

学校编码: 10384
学号: 22320141151382

分类号 _____ 密级 _____
UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

时变信道下的 OFDM 水声通信
研究及其实现

Research and Implementation of OFDM Underwater
Acoustic Communication under Time-varying Channel

吴燕艺

指导教师姓名: 童峰 教授
专业名称: 海洋物理
论文提交日期: 2017 年 5 月
论文答辩时间: 2017 年 5 月
学位授予日期:

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2017 年 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

摘 要

21 世纪是信息技术的世纪,水声通信快速发展,不仅局限于军事领域,在商业方面也得到了广泛运用,例如海洋资源的开发利用、海洋环境监测、海底测绘等方面。但是,海洋信道极其恶劣,具有随机时-空-频变、带宽有限、时延多径及多普勒频偏等特性严重阻碍了水声通信的高速发展。

正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, 简称 OFDM)技术不但具有较高的频谱利用率,而且具有强抵抗多径能力,多载波形式使得其同时具有高传输速率。然而针对时变水声信道中的多径时延、多普勒频偏等问题,OFDM 系统的性能受到严重的影响。OFDM 对多普勒频偏极具敏感性,一旦存在多普勒频偏,将导致子载波间的正交性遭到破坏,解调性能大大下降。为了保证 OFDM 水声通信的准确性,降低系统误码率,需要采取一定的方法消除多普勒频偏的影响。故 OFDM 水声通信中的多普勒频偏估计及补偿至关重要。

本文结合 OFDM、时频差分调制、信道编码技术,研究时变信道下 OFDM 水声通信及其硬件实现,并进行仿真和海试实验验证。本文主要的工作有:

1、分析了时变信道下对 OFDM 水声通信的影响以及时频二维差分在水声通信中的应用。根据水声信道的特性,提出一种基于误码率搜索频偏估计法。通过仿真实验和海试实验分析表明,基于误码率搜索频偏估计法可以较精确的估计出多普勒频偏,通过重采样,可以很好的消除多普勒频偏带来的影响。

2、分析了频偏补偿方法,考虑到传统采用多相滤波器组实现插值和抽取改变采样率所需的滤波器数量大、实现复杂度高,从方便系统硬件实现角度,本文提出一种可变采样率的频偏硬件补偿方案,并进行了方案的分析、硬件实现;

3、在上述工作基础上,设计实现了一个基于 STM32 的 OFDM 水声通信系统,通过海试实验验证了时变信道下的 OFDM 水声通信系统性能。

关键词: 时变信道; OFDM; 时频二维差分; STM32; 多普勒频偏

Abstract

The 21st century witnesses rapid development of underwater acoustic communication, which has been widely used not only in the military field, but also in the business field, such as the development and utilization of marine resources, marine environment monitoring, marine surveying and mapping etc. However, the ocean channel with random time-space-frequency variation characteristic, limited bandwidth, multipath delay and Doppler shift, hinders the rapid development of underwater acoustic communication.

Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) technology, compared with single carrier communication, has the advantages of high spectrum utilization, strong anti-multipath ability and high transmission rate. But the multipath delay and the serious Doppler shift in the time-varying underwater acoustic channel seriously affect the performance of the OFDM underwater acoustic communication system. OFDM is very sensitive to Doppler shift. And if there is Doppler shift, the orthogonality between subcarriers will be destroyed, which will lead to a great reduction in demodulation performance. So, in order to ensure the accuracy of OFDM underwater acoustic communication and reduce the system error rate, we need to take some methods to eliminate the influence of Doppler shift. Therefore, the estimation and compensation of Doppler shift is an important part of OFDM underwater acoustic communication system.

In this paper, OFDM underwater acoustic communication and its hardware implementation under time-varying channel are studied in combination with OFDM, time-frequency differential modulation and channel coding techniques, and simulation and sea trial are also carried out. The design of OFDM underwater acoustic communication system under time-varying channel is the main work of this thesis. As follows:

1. Analyze the influence of time-varying channel and the application of time-frequency differential modulation in OFDM underwater acoustic communication. According to the characteristics of underwater acoustic channel, a Doppler shift

estimation method based on bit error rate search is proposed. Via the simulation and sea trial show that the Doppler shift estimation method based on bit error rate search can accurately estimate the Doppler shift. After resampling, Doppler shift can be eliminated effectively.

