

学校编码: 10384

分类号\_\_\_\_\_密级\_\_\_\_\_

学 号: 31120101151299

UDC\_\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

时变信道下的时间反转扩频水声通信研究

Research on Time Reversal Spread Spectrum Underwater  
Acoustic Communication in Time-varying Channels

周跃海

指导教师姓名: 童 峰 教 授

专 业 名 称: 海 洋 物 理

论文提交日期: 2013 年 05 月

论文答辩时间: 2013 年 06 月

学位授予日期: 2013 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2013 年 05 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

随着海洋开发、海洋环境监测和海洋国防安全等领域信息化建设的快速发展,利用海洋信道进行信息传输的需求大大增加,水声通信越来越受到人们的重视。但是,水声环境的复杂性、时变性和不可确定性导致信号多普勒频移、多径效应、幅度和频率选择性衰落等问题,给高性能水声通信带来了极大的挑战。

时间反转技术近年来成为水下通信的热点研究技术,其最大的优点是可在没有任何环境先验知识的情况下实现多径聚焦,提高检测信噪比。直接序列扩频技术具有抗干扰、抗多径衰落、可提高扩频增益等优点已经在水声通信中广泛应用。

考虑到时变信道下时间反转性能的下降,结合时间反转和扩频通信的优点,本文提出可适应时变信道的时变时间反转扩频通信方案,通过利用已判决的码元生成扩频序列进行信道估计,用估计出的信道特性进行后续接收信号的时间反转处理,再用扩频方案进行解调,从而无需专门设置探针并可在低信噪比条件下工作。本文进行了该方案的 DSP 实现设计研究,最后给出了实验结果及分析。

本论文的主要工作内容如下:

- 1、在时变信道下,提出一种基于信道估计的时变时间反转扩频通信方案,利用已判决码元生成扩频序列作为训练序列进行信道估计,从而可利用信道估计获取的信道特性进行后续接收信号的时间反转处理,该方案无需专门设置探针,同时由于结合扩频本身的特性,适合于低信噪比下工作。

- 2、比较不同频率信道估计的时间反转性能与不同频率探针更新的时间反转性能,在不同的信噪比下,分析比较了基于信道估计的时变时间反转扩频方案的性能。

- 3、在上述工作的基础上,基于 TMS320DSP6713 进行所提方案的硬件实现研究,并通过湖试实验验证了其性能。

关键词:时变信道;时间反转;直接序列扩频;信道估计

## Abstract

With the rapid development of marine exploitation, marine environment monitoring, marine national defense and security, the requirement of transmitting information through underwater channel is increasing in recent years, so underwater acoustic communication has drawn significant attention. However, the complexity, time-varying and uncertainty of underwater acoustic channel character lead to Doppler shifting, multi-path, time and frequency selective fading, which bring considerable challenges to R&D of high performance underwater acoustic communication system. With the development of underwater acoustic signal processing, especially the fresh development of time reversal and digital hardware processing platform, robust point to point communication and underwater acoustic network become possible.

Time reversal becomes a research focus in underwater acoustic communication in recent years, because time reversal technology can concentrate multipath and improve output signal-to-noise ratio (OSNR) without knowing channel character in advance. Direct sequence spread spectrum has been exploited widely in underwater acoustic because of its advantage of anti-multipath, anti-jamming and spreading gain.

Considering the performance degradation of time reversal method under time-varying channel, by combining time reversal and spread spectrum we proposed a novel scheme for time reversal spread spectrum UWA communication in the presence of time variation. The proposed scheme utilizes previously decided bits to generate spread spectrum sequences as the training signal to update the channel estimation, and adopts the output of the channel estimator for time reversal processing to facilitate multipath and noise robust demodulation. The mechanism of the proposed method not only enables the multi-path focusing, but also omits the employment of the probe. In addition, the proposed scheme is robust to low SNR and convenient for implementation. Furthermore, we compare the performance of channel estimation time reversal under different SNR.

The main contributions of this paper are as follows:

- 1、 We proposed a scheme based on time reversal and spread spectrum under time-varying channel, by employing decided information to estimate channel

character, and utilizing the channel response for time reversal. The proposed time reversal communication scheme is suitable for low SNR condition due to its inherent spread spectrum feature.

2、 This paper compared the performance between different updating frequency of channel estimation based time reversal method and classic probe updating based time reversal method, analyzed the performance of channel estimation based time reversal method under different SNR.

