

学校编码: 10384

学 号: 22320131151441

分类号 _____ 密级 _____

UDC _____

厦 门 大 学

硕士学位论文

水声通信信号调制识别及其实现研究

Research of Underwater Acoustic Communication Signal

Modulation Recognition and Its Implementation

江伟华

指导教师姓名: 童 峰 教 授

专 业 名 称: 海 洋 物 理

论文提交日期: 2016 年 6 月

论文答辩时间: 2016 年 5 月

学位授予日期:

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（ ）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

目录

目录.....	I
Catalog	III
摘要.....	V
Abstract.....	VII
第一章 绪论	1
1.1 论文研究背景及意义	1
1.2 信号调制识别的基本方法及研究现状	2
1.2.1 基于决策理论的最大似然估计方法.....	3
1.2.2 水声通信信号调制特征提取.....	4
1.3 调制识别器	8
1.4 研究内容和章节安排	11
第二章 水声信道特性	13
2.1 引言	13
2.2 水声信道的主要特点	14
2.2.1 水中的声速度.....	14
2.2.2 声传播损失.....	15
2.2.3 海洋环境噪声.....	16
2.2.4 多普勒频移.....	17
2.2.5 多途效应.....	18
2.3 本章小结	18
第三章 常用水声通信信号特征提取.....	20
3.1 常用水声通信信号	20
3.1.1 频移键控 FSK	21
3.1.2 相移键控 PSK	22
3.1.3 正交频分复用 OFDM	22
3.2 特征提取	23
3.2.1 OFDM 信号特征提取	23
3.2.2 MFSK/MPSK 信号特征提取.....	24
3.2.3 BPSK/QPSK 信号特征提取	25
3.3 本章小结	27
第四章 基于循环前缀相关性的水声 OFDM 信号特征提取.....	28
4.1 循环前缀的相关性分析	28

4.2 循环前缀特征参数提取	29
4.2.1 特征参数迭代提取.....	29
4.2.2 特征提取方法分析.....	31
4.3 本章小结	32
第五章 调制识别分类器	33
5.1 BP 神经网络	33
5.2 支持向量机	34
5.2.1 支持向量机原理.....	34
5.2.2 最小二乘支持向量机(LS-SVM)	36
5.3 LS-SVM 在调制识别中的应用	37
5.4 本章小结	38
第六章 调制识别系统软件实现	39
6.1 调制识别平台简介	39
6.2 调制识别模块	40
6.3 本章小结	42
第七章 调制识别系统硬件实现	43
7.1 系统硬件实现	43
7.2.1 STM32F407	44
7.2.2 DMA	45
7.2.3 MAX274	46
7.2.4 AD603	47
7.2 硬件调制识别设计	48
7.3 本章小结	50
第八章 实验结果与分析	51
8.1 调制识别实验设置	51
8.2 实验结果	53
8.3 实验硬件实现	54
8.4 本章小结	58
第九章 总结与展望	59
参考文献	61
致谢.....	66
攻读硕士学位期间发表的论文	67

Catalog

Catalog	III
Abstract.....	VII
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Research background and significance.....	1
1.2 Basic methods and research status of signal modulation recognition.....	2
1.2.1 The maximum likelihood estimation method based on decision theory.	3
1.2.2 Feature extraction of underwater acoustic communication signals	4
1.3 Modulation recognizer.....	8
1.4 Main content of this dissertation	11
Chapter 2 Characteristics of underwater acoustic channel	13
2.1 Introduction.....	13
2.2 The main characteristics of underwater acoustic channel	14
2.2.1 Sea velocity	14
2.2.2 Transmission loss	15
2.2.3 Ambient noise	16
2.2.4 Doppler effect	17
2.2.5 Multi-path effect	18
2.3 Summary.....	18
Chapter 3 Common underwater acoustic communication signal feature extraction.....	20
3.1 Commonly used underwater acoustic communication signals	20
3.1.1 Frequency shift keying FSK	21
3.1.2 Phase shift keying PSK.....	22
3.1.3 Orthogonal frequency division multiplexing OFDM	22
3.2 Feature extraction	23
3.2.1 OFDM signal feature extraction	23
3.2.2 MFSK/MPSK signal feature extraction	24
3.2.3 BPSK/QPSK signal feature extraction.....	25
3.3 Summary.....	27
Chapter 4 Feature extraction of underwater acoustic OFDM communication signals based on the correlation property of the cyclic prefix	28

