

学校编码: 10384

类号 _____ 密级 _____

学号: 23320101153127

UDC _____

厦门大学

硕士学位论文

SIMO 水声通信系统关键技术与应用

Research and Application on Key Technologies for

SIMO Underwater Communication System

雷王微

指导教师: 胡晓毅 教授

专业名称: 通信与信息系统

论文提交日期: 2013 年 5 月

论文答辩日期: 2013 年 5 月

学位授予日期: 2013 年 月

答辩委员会主席: 

评 阅 人: _____

2013 年 5 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）：雷王徽

2013年5月30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）：雷王微

2013年5月30日

摘要

随着人类开发利用海洋活动的日益深入，水声通信技术越来越多地被应用到海洋环境考察、资源开发等领域。在未来的高科技研究领域中，水声通信技术已成为研究热点之一。但由于水声通信传输条件恶劣，存在严重的噪声背景，并且水下声信道的带宽十分有限，再加上复杂的多径传播和时间、频率选择性衰落，导致水声通信信号严重畸变。因此如何解决多径干扰以及信道衰落成为设计水声通信系统时所面临的主要问题。

SIMO 技术近几年持续发展，各种水声通信系统中也越来越多地采用 SIMO 技术来克服衰落提高系统性能。本论文基于 SIMO 水声通信系统，对其关键技术展开研究，提出适用于水声信道的相位估计技术从而保证了接收分集时的信号合并增益，将被动时间反转镜技术应用在 SIMO 水声通信系统中重组多径抑制码间干扰。采用 chirp 扩频 (Chirp Spread Spectrum, CSS) 技术调制信号，并在厦门大学实验水池以及厦门港浯屿浅海海域进行了实验，数据结果表明该系统可以实现距离 10km、信息传输速率 400bps 的零误码传输，不仅能提高系统抗衰落的能力，还能使水声信道的多径干扰得到抑制，实现了系统可靠性的显著提高。

本文的主要工作总结如下：

- 1、系统地介绍了国内外 SIMO 水声通信的研究现状，分析了水声信道的主要特点及其对水声通信性能的影响，简单介绍了 chirp 信号特性及 CSS 系统。
- 2、搭建基本的 SIMO 水声通信系统，研究信道相关性对接收分集性能的影响，并对接收分集技术中的四种合并方法进行性能分析比较并结合复杂度考虑，等增益合并是一种算法和复杂度折衷且性能较好的技术，使系统在提高抗衰落能力的同时也更易于实现。
- 3、针对实现信号等增益合并的前提是要将各路信号相位校准，提出基于 chirp 信号的数字相关法相位估计技术。实验证明该技术适用低信噪比下的水声信道且可靠性高，保证了信号合并增益。

4、针对水声信道的多径干扰，深入研究了基于 SIMO 的被动时间反转镜技术的原理。仿真和实验结果表明，基于 SIMO 的被动时间反转镜技术在水声信道中能重组多径抵抗码间干扰。

5、在实验室水池和厦门港浯屿浅海海域对 SIMO 水声通信系统进行了实验，实验结果表明，该系统具有较强的抗衰落、抗多径能力，可靠性较高。并且随着接收阵元数的增加，系统性能随之提高。

关键字： SIMO；水声信道；等增益合并；相位估计；被动时间反转镜技术

Abstract

With more and more development on exploiting and utilizing seas and oceans, Underwater Acoustic (UWA) communication technologies are increasingly being applied to study the marine environment, resources development and other fields. In the future high-tech research fields, UWA communications technology has become an active research field. However, poor conditions of transmission, serious noise background, time and frequency selective fading, the limited bandwidth of channel result in serious distortion of UWA communication signals. Therefore, how to solve the multi-path interference and channel fading to become the main problems faced in the design of underwater acoustic communication system.

