

# 大规模 MIMO 系统无线传输关键技术研究

肖 骁 谢芝玉

中国移动通信集团湖北有限公司武汉分公司 湖北 武汉 430023

**【摘要】**：超高清视频、元宇宙、智能网联汽车等新兴业务的落地普及，对移动通信系统的频谱效率、系统容量及传输可靠性提出了严苛要求，无蜂窝大规模多输入多输出（CF-Massive MIMO）技术凭借海量天线的空间复用与协作传输能力，成为突破传统蜂窝网络性能瓶颈的核心技术方向。本文针对大规模 MIMO 系统无线传输的核心技术难题展开研究，对比分析 sub-6GHz 与毫米波频段的传输特性与技术挑战，从信道信息获取、分布式传输与协作、同步设计等关键技术维度进行深入探究，重点优化信道估计、分布式预编码、功率分配等核心算法，提出适配不同频段与应用场景的技术解决方案，为大规模 MIMO 系统的工程化部署、性能提升及后续技术演进提供理论支撑与工程实践参考。

**【关键词】**：大规模 MIMO；无线传输；信道估计；同步技术；信号检测

DOI:10.12417/2705-0998.26.02.065

在数字经济与智能终端快速发展的双重驱动下，社会对高速率、低时延、广连接的无线通信服务需求持续攀升，5G 网络已完成全球规模化商用，而大规模 MIMO 作为 5G 核心关键技术，是提升系统频谱效率与功率效率的核心抓手。该技术通过在基站侧部署大规模天线阵列，能够在同一频谱资源上为多用户实现并行通信，借助空间分集与波束成形技术，有效抑制信道衰落、降低空口干扰，大幅提升系统传输容量<sup>[1]</sup>。但在实际部署过程中，大规模天线阵列带来的信道维度剧增、射频链路不一致、信号处理复杂度攀升等问题，成为技术落地的主要阻碍；同时 sub-6GHz 与毫米波频段的传输特性差异，进一步加剧了信道估计、同步设计、干扰抑制的技术难度<sup>[2]</sup>，此外，多节点分布式部署下的协作传输、双工模式选择与功率资源优化配置等问题，也亟待通过技术创新予以解决。因此，深入研究大规模 MIMO 系统的无线传输关键技术，突破频段适配、信道感知、协同传输等技术瓶颈，对满足新兴业务通信需求、推动 5G-A 及 6G 技术研发具有重要的工程价值与学术意义。

## 1 大规模 MIMO 系统的技术挑战

大规模 MIMO 系统的无线传输性能由频段特性、信道传播规律及系统架构共同决定，sub-6GHz 与毫米波频段呈现出差异化的技术挑战。sub-6GHz 频段是 5G 网络广覆盖的核心频段，其分布式大规模 MIMO 系统的信道具有强时变、高维度、频域特性波动显著的特点：多用户与分布式节点间的时延差异导致信道频域响应剧烈变化，用户移动产生的多普勒频偏存在用户与节点间的异质性，规模化的用户与节点数量使信道矩阵维度呈指数级增长，大幅提升了信道估计与传输方案设计的难度<sup>[3]</sup>。

毫米波频段凭借超大带宽资源成为高速率通信的核心选择，但该频段存在先天传输短板：毫米波信号波长较短，传播损耗大且易受障碍物遮挡，通信覆盖范围受限；信号对相位噪声高度敏感，射频前端通道的不一致性严重影响信道互易性，增加了射频校准的技术难度；混合预编码技术的应用要求实现高精度的多节点、多用户波束管理，下行传输中难以精准获取

信道状态信息，上行联合接收则需解决多用户间的强干扰问题<sup>[4]</sup>。此外，大规模天线部署带来的硬件成本与能耗增加、导频资源稀缺、信号处理复杂度高，以及双工模式中的交叉链路干扰、功率分配中的公平性与效率平衡等共性问题，仍是大规模 MIMO 系统工程化应用的关键制约因素。

