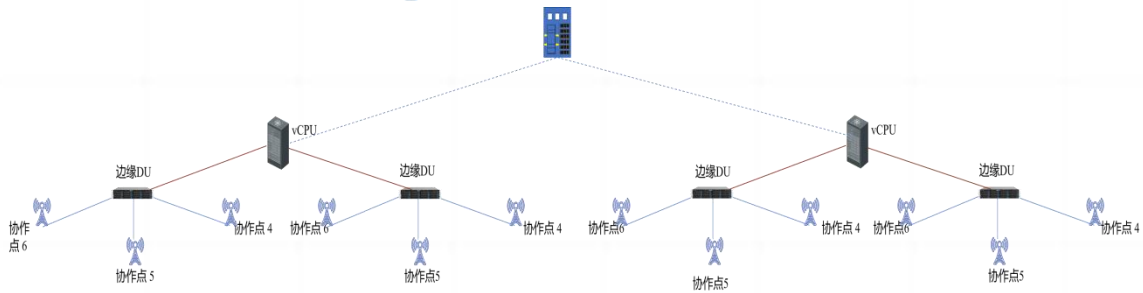


图 2.8 分布式超大规模 MIMO 树形部署方式示意图

2.2.2 网络链接技术

分布式超大规模 MIMO 的实际部署中，对协作点与基带单元之间的前传实现有较高的要求。通常基带单元和协作点间的前传（fronthaul）链路一般基于光纤连接，传输的是经过光调制的数字信号，因此可以称为 digital-radio-over-fiber（D-RoF）。这要求协作点不仅具备一定的数字处理能力以完成对应分布式单元(DU, Distributed Unit)的信号处理功能，而且包含 AD/DA、混频、功放/低噪放等完整射频链硬件组件，复杂度和功耗相对较高。对于带宽较小的低频段，其基带处理功能的协作点相对成熟，但是对于带宽较大的毫米波及以上频段，协作点的 AD/DA、混频器等器件性能限制了分布式超大规模 MIMO 系统的应用。

Analog-radio-over-fiber（A-RoF）技术具有低成本、低损耗、大带宽的特点，可以有效应对以上挑战。与 D-RoF 不同，A-RoF 中传输经过光调制的模拟信号，协作点仅需完成模拟信号的发射、接收等。因此，基于 A-RoF 实现前传链路时，协作点不再需要基带处理功能及 AD/DA 等部分射频器件，可以降低协作点的复杂度。具体的，基于 A-RoF 技术的前传链路可以传输光调制的射频（RF）或中频（IF）模拟信号。前者称为 RFoF，在协作点侧进行光电转换后无需上变频即可发射信号；后者称为 IFoF，在协作点侧上变频至射频即可发射信号^[5]。从而实现了协作点极简化。A-RoF 技术也支持构建不同拓扑结构的网络，但具体拓扑及 A-RoF 类型对协作点的要求不同^[6]。

在空口层面，由于数字处理能力集中在基带单元，有利于联合传输（JT）。当考虑基于 A-RoF 的分布式超大规模 MIMO 相干联合传输（CJT）时，多个协作点间的同步可以由基带补偿；同时，由于分布式协作点侧结构简单，有利于简化通道校准。

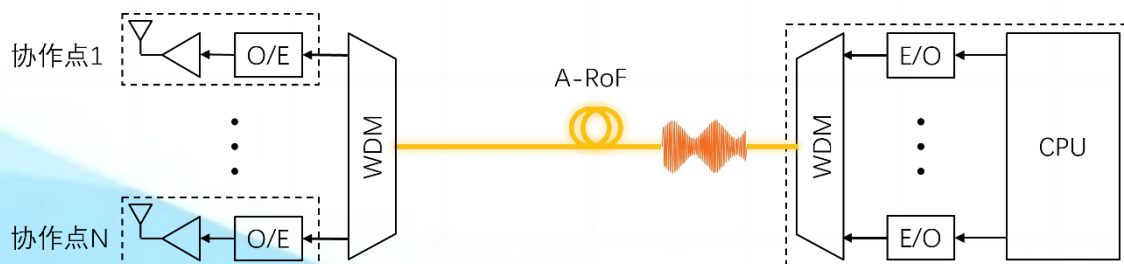


图 2.9 基于 A-RoF 实现前传链路示意图

2.3 网络架构

在分布式大规模 MIMO 网络中，网络侧以协作点（簇）的形式服务终端，在单层分布式超大规模 MIMO 网络中，由于 UE 的移动性，服务 UE 的协作点（簇）会持续更新，导致 UE 移动性管理相关的功耗较高，并可能导致服务中断问题与复杂的信令交互^[7]。此外，协作点与 UE 的功率差异引入了上下行覆盖范围不平衡的问题。

因此，面向 6G 的分布式超大规模 MIMO 架构设计需要考虑灵活的移动性和上下行覆盖均衡的需求。

2.3.1 双层分布式网络架构

为了应对移动性导致的中断与复杂信令交互的挑战，可以考虑一种双层分布式超大规模 MIMO 网络架构，如图 2.10 所示。其中，第一层网络主要实现 UE 的初始接入和移动性管理功能，完成 UE 与网络之间的低时延控制信令交换，能够提供较高的覆盖性能，例如第一层网络可以是基于单频网¹（SFN，Single Frequency Network）技术的超级小区（super cell）、或者是基于低频段通信的广覆盖小区（例如利用原有的 2G/3G/4G/5G 基础设施或频谱资源）、或者是卫星通信中的卫星/HAPS（High Altitude Platform Station）小区。第二层网络主要实现高速率的数据传输功能，通过动态地为每个终端选择一个或若干个传输节点进行集中式或者分布式的传输，能够获得更高的空间复用增益，提供更高的数据传输速率。第二层网络可以采用 non-SFN 模式的、或者采用相比第一层网络频点的更高频点、或者采用卫星通信中的低轨卫星。第一层网络节点的同步信号/参考信号可以关联同一区域内的第二层网络节点的同步信号/参考信号，例如第一层网络可以使用宽波束范围的参考信号维持 UE 的稳定连接，第二层网络可以使用与宽波束关联的若干窄波束范围的参考信号实现 UE 的高速传输。

考虑到 UE 在不同状态下差异化的通信和流量需求^[8]，UE 可以在不同状态下根据传输需求连接到不同层的网络。在空闲态或者非激活态下，UE 主要连接到第一层网络，通过测量网络同步信号/参考信号，进行寻呼监听和系统消息读取，以建立或维持网络连接关系，获得较高的覆盖性能并减少切换；在连接态时，则根据流量需求的不同，UE 可以连接到第二层网络进行高速率的数据传输。基于这种双层分布式超大规模 MIMO 网络架构，UE 可以一直测量到一个信号质量较好的第一层网络同步信号或参考信号，避免原本基于单小区模式的频繁小区重选流程，减少寻呼的丢失概率。当 UE 进入连接态时，如果其需要接收或者发送的数据量较大，UE 也能够接入到第二层网络，以提升传输效率。

¹ 单频网模式下，信号从多个网络侧的协作点（如小区或协作点）发送，因此可以提供更好的覆盖性能。

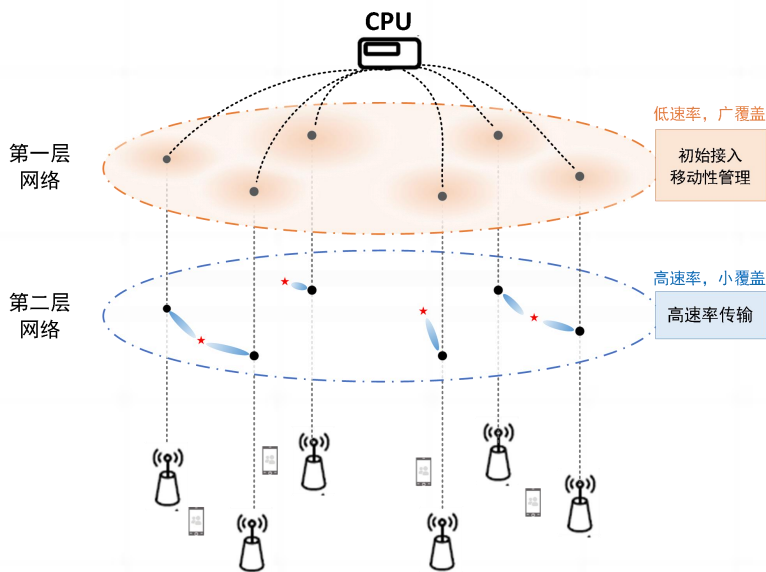


图 2.10 双层分布式超大规模 MIMO 网络架构示意图

2.3.2 上下行解耦网络架构

分布式超大规模 MIMO 系统可以通过密集节点部署来改善上行覆盖，也可以在大型节点覆盖边缘部署小型接收节点来提升上行覆盖，但由于大型节点发射功率通常明显大于小型节点，因此通过下行参考信号的 RSRP 确定的服务节点通常只能代表其为最优的下行服务节点，不一定是最优上行服务节点。上下行服务节点解耦网络架构通过允许单一用户的下行数据和上行数据可以面向不同物理节点进行传输来解决上述问题。

上下行服务节点解耦以不同的原则分别选择最优上行和下行服务节点。下行服务节点的选择可以仍然基于下行参考信号 RSRP 测量结果，而上行服务节点的选择将基于上行传输损耗。为使分布式超大规模 MIMO 部署具有更高的灵活性，动态协作簇簇间和簇内的节点间的天线阵列特性以及发射功率应当允许存在差异性，传输损耗则是综合考虑了天线面板带来的波束增益以及传播路径损失两个因素，使得在多个不同天线面板配置的节点间进行服务节点选择更加公平。

在如图 2.11 所示的宏微异构组网的分布式超大规模 MIMO 系统中，部分 UE（如图中 UE-1）会同时处于宏节点和微节点的下行覆盖范围内，但其上行覆盖范围仅能包含微节点，因此其下行传输可以来自宏节点或微节点，但上行传输只能面向微节点；还有部分 UE（如图中 UE-2）上行覆盖范围会同时包含宏微节点，因此宏节点与微节点都能提供上下行服务，从而在非联合传输场景下需要进行动态服务节点选择。

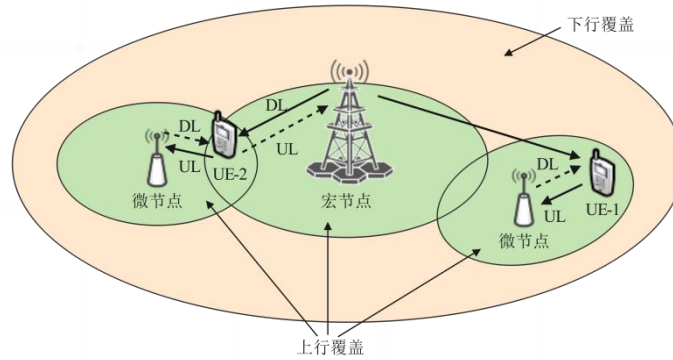


图 2.11 宏微组网分布式超大规模 MIMO 上下行服务节点解耦

对于一般上下行解耦网络架构，每个节点都可以进行上下行传输，可以根据 RSRP 测量、传输损耗和可分配资源等分别动态选择上行服务节点和下行服务节点。对于相干传输场景，由于要选择多于一个节点或协作点进行上下行传输，因此还需要考虑基于多节点整体吞吐量最大原则或者多节点整体接收功率最大原则进行服务节点选择。上下行解耦网络架构的需求还体现在一些特殊场景中，（1）在分布式超大规模 MIMO 系统中，密集的节点部署会导致多个节点的下行覆盖范围严重重叠，为了降低节点间下行干扰，部分节点的下行传输会被关闭，从而仅接收上行传输；（2）低负载场景下，由于节点能耗主要由下行发送模块贡献，出于网络节能的考虑，部分节点的下行传输单元可以被关闭；（3）对于仅存在上行容量覆盖受限的场景，只需要部署仅支持上行接收的节点，在这些场景中，用户上行服务节点和下行服务节点必须进行解耦。

上下行解耦网络架构在 5G 频段移动通信场景下的仿真结果如图 2.12 所示，在动态上行传输节点选择场景中，其可以有效改善边缘用户和系统平均吞吐量，对边缘用户吞吐量的提升相比上下行节点绑定的网络架构可以达到约 30%，平均吞吐量的提升可以达到约 20%。其中，传输损耗除了传输损耗外还包含了节点接收面板的接收增益差异。

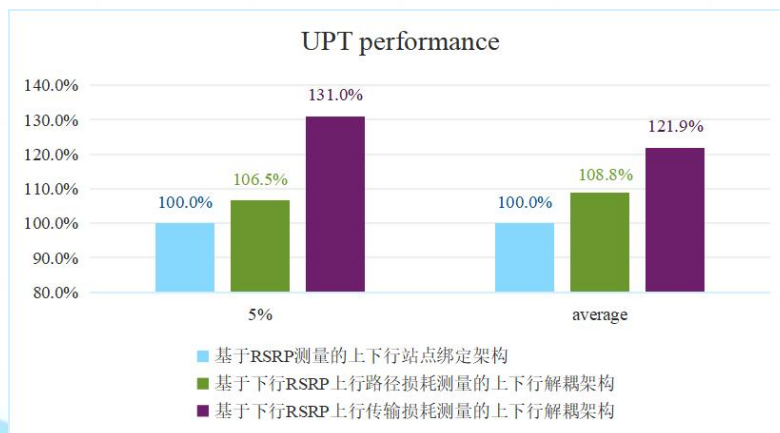


图 2.12 上下行解耦网络架构的吞吐量性能增益

上下行解耦网络架构在分布式超大规模 MIMO 系统中提供了更灵活的网络部署方

式，一方面，其通过打破上下行节点物理位置统一的传统网络部署限制，实现了分别根据上行和下行链路最优原则选择上下行服务节点，大幅度提升用户上下行业务体验；另一方面，其允许节点只支持上行、只支持下行或者上下行都支持，能够灵活应对不同的应用场景、网络需求、业务负载。

3. 协同传输方案

分布式超大规模 MIMO 网络中的协作簇包括静态协作簇与动态协作簇，其中动态协作簇主要用于连接态的数据传输，静态协作簇主要用于系统消息广播和终端的初始接入。实际系统中为简化随机接入的时延和公共信令开销，可以以静态协作簇或者静态协作簇的一部分协作点子集为单位配置公共的同步信号并进行测量，方便终端快速接入多协作点组成的协作小区。本章节从初始静态协作簇接入，动态协作簇构建、动态协作预编码和协作接收的角度进行具体阐述。

3.1 初始静态协作簇接入

在分布式超大规模 MIMO 网络中，一个协作簇一般由地理位置上相邻的几个协作点组成。对于每个 UE 而言，为其服务的协作点簇是 UE 专属的。如下图 3.1 所示，其中一个中心单元（CU，Centralized Unit）可调度的协作点数量是可以动态变化的，并且一个协作点可以同时由两个或以上的 CU 来调度其通信资源为不同的 UE 服务。基于密集的协作点部署，多个协作点联合服务同一 UE 的特点会对 UE 的初始接入过程带来诸多新的挑战^{[9][10]}，在多协作点联合服务的场景下，UE 的初始接入存在以下几个特点：

