

学校编号: 10384

分类号____密级____

学号: 23120121152905

UDC____

厦 门 大 学

硕士学位论文

大规模 MIMO 抗干扰若干技术的研究

The Study on Interference Cancellation of Massive MIMO

张长征

指导老师姓名: 施芝元教授

专业名称: 微电子与固体电子学

论文提交日期: 2015 年 5 月

论文答辩日期: 2015 年 5 月

学位授予日期: 2015 年月

答辩委员会主席: _____

评阅人: _____

2015 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

近年来移动通信快速发展，人们渴望越来越高的传输速率。多输入多输出 (Multiple input Multiple output) 技术可提高频谱利用率而受到密切关注，但传统的MIMO技术很难满足未来数据业务呈指数趋势上升的需求。2010年提出的大规模MIMO概念 (Massive MIMO)，通过深度挖掘空间维度资源，可有效地实现超大容量，超高频谱效率和超高能量效率，是目前研究热点。但大规模MIMO由于其天线数目达几十根甚至上百根，除延续一般MIMO技术的优缺点以外，其抗干扰技术、大数据引入的计算复杂度、快速实现分布式处理算法及新应用场景等问题亟待研究，本文针对大规模MIMO的干扰消除技术进行深入研究。

本文首先研究基于用户调度的大规模 MIMO 联合波束赋形算法，将具有相似协方差矩阵的用户分配到同一组，使不同用户组空间上相对独立，达到不同用户组间的干扰最小化；再采用 ZF 预编码，减少组内用户间的信号干扰。通过两阶段的处理，设计出一种基于 TDD 大规模 MIMO 有效的联合波束赋形方案，可使每次服务的最大用户数不受发射端天线数目的限制，达到有效地提升系统吞吐量。接着通过深入研究垂直空间维度，提出一种基于粒子群优化的 3D 大规模 MIMO 波束赋形算法，针对每个用户的下倾角和功率等相关参数，通过 PSO (Particle Swarm Optimization) 优化算法进行优化，仿真结果表明：由于针对每个用户进行波束赋形，所提出的算法达到更加精确的空域划分，可有效地提升系统容量。最后，将干扰对齐与大规模 MIMO 技术融合，提出一种基于天线选择的大规模 MIMO 干扰对齐算法，选择发、收端天线数目相等进行信号传送，通过激活特定的发射天线组合，利用改进的低复杂度的分布式贪婪选择算法，能够有效地降低射频链路的复杂度，同时，在发端设计有效的预编码矩阵和接收端设计波束赋形矩阵进行信号的干扰对齐，将来自其它用户的干扰信号对齐在尽可能小的子空间内，并利用大部分的空间自由度传送有用信号。仿真结果表明：相比传统的 ZF 预编码算法，所提出的干扰对齐算法在较高信干比情况下可取得良好的系统性能。

今后的研究将重点围绕大规模 MIMO 的导频分配策略，进一步提升系统性能。

关键词：大规模 MIMO 技术，波束赋形，干扰对齐，垂直维度

ABSTRACT

By deeply mining spatial resource, massive MIMO technology can effectively solve the spectrum efficiency and power efficiency in future wireless communication system. While massive MIMO renders many traditional problems in communication theory less relevant, it uncovers entirely new problems that need research: computational complexity, realization of distributed processing algorithms, and new application scenarios. The focus in this paper is to explore system performance based on new application scenarios. The main contents and innovative points are as follows:

Firstly, a two-stage precoding approach based user scheduling is studied in this paper: 1) Design pre-beamforming matrix, the same pre-beamforming matrix is semistatically applied to the users with the same or similar transmit correlation, which forms a user group. 2) Suppress the interferences within each group with zero-forcing algorithm. The serviced users is no longer restricted by the number of transmitter antennas in our proposed algorithm. Simulations show that the system throughput can be effectively improved. Then, by deeply mining vertical dimension resource, a particle swarm optimization (PSO) based beams optimization 3D-algorithm is proposed. An issue of joint downtilts adjustment and power allocation of every beams is addressed to maximize the cell spectral efficiency in this paper. Each user will be allocated one beam and it can bring huge improvements in throughput and radiated energy efficiency. Finally, IA is applied to massive multi-input multi-output system, and an anti-interference method of massive multi-input multi-output based on antenna selection is present. The transmitter and receiver select a set of antennas to transmit signals according to the optimization criterion of maximum channel capacity using an improved distributed antenna selection algorithm with low complexity using an improved distributed antenna selection algorithm with low complexity. After antenna selection, we aligned the interference from different spatial data flow in one direction or into one subspace, leaving most of the spatial degrees of freedom for useful signals. Simulation result show that the proposed schemes offer an approximately

