

学校编码: 10384  
学号: 20051302199

分类号 \_\_\_\_\_ 密级 \_\_\_\_\_  
UDC \_\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

浅海信道直接序列扩频  
水声通信系统研究

Research On Shallow Water Acoustic Communication  
Based On Direct Sequence Spread Spectrum Techniques

张刚强

指导教师姓名: 童 峰 教授  
专 业 名 称: 海 洋 物 理  
论文提交日期: 2008 年 6 月  
论文答辩时间: 2008 年 6 月  
学位授予日期:

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2008 年 6 月

# 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产生的权利和责任。

声明人（签名）：

2008 年 6 月 日



## 摘 要

随着海洋开发和信息产业的发展,利用海洋声信道进行数据信息传输的需求大为增加。水声信道的多径效应,使信号产生严重的衰落效应是影响水声通信系统性能的主要因素。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,目前抗多径干扰技术主要有扩频技术、均衡技术、分集技术等。其中直接序列扩频技术(DSSS)是一种十分有效的抗多径干扰技术,同时还有很好的多址性能,因此也是构建水下通信网络的关键技术。

本论文首先介绍了水声通信的发展历程以及水声扩频通信的研究方向,然后分析了浅海水声信道的特点,论述了时变多径是水声通信面临的最大困难。接着讨论了直接序列扩频技术的关键技术。在直接序列扩频系统中,无论是RAKE接收机还是均衡器的设计,对于信道本身的估计都是一个基本的要求,因此本文提出一种收敛模式下用LMS算法获得信道的参数,收敛后(即跟踪模式)切换到SOLMS算法跟踪信道的变化的信道估计方法,新方法结合了LMS算法收敛快和SOLMS算法跟踪性能好的优点。针对浅海水声信道复杂多变、强多途、强起伏的特点,本文采用了DS/DBPSK调制解调技术,该方案在解调端采用了数字匹配滤波、延时差分解调等技术,不需要增加额外的伪随机码同步捕获和载波提取环节。最后,以TI公司的高性能DSP芯片TMS320C6713为核心,并辅以外围电路组成一个DS/DBPSK水声通信实验系统,给出了湖试和厦门港海上实验结果。

关键词: 浅海水声信道; 信道估计; DS/DBPSK; DSP 芯片

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## Abstract

With the rapid development of ocean and information technology, the requirement of transmitting the data through the underwater acoustic channel is increasing greatly. The signal's fading which is caused by underwater especially shallow water acoustic channel multipath propagation is the main factors influencing the performance of underwater acoustic communication systems. Because of direct sequence spread spectrum (DSSS) techniques' ability of resisting multipath interference and multi-access, it is the key technique which is used to transmit data in underwater wireless acoustic communication networks.

This thesis briefly introduced the development of domestic and abroad research on underwater acoustic communications and the research orientation on spread spectrum communication, and then the properties of shallow underwater acoustic channels and the effects of time-varying multipath propagation upon transmitted signals are analyzed. In the third part, we introduce the key technology of direct sequence spread spectrum communication. Channel parameters estimation is need in the design of RAKE receiver or equalizer of direct sequence spread spectrum communication system, so in the fourth part, we presents a novel method of underwater acoustic channel estimation which initially uses LMS algorithm to acquire channel parameters in convergence mode and then converts to SOLMS algorithm for channel tracking after convergence (in tracking mode), this new method combines the merits of the fast convergence rate of the LMS algorithm and the better tracking performance of SOLMS algorithm. According to shallow underwater acoustic channels' characteristics of long multipath spreads and rapid time variations and evidence fluctuations, an underwater acoustic communication system based on DS/DBPSK technique was present in this paper, this scheme adopts digital matched filtering, delay differential demodulation techniques and so on, and it doesn't need pseudo random codes synchronization and carrier wave extraction. At last, a DS/DBPSK underwater acoustic communication system based on a chip

TMS320C6713 is set up combined with some peripheral circuits. And the experiment results gathered in the lake and in Xiamen port are given.