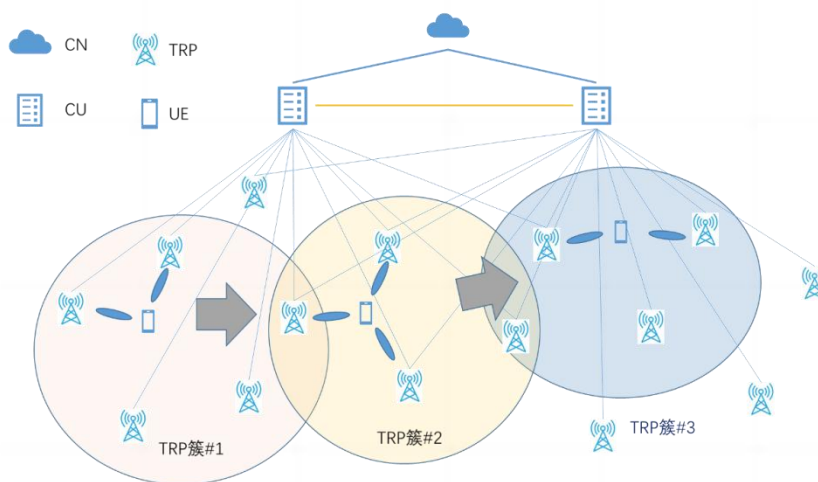


图 3.1 动态协作协作点簇架构

- 大量分布式部署的协作点与 UE 的距离远近分布并不均匀，发射功率也可能不同，仅依据接收功率选择协作点可能会导致路径损耗较大，从而导致终端上行功耗较大。因此，除了接收功率 RSRP 外，还可以联合参考路径损耗选择同步信号进行接入；



- 基于大量分布式部署的协作点，UE 可能同时检测到多个符合接入条件的同步信号。为了提高初始接入的可靠性与成功率，可以利用多个同步信号进行初始接入，并确定 UE 随机接入的 PRACH 资源和 MSG 1/MSG A 的发射功率；
- 不同协作点之间的同步精度和物理连接关系可能有所差异，各个协作点（簇）的波束发射能力也有所不同。UE 可以根据 UE 接收能力和协作点（簇）的波束发射能力，选择合适的同步信号进行初始接入。

3.1.1 基于双层网络的初始接入

初始接入阶段，UE 没有分布式协作点的先验信息，如果对周围所有协作点的参考信号进行逐个测量，则扫描时间较长，这增加了基于动态协作点簇的初始接入的设计难度。

基于双层网络的分布式超大规模 MIMO 架构，UE 的初始接入和网络连接流程可进一步设计与完善。其中，双层网络中的第一层网络主要实现 UE 的初始接入和移动性管理，提供较高的覆盖性能，第二层网络主要通过动态地为每个终端选择一个或若干个传输协作点来提升空间复用增益，提供高速率的数据传输。为避免 UE 在初始接入过程中由于前导参考信号盲检导致接入时延与资源开销变大，可以利用第一层与第二层网络参考信号之间的关联关系，设计更加灵活的广播信道和更加高效的初始接入方式。例如，当空闲态或者非激活态下的 UE 在第一层网络中接收到属于自己的下行寻呼消息时，UE 可以基于对第一层网络参考信号与波束的测量结果，利用第一层和第二层网络参考信号与波束方向的关联关系，缩短第二层网络参考信号的测量时间，更快地接入第二层网络。

为此，在基于协作点簇的组网架构中可以考虑设计两种类型的协作点簇：静态协作簇和动态协作簇。其中静态协作簇主要用于空闲态、非激活态 UE 的初始接入，而动态协作主要服务于连接态 UE，为其提供数据传输服务。

静态协作簇服务于所有的 UE，主要用于 UE 的快速初始接入，因此该类簇需要保证广域的覆盖，但对系统容量要求不高，可以采用低频段作为初始接入时协作点的工作频段。动态协作簇是 UE 专属的，主要为 UE 提供高速数据传输的服务，可以采用高频段作为工作频段。其中，基于双层网络的初始接入流程如下图 3.2 所示。

由于两种协作点簇功能不同，在参数配置上也要有所区别。对于静态协作簇，UE 只能通过扫频、搜索的方式接入网络，因此静态协作簇需要配置 SSB/SIB/PRACH 等公共资源参数，以方便 UE 能快速完成接入。而动态协作簇是 UE 专属的，对于每个 UE，一个动态协作簇可以有一个特定的标识来表征其唯一性，例如动态协作点簇 ID。动态协作簇所对应的系统消息和参考信号需要通过 UE 专用信令下发。为了减少系统消息和参考信号的资源开销，网络侧可以将动态协作簇的系统消息和参考信号进行复用，即处于同一位置的不同 UE 可以使用相同的系统消息和参考信号。基于 UE 的测量上报，网络

侧确定为 UE 服务的动态协作簇，并且维护一个测量协作簇，测量协作簇中的协作点为动态协作簇周围的部分协作点。当 UE 处于移动状态时，通过对测量协作簇中的协作点进行周期性测量，UE 可完成动态协作簇的更新和切换。

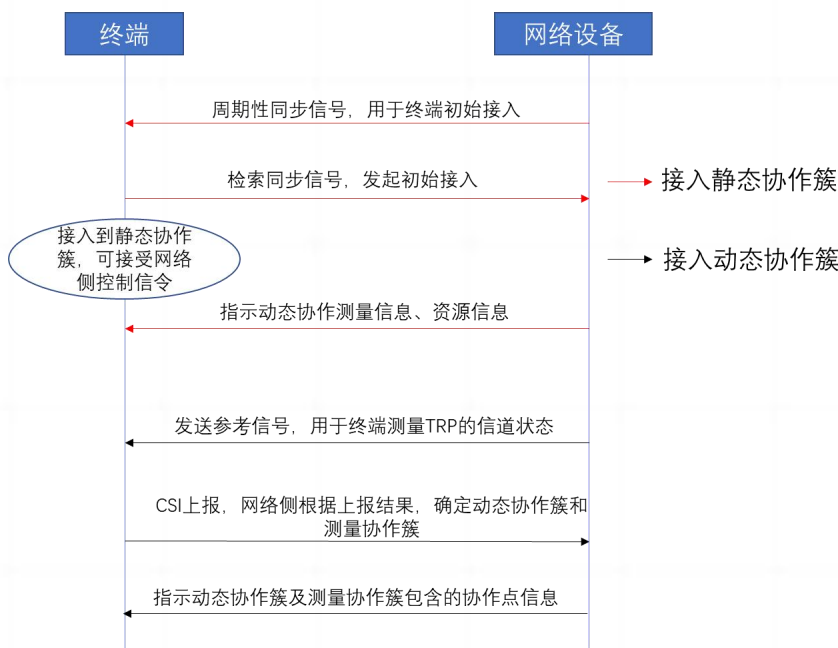


图 3.2 初始接入流程

3.1.2 静态协作簇初始接入增强

现有的技术中，终端要想获得分布式协作传输，需要先接入网络，然后才能在业务信道上进行协作传输。如果是在多点协作网络中，这一过程更加冗长，要在服务小区接入一次，还要在其他相邻小区进行同步信号测量以选择合适的协作小区，最后才能开始协作传输。所以，对于静态簇协作簇的构建，若沿用现有方式时延和开销较大。为降低接入时延，可以考虑接入协作的增强。

在接入阶段将系统中的同步信号划分为两类：一类是普通的非协作同步信号，每个协作点在这类同步信号的位置上独立发送同步信号；另一类是协作同步信号，不同的协作点可以在这类同步信号的位置上协作发送同步信号，使得 UE 可以在同步阶段就测量到协作小区的信息，从而在接入阶段就开始进行协作传输，实现时延降低以及接入流程的速率提升或可靠性增强。

如图 3.3 所示，在非协作 SSB 的传输位置上，每个协作点发送的 SSB 对应于小区 ID；可以有多个协作点在这个位置上发送 SSB，那么由于小区 ID 不同，这些 SSB 互为干扰信号。而在协作 SSB 的传输位置上，协作点按照协作 ID 发送同步信号，对于使用相同协作 ID 发送 SSB 的协作点，可以看作是以 SFN 方式发送的 SSB，信号得到增强；也可以有多个不同的协作 ID 在相同的位置上发送 SSB，那么他们之间还是一种干扰关系。

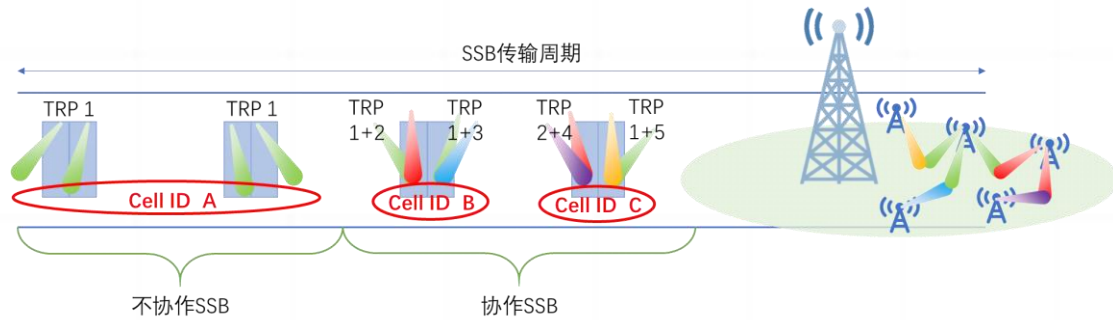


图 3.3 协作 SSB 示意图

UE 在进行小区搜索时，使用小区 ID 和协作 ID 分别在非协作 SSB 位置和协作 SSB 位置上进行检测，考虑到协作 SSB 会提高接收能量，在 UE 进行接入准则判定时，可以考虑如果协作 SSB 的接收 RSRP 高于非协作 SSB 一定范围时，才会选择协作 SSB 进行接入。通过约束不同 SSB 上的终端接入准则，实现 UE 接入协作 SSB，从而实现在接入阶段的协作传输。这样，UE 可以在同步阶段就测量到协作小区的信息，从而在接入阶段就开始进行协作传输，实现时延降低以及接入流程的速率提升或可靠性增强。

3.2 动态协作簇构建

分布式超大规模 MIMO 网络中的协作簇的构建主要包括新的协作簇架构、基于下行参考信号的动态协作簇选择和切换和基于上行参考信号的动态协作簇选择和切换三部分。

3.2.1 多层级动态协作簇

在分布式超大规模 MIMO 系统中，大量的协作点广泛灵活地部署在服务区域，并通过回程或前传链路相互协作，为 UE 提供统一的高质量的数据传输服务。由于协作点分布在不同的地理位置，与每个 UE 的距离有远有近，服务 UE 的信号强度有大有小，如果所有协作点同时服务 UE，一方面会引起回程或前传链路中出现大量的信道和数据信息的传输，另一方面远离 UE 的协作点带来的协作增益非常有限，因此通常在系统中构建以 UE 为中心的协作簇。每个 UE 的协作簇中可能包含相同或不同的协作点，如果需要在相同的时频资源上同时服务多个 UE，例如相干联合传输（CJT）的方式，多个协作簇中的大部分协作点之间需要有效地协调资源、联合调度、消除 UE 间干扰或联合传输，导致协作规模随 UE 数增加而成倍增加，回程或前传链路资源被大量占用，实现复杂度大规模增加，极大地影响了分布式超大规模 MIMO 系统的有效实施。

为此，实际系统中可以考虑多层级的协作簇架构，如图 3.4 所示。第一个层级是资源调度簇，可以根据地理位置的关系，将一组协作点划分成一个相对固定的簇，并通过回程或前传链路连接到同一个 CU，进行统一地 UE 调度、资源分配、发送预编码或接收合并器设计，以及功率分配等等，这样可以有效地控制协作处理的规模和实施效果。第二个层级是信道测量簇，它是以 UE 为中心划分的簇，根据在第一层资源调度簇中的协

作点到达 UE 的距离或信号强度大小，将一组邻近的协作点分配给一个 UE，并且配置相应的信道测量资源来估计多个协作点的信道，故称为信道测量簇。资源调度簇可能包含多个 UE 相关的信道测量簇，不同的信道测量簇可能包含相同或不同的协作点。针对下行链路，可以为该 UE 分配一组下行导频，分别接收测量每个协作点的信道状况；针对上行链路，UE 发送的上行导频，只有该簇内的每个协作点能够接收，测量该 UE 的上行信道状况。信道测量簇中的协作点收集信道信息后，可以通过回程或前传链路发送到与资源调度簇相连的 CU 中集中处理，也可以留在每个协作点单独处理。第三个层级是数据传输簇，UE 或 CU 根据实时测量的下行或上行信道信息，进一步从信道测量簇中选取合适的协作点，为 UE 提供下行数据的联合发送或上行数据的联合接收，故称之为数据传输簇。每个 UE 的数据传输簇可以等同于信道测量簇，也可以从信道测量簇中进一步筛选得来。如图 3.5 所示，不同 UE 的数据传输簇可能存在交叠，即同一个协作点可能出现在两个 UE 的数据传输簇，当这两个 UE 同时被调度和服务时，如何有效地抑制簇之间的干扰，3.3.3 节给出了一种联合预编码设计的方法。当然，三层协作簇的划分并不是一成不变的，它可以根据协作点的负荷、能耗要求，以及 UE 的位置变化等相应地调整。不同的资源调度簇，可以独立地服务各自簇内的 UE，也可以通过交换部分信道信息，为处在资源调度簇边缘的 UE 提供一定程度的干扰消除或信号增强的效果，以进一步提升 UE 的服务质量和用户体验。

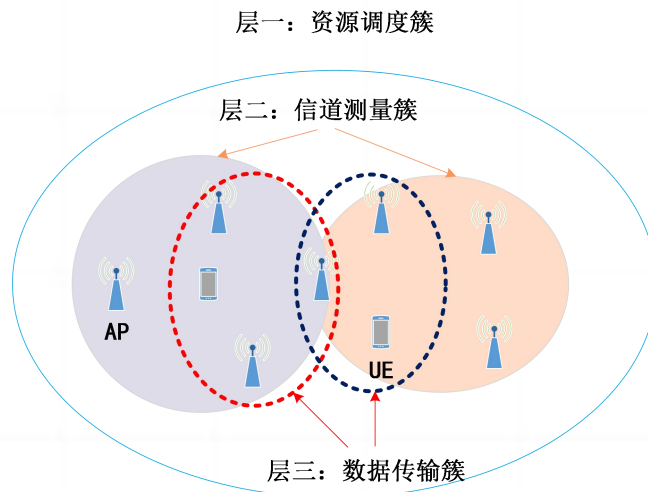


图 3.4 三层协作簇结构

3.2.2 基于下行参考信号的动态协作簇选择和切换

在 5G NR 系统中，网络侧通过波束测量上报和 CSI 测量上报来获得各个协作点与 UE 之间的信道信息，进而确定由哪几个协作点为 UE 服务。例如，在基于多个协作点的波束测量上报中，UE 可以上报适合 2 个协作点联合传输的波束组合；在基于多个协作点的 CSI 上报中，UE 可以分别上报 2 个协作点进行 NCJT 传输和进行单点传输的 CQI，