sharply improvement in throughput gain compared to the zero-forcing precoding solution in high SNR.

Pilot contamination reduction in multi-user TDD systems will be a focus in the next work.

Key words: Massive MIMO, beamforming, Interference alignment (IA), Vertical dimension

厦门大学博硕士学位论文摘要库

缩略词汇

3D-MIMO Three-Dimensionality Multiple input Multiple output, 3 维多输入多输出技术

3GPP 3rd Generation Partnership Project, 第三代合作伙伴计划

AAS Active Antenna System, 有源天线

AMPS Advanced Mobile Phone System, 高级移动电话系统

BD Block Diagonalization 块对角化预编码

BLAST Bell Layered Architecture Space-time 空时编码方法

CSI Channel State Information 信道状态信息

CDMA Code Division Multiple Access 码分多址技术

D-BLAST Diagonally- Bell Layered Architecture Space-time 空时编码方法

DOA Direction of Arrival 到达角

DPC Dirty Paper Coding 脏纸预编码

GPRS General Packet Radio Service 通用分组无线电业务

GSM Global System for Mobile Communication 全球移动通信系统

LDC Linear Dispersed Code 线性疏散码

LTE Long Term Evolution 长期演进

LTE-A Long Term Evolution Advance 长期演进增强

MIMO Multiple input Multiple output, 多输入多输出技术

Massive MIMO Massive Multiple input Multiple output 大规模多输入多输出技术

MF Matched Filtering 匹配滤波预编码

MMSE Minimum Mean Square Error 最小均方预编码

MU-MIMO Multi User MIMO 多用户 MIMO

OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing 正交频分复用

PSO Particle Swarm Optimization 粒子群优化算法

RZF Regular Zero Forcing 归一化迫零预编码

| | | |
|----------|--|----------|
| STTC | Space Time Trellis Code | 空时格码 |
| SINR | Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio | 信干噪比 |
| SLNR | Signal-to-leakage-plus-Noise Ratio | 信漏比 |
| SNR | Signal-to-Noise Ratio | 信噪比 |
| STBC | Space Frequency Block Code | 空时分组码 |
| SVD | Singular Value Dicomposition | 奇异值分解 |
| TACS | Total Access Communication System | |
| TDD | Time Division Duplexing | 时分双工 |
| TDMA | Time Divison Mutiple Access | 时分多址技术 |
| TD-SCDMA | Time-Division-Synchronous Code Division Multiple Access, | 时分同步码分多址 |
| WCDMA | Wideband Code Division Multiple Access | 宽带码分多址 |
| ZF | Zero Forcing | 迫零预编码 |

目录

| | |
|---|---------------|
| 第 1 章绪论 | - 1 - |
| 1.1 研究背景及意义 | - 1 - |
| 1.2 多输入多输出技术的发展现状以及未来发展趋势 | - 2 - |
| 1.2.1. 预编码技术..... | 6 - |
| 1.2.2. 资源调度..... | 8 - |
| 1.2.3. 三维 MIMO 技术 | 11 - |
| 1.3 主要成果以及论文结构安排 | - 13 - |
| 第 2 章基于用户调度的大规模 MIMO 联合波束赋形算法 | - 14 - |
| 2.1 研究背景 | - 14 - |
| 2.2 联合波束赋形算法 | - 15 - |
| 2.2.1 系统模型 | 15 - |
| 2.2.2 算法设计 | 16 - |
| 2.3 仿真结果与分析 | - 21 - |
| 2.4 本章小结 | - 22 - |
| 第 3 章基于粒子群优化的 3D 大规模 MIMO 波束赋形算法 | -24- |
| 3.1 研究背景 | -24- |
| 3.2 天线模型 | -25- |
| 3.2.1 线性阵列 | 25- |
| 3.2.2 面阵 | 29- |
| 3.3 3D 波束赋形算法 | -32- |
| 3.3.1 系统模型 | 32- |