The SIMO technology develops persistently in recent years, and more and more UWA communication systems use it to overcome fading improve system performance. This thesis is based on the SIMO underwater acoustic communication system to make a study on its key technologies, proposing a UWA channel phase estimation techniques in order to ensure the receive diversity signal combining gain, using time reversal mirror technology to recombinate multipath and suppress the inter-symbol interference. Employ CSS modulation system as a platform, the data results of experimental pool in Xiamen University and Xiamen Port Wu Island shallow waters show that the system can be achieved a rate of 400bps with free-error at distance of 10km. The system is not only improved the ability of anti-fading, but also channel multipath interference can be suppressed, significantly improving system reliability.

The main contents are summarized as follows:

1. The systematic exposition to the research status of SIMO underwater acoustic communication at home and abroad, the main features of the UWA channel and its impact on UWA communication, the simple introduction chirp signal characteristics and CSS system;

2. Build a basic SIMO underwater acoustic communication system; study the impact of channel correlation on receive diversity; after analysis performance of the four consolidation method in the receive diversity combining with the complexity considered, equal gain combining technology is an algorithm of compromised

complexity and better performance, improving the system anti-fading ability while easier to implement;

3. For the achievement of each signal phase calibration before combining signal, estimation phase technique named digital correlation function method based on chirp signal is proposed. Experiments show that the technique is applicable to UWA channel under the low signal-to-noise ratio and high reliability to ensure that the gain of the signal combination;

4. For UWA channel multipath interference, in-depth study of the principles of SIMO passive time reversal mirror technology. Simulation and experimental results show that, the technology can restructure multipath to resistant inter-symbol interference.

5. The experiments were carried out in the laboratory pool and Xiamen Port Wu Island shallow waters, the results show that the system has a strong anti-fading, multipath resistance and high reliability. What's more, with the receiving array elements increases, the system performance improves.

Key Words : SIMO; UWA channel; equal gain combining; phase estimation; passive time reversal mirror technology

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 SIMO 水声通信的研究现状.....	2
1.3 论文的研究内容	3
第二章 SIMO 水声通信系统.....	5
2.1 水声信道特性	5
2.1.1 声能量的传播损失.....	5
2.1.2 声传播的多径效应.....	7
2.1.3 声传播的多普勒扩展.....	8
2.1.4 声信号的起伏效应.....	9
2.1.5 海洋噪声	9
2.2 CSS 调制技术	10
2.2.1 Chirp 信号及其脉冲压缩特性.....	10
2.2.2 四进制 SC_CSS 调制	12
2.2.3 滑动相关检测.....	13
2.3 SIMO 水声通信系统.....	14
2.3.1 系统框架	14
2.3.2 系统同步	15
2.4 本章小结	16
第三章 接收分集技术	17
3.1 分集技术	17
3.1.1 空间分集对时间/频率分集.....	17
3.1.2 接收分集.....	17
3.2 信道相关性	18
3.3 信号合并方法	20
3.3.1 合并方法.....	20
3.3.2 合并方法的仿真比较.....	21
3.4 系统应用仿真	22
3.5 本章小结	25

第四章 相位估计技术	27
4.1 相位估计技术简介	27
4.1.1 常用相位估计技术现状	27
4.1.2 基于正弦信号的数字相关法	28
4.2 基于 chirp 信号的相位估计技术	30
4.2.1 Chirp 信号的相位差与互相关值的关系	30
4.2.2 多径信道下 chirp 信号相位差与其互相关值的关系	32
4.2.3 相位估计技术的实施方法	32
4.2.4 相位估计技术的仿真研究	33
4.3 相位校准	36
4.3.1 相位校准方法	37
4.3.2 仿真验证	37
4.4 系统应用仿真	40
4.4.1 数值仿真结果	40
4.4.2 仿真结果分析	40
4.5 本章小结	42
第五章 被动时间反转镜技术	43
5.1 水声通信中时间反转镜技术简述	43
5.2 时间反转镜技术原理	44
5.2.1 被动时间反转镜	44
5.2.2 虚拟时间反转镜	46
5.2.3 方案比较	47
5.3 基于 SIMO 的被动时间反转镜技术的研究	47
5.3.1 参数设计	48
5.3.2 增益分析	48
5.3.3 阵元数对被动时间反转镜聚焦性能的影响	51
5.4 系统应用仿真	54
5.4.1 系统仿真	54
5.4.2 码间干扰对系统时反性能的影响	58
5.5 本章小结	60
第六章 实验结果及分析	61
6.1 实验系统介绍	61