2. Analyze the common methods used for Doppler shift compensation. The polyphase filter-banks are usually used for interpolation and decimation to change the sampling rate, but the required number of filters is large and the implementation complexity is high. Considering the low complexity and simplicity of hardware implementation, a variable sampling rate hardware compensation scheme is proposed in this paper for Doppler shift compensation

3. The OFDM underwater acoustic communication system based on STM32 is designed and implemented, which performance under time-varying condition is verified by sea trial.

Key Words: time-varying channel; OFDM; time-frequency differential modulation; STM32; Doppler shift

目录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
目录.....	IV
Catalog	VI
第一章 绪论	1
1.1 论文研究背景及意义.....	1
1.2 水声通信的发展和研究现状.....	1
1.3 OFDM 技术在水声通信中的应用.....	3
1.4 OFDM 水声通信系统多普勒研究现状.....	3
1.5 论文内容安排.....	5
1.6 本章小结.....	6
第二章 水声信道及其特性	7
2.1 水声信道.....	7
2.2 水声信道特性.....	7
2.2.1 水声信道海洋环境噪声特性.....	7
2.2.2 水声信道声传播损失特性.....	7
2.2.3 水声信道多途效应特性.....	9
2.2.4 水声信道时变特性.....	10
2.3 本章小结.....	11
第三章 OFDM 水声通信	12
3.1 OFDM 系统.....	12
3.1.1 OFDM 基本模型.....	12
3.1.2 OFDM 技术研究.....	14
3.2 差分检测原理.....	17
3.2.1 差分检测.....	17
3.2.2 时频二维差分检测.....	18
3.2.3 时变信道下差分 OFDM 水声通信方案设计.....	20
3.3 本章小结.....	21
第四章 OFDM 中多普勒估计与补偿.....	22
4.1 OFDM 中多普勒效应影响.....	22
4.1.1 多普勒效应的影响.....	22
4.1.2 OFDM 系统中的多普勒问题.....	24
4.2 多普勒估计技术.....	25
4.2.1 块多普勒估计法.....	25
4.2.2 基于功率谱自相关函数法.....	26
4.2.3 模糊度函数法.....	28
4.2.4 基于频率估计法.....	29
4.2.5 非一致多普勒估计方法.....	29

4.3 基于误码率搜索频偏估计法.....	30
4.4 多普勒补偿.....	31
4.4.1 常用多普勒补偿方法.....	31
4.4.2 变采样率硬件重采样.....	32
4.5 多普勒估计仿真实验和结果分析.....	33
4.5.1 仿真设置.....	33
4.5.2 结果分析.....	35
4.6 本章小结.....	37
第五章 OFDM 水声通信系统实现.....	39
5.1 系统硬件实现.....	39
5.1.1 STM32F4.....	39
5.1.2 直接数据访问(DMA).....	40
5.1.3 MAX274.....	40
5.1.4 AD603.....	41
5.2 软件设计.....	41
5.2.1 程序主要流程.....	41
5.2.2 信号的发射.....	42
5.2.3 接收信号的解调.....	42
5.3 本章小结.....	43
第六章 实验结果及分析.....	44
6.1 OFDM 多普勒估计与补偿海试实验.....	44
6.1.1 实验设置.....	44
6.1.2 OFDM 多普勒估计与补偿海试实验结果.....	46
6.2 OFDM 通信样机海试实验.....	51
6.2.1 样机海试实验(a)设置.....	51
6.2.2 样机海试实验(a)结果.....	52
6.2.3 样机海试实验(b)设置.....	54
6.2.4 样机海试实验(b)结果.....	55
6.3 本章小结.....	57
第七章 总结与展望.....	59
参考文献.....	60
致谢.....	66
攻读硕士学位期间发表的论文.....	67

