学校编码：10384　　分类号___密级 _____
学号：23320131153233　　UDC _____

硕　士　学　位　论　文

低截获主动声呐发射波形设计研究

Design and Research on Transmit Waveform of LPI Active Sonar

原玉婷

指导教师姓名:　孙海信　副教授
林聪仁　副教授
专　业　名　称:　通信与信息系统

论文提交日期:　2016　年　　月
论文答辩日期:　2016　年　　月
学位授予日期:　2016　年　　月

答辩委员会主席：_____
评　　阅　　人：_____

2016 年　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（孙海信 副教授）课题（组）的研究成果，获得（孙海信 副教授）课题（组）经费或实验室的资助，在（水声通信与海洋信息技术教育部重点）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

随着海洋探测精度、检测概率、通信性能等军事和民用方面的需求，声呐系统从被动方式转变为主动方式。这种转变一方面提高了目标检测概率和水下通信的性能，另一方面也增加了信息被截获或解调的概率。被动声呐只有接受机，而主动声呐系统包括声呐信号波形、声呐信道和声呐接收机三部分。在工作时，系统要先发射探测波形，这一过程将极有可能导致信号被敌方截获并解调，造成信息泄漏。所以如何隐藏信息不被敌方截获或解调是现代主动声呐的重要研究方向。

波形设计是主动声呐系统中一个极为重要的环节，研究表明：对主动声呐来说，声呐发射波形体制既决定了接收系统如何进行信号处理，又直接影响了系统的距离分辨力、速度分辨力、目标探测精度、对抗干扰能力及信道匹配等方面的性能指标。通过设计合适的声呐发射端信号波形，可以较好地获取目标信息，提高抗干扰能力，并隐蔽自身，即实现主动声呐的低截获性能。

本文主要进行了低截获主动声呐发射波形的设计研究，并将其应用于低截获声呐通信系统的仿真中。

概述了主动声呐实现低截获通信的原理，推导了低截获概率因子的数学表达式，对影响低截获概率因子的各种因素进行了分析，并根据低截获因子和模糊函数提出了低截获主动声呐波形设计原则。在进行波形设计时，首先分析了混沌信号作为发射波形的特点及可行性；其次提出基于小波函数的导函数来对海豚信号进行建模，将实际通信信息伪装成海豚信号，以达到信息隐藏的目的。通过上述理论推导和计算机仿真，结合水池实验和海试，验证了方案的可行性。

本文的主要研究内容如下：

（1）对海洋环境系统进行详细研究，重点介绍了水下多径、多普勒效应、传播损耗及海洋环境噪声，并通过 alpha 稳态对海洋环境噪声进行建模，确立了计算机仿真的信道模型。

（2）对低截获通信中几种常用的波形进行讨论，分析了 LFM+CF 信号、LFM+Barker 码信号和 HFM 信号的特性，从信号的模糊函数及其组成结构出发，推导了各种信号的模糊函数表达式，分析了各种信号的距离分辨力和速度分辨力，并分析了各种信号的 LPI 特性。

（3）根据低截获通信的特点进行了波形分析与设计，分析了低截获通信系统对发射信号的要求，利用混沌信号作为低截获声呐通信的载波信号，并通过计算机仿真验证其可行性；其次提出基于小波函数的导函数来对海豚信号进行建模，将实际通信信息伪装成海豚信号，以达到信息隐藏的目的。通过上述理论推导和计算机仿真，结合水池实验和海试，验证了方案的可行性。

最后，对全文进行了总结，对取得的成果进行了的概括，提出文章的不足和对未来的展望。

关键字：水下通信；alpha 稳态；低截获声呐；波形设计；混沌信号；海豚仿生

ABSTRACT

The demands for marine exploration precision, detection probability, the communication performance in the military and civilian are increasing. The sonar system began to change from passive mode to active mode. On the one hand, the change increases the probability of target detection and performance of underwater sonar communication. On the other hand, it increases the probability of information being intercepted or being demodulated. The active sonar system includes sonar signal waveform, sonar channel and sonar receiver, while passive sonar only has receiver. When the system launches the detected waveform, it could be intercepted and demodulated by enemies,which may cause the leakage of information. So,researchers concentrate their attention on the reseaech of information concealing.