6.2 水池实验	62
6.2.1 实验条件及方法	63
6.2.2 实验结果及分析	66
6.3 海洋实验	74
6.3.1 实验条件及方法	74
6.3.2 实验结果及分析	76
6.4 本章小结	81
第七章 总结与展望	83
7.1 主要研究工作总结	83
7.2 对进一步研究工作的展望	83
参考文献.....	85
致谢.....	90

Index

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Research Background	1
1.2 SIMO Underwater Acoustic Communication Progress	2
1.3 Main Contents	3
Chapter 2 SIMO Underwater Acoustic Communication System	5
2.1 Characterstrics of Underwater Acoustic Channel	5
2.1.1 Transmission Loss	5
2.1.2 Multipath Effect	7
2.1.3 Doppler Effect	8
2.1.4 Intensity Fluctuation	9
2.1.5 Ocean Ambien Noise	9
2.2 CSS Modultion	10
2.2.1 Chirp Signal and Pulse Compression	10
2.2.2 Quaternary SC_CSS Modulation	12
2.2.3 Sliding Correlation Detection	13
2.3 SIMO Underwater Acoustic Communication System	14
2.3.1 System Framework	14
2.3.2 System Synchronization	15
2.4 Summary	16
Chapter 3 Receive Diversity Tecnology	17
3.1 Diversity Tecnology	17
3.1.1 Space Diversity to Time/Frequency Diversity	17
3.1.2 Receive Diversity	17
3.2 Channel Correlation	18
3.3 Singal Combination	20
3.3.1 Combination Method	20
3.3.2 Simulation Comparison	21
3.4 Application Simulation	22
3.5 Summary	25
Chapter 4 Phase Estimate Technology	27
4.1 Brief Introduction	27
4.1.1 State of Art	27

4.1.2 Digital Correlation Method	28
4.2 Phase Estimate Technology Based on Chirp.....	30
4.2.1 Relationship Between Phase Difference and Cross-correlation Value.....	30
4.2.2 Relationship Under Multipath Channel.....	32
4.2.3 Implementation Method	32
4.2.4 Simulation Study	33
4.3 Phase Calibration	36
4.3.1 Phase Calibration Method	37
4.3.2 Simulation	37
4.4 Application Simulation.....	40
4.4.1 Numerical Simulation Results.....	40
4.4.2 Analysis	40
4.5 Summary	42
Chapter 5 Passive Time Reversal Mirror Technology.....	43
5.1 Brief Introduction.....	43
5.2 Principle.....	44
5.2.1 Passive Time Reversal Mirror.....	44
5.2.2 Virtual Time Reversal Mirror	46
5.2.3 Program Comparison.....	47
5.3 Research on Passive Time Reversal Mirror	47
5.3.1 Parameter Design	48
5.3.2 Gain Analysis	48
5.3.3 Impact of Array Element Number.....	51
5.4 Application Simulation.....	54
5.4.1 System Simulation.....	54
5.4.2 Impact of Inter-symbol Interference	58
5.5 Summary	60
Chapter 6 Experiment Results.....	61
6.1 Introduction of Experimental System.....	61
6.2 Water Pool Experiments	62
6.2.1 Conditions and Methods.....	63
6.2.2 Results and Analysis	66
6.3 Oceans Experiments	74
6.3.1 Conditions and Methods.....	74
6.3.2 Results and Analysis	77

