



北 京 科 技 大 学

## 本科生毕业设计(论文)选题报告

题 目: MIMO-OFDM 系统中  
信道估计算法的实现与分析

学 院: 计算机与通信工程学院

专 业: 通信工程

姓 名: 成江波

学 号: 41924275

指导教师签字: \_\_\_\_\_

2023 年 03 月 19 日



## 目 录

1 课题背景及研究意义.....	1
1.1 课题背景 .....	1
1.2 研究意义 .....	1
2 文献综述.....	3
2.1 系统与算法概述 .....	3
2.1.1 MIMO-OFDM 技术 .....	3
2.1.2 信道估计算法 .....	4
2.2 国内外研究现状 .....	4
3 研究内容、预期目标及研究方法.....	7
3.1 研究内容 .....	7
3.2 预期目标 .....	7
3.3 研究方法 .....	7
4 研究进度安排.....	8
参考文献.....	9



## 1 课题背景及研究意义

### 1.1 课题背景

移动通信系统从 20 世纪 80 年代诞生以来，为信息社会的发展做出了卓越的贡献，极大地促进了商业、工业、金融、交通、安全等诸多行业的信息化革命，并带动了媒体、娱乐、社交等产业的繁荣发展。移动通信在近四十多年的时间内经历了五代演进。从第一代移动通信系统（1G），采用频分多址(Frequency Division Multiple Access, FDMA)的通信方式，仅提供模拟话音业务，到第四代 LTE(Long Term Evolution)移动通信系统（4G），采用正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术，并支持移动宽带(Mobile Broadband ,MBB)业务，通信的方式和通信的业务变得越来越丰富，再到如今的第五代通信系统（5G），服务的对象不再只是人与人之间的通信，汽车的自动驾驶，家具的智能化，远程医疗，以及智慧农业，智慧工业等应用都需要无线通信和移动通信的支持。人们在享受便捷和高效的信息服务的同时，也对通信系统的峰值速率、流量密度、可靠性和有效性等各项指标提出了更高的要求。

### 1.2 研究意义

随着信息化时代的到来，人们对通信的要求越来越高，而现有的通信技术在信息传输及频谱利用率等方面还存在着不足，在有限的频谱资源中实现大容量的高速率的数据传输是通信行业研究的目标。MIMO(Multiple-Input Multiple-Output)技术，可以在不增加带宽的情况下，成倍地提高通信系统的容量和频谱利用率。它可以定义为发送端和接收端之间存在多个独立信道，天线单元之间存在充分的间隔。MIMO 技术通过利用 MIMO 信道的空间复用增益和空间分集增益提高信道的容量，提升信道的可靠性，降低误码率。OFDM 技术，即正交频分复用技术，是多载波调制的一种，OFDM 技术通过将信道分成若干个正交子信道，将高速数据信号转换成并行的低速子数据流，调制到每个子信道上进行传输，每个子信道的带宽小于信道的相干带宽，每个子信道可以看作是平坦性衰落信道，因此 OFDM 技术具有良好的抗多径衰落能力。而两者技术的结合，MIMO-OFDM 技术，作为 4G 关键技术，一经出现便引起了通信界的一番轰动。MIMO-OFDM 技术通过 MIMO 和 OFDM 技术的结合，提高了系统容量和数据的传输速率，满足了不少用户的需求。

如今 5G 通信系统基于此技术，发展了大规模 MIMO 技术与 OFDM 相结合，系统的性能得到了很高的提升。

尽管 MIMO-OFDM 技术有诸多的优点，但还是需要不断的优化、改进与完善，基于 MIMO-OFDM 系统下的信道估计就是其中一项。对于 OFDM 系统而言，虽然子载波相互正交，但在信号传输的过程中，会受到信道的干扰，每个子载波可能会发生幅度和相位的变化，而在接收端进行相干解调时，需要知道完整的信道状态信息，因此在接收端很有必要对信道进行估计，对信道信息获取的越精确，系统的其他算法，如预编码算法获得的效果才越好。所以信道估计的准确性对系统的性能提升有着十分重要的作用，对信道估计的研究具有十分重要的意义。

## 2 文献综述

### 2.1 系统与算法概述

在 MIMO-OFDM 系统中,信道估计是非常重要的一个步骤。在信道的影响下,从发送天线传输的信号会通过多条路径到达接收天线,导致接收信号中出现多径衰落的现象。这些多条路径的信号会产生干扰和混叠,从而降低了接收信号的质量,影响了系统的性能。因此,需要进行信道估计以消除这些影响。在 MIMO-OFDM 系统中,信道估计的目的是确定每个子载波上的信道状态信息(Channel State Information, CSI),以便接收端可以将接收信号进行最优的合并和解调。具体而言,信道估计可以用于:消除多径干扰,通过估计每个子载波上的信道响应,可以消除多径干扰,提高系统的抗干扰能力;提高解调性能,通过估计 CSI,可以实现最优的接收器设计,提高系统的解调性能和误码率性能。实现空间多路复用,通过估计每个天线之间的信道响应,可以实现空间多路复用,从而提高系统的数据传输速率和频谱效率。因此,信道估计是 MIMO-OFDM 系统中非常重要的一步,它能够帮助系统实现高质量的数据传输和可靠的通信。