4.1 Correlation analysis of cyclic prefix	28
4.2 Feature parameter extraction of cyclic prefix	29
4.2.1 Feature parameter iterative extraction	29
4.2.2 Analysis of feature extraction methods	31
4.3 Summary	32
Chapter 5 Modulation recognition classifier.....	33
5.1 BP neural network	33
5.2 Support vector machines	34
5.2.1 Support vector machines theory.....	34
5.2.2 Least-squares support vector machine (LS-SVM).....	36
5.3 The application of LS-SVM in modulation recognition	37
5.4 Summary	38
Chapter 6 Modulation recognition system software implementation	39
6.1 Introduction of modulation recognition platform.....	39
6.2 Modulation recognition module.....	40
6.3 Summary.....	42
Chapter 7 Modulation recognition system hardware implementation	43
.....	43
7.1 The system hardware implementation.....	43
7.2.1 STM32F407	44
7.2.2 DMA	45
7.2.3 MAX274	46
7.2.4 AD603	47
7.2 The design of hardware modulation recognition	48
7.3 Summary.....	50
Chapter 8 Experiment results and analysis	51
8.1 Modulation recognition experimental setup.....	51
8.2 Experimental result	53
8.3 Experiment hardware implementation.....	54
8.4 Summary.....	58
Chapter 9 Summary and forecast	59
References	61
Acknowledgement.....	66
Publications during M.S. study	67

摘要

随着海洋开发、海洋权益维护、国防安全等领域信息获取和处理需求的不断提升,对水声通信信号的调制样式的自动识别研究成为重要的研究课题。然而目前无线领域常用的通信信号(BPSK, QPSK, MFSK, OFDM)的调制识别方法往往需要较多的调制参数作为先验知识(如精确载波频率、初始相位、符号速率)。由于水声信道的随机时-空-频变、窄带高噪、多途效应及多普勒频移等特性,使得上述这些先验知识在水声信号调制方式未知的情况下很难得到,因此,非合作水声通信信号的自动识别极具挑战性。

信号频谱是对信号在频域方面的一种描述,不同调制方式的信号,在频域上表现为不同的形式。信号功率谱及其二次方谱可以较好的反映出 MFSK, BPSK 和 QPSK 调制方式的特性,正确地提取这些特性可以作为调制识别的特征参数。循环前缀是 OFDM 信号中的显著特征,是部分有用信号的复制,因此循环前缀和有用信号具有相关性。同时,由于单载波信号的传输符号独立同分布,只有延迟为零时才具有相关性。因此,根据此特征可进行 OFDM 信号调制识别。考虑到水声信道复杂传播特性对循环前缀相关性的影响,本文提出了通过截取信号前后片段并迭代搜索双相关峰进行无需先验知识的水声 OFDM 通信信号特征参数提取。

但是,与无线信道相比,在水声信道恶劣传输条件下特征参数往往呈现出严重的不稳定性、随机性;同时,海洋背景噪声具有非高斯、非平稳特性,对识别器的性能提出了更高的要求。支持向量机(SVM)可自动寻找那些对分类有较好区分能力的支持向量,能够较好地解决了小样本、非线性、高维数、局部极小点等实际问题,成为求解模式识别问题的有效工具。

考虑到以上几点,为了抵抗水声信道特性的影响,结合信号谱分析、循环前缀特性及 SVM 识别器的优点,本文进行了非合作水声通信信号调制识别的技术研究,最后设计实现了水声通信信号调制识别的软件和硬件系统。

本文的主要工作如下:

- 1、介绍了常用的水声通信信号及信号特征参数的提取,分析了水声信道特

性对水声通信信号特征提取的影响,确定采用信号谱分析和循环前缀特性的特征提取方案。

2、介绍了 SVM 识别器基本原理,研究了 SVM 识别器在水声通信信号调制类型识别中的应用。并通过实验验证性能,与传统神经网络识别器相比,本文采用的最小二乘支持向量机(LS-SVM)识别器识别率高,且对不同水声信道具有较好的稳健性。

3、在上述工作的基础上,基于 MATLAB 的图形用户界面开发程序 GUI 和基于 STM32F407 嵌入式处理器,进行了水声通信信号调制类型识别的软件和硬件系统实现,并通过海试数据初步验证了系统性能。

关键词: 水声通信信号; 调制识别; 特征提取; 最小二乘支持向量机; 系统实现

Abstract

With rapid development of ocean exploitation, maritime rights protection and other marine information acquiring and processing related fields, the modulation recognition of underwater acoustic communication has become an important research topic. At present, the modulation recognition method of commonly used communication signal in wireless field, such as based on instantaneous features, based on wavelet transform method, based on signal spectrum correlation method, generally need to obtain one or more modulation parameters as prior knowledge (such as accurate carrier frequency, initial phase and the symbol rate). However, due to the harsh underwater acoustic channel with narrow-band, high-noise, multipath effect and Doppler shift characteristics, the priori knowledge is extremely difficultly to get when the underwater acoustic signal modulation pattern is unknown. Therefore, the automatic recognition of non-cooperative underwater acoustic communication signals is very challenging.

It has been recognized that the spectra and square spectrum of the signal reflect the characteristics of MFSK, BPSK and QPSK modulation, which can be used as the characteristic parameter of modulation recognition. The cyclic prefix is a significant feature of OFDM signal, and the replication of some useful signal, it is highly correlated with the useful signals. In addition, owing to the single carrier signal transmission symbols independent and identically distributed, there will be a correlation peak when they are aligned at time. So, according to this characteristic, OFDM signals can be identified from non-OFDM signals. Considering the correlation characteristics of the cyclic prefix (CP) at the presence of the doubly selective underwater acoustic channels, an iterative dual-peak searching strategy is proposed to extract the CP correlation peak feature, that do not need any prior knowledge, for the modulation recognition of OFDM signals.

However, compared with the radio channel, characteristic parameters often exhibit severe instability, randomness in the harsh underwater acoustic channel

transmission conditions; at the same time, the ocean background noise has a non-Gaussian, non-stationary characteristics, proposed higher requirements for the performance of recognizer. Support vector machine (SVM) can automatically find those support vector ,which have better ability to distinguish between the classification, it can solve the practical problems of small sample, nonlinear, high dimension and local minima, become effective tool to solve pattern recognition problem.

The main contributions of this paper are as follows:

1. Describes the extraction of common underwater acoustic communication signals and signal characteristic parameters, analyzes the underwater acoustic channel characteristics influence of underwater acoustic communication signal feature extraction, and determine the use of spectrum analysis and signal characteristics of the cyclic prefix as feature extraction scheme.

2. This paper introduces the basic principle of SVM, and studies the application of SVM identifier in the modulation recognition of underwater acoustic communication signals. Compared with the traditional neural network classifier, the recognition rate of the least square support vector machine (LS-SVM) is higher, and it has good robustness to different underwater acoustic channels.

3. Based on the above investigation, hardware and software implementation of underwater acoustic communication signal modulation recognition was carried out on Graphical User Interface program (GUI) of MATLAB, and STM32F407 embedded processor, with which the performance of system implementation was verified by sea trial experiment.

Key Words: underwater acoustic communication signal; modulation recognition; feature extraction, least-squares support vector machine; system implementation.