Waveform designing is very important in an active sonar system. Studies show that the transmit waveform can influence the performance of the active sonar system, including range resolution, speed resolution, the target detection precision, anti-interference ability, matching of channel and so on. In order to obtain better target information, higher anti-interference ability, we design appropriate sonar transmit waveforms for the sake of low interception rate of information.

This paper investigated the transmit waveform for active sonar and applied it to the simulation of LPI active sonar communication system. Firstly,the paper described the LPI communication principles, derived the mathematical expressions, and analysed various factors about the LPI factor. Besides, we proposed the design principles of LPI active sonar waveform according to LPI factor and ambiguity function. Secondly, the paper analysed the characteristics of the chaotic signal and discussed its feasibility when it was used as the transmitted waveform. Thirdly, the paper proposed a method of taking the derivative of the Gaussian function as the mathematical model of dolphins signals. In this way,the actual communication signal information could be concealed in dolphin signal. Finally, the paper verifies the feasibility of the method through the above theoretical analysis , computer simulation and sea trials.

The key contributions are as follows:

(1) The underwater multipath, Doppler effect, propagation loss and ambient noise are

analyzed in detail based on the studies of marine environment. The paper establishes a channel model for computer simulation by the alpha stable distribution which simulates the marine environment noise.

(2) The paper discusses several common waveforms which are used in LPI communications, such as signal of LFM+CF, LFM + Barker code and the HFM signal. Based on the ambiguity function and composition of the signal structure, the ambiguity functions of various signals above are derived , the range resolution and speed resolution of signals are analyzed. In the end, The paper analyzes the LPI characteristics of signals.

(3) When designing the transmit waveform, the paper analyzes the requirements for signals that used in LPI sonar commutations according to the characteristics of LPI commutations. In the first, this paper proposes that the chaotic signals can be carrier signals in LPI sonar commutation systems and verify the feasibility by computer simulation. What's more, he paper proposes a method to hide the communication information. The method is that using the derivative of the Gaussian function simulates the dolphins signal which can disguise the actual communication signal information into dolphin signal. Finally, the paper verifies the feasibility of the method through computer simulation, pool experiments and sea trials.

Finally, the full text and the result are summarized. The paper presents insufficient and prospects in the future.

Keywords: underwater communication alpha stable distribution LPI sonar waveform design chaotic signal bionic dolphins

