### 密级： 保密期限：



**硕士学位论文**



**题目： 无线通信系统中MIMO**

**检测算法的研究**

**学 号： 2013110145**

**姓 名： 代 振**

**专 业： 通信与信息系统**

**导 师： 景晓军**

**学 院：信息与通信工程学院**

**2016年 3月 1日**

独创性（或创新性）声明

本人声明所呈交的论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京邮电大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

本人签名： 日期：

关于论文使用授权的说明

学位论文作者完全了解北京邮电大学有关保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属北京邮电大学。学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许学位论文被查阅和借阅；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，可以允许采用影印、缩印或其它复制手段保存、汇编学位论文。（保密的学位论文在解密后遵守此规定）

保密论文注释：本学位论文属于保密在 年解密后适用本授权书。非保密论文注释：本学位论文不属于保密范围，适用本授权书。

本人签名： 日期：

导师签名： 日期：

无线通信系统中MIMO检测算法的研究

摘 要

正交频分复用(OFDM)技术因其具有极高的频谱利用率和较强的抗多径衰落、抗窄带干扰能力，且采用快速傅里叶变换和反变换的数字实现方式，受到众多研究人员的广泛关注。OFDM信道估计技术作为通信系统接收端进行均衡、解调和检测的基础，直接影响OFDM系统的整体通信性能。

本文提出用LMMSE准则恢复BEM基系数的方法，提高了信道估计的精度，并将改进的BEM估计算法应用于快变稀疏信道的估计，有效降低了计算复杂度，并提高了系统的频谱利用率。在高速移动条件下，由于多普勒频移的存在，会使信道的冲击响应快速的变化，在这种条件下，由于信道冲击响应一个OFDM符号持续时间中发生显著变化，传统的信道估计方法已经失效。对于快变信道，应用扩展模型(BEM)对信道进行建模是一种常用的估计方法。

本文提出两种根据信道变化速率快速生成最优基的方法，其中包括利用多普勒频移快速生成DPSS基，以及利用信道统计特性快速生成DKL基的方法，仿真结果表明，这两种方法可以有效提高估计的准确性同时简化估计过程。

本文针对稀疏这一普遍的信道特性，在BEM建模的基础上，结合双选信道，提出了利用信道稀疏性使用少量导频完成高精度双选信道估计的估计算法。理论推导表明，该方法可以有效的降低运算复杂度并规避噪声干扰，同时对各种信道表现出极强的适应性。实际的无线通信系统中，信道一般呈现出稀疏特性，即信道抽头的个数远小于信道时延拓展单位的个数。这种稀疏信道在高速通信和超宽带通信系统中尤为明显。在信道估计过程中如果忽略信道的稀疏特性，根据信道的最大抽头数进行导频排布及估计，则估计的准确度和效率都会受到影响。

关键词：OFDM 稀疏信道估计 导频簇 BEM

RESEARCH OF PILOT-AIDED DOUBLY SELECTIVE CHANNEL ESTIMATION IN OFDM SYSTEM

ABSTRACT

The OFDM has been widely researched and developed due to its high efficiency of the frequency usage, ability to decrease the influence of the multi-path fading and the resisting of the narrowband interference. And the use of the Fast Fourier Transform (FFT) and the Inverse Fast Fourier Transform (IFFT) to realize the digital implementation makes it more popular. The channel estimate influences the overall performance of the OFDM system as the basic part of the receiver to do the equalization, demodulation and detector.

The rapidly change of the impulse response because of the Doppler effects in fast moving environment makes the time of the OFDM symbols last never a constant time, so the traditional channel estimate method isn’t work now. The basis expansion model (BEM) is frequently used for the time-varying channel estimation. This paper proposes a way to restore the coefficients of the BEM basis by using the LMMSE principle. The new BEM with the help of the LMMSE can improve the efficiency of frequency usage as well as make the work less complexity when it apply to the time-varying sparse channels.

This paper proposes two methods, the DPSS basis constructed by the Doppler frequencies and DKL basis created by the channel estimation, to faster achieve the optimal basis according to the variation rate in the double selective channels. The simulation results illustrates the two methods can easily improve the veracity of the channel estimation.

In the real communication system, the channels are always sparse, that is the number of the taps is far less than the number of time spreading. The sparse channels happen a lot especially in the high-speed or the super wide bandwidth communication system. If we do the channel estimation according to the maximum number of the taps without the consideration of the sparse, the accuracy and the efficiency of the whole estimation process would be impacted. This paper fully considers the sparse situation and combines the double channel selection based on the BEM to best use of the feature of the sparse and little of pilot and achieve the high accurate double channel selection. It has been proved that the new scheme can reduce the complexity of the computation and reduce the influence of the noise interference, what’s more, it shows great adaptability.

KEY WORDS: OFDM sparse channel esitimation pilots cluster BEM.

目录

[第一章 绪论 2](#_Toc413683156)

[1.1 研究背景及意义 2](#_Toc413683157)

[1.1.1移动通信的发展历程 2](#_Toc413683158)

[1.1.2 OFDM 技术 2](#_Toc413683159)

[1.1.3 本课题的研究意义 2](#_Toc413683160)

[1.2 信道估计研究现状 2](#_Toc413683161)

[1.2.1 信道估计的主要分支 2](#_Toc413683162)

[1.2.2基于导频的信道估计 2](#_Toc413683163)

[1.3 本文主要工作及创新点 2](#_Toc413683164)

[1.3.1 主要研究内容 2](#_Toc413683165)

[1.3.2创新点 2](#_Toc413683166)

[1.3.3论文结构 2](#_Toc413683167)

[第二章 无线衰落信道与OFDM系统 2](#_Toc413683168)

[2.1 无线衰落信道特性 2](#_Toc413683169)

[2.1.1 大尺度衰落 2](#_Toc413683170)

[2.1.2 小尺度衰落 2](#_Toc413683171)

[2.1.3 无线信道模型 2](#_Toc413683172)

[2.2 OFDM系统 2](#_Toc413683173)

[2.2.1 多载波调制 2](#_Toc413683174)

[2.2.2 OFDM基本原理 2](#_Toc413683175)

[2.2.3 OFDM系统实现 2](#_Toc413683176)

[2.2.4 OFDM系统优缺点 2](#_Toc413683177)

[2.3 本章小结 2](#_Toc413683178)

[第三章 OFDM系统中的传统信道估计技术 2](#_Toc413683179)

[3.1 导频及导频的排布方式 2](#_Toc413683180)

[3.1.1 一维导频排布 2](#_Toc413683181)

[3.1.2 离散二维导频排布 2](#_Toc413683182)

[3.1.3 导频簇及均匀排布 2](#_Toc413683183)

[3.2 导频处信道响应的估计 2](#_Toc413683184)

[3.2.1 LS估计 2](#_Toc413683185)

[3.2.2 MMSE估计 2](#_Toc413683186)

[3.2.3 LMMSE估计 2](#_Toc413683187)

[3.2.4 奇异值分解算法 2](#_Toc413683188)

[3.2.5 BEM模型估计算法 2](#_Toc413683189)

[3.3 恢复完整信道信息的方法 2](#_Toc413683190)

[3.3.1 基于线性插值的估计方法 2](#_Toc413683191)

[3.3.2基于DFT时域内插算法 2](#_Toc413683192)

[3.3.3基于BEM的时域信道冲击响应恢复算法 2](#_Toc413683193)

[3.4 本章小结 2](#_Toc413683194)

[第四章 基于BEM的双选择性信道估计及其改进 2](#_Toc413683195)

[4.1 基于BEM的OFDM系统模型及双选择性信道特性 2](#_Toc413683196)

[4.2 OFDM系统中双选择性信道估计方法及其改进 2](#_Toc413683197)

[4.2.1OFDM-CE 中使用BEM建模信道及估计方法 2](#_Toc413683198)

[4.2.2 基于BEM的OFDM信道估计逆转换方法及其改进 2](#_Toc413683199)

[4.2.3 基于LMMSE的逆转换算法仿真结果及分析。 2](#_Toc413683200)

[4.2.4 快速生成高精度基函数的方法改进 2](#_Toc413683201)

[4.2.5 快速生成高精度基函数方法改进仿的仿真结果与分析 2](#_Toc413683202)

[4.4 本章小结 2](#_Toc413683203)

[第五章 基于BEM的双选择性稀疏信道估计及其改进 2](#_Toc413683204)

[5.1 基于BEM的双选稀疏信道的两步式探测估计算法 2](#_Toc413683205)

[5.1.1 稀疏信道与信道结构的探测方法 2](#_Toc413683206)

[5.1.2 探知信道结构后的优化BEM估计算法 2](#_Toc413683207)

