

学校编码: 10384

分类号 _____ 密级 _____

学号: 23320091152794

UDC _____

廈門大學

碩 士 学 位 论 文

水声通信中 SC-FDE 的关键技术研究

Research on the Key Techniques of SC-FDE Underwater
Acoustic Communication System

何天玲

指导教师姓名: 程 恩 教 授

专 业 名 称: 通信与信息系统

论文提交时间: 2012 年 6 月

论文答辩日期: 2012 年 6 月

学位授予日期: 2012 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2012 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

长的传输时延、多普勒扩散、频率选择性衰落以及有限的可用带宽等诸多因素，决定了水声通信信道的复杂性。水声信道的这些特性阻碍了水下高可靠性、高速率通信系统的发展。

单载波频域均衡 (SC-FDE) 技术，不仅可以有效对抗信道的频率选择性衰落，实现高速率、大容量的通信传输，而且能够避免 SC-TDE 复杂度大和 OFDM 峰均比高的不足，成为未来高速水声通信的重要组成技术。

多径信道下的高速率通信通常需要在接收端知道信道的响应。基于训练序列的方法通常被采用，其利用已知的发送序列捕获信道的时延、频率、空间信息，根据输出信号重建信道冲激响应。传统的信道估计方法，典型的有线性重建技术，被认为是适合具有丰富多径的信道估计。然而，水声信道具有非常长的延时传播，但却有限的多径。因此水声信道具有稀疏特性。在论文中，我们就近年来前沿的一种理论：压缩传感，提出了 SC-FDE 水声通信系统的压缩传感信道估计方法，可以采用很少的能量达到预期的重建误差。新的信道估计方法与传统信道估计方法做了比较。结果显示，在现实的水声信道下提出的方法要优于传统信道估计方法，且计算复杂度降低。

本文的主要工作概括如下：

- ① 研究了浅海水声信道的时变、空变、频变的特点，采用简单、快速、易使用的 image method 建立了浅海水声信道模型。
- ② 介绍了 SC-FDE 水声通信系统的基本结构，并进行了数学理论论述。
- ③ 重点研究了 SC-FDE 水声信道估计方法，将传统信道估计方法与文章提出的压缩传感稀疏信道估计方法进行了性能比较。提出了改进的压缩传感信道估计算法，获得了更好的估计精度，提高了整个通信系统的性能。比较了采用不同导频序列对信道估计性能的影响。
- ④ 进行了水池试验，对 SC-FDE 通信系统的可行性进行了论证。

关键字：水声通信; SC-FDE; 稀疏信道估计; 压缩传感

Abstract

In underwater acoustic (UWA) channels are characterized by long delay spread, significant Doppler effects, frequency selective fading and limited bandwidth. So, there are major challengers for the development of high-speed and reliable underwater data transmission.

SC-FDE allows an advantageous of high-speed data transmission in the frequency-selective fading channel, it avoids the complexity of SC-TDE and the high PAPR of OFDM. SC-FDE will become significant technology in the future underwater acoustic communication.

High-rate data communication over a multipath wireless channel often requires that the channel response be known at the receiver. Training-based methods, which probe the channel in time, frequency, and space with known signals and reconstruct the channel response from the output signals, are most commonly used to accomplish this task. Traditional training-based channel estimation methods, typically comprising linear reconstruction techniques, are known to be optimal for rich multipath channels. However, Underwater acoustic channels exhibit very long delay spreads, but with limited multipath. To this end, channel estimation for sparse underwater acoustic channels is examined. In this paper, we present a new approach to estimating sparse multipath channels that is based on some of the recent advances in the theory of compressed sensing. It can potentially achieve a target reconstruction error using far less energy.

The new sparse channel estimation scheme is compared to the traditional channel estimation method. It is shown that the proposed algorithm outperforms the traditional channel estimation method over realistic underwater acoustic channels and has lower computational complexity.

The main contents are summarized as follows:

1. This paper researches the complexity characters of the underwater acoustic channel. In the current paper the computational technique is specifically aimed at being simple, easy to use, and fast. This paper give

the simulation of model of underwater acoustic channel with image method.

