

学校编码: 10384

学号: 200430023

分类号 \_\_\_\_\_ 密级 \_\_\_\_\_

UDC \_\_\_\_\_

厦门大学

硕士学位论文

均衡器  
在水声通信系统中的应用研究

Research on equalizer in Underwater Acoustic  
Communication System

陈海兰

指导教师姓名: 胡晓毅 副教授

专业名称: 无线电物理

论文提交日期: 2008 年 6 月

论文答辩时间: 2008 年 月

学位授予日期: 2008 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2008 年 6 月

均衡器在水声通信系统中的应用研究

陈海兰

指导教师: 胡晓毅 副教授

厦门大学

厦门大学博硕士学位论文摘要库





## 厦门大学学位论文原创性声明

兹提交的学位论文，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的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文而产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士







## 摘 要

在移动无线通信中,由于能够提供高速率和高质量的通信服务,正交频分复用技术成为当前国际上的研究热点。正交频分复用技术因其具有频带利用率高和抗多径等优点,近年来在无线音频广播、无线视频广播、无线局域网、水声通信中得到了广泛的应用。由于水声信道是一个极其复杂的时-空-频变参随机信道,可用频带窄、传输损耗大,还广泛存在着多径效应,因此 OFDM 水声通信系统中的频域均衡问题是其技术难点之一。本文试图在前人工作的基础上,对这一问题做一些研究与探讨。

本文首先介绍了水声信道特性,其次介绍了自适应均衡技术,包括均衡器的类型、结构和算法,接着进一步介绍了 OFDM 通信系统中的均衡,时域均衡和频域均衡,文中分别介绍了频域均衡中的两种导频结构,块状导频和梳状导频;两种信道估计算法包括最小平方(Least Square LS)法,最小均方误差(Maximum Minimum Square Error MMSE)法;四种插值算法包括线性插值法等。

本文还对基于两种导频间隔,两种信道估计算法最小平方(Least Square LS)法,最小均方误差(Maximum Minimum Square Error MMSE)法,四种插值算法线性插值法等 OFDM 水声通信系统频域均衡进行了 Matlab 仿真;采用实验室自行研制的水声通信系统硬件平台,进行了实验室水池试验和海洋试验,两次试验结果表明:在导频间隔方面,采用导频间隔为 4 时系统误码率低于导频间隔为 5 时系统误码率;在信道估计方法方面,LS 信道估计与 MMSE 信道估计对于系统误码率的影响相差很小;在插值算法方面,样条插值法等较复杂算法适用于信噪比较高的水池试验,而线性插值法等较简单的算法则适用于信噪比较低的海洋试验。

**关键词:** 正交频分复用 (OFDM); 均衡; LS 算法; MMSE 算法



## Abstract

Because of enabling to provide high-rate and high-quality wireless for mobile communication service, OFDM system is becoming a very hot research topic recently. OFDM technology has been used in many fields, such as digital audio broadcasting, digital video broadcasting, wireless local network systems, underwater acoustic communication systems and so on. Since it is well known that underwater acoustic (UWA) channel is an extremely complex channel with the characteristic of time-frequency-space variant, narrow available bandwidth, great transmission loss and strong multi-path effect, it is especially one of the technical difficulties to estimate and equalize this dispersive channel. In this thesis, we are working on the topic based on some of the precedents' results.

At first, the characteristics of the underwater acoustic (UWA) channel is introduced, secondly, the self-accommodate equalization technique is introduced, including the equalizers' types, structures and arithmetic, then introduced the equalization of the OFDM communication system, time field equalization and frequency field equalization. In frequency field equalization, two pilot signals' structures are introduced, including block pilots and comb pilots; two kinds of channel estimator based on pilot signals are discussed, including Least Square (LS) estimator, Maximum Minimum Square Error (MMSE) estimator, in addition, four inserting-values arithmetic such as linear inserting-values arithmetic are introduced.

This paper modulates the UWA OFDM communication system which based on different pilot signals' structures, different channel estimators and different inserting-values arithmetic. This paper also implements the experiments based on above plans in the pool and in the sea. The experiments' results indicate that from pilots' interval, the system's error rate when pilots' interval equal to four is lower than pilots' interval equal to five; from channel estimators, these two estimators affects the system's error rate almost the same; from inserting-values arithmetic, the advanced arithmetic such as spline inserting-values arithmetic is more applicable to the case of higher signal noise ratio, and the more simple arithmetic such as linear inserting-values arithmetic is more applicable to the case of lower signal noise ratio.