[5.1.3 基于BEM的双选稀疏信道两步式探测估计算法的复杂度分析 2](#_Toc413683208)

[5.2 基于BEM的双选择性稀疏信道探测估计仿真与结果分析 2](#_Toc413683209)

[5.3 本章小结 2](#_Toc413683210)

[第六章 总结及展望 2](#_Toc413683211)

[6.1 论文工作总结 2](#_Toc413683212)

[6.2 后续工作展望 2](#_Toc413683213)

[参考文献 2](#_Toc413683214)

[致谢 2](#_Toc413683215)

[作者在读期间的研究成果 2](#_Toc413683216)

# 绪论

## 研究背景及意义

随着现代信息社会的飞速发展，移动通信已成为现代综合业务通信网中不可缺少的一部分。移动通信是指通信双方有一方或两方处于运动中的通信。移动通信要保证移动过程中的正常通信，因此它必须是无线通信或无线通信与有线通信的结合。无线信道具有极高的复杂性，在这种环境下获取信号难度较高。

## 1.2 国内外研究现状

OFDM信道估计的算法有多种分类，按照是否借助于参考信号进行估计，从算法先验信息的角度，则可分为盲估计，半盲估计和基于参考信号的估计三类[6]。其中盲估计是接收端利用发送的调制信号固有的统计特征或利用判决反馈进行信道冲激响应的估计。基于参考信号的估计方法需要发送端和接收端规定好参考信号的幅值与位置，接收端根据原始参考信号和接收到的参考信号按照特定的方法或准则进行信道参数的估计或实时追踪。半盲估计盲估计与基于参考信号的估计方法的折中，结合了盲估计与基于参考信号的估计这两种方法优点。与基于参考信号的估计方法相比，盲估计和半盲估计方法能够提升系统信道利用率，但由于计算复杂度较高，且盲估计存在相位模糊、误差传播、收敛慢或陷入局部极小等问题，需要较长的观察序列才能实现信道的准确估计，限制了其在无线通信系统中的应用。因此，基于参考信号的估计在实际中应用相对更为广泛。

## 1.3 本文主要工作及结构安排

### 1.3.1 主要研究内容

本文主要研究OFDM系统中基于导频的稀疏双选信道的估计算法，包括导频的构成及插入方法，BEM建模信道条件下，模型参数的估计算法。由于信道估计的特性和结构不同，采用的估计策略也不同，本文重点研究了具有一般性的稀疏双选无线信道的估计策略。

基于导频的信道估计是通过在发送数据中插入已知的导频符号来进行信道估计。导频占用了部分子载波进行传输，会使信道利用率有所降低，且导频的结构与排布方式与信道估计的性能直接相关，因此，设计合理的导频结构及排布方式能够实现使用较少的导频较为精确的估计信道冲击响应是一个值得研究的问题。对于双选信道，信道的冲激响应在一个OFDM符号持续时间内发生显著变化，为了减少待估计参数的数量，通常使用BEM建模双选信道。本文重点研究了用BEM建模稀疏双选的方法，比较了不同BEM基函数模型对信道估计性能的影响，提出了一种改进的BEM估计方法，提升信道估计的性能[8]。与此同时，将BEM模型与信道稀疏特性相结合，充分利用信道的，提高稀疏信道的估计准确度，同时减少导频的数量以换取较高的信道利用率和较小的估计复杂度。

### 1.3.2 论文结构

根据主要研究内容和创新点，本论文的章节安排如下：

第一章介绍了本课题的研究背景，包括移动通信和OFDM技术的发展历史，阐述了OFDM系统中稀疏双选信道估计的意义，给出了信道估计技术的研究现状，总结了本文的主要研究内容和主要创新点。

第二章介绍了无线信道的衰落特性，包括大尺度衰落和小尺度衰落，并详细讨论了OFDM技术的基本实现原理，关键技术，实现方法及优缺点。

第三章介绍了OFDM系统中的信道估计技术，包括导频结构的设计和排布方法，导频位置信道频域响应的估计算法以及恢复完整信道频域响应的插值算法。重点介绍了各种算法的理论基础和发展现状，为改进算法的提出奠定基础。

第四章提出了一种基于BEM建模双选信道估计方法。针对逆转换法带来的系统误差，提出了基于LMMSE的逆转换估计算法，进一步降低系统误差，提高估计准确性

第五章的内容为本文提出了一种联合信道估计算法，发送端发送CAZAC同步序列用于帧同步的同时可以利用CAZAC的相关特性进行时延估计，还原信道结构，探测显著抽头的位置；在已知信道抽头都位置的前提下，接收端可以利用极少的导频，极小的运算复杂度完成高准确度的双选稀疏信道估计。这种估计方法具有极高的健壮性，可以用于各种复杂的信道环境。

第六章总结本论文的主要工作，并展望了研究成果的应用前景，对于论文中的信道估计算法的下一步改进提出了意见。

# MIMO通信系统及其检测技术

无线通信系统的系统性能与无线信道的传播特性直接相关，无线信道通常具有较强的时间选择性衰落与频率选择系衰落。研究如何对抗这些信道衰落是获取较好系统性能的关键。OFDM技术作为多载波调制的一种将一串高速串行码流调制到多个正交子信道上并行传输，增加了码元宽度，具有良好的抗多径频率选择性衰落，因此在在无线通信领域被广泛关注。本章将介绍无线信道的各种衰落特性，并引入OFDM技术的基本理论、关键技术和实现框架，并给出该技术的各种优缺点。

## 2.1 MIMO通信系统

无线信道的信道特性很不稳定，通常会随时间和频率发生变化。通常将无线信道的衰落特性分为大尺度衰落和小尺度衰落，在无线通信环境中这两衰落同时存在[10]，大尺度衰落主要用以刻画信号强度随传播距离的增减而降低，小尺度衰落则是刻画在较短距离内信号发生的强度迅速的衰减变化。

### 2.1.1 无线信道的传输环境

当传播距离较远时，信号的平均功率会因为路径损耗和阴影效应产生平稳的下降，产生大尺度衰落。

路径损耗是指由于发射信号功率的辐射扩散，电磁波的强度随着传播距离增加产生衰减，引起路径损耗。信号在自由空间中以视距方式传播时，接收信号的平均功率随距离的变化可以表示为：

 （2-1）

式中是发送功率，和分别发送天线增益和接收天线增益，为传输信号的波长，信号的传输距离，是系统的损耗。由此可以得到自由空间的的路径增益为：

 （2-2）

阴影效应指在信号在传播过程中，受到障碍的阻挡产生的衰落效应。山脉、建筑等障碍会阻挡电磁波的传输，被障碍物阻挡的后面通常称为阴影区，在阴影区内信号强度很弱，因此当移动台处于阴影区时，就会引起信号较大的衰落。

大尺度衰落是由无线电波的传播特性导致的，为了弥补由于大尺度衰落，无线通信系统中通常可以通过增加天线的增益提升信号的的发送功率等措施弥

### 2.1.2 V-BLAST通信系统架构

小尺度衰落是指在短时间内信号的幅值和相位的快速变化，通常由发射机和接收机之间的传输路径特性导致。小尺度衰落的主要原因是多径时延扩展和多普勒扩展。信号经过不同长度的路径到达接收机的时延不同，这种现象称之为多径传输，接收端得到的多个接收信号之间相互叠加，产生时延拓展，最终导致信号的幅度和相位发生剧烈变化；另外由于移动终端在移动通信中常处于移动状态，收信号的频率由于多普勒效应产生变化。

信号在空间中传播会经过不同长度的传输路径到达接收端，信号在接收端相互叠加干扰使得信号产生拖尾，这种现象叫做：多径时延扩展。多径时延扩展会引起符号的拖尾并对后面的符号造成干扰，这种现象称之为符号间干扰。为了避免符号间干扰，在通信中，码元符号的宽度大于最大多径时延扩展的宽度，以避免符号间的干扰。在频域中，信道的最大时延扩展的倒数称之为信道的相关带宽。当信号的速率较快，码元周期较小，信号带宽就会大于相关带宽，这样就造成了码元带宽中不同频率分量上的信道响应不相同，种现象就是频率选择性衰落。而当系统的传输速率较低时，信号带宽小于相关带宽的时候，认为相关带宽内信道响应一致，不会发生频率选择性衰落。

与相关带宽的概念类似，最大多普勒频移的倒数为称之为信道的相干时间，相干时间是信道保持不变的最大时间范围。如果两个信号到达的时间差小于相关时间，则这两个信号经历的信道特性在时间上具有很强的相关性。当基带信号的符号周期大于信道的相干时间时，在同一码元周中，码元将经历不同的信道变化，从而导致接收信号发生畸变，称这种现象为时间选择性衰落，这种信道为快速时变信道。