第一章 绪论

1.1 论文研究背景及意义

在整个地球表面积中，海洋面积约占 71%，而海洋中的资源非常丰富，过去因技术限制使得海洋资源开采缓慢。但如今随着技术的发展，海洋资源开采技术也得到迅速发展，现今海洋资源已成为各国资源争夺的焦点之一。所以，对海洋资源的开采与合理监测等技术已经成为当代技术的重要部分。

水声通信是水声信号处理与通信技术的交叉学科，对水声通信的研究不仅需要综合电子信息技术、数字信号处理，同时还需要声学、物理和海洋等学科的技术知识。随着人类对海洋资源的渴望以及军事作战的实际需要，水声通信凸显了其重要价值，适用范围有了相当大的扩展。民用方面，如水下语音通信、工业用海岸遥测、水下机器人和海上平台的遥控指令传送、海底勘探数据与图像的传输、水文站的采集数据的传输、环境系统中的污染监测数据等等，使得水下通信的需求大为增加，水下通信商用价值凸现。军事应用方面，建立水下数据通信系统在于解决水雷遥控、潜艇之间、母舰与潜艇或其它水下无人作战平台传输获取的战场信息问题，如情报信息、图像、战场态势等，水下通信的重要性更是不言自明。

随着海洋开发、海洋权益维护、国防安全等领域信息获取和处理需求的不断提升，对水声通信信号的调制样式的自动识别研究成为重要的研究课题。调制识别在军事应用中历来都占据着重要的地位。水声通信电子战或信息战经常需要设计截获接收机来监视战场的电磁频谱活动，进行威胁识别，帮助选择电子干扰策略，直至截获敌方的有用军事情报。在截获接收机的设计中，获得接收通信信号的调制方式，是截获接收机的重要功能之一。它为解调器正确选择解调算法提供参数依据，最终获得有用的情报信息^[1]。此外，调制识别技术还有助于电子战最佳干扰样式或干扰抵消算法的选择，以保证友方通信，同时抑制和破坏敌方通信，实现水下电子战对抗的目的。

与无线电信道相比，水声信道是个非常复杂的信道，水声通信信号的传输不仅取决于海水的温度、海水的边界、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^[2]。水声信道是一个时-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。水声信道还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^[3]。水声信道可以描述成双重扩展信道：时间扩展和空间扩展。时间扩展会引起多径效应，而空间扩展则引起多普勒频移，双重扩展引起时间选择性衰落和频率选择性衰落^[4]。同时，海洋中存在由于潮汐波浪引起的噪声、人工噪声、船舶舰艇噪声、生物噪声等。因此，具有窄带宽、高噪声、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调制识别技术提出很高的要求^[5]。

一般来说，水声通信信号的调制识别是一项极具挑战性的任务，特别是在非协作通信环境中，不仅会受到水声信道的时变特性、多径传播、频率选择性衰落的影响，而且发送信号的任何先验信息都是无法获取的。水声通信调制方式识别研究的目的就是要在先验条件不足的情况下，在多种调制信号传输的背景下，以及在水声信道恶劣的环境下正确的识别出通信信号的调制类型，并判断提供下一步信号处理需要的信号信息。在这个背景下开展本课题的研究，切合实际，具有相当高的实用价值。

1.2 信号调制识别的基本方法及研究现状

早期的信号调制方式确定与识别，基本上是靠人工识别的方法，即由通信操作员借助示波器、频谱仪、语图仪、各种解调器等。操作人员首先要对各种调制方式信号的特征进行掌握。这些特征包括可以听到的特殊声音、可以看到的图形或可以提取出的其它参数^[6]。比如：等幅报信号的时域波形是断续的，可以在差拍后听到断续的声音。移频报信号的时域波形是连续的，频谱是幅度相等的有一定距离的谱线，在低频可以听到不同的音响。操作人员根据这些特征来判断通信信号的调制分类，操作人员的个人经验在判断过程中起着重要作用，而凭借操作经验进行分析判断已经表现出速度慢、准确性差，完全不能适应现代电子战争和当代信息时代的需要。

20 世纪 80 年代中期以来，随着军事和民用通信技术的迅速发展，信号的调制方式变得多样化起来。仅靠操作员的个人经验不能满足要求了，而自动调制识别技术不仅可以克服人工参与识别遇到的各种困难，且对信道带来的各种干扰因素具有较强鲁棒性。

