

学校编码: 10384
学号: 31120081151456

密级_____

廈門大學

硕士学位论文

基于 DSP 的浅海信道自适应均衡技术研究

Research of DSP based Shallow Water Acoustic
Channel Equalization

彭琴

指导教师姓名: 童峰教授

专业名称: 海洋物理

论文提交日期: 2011年5月

论文答辩时间: 2011年6月

2011年6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

水声通信技术是当代海洋开发、海洋环境立体监测和海洋军事活动中的重要技术组成部分。浅海水声信道是一个时间-空间-频率变化、强多径干扰的信道，是无线通信信道中最为复杂的信道之一。因此，实现高速、可靠的水声通信是一项具有挑战性的工作。

水声信道的多径效应会造成接收信号的幅度衰落、频率扩展和 ISI，解决水声信道特别是浅海信道的多径干扰是水声通信研究的关键技术难题。为了在带宽十分有限的水声信道中实现高速通信，通常使用带宽利用率高的相干方式进行调制。自适应均衡是当前普遍使用的一种抑制符号间干扰的技术，其核心是均衡算法。

本文首先分析了浅海水声信道的特性及其对水声通信的影响，然后介绍了自适应均衡技术，包括均衡器的类型、结构和算法，着重介绍了自适应均衡算法的性能，如最小均方误差(LMS)算法、递归最小二乘(RLS)算法、基于 Sigmoid 函数变步长 LMS(SVSLMS)算法。针对在实际应用中自适应均衡算法对迭代步长的敏感性，介绍了计算复杂度较低的 LMS 平行滤波器组(PFB-LMS)算法。海洋信道复杂多变的多径效应还会造成接收信号时延扩展的变化，使得均衡器阶数的选择对均衡算法有一定的影响，因此为了进一步减小算法对均衡器阶数的依赖性，本文提出了一种变阶数和变步长相结合的双参数平行滤波器组(dual parameter parallel filter banks least mean square, DPPFB-LMS)算法。并在 Matlab 平台上，通过仿真及实验比较了这几种自适应算法在均衡应用中的性能。从星座图、算法收敛特性以及系统的误码特性这三个方面对算法的性能进行了分析比较，测试了几种自适应算法在浅海信道的性能，分析了不同算法在实际应用中的参数稳健性。结果表明，DPPFB-LMS 算法能动态的调整迭代步长和滤波器阶数，改善了算法对阶数及步长参数的敏感性，验证了新算法的可行性。

最后，在 TMS320C6713 DSP 平台上验证了新算法。通过编写 DSP 代码实现了基于该算法的自适应均衡。验证了自适应均衡技术能较好的抑制码间干扰，降低误码率，改善通信的质量。

关键词：浅海水声信道；水声通信；码间干扰；自适应均衡；DPPFB-LMS 算法；DSP

厦门大学博硕士学位论文摘要库

Abstract

In contemporary ocean exploration, marine environmental monitoring and marine military activities, underwater acoustic (UWA) communication technology provides important support for reliable underwater information transmission. The shallow water acoustic channel is considered as the most difficult wireless communication channel so far. Therefore, realization of high-speed, reliable acoustic communication becomes a challenging task.

Characterized as a band-limited time-dispersive fading channel, the shallow water acoustic channel exhibits the characters of time-varying multipath propagation, frequency offsets and phase fluctuations. The key technical problem in UWA communication research is to overcome the multi-path effect in underwater acoustic channel, especially in shallow-water acoustic channel. The band-width efficient phase-coherent modulation techniques provide a feasible solution to achieve high data rates under severely band-limited UWA channels. In the implementation of phase-coherent modulation system, the adaptive equalization is the most commonly used technology to mitigate the inter-symbol interference (ISI).

