

大规模MIMO系统中导频污染抑制与信道估计优化

李 建 陈文昊 乔 良
中国通信建设集团有限公司 北京 100071

摘 要：在无线通信技术不断革新的当下，大规模MIMO系统凭借能大幅提升频谱效率与系统容量的优势，成为5G及未来通信的核心技术。本文聚焦大规模MIMO系统中的导频污染抑制与信道估计优化问题。阐述大规模MIMO系统基础理论，涵盖系统原理、无线信道模型及OFDM技术应用。接着深入剖析导频污染问题，包括产生机制、对系统性能的影响及数学模型。随后提出导频污染抑制策略，如导频分配优化、序列设计等。最后探讨信道估计优化方法，涉及压缩感知、深度学习及张量主成分分析。通过研究这些内容，旨在为大规模MIMO系统性能提升提供理论支持与实践指导。

关键词：大规模MIMO系统；导频污染问题；抑制策略；信道估计优化方法

引言：随着无线通信技术的飞速发展，大规模MIMO系统因其能显著提升频谱效率和系统容量，成为5G及未来通信系统的关键技术。然而，在实际应用中，大规模MIMO系统面临着诸多挑战，其中导频污染问题尤为突出。导频污染会严重干扰信道估计的准确性，进而降低系统性能。同时，信道估计的准确性直接影响着系统的通信质量。因此，如何有效抑制导频污染以及优化信道估计方法，成为大规模MIMO系统研究的重要方向。

1 大规模 MIMO 系统基础理论

1.1 大规模MIMO系统原理

大规模MIMO系统通过在基站端配置大量天线，同时服务多个用户。与传统MIMO相比，其天线数量大幅增加，可实现空间维度的深度挖掘。利用多天线带来的空间自由度，系统能在同一时频资源上为更多用户提供服务，大幅提升频谱效率。在上行链路，众多用户天线同时向基站发送信号，基站凭借多天线接收并分离各用户信号；下行链路中，基站通过多天线形成精准波束，将信号定向发送给目标用户，有效抑制干扰，增强信号传输的可靠性与稳定性，为高速、大容量通信提供坚实支撑。

1.2 无线信道模型

无线信道模型用于刻画无线信号在传播过程中的特性。它综合考虑多种因素，如路径损耗，信号强度随传

播距离增加而衰减；多径效应，信号经不同路径到达接收端，产生时延与相位变化，导致信号衰落，包括快衰落和慢衰落。此外，还有阴影效应，建筑物等障碍物遮挡使信号强度随机变化。常见的无线信道模型有小尺度衰落模型（如瑞利衰落、莱斯衰落）和大尺度衰落模型。准确构建无线信道模型，对大规模MIMO系统的性能分析、算法设计以及系统优化起着至关重要的作用。

1.3 OFDM技术原理及在大规模MIMO中的应用

OFDM技术将高速数据流分解为多个低速子数据流，调制到相互正交的子载波上进行并行传输。其核心优势在于能有效对抗多径衰落，通过插入循环前缀消除子载波间干扰。在大规模MIMO系统中，OFDM技术与多天线技术深度融合。一方面，OFDM为大规模MIMO提供了高效的频域处理框架，便于进行信道估计和均衡；另一方面，大规模MIMO的多天线特性可进一步提升OFDM系统的性能，如通过波束成形增强信号方向性，提高信号增益，降低用户间干扰，实现更可靠、高速的数据传输，满足大规模MIMO系统对高容量和高质量通信的需求^[1]。

2 大规模 MIMO 系统中导频污染问题分析

2.1 导频污染的产生机制

在大规模MIMO系统里，导频污染的产生主要与导频资源的有限复用紧密相关。系统为服务众多用户，因可用导频序列数量有限，不同小区不得不复用相同导频。当相邻小区用户使用相同导频时，基站接收信号就会混入非本小区服务用户的干扰信号。由于这些干扰信号在导频阶段无法与本小区用户信号有效区分，基站在进行信道估计时，会把非服务用户信号错误地纳入服务用户信号范畴。

2.2 导频污染对系统性能的影响

作者简介：

李建（1980-8），男，汉族，河南省驻马店市，工程师，本科。

陈文昊（1977-11），男，汉族，江苏省徐州市，工程师，本科。

乔良（1990-2），女，汉族，北京市东城区，工程师，研究生。

导频污染会对大规模MIMO系统性能造成多方面的严重损害。在信道估计环节,它致使估计结果出现偏差,基站难以精准掌握用户与天线间的信道状态信息。这直接影响到后续的数据传输,波束成形和预编码无法精准实施,信号不能准确指向目标用户,造成信号泄漏。从系统容量角度看,导频污染引发的干扰会降低用户信号的信干噪比,限制系统同时服务的用户数量,减少系统整体容量。