Catalog

Abstract in Chinese	I
Abstract in English	II
Catalog	IV
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Research Background and significance	1
1.2 Reserch Progress and Development of Underwater Acoustic Communication	1
1.3 Application of OFDM in Underwater Acoustic Communication	3
1.4 Reserch Progress and Development of Doppler in Underwater Acoustic Communication	3
1.5 Main Content of This dissertation	5
1.6 Summary	6
Chapter 2 Characteristics of Underwater Acoustic Channel	7
2.1 Underwater Acoustic Channel	7
2.2 Characteristics of Underwater Acoustic Channel	7
2.2.1 Ambient Noise of Acoustic Channel	7
2.2.2 Transmission Loss of Acoustic Channel	7
2.2.3 Multi-path Effect of Acoustic Channel	9
2.2.4 Time-varying Characteristics of Acoustic Channel	10
2.3 Summary	11
Chapter 3 OFDM Acoustic Communication	12
3.1 Principle of OFDM	12
3.1.1 Basic Model	12
3.1.2 OFDM Technology	14
3.2 Principle of Differential Technology	17
3.2.1 Differential Technology	17
3.2.2 Time-frequency Differential Technology	18
3.2.3 Time-frequency Differential OFDM	20
3.3 Summary	21
Chapter 4 Doppler Estimation and Compensation in OFDM	22
4.1 Doppler Effect in OFDM	22
4.1.1 Doppler Effect	22
4.1.2 Doppler Effect in OFDM	24
4.2 Doppler Estimation Technology	25
4.2.1 Block Doppler Estimation	25
4.2.2 Auto-Correlation Function Based on Power Spectrum	26
4.2.3 Ambiguity Function Method	28

4.2.4 Frequency Estimation Method	29
4.2.5 Non-Uniform Doppler Estimation Method	29
4.3 Doppler Shift Estimation Method Based on Bit Error Rate Search	30
4.4 Doppler Compensation	31
4.4.1 Doppler Compensation	31
4.4.2 Variable Sampling Rate in Hardware	32
4.5 Result of Doppler Estimation Simulation Experiment	33
4.5.1 Simulation Experiment Settings	33
4.5.2 Simulation Experiment Result Analysis	35
4.6 Summary	37
Chapter 5 The Implementation of OFDM Underwater Acoustic Communication System	39
5.1 Hardware Implementation	39
5.1.1 STM32F4	39
5.1.2 DMA	40
5.1.3 MAX274	40
5.1.4 AD603	41
5.2 Software Implementation	41
5.2.1 Main Programme Flow	41
5.2.2 Signal Emission	42
5.2.3 Demodulation of Received Signal	42
5.3 Summary	43
Chapter 6 Experimental Results and Analysis	44
6.1 Sea Trial of OFDM Doppler Estimation and Compensation	44
6.1.1 Experiment Settings	44
6.1.2 Experiment Result Analysis	46
6.2 OFDM Communication Prototype Sea Test	51
6.2.1 Experiment (a) Settings	51
6.2.2 Experiment (a) result Analysis	52
6.2.3 Experiment (b) Settings	54
6.2.3 Experiment (b) result Analysis	55
6.3 Summary	57
Chapter 7 Summary and Forecast	59
References	60
Acknowledgement	66
Publications during M.S. Study	67

第一章 绪论

1.1 论文研究背景及意义

丰富的海洋资源使得海洋开发和利用得到世界各国的普遍重视，这大大提高了对水声信息传输的需求，水声通信的价值日益凸显。水声通信已经由传统的军事用途扩展到广泛的商用民用，比如取得战场上的信息、实时的图像传输、海洋灾害预报、海上钻井平台、深海渔业资源开发、海底地貌测绘等。

相比于光波和电磁波，声波在水中的传播性能好，具有衰减慢、传输距离远等优势。与无线电信道相比，水声信道是传输特性恶劣的信道，其严重的多径、时变、噪声等效应对水声通信造成极大挑战。在水中声波的传播速度相对较低，容易产生多普勒现象，给水声通信研究造成了困难。目前，大部分水声通信研究算法都是针对静止信道或者缓慢变化的时变信道提出的，而对于快速变化的时变信道，仿真建模方式各异，并且算法运用受到很多限制，很难实现稳健的水声通信。

正交频分复用（Orthogonal Frequency Division Multiplexing，简称 OFDM）技术，主要有传输速率高以及频谱利用率高的特点，能够有效的抵抗码间干扰（Inter-Symbol Interference，简称 ISI）。但也有一些缺点：易受多普勒影响、峰均比大、存在保护间隔从而影响传输速率等。OFDM 技术在水声通信的应用极大地受到信道时变性和多普勒频偏制约。所以针对信道的时变性以及频偏对 OFDM 系统影响抑制的研究极其重要。本论文在这样的背景下，对时变信道下的 OFDM 稳健水声通信进行研究。