Key words: shallow water acoustic channels; channel estimation; DS/DBPSK; DSP

厦门大学博硕士论文摘要库

## 目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
目 录.....	IV
Catalog .....	VI
<b>第一章 绪论 .....</b>	<b>1</b>
1.1 引言.....	1
1.2 水声通信的发展历程.....	1
1.3 水声扩频通信的研究方向.....	3
1.3.1 扩频码选择.....	4
1.3.2 接收机结构.....	5
1.3.3 信号调制和编码方式.....	7
1.3.4 信号处理方法.....	8
1.4 本论文主要内容.....	9
<b>第二章 浅海水声信道特性 .....</b>	<b>11</b>
2.1 引言.....	11
2.2 浅海水声信道的主要特点.....	11
2.2.1 多径效应.....	11
2.2.2 环境噪声.....	12
2.2.3 传输损耗.....	13
2.2.4 多普勒频移.....	15
2.2.5 起伏效应.....	16
<b>第三章 扩频技术原理 .....</b>	<b>18</b>
3.1 扩频技术的理论基础.....	18
3.2 扩频技术的性能指标.....	20
3.3 直接序列扩频技术及其关键技术.....	21
3.3.1 伪随机序列.....	21
3.3.2 相关解扩.....	26
3.3.3 扩频系统的同步.....	27

3.3.4 RAKE 接收技术.....	30
<b>第四章 基于 LMS/SOLMS 的时变多径水声信道估计算法.....</b>	<b>32</b>
4.1 引言.....	32
4.2 LMS 及 SOLMS 算法简介.....	33
4.3 新的时变信道估计算法.....	35
4.4 仿真实验.....	36
<b>第五章 DS/DBPSK 调制解调原理.....</b>	<b>40</b>
5.1 引言.....	40
5.2 DS/DBPSK 调制解调原理.....	40
5.2.1 发射端流程和数学模型.....	41
5.2.2 接收端流程和数学模型.....	42
5.2.3 帧同步技术.....	47
5.2.4 码元同步跟踪技术.....	50
<b>第六章 DS/DBPSK 系统接收端的 DSP 实现.....</b>	<b>51</b>
6.1 引言.....	51
6.2 TMS320C6713 DSPs 概述.....	52
6.2.1 EDMA.....	54
6.2.2 EMIF.....	54
6.2.3 接口资源.....	55
6.2.4 ICETEK-C6713 的 UART 接口.....	56
6.3 系统硬件设计.....	57
6.4 系统软件设计.....	59
<b>第七章 湖试海试结果分析.....</b>	<b>61</b>
7.1 湖试结果分析.....	61
7.2 海试结果分析.....	66
<b>第八章 总结与展望.....</b>	<b>70</b>
<b>参考文献.....</b>	<b>71</b>
<b>致谢.....</b>	<b>75</b>
<b>攻读硕士学位期间发表的文章.....</b>	<b>76</b>

<b>Abstract.....</b>	<b>II</b>
<b>Catalog .....</b>	<b>IV</b>
<b>Chapter One Introduction .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Foreword.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Development Course Of Underwater Communication .....</b>	<b>1</b>
<b>1.3 Research Orientation On Underwater Spread Spectrum Communication</b>	<b>3</b>
1.3.1 Spread Spectrum Code Selecting.....	4
1.3.2 Receiver Structure.....	5
1.3.3 Modulation and Coding Mode .....	7
1.3.4 Signal Processing Method.....	8
<b>1.4 Main Research Contents .....</b>	<b>9</b>
<b>Chapter Two Characteristic Of Shallow water Acoustic Channel.</b>	<b>11</b>
<b>2.1 Foreword.....</b>	<b>11</b>
<b>2.2 Main Features of Shallow Underwater Acoustic Channel .....</b>	<b>11</b>
2.2.1. Multipath Effects.....	11
2.2.2 Ambient Noise.....	12
2.2.3 Transmission Lost.....	13
2.2.4 Doppler Shift.....	15
2.2.5 Fluctuation Effects.....	16
<b>Chapter Three The Principle of Spread Spectrum Techniques ...</b>	<b>18</b>
<b>3.1 The theoretical Basis of direct sequence spread spectrum Techniques....</b>	<b>18</b>
<b>3.2 The performance index of direct sequence spread spectrum .....</b>	<b>20</b>
<b>3.3 The key technology of direct sequence spread spectrum .....</b>	<b>21</b>
3.3.1 pseudo-random sequence.....	21
3.3.2 despread spectrum.....	26
3.3.3 synchronization of direct sequence spread.....	27
3.3.4 RAKE reception.....	30
<b>Chapter Four Time-varying multhpath underwater acoustic channel</b>	
<b>estimation based on LMS/SOLMS algorithm.....</b>	<b>32</b>