2.3 导频污染的数学模型

构建导频污染的数学模型可从系统实际场景出发。考虑多个小区共存的大规模MIMO环境,每个小区有一定数量用户和配备多根天线的基站。将不同小区用户到基站的信号传输看作一个整体过程,非服务小区用户使用相同导频产生的干扰信号,会与本小区服务用户信号一同到达基站。通过描述信号在不同小区间的传播、叠加以及基站接收情况,可抽象出导频污染的数学关系。

3 大规模MIMO系统中导频污染抑制策略

3.1 导频分配优化

在大规模MIMO系统中,导频分配优化是抑制导频污染的关键策略。(1)基于用户位置信息的导频分配是一种有效方法。通过获取用户在小区内的精确位置,将使用相同导频的用户尽可能分配到相互距离较远的位置。这样一来,不同小区使用相同导频的用户之间的信号干扰会因距离增加而大幅减弱,从而降低导频污染的程度。例如,利用基站对用户上行信号的到达角等信息来估算用户位置,进而实现合理的导频分配。(2)采用智能的导频复用模式。传统的导频复用方式较为固定,容易导致严重的导频污染。而智能导频复用可以根据小区的负载情况、用户分布以及信道条件等因素动态调整导频的复用方式。在用户密集区域,适当扩大导频复用距离;在用户稀疏区域,则可以采用更紧密的复用方式,以提高导频资源的利用率。(3)结合导频功率控制进行分配优化。根据用户与基站之间的距离以及信道质量,动态调整用户发送导频信号的功率。对于距离基站较近、信道质量较好的用户,适当降低导频功率;而对于距离较远、信道质量较差的用户,则适当提高导频功率。这样可以在保证信道估计准确性的同时,减少对其他用户的导频干扰,有效抑制导频污染^[2]。

3.2 导频序列设计

在大规模MIMO系统中,精心设计导频序列对于抑制导频污染、提升系统性能起着至关重要的作用。(1)从正交性角度出发,设计具有良好正交特性的导频序列是基础要求。正交导频序列能使不同用户在导频阶段产生

的信号相互独立,在接收端可有效分离各用户信号,极大降低用户间导频干扰。例如采用Zadoff-Chu序列,它具有理想的自相关和互相关特性,自相关旁瓣低,互相关值趋近于零,能保证在同一时频资源上,不同用户使用不同Zadoff-Chu序列作为导频时,信号之间几乎不存在干扰。(2)要考虑导频序列的长度。较长的导频序列能提供 richer 的信息,有助于更精确地进行信道估计,但会占用更多的时频资源,降低系统频谱效率。因此,需根据系统实际需求,如用户数量、信道环境复杂程度等,合理选择导频序列长度,在信道估计精度和频谱效率之间取得平衡。(3)导频序列的设计还需适应不同的信道环境。对于多径效应严重的信道,设计的导频序列应具备较强的抗多径衰落能力,确保在复杂信道条件下仍能准确完成信道估计,有效抑制导频污染,保障大规模MIMO系统稳定、高效运行。

3.3 波束成形技术应用

在大规模MIMO系统中,波束成形技术是抑制导频污染、提升系统性能的有力手段。(1)波束成形技术通过调整基站天线阵列中各天线的相位和幅度,将信号能量聚焦在特定方向,形成狭窄而强大的波束指向目标用户。在存在导频污染的场景下,它能够有效减少对非目标用户方向的信号辐射,降低相邻小区使用相同导频用户带来的干扰。例如,当相邻小区有用户使用相同导频时,本小区基站利用波束成形将信号精准指向本小区用户,使干扰信号难以对本小区用户造成显著影响。(2)从实现方式上看,基于最大比传输(MRT)的波束成形,可根据信道状态信息调整波束权重,最大化接收端信号功率,增强目标用户信号强度。而迫零(ZF)波束成形则侧重于消除干扰,通过计算使干扰信号在接收端为零的权重向量,有效抑制导频污染引发的干扰。(3)结合先进的算法,波束成形技术还能动态适应信道变化。根据用户移动、信道衰落等实时情况,快速调整波束方向和形状,始终保持对目标用户的高效信号传输,进一步降低导频污染对系统性能的伤害,保障大规模MIMO系统高效稳定运行。