3、 Based on above investigation, hardware implementation of the proposed time reversal DS scheme was carried out based on DSP platform, by which the effectiveness of the proposed scheme was validated with lake trial.

Keyword : time-varying channel ; time reversal ; direct sequence spread spectrum ; channel estimation

## 目录

摘要 .....	1
Abstract .....	11
<b>第一章 绪论 .....</b>	<b>1</b>
1.1 引言 .....	1
1.2 水声通信发展现状 .....	3
1.3 水声 Modem 发展现状 .....	4
1.4 时间反转的发展历程和现状 .....	7
1.5 本论文的主要内容 .....	11
<b>第二章 水声信道及特性 .....</b>	<b>13</b>
2.1 水声信道 .....	13
2.2 水声信道特性 .....	14
2.2.1 水中的声速度 .....	14
2.2.2 传播损失 .....	15
2.2.3 多途扩展 .....	16
2.2.4 起伏效应与多普勒扩展 .....	18
2.2.5 海洋噪声 .....	19
2.2.6 水声信道的时变特性 .....	19
<b>第三章 时间反转与直接序列扩频技术 .....</b>	<b>22</b>
3.1 时间反转原理 .....	22
3.1.1 主动时间反转 .....	22
3.1.2 被动时间反转 .....	23
3.2 直接序列扩频技术 .....	25
3.2.1 扩频技术的理论基础 .....	25
3.2.2 DBPSK 原理 .....	25
<b>第四章 时变条件下的时间反转扩频通信 .....</b>	<b>29</b>
4.1 时变条件下的时间反转的研究 .....	29
4.2 时变条件下时间反转扩频系统方案 .....	31
4.2.1 基于探针更新的时间反转扩频方案 .....	31
4.2.2 基于信道估计的时间反转扩频方案 .....	32

4.2.3 自适应信道估计算法.....	34
<b>第五章 被动时间反转扩频 DSP 实现方案设计 .....</b>	<b>36</b>
<b>5.1 系统硬件设计 .....</b>	<b>36</b>
5.1.1 TMS320C6713.....	37
5.1.2 MAX274 滤波电路 .....	40
5.1.3 AD603 电路.....	40
<b>5.2 系统软件实现.....</b>	<b>42</b>
5.2.1 程序的主要流程.....	42
5.2.2 信号的接收与解调.....	43
<b>第六章 实验结果与分析 .....</b>	<b>46</b>
<b>6.1 实验一 .....</b>	<b>46</b>
6.1.1 湖试水域的特性.....	46
6.1.2 信号的调制与解调.....	47
6.1.3 实验结果.....	49
<b>6.2 实验二.....</b>	<b>52</b>
6.2.1 实验设置.....	52
6.2.2 实验结果.....	54
<b>第七章 总结 .....</b>	<b>59</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>60</b>
<b>攻读硕士学位期间获得的成果.....</b>	<b>64</b>
<b>致谢 .....</b>	<b>65</b>