#### 2.1.1 MIMO-OFDM 技术

MIMO 的基本思想就是在收发两端均使用多根天线,通过天线增益来抵抗信道的衰落,提高系统的信道容量,降低系统的误码率。MIMO 技术通过将信息比特流经过一系列调制处理形成多个并行子数据流,之后将这些数据通过多根天线进行发射,经过信道被多根接收天线接收。由于收发天线间相互独立,故可以把 MIMO 视为多个并行的子信道,对数据同时进行传输,使得传输速率大大提高。OFDM 是一种高效的调制技术,其主要思想为,将信道分成若干正交子信道,将高速数据信号转换成并行的低速子数据流,然后调制到每个子信道上进行传输。正交信号可以通过在接收端采用相关技术来分开,这样可以减少子信道之间的相互干扰 ICI。每个子信道上的信号带宽小于信道相干带宽,因此每个子信道上的可以看成平坦性衰落,从而可以消除 ISI。

两类技术结合形成 MIMO-OFDM 系统,既可以提高系统容量,又可以抵抗信道中存在的干扰,该系统模型如图 2.1 所示。

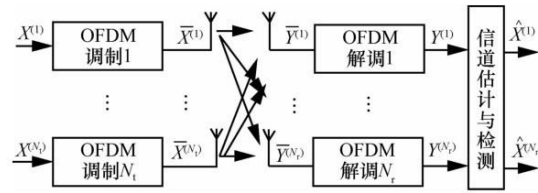


图 2.1 MIMO-OFDM 系统模型

### 2.1.2 信道估计算法

信道估计算法可以分为参数化估计和非参数化估计。参数化估计是对信道模型中的衰落幅度、时延等具体参数估计。非参数化估计是对某一频域或时域信道相应进行估计。非参数估计有多种算法，即盲信道估计、半盲信道估计、非盲信道估计。盲信道估计不需要参考信号，直接根据接收信号的统计信息来得到信道的 CSI，该方法虽然性能较好，但是复杂度较高，不容易实现。非盲信道估计是指在发送端将根据不同的信道选择已知的图案进行传输，然后在接收端对这些导频符号(或训练符号)进行处理，然后利用合适的估计算法进行估计得到导频处的信道频率响应(Channel Frequency Response, CFR)，最后通过插值算法得到整个信道的 CFR。该方法计算复杂度适中，且易于实现，能够被广泛地应用于 MIMO-OFDM 系统中。半盲信道估计属于两种算法的折中，不仅需要少量的导频，还需要信道的统计信息。本文主要对非盲信道估计基于导频的信道估计算法进行研究。根据导频排列的不同，导频结构可以分为三类：块状导频、梳状导频、格状导频。块状导频是一种在时域中采用均匀分布的导频结构，其中导频符号被平均分布在每个数据块的头部。块状导频简单易实现，但在频域中可能出现频率选择性衰落的问题。梳状导频是一种在频域中采用均匀分布的导频结构，其中导频符号均匀地分布在正交频域中的每个子载波上。梳状导频易于实现和计算，但可能出现导频间的干扰问题。格状导频是一种在时域和频域中都采用非均匀分布的导频结构，其中导频符号被分布在一个规则的网格上。格状导频可以有效地减少导频间的干扰，但需要更复杂的信道估计算法和更高的计算开销。

## 2.2 国内外研究现状

信道估计是对收发天线之间的信道模型中的幅度、角度和时延具体参数或者对频域(或时域)的信道响应进行估计。在获得 CSI 的信道估计算法中，以性能优越、复杂度低和易于实现为目标。其中，国内外广大学者对信道估计进行研究，提出了一系列性能优良的估计算法。