**Key words:** OFDM; equalization; LS estimator; MMSE estimator

# 目 录

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 第一章 绪论.....                          | 1  |
| 1.1 引言.....                          | 1  |
| 1.2 水声通信的发展及现状.....                  | 2  |
| 1.3 均衡器在水声通信中及 OFDM 系统中的研究与应用状况..... | 4  |
| 1.4 本论文主要内容.....                     | 7  |
| 第二章 水声信道特性.....                      | 9  |
| 2.1 海洋环境噪声.....                      | 9  |
| 2.2 声波在海水中的传输损耗.....                 | 10 |
| 2.3 浅海水声信道的多径特性.....                 | 11 |
| 2.4 浅海水声信道的多普勒频移.....                | 12 |
| 2.5 本章小结.....                        | 13 |
| 第三章 自适应均衡技术.....                     | 14 |
| 3.1 线性均衡器.....                       | 17 |
| 3.1.1 M 阶格型均衡器.....                  | 19 |
| 3.1.2 梯度格型均衡器.....                   | 20 |
| 3.2 非线性均衡器.....                      | 21 |
| 3.2.1 判决反馈均衡器.....                   | 21 |
| 3.2.2 概率检测均衡器.....                   | 23 |
| 3.3 自适应均衡算法.....                     | 23 |
| 3.3.1 最小均方 (LMS) 算法.....             | 24 |
| 3.3.2 递归最小二乘 (RLS) 算法.....           | 25 |
| 3.3.3 格型递归算法.....                    | 27 |
| 3.4 盲均衡算法.....                       | 29 |
| 3.5 本章小结.....                        | 30 |
| 第四章 OFDM 系统的均衡技术.....                | 31 |
| 4.1 OFDM 系统.....                     | 31 |
| 4.1.1 OFDM 系统的介绍.....                | 31 |

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 4.1.2 OFDM 系统均衡的必要性 .....      | 32 |
| 4.2 OFDM 系统的时域均衡技术 .....       | 33 |
| 4.3 OFDM 系统的频域均衡技术 .....       | 35 |
| 4.3.1 频域均衡结构 .....             | 37 |
| 4.3.2 信道估计 .....               | 35 |
| 4.3.3 信道补偿 .....               | 42 |
| 4.4 本章小结 .....                 | 42 |
| 第五章 OFDM 水声通信系统频域均衡仿真 .....    | 43 |
| 5.1 OFDM 水声通信系统频域均衡仿真 .....    | 43 |
| 5.2 OFDM 水声通信系统仿真结果 .....      | 45 |
| 5.2.1 LS 和 MMSE 估计算法比较仿真 ..... | 48 |
| 5.2.2 不同导频频域间隔的比较仿真 .....      | 49 |
| 5.2.3 信道补偿 .....               | 50 |
| 5.3 本章小结 .....                 | 48 |
| 第六章 OFDM 水声通信系统频域均衡实验 .....    | 49 |
| 6.1 OFDM 水声通信系统频域均衡简介 .....    | 49 |
| 6.2 实验室水池试验 .....              | 49 |
| 6.3 海洋试验 .....                 | 52 |
| 6.4 本章小结 .....                 | 54 |
| 第七章 总结和展望 .....                | 55 |
| 参考文献 .....                     | 56 |
| 致 谢 .....                      | 59 |