2. We give a detailed overview of the underwater acoustic SC-FDE system. And discusses it in mathematics.
3. The importance of this article is about the SC-FDE underwater acoustic channel estimation based on pilots. We detail the application of compressive sensing to SC-FDE underwater acoustic communications. We give a comparison of the performance between the original method of channel estimation with the compressive sensing sparse multi-path channel estimation. We give a improved method of compressive sensing sparse multi-path channel estimation, and achieve a good performance. this paper researches the performance of the different pilots to channel estimation.
4. The performance of the SC-FDE system and all of the algorithms we investigate are simulated by computer and experiments are completed in water pool.

Key words: Underwater Acoustic Communication; SC-FDE; Sparse Channel Estimation; Compressive Sensing.

目录

摘要.....	I
ABSTRACT	II
第一章 绪论.....	1
1.1. 论文研究的背景和意义.....	1
1.2. 水声通信的发展现状	1
1.3. SC-FDE 技术在水声通信中的应用研究.....	4
1.4. 本文的主要研究内容	5
第二章 水声信道.....	6
2.1. 浅海水声信道的特点	6
2.1.1. 海洋环境噪声	7
2.1.2. 传播损耗	7
2.1.3. 多径效应	8
2.1.4. 多普勒效应	8
2.2. 浅海水声信道建模.....	9
2.3. 本章小结.....	13
第三章 SC-FDE 水声通信系统.....	15
3.1. SC-FDE 系统基本结构.....	15
3.2. 导频序列.....	16
3.2.1. 独特字 UW	16
3.2.2. gold 序列.....	19
3.3. 符号映射.....	21
3.4. 成型滤波.....	22
3.5. 本章小结.....	24
第四章 SC-FDE 水声通信系统关键技术研究.....	25
4.1. SC-FDE 系统信道估计概述	25
4.1.1. 传统的信道估计	26
4.1.2. 压缩传感信道估计	28
4.2. SC-FDE 系统的压缩传感信道估计	30
4.2.1. 压缩传感理论分析	30
4.2.2. 压缩传感信道估计算法	39
4.2.3. 压缩传感信道估计方法的仿真比较	45
4.3. 均衡算法.....	46
4.4. SC-FDE 系统关键技术仿真	48
4.4.1. 导频序列的选择	48
4.4.2. 不同信道估计算法的性能比较	50
4.5. 本章小结.....	52

第五章 SC-FDE 水池实验	53
5.1. 水池实验.....	53
5.1.1.SC-FDE 水池实验 1.....	55
5.1.2.SC-FDE 水池实验 2.....	60
5.1.3.SC-FDE 水池实验 3.....	63
5.2. 本章小结.....	65
第六章 总结与展望	67
6.1. 本文的主要工作内容	67
6.2. 未来工作的展望.....	68
参考文献	69
致谢.....	74

ABSTRACT.....	I
ABSTRACT.....	II
CHAPTER 1 PREFACE	1
1.1. THE BACKGROUND AND MEANING FOR THE PAPER.....	1
1.2. THE DEVELOPMENT OF UNDERWATER ACOUSTIC COMMUNICATION	1
1.3. THE RESEARCHING OF SC-FDE IN UNDERWATER ACOUSTIC COMMUNICATION	4
1.4. THE MAIN CONTENT OF THE PAPER.....	5
CHAPTER 2 THE UNDERWATER ACOUSTIC CHANNELS.....	6
2.1.THE CHARACTER OF THE UNDERWATER ACOUSTIC CHANNELS	6
2.1.1. Ocean Ambien Noise.....	7
2.1.2. Transmission Loss.....	7
2.1.3. Multipath Propagation.....	8
2.1.4. Doppler Effect.....	8
2.2. THE MODEL OF THE UNDERWATER ACOUSTIC CHANNELS.....	9
2.3. SUMMARY	13
CHAPTER 3 SC-FDE UNDERWATER ACOUSTIC COMMUNICATION SYSTEM	15
3.1. BASIC MODEL OF SC-FDE UNDERWATER ACOUSTIC COMMUNICATION SYSTEM.....	15
3.2. THE PILOTS SEQUENCE.....	16
3.2.1. Unique Words.....	16
3.2.2. Gold Sequence.....	19
3.3.MAPPING	21
3.4.SHAPING FILTER.....	22
3.5. SUMMARY	24
CHAPTER 4 RESEARCH ON KEY TECHINQUES OF SC-FDE UNDERWATER ACOUSTIC COMMUNICATION SYSTEM.....	25
4.1. SC-FDE CHANNEL ESTIMATION.....	25
4.1.1. Conventional Channel Estimation.....	26
4.1.2. Compressive Sensing channel estimation.....	28
4.2. COMPRESSIVE SENSING CHANNEL ESTIMATION OF SC-FDE IN	