**contents**

**Abstract(in Chinese)** ..... 1

**Abstract** ..... 11

**Chapter 1 Preface** ..... 1

**1.1 Introduction**..... 1

**1.2 Developing status of underwater acoustic communication**..... 3

**1.3 Developing status of underwater acoustic Modem**..... 4

**1.4 Developments and advances in Time Reversal Communication**..... 7

**1.5 Main Content of this dissertation**..... 11

**Chapter 2 Underwater acoustic channel and its characteristics** .... 13

**2.1 Underwater acoustic channel**..... 13

**2.2 Characteristics of underwater acoustic channel** ..... 14

        2.2.1 Sound speed in the ocean ..... 14

        2.2.2 Transmission loss..... 15

        2.2.3 Multipath spread ..... 16

        2.2.4 Undulating effect and Doppler spread..... 18

        2.2.5 Oceanic noise..... 19

        2.2.6 Time-varying characteristics of underwater acoustic channel..... 19

**Chapter 3 Time Reversal and Direct Sequence Spread Spectrum** .. 22

**3.1 Principle of time reversal**..... 22

        3.1.1 Active time reversal..... 22

        3.1.2 Passive time reversal..... 23

**3.2 Principle of direct sequence spread spectrum**..... 25

        3.2.1 Theoretical basis of spread spectrum technology ..... 25

        3.2.2 Principle of DBPSK ..... 25

**Chapter 4 Time Reversal and spread spectrum communication under time-varying channel** ..... 29

**4.1 Time reversal under time-varying channel**..... 29

**4.2 The scheme of time reversal spread spectrum system**..... 31

        4.2.1 Scheme of time reversal spread spectrum based on probe updating..... 31

4.2.2 Scheme of time reversal spread spectrum based on channel estimation .....	32
4.2.3 Adaptive channel estimation algorithm.....	34
<b>Chapter 5 Passive time reversal spread spectrum implementation</b>	
<b>base on DSP design .....</b>	<b>36</b>
<b>5.1 Hardware design .....</b>	<b>36</b>
5.1.1 TMS320C6713 .....	37
5.1.2 MAX274 filtering circuit .....	40
5.1.3 AD603 circuit .....	40
<b>5.2 Software implementation.....</b>	<b>42</b>
5.2.1 Main process of system .....	42
5.2.2 Receive and demodulation signal.....	43
<b>Chapter 6 Experimental results and analysis .....</b>	<b>46</b>
<b>6.1 Experiment 1 .....</b>	<b>46</b>
6.1.1 Environmental character of trial area .....	46
6.1.2 Signal modulation and demodulation .....	47
6.1.3 Lake trial.....	49
<b>6.2 Experiment 2 .....</b>	<b>52</b>
6.2.1 Experimental design.....	52
6.2.2 Experimental results.....	54
<b>Chapter 7 Summary .....</b>	<b>59</b>
<b>References .....</b>	<b>60</b>

## 第一章 绪论

### 1.1 引言

海洋占全球面积的 71%，是人类生存发展的第二空间。二十一世纪以来，随着人口的快速增长，陆地生态环境恶化，资源紧缺，引发海洋资源的大发现，驱动着人类向海洋空间拓展。海洋中蕴含着丰富的生物、矿产等资源，是支持人类可持续发展的宝贵财富。海洋是人们生活的重要依托。世界经济、社会、文化最发达的区域，都集中在离海岸线 60 公里以内的沿海，其人口占全球 50%以上，70%的世界贸易总值来自海运。海洋是战略争夺的“内太空”。能源安全和经济安全的突出，高新技术在军事上的运用，赋予了海洋安全，海洋战略地位新的内容。如今人类对海洋的依赖与日俱增，人们将从海洋中获取各种食物、能源和矿场等，并从海洋中探索地球的奥秘。

所有这些海洋活动都依赖于水下信息的传输。由于电磁波在水中传播时衰减严重，而声波是人类迄今为止已知的唯一能在水中远距离传播的能量形式，所以海洋中检测、通信、定位和导航主要利用声波，声波成为了水下信息传输的主要载体。

与无线电信道相比，水声信道是个非常复杂的信道，水声信号的传输不仅取决于海水的边界、海水的温度、盐度分布以及海水中各成分对声波的吸收，还受到海洋动力因素和海洋时空变化的制约<sup>[1]</sup>。水声信道是个弥散的衰落信道，能量损失随着距离和频率的增加而变大<sup>[2]</sup>。水声信道还是一个时-空-频变的信道，其主要特征表现在复杂性、多变性和有限带宽。水声信道可以描述成双重扩展信道：时间扩展和空间扩展。时间扩展引起多径效应，而空间扩展引起多普勒频移，双重扩展引起时间选择性衰落和频率选择性衰落<sup>[3]</sup>。同时，海洋中存在由于潮汐波浪引起的噪声、船舶舰艇噪声、生物噪声、人工噪声等。因此，具有窄带、高噪、强多途干扰等众多制约因素的随机时-空-频变水声信道给水声通信技术提出很高的要求<sup>[4]</sup>。

为了克服多径效应,提高通信性能,学者们提出了许多抑制多径的技术,如:直接序列扩频技术、信道均衡技术、RAKE接收机技术、时间反转技术等。通过一种技术或者联合多种技术能够有效地克服多径,消除码间干扰。

直接序列扩频是安全性高、抗干扰性强的一种信号传输方式,这种技术是基于香农信息论发展起来的信息传输技术,它通过伪随机码扩展信号频谱,其信号所占用的频带宽度远远大于所传信息必需的最小宽度,使其具有优良的抗多径和抗干扰能力,在军事通信和机密工业中得到了广泛的应用<sup>[5]</sup>。