或者从 4 个协作点对应资源中上报适合进行 CJT 传输的资源（协作点）。

在分布式超大规模 MIMO 系统中，网络部署会更加密集，如果仍然按照 5G 的方法对每 2 个协作点或每 4 个协作点进行联合测量将增加测量上报的延时，进而影响分布式超大规模 MIMO 系统的传输效率。因此，有必要对测量上报进行增强以快速构建动态协作簇。一种方法是沿用 5G 的设计思路，由网络侧确定动态协作簇并通知给 UE。另一种方法是由 UE 确定动态协作簇，或者至少 UE 可以发起对协作簇的动态变更请求。

与 5G 类似，UE 通过测量上报来辅助网络侧确定动态协作簇，但测量上报方法相比 5G 系统更加灵活。例如，在每次测量上报中，UE 对大于 4 个协作点对应的测量资源进行测量上报，选择部分协作点对应的资源和测量值上报给网络侧；又例如，在进行测量上报时，UE 还可以上报选中的协作点适合进行 NCJT、CJT 或 DPS/DPB 中的哪一种或哪几种传输方式；此外，UE 还可以上报哪些协作点适合进行联合传输，并且当这些协作点进行联合传输时，测量的其它协作点是否适合进行同时传输（如其它协作点对联合传输的协作点干扰过大，则不适合进行同时传输，其它协作点需要静默）。

传统多点协作传输网络仅应用于业务数据传输阶段，并未对切换过程的上行速率和鲁棒性进行优化设计。UE 要想获得分布式协作传输，需要先切换至新的网络，而后才能在业务信道上进行协作传输，这对位于小区边缘的 UE 而言，难以保证一致性体验。为此，可以考虑在测量环节即引入协作协作点簇测量的机制，并在切换判决环节生成非协作点、协作点簇两类候选切换目标列表，使得切换过程可按实际网络需求完成多个目标协作的接纳控制，从而在切换后即可实行多协作点的联合传输，实现速率提升或可靠性增强，保证用户一致性体验。

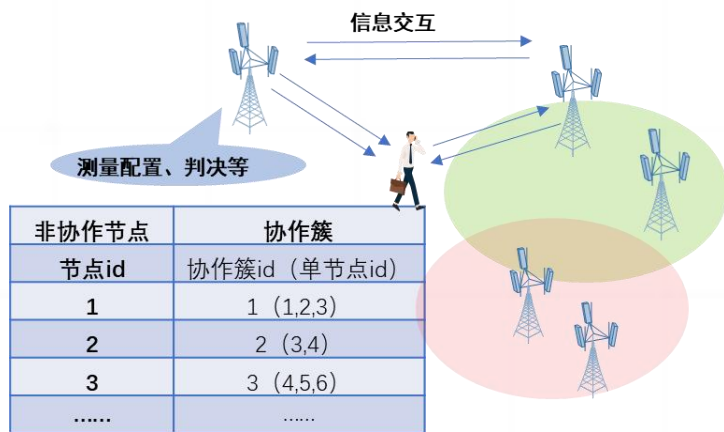


图 3.5 协作簇测量

在触发协作切换时，考虑协作切换簇列表和非协作点切换列表。两类列表均进行目标协作簇/非协作点综合排序。当判决结果是非协作点切换，源节点/源协作簇只需向单个目标节点发起切换请求和执行切换。当判决结果是协作簇切换，源节点/源协作簇需向目标协作簇内的协作点（协作簇内可预先指定接收和响应切换请求的协作点）或协作簇

内切换控制单元（独立于协作点的实体，用于接收和响应切换请求）发起切换请求，协作簇内各协作点完成协作信息发送和确认并完成接纳控制后，执行切换并最终实现成功切换。

在以用户为中心的系统中，可以由 UE 发起或决定协作簇的构建和变更。在 UE 发起的协作簇构建/变更方法中，UE 通过网络侧的配置确定测量资源与协作点的关联关系，在 UE 进行协作传输的同时，对部分测量资源进行测量（可以是进行协作传输的协作点对应的测量资源，也可以是协作簇以外协作点，即非协作点对应的资源），根据测量资源与协作点的关联关系，UE 可以确定当前协作簇是否最优，是否需要变更协作簇等。如果有协作点与 UE 间链路质量变差，或其他非协作点有更好的链路质量，则 UE 可以发起协作簇变更上报，如建议网络侧将测量资源 A 对应的协作点在协作簇中删除，或将测量资源 B 对应协作点增加到协作簇中。待网络侧对 UE 发起的协作簇变更上报进行确认后，则 UE 上报的协作簇生效，即网络侧为 UE 动态地更换了协作簇。这样，将会大大缩短协作簇变更时延。

在 UE 决定的协作簇构建/变更方法中，UE 同样可以根据测量资源确定出当前最优的协作簇，并将最优协作簇（或对应的测量资源索引）通知给网络侧，网络侧在收到 UE 的指示后，按照 UE 的决策，使用协作簇中的协作点为 UE 服务。

3.2.3 基于上行参考信号的动态协作簇选择和切换

在分布式超大规模 MIMO 系统下，每个协作点覆盖范围缩小，且协作点密度相较于以往相对较高。UE 必须要能够更快的测量出协作点信号强度并且完成上报，否则网络将无法及时为 UE 选择最佳的服务协作点簇。这样密集部署的环境中，传统单靠 UE 进行 RRC 触发的层 3 测量、上报测量结果、网络再根据 UE 上报结果选择协作点的方式将会对测量效能以及下行频谱使用效率上造成极大的挑战，并且也会造成切换过程中有过多的传输中断。当前 3GPP 在 Rel-18 对传统的移动性管理提出改进，想从传统的以 RRC 触发的层 3 测量上报结果来决定切换对象、推进到以 L1/L2 触发的层 1 测量 (L1/L2-triggered mobility, LTM^[11]) 上报结果来决定切换对象。LTM 主要是针对在层 3 测量上报 (layer-3 measurement report) 后之行为的优化，也就是通过过对层 1 测量流程的调整来降低切换过程中对服务小区或协作点造成的传输中断。虽改进了传输中断但仍旧存在层 3 测量结果跟踪不上实际环境变化以及下行频谱使用效率不佳的问题。为此，我们考虑利用上行测量信号来取代下行测量信号。

如图 3.6 所示，当 UE 在服务小区所在的频点接收数据时，过去为了要收异频频点的下行测量信号必须中断服务小区的下行数据接收；现在改为在异频频点上传送上行测量信号，只要服务小区所在频点与异频频点符合 UE 能支持的同时接收和发送的频点组合，就能够让 UE 在维持服务小区的下行数据接收的同时传送上行测量信号、让网络来

进行测量。举例来说，FDD 频谱中的相关联的下行/上行频点即为 UE 能支持同时收发频点的组合，一般而言，只要发射和接收的频点差距大于 FDD 频中的下行/上行频点差异，UE 即可支持同时接收和发送。在 TDD 频谱中，以上述上行信号为基础的层 3 测量也适用，如图 3.7 所示，在网络与 UE 皆支持子带全双工 (sub-band full duplex) 的情况下，除了解决异频频点和服务小区的下行数据无法同时接收的问题，过往同频测量时 UE 在某些场景无法同时进行层 3 测量以及维持服务小区的下行数据接收的问题，也就是有所谓的调度限制(scheduling restriction)，也可通过 UE 在维持服务小区的下行数据接收的同时传送上行测量信号、让网络来进行测量来改善。

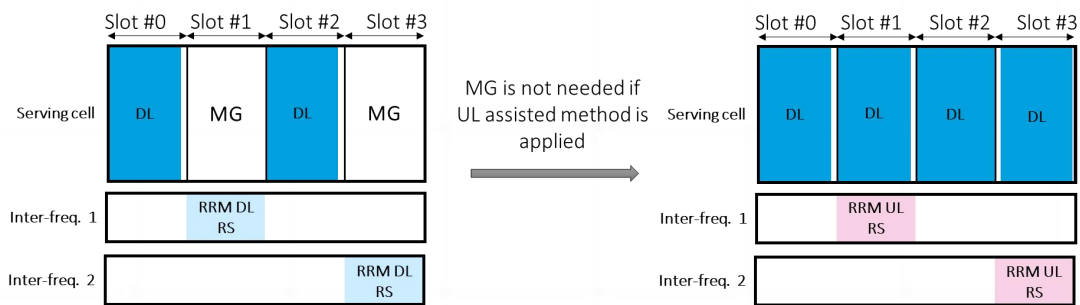


图 3.6 异频测量示意图

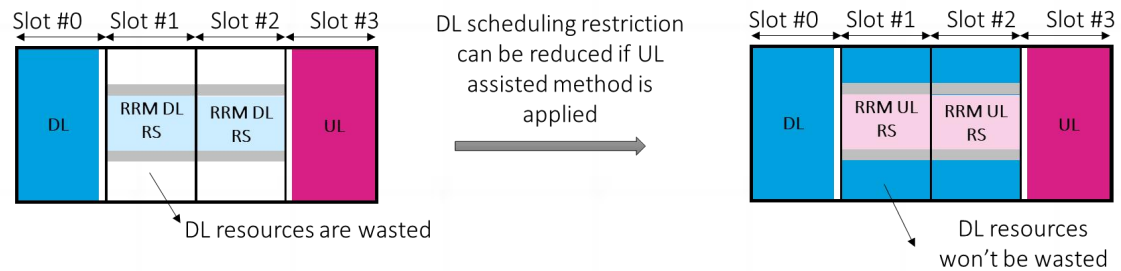


图 3.7 同频测量示意图

根据 3GPP 所制定的仿真假设^[12]，以及参考过去传统 RRC 触发切换流程、LTM 切换流程的仿真假设^[13]，我们依此进行了仿真，比较传统切换流程中常见的效能评估指标切换失败率(handover failure rate)、乒乓率 (ping-pong rate)、无线链路失效率 (RLF frequency) 以及干扰时间或者叫做传输中断(data interruption time)。表 3.1 所示中心频率 4GHz 的仿真结果，我们比较利用不同测量方式做同频测量、在没有测量间隙与有测量间隙两种情况进行效能比较。在这里我们假设网络使用了 20ms 的下行测量信号测量周期 (SMTC periodicity)，而当网络有配给 UE 测量间隙时使用的是 40ms 的测量间隙周期 (MGRP)。比较结果可以发现相较于传统 RRC 触发切换流程以及 LTM 切换流程的仿真结果，利用上行测量信号来取代下行测量信号的结果可以大幅降低无线链路失效率以及切换失败率。与传统的切换流程相比，LTM 与基于上行测量信号之切换方式其乒乓率虽有提升，但由于每次切换过程的传输中断时间比较短，所以总体而言的传输中断

比率仍有所改善。在 LTM 的仿真假设当中，我们假设使用者有能力先进行时频域的精准同步且切换过程只有约 25ms 的传输中断(大约是参考资料^[13]中 T3 时间的长度)；而在基于上行测量信号之切换方式里，上行同步已经等同于被预先进行，下行同步我们假设在网络给予切换小区指示后会顺带给与非周期性下行同步信号帮助 UE 快速完成时频域的精准同步，因此有约 45ms 的传输中断(大约是参考资料^[13]中 T1+T3 时间的长度)。就仿真结果而言，我们可以看到总体而言基于上行测量信号之切换方式的传输中断比率仍然是所有场景中最低的 2.53%。

表 3.1 中心频率 4GHz，车速 60km/h 场景下同频测量之效能比较

HO KPIs	HO schemes				
	DL RRC-triggered		DL LTM		UL based
MGRP 40ms	Without MG	With MG	Without MG	With MG	No need MG
HO failure rate	3.35%	5.43%	2.54%	4.13%	0.21%
RLF frequency (times/hr)	85.44	109.43	78.95	94.94	13.00
Ping-Pong rate	5.93%	5.28%	7.64%	6.97%	10.92%
Data interruption	3.86%	19.20%	2.79%	18.02%	2.53%

图 3.8 中我们比较不同方式所测量到的参考信号接收功率 RSRP 变化，由于 LTM 切换流程仍需基于层 3 测量上报的结果为基础，其仿真结果与传统 RRC 触发切换流程仿真结果类似，故此忽略不显示于图中。图 3.8 中，左图为所有发生 RLF 到重新与网络链接上的中断时间内，理想估测值、基于下行测量信号之估测结果、与基于上行测量信号之估测结果的 CDF 曲线的比较；右图为单一次发生 RLF 到重新与网络链接上的中断时间里，理想估测值、基于下行测量信号之估测结果、与基于上行测量信号之估测结果随着时间的变化的采样。如图所示，与固定周期传输下行测量信号的方式相比，利用短时间密集传输上行测量信号之测量结果更贴近理想估测值，更能反映环境的变化并找到信号最强的协作点；此外，由于测量结果更贴近理想估测值，有利于降低决策错误率，故也能减少 RLF 的发生。

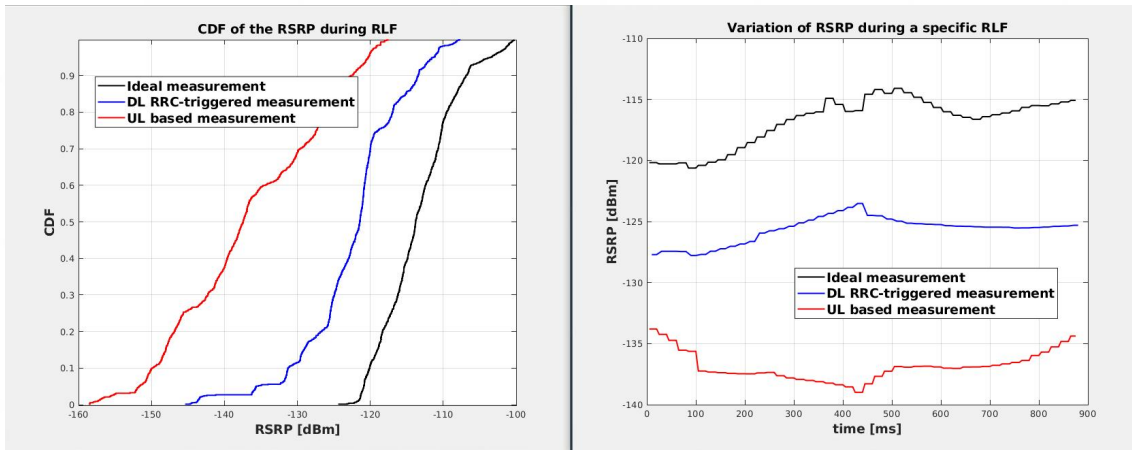


图 3.8 RSRP 测量结果比较

利用上行测量信号来帮助移动性管理以及协作点簇的选择，不但可以改善下行频谱使用效率也能减少测量所需的时间，让 UE 对环境的变化做出更精准的反应，连接上最适当的信号源。考虑到 UE 数目众多、上行测量信号的传输资源有限，以及上行传输功率可能不足的限制，实作上如何有效调配资源，仍需进一步研究。

