

# 大规模天线系统的信号处理技术研究

程跃进

日海恒联通信技术有限公司 河南 郑州 450000

**摘要:** 文章主要探讨了大规模天线系统中的信号处理技术问题, 首先阐述了大规模天线系统的基本原理和架构组成, 针对多用户干扰和信道估计误差等问题, 通过采用高精度的信道状态信息 (CSI) 获取方法, 实现了精确的波束成形和空间复用, 提高了频谱利用率和系统容量, 确保了信号传输的质量和稳定性, 旨在通过分析和优化信号的预编码、信道估计及干扰抑制技术, 提升通信系统的性能和效率。

**关键词:** 大规模天线系统; 信号处理; 信道估计; 干扰抑制

## 引言

随着无线通信技术的快速发展, 传统天线系统已难以满足日益增长的数据传输需求, 大规模天线系统 (Massive MIMO) 因其高频谱效率和巨大的系统容量成为解决方案之一。然而, 实现这一系统的高性能运作, 需要解决众多信号处理技术面临的挑战。本研究针对大规模天线系统中的这些技术问题进行深入研究, 旨在探索更加高效和稳定的信号处理方法, 以提升系统的通信质量和性能, 满足未来无线通信对高速度、低延迟的要求。

## 1 大规模天线系统的基本原理

### 1.1 天线阵列的构成

天线阵列由数十至数百个传输和接收天线单元构建而成, 形成高度集成的通信网络。天线单元按照一定的几何排布, 如线性、平面或圆形阵列, 以协同工作的方式增强信号的发射和接收能力。在大规模MIMO系统中, 通过精密的算法对每个天线单元发射的信号进行精确的相位和幅度调整, 实现波束成形技术, 即在特定的方向上集中信号能量, 以提高信号在目标用户方向上的增益, 同时减少对其他方向的干扰<sup>[1]</sup>。天线阵列的大规模特性使得系统能够在同一时间频带内服务于多个用户, 通过空间复用技术, 显著提高频谱利用率和系统容量, 该技术依赖于高效的信道状态信息 (CSI) 获取和处理技术, 确保信号波束准确对准每个目标用户, 优化每个用户的通信质量。

### 1.2 信号的传播机制

在大规模天线系统中, 信号的传播机制通过高度复杂且精细的处理过程实现, 尤其是波束成形技术, 其基本原理在于利用天线阵列发射相干信号, 通过精确控制各个天线单元的信号相位和幅度, 实现信号能量在特定

空间方向的集中, 而在其他方向上的衰减, 增强信号在目标方向上的传播效率, 减少干扰以提升通信质量。此过程要求系统对通信环境的信道状态信息 (CSI) 有准确了解, 以便动态调整波束形成的方向和强度, 确保信号波束能精确对准目标用户, 即便在用户移动的情况下也能维持优化的通信链路。大规模MIMO系统通过这种方法实现了对信号传播的精细控制, 有效地利用了空间维度上的资源, 显著提高了频谱的使用效率和系统的容量。波束成形技术在多用户环境中通过空间复用, 允许系统同时服务多个用户而互不干扰, 通过设计不同用户的信号波束在空间上互相正交实现。

### 1.3 与传统天线系统的对比

首先, 大规模天线系统通过部署大量的天线单元, 利用波束成形技术和空间复用技术, 显著提高了信号的方向性和频谱利用率, 从而在相同的频谱资源下实现了更高的系统容量和数据吞吐量。与传统天线系统相比, 后者通常只能支持有限的用户数量和数据速率, 因其信号覆盖和处理能力受限于较少的天线数量和较低的信号处理复杂度。其次, 通过对信号进行精确的空间定向, 大规模天线系统能够将信号能量集中传输至特定用户, 减少能量的空间泄露, 在降低功耗的同时增加了信号到干扰加噪声比 (SINR)。大规模天线系统由于其独特的信号处理能力, 能够更有效地抵抗信道衰落和干扰, 提高了通信的可靠性和稳定性。相比之下, 传统天线系统在处理高速、高密度用户环境时, 往往会受到信道容量和干扰的限制, 难以满足高质量通信需求。

## 2 大规模天线系统的架构组成

大规模天线系统具有高度集成和先进的信号处理能力, 能优化无线通信的性能和效率, 该系统架构主要由前端处理、信号调制解调、以及编码解码等关键部分组成。前端处理模块负责接收和发射经过天线阵列的