图2-1 接收信号强度随接收机位置的变化

图2-1描绘了接收信号随接收机距离的变化情况。可以用下式来描述接收信号的变化

 （2-3）

其中，路径损耗，是多径衰落。

由图2-1中可以看出大尺度衰落和小尺度衰落相互叠加，其中小尺度衰落中的波峰与波谷距离正比于波长，如果将大尺度衰落的影响去掉（图2-1b），可以看到小尺度衰落围绕一均值震荡。可知大尺度衰落可以决定无线传输中信号的路径损耗。在实际无线通信系统中，无线信号的传输会经历复杂的信道环境，如何对抗小尺度衰落是研究的重点。

### 2.1.3 MIMO系统模型

无线信道通常被建模成一个有限冲击响应滤波器，下面将介绍几种典型的无线信道模型。

高斯信道模型：



图2-2高斯信道示意图

发送信号在经过信道时会叠加上加性高斯白噪声，在接收端影响判决的准确性。

衰落信道模型：



图2-3 衰落信道示意图

发送信号经过衰落信道时，由于信道响应的影响，会使信号发生幅值衰减和相位旋转，并在接收端叠加上加性高斯白噪声；在接收端进行判决之前如不对信道的影响经行均衡恢复信号的原始幅值和相位，会大大的影响系统的性能和稳定性。

时间选择性（快变）信道模型：



图2-4 时间选择性衰落（快变）信道示意图

发送信号经过时间选择性信道时，信道响应会随时间变化而快速变化，由于信道响应的影响，会使信号发生幅值衰减和相位旋转，并且每一时刻信道的影响都不相同。接收端进行信道均衡时必须实时的追踪信道变化，增加了信道估计的难度。

频率选择性信道模型：



图2-5 频率选择性衰落信道示意图

频率选择性信道主要是由多径效应引起的，由于信号传播环境的复杂性，造成发送端和接收端之间产生多条传播路径，每条路径下的传输时延各不相同，对信号幅值和相位的影响相互独立，由此产生频率选择性衰落。由于频率选择性衰落的影响，信号在时域产生较长的拖尾，对后续信号产生污染，严重影响接收端的性能。为了在接收端消除这种信道对信号的影响，需要利用信道估计技术将所有抽头的响应全部估计出来，并利用估计信息进行信道均衡。

双选择（时间频率选择）性信道模型：



图2-6 双选择性衰落信道示意图

频率选择性信道主要是由多径效应引起的，而时间选择性信道主要是由接收端的移动引起。由于信号传播环境的复杂性与接收端的移动性，造成发送端和接收端之间产生多条快速变化的传播路径，每条路径下的传输时延各不相同，对信号幅值和相位的影响相互独立，并且每条信道的响应随时间快速变化，由此产生双选择性衰落。双选择性信道的信道估计一直以来是一个研究热点和难题，接收端必须能够估计出每条路径上的信道响应，并且实时追踪信道变化，这对接收端的设计带来了极大地挑战。

在多径信道中，包括频率选择性信道和双选择性衰落信道，所有抽头的最大延时称为信道的长度。在某些情况下，信道长度会远大于有效信道抽头的个数，即大多数抽头的系数为零，通常称这种信道为稀疏信道，本课题主要就是针对OFDM双选信道和OFDM稀疏双选信道的估计算法经行改进和提升。

## 2.2 MIMO通信系统中的关键技术

### 2.2.1 MIMO发送端关键技术

多载波调制最早起源于上世纪60 年代，OFDM 调制技术属于多载波调制的一种。多载波调制中，传输带宽被分割为个带宽为的子带宽，并将数据调制到这个子载波上并行传输，传输的符号周期为。

多载波调制产生的信号可以写成下式

 （2-4）

式中，是被调制到第个子载波上的待发符号，为第个子载波，为经多载波调制后得到的发送信号，基本多载波调制原理如图2-7所示。



图2-7多载波调制原理示意图

多载波调制系统比单载波调制系统存在的优势主要由两方面：

1. 从时域上看，多载波调制将原本串行发送的高速数据通过并行的多个并行子载波发送，在数据速率相同的条件下，码元宽度增加倍，因此是的多载波系统具有优异的对抗码间干扰的能力；
2. 从频域上看，由于码元宽度扩大了倍，频域上单个码元宽度缩小为原来的，因此使得多载波调制技术具备了优异的抗频率选择性衰落的能力。

### 2.2.2 MIMO接收端关键技术

OFDM属于一种高效的多载波调制技术。不同于一般的多载波调制系统，OFDM系统中的各个子载波之间保证相互正交[11]。由于载波间相互正交，载波在频谱上允许相互重叠，这使得 OFDM具有更高的频谱利用率，图2-8为频分复用与正交频分复用频谱利用率的比较。



图2-8 频分复用方式与OFDM的信道频谱利用率对比

设OFDM系统中有个子载波，分别是，每个子载波上待发送的符号是，OFDM符号的持续时间为，则载波可以由下式表示

 （2-5）

为了保证子载波间的正交性，必须满足下式：

 （2-6）

则一个OFDM符号的可以表示为：

 （2-7）

图2-9(a) OFDM子载波时域分布

图2-9(b) OFDM子载波频域分布

如图2-9(a)所示,为时域OFDM个子载波间的关系，任意子载波的频率可以表示为的倍，这样就保证了个子载波间的正交性。图2-9(b)为OFDM系统各个子载波的频域图，由图可见，各个子载波虽然相互重叠，但是由于正交性的存在，子载波 达到峰值时相邻的子载波衰减为0，不会发生相互干扰，保证了信号传输的质量。基于此，可以提出OFDM系统的基本本原理图，如图2-10所示：



图2-10 OFDM系统基本原理图

接收端子载波上的信号解调如下式所示：

 （2=8）

有上式可以看出，因为子载波间存在正交性，在接收端可以利用正交性，通过内积运算分离各个子载波上的传输信号

## 2.3 MIMO接收端检测技术

### 2.3.1 经典检测算法

2.3.1.1 最大似然检测算法

2.3.1.2 迫零检测算法

2.3.1.3 最小均方误差检测算法

2.3.1.4 干扰消除检测算法

2.3.1.5 QR分解检测算法

### 2.3.2 算法比较与总结

## 2.4 本章小结

本章节首先介绍了无线信道中的衰落特性，重点阐述了频率选择性信道、时间选择性信道、双选择性信道和稀疏信道的特点及其成因，并给出了对应的信道模型，为下文介绍双选稀疏条件下的信道估计奠定了基础。本章节还详细介绍了OFDM技术的基本原理，系统实现和系统优缺点，为下文的信道估计理论奠定了理论基础。

# 基于OSIC的改进算法

在OFDM系统中，常见的信道估计方法包括基于统计特性的盲估计方法、基于判决反馈的信道估计和基于导频的信道估计。本文主要研究基于导频的信道估计算法。基于导频的OFDM信道估计中，有三个主要问题：1）如何设计导频和导频的排布方式，2）接收端通过接收到的导频信息如何估计导频处的信道频域响应，3）获取完整导频处的信道信息后，如何恢复完整的信道频域响应或时域信道冲击响应。

## 3.1 OSIC-ML改进算法

基于导频的信道估计是通过在规定的子信道中插入发送端和接收端都已知的导频来进行信道估计，因此导频与导频排布的设计对于信道估计的性能有较大影响。导频排布包括插入导频的数量和导频的插入方式。不同的排布在相同的环境相同的系统中表现出的信道估计性能完全不同。因此针对不同环境和不同的系统需求设计合理的导频排布方式非常重要的。本章节介绍了几种经典的导频排布方式，包括一维导频排布，二维导频排布，导频簇等排布。

### 3.1.1 算法描述

一维导频是指只在频域或只在时域插入导频的导频排布方式，通常在插入导频时都是均匀排布的，文章[13]表明，均匀排布的导频是最优的。常见的一维导频是块状导频和梳状导频[13][14]，其导频排布方式如图3-1所示。



图3-1梳状导频和块状导频示意图

子载波上传输导频符号，导频带时域是连续的，而在频域上是离散的，导频以梳状形式插入到OFDM符号中，其余的子载波使用传输有用数据。接收端使用导频处的导频信息估计导频处的信道频域响应，然后使用插值算法恢复整个信道的频域响应。这种导频排布方式的优点在于可以实时追踪信道的变化，但是对于频率选择性较高的信道，这种导频排布方式无法较好的拟合频域信道响应。这种信道排布方式在对抗频率选择性较低但是时间选择性较高的信道时较为合理。