UNDERWATER ACOUSTIC COMMUNICATION.....	30
4.2.1. The Analysis of Compressive Sensing theory.....	30
4.2.2. Compressive Sensing Channel Estimation Algorithm.....	39
4.2.3. The Simulation Comparison of Compressive Sensing Channel Estimation Algorithm.....	45
4.3. EQUALIZATION ALGORITHM.....	47
4.4. THE SIMULATION OF SC-FDE	48
4.4.1. The Choice of The Pilots.....	48
4.4.2. The Performance of Different Channel Estimation Algorithm.....	50
4.5. SUMMARY	51
CHAPTER 5 SC-FDE WATER POOL EXPERIMENT.....	53
5.1. WATER POOL EXPERIMENT	53
5.1.1. SC-FDE Experiment 1.....	55
5.1.2. SC-FDE Experiment 2.....	60
5.1.3. SC-FDE Experiment 3.....	63
5.2. SUMMARY	65
CHAPTER 6 SUMMARY AND PROSPECT	67
6.1. SUMMARY OF THIS PAPER.....	67
6.2. PROSPECTIVE OF THE FUTURE RESEARCH.....	68
REFERENCES.....	69
ACKNOWLEDGEMENT.....	74

第一章 绪论

1.1. 论文研究的背景和意义

海洋是资源的宝库、运输的大动脉、影响地球天气的决定因素，同时也是国家安全的重要屏障。由于海洋对光波与电磁波基本上是“不透明”的，声波是目前唯一能在海洋中远距离传播的波动形式^[1]。因此随着海洋探索不断深入，信息技术不断发展，军事作战的实际需要，水声通信技术越来越多的受到关注。无论是在民用方面、军用方面，水声通信的重要性都不言而喻。民用方面，如水下语音通信，海洋资源调查、海洋环境监测的信息传送，水下机器人与海上平台的遥测遥控指令的传送等。军事应用方面，如：构建声通信系统以解决水雷遥控，潜艇之间或母舰与潜艇之间的信息交互以及传输水下其他无人作战平台获取战场信息等^[2]。

我国大约 300 万平方公里的“海洋国土”大部分处于浅海区域，这些区域含有丰富的海洋资源并具有重要的军事战略地位。无论是从军事上还是从民用上来看，浅海域水声通信技术的研究都有着特别重要的意义^[3]。

近年来，水声通信技术，如：扩频技术(Spread Spectrum)，相位相关技术(Phase Coherent)，自适应均衡技术(Adaptive Equalization)，正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)等技术都得到了广泛研究。但众所周知，水声通信信道是数字通信中最困难的无线信道，通常表征为时变多径衰落信道。在水平水声信道上的多径扩展，往往超过几十毫秒甚至上百毫秒，导致严重的码间干扰。由于水声通信中使用的是低速率的声纳进行通信(声音在水下的传播速度近似为 1500m/s)，多普勒现象也是水声通信所克服的一个难题^[4]。文中针对水声环境的特殊性，对于水声通信环境下的 SC-FDE 系统及其关键技术进行了研究。