1.2 水声通信的发展和研究现状

水声通信的发展可分四个阶段：

一、模拟阶段

1840s，美国的海军水声实验室产生了世界上第一个真正意义上的水声通信系统，采用的是模拟单边带调制技术，主要应用于潜艇间的通信^[1]。1950s，美国伍兹霍尔海洋研究所(WHOI)研制的调频水声通信系统，实现了水底和船只之间的通信^[2]。

二、非相干数字阶段

非相干数字水声通信系统是 90 年代以前水声通信的主流技术。与模拟系统比较,非相干数字水声通信系统主要使用数字编解码技术进行纠错,从而降低水声信道对接收信号产生的衰落,使得其通信性能得到了提高^[3]。从工程实现角度分析,非相干数字通信技术实现较为容易,但是有个缺点就是在接收端对接收信号进行非相干解调并不能保证信息的完整性^[4]。

三、相干数字阶段

相干数字水声通信的突破最早在上世纪九十年代由美国伍兹霍尔海洋研究所(WHOI)/麻省理工学院(MIT)联合课题组取得^[5],在其工作基础上相干水声通信技术得到快速发展。

四、高速水声通信阶段

该阶段主要工作是将无线电移动通信技术应用到水声通信当中,经过各种实验验证在水声通信领域的可行性。从各种各样的实验表明,无线电中的某些技术能够有效提高水声通信速率。但是该阶段的相关技术,还未发展到成熟的地步,还有很多难题需要攻克。

国外对于水声通信的研究起步早,研究水平处于世界领先。美国伍兹霍尔海洋研究所(WHOI)、MIT、日本 OKI 电气公司、英国的 ENSTIFREMR 研究机构等都进行了大量的研究并取得了显著成果^[6]。

相比较国外,国内水声通信研究起步较晚,但经过不懈努力也有了很大的进展,取得了不少的研究成果。主要的研究单位有:哈尔滨工程大学、中国科学院声学研究所、厦门大学、中船重工 715 所、西北工业大学和东南大学等。2005 年,中科院声学所在南海进行了 OFDM 高速水声通信系统的实验,实现了 6.6km 距离解调零误码率^[7]。2012 年,哈工程在黑龙江莲花湖进行 OFDM 水声语音通信试验,通信速率达到 2.4kbps^[8]。2013 年厦门大学基于 DSP 平台上实现了水声语音通信系统,采用 WT600A 声码器及 FH-MFSK 调制技术,在较低信噪比下接收端合成语音良好,误码率小于 10^{-5} ^[9]。

近年来随着水声通信的快速发展,调制解调器(Modem)发挥的作用越来越显著。目前,主要有 Benthos^[10]、Datasonics、LinkQuest Inc.^[11]等几个水声调制解调器技术相对成熟的公司。

1.3 OFDM 技术在水声通信中的应用

OFDM 技术的应用可以追溯到 20 世纪 60 年代的军用高频通信系统,到了 20 世纪 90 年代中后期才开始逐渐应用于水声通信中。

国外将 OFDM 技术应用于水声通信中,取得一系列的研究成果。1994 年, S.Coatelan 等人设计了早期 OFDM 水声通信系统。该系统采用的是 2FSK 调制方式,带宽 3.6kHz,传输速率 250bps,在 2km 的通信距离上实现了小于 10^{-4} 的通信误码率^[12]。2000 年, Byung-Chul Kim 实现了基于 OFDM 的水声通信,传输速率可达 3584bps^[13]。2005 年, Mardar 等人在海洋中进行编码 OFDM 系统的试验,结果表明在 350 米通信距离内,误码率可达 10^{-4} ^[14]。2006 年, Li 等人提出改进的 OFDM 水声通信系统,以 ZP-OFDM 代替 CP-OFDM,有效的节省了传输功率,通信距离 2.5km,误码率为 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ ^[15]。2008 年,美国康涅狄格大学与伍兹霍尔海洋研究所(WHOI)进行合作,针对传输速率高的 MIMO-OFDM 水声通信进行研究,取得了不菲的成绩^[16]。2010 年,法国 B.Lyonnet 针对 ZP-OFDM 系统进行了多普勒频偏估计,采用的方法为最大似然估计^[17]。2013 年,来自印度的 K.Lakshmi 采用迭代稀疏重建理论,针对 OFDM 通信进行研究,对该系统进行信道估计^[18]。