4.1 Foreword.....	32
4.2 A brief introduction to lms and solms algorithm.....	33
4.3 A novel estimation method of Time-varying channel.....	35
4.4 Simulation experiment.....	36
<b>Chapter Five The principle of DS/DBPSK modulation and demodulation .....</b>	<b>40</b>
5.1 Foreword.....	40
5.2 The principle of DS/DBPSK modulation and demodulation .....	40
5.2.1 procedure and mathematical model of transmitting terminal.....	41
5.2.2 procedure and mathematical model of receiving terminal... ..	42
5.2.3 Frame synchronization.....	47
5.2.4 symbol synchronization tracking.....	50
<b>Chapter Six DSP implementation of the receiving terminal of DS/DBPSK system .....</b>	<b>51</b>
6.1 Foreword.....	51
6.2 Brief introduction of TMS320C6713 DSPs.....	52
6.2.1 EDMA.....	54
6.2.2 EMIF.....	54
6.2.3 Interface Resources.....	55
6.2.4 Interface of ICETEK-C6713.....	56
6.3 Hardware system design.....	57
6.4 Software system design.....	59
<b>Chapter seven Analysis of Lake test and Sea test result .....</b>	<b>61</b>
7.1 Analysis of lake test result .....	61
7.2 Analysis of lake test result .....	66
<b>Chapter Eight Summary and Forecast .....</b>	<b>70</b>
<b>References .....</b>	<b>71</b>
<b>Acknowledgement .....</b>	<b>75</b>
<b>Publications during M.S. study .....</b>	<b>76</b>

## 第一章 绪论

### 1.1 引言

海洋占有地球 71%的面积，是人类生存活动十分重要的领域，随着海洋开发和信息产业的发展，利用海洋信道传递信息的需求大为增加。有缆方式的信息传输由于目标活动范围受限制、通信缆道的安装和维护费用高昂、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，即使是衰减最小的蓝绿光的衰减也达到了  $40\text{dB}/\text{km}^{[1]}$ ，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的需要。在非常低的频率(200Hz 以下)，声波在海洋中却能传播几百公里，即使  $20\text{kHz}$  的声波在水中的衰减也只有  $2\text{-}3\text{dB}/\text{km}^{[1]}$ ，因此采用声波作为信息传送的载体是目前海中实现中、远距离无线通信的唯一手段<sup>[1][2][3]</sup>。

众所周知水声信道是一个十分复杂的信道，水下环境噪声大，频带范围窄，多径效应严重，这些不利因素加剧了水声通信系统的抗多径，抗衰落的困难。扩频技术具有优良的抗多径衰落和干扰的能力，除此之外，扩频技术还具有很强的组网能力，因此也是水声通信网络研究中所采用的关键技术，是目前研究的热点。

### 1.2 水声通信的发展历程

水声通信技术诞生于上世纪中叶，和其他信号处理技术的发展趋势相同，也经历了从最初的模拟通信阶段到现如今的数字通信阶段的过程。总的来说，水声通信，特别是高速水声通信，近十几年的发展趋势是由非相干通信向相干通信发展<sup>[3]</sup>，并且随着硬件水平、信号处理芯片计算能力的不断提高，水声通信的调制方式、信号处理算法等都在逐渐使用各种新的、复杂的技术，比如空间调制技术、自适应均衡技术、分集接收技术等（如图 1-1）。