6.4 Summary	82
Chapter 7 Summary and Outlook.....	83
7.1 Main Work of This Dissertaion.....	83
7.2 Future Work	83
References	85
Acknowledgement	90

厦门大学博硕士学位论文摘要库

第一章 绪论

1.1 研究背景和意义

随着人类在海洋中活动领域的不断扩展，各种技术被应用到其中并得以发展，利用海洋信道进行数据信息传输的水声通信技术就是其中的关键技术之一。水声通信技术是近年来国际上研究相当活跃、备受关注的科学领域之一。它以声波作为水下信息传输载体的通信方式，发射端调制产生适合信道传输的电信号，经过换能器转换为声信号在信道中传输，接收端将接收的声信号转换为电信号后进行解调完成水下声通信。水声通信的研究目的就是为了实现水下信息高速、高可靠性的传输^[1]。

但水声通信不同于无线电通信，水声信道是水下唯一可以进行远程信息传输的物理媒质，它较无线电信道复杂得多，使得水声信道无法直接吸收引入许多经典的无线电通信技术，海洋信道的能量损失与传播距离成正比，其不仅属于不平整双界面随机不均匀介质信道，又是时间弥散的慢衰落信道，因此可用带宽只有几千赫兹，信息容量小也是水声信道的特点之一，并且在传播过程中信号受时变、空变及多途效应严重影响^[2]。传统的水声通信系统通常采用单输入单输出（Single Input Single Output, SISO）系统，通过各种均衡方法抵抗水声信道的码间干扰和载波相位偏移，获得满意的接收性能^{[3]-[4]}，但水声通信的可靠性远远低于一般的无线通信系统，提高水声通信的传输可靠性成为我们迫切需要解决的问题。目前各国研究人员针对水声信道特性对如何尽可能提高系统抗衰落能力和降低多径干扰影响进行了深入的研究。分集技术、时间反转镜处理技术等成为了研究的热点^{[5]-[7]}。

单输入多输入（Single Input Multiple Output, SIMO）作为一种空间分集技术，通过多阵元所带来的空间域冗余提高了数据传输的可靠性，而且这些性能提高不需要增加可用带宽或者提高发射功率。在水声通信系统，特别是远距离传输的系统中，常用水听器阵组合的空间分集来抗衰落提高接收信噪比，改善系统性能。而时间反转镜技术在静态声场的基础上，利用声场传输的收发互易性，实现了接收的时反信号在时间上的压缩和空间上的聚焦。利用时反信号这种时间上和空间上的压缩，可克服水声信道的多径效应，可以减小水声通信中

的码间干扰，增加通信距离。更进一步，利用多个时反信号在空间不同接收位置上的聚焦，可以实现 SIMO 的通信机制，提高水声通信可靠性。

在 SIMO 水声通信系统中，接收空间分集技术的性能通常取决于接收阵元间的信道相关性以及接收端如何合并多个接收信号副本，从而提高系统的抗衰落能力；另一方面，要实现高速率的水声通信首先要克服信道多径效应的影响，因为引起的码间干扰大大降低了通信可靠性。因此，如何保证信号分集合并增益，应用时间反转技术克服码间干扰，提高系统可靠性是本文的研究重点。

1.2 SIMO 水声通信的研究现状

在无线信道上实现可靠通信的唯一最有效的技术手段就是分集^[8]，其中特别有前途的就是研究空间分集多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)^[9]。SIMO 结构可以视为 MIMO 的一个特例，在接收端使用多副天线，通过将每副天线上接收的信号副本合并，以获得分集增益。当接收端能够准确估计信道状态信息时，接收分集系统可以获得最大分集阶数^[10]。