**作者简介:** 程跃进 (1978.07-), 男, 汉族, 籍贯: 河南省郑州市, 本科, 工程师, 研究方向: 通信工程

信号,其中包括对接收信号的放大、滤波和频率下转,以及对发射信号的频率上转、滤波和放大等功能,以适应无线信道的特性并优化信号的传输质量。信号调制解调部分则是系统中的核心,负责将高速的数字信息转换为适合无线传播的模拟信号(调制),以及将接收到的模拟信号转换回数字信息(解调)。在大规模天线系统中,调制解调过程需要高度精确和复杂的算法支持,以实现大量并行信道的有效处理,从而支持高数据率传输和多用户接入。编码解码环节则涉及到信息的纠错和保护,通过引入冗余信息来检测和纠正传输过程中可能产生的错误,保证数据传输的可靠性。在大规模天线系统中,通常采用Low-Density Parity-Check (LDPC)码、Turbo码等编码方案<sup>[2]</sup>。

天线阵列由数十至数百个天线元素组成,负责信号的发射和接收。天线元素密集排布、协同工作,实现高频谱效率和信号增强。信号处理单元包含了数字信号处理器(DSPs)和专用集成电路(ASICs),负责执行复杂的算法,如波束成形、信道估计、调制解调和编码解码,使得系统能够精确定向信号传输,优化多用户接入并最大化数据吞吐量。功率放大器则位于信号的传输链路中,用于增加发射信号的功率,确保信号能有效地覆盖目标区域并抵达接收端。在大规模天线系统中,功率放大器需要精心设计,以平衡功率效率和信号失真之间的关系,尤其是在高功率输出时保持信号的质量。前端模块包括滤波器和频率转换器,对信号进行初步的处理,如滤除噪声、进行频率上转或下转,为后续的数字处理准备合适的信号形式。控制和管理单元监控整个系统的运行状态,调度资源,处理用户接入请求,并实时优化系统配置以应对动态变化的通信环境。

### 3 大规模天线系统中的信号处理面临的挑战

#### 3.1 主要信号处理问题

在大规模天线系统的设计和实现中,信号处理面临多用户干扰和信道估计误差问题,直接影响系统的性能和效率。在高密度用户环境下,当多个用户同时在相同的频率带宽内传输信号时,一个用户的信号可能会干扰到其他用户的信号接收。虽然大规模天线系统通过波束成形技术尝试在空间域中分离用户,实现空间复用,但在实际应用中,波束之间的隔离不可能完全,尤其是在用户分布密集或移动性大时,波束覆盖区域可能重叠,导致用户间干扰(IUI)增加。系统的性能高度依赖于准确的信道状态信息(CSI),但信道估计在实际操作中往往受到限制,如时间变化、硬件不完善和环境噪声的影响,导致估计误差。信道估计的准确性直接影响波束成

形的效果和信号的定向传输能力,估计误差可能导致信号能量没有被有效地集中到目标用户上,而是被误导到其他方向,从而降低了信号到干扰加噪声比(SINR),影响通信质量和系统容量。

#### 3.2 信号处理技术难点

##### (1) 算法设计的复杂度

随着天线数量的增加,需要处理的信号维度和数据量呈指数级增长,导致信号处理算法复杂度的显著提升。例如,波束成形和信道估计等关键技术需要基于高维度数据进行优化计算,以实现信号的精确定向和资源的高效分配。然而,求解过程需要耗费大量计算资源,难以在实时或近实时场景下满足性能要求。算法设计还需考虑到硬件实现的可行性,包括算法的并行化能力和对硬件资源的适应性。高复杂度的算法可能在理论上可行,但在实际部署中因硬件限制而难以实现,实现成本过高。

##### (2) 信号检测的效率

在高密度用户环境和复杂多变的信道条件下,信号检测面临着较大挑战。首先,系统需要在短时间内从接收到的混合信号中准确区分出各个用户的信号,检测算法必须具有高度的灵敏度和鲁棒性。然而,实际信道的多径效应、干扰以及噪声的存在显著增加了信号检测的难度,容易造成用户间的信号混叠或误检。为了提高系统的频谱利用率,大规模天线系统常采用复杂的调制技术,增加了信号检测的复杂性。有效的信号检测技术需要能够在保证高检测效率的同时,最小化误码率,对算法的设计提出了高要求。

## 4 大规模天线系统的信号处理技术

### 4.1 预编码技术

预编码技术是在信号发射前对其进行预处理,以优化信号的传播路径和提高信号在接收端的质量,利用已知的信道状态信息(CSI)调整发射信号的相位和幅度,在接收用户端形成期望的信号分布,实现高效的空域复用和增强的信号接收性能<sup>[3]</sup>。