3.3 动态协作预编码

为了实现灵活的下行相干传输，需要在协作簇基础上实现动态协作预编码。另外，下行相干联合传输性能严重依赖于上下行互易性校准和协作点间时频同步的影响。因此，设计预编码方法需要结合协作点间时频同步技术及互易性校准。

3.3.1 动态分布式联合预编码技术

当网络中协作点间做到高精度的同步时，可以采用集中式或分布式预编码，以及基于动态分簇的预编码方法。另外，下行终端的功率分配对系统性能也有较大的影响，需要考虑每协作点功率约束下的多用户功率分配技术。

为了实现超大规模 MIMO 的扩展性，将传统的基带单元分为边缘分布式单元 EDU 和以终端为中心的分布式单元 UCUD。如图 3.9 所示的可扩展分布式超大规模 MIMO，多个 RRU 连接到 EDU，在 EDU 中可以实现物理层信号处理的功能，实现空-时-频解耦，在 UCUD 实现空域数据流的分发/合并、调制/解调以及编解码。

假设系统中有多个边缘分布式单元 EDU，每个 EDU 连接固定数量的 RRU 集合，系统中有多个 UCUD。每个 UCUD 与 EDU 均存在处理能力的上限。

对于下行传输，在中央控制单元 CCU 根据终端接入、上行探测等信息，实现动态协作簇，建立终端与 RRU、EDU、UCUD 的关联。每个终端仅关联一个 UCUD。

多个 RRU 之间的空口校准可以在 CCU 实现，CCU 将其关联的 RRU 的校准系数下发到 EDU，多个 CCU 管理的 RRU 之间的校准系数，可以由 CCU 之间交互获得联合校

准。

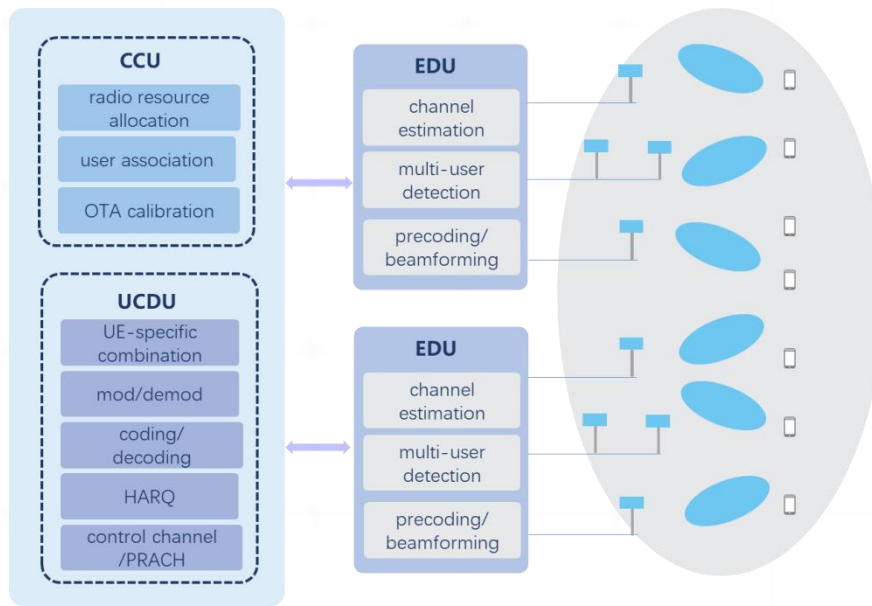


图 3.9 可扩展的分布式超大规模 MIMO 系统

下行相干协作传输的预编码在每个 EDU 本地计算，即每个 EDU 仅根据终端到该 EDU 连接的 RRU 的上行信道计算其相应的预编码矩阵。具体地，根据分簇和关联信息，EDU 获得终端上行 SRS 接收信号，进而得到多个终端的上行信道，根据调度和空分复用配置，EDU 对经过校准的上行信道计算下行预编码。

3.3.2 鲁棒预编码

采用多协作点联合预编码时，性能会受到非理想校准和相位同步的影响，尤其是当每个协作点服务的终端数据流接近协作点的天线数时，性能下降较为明显，因此需要采用鲁棒的预编码技术。

以共参考时钟不共本振的实现为例，经过校准后，如果不考虑频繁地发送校准信号跟踪本振相位漂移，相位误差或校准的相位误差可以建模为 $\pm \theta_{\max}$ 的均匀分布。为了减轻信道上乘性相位误差对系统性能的影响，需要设计合适的鲁棒预编码。

文献^[14]提出了采用加权和速率作为鲁棒预编码设计的目标函数，并且考虑了协作点间信息共享。根据乘性相位噪声的分布，可以计算出信道的协方差矩阵，考虑单协作点的功率约束，建立一个存在功率约束的最大化加权和速率，优化目标为预编码的优化问题。由于该问题无法直接求解，文献^[14]将加权和速率问题转化为加权和估计均方误差（MSE）问题，并证明这两个问题有着相同的全局最优解。进一步，论文给出了最优解的结构，并引入拉格朗日乘子将原问题变为无约束问题，采用迭代方法求解。为了得到闭式解，文中进一步简化为求解下面的瑞利熵最大化问题，

$$\max_{\mathbf{w}_k} \frac{\mathbf{w}_k^H \mathbf{R}_k \mathbf{w}_k}{\mathbf{w}_k^H \sum_{j \neq k} \mathbf{R}_j \mathbf{w}_k + \frac{K\sigma^2}{NP}} \quad (\text{公式 3-1})$$

其中 \mathbf{R}_k 是第 k 个终端的信道的协方差矩阵，其中包含了对乘性相位噪声求期望的处理， \mathbf{w}_k 是第 k 个终端的预编码向量， N 是 AP 个数， P 是单 AP 的最大功率， K 是终端数。其解可以表示为

$$\mathbf{w}_k = \mathbf{u}_{\max} \left\{ \left(\frac{K\sigma^2}{NP} \mathbf{I}_{NM} + \sum_{j \neq k} \mathbf{R}_j \right)^{-1} \mathbf{R}_k \right\} \quad (\text{公式 3-2})$$

其中 $\mathbf{u}_{\max} \{\mathbf{A}\}$ 表示 \mathbf{A} 矩阵的最大的特征值对应的特征向量。由于是次优的鲁棒预编码，此时还不满足协作点的功率约束，最终的预编码还需要对最大预编码功率的协作点进行归一化。

3.3.3 重叠协作簇的预编码

在分布式超大规模 MIMO 系统中，终端与协作簇之间的关联、预编码和功率控制的联合设计可以显著提高性能。当终端可以由其专属簇的协作点服务时，由于簇之间可能存在重叠，需要有效的干扰抑制算法。

如果一个终端由其覆盖区域内的所有协作点提供服务，可以使用众所周知的迫零预编码器，它通过对估计的信道矩阵求 Moore-Penrose 逆实现。然而，在分布式超大规模 MIMO 中，终端只从其簇内的协作点接收信号，无法通过来自簇外接入点的传输来抑制干扰。一些文献讨论了分布式超大规模 MIMO 中的预编码问题^{[15][16]}，通过限制簇间干扰的迭代算法实现分布式下行波束赋形，但相关算法要求协作点之间交换信道信息。在未来密集网络场景下，干扰源的数量可能非常庞大，传统方案不仅加大了网络传输负荷而且可能无法有效地减轻干扰。以下提出一种使用广义逆矩阵理论的非迭代预编码方法^[17]。它依赖于全局计算簇，以集中的方式一次性计算预编码系数和功率控制，并推送给发射机，避免了任何迭代算法，无需在接入点之间进行消息传递。在基于协作簇的分布式超大规模 MIMO 系统中，解耦簇间干扰可通过簇间链路的预编码系数设为零的方式。预编码矩阵 \mathbf{A} 的设计目标需满足以下两个条件：

$$\mathbf{G}\mathbf{A} = \mathbf{I} \quad (\text{公式 3-3})$$

$$\mathbf{A} \circ \mathbf{C}^T = \mathbf{A} \quad (\text{公式 3-4})$$

其中(3-3)是迫零条件。矩阵 \mathbf{C} 是与信道 \mathbf{G} 相同大小的二进制簇矩阵。如果协作点 j 为终端 i 提供服务，则 $C_{ij} = 1$ ；否则 $C_{ij} = 0$ 。 \mathbf{A} 可以是信道矩阵的求逆。假设协作点的数量大于终端数目，估计的信道矩阵 \mathbf{G} 是奇异的。条件(3-4)确保没有协作点向未包括在其协作点中的终端传输。所提出的预编码算法基于广义逆，即

$$A = A^+ + (I - A^+G)B \quad (\text{公式 3-5})$$

为了实现条件(3-4)，需要构造一个任意矩阵 B ，使得式(3-5)中的 A 满足(3-4)所示的簇外条目相对应元素为零的条件。广义逆和传统的 Moore-Penrose 逆都可以解决迫零问题，但广义逆的计算速度比 Moore-Penrose 逆更快，并且具备额外的自由度，即可通过适当构造中间矩阵 B 满足条件(3-4)。

功率分配在分布式大规模天线中起着重要作用。以上基于广义逆的预编码算法在服务的单元数远远超过终端数时几乎消除了干扰。因此，将最大化所有终端的最小信噪比 (SINR) 的功率优化问题可以简化为以下更简单的线性规划问题，即解决最大化给定终端的最小接收符号功率的问题，并能通过变化效用函数来构建闭合解决方案。

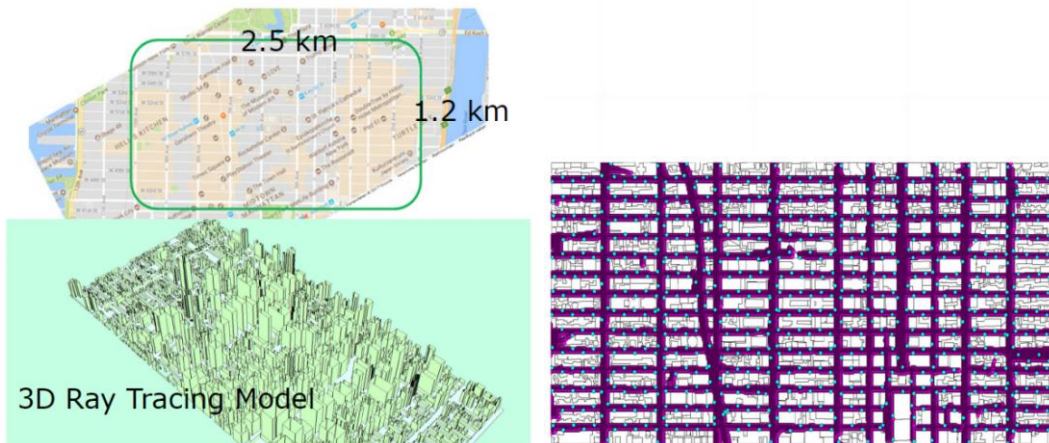


图 3.10 某城区一个面积为 3 平方公里的区域的三维射线追踪模型（左）；接收器位置在品红色阴影区域，发射器用蓝色圆圈表示（右）。

为了评估以上算法，通过 ray tracing 射线追踪在 3.5GHz 频段对某城区的一个 3 平方公里的街区进行了信道建模^[18]，如图 3.10（左）所示。我们假设终端在街道上均匀分布，彼此之间距离为 5 米。协作点放置在建筑物立面上，协作点之间的距离为 200 米，交替分布在街道的两侧。图 3.10（右）显示了紫红色阴影区域上的接收器位置和蓝色圆圈表示的发射器。在给定时间内，随机选择了 180 个活跃终端。对于 3.2.1 节中的三层协作簇方案，将资源调度计算和信道测量簇包括在所有 193 个协作点中，而每个终端的传输/接收簇根据信号强度标准确定。每个终端由最多 7 个协作点提供服务，这些协作点的信号强度与最强协作点的信号强度相差不超过 26 dB，形成其传输/接收簇。如图 3.11（左）所示，与独立运行的多用户 MIMO 小小区 (small cell) 相比，采用提出的三层协作簇的方法可以获得 2.6 倍的中位数频谱效率，而与传统的非重叠服务簇限制在相似数量的 7 个协作点的联合传输 CoMP 相比，可以获得 2 倍的中位数频谱效率。图 3.11（右）显示了在接收端采用四个接收天线时，小小区 small cell、CoMP、DmMIMO 和完全协调四个不同方案的比较。与小区相比，DmMIMO 的频谱效率增益为 2.6 倍，与单个接收天线的情况相当。然而，与单个接收天线的情况相比，几乎实现了 2 倍的频谱效率。许多终端位于其簇中的协作点的直射径 LOS 范围内，因此增加接收天线数量并未带来四倍的增益。

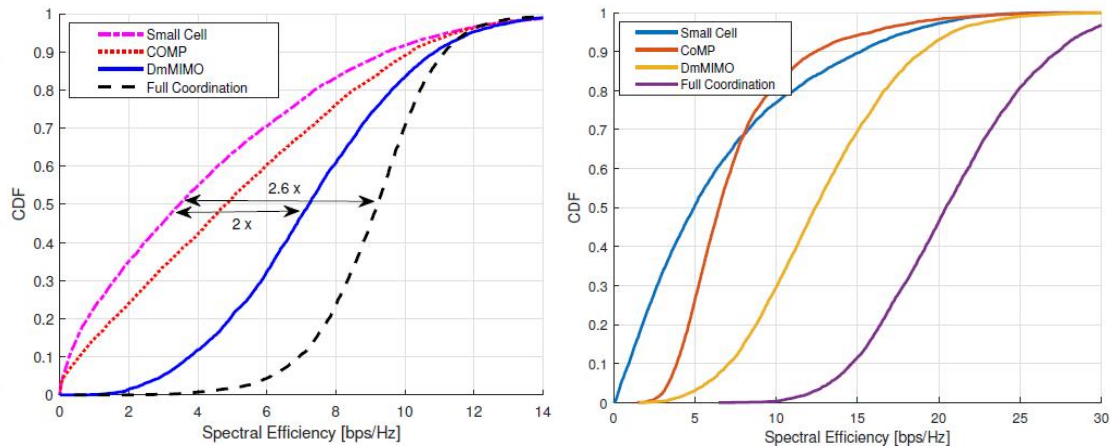


图 3.11 不同 MIMO 方案的频谱效率比较：（左）单接收天线；（右）四接收天线

3.4 协作接收算法

对于分布式超大规模 MIMO 系统，采用集中式的联合接收机可以获得最优的性能。例如，采用联合最大似然检测可获得最优的性能。但是，集中式的联合接收机一方面对前传要求很高，另外对基带信号处理的算力要求也很高。采用干扰抵消类接收机可以获得较好的性能，但是实现的复杂性仍然较高。当协作的天线数远大于数据流个数时，线性接收机可以获得较好的复杂度和性能的折中。