调制方式自动识别的研究到今已经有几十年的研究历史，1969年4月，C.S.Waver等四名作者在斯坦福大学技术报告上发表了第一篇研究调制方式自动识别的论文《采用模式识别技术实现调制类型的自动分类》。此后，不断有研究调制识别器的文献出现，国内外学者发表了不少优秀的相关文献，但目前对于信号的调制方式的识别还缺少一个统一框架，采用的方法也各式各样，可以说是百家争鸣。从现有文献来看，数字信号调制识别采用的方法有：基于统计模式识别的方法和基于似然比理论的方法。

1.2.1 基于决策理论的最大似然估计方法

基于似然比理论的方法采用的最多的是最大似然比方法^[7,8]，识别过程大致为：首先通过对信号的似然函数进行处理，得到用于分类的充分统计量；然后与一个合适的门限进行比较，判决后完成调制方式的识别。其通常将分类看作一个多重假设测试问题，设 H_i 为 N 个可能的调制类型中的第 i 个调制类型的假设检验，常用的最大似然识别框图如下^[8,9]：

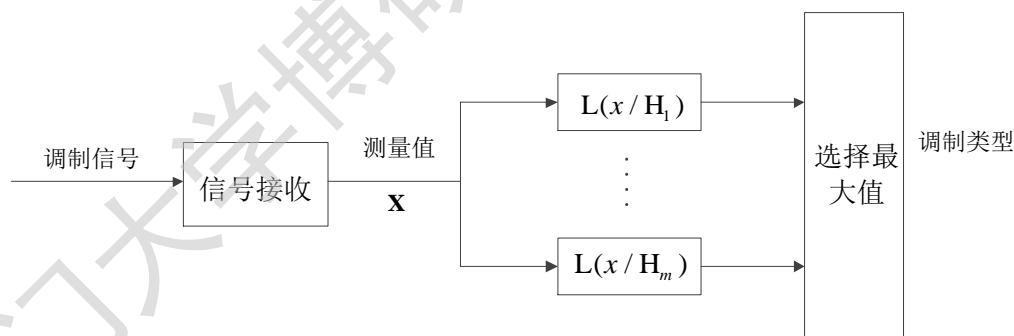


图 1.1 常用的最大似然识别框图

Fig.1.1 Block diagram of maximum likelihood identification

图中的 $L(x/H_i)$ 为似然函数，当 $L(x/H_i) > L(x/H_j), j \neq i, j = 1, 2, \dots, m$ 时，该似然比分类器将识别为 m 种调制类型中的第 i 种调制。根据似然比函数中参数的处理方式可以将似然比的检测方法分为：平均似然比检测(ALRT)，广义似然比检测(GLRT)和混合似然比检测(HLRT)方法三类。下边分别进行简要的介绍^[10]。

1、平均似然比检测方法^[11]

平均似然比检测方法把未知信号和信道参数均被看成已知概率密度函数的随机变量。当星座点数和数据长度比较大时,可能导致计算量增大,Beidas 等人对似然函数的构造方法进行了改进,利用信号的高阶相关作为 MFSK 信号的似然函数的近似^[12,13],而 Long 等人则将似然函数进行级数展开后,取其主要项作为近似,对 QAM 信号的识别也取得了很好的效果^[14]。这类近似的平均似然比检测被称为准 ALRT(quasi-ALRT)。

2、广义似然比检测方法

与 ALRT 不同的是,广义似然比检测方法将未知的参量建模为确定的变量,而未知变量和似然比考虑这些参数的最大化。因为 GLRT 不需要对信号和信道作任何的假设,所以 GLRT 比 ALRT 的应用场合更为广泛^[15]。在处理过程中,广义似然比检测方法对未知参数进行了最大似然估计,而在后续的信号参数估计中可以继续利用这些结果,因此在需要估计信号参数的场合, GLRT 更为适用。

3、混合似然比检测方法

混合似然比检测方法是前两种方法的结合。这种方法将未知参量分为两个子集,子集中未知参量假设为随机变量,利用 ALRT 的方法对其 PDF 求平均;而另一个子集则建模成确知变量,按照 GLRT 的方法求其最大似然估计值。HLRT 在解决星座图嵌套问题中有较好的应用^[16]。