In this thesis, firstly the characteristics of the UWA channel, as well as the typical equalization algorithms such as least mean square (LMS) algorithm, recursive least squares (RLS) algorithm, and sigmoid variable step-size least mean square (SVSLMS) algorithm are introduced. Considering the sensitivity upon step-size parameter which causes performance degradation in practical applications, parallel filter banks least mean square (PFB-LMS) algorithm is introduced. In order to alleviate the dependency on filter tap-length, this thesis presents a novel dual parameter adaptive algorithm which enables hybrid adjustment of step-size and tap-length based on PFB-LMS (DPPFB-LMS) manner. The performance of these adaptive algorithms is compared by simulation and experimental data to investigate the performance of these algorithms in several factors, such as the constellation, the convergence and the symbol error rate. Data processing results verify the improvement of the proposed algorithm in terms of

robustness upon step-size and filter tap-length parameter.

Finally, the practical performance of the DPPFB-LMS algorithm is verified on the TMS320C6713 platform. The results show that adaptive equalizer can overcome ISI caused by multi-path propagation and improve the performance of communication.

Key Words: Shallow water acoustic channels; Underwater acoustic communication; Inter-Symbol Interference; Adaptive equalization; DPPFB-LMS algorithm; DSP

厦门大学博硕士学位论文摘要

摘 要.....	I
Abstract.....	III
目 录.....	V
Catalog	VII
第一章 绪论	1
1.1 引言.....	1
1.2 水声通信的发展.....	2
1.3 水声信道均衡技术的发展与研究现状.....	3
1.4 本文的主要研究内容.....	7
第二章 浅海水声信道特性	9
2.1 海水中的声速.....	9
2.2 浅海环境噪声.....	10
2.3 浅海信道中的声传播损失.....	12
2.4 浅海水声信道的多径和起伏.....	14
2.4.1 多途效应.....	14
2.4.2 随机起伏.....	16
2.4.3 多普勒频移.....	16
2.5 水声信道特性对自适应均衡算法的影响.....	17
2.6 本章小结.....	18
第三章 自适应均衡技术	19
3.1 自适应均衡综述.....	19
3.2 自适应均衡器的分类.....	20
3.2.1 线性均衡器.....	20
3.2.2 非线性均衡器.....	21
3.2.3 分数间隔均衡器.....	22
3.3 自适应均衡算法.....	24
3.3.1 最小均方误差(LMS)算法.....	25
3.3.2 递归最小二乘(RLS)算法.....	26
3.3.3 SVSLMS 算法.....	27
3.4 均衡算法计算机仿真研究.....	28
3.4.1 LMS 算法仿真实验.....	29
3.4.2 RLS 算法仿真实验.....	30
3.4.3 SVSLMS 算法仿真实验.....	30
3.5 本章小结.....	31

第四章 改进的 LMS 算法	32
4.1 PFB-LMS 算法	32
4.2 论文提出的算法.....	34
4.3 自适应均衡算法的计算机仿真实验.....	36
4.3.1 时不变信道均衡算法仿真实验.....	36
4.3.2 时变信道均衡算法仿真实验.....	38
4.3.3 新算法性能分析.....	41
4.4 海上实验数据处理.....	43
4.4.1 海上实验参数设置.....	43
4.4.2 信道特性.....	44
4.4.3 均衡算法结果及分析.....	45
4.5 本章小结.....	48
第五章 自适应均衡算法的 DSP 实现	50
5.1 TMS320C6713 DSP 简介	50
5.2 TMS320C6713 开发平台.....	52
5.3 软件开发环境.....	53
5.4 自适应均衡算法在 DSP 上的实现	54
5.4.1 参数配置及软件设计.....	54
5.4.2 自适应均衡算法在 DSP 上的仿真	55
5.4.3 海试数据.....	59
5.5 本章小结.....	61
第六章 总结与展望	62
参考文献	64
致谢	69
攻读硕士学位期间发表的论文	70