由于多 UE 与多点的时延差和多普勒频偏各不相同，从频域和时域看，分布式超大规模 MIMO 信道矩阵整体上在频域和时域变化较大。算力允许的情况下，逐子载波均衡可以获得较好的性能。

采用分布式接收机可以降低协作接收机的复杂性。例如分布式超大规模 MIMO 技术可以采用在每个协作点/RRU 本地做分布式检测，然后再进行集中式合并。这种分布式检测/均衡算法只有在协作点个数远大于服务 UE 数据流个数时，可以获得逼近最优的性能。并且，协作点/RRU 检测后的结果与集中式合并基带单元之间的信息传递的前传开销也较大。

参考图 3.9 的新型架构下的分布式超大规模 MIMO 系统，以上行接收为例，检测出多个 UE 数据流后，EDU 将其发送给 UCDU。一个 UE 可以关联多个 EDU，但是只能关联一个 UCDU。在 UCDU，可以将不同 EDU 发送过来的相同 UE 的数据流进行合并。

这种新型架构下，每个 EDU 服务的 UE 是动态的。例如，当 UE 被多个 EDU 管理的 AP 服务时，P-MMSE 在每个 EDU 中实现，而该 UE 的检测结果在其对应的 UCDU 中进行合并。

4. 通道校准

在物理实现上，每根天线的射频端需要两套电路来分别完成信号的发送和接收，如图 4.1 所示。由于硬件方面的工艺误差，加上放大器的非线性失真，很难实现射频端的

两套电路具有完全一样的特性。另外，每个射频电路的特征响应也随着环境（如温度，湿度等）和时间的变化而变化。这样，从对基带信号的影响上看，发送通道和接收通道等效的对信号乘以了不同的系数，导致了信道的互易性受损。

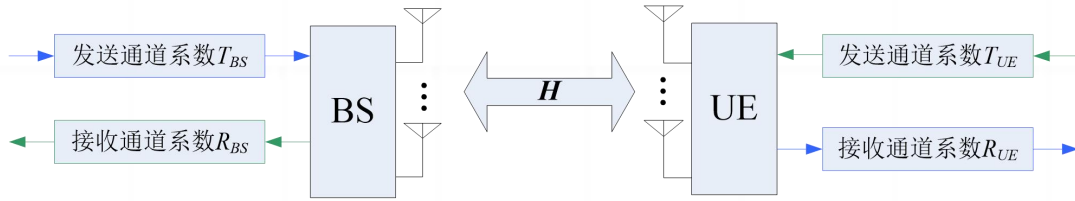


图 4.1 通道系数示意图

对于分布式超大规模 MIMO，多个协作点之间时频同步的实现方式也会对上下行整体信道的互易性产生影响。总的来说，在一定的带宽内，校准系数可以建模为^[19]，

$$c(f, t) = e^{i\varphi(t)} e^{i2\pi f\tau} \bar{c}(f) \quad (\text{公式 4-1})$$

其中， τ 表示收发通道之间固有的时间偏差， $\varphi(t)$ 表示由于每个协作点本振相位漂移引起的相位变化， $\bar{c}(f)$ 表示通道校准系数，通常不随时间变化。当多个协作点采用精确时间同步，以及公共的参考时钟时， τ 在较长时间保持不变，但是由于非理想的锁相环， $\varphi(t)$ 仍会随时间变化，其变化特征与锁相环的实现以及参考时钟的实现都有关系，它也可以理解为多个协作点之间载波频率的偏差引起的相位变化。

对于集中式大规模 MIMO，通常采用硬件耦合校准获得发送通道的校准系数和接收通道的校准系数，进而可以根据上行信道信息获得下行信道状态信息。在分布式超大规模天线系统中，对于同站 RRU，采用硬件耦合的方式可有效估计校准系数；对于分布式部署的 RRU，硬件耦合的方式部署成本较高，空口校准是低成本的可行实现方法。

最优的空口校准系数为发送通道系数与接收通道系数的比值。校准系数的估计通常采用参考天线的方法。参考天线可以是 UE，也可以是 RRU 的天线。基于此，空口校准通常分为两种方式，一种是协作点/RRU 间空口校准，另一种是 UE 辅助的校准。

4.1 协作点间空口校准

4.1.1 基于 Argos 的校准

一种简单的自校准方法是文献^[20]给出的 Argos 校准，该方法以一个天线为参考，校准系统中所有协作点/RRU。但是这种方法严重依赖于校准天线与协作点/RRU 之间的信噪比。

为提升信噪比，可考虑基于波束的协作点/RRU 间天线校准方法。首先，同站 RRU 间基于硬件耦合方式完成自校准。在此基础上，异站 RRU 通过多天线互相收发校准信号。进一步地，可基于时域进行加权，获得多组校准系数以提升校准效果。

4.1.2 基于总体最小二乘的分组校准

另一种是基于总体最小二乘的多个协作点/RRU 互相校准。总体最小二乘也可以分为两种方法。方法一是，各个协作点/RRU 轮流发送，其余协作点/RRU 接收。这种方法可以达到最优的性能，但是轮流校准的时间开销较大。方法二是，将协作点/RRU 分为两组，在两组之间互相发送校准信号。这种方法可以在较短时间内实现多个协作点/RRU 的校准。

两组协作点/RRU 之间的自校准^[21]如下：假设两组协作点/RRU 之间互相发送正交的校准信号，每个接收机先进行信道估计，得到两个协作点/RRU 组之间的频域信道矩阵。如图 4.2 所示，假设两组协作点/RRU 之间互发校准信号后，某个子载波上的信道矩阵分别为 H_1 和 H_2 。校准系数是如下总体最小二乘的最优解，

$$\arg \min_{\mathbf{c}_{\text{cal}}} \left\| \mathbf{H}_1 \mathbf{C}_{\text{cal},1} - \mathbf{C}_{\text{cal},2} \mathbf{H}_2^T \right\|^2 \quad (\text{公式 4-2})$$

$$\text{s.t. } \left| \mathbf{c}_{\text{cal}} \right|^2 = 1 \quad (\text{公式 4-3})$$

其中， $\mathbf{C}_{\text{cal},1}$ 和 $\mathbf{C}_{\text{cal},2}$ 为校准系数组成的对角阵， $\mathbf{c}_{\text{cal},1} = \text{diag}(\mathbf{C}_{\text{cal},1})$ 和 $\mathbf{c}_{\text{cal},2} = \text{diag}(\mathbf{C}_{\text{cal},2})$ 。

因此，所有协作点/RRU 的校准向量可以表示为 $\mathbf{c}_{\text{cal}} = \left[\mathbf{c}_{\text{cal},1}^T, \mathbf{c}_{\text{cal},2}^T \right]^T$ 。可以看到，当校准系数为该天线单元接收通道系数与发射通道系数的比值时，(4-2) 式的最小值为 0。文献^[21]给出了最优校准向量的求解。

上述方法同样适用于多个 UE 对多个协作点/RRU 的校准。但是，UE 辅助的校准方法需要 UE 把下行信道反馈给协作点/RRU，或者需要定制化的虚拟 UE，专门完成进行下行信道信息的反馈，实现校准。

采用协作点/RRU 之间的自校准可以避免 UE 反馈或定制化的虚拟 UE，并且可以利用 5G 的帧结构实现对射频单元以及终端均透明的校准^[21]。如图 4.2 所示，为了兼容 AP 的提前接收，校准参考信号（CARS）在特殊时隙采用两个 OFDM 符号实现。

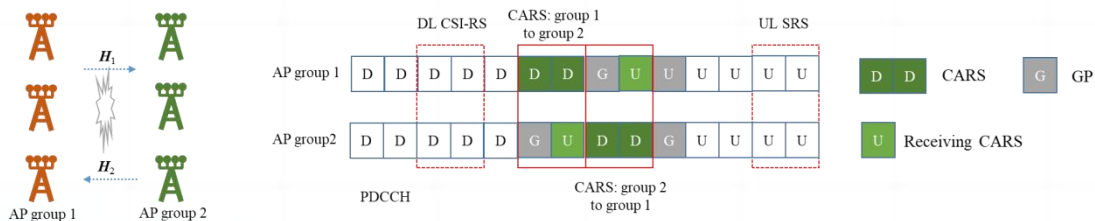


图 4.2 协作点/RRU 分组校准及校准信号

这种协作点/RRU 分组校准的方法有如下优点：不考虑通道之间的时间偏差，校准系数的相位在较大的子带带宽内变化较小，因此，利用多天线正交导频，即使利用 1 个 OFDM 符号，仍可估计出较多天线的之间的校准系数，这种并发的方式，可以实现多个

天线的空口校准，时间开销较少；采用双符号的校准信号，两个符号互为循环前缀，可以支持较大的范围的覆盖。

4.1.3 大规模协作点的空口校准

为了实现大规模协作点的相干协作传输，需要共相位参考，因此要求全网协作点的校准。当协作点规模较大时，需要研究如何以较低的实现复杂度，快速的实现全校准。为了快速校准，可以将分簇和分组校准相结合，实现快速的大规模协作点校准。

(1) 分簇

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

(2) 分组

每一个簇内的多个协作点可以再次分为两组，在两组协作点之间，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，簇内协作点的分组，需要进一步优化。直观上，两组协作点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协作点分别划分在不同的组中。文献^[21]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

每个簇进行校准时，簇间可以采用正交的校准参考信号，例如在时间上错开。为了获得全校准，我们还需要进行簇间的相对校准。簇间的相对校准可以在相邻簇内选择两个距离最近的协作点，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，还可以采用文献^[22]提出的基于生成树的方式进行校准。这种方法源自于中继校准的思路，根据协作点之间的拓扑，选择最优的校准路径，对大规模协作点完成校准。但是这种方法校准的时间开销较大。

4.2 基于 UE 辅助的校准

4.2.1 UE 辅助的校准系数获取

在 TDD 系统中，网络侧通过 UE 发送的 SRS 估计出上行信道信息，利用互易性原理确定下行信道信息，进而利用估计的下行信道信息确定下行预编码矩阵进行传输。在非理想互易性假设情况下，UE 与每个协作点之间的上下行信道不再是互为转置的关系。相应地，网络侧通过上行信道估计获得的预编码矩阵与实际的下行信道不再匹配。

假设由 4 个协作点（分别是协作点 1 到协作点 4）为 UE 服务，每个协作点已进行内部通道校准，未进行协作点间通道校准，每个协作点与 UE 之间的上下行信道分别是 $\mathbf{H}_{UL,i}$ 和 $\mathbf{H}_{DL,i}$ ，在理想互易性假设下 $\mathbf{H}_{DL,i} = \mathbf{H}_{UL,i}^T$ ，4 个协作点组成的理想的等效下行信

道（也即上行等效信道 \mathbf{H}_{UL} 的转置）可以表示为：

$$\mathbf{H}_{DL} = \mathbf{H}_{UL}^T = [\mathbf{H}_{UL,1}^T \quad \mathbf{H}_{UL,2}^T \quad \mathbf{H}_{UL,3}^T \quad \mathbf{H}_{UL,4}^T] \quad (\text{公式 4-4})$$

根据通道校准假设，每个协作点与 UE 间实际的下行信道可以建模为： $\tilde{\mathbf{H}}_{DL,i} = \mathbf{H}_{UL,i}^T \beta_i e^{j\varphi_i}$ ，其中 β_i 和 φ_i 为幅值误差和相位误差，分别服从对数正态分布和均匀分布，则 4 个协作点组成的实际的等效下行信道可以表示为：

$$\tilde{\mathbf{H}}_{DL} = [\mathbf{H}_{UL,1}^T \beta_1 e^{j\varphi_1} \quad \mathbf{H}_{UL,2}^T \beta_2 e^{j\varphi_2} \quad \mathbf{H}_{UL,3}^T \beta_3 e^{j\varphi_3} \quad \mathbf{H}_{UL,4}^T \beta_4 e^{j\varphi_4}] \quad (\text{公式 4-5})$$

显然，根据 \mathbf{H}_{DL} 计算出的预编码矩阵和 $\tilde{\mathbf{H}}_{DL}$ 并不匹配。因此，需要对各个协作点间的互易性误差进行校准，以提高相干传输的性能。例如，网络侧估计各个协作点处的幅值误差和相位误差，计算校准系数，并使用校准系数对上行等效信道 \mathbf{H}_{UL} 进行预补偿，进而确定下行预编码矩阵进行下行传输。网络侧正确估计校准系数的关键在于获得精确的上下行信道信息（各个 $\tilde{\mathbf{H}}_{DL,i}$ 和 $\mathbf{H}_{UL,i}^T$ ），可以通过 SRS 获得上行信道信息 $\mathbf{H}_{UL,i}^T$ ，通过 UE 辅助的反馈方法获得下行信道信息 $\tilde{\mathbf{H}}_{DL,i}$ 。

图 4.3 和图 4.4 对 UE 辅助校准算法的校准误差进行了初步的仿真。相位校准误差定义为 $\varphi_{\text{error}} = \text{angle}(\varphi_{\text{cal}}/\varphi)$ ，其中 φ_{cal} 为通过 UE 辅助校准算法估计到的校准系数， φ 为仿真中叠加的相位误差（服从 $[-180, 180]$ 度均匀分布）。根据图 4.3 可知，校准误差随着码本精度的增加而增加，其中 2 比特码本对应 NR 中的 2 天线码本。码本精度越高，协作点根据 UE 反馈估计的下行信道信息也更加的准确。在图 4.4 仿真中，假设校准误差在一段时间内保持不变，协作点利用多个信道实现（样点）进行校准系数计算。可以看到，当码本精度固定为 3 比特时，随着样点数的增加，校准误差也逐渐减小。当样点数为 5 时，UE 辅助校准算法可以将校准误差减小到 10 度以内。