## 2 大规模 MIMO 系统关键技术研究

### 2.1 信道信息获取技术

信道信息的精准感知与获取是大规模 MIMO 系统实现高效传输的基础，直接决定波束成形、预编码等技术的实施效果。在 CF-Massive MIMO 系统的时分双工（TDD）模式下，可依托空口信道互易性，通过上行探测信号间接推导下行信道信息，大幅降低下行信道获取的开销<sup>[5]</sup>。当前单远端无线单元（RRU）内多通道一致性已得到有效解决，跨 RRU 的空口校准成为分布式系统的核心技术难点，针对这一问题，可采用交替方向乘法等高精度校准算法，提升跨节点校准精度，保障信道互易性的有效实现，同时需通过空口信号对 RRU 间时钟偏移进行实时估计与跟踪，为下行联合预编码提供时钟同步支撑，且利用 5G NR 灵活帧结构，使 RRU 间的校准信号传输对终端透明，不影响用户通信体验。在上行信道估计中，结合信道的功率域稀疏特性设计导频复用方案，可有效降低导频开销，提升频谱资源利用率；基于稀疏贝叶斯学习的信道估计算法，能够精准捕捉信道的时延扩展与多普勒频偏特性，有效提升低信噪比场景下的信道估计精度。在下行信道感知中，信道状态信息参考信号（CSI-RS）与跟踪参考信号（TRS）是获取信道统计特性的关键，CSI-RS 承担信道质量测量、波束管理、时频偏跟踪等功能，在用户中心的传输架构下，需根据用户分布特征与信道动态变化情况，动态配置 CSI-RS 的端口、周期与密度，规避传统固定配置 TRS 带来的测量误差，在保证信道估计精度的同时，最大化系统传输效率。

## 2.2 分布式传输与协作技术

分布式传输与协作技术是拓展大规模 MIMO 系统覆盖范围、提升传输可靠性的核心手段，其核心是通过多 RRU 节点的协同工作，实现信号的联合收发与干扰抑制，关键在于优化分布式预编码与联合接收策略。在上行传输中，各 RRU 端采用最小均方误差、最大似然等多用户检测算法，对接收信号进行独立处理与量化，再将量化后的信号转发至基带处理单元（BBU）完成联合合并，有效区分不同用户的上行信号，抑制多用户间的干扰，提升上行接收质量。在下行传输中，采用正则化迫零、块对角化等预编码策略时，为降低前传链路开销与性能损失，需采用部分 RRU 联合的分布式预编码方案，根据用户的信道特征与位置信息，动态选择协作 RRU 节点，优化预编码矩阵设计，提升下行传输的信噪比。针对信道时频特性快速变化的问题，将干扰抑制矩阵的设计限制在特定子带宽度内，同时根据信道相干带宽动态调整统一预编码策略下的子带划分，避免子载波正交性破坏导致的系统性能下降。此外，上行功率控制需基于用户的信道条件与服务质量（QoS）需求进行动态自适应调整，确保边缘用户的信号有效接收；下行多用户功率分配算法需具备良好的可扩展性，在多 RRU 联合预编码场景中，充分考虑各 RRU 的硬件功率限制，通过凸优化算法实现功率资源的全局最优分配，防止单节点功率过载，平衡系统的传输效率与用户公平性。

## 2.3 同步技术设计

同步技术是保障大规模 MIMO 系统正常工作的前提，包括定时同步和载波同步，其性能直接影响系统的传输质量，大规模 MIMO 系统中，不同发射信号经不同路径到达接收天线，存在多个时延和频偏，且天线数量多、分布广，对同步的要求远高于单天线系统<sup>[5]</sup>。针对这一问题，可设计带重复结构的同步符号，在单个 OFDM 符号内完成初始定时同步和载波同步，降低系统开销，提升同步效率。同步序列的选择至关重要，需具备良好的自相关特性、互相关特性、低峰均比及抗频偏性能。通过对比 ZC（Zadoff-Chu）序列和 PN（Pseudo-Noise）序列的性能发现，截短 PN 序列在抗频偏性能上更具优势，其互相关峰值集中，可有效避免伪峰值导致的同步错误，且在用作导频序列时可降低信道估计复杂度，更适合大规模 MIMO 系统的同步需求。定时同步技术包括帧检测和精符号同步，帧检测采用 Schmidl&Cox 方法结合长度保持算法，通过接收信号的重复结构进行滑动相关运算，可在突发数据传输中准确判断数据帧到达并粗略估计起始位置；精符号同步基于接收信号与本地同步符号的互相关运算，在帧检测基础上精确找到 OFDM 符号起始位置，为后续 FFT 运算提供保障；载波同步则采用粗频率估计与细频率估计相结合的策略，利用同步符号的重复结构实现频偏估计与补偿，粗频偏估计覆盖较宽范围，细频偏估计提升精度，满足高阶调制对频偏的严格要求，确保子载波正交性。