1.2. 水声通信的发展现状

水声通信的历史可以追溯到 1914 年，水声电报系统研制成功并被英国海军安装在巡洋舰上，这可以看作是水下无线通信的雏形。真正有可靠性保证的水声

模拟通信系统出现在二战以后，系统采用了调制技术，用于潜艇间的通信。但由于技术条件等的限制，从六十年代开始的很长一段时间内，水声通信技术没有得到进一步的发展。

进入七十年代后，水声通信进入了一个相对迅速发展的阶段。在军事领域，随着探测距离和精度的提高，以及探测区域从沿海大陆架延伸到深水区，要求信息传输系统能够实现远距离高速传输。水下武器系统的日益智能化，则要求对其进行相应的指挥和控制。对水下探测器和航行器的导航和监测使得水下通信技术的研究得到了人们的高度重视。在经济领域，随着海洋开发和渔业资源的探测和开发、水下资源勘探、海洋钻井平台和舰船的应急维护、海底地貌和地震图像传输、海上科学考察、海洋环境监测、水下机器人导航等的发展，对水声通信技术也不断提出新的要求。现在的水声通信系统运用于各种各样的场合，它们可以在一系列海洋作业里替代潜水员，另外在深海中它们是完成任务的唯一的方式。从几千米深的海底进行高质量的视频传输现在已经实现，声遥感的水下网络也正在研制当中。如果能够研制出更高效的水声通信系统，它们的应用范围将会进一步扩大。现在正在研究的许多应用中，例如一般所说的潜艇和水面舰船的“实时通信”中，不仅有点到点的通信连接，还包含网络结构。技术方面，70年代以来随着电子技术和信息科学突飞猛进的发展，新一代的水声通信系统也开始采用数字调制技术。

长期以来，频移键控(Frequency Shift Keying, FSK)调制方式被认为是水声通信中克服多径传播的最佳调制方式。在实际应用中，常常通过这种方式的非相干检测方法避免传输过程中的多径和相位起伏的问题^[3]。然而非相干系统克服码间干扰的方法是尽量避免，而不是主动去消除，传输速率和系统带宽之间的矛盾使得这种通信体制不适合要求高通信速率的场合。为了克服码间干扰，非相干通信系统一般采取加入保护时间的方法，这种方法显然会带来功率和信息速率的损失。这种方法需要较宽的频带宽度，频带利用率很低，并要求有较高的信噪比。当存在多普勒频移时，还必须设置一定的频率富裕度，这样就不能充分利用有限的水声信道带宽。非相干通信系统的代表是美国 Woods Hole 海洋研究所和 Datasonics 公司联合研制的水声数据遥测系统^[8]，它采用 4FSK 技术，带宽 20kHz-30kHz。该水声通信系统成功应用在 4km 浅海水平信道、3km 深海垂直信

道以及 700 米极浅海区, 在无信道编码的情况下误码率可以达到 10^{-2} - 10^{-3} 。国内, 哈尔滨工程大学水声工程学院最早地进行了 MFSK 相关技术的研究, 完成了“863”项目“视频图像水下声传输试验研究”。

相干通信技术已成为目前水声通信领域中极为活跃的研究方向之一。而水声信道的复杂性又使得这一研究领域面临着众多的理论和技术上的难题。相干通信技术首先应用在深水垂直信道、近距离水平信道等多径效应影响较小和较为稳定的水声信道之中。从 20 世纪 90 年代至今, 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, 各种基于相移键控(Phase Shift Keying, PSK)调制的通信系统相继出现^[9]。相位相干调制方法一方面可以满足人们对通信速率的要求, 另一方面随着通信速率的提高, 自适应均衡器对信道的跟踪误差下降^[10], 从而有效地改善了系统的性能, 因而, 相位相干通信系统逐渐被广泛应用到高速水声通信中。

近年来, 中、远程浅海水平信道中的相干解调技术也取得了令人瞩目的成果, 其中包括直接序列扩展频谱(Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS)技术, 该技术对于抑制海面反射的干扰有显著的效果。而这一方法的缺点是频带利用率较低, 在频带严重受限的水下声信道中信息传输速率不是很高^[3]。基于相移键控的调制方式也逐渐占据了高速水声通信的主导地位。相位相干调制方法一方面可以满足人们对通信速率的要求, 另一方面随着通信速率的提高, 自适应均衡器对信道的跟踪误差下降, 从而有效地改善了系统的性能, 因而, 相位相干通信系统逐渐被广泛应用到高速水声通信中^[2]。