Catalog

Abstract.....	III
Catalog	VII
Chapter one Introduction.....	1
1.1 Research background	1
1.2 Development and research progress of underwater communication	2
1.3 Development and research progress of adaptive equalization technique	3
1.4 Main research contents	7
Chapter two Characteristics of underwater acoustic channel	9
2.1 Sea velocity	9
2.2 Environment noise in shallow sea	10
2.3 Transmission loss in shallow sea	12
2.4 Multi-path and fluctuation effect in shallow sea	14
2.4.1 Multi-path in shallow sea	14
2.4.2 Fluctuation in shallow sea	16
2.4.3 Doppler shift	16
2.5 Effect on adaptive equalization algorithm	17
2.6 Summary	18
Chapter three Adaptive equalization technique	19
3.1 Brief introduction of equalization	19
3.2 Adaptive equalizer	20
3.2.1 Linear equalizer	20
3.2.2 Non-linear equalizer	21
3.2.3 Fractional spaced equalizer	22
3.3 Adaptive equalization algorithm	24
3.3.1 Least mean square (LMS) algorithm	25
3.3.2 Recursion least square (RLS) algorithm	26
3.3.3 SVSLMS algorithm	27
3.4 Simulation research of equalization algorithm	28
3.4.1 Simulation research of LMS algorithm	29
3.4.2 Simulation research of RLS algorithm	30
3.4.3 Simulation research of SVSLMS algorithm	30
3.5 Summary	31
Chapter four Underwater acoustic channel equalization	32
4.1 Parallel filter banks LMS (PFB-LMS) algorithm	32

4.2 The new algorithm	34
4.3 Simulation research of equalization algorithm	36
4.3.1 Time invariable channel	36
4.3.2 Time variable channel	38
4.3.3 Performance analysis of the proposed algorithm	41
4.4 Experiment and result	43
4.4.1 Parameters setting	43
4.4.2 Characteristics of UWA channel	44
4.4.3 Experiment result and discussion of equalization algorithm	45
4.5 Summary	48
Chapter five Adaptive equalization algorithm based on DSP	50
5.1 Brief introduction of DSP	50
5.2 Brief introduction of TMS320C6713 platform	52
5.3 Design of DSP software	53
5.4 Realization of adaptive equalization algorithm	54
5.4.1 Software design and parameters setting	54
5.4.2 Simulation result	55
5.4.3 Experiment result	59
5.5 Summary	61
Chapter six Summary and forecast	62
References	64
Acknowledgement	69
Publications during M.S. study	70

第一章 绪论

1.1 引言

21 世纪是人类深入开发利用海洋资源的世纪，覆盖地球表面积 71% 的海洋成为人类活动空间的新领域和新热点。水下通信的研究也越来越受到人们的重视。目前，无线电技术也日趋成熟，人们试图将相对成熟的无线电技术运用于海洋中，但是海水这一特殊的介质对这一想法的实践起到了很大的阻碍作用。由于陆地上通信的主要载体是电磁波，然而，海水是电的导体，因此电磁波在海水中的衰减很快，传播距离非常有限。声波是目前唯一能够在海水介质中进行远距离传播的信息载体，是海洋中无线通信的唯一有效手段^[1]，因此，水声通信技术应运而生。

水声通信作为水下无线通信的有效手段，在民用和军用方面都有着重要的意义。军用方面，建立水声数据通信系统以便解决潜艇之间、潜艇与水面舰艇之间互通战场信息的问题。另外，水声通信技术对水下军事目标的监测、定位、跟踪与分类过程中提供了重要技术支持和保障。在民用方面，随着海洋开发和信息产业的发展，利用海洋信道传递数据信息的需求大为增加，水声通信技术广泛应用于海洋物理研究、数据采集、交通导航、资源勘探、污染监控、灾难预防等方面。由于水声通信技术在民用和军用方面的广泛前景，水声通信技术成为水下通信研究的热点。