块状导频的排布方式如图3-1（b）所示，在规定的OFDM符号中的所有子载波上传输导频，导频在时域上离散的，但是在频域上是连续的， 传输导频的OFDM符号以块状插入到其他OFDM符号间，其余OFDM符号传输有用信息。接收端使用传输导频的OFDM符号估计出信道全部的频域响应，在后续OFDM符号到来时使用估计出来信道信息进行均衡，直到下一个传输导频的OFDM符号到来，再更新频域信道响应。这种导频排布方式的优点在于可以对抗频率选择性很高的信道，但是由于导频排布在时间上是离散的，所以无法实时追踪信道变化。这种信道排布方式在对抗时间选择性较低但是频率选择性较高的信道时较为合理。

假设当信道变化速率缓慢或是静态的情况且没有噪声影响。在一个OFDM符号中每加入一个导频，等价于加入一个约束条件，导频可以分配到任意子载波上，当约束条件的个数大于等于信道长度是，便可以求解信道的时域冲击响应，因此一般系统中加入导频的个数要大于等于信道的最大长度。但是在加性高斯白噪声环境下，个导频的最优排布方式是均匀排布，切边缘子载波上应该排布导频[13]，这样可以将噪声的影响降低，同时降低插值算法带来的系统误差。在AWGN时不变的信道中，在使用导频数量相同的情况下，梳状导频排布与块状导频排布的信道估计MSE相同[13]。

### 3.1.2 仿真

基于导频的信道估计可以较好地追踪信道变化和频率选择性，但是传输导频会占用某些子载波，使数据传输的速率下降，降低信道利用率。如何在保证信道估计质量不明显下降的情况下增加传输效率成为导频排布设计的另一关注点。因此在频域与时域插入到导频[15][16]，通过将信道的时域相关性与频域相关性联合考虑来获取更高的信道利用率成为关注的焦点。这种离散的二维插值方式如图3-2所示。



图3-2 离散二维导频示意图

这种方式的导频排布可大大降低导频插入的数量，增加信道利用率。但是接收端需要经行二维插值运算恢复整个信道频域响应，这样大大增加了运算复杂度，同时由于导频数量减少，不能很好的追踪时域或频域变换速率较高的信道，但是在信道质量相对较好的情况下这种导频排布方式是合理的。

### 3.1.3 复杂度分析

在双选择性信道的条件下，由于信道抽头在一个OFDM符号持续时间内发生显著变化，这种现象将严重破坏子载波间正交性，带来较强的载波间干扰，为了避免载波间干扰对导频影响，通常是将导频设计成导频簇并进行均匀排布[17],如图3-3所示。每个到导频簇由非零导频和零导频组成，其中零导频被排布在导频簇的中央；零导频排布在非零导频的两侧，作为保护间隔，防止数据载波污染导频值。这中排布方式被称之为ZCZ序列，文献[18]证明ZCZ序列是MMSE准则最优的导频排布形式。



图3-3 均匀导频簇示意图

## 3.2 基于QR分解及ML的OSIC改进算法

导频处信道响应的估计，是利用接收导频信息估计出导频所在子载波处的信道频域响应，在复杂度允许的范围内尽量保证估计值与真值间的误差最小。目前最常用的估计算法包块最小二乘估计（Least Square，LS），最小均方误差(Minimum Mean Square Error, MMSE)估计和基于奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)的估计方法。

### 3.2.1 算法描述

在OFDM系统中，频域OFDM发送符号与频域OFDM接受符号间的观想如公式3-1所示。

 （3-1）

式中为一个OFDM符号中第个子载波上的接收信号，为第个子载波上的发送信号，为第个子载波上的频域信道响应，为噪声的傅里叶变换，则信道频域响应估计值为：

 （3-2）

由公式（3-2）可以看出，LS算法是一种原理极为简单的算法，非常易于实现，因此LS算法被广泛的使用，但是由于LS算法并没有考虑噪声对估计结果的影响，使得LS估计算法对噪声影响非常敏感，随着信噪比的下降，LS算法的性能也会急剧下降。

### 3.2.2 仿真

MMSE估计算法是最小均方误差意义下最优的估计算法[19]，由于考虑了噪声的影响使得MMSE在信噪比较低的情况下依然可以取得较好的性能。MMSE

算法的定义如公式3-3所示：

 （3-3）

MMSE估计中考虑了噪声对估计结果的影响，同时考虑了信道的统计特性，并在估计中抑制了相关影响，与LS算法相比，在相同估计误差的情况下，MMSE估计算法有大约10~15dB增益，在信噪比较低的情况下，优势尤为明显。随着着信噪比的提升MMSE估计与LS估计的性能接近。但是MMSE估计计算复杂度极高，而且需要知道信道的相关信息，使得MMSE算法难以实现。

### 3.2.3 复杂度分析

为了降低MMSE算法的实现难度，人们又提出了LMMSE算法，LMMSE的估计算法如公式3-4所示。

 （3-4）

在LMMSE估计的计算公式中，除去了MMSE中的难以得到的信道相关矩阵，而使用有通过信道统计特性获取的相关矩阵，式中唯信噪比，的选取由星座映射直接确定，大大降低了运算量，但是LMMSE的运算量依旧十分可观。LMMSE算法的性能要略低于MMSE。

## 3.3 两种改进算法的比较

在基于导频的估计算法中，估计算法只能估计出导频处的信道频域响应或是BEM基系数，实际上是对信道的是与响应或是频域响应进行了采样，只有使用这些采样值恢复出完整信道的频域响应或时域冲击响应，OFDM信道估计才算完成。对与进行频域估计的算法，通常使用插值算法恢复完整的频域信道响应；而针对BEM建模的时间选择性信道而言，通常使用BEM基函数与基系数的线性叠加恢复信道的时域冲击响应。

## 3.4 本章小结

本章主要介绍了OFDM信道估计中三个主要的问题：导频导频排布方式的设计，导频所在子载波处的频域信道响应估计以及通过导频子载波处的频域信道响应估计值恢复完整的频域信道响应。同时介绍了基于BEM的信道模型和恢复算法。为后续针对双选择性信道的估计及改进打下了基础。

# 第四章 球检测技术

本章将深入讨论OFDM系统中双选择性信道的特性，包括双选择性信道的时域模型、频域特性以及对基于导频的OFDM信道估计算法提出的挑战；由于双选择性信道的特性使得传统的基于导频的信道估计算法力不从心，无法有效的追踪信道变化。因此找到一种可以应对双选择性信道的估计方法已经非常急迫。BEM（基扩展模型）因其可以拟合快速变化的待估计参数，和较少的估计系数，成为了人们建模双选择性信道的首选。但是BEM模型也有其不足之处：

（1）BEM存在系统误差，在基函数选择不当的情况下，BEM的系统误差将大大影响估计性能；

（2）高精度基函数获取困难，高精度基函数在生成时通常需要信道的统计信息或相关特性，这些信息在实际的OFDM系统很难获取；

（3）运算复杂度较高，在信道长度较大的情况下，运算复杂度成的平方次增长。

基于BEM模型以上的不足，本文分别提出了如下改进算法：

（1） 提出了改进的基于LMMSE逆转化方法，降低系统误差，提升估计准确性，仿真结果表明，这种方法可以明显降低系统误差；

（2）提出了一种最优快速生成高精度基函数的方法，仿真结果表明，这两种方法可以大大简化估计过程提升估计性能；

（3）结合信道的稀疏特性，提出了两步式的探测估计算法，大大降低BEM的运算复杂度，并降低噪声对估计结果的影响。

本章将深入阐述前两种改进，在下一章中将阐述第三种改进。

## 4.1 球检测的基本理论

双选择性信道模型通常被建模成抽头系数快速变化的有限冲击响应滤波器，在接收端前还会叠加噪声，如图4-1所示：

4.1.1 球检测算法

双选择性信道模型通常被建模成抽头系数快速变化的有限冲击响应滤波器，在接收端前还会叠加噪声，如图4-1所示：

4.1.2 层的概念

双选择性信道模型通常被建模成抽头系数快速变化的有限冲击响应滤波器，在接收端前还会叠加噪声，如图4-1所示：

## 4.2 FP策略和SE策略

在双选择性信道中由于待估计系数的个数急剧增长，传统的基于导频的OFDM估计算法在这种环境中并不适用，因为待估计系数的个数远大于符号的长度，使得通过添加导频增加约束条件的来解算信道响应的方法失效，同时传统的估计算法无法追踪信道的快速变化，导致估计精度大幅下降。在这种情况下，通常使用BEM模型建模栓选择性信道，并基于BEM模型进行估计信道回复。