# Index

|   |    |
|---|----|
| CHAPTER 1 PREFACE .....   | 1  |
| 1.1 INTRODUCTION .....  | 1  |
| 1.2 DEVELOPMENT AND STATUS OF UWA COMMUNICATIONS .....                | 2  |
| 1.3 RESEARCH AND APPLICATION OF EQUALIZER IN UWA COMMUNICATIONS ..... | 4  |
| 1.4 ARRANGEMENT OF THIS PAPER.....                                    | 7  |
| CHAPTER 2 PHYSICAL CHARACTERISTICS OF UWA CHANNELS .....              | 9  |
| 2.1 BACKGROUND NOISE OF THE SEA.....                                  | 9  |
| 2.2 TRANSMISSION LOSS OF SOUND WAVE IN UWA CHANNEL.....               | 10 |
| 2.3 MULTIPATH EFFECT OF UWA CHANNEL.....                              | 11 |
| 2.4 DOPPLER FREQUENCY SHIFT OF UWA CHANNEL .....                      | 12 |
| 2.5 SUMMARY.....  | 13 |
| CHAPTER 3 SELF-ADAPTIVE EQUALIZATION TECHNIQUE.....                   | 14 |
| 3.1 LINEAR EQUALIZER .....  | 17 |
| 3.1.1 M-scale grid-type equalizer .....                               | 19 |
| 3.1.2 Grads grid-type equalizer .....                                 | 20 |
| 3.2 NON-LINEAR EQUALIZER .....  | 21 |
| 3.2.1 Decision-feedback equalizer .....                               | 21 |
| 3.2.2 Probability-detection equalizer.....                            | 23 |
| 3.3 SELF-ADAPTIVE EQUALIZATION ARITHMETIC .....                       | 23 |
| 3.3.1 Least mean square (LMS) arithmetic.....                         | 24 |
| 3.3.2 Recursion least square (RLS) arithmetic.....                    | 25 |
| 3.3.3 Grid-type recursion arithmetic .....                            | 27 |
| 3.4 BLIND EQUALIZATION ARITHMETIC .....                               | 29 |
| 3.5 SUMMARY .....   | 30 |
| CHAPTER 4 EQUALIZATION OF OFDM SYSTEM .....                           | 31 |
| 4.1 THE OFDM SYSTEM .....   | 31 |
| 4.1.1 Introduction of OFDM system .....                               | 31 |
| 4.1.2 Need of OFDM system's equalization .....                        | 32 |

|  |    |
|--|----|
| 4.2 THE TIME FIELD EQUALIZATION OF OFDM SYSTEM.....  | 33 |
| 4.3 THE FREQUENCY FIELD EQUALIZATION OF OFDM SYSTEM .....  | 35 |
| 4.3.1 Structure of frequency field equalization of OFDM system .....                             | 37 |
| 4.3.2 Channel estimation .....   | 38 |
| 4.3.3 channel compensate.....  | 45 |
| 4.4 SUMMARY.....   | 42 |
| CHAPTER 5 SIMULATION OF UWA OFDM SYSTEM'S FREQUENCY<br>FIELD EQUALIZATION .....                  | 43 |
| 5.1 BRIEF INTRODUCTION OF THE SIMULATION OF UWA SYSTEM'S<br>FREQUENCY FIELD EQUALIZATION .....   | 43 |
| 5.2 RESULT OF SIMULATION .....   | 45 |
| 5.2.1 Structure of pilot signals.....  | 48 |
| 5.2.2 Simulation of LS estimator and MMSE estimator .....  | 49 |
| 5.2.3 Simulation of different inserting-values arithmetic.....                                   | 50 |
| 5.3 SUMMARY.....   | 51 |
| CHAPTER 6 EXPERIMENT OF UWA OFDM SYSTEM'S FREQUENCY<br>FIELD EQUALIZATION .....                  | 49 |
| 6.1 BRIEF INTRODUCTION OF THE EXPERIMENT OF UWA SYSTEM'S FR-<br>EQUCNCY FIELD EQUALIZATION ..... | 49 |
| 6.2 EXPERIMENT IN THE POOL .....   | 49 |
| 6.3 EXPERIMENT IN THE SEA .....  | 52 |
| 6.4 SUMMARY.....   | 54 |
| CHAPTER 7 SUMMARY AND DEVELOPMENT .....  | 55 |
| REFERENCES.....  | 56 |
| ACKNOWLEDGEMENT .....  | 59 |



## 第一章 绪论

### 1.1 引言

由于海洋占地球表面积的  $2/3$  多，且作为人类资源的宝藏，为人类提供各种宝贵的资源，在军事中也占有重要的战略地位。在探索、开发海洋的过程中，无论在军用还是在民用领域中，对海洋中信息的交流都产生了巨大的需求，而这种巨大的需求反过来又大大提高了对海洋通信的高效率、高可靠性的挑战。因此，解决水下信息传输的高效率高可靠性成为当今人类的重要任务和重要研究内容。