预编码可以根据信道的具体特性和系统设计的要求,采用不同的算法策略。常见的预编码技术包括线性预编码和非线性预编码。线性预编码技术如零强制(ZF)和最小均方误差(MMSE)预编码,通过简单的矩阵运算来消除用户间干扰,优化每个用户的信号传输,这些方法在计算复杂度较低时能够提供良好的性能,尤其适用于用户间干扰较为显著的场景。非线性预编码技术,如汤姆林森-哈拉希玛(Tomlinson-Harashima)预编码和矢量扰动技术,通过更复杂的信号处理手段进一步优

化信号的传输特性,能够在高信号干扰的环境下实现更好的性能,但相应的计算成本也更高。

首先,预编码技术能够显著提高频谱利用率,通过精确控制发射信号的方向性,使得同一频谱资源可以被多个用户共享,从而增加系统容量。其次,预编码有助于减少多用户干扰,通过对信号进行精确预处理,保证在接收端信号的清晰度和准确性,提高通信质量。此外,预编码还能改善信号的覆盖范围和边缘用户的接收性能,通过动态调整信号的传播特性,优化系统的整体性能。

#### 4.2 信道估计方法

信道估计是为了获取信道状态信息(CSI),指导预编码和信号检测等信号处理技术的实施。信道估计方法主要分为两类:基于导频的信道估计和盲信道估计。基于导频的方法通过发送已知的信号序列(导频信号)并在接收端观察经过信道传输后的信号变化来估计信道特性,因其实现简单和估计准确度较高而被广泛应用。然而,导频信号的传输占用了通信系统的部分频谱资源,降低了频谱的使用效率。盲信道估计技术试图通过接收信号本身的统计特性来推断信道信息,无需导频信号的辅助,从而提高频谱利用率,但该方法的估计复杂度和计算量通常较高<sup>[4]</sup>。

信道估计面临的挑战主要有:(1)时间变化的信道特性导致估计过时,尤其是在高移动性场景下更加显著;(2)多用户环境下的导频污染问题,即不同用户的导频信号会相互干扰,影响估计准确性;(3)在大规模天线系统中,由于天线数量众多,有效而准确地估计信道变得更加复杂和资源消耗更大。

信道估计的准确性对系统性能有着直接的影响。准确的信道估计可以有效指导预编码技术的实施,优化信号的传输路径,减少干扰,提高信号到干扰加噪声比(SINR),从而提升通信质量和系统容量。相反,不准确的信道估计会导致预编码的失效,增加多用户干扰,降低系统的频谱效率和能效比。

#### 4.3 干扰抑制策略

在大规模天线系统中,由于天线数量众多且服务多用户,干扰成为影响系统性能的关键因素之一。因此,

为了提高通信质量和系统容量,可以采用空间预编码、功率控制、用户调度、以及高级信号处理技术等干扰抑制策略。

空间预编码技术通过在发射端对信号进行精确控制,利用天线阵列的空间特性来定向发射信号,使信号主要能量集中在目标用户方向,而在其他方向上的能量尽可能减少,有效降低对其他用户的干扰。此外,利用用户间的信道正交性,可以进一步减少用户间的干扰。功率控制策略通过调整发射功率来控制干扰水平,对于近距离用户采用较低的发射功率以减少对远距离用户的干扰,而对于信号衰减较大的远距离用户,则增加发射功率以保证信号质量,通过这种动态的功率调整可以在一定程度上平衡用户间的服务质量,减少干扰。用户调度策略旨在合理安排用户的通信时间和频段,通过空时资源的优化分配来减少用户间的干扰。高级信号处理技术如多用户检测(MUD)和干扰对齐(IA)等,通过在接收端对信号进行高效处理,区分出目标信号和干扰信号,进而抑制或消除干扰的影响。

### 5 结语

本文通过对大规模天线系统中的信号处理技术进行系统性的研究,重点探讨了预编码、信道估计和干扰抑制等关键技术的实现细节及其面临的挑战。通过引入高效的信道估计方法和优化的预编码策略,以及实施针对性的干扰抑制措施,显著提高了信号传输的效率和质量,降低了系统的能耗,增强了通信的可靠性。本研究不仅为大规模天线系统的实际部署提供了理论依据和技术支持,也为无线通信技术的发展奠定了坚实基础。

#### 参考文献

- [1]李晨光.大规模天线通信系统非相干信号处理技术研究[D].四川:电子科技大学,2017.
- [2]李彬睿,张忠培.可重构智能面辅助的低精度量化大规模MIMO系统的信道估计[J].系统工程与电子技术,2021,43(10):2984-2991.
- [3]阙爽凡.TDD多用户MIMO信道状态信息获取技术研究[D].四川:电子科技大学,2023.
- [4]夏赞.阵列信号处理模块电路板设计与实现[D].四川:电子科技大学,2023.