几年之前, 研究学者最先提出了一种应用在 SISO-OFDM 系统中基于导频的估计方法<sup>[1]</sup>, 后面经过无数国内外学者的研究, 在 SISO-MIMO 系统的基础上, 提出许多基于 MIMO-OFDM 系统的信道估计方法。该类算法大致可以分为以下几类: 一种是基于频域的估计, 在文献[2]中, 作者研究了 OFDM 系统中快速时变频率选择性衰落信道下的最小二乘 (LS) 信道估计技术, 提出的保持梳状导频布置的方法能够准确估计信道脉冲响应(CIR)并有效跟踪 CIR 的快速时间变化, 从而实现较低的误差概率<sup>[2]</sup>。文献[3]对 OFDM 系统的时域信道估计和频域信道估计进行了比较, 推导出了最小均方误差 (MMSE) 估计算法, 结果表明, 使用线性插值的方法, 时域的 MSE 小于频域的 MSE<sup>[3]</sup>。但是由于 MMSE 算法涉及矩阵求逆的计算, 需要巨大的运算量, 复杂度达到  $O(N^3)$ 。针对这一问题, 许多学者提出了以 MMSE 估计算法为基础的改进算法, 文献[4] 采用奇异值分解 (SVD) 来代替 MMSE 算法中的矩阵求逆, 通过研究信道自相关矩阵, 用小的子矩阵进行代替, 从而实现算法复杂度的降低<sup>[4]</sup>, 文献[5]也指出了采用奇异值分解可以降低系统的误码率, 并通过仿真平台进行了算法的仿真, 证明了 SVD 分解能够提升系统的性能<sup>[5]</sup>。该方法虽然很大程度上降低了计算量, 但是也造成了部分性能的损耗。所以文献[6] 针对 MMSE 算法的复杂度, 提出了另一种优化算法, 文章研究出了一种基于已知的 CSI 和动态无线信道的时间属性方法来共同更新信道相关矩阵的方法<sup>[6]</sup>, 该方法也实现了算法复杂度的降低。文献[7] 从其他角度出发, 通过将均衡和估计过程结合起来, 可以实现比单纯的估计更优的效果<sup>[7]</sup>, 从而实现部分 BER 性能的提升。第二种是基于变换域的估计方法, 主要有基于离散傅里叶变换(DFT)域的信道估计算法<sup>[8]</sup>。该方法可以看作是 LS 和 MMSE 估计算法的一种折中, 其性能优于 LS 估计方法, 复杂度低于 MMSE 估计方法, 并且在实际应用中易于实现。DFT 估计方法是首先用 LS 估计算法得到 CFR, 然后通过 IDFT 变换到时域, 在时域进行去噪处理, 最后将噪声处理后的信道冲激响应(CIR)通过 DFT 变换到频域。当 CIR 为非间隔采样时, 等效的离散信道脉冲响应在时域中分散, 这样会造成能量泄露。针对这个问题, 文献[9] 在 DFT 算法的基础上, 提出了一种频域加窗分析方法, 研究了基于 STBC 算法的 MIMO-OFDM 系统的信道估计问题<sup>[9]</sup>, 该算法可以在复杂度减半的情况下实现相同的性能。文献[10] 根据现有的 MIMO-OFDM 信道估计算法无法实现估计精度与计算复杂度之间的最优均衡等问题<sup>[10]</sup>, 提出了一种基于无线信道的时间相关和稀疏特性的自适应时间相关的信道估计技术。与以上方法不同的是, 文献[11]为了提高 MIMO-OFDM 系统中信道通信的可靠性, 提出了一种适用于时变多径效应情况下的信道估计算法。在本

研究中, 基于最优导频的最小二乘(LS)方法得到信道估计, 然后利用自回归(AR)模型预测和决策导向(DD)进一步改善粗糙估计的性能<sup>[11]</sup>。近年来, 压缩感知(Compressed Sensing, CS)技术为解决信道估计问题提供了一种新的思路, 文献[12]针对在估计快速时变信道时导频开销难以降低等问题, 在基于压缩感知理论的基础上, 设计了迭代反馈估计方法。该方法在预估计的基础上, 通过反复迭代不断修正感知矩阵以及测量方程以提高估计结果的精确性。<sup>[12]</sup>

### 3 研究内容、预期目标及研究方法

#### 3.1 研究内容

本文首先针对 MIMO-OFDM 系统展开研究,学习 MIMO 技术和 OFDM 调制,研究无线信道的衰落特征,分析无线信道的基本原理与特性,分析 MIMO 信道模型,对不同场景下的衰落信道进行学习与仿真实现,学习 OFDM 技术,研究 OFDM 系统的信息传输,以及 OFDM 中保护间隔的作用,对 OFDM 系统进行仿真实现,研究多载波传输的基本方案,分析 MIMO-OFDM 系统的性能等。

其次研究导频的基本性质,分析导频的基本结构和放置方案,研究 MIMO-OFDM 系统中基于训练符号的最小二乘信道估计算法和最小均方误差估计算法,以及基于离散傅里叶变换的信道估计算法,推导算法中涉及的公式,分析三个估计算法的基本原理,进行三种估计算法的仿真实现,分析三种估计算法的性能,对比各个算法的优缺点。

#### 3.2 预期目标

预期对 MIMO 技术和 OFDM 技术进行理解与掌握,明确 OFDM 传输原理,理解 OFDM 中循环前缀的作用,理解 OFDM 抗多径的原理。对三种信道估计算法(LS、MMSE、DFT)进行理解与掌握,能够对三种估计算法进行仿真实现,并对信道估计的性能进行分析。