时间反转技术是近些年研究比较多的抗多径技术,其最大的优点在于在没有信道先验知识的情况下自适应匹配信道,使信号时间压缩和空间聚焦从而克服多径的干扰。时间反转还有一个优点:相比于其他抗多径技术,其算法复杂度低,容易在水声节点上实现。时间反转可以分为主动时间反转和被动时间反转。

应该特别指出,在时变和多径的浅海环境,可靠的高速率的水声通信是一个非常具有挑战的问题<sup>[6]</sup>。

在时变多径信道中运用时间反转技术可以克服多径造成的码间干扰,在主动时间反转中信号来回传输两次或者在被动时间反转中连续更替探针影响了通信效率。在对信道估计的基础上,运用被动时间反转间歇更替探针即:在信道变化剧烈的情况下,不断更替探针用于适应信道的变化,而在信道保持基本不变时,不更替探针,一方面可以保证时间反转的性能,另一方面可以提高时间反转的通信效率。

目前水声通信 Modem 的需求与日俱增,其通信距离与通信速率比上世纪有了较大的提高<sup>[7]</sup>。水下通信 Modem 广泛用于水下遥控遥测、水下定位、水下资源勘探、水下环境监测等,同时水下通信节点正朝着构建水下通信网络发展,而在水-陆-空形成立体化信息网络。西方发达国家投入了大量的力量建立水下通信网络,如美国麻省理工学院设计的 AquaNodes 水下传感器网络节点,历经 12 年的 Seaweb 计划,欧共体在 MAST (Marine Science and Technology program) 计划支持下,开展了名为 ROBLINKS (Long Range Shallow water Robust Acoustic communication Links)、SWAN (Shallow Water Acoustic communication Network) 的水声通信网络研究计划等。无论在水下通信节点还是水下通信网络方面,国内的研究还是相对落后,很多研究还尚处于起步阶段。

## 1.2 水声通信发展现状

总的来说<sup>[8]</sup>，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，并且随着硬件处理平台、信号处理算法、信号处理芯片的不断提高，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、盲均衡技术、分集接收技术等。水声通信的发展远远滞后，这是由水声信道的特殊性决定的<sup>[9]</sup>。特别是在高速通信中，有限的信道带宽和信号的多途传输会引起非常严重的码间干扰，造成接收数据严重误码；海洋中声波传播方式在不同季节，不同的水域传播方式也不稳定。总之，实现高速率、高稳定性的水声通信必须要克服信道变化带来的影响。

随着通信技术的发展，新型的水声通信技术，如直接序列扩频技术或跳频扩频通信、正交频分复用等在发达国家正深入、广泛地研究和应用。同时，时间反转镜等新概念由超声领域运用到水声领域，时间反转的独特性使其在水声通信技术也受到越来越多的重视。进入 21 世纪，水声通信技术的进步和需求更加显著，特别是随着电子技术和商用 DSP 技术的快速发展，以水声调制解调器和组网通信技术为典型的规范化产品的开发和应用正得到重视并逐步投入应用。

从水声通信研究的横向比较来看，世界水声通信的研究主要集中在美、法、英、日等发达国家的大学和科研机构<sup>[10]</sup>，一些国外公司和研究所也开发了许多应用产品，而我国对这方面的研究起步相对较晚。自上世纪80年代中期以来，尤其是进入90年代后，国内一些科研单位都对水声通信进行了大量的研究工作，在水下图像传输、语音通信、自适应均衡技术、扩频通信、水雷远程遥控、通信网络等许多方面各自取得了一定的成果。我国开展水声通信研究的单位主要有哈尔滨工程大学、中科院声学研究所、西北工业大学、厦门大学和中信重工集团所属的研究所。从总体上讲，我国在水声通信领域的研究水平还远落后于国际先进水平。尽管如此，在点对点通信技术方面国内的跟踪面较宽，几乎研究了当前所有的前沿技术，有关的实验研究也较深入，积累了一定的技术储备。

### 1.3 水声 Modem 发展现状

水声 Modem 具有以下功能：海洋环境监测、海洋遥控遥测、海洋数据传输、海洋资源勘探、水下组网等。早期的水下通信节点采用模拟调制解调技术，随着电子技术和信息科学的迅速发展，水声通信开始采用数字调制解调技术，数字通信可以降低硬件资源、降低复杂度、可靠数据传输、小型化、低功耗等。

水声通信节点无论在民用方面还是在军用方面的需求日益显著，人们对水声通信节点的研究投入了更多的财力物力，数据处理方面选择具有高运算能力的数字芯片，因此取得了一些显著的成果。目前有很多性能优良的水声 Modem。