### 4.2.1 FP策略

本章节将会详细讨论BEM的建模建立和估计过程。

首先定义估计量，为长度为的向量，对应BEM各个基函数的系数，则第个抽头的信道时域响应可由4-13式表示。

 （4-13）

式中是一个的矩阵，列是由BEM基的第个基函数构成。是由BEM模型本身造成的建模误差。将各个抽头的信道时域响应组合起来，定义如公式4-14形式的信道时域响应：

 （4-14）

那么总的信道模型如公式4-15所示：

 （4-15）

式中为克罗内科积，为各个抽头对应基函数的系数，为各个抽头对应的BEM建模误差。

### 4.2.2 SE策略

由于整个OFDM信道估计是基于OFDM传输模型考虑的，联立公式4-6与公式4-15我们可以得到基于BEM信道建模的OFDM传输模型，如公式4-16所示：

 （4-16）

式4-16中为BEM的基系数，为BEM建模误差和噪声引起的总系统误差。

式4-16中如公式4-17所示：

 （4-17）

其中如公式4-18所示：

 （4-18）

式4-13中如公式4-19所示：

## 4.3 球检测的复杂度

双选择性信道模型通常被建模成抽头系数快速变化的有限冲击响应滤波器，在接收端前还会叠加噪声，如图4-1所示：

图中为发送符号在时刻的采样值，为噪声在时刻的采样值，为接收符号在时刻的采样值，为延时单元，表示在时刻第个抽头的信道响应，信道抽头的最大个数为。

在OFDM系统中由于使用了CP（循环前缀），即将一个OFDM符号的最后个采样点复制到该符号的前面，组成长度为的发送OFDM符号，如图4-2所示：

图4-2 CP的结构和作用

由于使用了循环前缀作为保护间隔，前面一个OFDM符号由于通过信道产生的时延拓展（拖尾）将会在后一个OFDM符号的循环前缀中衰减为零，同时由于循环前置是复制的本OFDM符号的最后个采样点，保护了OFDM符号各子载波间的正交性。使得估计问题可以只在一个OFDM符号内讨论。

由此，OFDM的调制如公式4-1所示：

 （4-1）

式中为时域的OFDM符号，为频域的OFDM符号，为傅里叶变换矩阵，为的共轭转置（傅里叶反变换矩阵）：

 （4-2）

由于使用循环前缀（CP），定义时域信道矩阵如公式4-3所示：

 （4-3）

通常情况下，循环前缀长度大于等于信道的最大抽头数，本文考虑的情况。且满足如公式4-4：

 （4-4）

则接收端接收到的时域OFDM符号如公式4-5所示：

 （4-5）

其中为AWGN噪声的采样值，接收端获取通过傅里叶变换就可以恢复频域OFDM符号，如公式（4-6）所示：

 （4-6）

式中为噪声向量的傅里叶变换。

公式4-6为双选择性信道条件下的OFDM系统模型，下面将分析OFDM系统模型的双选择性信道特性。定义频域信道如公式4-7所示：

 （4-7）

## 4.4 本章小结

本章深入讨论了OFDM系统中双选择性信道的特性，包括双选择性信道的时域模型、频域特性以及对基于导频的OFDM信道估计算法提出的挑战；由于双选择性信道的特性使得传统的基于导频的信道估计算法力不从心，无法有效的追踪信道变化。因此找到一种可以应对双选择性信道的估计方法已经非常急迫。BEM（基扩展模型）因其可以拟合快速变化的待估计参数，和较少的估计系数，成为了人们建模双选择性信道的首选。但是BEM模型也有其不足之处：

（1）BEM存在系统误差，在基函数选择不当的情况下，BEM的系统误差将大大影响估计性能；

（2）高精度基函数获取困难，高精度基函数在生成时通常需要信道的统计信息或相关特性，这些信息在实际的OFDM系统很难获取；

（3）运算复杂度较高，在信道长度较大的情况下，运算复杂度成的平方次增长。

针对BEM模型以上的不足，章分别提出了如下改进算法：

（1） 提出了改进的基于LMMSE逆转化方法，降低系统误差，提升估计准确性，仿真结果表明，这种方法可以明显降低系统误差；

（2）提出了一种最优的快速生成高精度基函数的方法，仿真结果表明，这两种方法可以大大简化估计过程提升估计性能；

# 第五章 球检测算法中半径控制的研究

OFDM系统中由于双选择性信道的特性使得传统的基于导频的信道估计算法力不从心，无法有效的追踪信道变化。因此找到一种可以应对双选择性信道的估计方法已经非常急迫。BEM（基扩展模型）因其可以拟合快速变化的待估计参数，和较少的估计系数，成为了人们建模双选择性信道的首选。但是BEM模型也有其不足之处：

（1）BEM存在系统误差，在基函数选择不当的情况下，BEM的系统误差将大大影响估计性能；

（2）高精度基函数获取困难，高精度基函数在生成时通常需要信道的统计信息或相关特性，这些信息在实际的OFDM系统很难获取；

（3）运算复杂度较高，在信道长度较大的情况下，运算复杂度成的平方次增长。

基于BEM模型以上的不足，在第四章中提出了基于LMMSE的逆转换算法和最优DPSS基函数算法两种算法，分别真对BEM系统误差较大和难以获取高精度基函数进行改进，本章将重点针对基于BEM的双选择性信道估计复杂度较高的缺点进行改进。算法思路是充分利用信道的稀疏特性，提出了两步式的探测估计算法，可以大大降低BEM的运算复杂度，并降低噪声对估计结果的影响。

## 5.1 初始半径选择策略

在双选信道的前提下，由于带宽及传输速率的增加，信道会明显的表现出稀疏特性，BEM建模的一般方法可以解决稀疏信道的估计问题。但是由于没有考虑信道稀疏特性，造成信道效率的极大损失，并且引入了大量的噪声降低了估计的准确度，本章提出了两步式的探测估计算法，发送端发送CAZAC同步序列用于帧同步的同时可以利用CAZAC的相关特性进行时延估计，还原信道结构，探测显著抽头的位置；在已知信道抽头都位置的前提下，接收端可以利用极少的导频，极小的运算复杂度完成高准确度的双选稀疏信道估计。这种估计方法具有极高的健壮性，可以用于各种复杂的信道环境。

### 5.1.1 常见初始半径选择策略的研究

由图5-1可知稀疏信道的长度较长，抽头交多，但是只存在少数的显著抽头，其余大部分抽头的响应为零，或是接近零[25]。信道的稀疏性普遍存在于无线信道中，由其当通信系统的传输速率较高时，稀疏性尤为明显。

由于信道的稀疏性存在，传统的基于BEM的双选择性信道估计算法存在如下两点缺陷：

（1）由于没有考虑信道的稀疏性，在发送端必须至少插入与信道长度相等的导频簇，每个导频簇构成一个约束条件，在接收端才能进行信道估计解算BEM基系数。但是稀疏信道中只有极少数显著抽头会对OFDM符号产生影响；而其他抽头的响应为零或极小，不会对OFDM符号产生影响。因此插入大量导频簇对非显著抽头进行估计是对频率资源的极大浪费，极大程度的降低了信道的利用率。

（2）由于非显著抽头的响应为零或极小，接收端在估计时，噪声将成为非显著抽头上的主要影响因素。由于噪声的影响，非显著抽头的估计将非常不准确，并且引入了大量的噪声干扰，使得整个OFDM系统的性能受到影响。

为了解决这一问题本文提出了一种两步式的探测估计算法，探测估计算法的第一步为探测信道结构。在OFDM系统中往往需要插入同步序列进行帧同步，帧同步序列往往拥有极好的自相关特性。基于此可以利用帧同步序列的自相关特性进行时延估计，最终探测出稀疏信道的结构。

本文提出了使用CAZAC序列作为稀疏信道探测序列和帧同步序列的方法。CAZAC序列有极强自相关特性和自相关峰值，而且旁瓣为零 [26]。CAZAC序列的傅里叶变换仍为CAZAC序列，在文章[27]中作者提出了使用CAZAC的OFDM系统同步算法。CAZAC序列可以通过公式5-1生成：

 （5-1）

CAZAC序列的自相关特性如公式5-2所示：

 （5-2）

在发送端，CAZAC序列将排布在OFDM符号之前发送，CAZAZ序列通过信道在接收端的形式如公式5-3所示：

 （5-3）

由公式5-3可知，与的互相关如公式5-4所示：

 （5-4）

稀疏信道中只有显著抽头用于非零的信道响应，如公式5-5所示：

 （5-5）

式中为显著抽头索引的集合，当时为非零的显著抽头，当时为零的非显著抽头。结合公式5-4、5-5可以得出公式5-6如下：

 （5-6）

由于白噪声与CAZAC序列不相关，则公式5-6可以简化为公式5-7，如下：

 （5-7）

定义探测出信道显著抽头集合如公式5-8所示;