3.4 基于博弈论的导频去污策略

在大规模MIMO系统中,基于博弈论的导频去污策略为解决导频污染问题提供了新颖且有效的思路。(1)博弈论旨在研究多个决策主体在相互影响的环境下如何做出最优决策。将各个小区或用户视为博弈参与者,他们在导频分配和使用过程中存在利益冲突。每个参与者都希望选择最优的导频资源,以最大化自身通信性能,但这种选择可能会对其他参与者造成干扰,即产生导频

污染。(2)通过构建合适的博弈模型,例如非合作博弈模型,参与者根据自身观测到的信道状态等信息,独立选择导频策略。在反复博弈过程中,参与者不断调整策略,以达到纳什均衡状态。在纳什均衡下,没有任何一个参与者能通过单独改变自己的导频选择策略来获得更好的性能,此时系统整体的导频污染得到有效抑制。(3)引入合作博弈理念,让小区或用户之间进行信息共享与协作。通过协商和联合决策,共同选择导频分配方案,进一步优化系统性能。这种基于博弈论的导频去污策略,能够充分考虑系统内各参与者的利益和行为,动态适应复杂的无线环境,有效降低导频污染,提升大规模MIMO系统的整体性能。

4 大规模MIMO系统中信道估计优化方法

4.1 基于压缩感知的信道估计

在大规模MIMO系统中,传统信道估计方法面临导频开销大、计算复杂度高的挑战。压缩感知理论通过利用信号的稀疏性,以远低于奈奎斯特采样率的观测数据实现信号重构,为信道估计提供了新思路。大规模MIMO信道在特定变换域(如角度域、时延域)通常呈现稀疏性,即少数路径携带主要能量。基于压缩感知的信道估计方法通过设计非正交导频序列,将信道估计问题转化为稀疏信号重构问题。通过优化测量矩阵设计,使其满足约束等距性(RIP)条件,结合贪婪算法(如OMP)或凸优化算法(如基追踪),从少量观测数据中恢复信道信息。该方法显著降低了导频开销,尤其适用于频分双工(FDD)大规模MIMO系统。进一步研究可结合结构化稀疏特性,利用时空相关性设计更高效的测量矩阵,并通过改进重构算法提升估计精度与鲁棒性。

4.2 基于深度学习的信道估计

深度学习技术通过自动学习信道特征,为大规模MIMO信道估计提供了高性能解决方案。传统方法依赖理想信道模型假设,难以适应复杂实际环境,而深度学习模型(如CNN、RNN、LSTM)可从海量数据中提取非线性特征,构建信道状态与观测数据的映射关系。基于深度学习的信道估计方法通过离线训练神经网络,学习信道的稀疏性、低秩性等特性,在线阶段直接预测信道状

态信息,避免了复杂数学推导。研究提出深度学习辅助压缩感知的信道估计方法,通过神经网络优化稀疏度自适应过程,提升估计精度。进一步优化可结合注意力机制,增强模型对关键信道特征的捕捉能力,并通过迁移学习降低对训练数据量的依赖,推动其实用化进程。

4.3 基于张量主成分分析的信道估计

张量主成分分析(TPE)通过挖掘大规模MIMO信道中的多维数据结构(如时间、频率、空间),为信道估计提供了高效工具。传统方法将信道数据视为矩阵,难以充分利用其内在相关性,而张量模型可自然表示多维信息,通过分解提取主要特征,降低数据维度。基于TPE的信道估计算法通过对接收信号张量进行分解,提取信道的主成分,减少计算量与导频开销。研究提出基于交替子空间张量分解的算法,通过逐层提取秩-1张量,精确估计信道参数。进一步改进可结合低秩与稀疏特性,设计联合优化框架,提升算法在复杂信道环境下的适应性。同时,优化张量分解算法的收敛速度,降低对硬件计算能力的要求,推动其在实时通信系统中的应用^[3]。

结束语

在大规模MIMO系统里,导频污染抑制与信道估计优化是提升系统性能、实现高效通信的关键。通过导频分配优化、序列设计、波束成形及博弈论等策略,有效减轻了导频污染带来的干扰;而基于压缩感知、深度学习、张量主成分分析的信道估计优化方法,则显著提高了信道状态信息获取的精度与效率。这些研究不仅深化了我们对大规模MIMO系统内在机制的理解,更为5G及未来通信技术的发展提供了坚实的理论支撑与技术保障。

参考文献

- [1]吴涛.一种适用于大规模MIMO无线通信系统的新颖波束选择算法[J].电信工程技术与标准化,2024,37(06):24-28.
- [2]孙文胜,许俊杰.大规模MIMO系统中基于牛顿迭代和超松弛迭代的WWSE预编码算法[J].电信科学.2019,
- [3]杨祺,王琼,牛芳琳.大规模MIMO中ZC码导频设计的研究[J].信息通信.2018,(4)