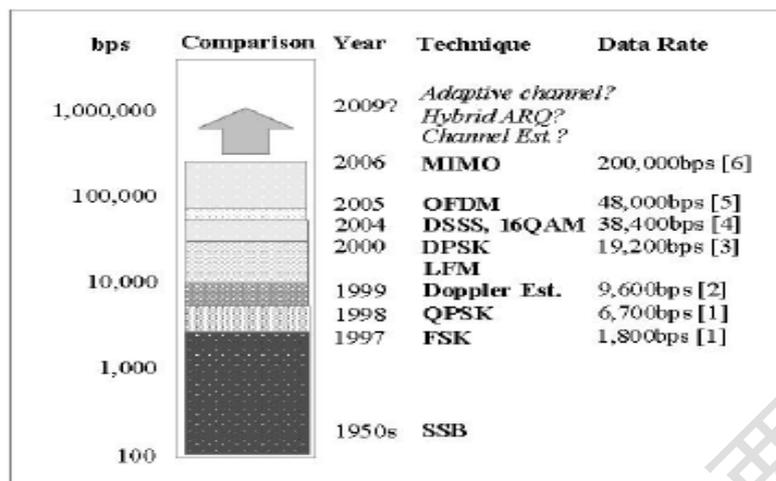


Fig. 1. Improvement in acoustic communications performance as a result of the adoption of new technologies – data rate estimates over 1km channel

图 1-1 水声通信的发展历程<sup>[4]</sup>

FSK 非相干系统，解决了载波相位跟踪问题、抗干扰性能好、信号易产生、解调，在水声中、低速数据传输设备中得到广泛使用。一个典型的例子就是美国 Woods Hole 海洋研究中心和 Datasonics 公司联合研制的水声数据遥测系统<sup>[5]</sup>，该系统载频为 20~30kHz，采用 MFSK 调制(共分为 16 个子带，每个子带内采用 4FSK)技术，其最大传输速率为 5kb/s，传输距离 4km。该系统在浅海水平信道、700m 远的极浅海区及 3km 的深水垂直信道的海试中，当输入信噪比 10~12dB 且没有纠错编码的情况下，获得的误比特率为  $10^{-2}$ ~ $10^{-3}$ 。系统也可使用 3/4 码率，约束长度为 5 的卷积码，以获得更好的性能，并达到 3.75kb/s 的数据率。

在近十年间，非相干接收技术的发展主要在于采用更有效、能力更强的硬件上，高可靠性、长期无人值守的系统也是非相干系统研制的一个方向。目前，非相干系统研制面临的主要任务是自适应调节系统的参数达到最佳化，以适应所处的信道环境，从而达到最远的传播距离、最高的数据率和可靠性。现有的非相干系统都没有自动确定保护时间、设置参数的能力，结果系统都是按最恶劣的环境设计，造成带宽和功率不必要的浪费。

80 年代初开始，以提高带宽利用率和数据率为目的，水声通信中出现使用相移键控调制方式(PSK)的研究。由于难以实现有效的载波恢复，早期的相移键控系统大多使用差分相移键控方式(DPSK)进行调制，接收端可以用差分相干方式解调<sup>[12]</sup>。采用差分相干的差分调相除了不需要相干载波外，在抗频漂能力、抗多途效应及抗相位慢抖动能力方面都优于采用相干解调的绝对调相，但由于