 （5-8）

式中为一阈值，当互相关的值超过则认为为一显著抽头位置。

至此本章节介绍了利用CAZAC序列探测稀疏信道中显著抽头位置的探测方法。在下一节中，我们会利用探测结果改进基于BEM的双选信道的估计算法。

### 5.1.2 其他半径选择策略

首先定义估计量，为长度为的向量且，对应BEM各个基函数的系数，则第个抽头的信道时域响应、可由5-9式表示。

 （5-9）

式中是一个的矩阵,其中，列是由BEM基的第个基函数构成。、是由BEM模型本身造成的建模误差。将各个抽头的信道时域响应组合起来，定义如公式5-10形式的信道时域响应：

 （5-10）

那么总的信道模型如公式5-11所示：

 （5-11）

式中为克罗内科积，、为各个抽头对应基函数的系数，、为各个抽头对应的BEM建模误差，为显著抽头的个数。

由于整个OFDM信道估计是基于OFDM传输模型考虑的，联立公式5-6与公式5-11我们可以得到基于BEM信道建模的OFDM传输模型，如公式5-12所示：

 （5-12）

式5-12中为BEM的基系数，为BEM建模误差和噪声引起的总系统误差。

式5-12中如公式5-13所示：

 （5-13）

其中如公式5-14所示：

 （5-14）

式5-12中如公式5-15所示：

 （5-15）

其中是由傅里叶变换矩阵的列组成，为频域的OFDM发送符号。在频域的发送符号中，其导频和数据的排布方式如图5-2所示



图5-2 中导频和数据的排布方式示意图

如图4-4所示，一个OFDM频域符号中，共使用了个导频簇，在稀疏算选则性信道估计中，由稀疏信道的定义可知，因此使用的导频簇数可以满足；每个导频簇都是一个频域克罗内克冲击序列[22],由这种序列构成的导频簇通常用于时间选择性信道的估计，在一个OFDM频域符号中，频域克罗内克冲击序列导频均匀排布。每个频域克罗内克冲击序列导频如公式5-16所示：

 （5-16）

式中为第个导频的开始位置，导频簇中除中间的导频点为非零点，其他导频点都是零导频点。

在接收端，会将接收到的频域OFDM符号中的导频位置处的响应抽取出来。抽取后的接收导频导频响应如公式5-17所示：

 （5-17）

式5-17中表示数据点对导频点的干扰,矩阵的定义如公式5-18所示：

 （5-18）

公式5-18中矩阵是矩阵的子矩阵，子矩阵与矩阵的关系如图5-3所示：



图5-3子矩阵与矩阵的关系式示意图

式5-17中矩阵的定义如公式5-19所示：

 （5-19）

其中：

 （5-20）

对公式5-17进行变形，令可得公式5-21：

 （5-21）

则BEM系数的LS估计如公式5-22所示：

 （5-22）

时域信道的估计值可由公式5-23表示：

 （5-23）

至此基于BEM建模的OFDM双选稀疏信道估计基本完成。

## 5.2 基于信噪比条件的改进的半径选择策略

本章给出了基于BEM的双选稀疏信道的两步式探测估计算法在OFDM双选择性信道条件的估计性能仿真。仿真中采均方误差作为评判标准。仿真中比较了直接估计CE-BEM、P-BEM与两步式探测估计CE-BEM、P-BEM在不同信噪比与不同多普勒频移条件下的性能。仿真参数如表5-1所示。

真中使用长度为256点的FFT与IFFT进行OFDM调制与解调，数字调制方式采用4QAM，信道的长度为32个采样点，所有参数设计与估计算法均普适，可以移植到其他OFDM系统中。

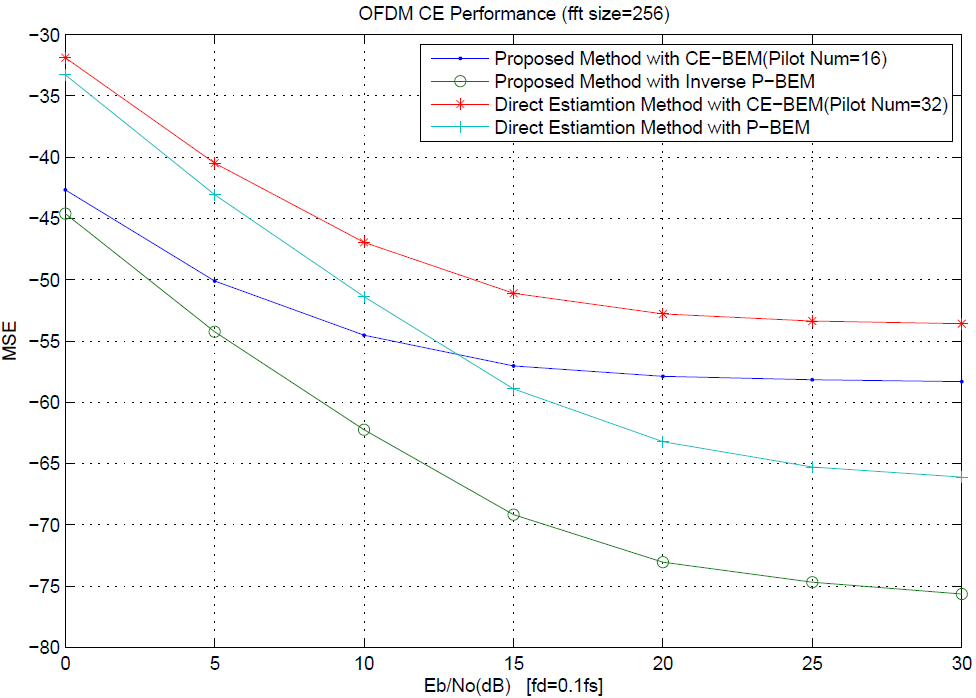


图5-4归一化多普勒频移为0.1时性能比较

如图5-4所示，比较了直接BEM双选择性稀疏信道估计算法性能和基于BEM的双选稀疏信道的两步式探测估计算法性能。仿真结果表明，基于BEM的双选稀疏信道的两步式探测估计算法在仅适用直接估计算法一半的导频数条件下，估计性能仍然优于直接估计算法。并且随着信噪比的提升，基于BEM的双选稀疏信道的两步式探测估计算法性能提升更快。

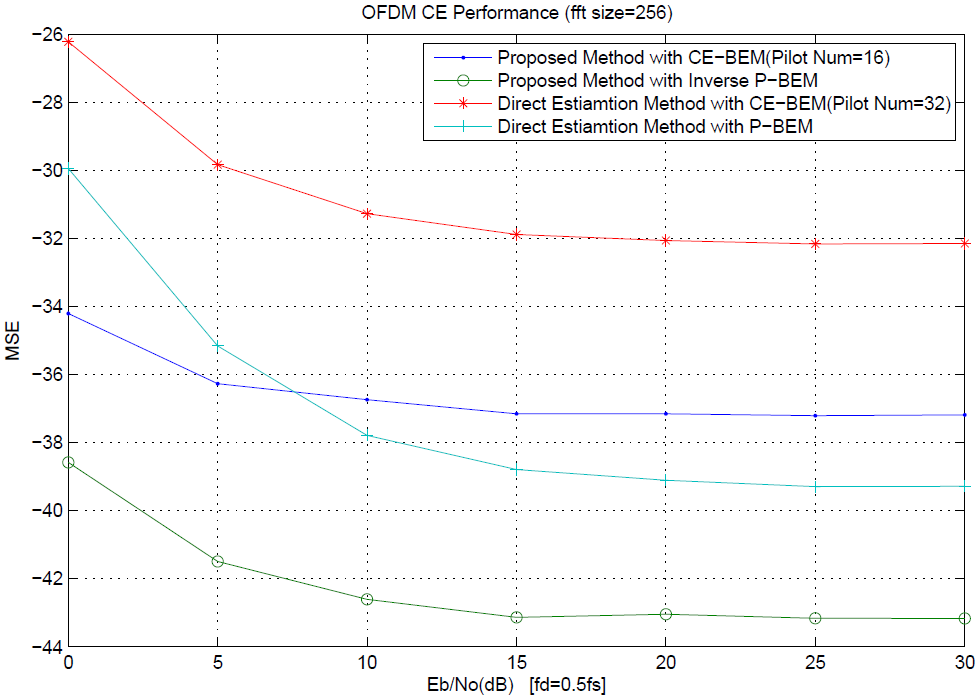


图5-5归一化多普勒频移为0.5时性能比较

如图5-5所示，比较了直接BEM双选择性稀疏信道估计算法性能和基于BEM的双选稀疏信道的两步式探测估计算法性能。仿真结果表明，基于BEM的双选稀疏信道的两步式探测估计算法在仅适用直接估计算法一半的导频数条件下，估计性能仍然优于直接估计算法。并且随着信噪比的提升，基于BEM的双选稀疏信道的两步式探测估计算法性能提升更快。