| | |
|--|-------------|
| 3.3.2 粒子群优化算法设计 | -34- |
| 3.4 仿真结果及分析 | -36- |
| 3.5 本章小节 | -38- |
| 第 4 章基于天线选择的大规模 MIMO 干扰对齐算法 | -39- |
| 4.1 干扰对齐技术简介 | -39- |
| 4.2 下行干扰对齐算法 | -40- |
| 4.2.1 系统模型 | -40- |
| 4.2.2 干扰对齐算法设计 | -41- |
| 4.3 仿真结果及分析 | -45- |
| 4.4 本章小结 | -47- |
| 第 5 章全文总结 | -49- |
| 5.1 本文主要工作与贡献 | -49- |
| 5.2 未来工作展望 | -49- |
| 致谢 | -51- |
| 参考文献 | -52- |
| 作者简历 | -63- |

CONTENTS

| | |
|--|------------|
| Chapter 1 Introduction..... | 1- |
| 1.1 Background and Singicance..... | 1- |
| 1.2 Research Status of MIMO..... | 3- |
| 1.2.1.Precoding..... | 6- |
| 1.2.2.Resource scheduling..... | 8- |
| 1.2.3.Three dimensionality MIMO..... | 11- |
| 1.3 Main achievements and Paper Organization..... | 13- |
| Chapter 2 A New two-stage precoding approach..... | 15- |
| 2.1 Background..... | 15- |
| 2.2 A two-stage precoding Algorithm..... | 16- |
| 2.2.1.System Model..... | 16- |
| 2.2.2 Algorithm Design..... | 18- |
| 2.3 Simulated Analysis..... | 22- |
| 2.4 Conclusiton..... | 23- |
| Chapter 3 A New 3D-beamforming Algorithm Based on PSO-24- | 24- |
| 3.1 Background..... | 24- |
| 3.2 Array Model..... | 25- |
| 3.2.1 Linear Array Model..... | 25- |
| 3.2.2 Plane Array Model..... | 29- |
| 3.3 3D-beamforming Algorithm..... | 32- |
| 3.3.1 System Model..... | 32- |
| 3.3.2.Algorithm Design Based on PS0..... | 34- |
| 3.4 Simulated Analysis..... | 36- |
| 3.5 Conclusion..... | 38- |
| Chapter 4 A New IA Algorithm Based on Antenans Selection.-39- | 39- |
| 4.1 Introduction of IA technology..... | 39- |
| 4.2 Downlink IA Algorithm..... | 40- |

| | |
|--|-------------|
| 4.2.1 System Model..... | -40- |
| 4.2.2 IA Algorithm Design..... | -42- |
| 4.3 Simulated Analysis..... | -46- |
| 4.4 Conclusion..... | -48- |
| Chapter 5 Conclusion and Future Work..... | -49- |
| 5.1 Main Achievement and Conclusion..... | -49- |
| 5.2 Future work..... | -49- |
| Acknowledgements..... | -51- |
| References..... | -52- |
| Resume..... | -63- |

第 1 章绪论

1.1 研究背景及意义

近年来,无线移动通信快速发展,人们渴望更高的传输速率的呼声越来越响。然而,在无线资源日趋紧张的情况下,如何有效地利用频谱率等系统资源成为了一个非常具有实际意义的研究课题。近年来,多输入多输出(Multiple input Multiple output)技术能够高效提高频谱利用率而备受关注,但传统意义上的 MIMO 技术很难满足未来呈指数趋势上升的数据需求。2010 年底,贝尔实验室科学家 Thomas L. Marzetta 提出了大规模 MIMO 概念(Massive MIMO),又称作 Large scale Antenan Systems、Very Large MIMO、Hyper MIMO、Full Dimenson MIMO、AGROS,其在实现超大容量,超高频谱效率,超高能量效率方面表现出巨大优势。