由于水声信道自身的特殊性，水声通信发展相对滞后。众所周知，水声信道是一个十分复杂的信道，水声通信的衰耗因素较多，特别是在海水中传播时，声传播损失不仅与频率相关，而且还受到海水的盐度、深度、温度等的影响，使得水声信道带宽极其有限，海水中不均匀分布的声速剖面造成声线的弯曲，而声波的界面反射和随机散射又引起声波接收信号的多途效应。强噪声，窄频带，强多径，这些不利因素加剧了水声通信系统抗多径，抗衰落的困难。均衡技术具有优良的抗多径衰落和干扰的能力，是水声通信研究中的关键技术，也是目前研究的热点，利用自适应均衡技术实现可靠的数据传输已成为现代水声通信系统的特征之一。

1.2 水声通信的发展

水声通信最初应用于军事领域,世界上第一个具有实际意义的水声通信系统是美国海军水声实验室于 1945 年研制的水下电话,该系统使用单边带调制技术,载波频率 8.33 kHz,主要用于潜艇之间的通信。早期的水声通信通常使用模拟频率调制技术,但是模拟调制系统不能减轻由水声信道的衰落所引起的畸变,限制了系统性能的提高。70 年代以来随着电子技术和信息科学的迅速发展,水声通信系统开始采用数字调制技术,它利用纠错编码技术提高数据传输的可靠性并对时域和频域上的畸变进行补偿。

上世纪 80 年代,水声通信主要以非相干的频移键控(FSK)调制等技术为主。FSK 系统对水声信道的时间和频率扩展具有很强的适应能力,能提供高可靠性、低速率的遥测通信,在水声通信系统中得到广泛的应用。一个有代表性的例子为:美国 Woods Hole 海洋研究所使用载频 20-30 kHz,采用 MFSK 调制信号(其中把系统分为 16 个子带,每个子带内是 4FSK,总的使用 64 个频率),最大传输达 5 kbps,在浅海水平信道工作距离为 4 km,系统的误码率为 10^{-2} - 10^{-3} 数量级^[2]。

随着海洋事业的不断发展,利用水声信道进行高速率的数据传输的需求不断增大,对通信系统的信息量和性能的要求也随之增加。在实现高速通信时,有限的信道带宽和多途接收会引起非常严重的码间干扰(ISI),造成接收数据严重的误码。即使是同一声源,在不同季节、不同地区,传播情况可能都不相同,因此在水下实现高速通信非常困难。针对水声信道的这种特殊性,由于非相干系统的传输速率低,而且带宽利用率不高,所以人们的注意力开始转向相干通信系统。

近年来,大量的研究着重于扩展系统带宽和提高数据的传输速率上,从而推动了相位相干调制技术的发展。90 年代早期,在相位相干系统中引进了一种强有力的接收算法,它将判决反馈均衡器(DFE)和锁相环(PLL)结合起来^[3, 4],系统采用正交相移键控(QPSK)调制,在 90 km 的距离上得到了 1000 bps 的数据传输速率。90 年代后期以来,集中在对水声通信中的新技术的研究上,如水下多载波调制技术^[5, 6]、空间分集技术、直接序列扩频或跳频扩频通信等,并取得了不错的成果。

水声通信的研究主要集中于美、英、日、法等发达国家的大学和科研机构。美国的 Daniel Rouseff 等人在西雅图附近海域采用被动相位共轭技术进行了浅海

水声通信实验^[7,8], 在传输距离为 0.65 km 且数据率 1.23 kbps 时实现了无差错传输。Edelmann G F、Song H C 等人应用时间反转技术构建了一个相关水声通信系统^[9], 并于 2000 年 5 月 19 日至 6 月 15 日在意大利厄尔巴岛(Elba Island, Italy) 北部的浅海水域进行了实验, 传输距离为 10 km, 载频 3500 Hz, 带宽 500 Hz。日本研究了一种图像传输系统^[10]: 采用 4DPSK 技术, 使用载频 20 Hz, 在海底到海面的 6500 m 的垂直信道中, 采用最小均方(LMS)算法, 结合线性均衡器, 传输速率达到 16 kbps, 误码率为 10^{-4} 。法国几位科学家于 2002 年和 2003 年在 Brest Bay 附近的多个海域进行了实时低速率水声语音通信的海试, 在 500–4000 m 的水平距离上实现了 6–20 kbps 的实时语音传输^[11]。