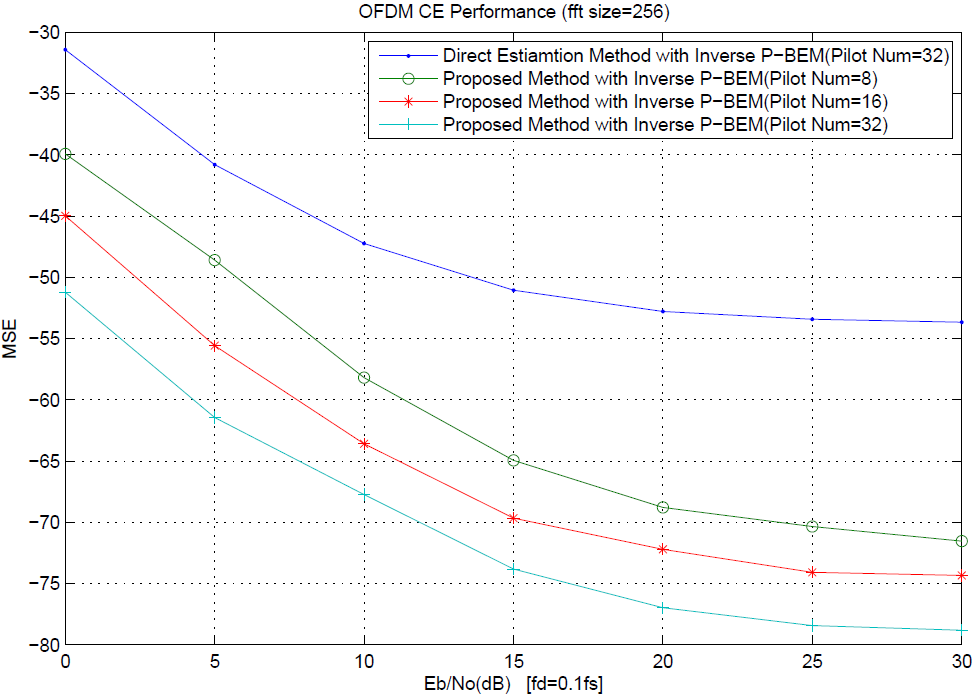


图5-6不同导频数量下的性能比较

如图5-6所示，比较了直接BEM双选择性稀疏信道估计算法性能和基于BEM的双选稀疏信道的两步式探测估计算法性能。仿真中直接BEM双选择性稀疏信道估计算法使用的导频数为32，而基于BEM的双选稀疏信道的两步式探测估计算法使用的导频数分别为32、16、8。仿真结果表明即使基于BEM的双选稀疏信道的两步式探测估计算法使用的导频数远小于直接估计算法使用的导频数，基于BEM的双选稀疏信道的两步式探测估计算法的估计精度仍然优于直接估计算法

综合以上仿真结果可知，本文提出的基于BEM的双选稀疏信道的两步式探测估计算法，在大幅降低计算复杂度的同时增加了信道利用率；使用极少导频的条件下任然可获取极高的估计精度。这种优势主要来源于探测稀疏信道结构的过程，在探测稀疏信道结构之后，接收端可以利用较少的导频只估计显著抽头的时域响应。由于显著抽头的数量远远小于非显著抽头的数量，使得估计矩阵的规模大大降低，同时降低了计算复杂度。在估计过程中由于不考虑非显著抽头，非显著抽头上的噪声不会影响整个系统的估计性能，因此基于BEM的双选稀疏信道的两步式探测估计算法规避了大量的噪声影响，提升估计精度。

## 5.3 本章小结

本章将重点针对基于BEM的双选择性信道估计复杂度较高的缺点进行改进。算法思路是充分利用信道的稀疏特性，提出了两步式的探测估计算法，可以大大降低BEM的运算复杂度，并降低噪声对估计结果的影响。

仿真结果表明，本文提出的基于BEM的双选稀疏信道的两步式探测估计算法，在大幅降低计算复杂度的同时增加了信道利用率；使用极少导频的条件下任然可获取极高的估计精度。这种优势主要来源于探测稀疏信道结构的过程，在探测稀疏信道结构之后，接收端可以利用较少的导频只估计显著抽头的时域响应。由于显著抽头的数量远远小于非显著抽头的数量，使得估计矩阵的规模大大降低，同时降低了计算复杂度。在估计过程中由于不考虑非显著抽头，非显著抽头上的噪声不会影响整个系统的估计性能，因此基于BEM的双选稀疏信道的两步式探测估计算法规避了大量的噪声影响，提升估计精度。

# 第六章 基于可靠性的检测算法

## 6.1 基于信噪比条件的改进的半径选择策略

表明，本文提出的基于BEM的双选稀疏信道的两步式探测估计算法，在大幅降低计算复杂度

## 6.2 基于信噪比条件的改进的半径选择策略

表明，本文提出的基于BEM的双选稀疏信道的两步式探测估计算法，在大幅降低计算复杂度

# 第七章 总结及展望

## 7.1 论文工作总结

OFDM是一种多载波传输技术，OFDM技术既可以被看作一种多载波数字调制技术，也可以被看作是一种频分复用技术。OFDM技术的主要思想是：在频域内将信道划分成若干个相互正交的子信道，在每个子信道上使用一个子载波进行调制，各个子载波相互正交并行传输。传输过程中，为了使各个子载波互不干扰，被划分成的这些子信道必须要满足正交的关系，数据经过信道的传输后，在接收端可以经过解调将原来的信号再恢复出来。OFDM是无线环境中的一种高速传输技术，对于存在多径传播和多普勒频移的无线移动信道有极强的适应性。

无线信道的信道特性很不稳定，通常会随时间和频率发生变化。通常将无线信道的衰落特性分为大尺度衰落和小尺度衰落，在无线通信环境中这两衰落同时存在[10]，大尺度衰落主要用以刻画信号强度随传播距离的增减而降低，小尺度衰落则是刻画在较短距离内信号发生的强度迅速的衰减变化。

在OFDM系统中，常见的信道估计方法包括基于统计特性的盲估计方法、基于判决反馈的信道估计和基于导频的信道估计。本文主要研究基于导频的信道估计算法。基于导频的OFDM信道估计中，有三个主要问题：1）如何设计导频和导频的排布方式，2）接收端通过接收到的导频信息如何估计导频处的信道频域响应，3）获取完整导频处的信道信息后，如何恢复完整的信道频域响应或时域信道冲击响应。

本文深入讨论了OFDM系统中双选择性信道的特性，包括双选择性信道的时域模型、频域特性以及对基于导频的OFDM信道估计算法提出的挑战；由于双选择性信道的特性使得传统的基于导频的信道估计算法力不从心，无法有效的追踪信道变化。因此找到一种可以应对双选择性信道的估计方法已经非常急迫。BEM（基扩展模型）因其可以拟合快速变化的待估计参数，和较少的估计系数，成为了人们建模双选择性信道的首选。但是BEM模型也有其不足之处：

（1）BEM存在系统误差，在基函数选择不当的情况下，BEM的系统误差将大大影响估计性能；

（2）高精度基函数获取困难，高精度基函数在生成时通常需要信道的统计信息或相关特性，这些信息在实际的OFDM系统很难获取；

（3）运算复杂度较高，在信道长度较大的情况下，运算复杂度成的平方次增长。

基于BEM模型以上的不足，本文分别提出了如下改进算法：

（1） 提出了改进的基于LMMSE逆转化方法，降低系统误差，提升估计准确性，仿真结果表明，这种方法可以明显降低系统误差；

（2）提出了一种最优快速生成高精度基函数的方法，仿真结果表明，这两种方法可以大大简化估计过程提升估计性能；

（3）结合信道的稀疏特性，提出了两步式的探测估计算法，大大降低BEM的运算复杂度，并降低噪声对估计结果的影响。

综合仿真结果可知，本文提出的最优DPSS-BEM基函数在不同速度条件下性能均非常优越，由其是在高速移动条件下，优势更加明显。同时本文提出的最优DPSS-BEM建立了DPSS基函数生成时使用的时间半带宽乘积与信道的多普勒频移间的建模。在已知接收端的移动速度条件下可以直接计算多普勒频移，并通过多普勒频移生成最优DPSS基函数，仿真结果表明，这种基函数的性呢好于其他基函数。本文提出的基于BEM的双选稀疏信道的两步式探测估计算法，在大幅降低计算复杂度的同时增加了信道利用率；使用极少导频的条件下任然可获取极高的估计精度。这种优势主要来源于探测稀疏信道结构的过程，在探测稀疏信道结构之后，接收端可以利用较少的导频只估计显著抽头的时域响应。由于显著抽头的数量远远小于非显著抽头的数量，使得估计矩阵的规模大大降低，同时降低了计算复杂度。在估计过程中由于不考虑非显著抽头，非显著抽头上的噪声不会影响整个系统的估计性能，因此基于BEM的双选稀疏信道的两步式探测估计算法规避了大量的噪声影响，提升估计精度。