另一显著的成果则是基于判决反馈均衡技术的相位相干通信。在文献[11]中, 作者利用均衡与同步参数估计联合处理的方式, 以及多进制相移键控(Mary Phase Shift Keying, MPSK)技术实现了海洋水声信道中的远程传输。并且该方法取得了良好的实验结果, 在远程(110 海里)深海环境中, 实现了 333 bps 的可靠传输, 在远程(48 海里)浅海环境实现了 500 bps 的传输速率^[3]。西北工业大学航海学院对盲均衡和分数间隔均衡等均衡算法进行了相应的应用研究^[2]。

总之, 近年来, 世界各国的许多院校和科研结构, 如: 美国的麻省理工学院、伍兹豪海洋研究所(WHIG)、华盛顿大学、Datasonics 公司、Delphi 通信系统、海军指挥控制和海洋监测中心 RDT&E 分部、英国的拉夫堡理工大学、国家海洋

研究所 NIO 等相继对水声通信技术展开了研究，并取得了丰硕的成果。国内的中科院声学所、哈尔滨工业大学和西北工业大学以及厦门大学等单位进行了水声信道数据传输的研究。

1.3. SC-FDE 技术在水声通信中的应用研究

单载波系统是一种很成熟的传输系统，当今大部分通信系统都属于单载波传输体系。单载波系统一般通过训练序列进行信道响应估计，并通过某种自适应算法不断更新均衡器的系数以跟踪信道的变化。而时域均衡的单载波系统均衡器复杂度远大于多载波的频域均衡复杂度，时域均衡的均衡器成了制约单载波系统性能提高的“瓶颈”。

多载波传输把数据流分解为若干个独立的子比特流，每个子数据流将具有低得多的比特速率。用这样低比特率形成的低速率多状态符号去调制相应的子载波，就构成了多个低速率符号并行发送的传输系统^[12]。多载波技术为实时高速水声通信提供了一种可行的选择。OFDM 是多载波传输方案的实现方式之一。自 2005 年开始，国外研究机构展开了大规模的基于 OFDM 的水声通信技术研究，从最初的利用导频进行 OFDM 的验证性试验，发展到 08 年可以利用 MIMO-OFDM 通信体制进行极高速率的数据传输。国内的多个研究机构也开展了基于 OFDM 的水声通信技术研究。哈尔滨工程大学水声工程学院的朱彤、桑恩方实现了湖试 6.1km 距离 9.1kbps 的传输速率，海试 12.1km 距离 9.04kbps 的传输速率，西北工业大学航海学院的黄建国、孙静等人实现了湖试 5km 距离 9kbps 传输速率，15km 距离 1kbps 的传输速率，中科院声学研究所蔡惠智、刘云涛等人实现了 6.6km 距离 20kbps 的传输速率。但通信速率和通信距离与水声信道的信道容量仍有很大的差距，基于 OFDM 的水声通信系统中还有很多的不足，如峰均比问题、抗多普勒问题等。

802.16a 标准中建议的单载波传输模式是一种基于 OFDM 的传输模式，能够克服 OFDM 系统的不足，并在保持相同复杂度的同时，获得与 OFDM 系统近似的性能。IEEE802.16a 标准中的单载波传输模式不同于传统的单载波传输，它发送的是调制后的高速率单载波信号，接收端通过 FFT 和 IFFT 变换来实现频域均衡^[13]。与 OFDM 相比 SC-FDE 系统具有如下特征：