国内的水声通信研究起步相对较晚, 但也取得了一定的成果。中国科学院声学所对水下多进制 PSK 调制解调系统和 OFDM 通信系统进行了深入研究, 并进行了多次湖试和海试实验, 在信道估计、差错控制编码、均衡和抗多途等方面有丰富的研究成果, 在国内外速率大于 2 kbps 的高速水声通信研究中处于领先地位。他们于 2005 年 12 月在南海进行了海试^[12], 系统采用 16QAM 调制, 通信距离 6.6 km, 误码率为 0, 速率为 20 kbps。哈尔滨工程大学实现了一个水声扩频通信系统, 2005 年 10 月在吉林省松花湖进行了湖试, 同年 11 月在山东青岛进行了海试。实验结果表明, 该通信系统在传输距离在 10 km 以内时误码率可达到 10^{-6} 量级, 在 10–25 km 的范围内误码率可达到 10^{-5} – 10^{-6} 数量级^[13]。西北工业大学在中远程水声通信方面也有较深入的研究, 2005 年对 M 元 LFM 水声通信技术进行了海试, 当带宽为 200 Hz, 距离为 30 km, 数据率在 11.8 bps 时, 没有误码^[14]。厦门大学成功研制了鲁棒性好, 可懂度和清晰度高的数字式水声语音通信样机、水下图像水声传输实用样机、水下 E-mail 传输系统。

1.3 水声信道均衡技术的发展与研究现状

均衡器最早应用于无线电领域, 用于消除信道响应引起的 ISI, 对信道或整个传输系统特性进行补偿。最初均衡器的参数都是固定的或者是手动调节的, 性能很差。二十世纪六十年代初, Widrow B 提出了自适应信号处理的理论, 均衡技术由早期的固定式均衡和预置式均衡进入了自适应均衡的阶段, 并且取得了巨大的发展^[15]。1965 年, Lucky 根据极小极大准则提出了一种“迫零自适应均衡

器”；第二年，他又将此算法推广到跟踪模式^[15]。1967年，Austin提出了判决反馈均衡器^[15]。1969年，Gersho等人提出了根据最小均方误差法的自适应算法(LMS)^[16]，由于LMS算法的简单性，被广泛地应用于多种ISI不是很严重的场合。随着通信技术的发展，人们发现线性均衡器在很多应用领域的效果无法令人满意，此后自适应均衡技术开始转向非线性处理，并开辟了两条非线性发展的方向。其中之一就是DFE，另外一个发展方向就是采用极大似然估计的思想对信息符号或序列进行检测的方法，即自适应极大似然序列估计(MLSE)^[17]。DFE与线性均衡器相比性能有了很大的提高，主要表现在它对于信号幅度畸变有良好的补偿性，避免了线性均衡器噪声增强的现象，同时，这种均衡器对信号采样的相位不敏感。MLSE方法实质上是在基于维特比算法的极大似然序列估计的基础上采用自适应信道估计器为序列检测提供信道信息。由于结合了自适应信道估计技术，使得这一方法获得了更为广阔的发展空间。从另一方面来看MLSE方法通过充分利用信道特性而获得了优良性能的同时也带来了其计算量随着信道复杂度的提高急剧增长的问题。这使得这一方法在复杂的海洋水声信道中的应用受到严重的阻碍。