目录

摘　要 ..... **I**

ABSTRACT ..... **III**

第 1 章　绪论 **1**

1.1 课题背景及意义 **1**

1.2 国内外研究现状 **2**

1.3 本文主要内容及工作要点 **3**

第 2 章 海洋环境分析及噪声建模 **5**

2.1 海洋环境分析 **5**

2.1.1 多普勒效应 5

2.1.2 多径效应 6

2.1.3 传播损耗 7

2.1.4 海洋环境噪声 8

2.2 海洋环境噪声建模 **8**

2.2.1 alpha 稳定分布概述 8

2.2.2 alpha 稳定分布的产生及概率密度 10

2.3 本章小节 **12**

第 3 章 低截获声呐波形分析 **13**

3.1 低截获概率声呐概述 **13**

3.2 低截获因子及模糊函数 **13**

3.2.1 声呐截获因子分析 13

3.2.2 模糊函数 15

3.3 低截获声呐波形设计原则 **15**

3.3.1 低频信号技术 16

3.3.2 大时宽带宽积技术 16

3.3.3 复合频（码）制 17
3.3.4 随机或非线性体制 18
3.3.5 时频捷变 18
3.3.6 低功率高能量效率 18
3.4 传统的低截获声呐波形分析 19
3.4.1 LFM+Barker 码组合信号 20
3.4.2 LFM+CF 组合信号分析 23
3.4.3 双曲调频信号分析 26
3.5 本章小结 28
第 4 章 基于混沌序列的低截获通信系统设计 31
4.1 混沌通信理论基础 31
4.1.1 混沌概述 32
4.1.2 混沌映射分析 34
4.1.3 典型的混沌序列及运动特征分析 37
4.1.4 混沌信号的平均模糊函数 41
4.2 基于混沌键控的低截获通信系统 43
4.2.1DCSK 通信系统 43
4.2.2 基于 DCSK 的低截获通信系统性能分析 45
4.2.2 水池实验分析 48
4.3 基于混沌调相的低截获通信系统 50
4.3.1 利用混沌映射 m 序列控制法产生随机相位 50
4.3.2 基于混沌映射的基函数的随机性及相关性分析 52
4.3.2 水池实验分析 55
4.4 本章小结 56
第五章 基于海豚信号合成的低截获通信系统设计 57
5.1 仿生低截获通信系统 57
5.2 海豚声呐系统及信号特点 57

5.2.1 海豚声呐系统 57
5.2.2 海豚信号特点 58
5.3 小波拟合 60
5.3.1 小波拟合过程 60
5.4 重构海豚信号的分析 62
5.5 海洋分析 66
5.6 本章小节 68
第 6 章 总结与展望 69
6.1 工作总结 69
6.2 工作展望 70
参考文献 71
硕士期间发表的论文 75
致谢 77

Catalog

Abstract(In Chinese) I

Abstract(In English) III

Chapter1 Introduction 1

1.1 Reseach Background 1

1.2 Reseach Status 2

1.3 Thesis Research 3

Chapter 2 The Marine Environment And Noise Modeling 5

2.1 Analysis of the Marine Environment 5

2.1.1 Doppler Effect 5

2.1.2 Multipath Effect 6

2.1.3 Transmission Loss 7

2.1.4 Ambient Noise 8

2.2 Noise Modeling 8

2.2.1 Alpha Stable Distribution 8

2.2.2 Generate of Alpha Stable Distribution and Probability Density 10

2.3 Summary 12

Chapter 3 Analysis Of Lpi Sonar Waveform 13

3.1 Overview of LPI Sonar 13

3.2 LPI Factor and Ambiguity Function 13

3.2.1 LPI Factor 13

3.2.2 Ambiguity Function 15

3.3 Principles of Designing LPI Sonar Waveform 15

3.3.1 Low Frequency 16

3.3.2 Large BT Product 16

3.3.3 Compund Code 17
3.3.4 Random or Nonlinear 18
3.3.5 Cross Section of Time-freqency 18
3.3.6 Energy Ratio 18
3.4 Analysis of Traditional LPI Sonar Waveform 19
3.4.1 LFM+Barker 20
3.4.2 LFM+CF 23
3.4.3 HFM 26
3.5 Summary 28
Chapter 4 Design of LPI System Based on Chaotic Sequences ..31
4.1 Chaotic Communication Theory 31
4.1.1 Overview of Chaos 32
4.1.2 Chaotic Map 34
4.1.3 Typical Characteristics and Motion 37
4.1.4 Average Ambiguity Function 41
4.2 LPI Communication System Based on DCSK 43
4.2.1 DCSK Communication System 43
4.2.2 Analysis of the Performance 45
4.2.2 Analysis of Pool Experiment 48
4.3 LPI Communication System Based on Chaotic Phase Modulation 50
4.3.1 Phases Based on Chaoic Map and m-sequences Control 50
4.3.2 Random and Correlation of Basis Functions 52
4.3.3 Analysis of Pool Experiment 55
4.4 Summary 56
Chapter 5 LPI Communication System Based on Gaussian 57
5.1 Bionic LPI Communications System 57
5.2 Dolphin sonar system and signal characteristics 57

5.2.1 Dolphin Sonar System 57
5.2.2 Signal Characteristics.....58
5.3 Gaussian Fitting.....60
5.3.1 Gaussian and Derivative 60
5.3.2 Gaussian Fitting 64
5.4 The Reconstruction of Dolphin Signal 66
5.5 Experiment Analysis 70
5.6 Summary.....72
Chapter 6 Summary and Future Work 69
6.1 Summary of This Paper.....69
6.2 Future Work 70
Reference 71
Reseach Achievement 75
Ackknowledgements.....77