从 2000 年开始,国内对水声 OFDM 进行研究。2006 年,西北工业大学的孙静等设计了一套可实现多普勒因子估计和信道估计均衡的 OFDM 系统,传输距离 10km,传输速率 4.8kbps^[19]。2009 年,哈尔滨工程大学桑恩方将 turbo 码和 OFDM 技术相结合,实现了 5km 距离的仿真试验^[20]。2011 年,冉茂华等提出了基于压缩感知原理的 OFDM 稀疏矩阵水声信道估计方法^[21]。2013 年,哈尔滨工程大学王巍、乔钢等人采用打孔判决反馈信道估计算法,在系统上实现了 MIMO-OFDM 水声通信^[22]。2015 年,厦门大学周跃海等提出了时反和时频差分 OFDM 水声语音通信系统方案,并进行了仿真和试验,结果表明该方案效果显著^[23]。

我国 OFDM 水声通信技术在近几年有了很大的进步,获得了一系列成果。但是还有许多关键技术瓶颈以及工程实用化问题需攻克,尚需继续努力。

1.4 OFDM 水声通信系统多普勒研究现状

声波在水下的传输速率和电磁波在空气中的传输速率相比要慢很多。如果收发两端存在相对运动,那么 OFDM 水声通信系统中将会产生较大的多普勒频移。

由于多普勒频偏的作用，接收信号将会在频谱上扩散，破坏 OFDM 子载波正交性，大大提高误码率，降低系统性能。迄今为止，针对水声 OFDM 技术多普勒频偏的研究，国内外都取得了不少成果。

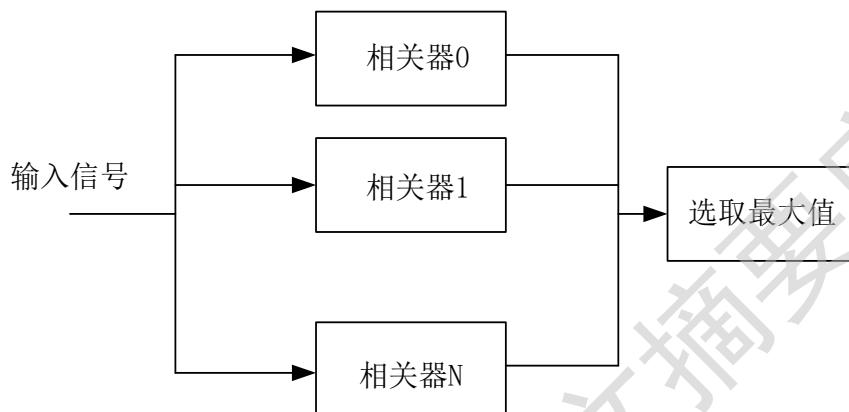


图 1.1 多个相关器的多普勒估计

Fig. 1.1 Doppler estimation of multiple correlators

1997 年, M.Johnson 等采用一组相关器与接收信号求相关的方法^[24], 如图 1.1 所示。此方法虽然简单, 但是要想得到高精度的多普勒因子, 相对应的相关器个数就得随之增加, 导致运算量大大增加。而且所选信号的模糊度形状和信号的时间带宽积也在一定程度上影响了多普勒估计精度。2000 年, B. S. Sharishi 等利用 LFM 信号对多普勒进行估计^[25]。帧首尾分别加入线性调频信号, 对首尾峰值测得的接收信号长度与发射信号长度进行比较, 从而估计该帧信号的多普勒因子。该方法简单稳健, 但是估计精度依赖线性调频插入的间隔, 间隔越小精度越大, 这在一定程度上牺牲通信效率。信号帧结构如图 1.2 所示。