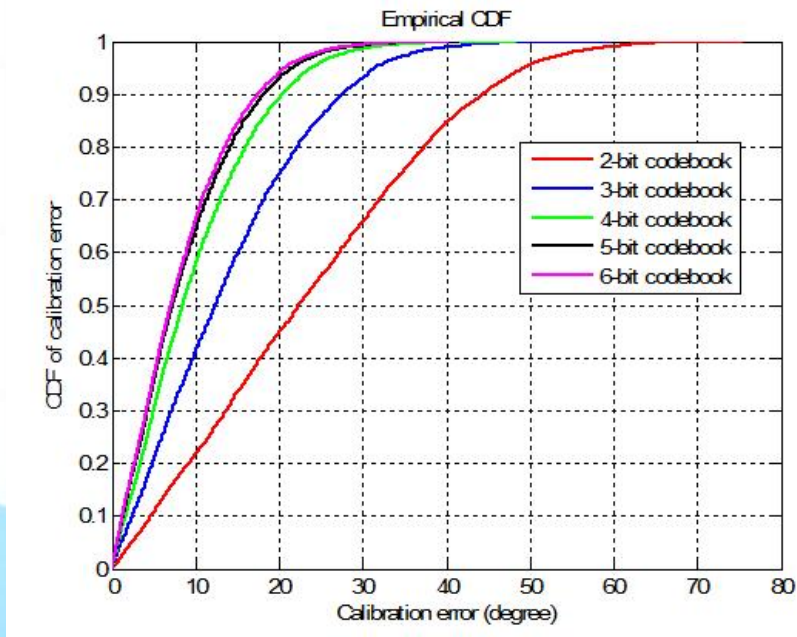


图 4.3 使用不同码书精度情况下的校准误差 CDF

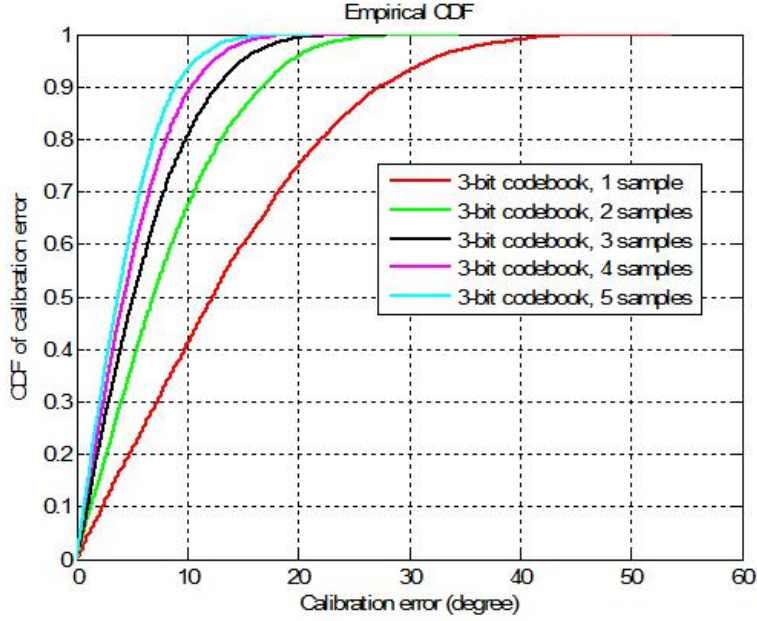


图 4.4 使用多样点联合估计情况下的校准误差 CDF

4.2.2 UE 侧天线校准误差影响

在协作点侧进行天线校准，UE 侧没有进行天线校准的情况下，多天线 UE 的天线校准误差影响系统性能。假设协作点侧经过天线校准后，上下行信道的误差因子为一个常数 α_{BS} ，UE 侧没有天线校准，但考虑单天线发送，此时天线误差因子为 e_{UE} 。经过协作点侧天线校准后，上下行信道如下所示：

$$\mathbf{H}_{DL} = \alpha_{BS} e_{UE} \mathbf{H}_{UL} = \alpha_{BS} e_{UE} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} \quad (\text{公式 4-6})$$

由此可见，UE 单天线发送时不需要天线校准。然而，UE 为多天线时，其校准误差为对角阵 \mathbf{E}_{UE} 。则经过协作点侧天线校准后，上下行信道如下所示，相当于在信道上左乘了一个误差矩阵：

$$\mathbf{H}_{DL} = \alpha_{BS} \mathbf{E}_{UE} \mathbf{H}_{UL} = \alpha_{BS} \mathbf{E}_{UE} \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \quad (\text{公式 4-7})$$

此时 UE 侧的天线校准误差对性能产生影响。面向未来的通信系统，UE 将具备更多的天线数，此时基于 UE 辅助的校准时 UE 的天线校准误差不容忽略。

4.2.3 UE 辅助的校准系数跟踪

根据校准系数的建模，由于通道系数和时延通常在较长时间内保持不变，多个协作点之间由于载频频差引入的相位漂移可以通过 UE 辅助跟踪得到。初始校准，可以采用



协作点侧的自校准，得到当前的校准系数。在跟踪阶段，可以利用 UE 的上行 DMRS 或 SRS 跟踪出协作点之间的频率差/相位差跟踪校准系数的相位漂移。

假设协作点和 UE 均采用单天线。根据 UE 到各协作点间信道，计算 UE 到协作点 p 的信道增益与它到参考天线 P 的信道增益的相位差为：

$$\theta_p(t_i) = \text{angle}[G_p(t_i)] - \text{angle}[G_P(t_i)] \quad (\text{公式 4-8})$$

其中， $\text{angle}(\cdot)$ 表示求相角。

t_i 时隙上行信道间的相位差 $\theta_p(t_i)$ 以及 t_{i-1} 时隙上行信道间的相位差 $\theta_p(t_{i-1})$ ，更新 t_i 各天线的校准系数：

$$c_p(t_i) = c_p(t_{i-1}) e^{j2[\theta_p(t_i) - \theta_p(t_{i-1})]} \quad (\text{公式 4-9})$$

这种方法的好处在于，无需协作点间继续发送校准信号，无需 UE 反馈。但需要注意的是，这种跟踪方法依赖于 UE 的状态。当 UE 处于静止状态时，可以较好地跟踪出校准系数的变化。但是如果 UE 处于移动状态下，该增量包含了 UE 与多个协作点之间的多普勒频偏。因此，需要慎重选择参与的 UE。

5. 时频同步

在分布式超大规模天线系统中，各个协作点通常处于不同的地理位置，并使用独立的晶振，这导致了系统中存在多个不同的时间偏移和载波频率偏移。这使得同步在分布式超大规模天线系统中变得更为复杂。

无线通信系统中的同步精度会直接影响系统的性能，如果各协作点之间不能实现精准的时频同步，那么系统将无法实现最佳的性能。因此，分布式超大规模天线时频同步技术对于提高系统性能和可靠性至关重要。在本章中将介绍协作点之间的同步技术方案，包括时间同步和时钟频率同步。

5.1 时间同步

5.1.1 协作点之间的定时同步

当前无线通信系统常采用加循环前缀（CP）的分块传输，如正交频分复用 OFDM。时间同步可以保证系统能较准确地恢复出符号/数据块。受到 OFDM 循环前缀的约束，各协作点/RRU 到服务 UE 的时延差不能超出 CP 的保护范围，否则将被视为异步干扰。因此，分布式超大规模 MIMO 系统中，为一个 UE 服务的协作点/RRU 数一方面受到大尺度衰落的影响，另一方面受到循环前缀长度的约束。

为了实现协作传输，高精度的时间同步是基本的要求。假设系统中存在统一的时间基准，例如采用 GPS/Beidou 获取精确的时间（TOD, Time of Day）和秒脉冲（PPS, Pulse Per Second），并通过有线的方式发送给各个协作点/RRU，则可以实现协作点/RRU 时间

的时间同步。IEEE 1588 PTPv2 是一种高精度的时间同步以太协议，精度可以达到 50ns 以内。

当各个协作点/RRU 之间没有统一的时间基准时，需要每隔一定时间进行同步。文献^[2]给出了一种分布式超大规模 MIMO 的时间同步方法。其核心思想是，通过协作点/RRU 之间互相发送参考信号，估计出协作点/RRU 之间的发送和接收之间的时间差，进而通过联立方程，求解出协作点/RRU 与其中一个参考协作点/RRU 之间的时间差。

另外，如图 4.2 所示通过互相发送分组空口校准信号，校准系数中包含了协作点/RRU 之间的时间差^[21]。通过估计校准系数中的时延，也可以得到协作点/RRU 之间的时间差。

5.1.2 基于 UE 辅助的协作点间同步

在使用单个协作点为 UE 服务时，当信号相比处理定时延后到达，将会导致 UE 与协作点之间的等效信道引入一定的相位偏移，但该相位偏移并不会导致 UE 反馈的预编码码字和信道不匹配。当多个协作点采用相干联合传输，且多个协作点发送的信号不同步，则会导致多个协作点与 UE 之间的信道均存在相位偏移。假设由 4 个协作点（分别是协作点 1 到协作点 4）为 UE 服务，每个协作点与 UE 之间的下行信道为 H_i ，假设 UE 首先接收到协作点 1 的信号，且将协作点 1 的接收时间作为接收定时，则 4 个协作点与 UE 之间的等效频域信道 H 可以表示为：

$$H = (H_1 \quad H_2 e^{-j2\pi f t_2} \quad H_3 e^{-j2\pi f t_3} \quad H_4 e^{-j2\pi f t_4}) \quad (\text{公式 5-1})$$

其中 t_i 为协作点 i 的接收时延， f 为频率值。由以上公式可知，若 UE 针对某个子带或子载波反馈了预编码矩阵，该预编码矩阵与当前子带或子载波的频域信道是匹配的。然而，由于时延导致的频率选择性，该预编码矩阵对其它子带或子载波是不适用的，因此需要一种机制以提升相干传输的性能。

与第 4 章中的通道校准类似，网络侧可以通过 UE 辅助的方式获得各个协作点之间的相位差，并对协作点发送的信号进行补偿，使得 UE 接收到多个协作点的信号是同步的。问题的关键在于 UE 如何准确的反馈各个协作点的相位信息，例如，UE 可以对各协作点之间的时延差或相位差进行上报，还可以设计更加精细的码本上报精细的时延信息，还可以上报预测的适合不同子带传输使用的预编码矩阵等。

另一种方法是由网络侧通过上行参考信号估计各协作点的时延差，并将直接将估计到的时延差补偿到信号传输中。

5.1.3 协作点与 UE 间的定时同步

5G 通信系统中，上行同步依靠随机接入过程获取初始上行定时调整量，然后通过 MAC CE 信令调整上行定时。对于 Multi-TRP 场景，上行同步过程可以通过建立定时同步组（TAG）与 TCI state 的关联关系，使得 TAG 在波束这一粒度上进行分组，有利于

多传输协作点上行传输的定时管理优化。针对层 1/层 2 触发的移动性管理（L1/L2 triggered mobility, LTM）场景，上行同步过程引入了没有 RAR 的 PRACH 传输以获取定时提前量（TA），显著降低了获取多个传输协作点的 TA 时延^[23]。

对于分布式超大规模 MIMO 系统，根据应用场景、网络架构和传输方案的差异，其上行同步过程也存在一定的差异。对于包含静态协作簇和动态协作簇的双层网络架构中，为了快速建立协作簇中的多个协作点的上行同步，低复杂度低时延的多协作点 TA 获取方式需要被使用。对于多协作点相干联合接收（CJR）场景，一次上行传输到达不同协作点的时刻很难保证都能满足落在对应帧的 CP 范围内的需求，因此上行同步需要考虑协作点的分组优化和多波束同时传输上行定时优化等方案。对于动态协作点选择（DPS）场景且部署上下行解耦的网络架构，波束级的 TA 调整更利用上行传输协作点切换后的快速上行同步。

（1）上行定时同步协作点分组

在 CJR 场景中，基于下行参考信号的测量上报或者基于上行参考信号的测量，协作点可以获得 UE 上行传输的传输时延信息，进而根据测量结果将不同协作点或者不同协作点的波束进行分组，同一组内的协作点或波束将采用相同的 TA，如图 5.1 所示。上行同步协作点分组过程可以作为协作点配置、簇划分、簇内协作点列表更新等的依据或关键步骤。

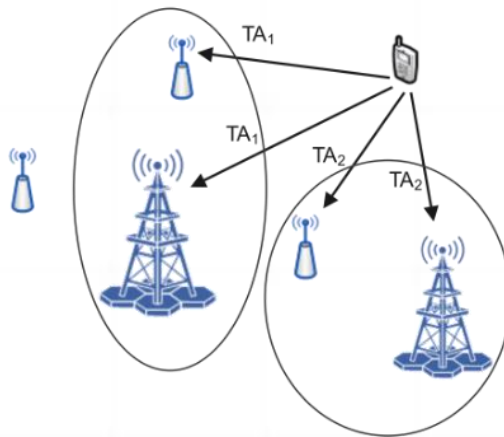


图 5.1 上行定时同步协作点分组

UE 在移动过程中到多个协作点的距离会产生变化，相应的上行定时同步分组可能需要重新配置，特别是当上行定时同步分组是以波束的级别进行，因此静态或半静态的上行定时同步协作点分组在高速移动场景中并不是最优选择。

（2）多协作点联合确定 TA

在 CJR 场景，当面向多个协作点的上行传输基于统一的下行定时参考点以及 TA 时，由于 UE 与各个协作点的地理位置、天线方向、波束方向等的差异，对应的上行传输到达不同协作点的时刻很难保证都能落在各自的 CP 范围内。

如图 5.2 所示，即使协作点间可以保证下行同步，UE 侧确定的每个协作点的下行帧起点仍会存在不对齐的情况。上行传输以其中一个协作点对应的下行帧作为下行定时参考点且应用一个统一的 TA 时，协作点决定 TA 调整量时需要联合考虑各协作点接收上行传输的时刻与下行定时的偏差。

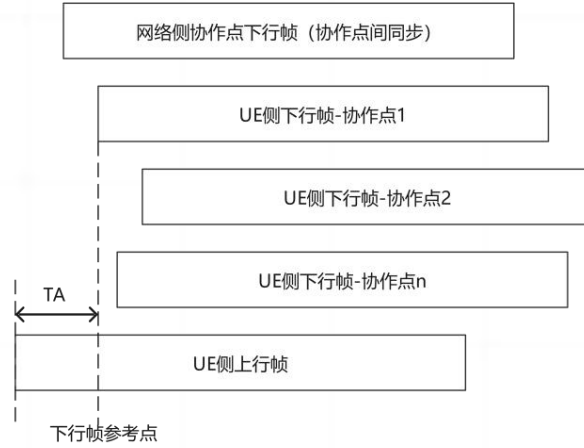


图 5.2 协作点下行定时

如式 (1) 所示，假设当前上行传输应用的定时提前量为 TA_{old} ，相应的上行传输在第 i 个协作点的时刻为 $T_{UL,i}$ ， T_{DL} 表示协作点侧的下行定时， L_{CP} 表示 CP 长度，协作点以最小化各协作点上下行定时偏差之和的原则确定上行定时调整量 ΔTA 。

$$\Delta TA = \arg \min_{\Delta ta} \sum_{i=0}^N \{|T_{UL,i} - \Delta ta - T_{DL} | - L_{CP}\} \quad (\text{公式 5-2})$$

为了保证整体上行定时调整有效性，当部分协作点的 TA 调整量需求和协作点中的多数协作点有显著差异时，仍然对所有协作点进行 TA 联合调整可能导致 TA 无法满足大多数协作点的上行定时需求，因此联合 TA 调整需要适度忽视部分协作点或者需要对每个协作点的 TA 调整需求分配一定的权重。