近年来,无线移动通信技术取得了快速的发展,使得人们期望在任意的时间(whenever)、任意的地点(wherever)、与任意的人(whoever)发生任意数据信息交流”的“个人通信”逐渐变为了可能。在后 3G 时代,不断出现的交互式多媒体新业务极力催促着新的关键技术革新,以正交频分复用技术(Orthogonal Frequency Divison Multiplexing ,OFDM)、MIMO 技术为代表的新技术和宽带无线接入的概念的出现。2005 年 3GPP(3rd Generation Partnership Project)组织 LTE(Long Term Evolution)系统标准化目标是实现 100Mbit/s 的峰值通信速率[1]。2008 年,为了满足未来基于大数据应用的和基于不同数据业务的传输速率要求,国际电信联盟提出发展峰值速率超过 1Gbit/s 的第四代移动通信技术 IMT-Advanced(4G)的要求,在高速移动的通信环境中(一般大于 120Km/h),下行峰值传输速率可以达到 100Mbit/s,在低速的环境中或者室内环境中可以实现 1Gbit/s 的下行峰值数据传输速率[2],随后出现了载波聚合、分布式天线、中继、以及基站协作等技术。目前,国内外已开始建设 4G 通信网络,2013 年 12 月 4 日,中国三大运营商获得 4G 业务牌照标志着中国的电信行业开始迈进 4G 时代。全球 4G 建设部署方兴未艾,然而 5G 研究开发却悄然开启大幕。5G 将是

现有无线接入技术（包括 2G[3]、3G[4-7]、4G[2] 和 WiFi）的技术融合及新技术的补充的集成，是一个虚拟化架构的融合网络。以融合和统一为标准，提供任何时间、任何地点与任何人与任何物之间高速、安全和自由的联通。5G 系统的研发将面向 2020 年移动通信的需求，包含新型网络架构、无线组网、无线传输、大规模 MIMO 技术、新型多址、新型天线以及全频谱接入等关键技术。其中新型网络架构是基于 SDN、NFV 和云计算等先进技术，朝扁平化和虚拟化方向，具备更强大的功能，是一个功能强大的基站叠加一个大服务器集群，可实现以用户为中心的更灵活、智能、高效和开放的 5G 新型网络，对满足 5G 系统容量和速率需求将起到重要的支撑作用；无线组网采用超密集组网，通过增加基站部署密度，系统容量可提升数百倍，是满足 5G 千倍容量增长需求的最主要手段之一；新型多址技术通过发送信号的叠加传输来提升系统的接入能力，可有效支撑 5G 网络千亿设备连接需求；新型天线技术通过 MIMO 技术充分开发空间资源，利用多个天线实现多发多收，在不需要增加频谱资源和天线发送功率的情况下，可以成倍地提高信道容量；全频谱接入技术通过有效利用各类频谱资源，可有效地缓解 5G 网络对频谱资源的巨大需求。据预测，2020 年的数据流量将比 2010 年增长 1000 倍，5G 将带给用户 10Gbit/s 的超高速传输和超高容量、超大带宽、超密站点、超可靠性及随时随地可接入。因此，未来的 5G 将是一个广带化、泛在化、智能化、融合化、绿色节能的网络，而以 5G 为基础的移动宽带网络的未来发展方向是打造“移动智能终端+宽带+云”平台。

1.2 多输入多输出技术的发展现状以及未来发展趋势

在通信标准的演进过程中，由于 MIMO 技术能够有效地提升数据传输质量、实现数据高速率传输、提升频谱利用率，被人们认为是支撑后 3G 时代以及未来移动通信标准的关键技术。1908 年，马可尼 (Marconi) 首先提出了多天线技术，20 世纪 70 年代，相关学者提出 MIMO 技术可用于通信系统中；20 世纪 90 年代，AT&TBell 实验室 (Bell Lab) 的科学家完成了 MIMO 技术在无线通信系统应用的奠基工作；1995 年，Telatar I. E. [8] 对多输入多输出技术的信道容量进行了理