图 1.1 LinkQuest 公司 UWM 系列水声 Modem

Fig.1.1 UWM series Modem of LinkQuest Corporation

图 1.1 为 LinkQuest 公司 UWM 系列的水声 Modem。UWM 系列的 Modem 包括 UWM1000、UWM2000、UWM2200、UWM3000、UWM4000、UWM10000，不同型号的 Modem 代表不同的传输距离。LinkQuest 公司的 UWM 系列水声 Modem 在世界各地都有广泛的应用，主要用于近海油田、环境监测、AUV 高速数据链、AUV 命令和控制、载人潜艇、水下建设和水声数据上传等领域。LinkQuest 公司 UWM 系列 Modem 的参数如下表所示<sup>[11]</sup>：

图 1.2 为美国 Woods Hole 海洋研究所开发的微型 Modem<sup>[12]</sup>。微型 Modem 的处理芯片是 TI 公司的 TMS320C5416 DSP 芯片，具有高度集成、功耗低的特点。微型 Modem 的传输速率为 80-5400bps，微型 Modem 工作在浅海中，支持 FSK 和 PSK 调制解调，在低速通信时采用 FH-FSK 调制解调技术，在高速通信中采用可变速率的 PSK 调制解调技术。

表 1.1 UWM 水声 Modem 参数一览表

Table 1.1 the parameters of UWM Modem

type	Work condition(m)		Consumption (w)	Baud Rate (bps)		Frequ- -ency (kHz)	Error radio
	depth	Radius		Stand -ard	Optio -nal		
UWM 1000	200	300	1	9600	19200	35	Belo w $10^{-7}$
UWM 2000	1000	1500	4	9600	19200	35	
UWM 3000	3000	3000	20	2500	5000	10	
UWM 4000	6000	4000	20	4800	9600	17	

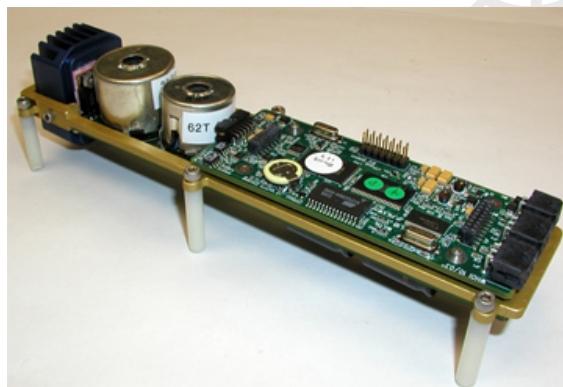


图 1.2 Wools Hole 开发的微型 Modem

Fig.1.2 Micro underwater acoustic Modem of Wools Hole



图 1.3 Benthos 公司研制的水声 Modem

Fig.1.3 Underwater acoustic Modem of Benthos coroporation

图 1.3 为 Benthos 公司的水声 Modem , 供电电压为 12-48VDC , 水声 Modem 的工作频率分为两种 : 低频段在 9-14kHz , 中频段在 16-21kHz , 换能器为全指向性 , 与上位机的接口采用 RS232 模式。



图 1.4 S2C L220 水声 Modem

Fig.1.4 Underwater acoustic Modem of L220

图 1.4 为 S2C L 220 型水下声学调制解调器<sup>[13]</sup>。该系统最早采用线性变频调制解技术 (Chips)。由于在声学频谱传播领域的不断探索 , S2C 水下声学调制解调器具有很高的传输速率 , 并且能够很好的抑制多径和噪声。S2C L200 Modem 的带宽为 210kHz-290kHz , 换能器具有 10°的指向性 , 传输速率能够自适应信道 , 最高可达到 72kbps , 内部具有纠错功能 , 误码率可达  $10^{-7}$  , 采用 DC12V 供电 , 接收时最大功率为 1.5W , 传输时最大功率为 3W。



图 1.5 中科院声学所 MQ 型 Modem

Fig.1.5 Modem of Institute of Acoustics Chinese Academy of Sciences

图 1.5 为中国科学院声学研究所研究出的 MQ 型水声调制解调器<sup>[14]</sup>。MQ 型水声调制解调器以水声扩频通信技术为基础 , 结合先进的低功耗数字处理技术 , 可实现水下远距离长时间可靠通信。MQ Modem 有三种可选的传输速率模式 :



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.

廈門大學博碩士論文摘要庫