(3) 波束级 TA 调整

在分布式超大规模 MIMO 系统中，多协作点相干接收的上行传输可以在不同的协作点和载波上，同时面向多协作点的上行传输可以被单个 DCI 调度，波束级别的 TAG 分组可以使多协作点 TA 管理更加灵活，也为协作点的配置带来更大的灵活性。

不同于面向多个协作点的透明上行传输只能使用联合的功率控制、预编码码本和上行定时，基于上行 FDM 同发方案的上行协作传输在波束级的功率调整和预编码码本指示的基础上，可以支持频域重叠而时域不完全重叠的上行传输，因此对于分布式超大规模 MIMO 多协作点联合接收的场景来说，相同或不同的上行数据可以通过不同的波束发送到各个协作点，并通过波束级 TA 调整来对齐对应波束的上行传输定时。

波束级的 TA 调整能够支持更小粒度的 TA 组划分，可以满足不同 TA 要求的上行传输的独立调整，但由于 UE 需要长久维护每个 TA 值与其对应的定时器，波束级的 TA 调

整对 UE 所需要的维护成本具有更高要求。

(4) 更低时延的 TA 获取方法

分布式超大规模 MIMO 的部署使 UE 移动过程中的服务协作点切换更加频繁，传统基于 PRACH 获取 TA 的方式将带来明显的服务协作点切换时延。基于 PRACH 的 TA 获取方式由于需要与随机接入过程绑定而需要按照配置的 SS/PBCH block 与 RACH 发送时机 (RO) 的映射关系确定有效 RO 用于 PRACH 传输，RO 位置的局限性对这种 TA 获取方式带来较高的时延^{[24][25]}。

一方面可以通过允许用于获取 TA 的 PRACH 传输不再依靠固定的 SSB-RO 映射关系确定波束方向，而是根据网络配置或指示为 PRACH 传输引入波束信息，降低 PRACH 传输的时延。同时具备波束信息的 PRACH 可以通过同发或者时分的方式获取多个协作点的 TA，在协作点列表频繁更新的场景中可以快速建立新协作点的上行同步。但新的 PRACH 框架与初始接入的融合与碰撞会比较激烈。

另一方面可以完全由协作点测量 UE 发送的 SRS 资源集来获取初始 TA 和 TA 更新量，从灵活性的角度说，SRS 资源具备非周期、半持续、周期三种类型，用于 TA 获取时在时延表现上优于基于 PRACH 传输的方式。但由于相比于 PRACH，SRS 信号的检测复杂度要更高，在获取初始 TA 的时候，对协作点的处理要求更高。

5.2 频率同步

高精度的载波频率同步是实现下行 CJT 的另一个基本要求。在当前的协作点/RRU 实现中，基带信号通常经过数模转换之后上变频到载波频段。当各个协作点/RRU 上变频采用的本振信号由同一个时钟源生成并分发到各个协作点/RRU 时，可以实现高精度的载频同步。对于集中式的大规模 MIMO，由于各收发通道集成在一个无线单元，因此可以采用这种方法。但是对于分布式超大规模 MIMO，协作点/RRU 采用分布式部署方式，对于覆盖范围较小的专网应用场景是可行的，对于大范围覆盖，这种高频本振信号的分发意味着较高的部署成本。此外，在实际产品中，虽然每个协作点 (RRH) 都使用高精度的晶振，同时采用相应的协作点同步技术。但是由于射频链路的不一致性，每个协作点 (RRH) 的空口信号相对载频仍会存在一定的频率偏差。

目前，标准定义的全网中基站相对载频的最大频偏的指标是 $+0.05\text{ppm}$ ^[26]。频偏将导致在进行相干传输时，通过 Sounding 得到的信道与实际传输时刻的信道，不仅随着信道本身的衰落变化，同时引入了与频率偏移相关的量，使得预编码算法得到的预编码矩阵并不能有效的消除协作簇内的干扰，从而影响协作传输的性能。

在 2.6GHz 的载频上， $+0.05\text{ppm}$ 相当于 $\pm 2.6\text{GHz} * 0.05 / 1e6 = \pm 130\text{Hz}$ ，也就是说任意协作点的最大载频频偏为 $\pm 130\text{Hz}$ 。

假设两个协作点与 1 个 UE 通信，协作点 1 在载频 f_1 发送带通信号 $x_1(t)$ ，协作点 2

在载频 f_2 发送带通信号 $x_2(t)$ 。假设信道是窄带平坦的，协作点 1 与 UE 间的信道建模为 1，eNB2 与 UE 间的信道建模为复因子 a 。UE 接收协作点 2 的信号相比于协作点 1 有 τ 的延迟，假设两个协作点在时间上完全同步。

收到的带通信号可以表示为：

$$y(t) = x_1(t) + a x_2(t - \tau) \quad (\text{公式 5-3})$$

带通信号 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 表示为：

$$x_1(t) = \sqrt{2} \Re \{ x_b(t) e^{j2\pi f_1 t} \} \quad (\text{公式 5-4})$$

$$x_2(t) = \sqrt{2} \Re \{ x_b(t) e^{j2\pi f_2 t} \} = \sqrt{2} \Re \{ x_b(t) e^{j2\pi(f_1 + \Delta f)t} \} \quad (\text{公式 5-5})$$

其中 $x_b(t)$ 是协作点 1 和协作点 2 发送的带通信号， Δf 是协作点 1 和协作点 2 之间的频偏，假设我们锁定接收端载频为 f_1 ，那么

$$\begin{aligned} \Re \{ y_b(t) e^{j2\pi f_1 t} \} &= \Re \{ x_b(t) e^{j2\pi f_1 t} + a x_b(t - \tau) e^{j2\pi(f_1 + \Delta f)(t - \tau)} \} \\ &= \Re \left\{ \left[x_b(t) + a x_b(t - \tau) e^{j2\pi(-f_1 \tau + t \Delta f - \tau \Delta f)} \right] e^{j2\pi f_1 t} \right\} \end{aligned} \quad (\text{公式 5-6})$$

因此，收到的带通信号可以表示为：

$$y_b(t) = x_b(t) + a_b(t) x_b(t - \tau) \quad (\text{公式 5-7})$$

其中

$$a_b(t) = a e^{j2\pi(-f_1 \tau + t \Delta f - \tau \Delta f)} \quad (\text{公式 5-8})$$

也就是说，协作点 1 和协作点 2 之间的频偏导致了一个时变的信道。假设收端没有延迟 ($\tau=0$)，那么随着时间间隔 t 的增大，信道的相位变化线性增大。

基于上述分析可知，在分布式超大规模 MIMO 系统中，频率同步的研究可分为以下三类方向：

- 当各个协作点/RRU 配置独立锁定 Beidou/GPS 时钟时，由于上变频采用的本振信号由本地晶振生成，各个协作点/RRU 仍存在一定的频偏，并且频偏不是一个固定的值。因此，为了实现相干传输，即使各个协作点/RRU 配置 Beidou/GPS 接收机，还必须对各个协作点/RRU 之间的频偏进行补偿。
- 当各个协作点/RRU 的参考时钟由同一个时钟源提供，每个协作点/RRU 根据参考时钟生成本振信号。SyncE 协议是以太网的方式传输参考时钟的常用方法，被广泛应用于电信网络。在这种情况下，虽然协作点/RRU 之间整体上不存在频偏，但是由于各个协作点/RRU 的本振信号仍是独立通过锁相环生成，各个协作点/RRU 的相位仍不同步，即各协作点/RRU 的相位存在漂移。这种相位漂移仍会对相干传输产生较大的性能恶化。文献^[27]提出了高精度的时频同步方法，可以大幅降低相位漂移的范围。
- 当协作点/RRU 没有配置 Beidou/GPS 接收机且没有共同的参考时钟时，例如 WiFi

系统，则需要设计空口同步信号实现频率同步。

时频同步是相干传输的基本要求，通常是联合设计和实现的。表 5.1 中对比了当前采用的时频同步方法。

表 5.1 时频同步实现方法对比

方案	优点	缺点
共参考时间，共本振	相位同步精度高	部署成本高
共参考时间，共参考时钟	易于实现时频同步，不需要跟踪协作点/RRU 之间的频偏	需要跟踪相位漂移，部署成本较高
协作点/RRU 独立配置 Beidou/GPS	易于实现时频同步	需要跟踪协作点/RRU 之间的频偏或相位
协作点/RRU 间无公共参考时间和参考时钟	部署和硬件实现成本低	需要协作点/RRU 之间的空口时频同步

6. 原型验证

分布式超大规模 MIMO 试验验证平台采用如图 6.1 所示的架构。系统中的协作点的射频单元可以采用低频段的 RRU 或毫米波 AAU。RRU 主要完成上下变频、AD/DA 变换、OFDM 的 FFT/IFFT 及加 CP 和去 CP 和资源映射和解映射。对于高频段，AAU 还将实现模拟预编码。试验平台中，终端采用与 CPU 类似的硬件架构。基带处理由 X86 服务器实现，X86 服务器配置前传卡和 FEC 加速卡。前传卡上配置 GPS 功能和时钟单元，为射频前端提供精确的时间和时钟同步。前传卡与 RRU 之间采用 eCPRI 接口，包括控制面、同步面和用户面数据包。试验系统由通用服务器实现基带处理的功能，包括边缘分布式单元（EDU）和以用户为中心的分布式单元（UCDU）。

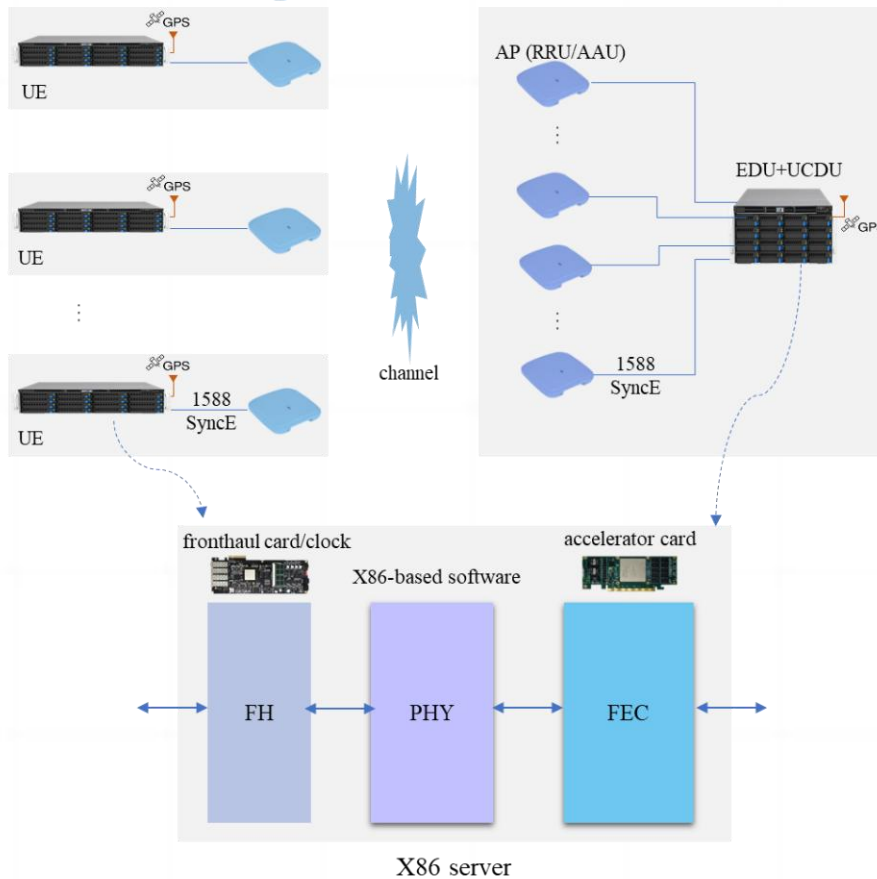


图 6.1 低频段分布式超大规模 MIMO 无线接入网试验场景

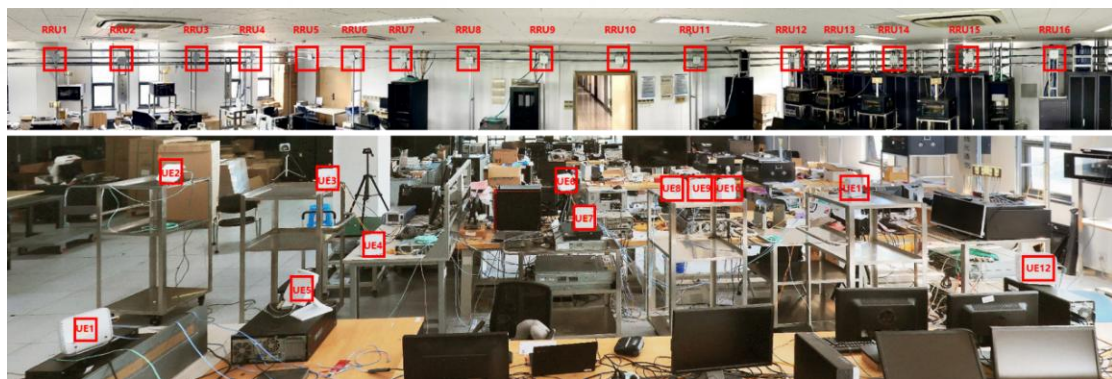


图 6.2 低频段分布式超大规模 MIMO 无线接入网试验场景

图 6.2 低频段分布式超大规模无线接入网试验场景。系统中有 16 个 4T4R 的 RRU，12 个 4T4R 的模拟终端。系统工作在 4.9GHz 频段，采用 5G NR 商用的低成本 RRU，带宽 100MHz，系统帧结构服从 5G NR 标准。系统的编码调服从 5G 标准。为降低导频污染及信道估计的复杂性，我们采用 48 端口的正交 DMRS，平均每 2 个 RB 估计出一个端口的信道增益。在频域，经过 8 个 RB 的均匀时延功率谱维纳插值，可以得到子带内所有子载波的信道增益。