在理论上,基于决策理论的识别方法达到了识别性能的上限,保证了在贝叶斯误判代价最小准则下识别结果的最优性,而且通过理论分析可以得到分类性能曲线。同时,由于它考虑了噪声的影响,所以具有较好的抗噪性能。基于似然比的决策理论方法的判决通常很简单并且在理论上识别结果是最优的,但该类方法通常是针对某类具体调制信号的统计特性进行分析而得到某种判决准则,因而根据某类信号选定的似然比函数只适用于该类调制信号的识别,如果要同时对多种调制类型的信号进行识别,则识别性能不是很好。决策函数的计算复杂度也会急剧增加。

1.2.2 水声通信信号调制特征提取

特征提取是统计模式识别方法的关键,也是后续分类器设计的基础。相对于基于最大似然比的决策理论方法而言,模式识别方法判决规则更为复杂,但它可

以不需要先验条件，并且随着调制种类的增加，特征参数的提取的计算复杂度不会增加太多。因此基于统计模式识别的方法在调制方式识别方面得到广泛的应用。但由于水声信道多径干扰强烈、时间稳定性差，具有典型的时-空-频域非平稳特性，也对信号特征参数的提取提出了更高的要求。

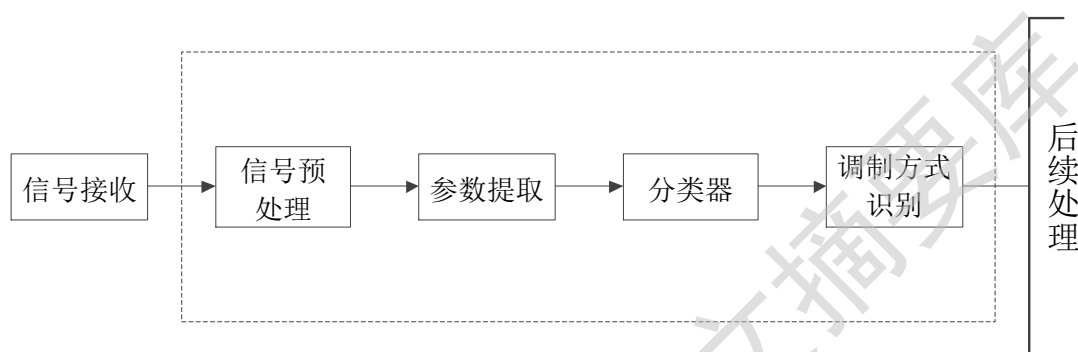


图 1.2 信号调制识别框图

Fig.1.2 Block diagram of signal modulation recognition

在接收机中基于统计模式的信号调制识别框图如下 1.2 所示，图 1.2 中虚线部分为统计模式识别方法的基本过程。常用的分类特征统计理论方法大致可以分为以下几种：

1、瞬时参数特征^[17,18]

通信信号的调制信息包含在信号的幅度、相位和频率中，通信信号各阶统计量可以直接反应信号的调制方式。信号的瞬时特征主要包括信号的瞬时幅度、瞬时相位和瞬时频率，在最早的时候瞬时特征被用来识别模拟信号。在 20 世纪 90 年代，E.E.Azzouz 和 A.k.Nandi 先后提出了 7 个基于瞬时特征参量(瞬时频率、瞬时幅度、瞬时相位)的参数用来区分 9 种数字调制信号。近期国内外也有相关的文献发表，但大部分都是在 A.k.Nandi 和 E.E.Azzouz 的参数上进行改进或优化。利用瞬时特征进行信号识别的优点在于算法简单，计算量小，识别类型多。但其缺点也是显而易见的，由于这几个参数多是在信号的时域进行提取，对于水声通信信号，由于水声信道的时-空-频变恶劣环境的影响，识别正确率很低。

2、高阶统计量特征^[19,20]

高阶累积量及高阶谱分析技术是一种现代的信号处理技术。高阶统计量是指

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts 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.