论证明与分析, 奠定 MIMO 技术的信息论基础; 1996 年, 贝尔实验室的 Foschini G. J 最先提出了 BLAST (Bell Layered Architecture Space-time) 空时编码方法, 同年, Foschini G. J 提出了 D-BLAST (Diagonally-Bell Layered Architecture Space-time) 空时编码方法[9], 它的每一层在时间与空间上均呈对角线形状; 而后, 一种检测过程简单的空时编码方法[10]也最先由贝尔实验室提出。贝尔实验室诸多科学家的大量工作标志了对 MIMO 技术的研究以及实验应用的正式开端, 从此, 无线移动通信领域揭开了研究 MIMO 技术热潮的序幕。

MIMO 技术在通信链路的接收端和发射端布置多根天线, 以利用空间资源, 将多径效应这一不利因素转化成相对有利的因素, 使得在不增大系统带宽以及发射功率的条件下, 通过空间复用较大地提升系统容量或者通过增加天线分集度达到改善通信链路的传输质量的目的[11][12]。当前, 多输入多输出技术主要研究重点具体包括:

1) MIMO 信道建模: MIMO 信道模型具体包括: 基于信道冲击响应的信道模型[13][14], 基于地理特征的信道模型[17], 基于收发衰落相关特征的信道模型[18][19][20], 参数化统计建模[21][22][23][24][25], 基于射线跟踪的信道模型[15][16]。

2) MIMO 信道容量分析: 具体包括发射端已知信道信息状态时的容量推导以及发射端未知获取信道信息状态时的容量推导。

3) 基于 MIMO 的空时编码/解码方法: 空时编码按照特性的规则对数据进行信道编码, 之后将编码数据映射到多天线上发射出去, 可以达到有效地抗衰落目的。空时编码科研成果具体包括: 空时格码 (Space Time Trellis Code, STTC) [26]、对角代数空时码[31]、空时分组码 (Space Frequency Block Code, STBC) [27][28]、差分/酉空时调制 (Different /Unitary Space-Time Modulation) [29]、线性疏散码 (Linear Dispersed Code, LDC) [30] 以及分层空时结构[32]等。

4) 运用在 MIMO 发射端、接收端的关键技术, 如信道估计[33]、信道均衡、预编码、多用户检测等。

表 1-1 802. 11n, 802. 11ac, 802. 11ad 三代标准的参数对比[36]

| | 802. 11n | 802. 11ac | 802. 11ad |
|-------------|-------------|-----------|--------------------|
| Throughput | 600Mbit/s | 3.2Gbit/s | Up to 7Gbit/s |
| Coverage | Home, 70m | Home, 30m | Home, <5m |
| Freq. Band | 2.4GHz/5GHz | 5GHz | 2.4GHz/5GHz/60GHz |
| Antennas | 4*4MIMO | 8*8MIMO | >10*10MIMO |
| Application | Data, Video | Video | Uncompressed Video |

表 1-2 LTE-A、802. 16m 标准的参数对比[37][38]

| | LTE-A | IEEE. 802. 16m |
|---|-----------------------------|---|
| Maximum rate (reverse link) | 1Gbit/s | 1Gbit/s |
| Width | 1.25MHz-25MHz | 5MHz-20MHz, maximum 100MHz |
| Antennas | Support 4*4MIMO, 8*8MIMO | Support1, 2, 4, 8at the base Support1, 2, 4at the mobile |
| Modulation mode | QPSK, 16QAM, 64QAM | BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM |
| Transmission technology and access technology (reverse link) | OFDMA | OFDMA |

近年来, MIMO 技术得到长足发展, MIMO 技术不断被规定为诸多协议规范的关键技术。2008 年, 3GPP 组织发布的 Release-8 标准版本首次引入基于 MIMO 的无线接口技术, LTE[34] 也在此版本中被提出, 2011 年发布的 Release-10 提出了 LTE-A 的概念[35], 目前 3GPP 组织正在制定 Release-12 以及后续版本。2009 年, IEEE 批准 802. 11n 引入 MIMO 技术, 改善已有的 802. 11b\g 网络的性能, 使得传输速率可达到 600Mbit/s, 802. 11ac, 802. 11ad 不断发展 MIMO 技术的运用,

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.