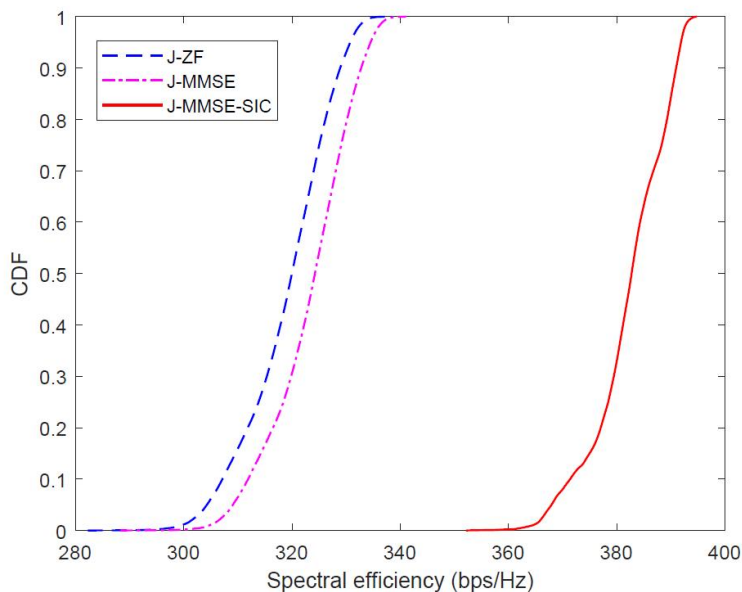


图 6.3 48 个数据流时系统总频谱效率

对于图 6.2 所示的试验场景，每个终端使用 4 个数据流，系统总共 48 个数据流。图 6.3 给出了采用三种联合接收机的系统总频谱效率的离线分析，包括联合的迫零检测（J-ZF）、联合 MMSE 检测（J-MMSE）和联合 MMSE 理想的连续干扰抵消检测（J-MMSE-SIC）。考虑信道估计误差，三种接收机的平均频谱效率分别为 319bps/Hz，323.3bps/Hz，382.2bps/Hz。在如图 6.2 所示的试验场景中，每个数据流均采用 64QAM 调制时，接收机采用逐子载波的 MMSE 均衡，每个数据流的平均信干噪比大约在 20dB~23dB 之间。试验经过第三方测试，11 个终端的每个流可以达到 MCS 28（LDPC 码率 948/1024），1 个终端每个流可以达到 MCS 27（LDPC 码率 910/1024）。不考虑导频和循环前缀开销时，总频谱效率达到 265.7bps/Hz。考虑导频开销和循环前缀开销时，系统的总频谱效率超过 200bps/Hz。

接下来，我们进一步对采用新型架构的分布式超大规模 MIMO 系统的性能进行了离线分析。考虑每个终端采用 1 根天线，系统总数据流为 12 个，接收侧总共 64 天线。我们对比了 4 种场景下的系统总频谱效率，即 AP 本地 MRC、AP 本地 MMSE 检测、EDU 采用 P-MMSE、联合 MMSE 检测。分别考虑 EDU 配置两个 AP、4 个 AP、8 个 AP，即 8 天线、16 天线和 32 天线，对应于系统中配置 8 个 EDU、4 个 EDU、2 个 EDU。图 6.4 和图 6.5 分别给出了系统频谱效率的 CDF 和平均频谱效率。从图中可以看到，由于在试验场景中，终端之间干扰较为严重，local MRC 和 local MMSE 的干扰抑制能力较差。即便如此，local MMSE 相比 local MRC 仍有 39% 的性能增益。当系统中 EDU 配置的天线每增加一倍，相比 local MRC 的性能提升分别为 82%、175%、213%。当系统采用两个 EDU，每个 32 天线时，可以达到联合 MMSE 的 95%。由于系统中支持的总数据流数为 12，当 EDU 总天线数为 16 时，相比 EDU 总天线 8，系统获得的性能改善最大。

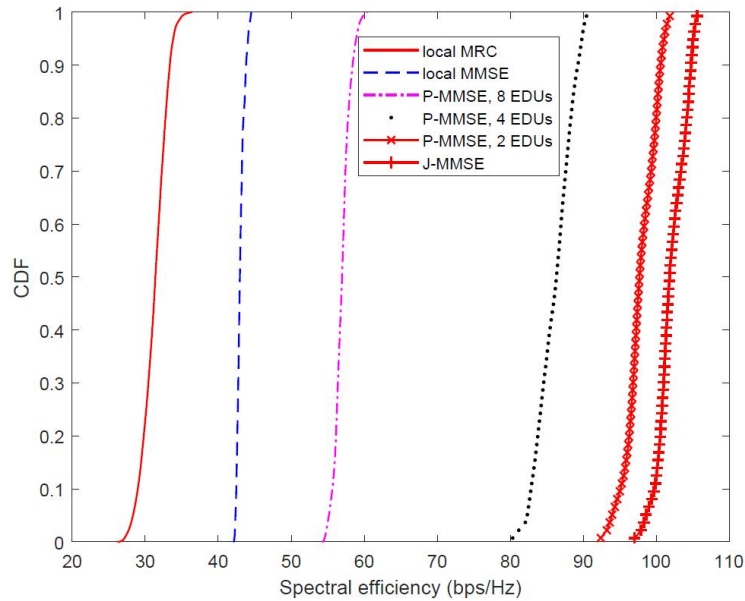


图 6.4 12 个数据流时系统总频谱效率

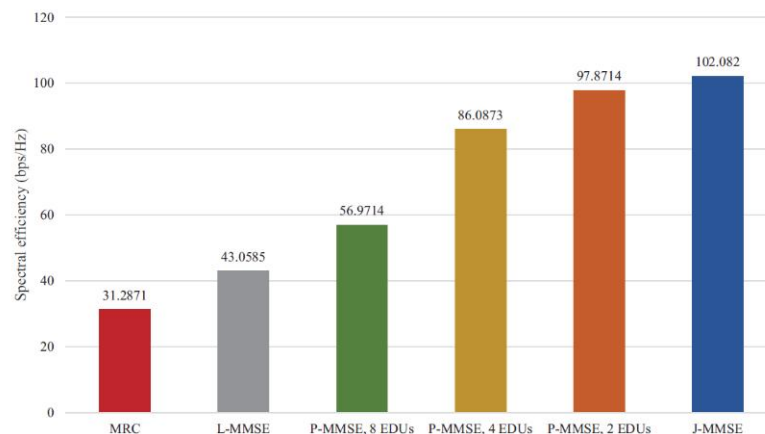


图 6.5 不同方案的频谱效率对比

下面我们对采用 24 个数据流的下行传输进行了频谱效率的离线分析。对于下行链路传输，我们采用兼容 5G 帧结构的校准参考信号（CARS）配置，并使用了基于总体最小二乘（TLS）的互易性校准算法。由于 UE 辅助校准可以被认为是完美的 CSI 反馈，基于 UE 辅助校准的联合 MMSE 预编码具有最佳性能。除了联合 MMSE 预编码，其他方案使用 RRU 的空口自校准。在实际系统中，使用校准系数时，不可避免地会有时间延迟。图 6.6 显示了没有延迟的频谱的性能。可以看出，在两个 EDU 的情况下，EDU-MMSE 的性能可以接近 UE 辅助校准的联合 MMSE 预编码的 80%，并且比 L-MMSE 性能有较大提高。图 6.7 展示了 5ms 校准延迟的性能。这意味着基于互易性校准的预编码在 5 毫秒后才能发挥作用。由于本振相位漂移，CSI 在 5 毫秒后会发生变化，这对联合预编码有很大的性能损失。对于 EDU-MMSE，其性能损失约为 10%。即便如此，基于 EDU 的

实现仍然是有吸引力的。

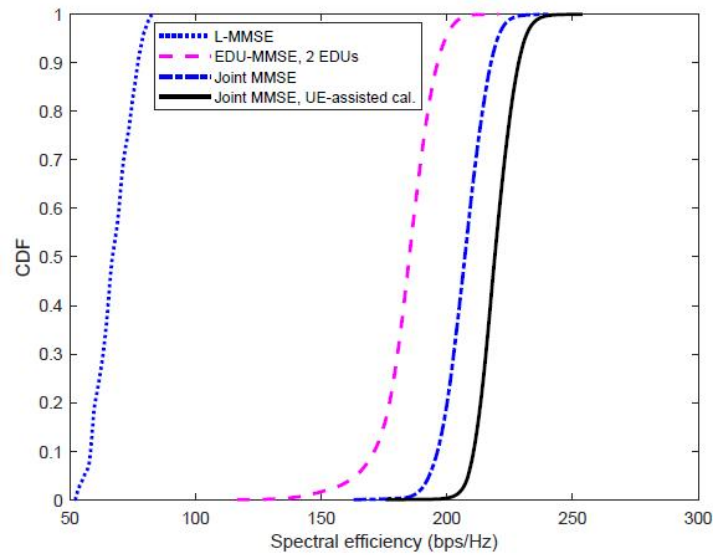


图 6.6 下行 24 个数据流的频谱效率

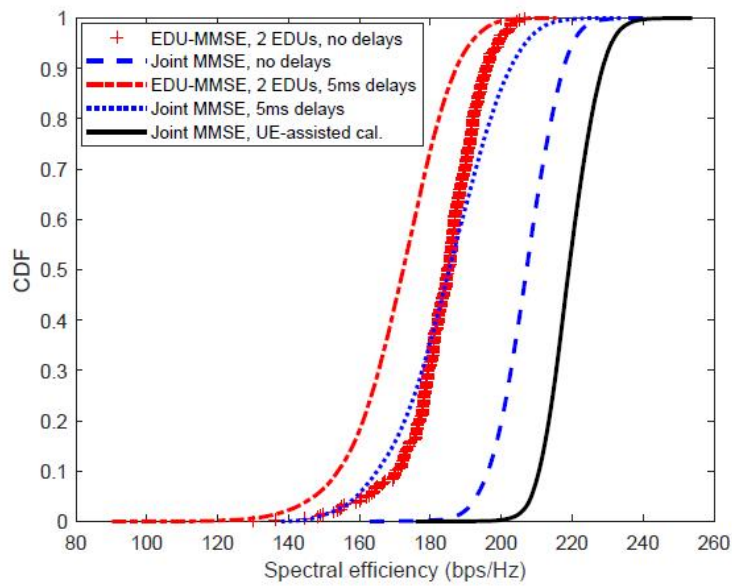


图 6.7 考虑校准时延的下行 24 个数据流的频谱效率

7. 总结及发展建议

分布式超大规模 MIMO 作为 6G 的重要候选技术，以用户为中心，部署大量分布式协作点并在协作点间引入协作来充分消除用户间干扰，提高系统频谱效率，降低通信时延，增强系统可扩展性和可靠性。随着流量需求的爆炸式增长，预期未来分布式超大规模 MIMO 核心技术可实现商用部署，促进各行各业技术革新和框架创新，进一步赋能千行百业。



参考文献

- [1] Ngo H Q, Ashikhmin A, Yang H, et al. Cell-free massive MIMO versus small cells[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(3): 1834-1850.
- [2] Interdonato G, Björnson E, Quoc Ngo H, et al. Ubiquitous cell-free massive MIMO communications[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2019, 2019(1): 1-13.
- [3] Interdonato G, Frenger P, Larsson E G. Scalability aspects of cell-free massive MIMO[C]//ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2019: 1-6.
- [4] Wang D, You X, Huang Y, et al. Full-spectrum cell-free RAN for 6G systems: system design and experimental results[J]. Science China Information Sciences, 2023, 66(3): 130305.
- [5] Ito K, Suga M, Shirato Y, et al. Remote beamforming scheme with fixed wavelength allocation for radio-over-fiber systems employing single-mode fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(4): 997-1006.
- [6] Beas J, Castanon G, Aldaya I, et al. Millimeter-wave frequency radio over fiber systems: a survey[J]. IEEE Communications surveys & tutorials, 2013, 15(4): 1593-1619.
- [7] Elhoushy S, Ibrahim M, Hamouda W. Cell-free massive MIMO: A survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, 24(1): 492-523.
- [8] 终端友好 6G 技术白皮书, 未来移动通信论坛, 2022 年 3 月.
- [9] Ngo H Q, Ashikhmin A, Yang H, et al. Cell-free massive MIMO versus small cells[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(3): 1834-1850.
- [10] Björnson E, Sanguinetti L. Scalable cell-free massive MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(7): 4247-4261.
- [11] RP-223520, "WID on Further NR mobility enhancements," Dec., 2022
- [12] 3GPP TR36.839: "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Mobility enhancements in heterogeneous networks."
- [13] R2-226982, "Target Performance Enhancements for L1/L2-based Inter-cell Mobility," Aug., 2022.
- [14] Han S, Yang C, Wang G, et al. Coordinated multi-point transmission strategies for TDD systems with non-ideal channel reciprocity[J]. IEEE transactions on communications, 2013, 61(10): 4256-4270.
- [15] A. Forenza, E. Lindskog, and S. G. Perlman, "Systems and methods to coordinate



- transmissions in distributed wireless systems via user clustering,” U.S. Patent 8 542 763, Sep. 24, 2013.
- [16] Hui D, Zangi K. Distributed computation of precoding weights for coordinated multipoint transmission on the downlink: U.S. Patent 8,107,965[P]. 2012-1-31.
- [17] Kaya A Ö, Viswanathan H. Dense distributed massive MIMO: Precoding and power control[C]//IEEE INFOCOM 2020-IEEE Conference on Computer Communications. IEEE, 2020: 756-763.
- [18] Fortune S J, Gay D M, Kernighan B W, et al. WISE design of indoor wireless systems: practical computation and optimization[J]. IEEE Computational science and Engineering, 1995, 2(1): 58-68.
- [19] Nissel R. Correctly Modeling TX and RX Chain in (Distributed) Massive MIMO—New Fundamental Insights on Coherency[J]. IEEE Communications Letters, 2022, 26(10): 2465-2469.
- [20] Shepard C, Yu H, Anand N, et al. Argos: Practical many-antenna base stations[C]//Proceedings of the 18th annual international conference on Mobile computing and networking. 2012: 53-64.
- [21] Cao Y, Wang P, Zheng K, et al. Experimental performance evaluation of cell-free massive MIMO systems using COTS RRU with OTA reciprocity calibration and phase synchronization[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2023.
- [22] Xu S, Cao Y, Li C, et al. Spanning tree method for over-the-air channel calibration in 6G cell-free massive MIMO[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023.
- [23] 3GPP. “Chair's notes RAN1#112bis-e v15”, April 2023; <http://ftp.3gpp.org>.
- [24] 3GPP TS 38.211: "NR; Physical channels and modulation".
- [25] 3GPP TS 38.213: "NR; Physical layer procedures for control".
- [26] 袁满, 刘晓燕, 王科. 5G 多频段组网和优化策略研究[J]. 电子技术应用, 2021, 47(10): 16-21.
- [27] Bigler T, Treytl A, Löschenbrand D, et al. High accuracy synchronization for distributed massive MIMO using white rabbit[C]//2018 IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control, and Communication (ISPCS). IEEE, 2018: 1-6.



主要贡献单位

序号	主要贡献单位	贡献内容
1	中国移动	1.1节、1.2节、2.1节、4.1节、4.2.2节、5.2节、3.1.2节、7章节
2	维沃移动通信有限公司	2.3.1节, 3.1节（总述部分, 3.1.1节）
3	联发科技股份有限公司	3.2.3节
4	上海诺基亚贝尔股份有限公司	3.2.1节、3.3.3节
5	中兴通讯股份有限公司	2.3.2节、5.1.3节
6	中信科移动通信技术股份有限公司	3.2.2节, 4.2.1节, 5.1.2节
7	北京小米移动软件有限公司	3.1.1节
8	都科摩（北京）通信技术研究有限公司	2.1节, 2.2.1节
9	东南大学	2.2.1节、3.3.1节、3.3.2节、3.4节、4.1节、4.2.3节、5.1.1节、6章节