国外 SIMO 的水声通信研究开展的比较早，2000 年时就有文献基于 SIMO 系统通过各种均衡方法有效抵抗水声信道的码间干扰和载波相位偏移，并获得满意的接收性能^[11]。近年来，不少文献基于 SIMO 采用时间反转镜技术抵抗多径，美国华盛顿州立大学的 D. Rouseff 团队就基于 4 个接收阵元采用差分二相移相键控(Differential Binary Phase Shift keying, DBPSK)数据调制方式，在浅海通信距离 2km 时实现 2.2kbps 的传输速率^[12]。文献[13]开发了一种浅海水声调制解调器，基于 8 个垂直的接收阵元，采用联合迭代解调/译码技术，在通信距离 1.78km 时达到 2.5kbps 数据率，系统误码率低于 10^{-5} 。更多文献则倾向于在 SIMO 中引入正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术。美国康涅狄格大学的周胜利等人在 OFDM 水声通信系统中，采用导频进行最小平方(Least Square, LS)信道估计，并使用码率为 2/3 的卷积码以及多通道接收技术，浅海通信距离 800m 时通信速率达到 9.7kbps^[14]。此外，还有文献基于 SIMO 水声信道对 OFDM 信道容量进行估计，实验结果表明，只要接收帧数足够多且信道时不变，系统可以在不牺牲信道容量的情况下克服符号间干扰^[15]。

国内对 SIMO 水声通信的研究主要集中在时反处理, 参数估计以及信道均衡这三个方面。时反方面, 哈尔滨工程大学的殷敬伟以及西北工业大学的刘家亮等人将时反处理作为信道均衡器用于水声通信^{[16]-[17]}, 后者在湖测信道条件下, 收发距离 3.7km, 使用 10 个接收阵元在信噪比为 15dB 时系统误码率低于 0.3%^[18]。浙江大学则将被动时反与自适应均衡技术相联合用于水声通信^[19], 还基于 MIMO 水声通信系统进行了主动时反技术的湖试, 在信噪比 11dB 时传输速率达到 8kbps, 误码率低于 10^{-3} ^[20]。SIMO 应用于水声信道参数估计的文献也不少^{[21][22]}。比如, 利用垂直阵测量舰船辐射噪声过程中因水声信道的多径效应对测量性能产生的影响, 提出了一种基于虚拟时间反转镜技术的垂直阵舰船辐射噪声级测量方法^[23]。计算机仿真试验结果表明, 该方法能有效地进行舰船宽带辐射噪声测量, 当阵元个数满足一定要求时, 测量得到的声源级与实际声源级相比, 误差小于 1dB。此外, 基于 SIMO 的信号均衡技术研究现在也很流行^[24]。文献[25]通过多通道联合频域均衡克服水声信道时变衰落严重现象, 提高水声通信质量, 仿真结果表明, 该方法计算量低、稳定性高, 在高速水声通信中具有较强的应用前景。并且在我国南海进行实验, 结合采用最大似然方法对多普勒频移和初始相位进行估计, 在通信距离 30km 数据率为 900bps 时误码率为 0.006^[26]。

综上, SIMO 水声通信关键技术研究主要集中在时反处理、参数估计、信道均衡以及结合各种调制技术上。对如何保证 SIMO 水声通信系统中的分集合并增益, 特别是在对各阵元接收信号合并前所要求的相位校准技术很少提及。本文提出的基于 chirp 信号的数字相关法实现了各阵元接收信号的相位估计并校准相位, 保证了分集合并增益的同时, 引进被动时间反转镜技术用于抑制多径影响, 从而提高了系统可靠性。

1.3 论文的研究内容

本论文基于 SIMO 水声通信系统, 通过理论分析、计算机仿真和实验三个环节对其关键技术展开研究。研究接收分集技术基本原理并比较其四种不同的信号合并方法性能, 提出适用于水声信道的相位估计技术保证信号合并增益, 将被动时间反转镜技术应用 SIMO 水声通信, 最后以 Chirp 扩频 (Chirp Spread

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