#### 3.3 研究方法

在进行研究之前,明确研究的内容,查阅相关文献,熟悉目前的研究现状与研究的背景。之后阅读相关的专业论文,对研究的基础知识进行学习与掌握。之后,通过对问题的深入研究,探索算法的内在本质。

## 4 研究进度安排

第 1 周一第 3 周：查阅相关资料和文献，撰写开题报告；

第 4 周一第 6 周：查阅文献，学习 MIMO-OFDM 系统，学习 MIMO 信道模型，学习 OFDM 调制技术，翻译英文文献；

第 7 周一第 10 周：学习 MIMO-OFDM 信道估计相关算法，利用 MATLAB 软件进行已有算法的仿真与实现；

第 11 周一第 15 周：对比不同信道估计算法的性能，对性能进行分析，总结归纳并撰写毕业论文，准备论文答辩；

第 16 周：论文答辩。

学生本人签字：

年 月 日

## 参考文献

- [1] Hsieh M H, Wei C H. A low-complexity frame synchronization and frequency offset compensation scheme for OFDM systems over fading channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1999, 48(5):1596-1609.
- [2] J. -C. Lin, "Least-Squares Channel Estimation for Mobile OFDM Communication on Time-Varying Frequency-Selective Fading Channels," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 57, no. 6, pp. 3538-3550, Nov. 2008, doi: 10.1109/TVT.2008.919611.
- [3] Suh C, Hwang C S, Choi H. Comparative study of time-domain and frequency-domain channel estimation in MIMO-OFDM systems[C]// Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2003. Pimrc: IEEE, 2003:1095-1099.
- [4] Wang Subin, Hu Chunjing, Peng Tao, et al. A low complexity channel estimation approach of LTE downlink system[C]// IEEE, International Conference on Communication Technology. Chengdu: IEEE, 2012:143-147.
- [5] Feng Qingsheng, Li Hong. The research and realization of SVD algorithm in OFDM system[C]//International Congress on Image and Signal Processing. Yantai: IEEE, 2010:4467-4471.
- [6] Almamori A, Mohan S. Improved MMSE channel estimation in massive MIMO system with a method for the prediction of channel correlation matrix[C]//Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC), Las Vegas:
- [7] Anupama P, Pillai S S. MMSE channel estimation with LMS equalization for SC FDE systems[C]// International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT). Kumaracoil: IEEE, 2016:134-138.
- [8] 乔厚财,刘光祖,邹骏,孙琳琳.基于DFT的OFDM无线通信系统信道估计算法研究[J].电子设计工程,2023,31(01):152-156+162.
- [9] Li Guomin, Liao Guisheng. A Pilot Pattern Based Algorithm for MIMO-OFDM Channel Estimation[C]// International Symposium on Computer, Consumer and Control. Xi'an, 2016, 985-989.
- [10] 张明通. 基于自适应时间相关的 MIMO-OFDM 系统稀疏信道估计研究 [D].山东大学,2021.DOI:10.27272/d.cnki.gshdu.2021.000903.

- [11] C. Liu, C. Chen, J. Lu and X. Dai, "A New Channel Estimation Algorithm for Time-Varying Multi-Path Channel in MIMO-OFDM Systems," 2019 IEEE 19th International Conference on Communication Technology (ICCT), Xi'an, China, 2019, pp. 69-74, doi: 10.1109/ICCT46805.2019.8947205.
- [12] 刘翼. 基于压缩感知的 OFDM 系统快速时变信道估计[D].北京理工大学,2015.
- [13] Shenyang Xiao et al. Joint Mutual Coherence and Total Coherence Pilot Design for OFDM Channel Estimation.[J]. IEEE Access, 2019, 7 : 144536-144547.
- [14] Linglong Dai,Zhaocheng Wang,Zhixing Yang. Time-Frequency Training OFDM with High Spectral Efficiency and Reliable Performance in High Speed Environments.[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2012,30(4).
- [15] Azza Alamir and Hamada Esmail and Hany S. Hussein. Efficient Optical MIMO-OFDM Channel Estimation Based on Correntropy Compressive Sensing[J]. Wireless Personal Communications, 2020, 115(3) : 1-17.
- [16] Vincent Savaux and Yves Louët. LMMSE channel estimation in OFDM context: a review[J]. IET Signal Processing, 2017, 11(2) : 123-134.
- [17] Ding, Wen bo, Fang Yang, Wei Dai and Jian Song. "Time-Frequency Joint Sparse Channel Estimation for MIMO-OFDM Systems." IEEE Communications Letters 19 (2015): 58-61

## 指导教师意见

指导教师签字：

年 月 日





---