## 7.2 后续工作展望

由于时间和精力有限，本论文对于OFDM系统中稀疏信道估计技术的研究还不够完善，还有几方面的后续工作需要补充和延伸，具体主要包括以下几个问题：

（1）在提出改进的基于LMMSE逆转化方法中，由于干扰相关特性建模不理想，导致估计精度在高信噪比的条件下提升不明显；

（2）最优快速生成高精度基函数的方法只适用于DPSS基，有待推广。

# 参考文献

[1] 胡智娟, 钮文良. 中国移动通信网络的发展历程和趋势探析[J]. 北京联合大学学报(自然科学版), 2004, 3.

[2] 唐兴. 移动通信技术的历史及发展趋势[J]. 江西通信科技, 2008, 2: 16-20.

[3] 胡心怡, 方睿, 李日欣, 等. OFDM 技术发展综述[J]. 通信技术, 2010, 8: 132-134.

[4] Chang R W. Orthogonal Frequency Multiplex Data Transmission System: U.S. Patent 3, 448, 445[P]. 1970-1-6.

[5] Wu, C. J., & Lin, D. W. (2005, May). Sparse channel estimation for OFDM transmission based on representative subspace fitting. In Vehicular Technology Conference, 2005. Vol. 1,pp. 495-499.

[6] 张继东, 郑宝玉. 基于导频的OFDM 信道估计及其研究进展[J]. 通信学报, 2003, 24(11): 116-124.

[7] Giannakis G B, Tepedelenlioglu C. Basis expansionmodels and diversity techniques for blind identification and equalization of time-varying channels[J]. Proceedings of the IEEE, 1998, 86(10): 1969-1986.

[8] Yanhong Ju, Songlin Sun, Fei Qi, etal, ”An Improved Method for Reconstruction of Channel Taps in OFDM Systems,” in Proc. IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC), Split, Croatia, July 2013.

[9] Hrycak T, Das S, Matz G. Inverse methods for reconstruction of channel taps in OFDM systems[J]. Signal Processing, IEEE Transactions on, 2012, 60(5): 2666-2671.

[10] 啜钢，王文博，常永宇，移动通信原理与系统.第二版.北京邮电大学出版社.2009.

[11] 王文博, 郑侃. 宽带无线通信OFDM 技术[M]. 人民邮电出版社, 2007.

[12] 尹长川, 罗涛, 乐光新. 多载波宽带无线通信技术[M]. 北京邮电大学出版社, 2004.

[13] Negi R, Cioffi J. Pilot tone selection for channel estimation in a mobile OFDM system[J]. Consumer Electronics, IEEE Transactions on, 1998, 44(3): 1122-1128.

[14] Coleri S, Ergen M, Puri A, et al. Channel estimation techniques based on pilot arrangement in OFDM systems[J]. Broadcasting, IEEE Transactions on, 2002, 48(3): 223-229.

[15] Fernández-Getino Garcia, M. J., Paez-Borrallo, etal. Efficient pilot patterns for channel estimation in OFDM systems over HF channels. In IEEE Vehicular Technology Conference, 1999-Fall. Vol. 4, pp. 2193-2197.

[16] Hatthasin, U., Thainimit, S., Vibhatavanij, K.,etal (2009, May). An improvement of an RFID indoor positioning system using one base station. In IEEEComputer, Telecommunications and Information Technology, 2009. Vol. 2, pp. 862-865.

[17] Teo, K. A. D., & Ohno, S. Optimal MMSE finite parameter model for doubly-selective channels. In IEEEGlobal Telecommunications Conference, 2005. Vol. 6, pp. 3503-3506.

[18] Islam K M Z, Al-Naffouri T Y, Al-Dhahir N. On optimum pilot design for comb-type OFDM transmission over doubly-selective channels[J].IEEE Transactions onCommunications, 2011, 59(4): 930-935.

[19] Jan-Jaap van de beek, Ove Edfors，Magnus Sandell etc. On channel estimation in OFDM systems [J]. IEEE In proceedings of vehicular technology conference，1995，pp.815-819.

[20] 胡茂凯，陈西宏，董少强.OFDM 中一种改进的SVD 信道估计算法[J]．电测与仪表，2009：56-58．

[21] Fei Qi, Yanhong Ju, Songlin Sun, etal, ”BEM-based Reconstruction of Time-varying Sparse Channel in OFDM Systems,” in Proc. IEEE Vehi. Tech. Conf. (VTC), Las Vegas, NV,USA,Sep. 2013.

[22] A. P. Kannu and P. Schniter MSE-optimal training for linear time varying channels Speech, Signal Process.(ICASSP), Mar. 2005, pp. 789-792.

[23] Hrycak T, Das S, Matz G, et al. Practical estimation of rapidly varying channels for OFDM systems[J]. Communications, IEEE Transactions on, 2011, 59(11): 3040-3048.

[24] G. Leus, On the estimation of rapidly time-varying channels, in Euro.Signal Process. Conf. (EUSIPCO), Sep. 2004

[25] Dammann A, Kaiser S. Standard conformable antenna diversity techniques for OFDM and its application to the DVB-T system. In IEEE Global Telecommunications Conference, 2001. Vol. 5, pp. 3100-3105.

[26] Bomer L, Antweiler M “Perfect n-phase sequences and arrays” IEEE Journal on Select. AreasCommun, 10 (4): 782- 789, 1992.

[27] MengJingbo, Kang Guihua “A novel OFDM synchronization algorithm based on CAZAC sequence” .International Conference on Computer Applicationand System Modeling, 14: 634 -637, 2010.

# 致谢

在本论文完成之际，首先我要特别感谢我的研究生导师孙松林，这篇论文是在孙老师的悉心指导和大力支持下完成的。从研究方向确定，论文的选题，论文的框架和该方向的研究工作，直至最终本篇论文的撰写，整个过程中，孙老师都给予了细致的指导，提出了很多非常有用的意见和建议。另外，孙老师在学术方面严谨求实的态度和不断创新的进取精神，对我的本篇论文以及整个研究生期间的学习都产生了非常重要的影响。在此表达对孙老师真诚的感谢。

感谢所有在我本科和研究生期间教过我课的老师们，是课堂上知识的积累沉淀，让我有动力，有信心，有能力完成这篇论文。

另外，感谢本实验室的所有同学们，是你们在我研究生期间在学习和生活上给予了巨大的支持和帮助，感谢你们。尤其感谢本实验室无线通信组的组员们，因为有大家的合作和互相帮助，我们的研究工作才得以顺利进行，才有了我本论文中的所有成果，感谢大家！

最后，向在百忙之中抽出时间对本文进行评审并提出宝贵意见的各位专家表示衷心的感谢！

# 作者在读期间的研究成果

[1] Yanhong Ju, Songlin Sun, Fei Qi, Xiaojun Jing, Yueming Lu, Na Chen, ”An Improved Method for Reconstruction of Channel Taps in OFDM Systems,” in Proc. IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC), Split, Croatia, July 2013.

[2] Fei Qi, Yanhong Ju, Songlin Sun, Xiaojun Jing, Yueming Lu, ”BEM-based Reconstruction of Time-varying Sparse Channel in OFDM Systems,” in Proc. IEEE Vehi. Tech. Conf. (VTC), Las Vegas, NV,USA,Sep. 2013.

[3] Fei Qi, Songlin Sun, Bo Rong, Rose Qingyuang Hu, Yi Qian, ” Cognitive Radio Based Adaptive SON for LTE-A Heterogeneous Networks,” in Proc. IEEE GLOBECO, WN,USA,Dec. 2014.

[4] Yuhan Zhen, Fei Qi, Songlin Sun, Xiao Jun Jing, Hai Huang, ” Compressive Sensing based Decryption Method for Covert CDD-OFDM Transmission,” in Proc. International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), HK,PRC,Sep. 2014.