## 2.4 信号检测技术

信号检测技术的核心是在多用户干扰和噪声环境下，从接收信号中准确恢复原始发送符号，需在检测性能与计算复杂度之间实现平衡，针对大规模 MIMO 系统天线数量多、信道维度高的特点，线性检测算法因其较低的复杂度得到广泛应用，包括匹配滤波（MF）检测、迫零（ZF）检测和最小均方误差（MMSE）检测。MF 检测复杂度最低，但无法消除多用户干扰，适用于信道条件较好的场景；ZF 检测可完全消除干扰，但存在噪声放大问题，在低信噪比环境下性能受限；MMSE 检测同时考虑噪声和干扰，通过最小化均方误差优化检测性能，更适合复杂信道环境，但需估计噪声方差。为进一步提升检测性能，干扰消除检测算法被广泛研究，包括串行干扰消除（SIC）检测、并行干扰消除（PIC）检测及两者结合的多级干扰消除检测：SIC 检测通过逐路检测并消除干扰，可获得分集增益，但存在处理时延大的问题；PIC 检测可同时检测所有发送信号，处理时延小，但性能依赖初始估计准确度；两者结合的检测算法可兼顾性能与时延，适配不同应用场景。对于收发天线数较多的大规模 MIMO 系统，基于因子图的置信传播（BP）检测算法通过消息传递与更新机制，在低复杂度下实现近似最优性能，尤其适用于高阶调制场景，通过迭代运算提升检测精度，避免高维矩阵求逆带来的复杂度问题。

## 2.5 双工技术与功率控制优化

合理选择双工技术并优化功率控制设计，是提升大规模 MIMO 系统频谱利用率的重要保障。同时同频全双工（CCFD）技术能够在相同频率资源上同时进行上下行传输，显著提升频谱效率，但该技术面临着交叉链路干扰的核心挑战。CF-Massive MIMO 技术凭借其强大的协作传输功能，可有效管理和优化信号传输路径，减少干扰产生，为双工通信技术实现更高自由度和更优网络性能提供了技术支撑。基于无蜂窝架构的网络辅助全双工（NAFD）技术开创了灵活双工通信的新模式，该技术通过基站基带处理单元（BBU）的联合基带处理和 RRU 的独立收发功能，实现上下行无线链路在同一频率资源上的同时运作，结合先进的干扰消除技术和综合调度措施，在有效降低服务时延的同时，保持较高的频谱利用率。在功率控制方面，大规模 MIMO 系统需根据用户分布、信道条件和 QoS 需求动态调整功率分配策略：上行功率控制需避免用户间干扰的累积，通过精准调整用户发射功率，确保远离基站的用户信号能够被有效接收，同时防止近距离用户出现功率过载；下行功率控制需在满足多用户通信需求的前提下，平衡功率效率与用户公平性，在多 RRU 联合预编码场景中，需严格遵循各 RRU 的功率限制，通过协同优化实现系统整体功率资源的高效利用。

### 3 结论

本文围绕大规模 MIMO 系统无线传输关键技术展开系统性研究,剖析了 sub-6GHz 与毫米波频段的核心技术挑战,深入探讨了信道信息获取、分布式传输与协作、同步设计、信号检测、双工技术及功率控制优化等关键技术路径并提出优化方案。未来需重点开展四方面研究:一是融合人工智能技术优化

导频设计与信道估计算法,平衡估计性能与复杂度;二是搭建在线实时传输测试平台,验证关键技术的协同工作性能;三是研究自适应编码调制与反向链路传输方案,提升系统场景适配能力;四是探索与可重构智能反射表面、太赫兹通信等新技术的融合应用,拓展性能边界。随着关键技术的持续突破,大规模 MIMO 系统将为 5G 深度优化及 6G 发展提供核心支撑,助力智能通信实现更高速、可靠、高效的传输目标。

### 参考文献:

- [1] 朱殿君.面向 5G 智能通信的大规模 MIMO 无线传输关键技术研究[J].长江信息通信,2024,37(11):191-193.
- [2] 张程.宽带 MIMO 无线传输关键技术研究[D].南京:东南大学,2021.
- [3] 赵晓晖,李雪迎.分布式大规模 MIMO 系统的信道估计与预编码技术[J].电子与信息学报,2022,44(8):2654-2663.
- [4] 刘元安,朱秋明.毫米波大规模 MIMO 系统的关键技术与挑战[J].北京邮电大学学报,2021,44(2):1-10.
- [5] 杜劲波.大规模 MIMO 系统混合预编码研究与性能分析[D].南京:东南大学,2019.