参考相位中噪声的影响，在抗噪声能力上有损失<sup>[12]</sup>。

较早的 DPSK 水声通信系统由 G R. Makelburg 等人于 1981 给出<sup>[6]</sup>。该系统在多途干扰不大的水底到水面的垂直信道实现了 4800b/s 的传输速率。其后的一段时间里，采用差分相移键控的水声通信系统竞相出现，日本 JAMSTEC 开发的用于深海垂直信道的图像传输系统<sup>[7]</sup>，采用 4-DPSK 技术，载频 20kHz，在长达 6500 m 的信道上可获得 16 kb/s 的通信速率。英国伯明翰大学的“BASS300”<sup>[8]</sup>采用 DPSK，在 10KHz 带宽内，通信速率可达 10kb/s 和 20kb/s。

PSK 调制方式利用了载波的相位信息，在 AWGN 信道中的误码率低于 DPSK 通信系统<sup>[11][12]</sup>。由于水声信道相位的快速起伏，过去的传统观念认为绝对调相通信系统在浅海的水平信道中不可用。随着非线性均衡器的出现并结合锁相环技术，解决了载波恢复和相位漂移的问题，使得采用相干解调的绝对调相通信系统可应用于浅海水平信道<sup>[11]</sup>。上世纪 90 年代开始，水声通信领域的研究重点转向对高速相干调制通信技术的研究，各种基于 PSK 调制的通信系统相继出现<sup>[9][10]</sup>。美国西北大学和 Woods Hole 海洋研究所(WHOI)联合研制了均衡器结合锁相环结构的 QPSK 系统，并在各种水声环境中进行了试验<sup>[11]</sup>。在距离 110 海里的深海信道中传输数据率为 660b/s；48 海里浅海信道中，数据率为 1000b/s，2 海里浅海信道中数据率为 10kb/s。文献[9]中用于遥测和图像数据传输的系统采用线性均衡器和联合最佳的载波恢复，算法能自动修正 PLL 的环路增益，数据率达到 150kb/s。

### 1.3 水声扩频通信的研究方向

扩频通信是将待传送的信息数据用伪随机序列调制，实现频谱扩展后再传输；接收端则采用相同的序列进行解调及相关处理，恢复原始信息数据。它始于 80 年代初的无线电隐蔽式数字通信。其特点有：编码后信号占据较宽的通信带宽，抗干扰、抗多径衰落能力强，功率谱密度低，具有隐蔽性和低的截获概率。

由于水声信道可用的有效带宽是严重受限的，所以长期以来扩频技术在水声信道中远没有其在空间信道中发展的迅速。不过由于水声网络的研究以及扩频技术是对抗多径干扰的一种非常有效的技术，并且扩频技术是唯一能工作在

低信噪比条件下的通信技术<sup>[5][10]</sup>，因此，扩频技术在水声通信中的应用也越来越受到关注。一些水声系统已经为扩频技术在水声通信中的应用提供了成功的范例<sup>[5][10][14][17]</sup>。

近十年来，对水声扩频系统的研究日益深入，扩频系统结合各种新颖技术，使水声扩频系统性能得到了提高，这些技术主要有：扩频码选择、接收机结构、调制方式、新的信号处理方法。

### 1.3.1 扩频码选择

$m$  序列、GOLD 码<sup>[33]</sup>等伪随机码具有周期性，它们的属性和产生方法被人们广泛熟知。研究表明，基于这些扩频码的扩频系统不具有良好的低截获概率(LPI)、低检测概率(LPD)性能<sup>[13]</sup>，即使在低 SNR 下也不是足够安全，因此需要对常规扩频码方案加以改进以便提高保密性能。混沌序列具有类随机性和对初始值及其敏感性<sup>[14]</sup>，将其应用于扩频通信，可以获得更好的保密性能。另外，混沌序列数量众多，相关特性良好，适合于 DS-CDMA 和 M-ary 扩频等场合。