当今世界已进入了飞速发展的信息时代，通信是这一进程中发展最为迅速、进步最快的行业。陆地和空中通信领域包括的两个最积极、最活跃和发展最快的分支——Internet 网和移动通信网日臻完善，而海中通信的发展刚刚崭露头角。有缆方式的信息传输由于目标活动范围受限，通信缆道的安装和维护费用高昂以及对其他海洋活动（如正常航运）可能存在影响等缺点，极大地限制了它在海洋环境中的应用。另外由于在浑浊、含盐的海水中，光波、电磁波的传播衰减都非常大，即便是衰减最小的蓝绿光的衰减也达到了  $40\text{dB/km}$ ，因而它们在海水中的传播距离十分有限，远不能满足人类海洋活动中的需要。在非常低的频率（ $200\text{Hz}$  以下），声波在海洋中能传播几百公里，即使  $20\text{kHz}$  的声波在水中的衰减也只有  $2\text{—}3\text{dB/km}$ ，因此水下通信一般都使用声波来进行通信。而在这个频率范围内，声波在水中（包括海水）的衰减与频率的平方成正比，声波的这个特性导致了水下声信道是带宽受限的。采用声波作为信息传送的载体是目前海洋中实现中、远距离无线通信的唯一手段。

近年来，随着其它通信领域的快速发展，水声通信技术也取得了长足的进步，水声通信是一门集综合学科，如数字信号处理、无线电通信、移动通信、扩频通信、海洋科学技术等，而各学科的发展及各种新技术的出现都可以在水声通信中予以借鉴，许多新方法及新技术都进入了水声通信领域。

正交频分复用（OFDM）就是这些技术中典型的代表之一。正交频分复用（OFDM）技术是一种多载波数字调制技术，其基本原理就是把高速的数据流通过串并变换，分配到传输速率相对较低的若干个子信道中进行传输。由于每个子信道中的符号周期会相对增加，因此可以减轻由无线信道的时延扩展所产生的时间弥散

性对系统造成的影响。并且还可以在 OFDM 符号之间插入保护间隔，令保护间隔大于无线信道的最大时延扩展，这样就可以最大限度的消除由于多径而带来的符号间干扰 (ISI)。而且，一般都采用循环前缀作为保护间隔，从而可以避免由多径带来的信道间干扰 (ICI)。

## 1.2 水声通信的发展及现状

水声通信的历史可以追溯到 1914 年，在这一年水声电报系统研制成功，并且被英国海军部安装在巡洋舰上，这可以看作是水下数字式无线通信的雏形。从那时起，一些水下信息传输及通信设备相继研制成功并在军事领域得到广泛地应用。但是由于技术条件等的限制，从二十世纪六十年代开始的很长一段时期内，水声通信技术没有得到进一步地发展，因此与无线电通信的飞速发展相比，水声通信的技术和设备就显得落伍。从二十世纪七十年代开始，军事领域和民用领域都对水声通信技术产生了大量的需求，这就使得水声通信进入了一个发展相对迅速的阶段。在军事领域，随着探潜区域从沿海大陆架延伸到深水区，以及探测距离和精度的提高，要求水声数据传输系统的传输速率更高，传输距离更远，传输误码率更低。同时，水下武器系统的日益智能化，要求对其进行指挥控制，如：对潜通信，对水下航行器实施监测和导航，以及对水雷的远程声遥控等使得水下通信技术的研究得到人们的高度重视，水声通信技术的重要性也日益突出。在民用领域，随着渔业资源的开发利用，海上钻井平台和船只的应急维护，水下机器人的研制，水下资源勘探等的发展，对水声通信技术也提出了新的要求。因此，从那时起水声通信开始取得迅速地发展。

近年来，水声通信技术作为海洋军事中最重要和最关键的技术，已成为国内外发展最为迅速、研究相当活跃的科学技术之一。随着水声通信的发展，对水下高速通信（一般指速率大于 2kbit/s）的需求越来越大，使得水下相干通信采用了一些移动通信中的许多先进和复杂的技术，如正交频分复用（orthogonal frequency division multiplexing ,OFDM）技术、多天线(multiple input multiple Output, MIMO)技术等。其中 OFDM 技术是近几年来国内外学者研究的热点，并取得了一定的试验结果，具有抗多径、频谱利用率高的特点。MIMO 技术也是水声通信中刚刚兴起的技术及第四代移动通信（4G）的核心技术，由于其具有提高信道容量、抗衰落、降低误码率



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](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

廈門大學博碩