1) 与 OFDM 系统相比，SC-FDE 系统降低了峰均比和对相位噪声的敏感性，降低了

功率放大器等模拟器件的成本。

2) 存在时延扩散时, 使用频域均衡的 SC-FDE 系统能够获得与 OFDM 系统近似的性能。

3) SC-FDE 系统的复杂度与多径扩散的对数成正比, 降低了接收端信号处理的复杂度。

4) 与非自适应 OFDM 系统不同, SC-FDE 系统不需要使用编码技术克服频率选择性干扰。

5) 单载波调制是一种成熟的技术, 已经在现有的有线与无线通信中得到广泛的应用, 并且对于 RF 系统的线性要求不高。

正因为 SC-FDE 的这些独特性质, 结合水声信道的复杂环境, 可以考虑将其应用于水声通信中。国外的美国华盛顿海军研究实验室和美国密苏里大学, 国内的西北工业大学航海学院都对于 SC-FDE 应用于水声通信的关键技术进行了深入研究。

1.4. 本文的主要研究内容

本文的研究内容主要包括以下几个方面:

首先, 论文介绍了水声通信的发展现状、浅海水声信道的特点及 SC-FDE 通信系统的基本原理, 重点分析了 SC-FDE 通信系统的负载帧结构; 基于声学射线理论, 采用简单、快速、易使用的 image method 建立了基于海底海面的水声信道仿真模型。

其次, 论文重点讨论了基于 SC-FDE 系统的水声信道估计问题, 对于已有的水声信道估计方法进行了系统论述, 根据水声信道的稀疏特性, 结合压缩传感理论, 进行了压缩传感理论的水声信道估计算法的分析和仿真, 对压缩传感的几种关键重构算法进行了分析和比较, 提出了其改进算法, 并引入了稀疏贝叶斯学习理论进行稀疏信道估计, 性能得到很大改进。

最后, 搭建了 SC-FDE 的 LABVIEW 试验系统, 进行图像传输水池试验, 对系统可行性进行了论证, 对不同负载帧格式、信道估计方法进行了性能比较分析。

第二章 水声信道

水声信道是一个十分复杂的时-空-频变参随机多径传输的信道，其复杂性、多变性、强多径、干扰噪声以及有限的利用频带，都使得它是至今存在的难度极大的无线通信信道之一。在这种复杂的信道条件下实现水下无线数据的传输，不仅通信数据率低、可靠性差，对传输距离以及功率要求也都极其严格，这从很大程度上制约了水声通信技术市场应用的飞速发展^{[14][15]}。

2.1. 浅海水声信道的特点

水声技术的迅速发展，一方面得益于现代信号处理理论的发展，电子技术的发展特别是集成电路和高性能信号处理器的发展，更重要的一方面是得益于对水声信道的深入认识。而水下通信的难点和特点集中在其复杂的海洋水声信道上。信道的复杂性使得传输信号产生强烈的幅度起伏和相位波动。因而从通信的观点出发，分析水声信道的传播特性对于水声通信的研究具有重大意义^[16]。水声技术的发展趋势之一也包括着进一步研究信道对信息进行的各种变换及声纳系统如何与声信道、海洋环境相适配。

作为水声信息传输通道的海洋介质是复杂多变的，有随机起伏的软表面，表面附近有气泡层，介质当中有些分散的或密集的非均匀散射体，如鱼群、浮游生物等。此外，还存在不同尺寸的冷暖水团、层流、湍流、内波等。水声信道是一个非常复杂的时变、空变、频变信道。传播损失，多径效应，频散效应，水中的不均匀性，边界的不平整等等，均会引起不同类型的畸变，影响信号处理工作，降低通信系统性能。因此，在这种复杂的信道中实现信息的高速、可靠和远距离传输，具有巨大的挑战性。

浅海水声信道与空中无线信道相比，水声信道的带宽明显小于空中无线信道，这就需要我们研究带宽利用率更为高效的通信方式来实现水下高速数据传输。水声信道的多径时延要明显大于空中无线信道，因此带来了更为严重的符号间干扰和同步误差。水声信道的多普勒现象不仅有频率上的偏移，还会出现时间上的压缩或伸展。水声信道有严重的散射和混响特性。因此水声通信的难度要远远大于无线电通信。因此大多数通信技术需要经过修改才适用于水声通信。

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