S.Azou<sup>[14]</sup>的混沌扩频系统实验，利用 ESS (Exact Spreading Sequence) 和 DUKF (Dual Unscented Kalman Filter) 两种解调手段，前者基于混沌扩频码的精确复制，在混沌扩频码无法精确复制的场合下，可以使用 UKF 方法对扩频码和数据符号进行联合估计(即 DUKF)。利用计算机数值模拟与 Brest 浅海湾实验来验证性能。数值模拟基于努森(Knudsen)模型，采用声线法。传输距离约 10km，实验海区水深 90m，发射机深度 20m，接收机深度 40m，采用 BPSK 调制方式，载频 8820Hz，切普频率 4410Hz，每帧传输 200bit 信息，处理增益 80，接收端的信噪比约为 0dB。对于解调效果，在数值模拟情况下，ESS 法的效果很好，没有出现判决误差；而 DUKF 法对信道失真更敏感，在没有采用信道均衡和信道编码技术的条件下，误码率大约 5.5%。

海上实验过程中<sup>[14]</sup>，传输距离 1km，实验水深 20m，发射机和接收机深度分别为 5m 和 10m，未采用信道编码技术，处理增益为 63。实验中先发射一百组长度为 127 的  $m$  序列来测量信道。接收端利用 ESS(Exact Spreading Sequence) 和 DUKF (Dual Unscented Kalman Filter) 两种解调手段，并在两种解调手段中加入幅度增益控制和锁相环。两种手段下误码率都为 0。解调过程分析表明，

尽管 ESS 法对快速信道变化的跟踪能力有限,但该方法系统结构实现比较简单;当 DUKF 法工作在切普速率下对数据符号和相位进行估计时,对恶劣信道的适应能力更强。S.Azou 等人还将对负信噪比以下的混沌扩频系统进行研究,以检验其 LPD/LPI 性能。

文献<sup>[15]</sup>采用改进的 Kent 映射产生混沌扩频序列,2003 年在南海进行了验证,混沌序列长度为 127,时间长度为 5.10s,带宽 50Hz,发射声源级 186.0dB,传输距离 31km,进行汉字编码通信实验,通信速率为 6.3b/s,误码率为  $8.0 \times 10^{-3}$ 。

哈尔滨工程大学研究了 M-ray 混沌扩频多通道 Pattern 时延差编码水声通信系统<sup>[16]</sup>。单通道信道的通信速率为 50b/s,水平距离为 1770m 时误码率为 0。当采用 8 个通道时,通信速率为 400b/s,水平距离为 2170m 时误码率为 0.1787%。

文献[17]的水声 M-ray 扩频系统,采用模拟退火算法和禁忌搜索算法产生伪随机序列。该方法可以产生任意长度的序列(不局限于  $N=2^k-1$ )。系统传输距离 20km,传输速率 7.2 b/s,接收端在 -14dB 的信噪比条件下,误码率 0.2 %。

### 1.3.2 接收机结构

水声信道是时变多径衰落信道,为了使均衡器能补偿信道的时变,必须考虑自适应方法。在 DS-CDMA 系统中。如果信道是静态的或者是准静态的(即信道参数在一个符号间隔内保持不变),那么在解扩之后接收机将获得正确判决所需的处理增益,同时正确的判决又被用于调整均衡器系数,为后续的符号判决做准备,但是如果当信道变化速率快于符号速率,而均衡器系数仍然在一个符号间隔内保持不变,那么这时将很难保证判决符号的可靠性,由此可见,当信道变化速率快于符号速率时,为了能跟上信道的变化,均衡器系数的更新速率应该快于符号速率,也就是说,这时的均衡器系数应该以切普(chip)速率更新。为了实现均衡器系数以切普速率更新的目的,必须要有可靠的切普判决信息,但是在解扩之前,又无法获得可靠的判决信息。为了解决这对矛盾,文献[18]给出了一种假设反馈均衡(HFE)算法,它采用切普速率更新并对假设切普序列而非实际判决进行反馈,从而能够有效地跟踪并补偿水声信道的快速时变效应。

在文献[18]的仿真系统中,水声信道深度为 75m,收发距离 5km。系统采用 DS/BPSK 调制,扩频码为 63 位的 Kasami 码,符号信噪比为 20 dB,切普信噪比为

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.

厦门大学博硕士论文摘要库