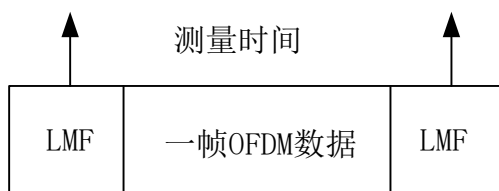


图 1.2 利用线性调频信号进行多普勒估计的数据帧结构

Fig. 1.2 Data frame structure for Doppler estimation with LFM

2006年, M. Stojanovic、S. Zhou 等人针对时变信道特点, 提出 ZP-OFDM 两步移除多普勒频偏的算法, 并且结合空间分集技术和信道编码技术, 实现了一套完整的 OFDM 水声通信系统。实验证明了该系统的有效性^[15]。2013年, Tu K 等针对不同传播路径中存在的不同多普勒因子, 在接收端设计一种可匹配特定路径多普勒因子的重采样方案^[26]。重采样后, FFT 模块将多普勒补偿信号转换成频域, 通过线性或非线性检测方案进一步处理, 实验表明了该接收机的有效性和鲁棒性。2015年, Yashar 等提出了一系列针对差分相干检测 OFDM 信号在水声信道中产生的多普勒频偏的补偿方法, 这些方法基于 FFT 来实现。同时提出了一种用于计算差分相干检测组合权重的随机梯度型自适应算法, 该算法利用的空间分集技术被应用于多通道中, 并且在接收器中针对多普勒频偏估计和重采样信号解调改进了同步技术, 实验证明该方法相较于常规的检测方法对系统的通信性能有显著的改善^[27]。

2008年, 西北工业大学崔健等利用循环前缀, 针对水声 OFDM 系统进行多普勒估计^[28]。与文献^[25]相比, 该算法有更高的精度。但当存在较大的多途扩展时, 相位误差也会增大。2012年, 哈尔滨工程大学陈阳等对多普勒估计算法进行了对比, 结果表明基于拷贝相关时延差算法复杂度低, 比较容易实现, 但是基于空载波算法虽繁琐但计算精度高。从实验结果可知, 在缓慢变化信道中两者效果相同, 但在快变信道中, 后者估计算法更为稳定^[29]。2013年, 厦门大学黄梅等提出了一种新的估计技术, 能够对水声 OFDM 系统中存在的多普勒频偏和水声信道进行联合估计, 针对多普勒的补偿主要是利用循环前缀来进行, 进而抵消载波间干扰, 并且通过试验验证了该方案^[30]。同年, 哈尔滨工程大学王巍等提出了一种新的多普勒补偿算法^[31]。

1.5 论文内容安排

浅海信道是一个复杂的时-空-频变信道。本文主要研究时变信道下的 OFDM 水声通信, 提出差分 OFDM 水声通信方案, 并进行理论分析及设计实现, 对 OFDM 系统性能影响最大的多普勒现象进行研究, 提出基于误码率搜索频偏估计法, 通过与时域估计法和频率估计法相比, 通过仿真及硬件实现, 验证所提基于误码率估计的频偏估计方法估计更为准确。论文内容安排如下:

第一章, 阐述论文研究背景、OFDM 水声通信的发展历程和研究现状, 并重

点对 OFDM 水声通信系统多普勒研究现状进行介绍。

第二章，分析水声信道特性，为水声通信系统的研究奠定基础。

第三章，主要介绍 OFDM 的基本原理和时频差分 OFDM 原理，包括基本模型、关键技术、多普勒补偿等。

第四章，分析多普勒对 OFDM 水声通信系统的影响，介绍 OFDM 水声通信系统中常见的几种多普勒频偏估计方法。提出了基于误码率搜索频偏估计法，并通过仿真实验，与频率估计法、时域估计法进行了对比。提出一种可变采样率的频偏硬件补偿方案，并进行了方案的分析、硬件实现；

第五章，主要介绍了本文所设计的基于 STM32 的 OFDM 水声通信系统硬件、软件等方面的内容。

第六章，给出海试实验结果并对实验结果进行分析，验证了本文方法及系统的有效性。

第七章，对论文工作进行了总结。

1.6 本章小结

本章主要概述了论文研究的背景及其意义，并对水声通信的发展和研究现状进行了阐述，重点介绍 OFDM 水声通信技术的应用以及 OFDM 水声通信系统中多普勒研究的现状。最后介绍了本论文内容安排。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts 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.

厦门大学博硕士学位论文摘要库