为改善系统的动态性能，相干水声通信系统通常都采用DFE加PLL的结构。DFE的前馈滤波器完成对接收信号的采样，并对ISI进行抑制。反馈滤波器完成对以前符号的判决，并对整个算法引入非线性。因此自适应均衡器可以跟踪复杂的相对慢变的信道响应，PLL能快速而稳定地跟踪由于信道时变特性所带来的多普勒频移。美国西北大学和Woods Hole海洋研究所(WHOI)联合研制了一种采用绝对相位相干调制QPSK的系统^[3]，该系统采用了瞬时同步和DFE联合技术在强多径环境中提取载波，通过对载波相位和均衡器参数的联合估计，进行相干检测，并在各种水声环境中进行了实验，数据率从长距离信道的2 kbps，到浅海中距离的40 kbps。

采用空间分集与均衡处理不仅可以有效抑制ISI，而且可以有效提高信噪比，在远距离水声通信中很有优势。为了克服时变多途的相位模糊问题，Proakis J G等人在多通道自适应判决反馈结构上加入了二阶PLL^[3]，并给出了海上实验结果，通信距离110海里，QPSK信号，数据率333 sym/s，采用12阵元的SDE技术比单通道均衡的输出信噪比提高了5 dB。Capellano V和Jourdain G对比了几

种多通道线性均衡器与二阶 PLL 相结合的接收机算法^[18]，这些算法包括：LMS 算法，自适应步长 LMS 算法和 RLS 算法。通过几组单通道和多通道实验数据的验证，表明了空间分集可有效改善算法的收敛性能。而多于 3 重的分集并未体现出更大的优越性。改变三种算法的步长因子或遗忘因子，表明自适应步长 LMS 算法对步长因子的改变适应能力更强，因而更适合于在实际工程中的应用。

2009 年，针对浅海水声信道长时延、强多途干扰的特点，厦门大学刘胜兴等人建立了一种新的带自适应循环判决反馈均衡的 Turbo 译码结构^[19]，该结构对典型的 Turbo 译码器进行了改进，使其既能输出信息比特，又能输出校验比特，这些比特经硬判决、符号映像及信道交织后反馈回 DFE，构成带自适应循环判决反馈均衡的 Turbo 译码结构。厦门港实测 5 途浅海水声信道仿真实验结果表明，该结构具有优良的抗多途性能，信噪比大于 4 dB 时，误比特率小于 10^{-5} 。

2010 年，西北工业大学吴芳菲等人提出了带宽利用率高的相干远程高速水声通信方法^[20]，利用 8PSK 和 16QAM 信号进行了远程(30 km)海上实验研究，判决反馈均衡器中采用的是常规的 LMS 算法。结果表明，采用内嵌二阶锁相环的自适应 DFE 接收机可消除慢变水声信道的影响，在 30 km 的水平距离上，数据率可达 1200 bps 和 1600 bps，纠错前误码率在 10^{-3} 以下。

李红娟和孙超提出了一种既适用于不同信道又节省计算量的快速自优化 LMS(FOLMS)+LMS 均衡算法^[21]，采用 FOLMS 算法来调整抽头系数，并将每次迭代计算出的均方误差 MSE 与门限进行比较，一旦 MSE 低于门限值，就转而采用 LMS 算法。对该算法进行了海试实验^[22]，BPSK 信号码元速率为 2 kbaud，长度为 1000 个码元，接收信号的采样频率为 80 kHz。在 100 m 的距离上，实验结果表明：FOLMS+LMS 算法具有计算量低和自适应步长的优越性。

2008 年，赵亮等人提出了一种运算量更小，但性能更优的均衡算法^[23]。该算法采用快速自优化 LMS 分集合并(FOLMSDC)算法对合并器系数进行更新、采用 FOLMS 算法更新均衡器系数，一方面减少了运算量，另一方面改善了均衡器的收敛速度和信道跟踪性能。同时，采用快速自优化 LMS 相位补偿(FOLMSPC)算法按照 MMSE 准则自适应地更新，从而更好地校正相位失调。该算法的海试实验结果表明：在 1 km 的距离(信道多径最为严重)上，获得了 5.42×10^{-5} 的误码率。

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 for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库