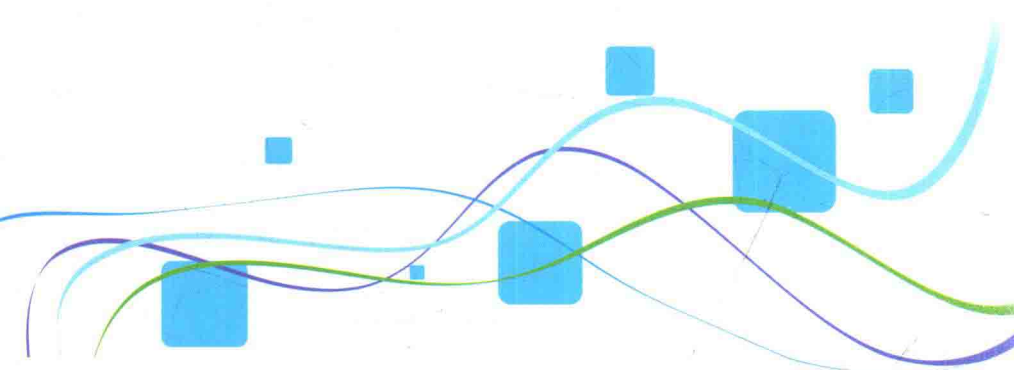




Time-Frequency
Analysis and Blind Signal Processing

时频分析与盲信号处理

■ 高 勇 著



国防工业出版社

ational Defense Industry Press

时频分析与盲信号处理

高 勇 著

國防工業出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书系统地阐述了盲信号处理的主要需求和内容,介绍了二维信号经时频变换成三维空间后新型时频特征曲线的提取方法、物理内涵以及这些曲线形态与信号幅度、频率、相位调制特征的映射关系,并重点介绍了利用这些新型特征曲线进行特征参数估计、调制识别、符号同步、符号识别的具体方法。

本书既可以作为高等院校相关专业高年级本科生和研究生的教材,也可作为从事雷达、通信等盲信号处理的工程技术人员、科研工作者的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

时频分析与盲信号处理/高勇著. —北京:国防工业出版社,2017.1

ISBN 978-7-118-10740-1

I. ①时… II. ①高… III. ①标准时间频率发布—研究 ②盲信号处理—研究 IV. ①P127.1 ②TN911.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 258517 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 880×1230 1/32 印张 8 $\frac{1}{2}$ 字数 228 千字

2017 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 86.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

在深空自主无线电通信、电子侦察等领域,针对非合作信号的盲处理时,需要在无先验信息条件下,完成信号的检测、调制类型识别、特征参数估计,以及数字信号的符号同步、盲解调等处理,有些情况下,还需要通过对特征参数特异性的判决,实现目标个体识别,这些都对盲信号处理的理论与技术提出了新的更高的要求。

时频分析方法是一种新兴的信号处理方法,它能够将二维的信号变换到时、频、幅三维空间,并且二维信号中的幅度、频率、相位等调制特征都能够在时、频、幅三维空间分布上找到相应的映射关系。因此,时频分析方法在盲信号处理领域有非常广阔的应用前景。

本书主要针对从事雷达、通信信号处理的工程技术人员,以及高等院校电子工程、信号与信息处理等专业的高年级本科生和研究生,重点介绍时频分析方法在盲信号处理中的应用,特别是基于提出的新的时频特征曲线开展了特征参数估计、信号自动识别等相关内容研究,希望能对他们有所帮助。

本书共分 10 章。

第 1 章绪论,综述了盲信号处理的基本需求、主要内容、技术特点以及发展现状;回顾了时频分析方法的发展历程,介绍了时频分析方法的分类,以及各类时频分析方法的特点;结合盲信号处理需求,通过分析提出了采用的时频分析类型,并介绍了本书基本研究内容。

第 2 章新型时频特征曲线及提取方法,根据对幅度、频率、相位的检测性的比较,选定了时频分析的基函数;介绍了传统时频脊基本概念和时频脊线的提取方法;从盲信号调制物理量表达为出发点,研究提出了载频时频特征曲线、时频脊系数曲线、时频差值脊

线、频率维特征曲线等新型时频特征曲线,介绍了这些新型特征曲线的基本概念、提取方法和所表达的物理内涵。

第3章典型信号时频特征曲线形态分析,介绍了目前盲信号处理中11种典型信号类型及其数学表达式;从公式推导和信号仿真两个角度,分析了11种典型信号的新型时频特征曲线以及时频脊线的特征形态;最后总结了各特征曲线的形状类型,为后续盲信号处理奠定了基础。

第4章基于时频特征的调制参数估计,根据典型信号调制参数分布及变化规律与各类特征曲线形态之间的内在联系,选取与调制物理量相对应的特征曲线进行调制参数估计和符号同步处理,确保具有相对最优的估计性能。

第5章基于时频特征的调制识别特征提取,基于建立的可人工观察的各调制类型信号的特征曲线空间,利用特征曲线形态与典型信号调制参数之间的映射关系,设计了时频脊线二等分标准差比值特征、时频脊线概率特征、时频脊系数二等分均值比值法、时频脊系数曲线方差特征、时频特征曲线符号率特征、短时频率极小极大特征、时频特征聚类特征等新的机器可识别的调制识别特征体系。

第6章调制识别分类器设计,首先从模式识别角度,分别介绍了贝叶斯理论的假设检验和判决准则,以及识别树分类器、支持向量机分类器和混合分类器等,并分别利用第5章提出的调制识别特征和第3章提出的特征曲线进行了调制类型识别仿真和评估。

第7章基于时频特征的数字信号盲解调,利用相应时频特征曲线所表达的物理特征,提出了ASK、CPFSK/FSK、PSK等信号的符号识别方法,进行了常规条件以及存在多普勒扩散等条件下的模拟仿真,并与理论解调性能进行了比较分析。

第8章辐射源个体识别特征提取,开展了基于时频特征曲线为主的个体识别技术研究,重点介绍了辐射源个体识别特征产生根源及特点,介绍了辐射源暂态响应特征、稳态响应特征、非线性非高斯特征以及辐射源机械扫描特征的提取方法。

第9章基于迭代结构的时频函数快速算法,主要从提高时频处

理效率角度,利用指数遗忘分布能够进行迭代运算的特点,研究了morlet小波变换和短时傅里叶变换的窗口函数设计及其相应的迭代运算算法;针对小波变换的相容性条件,提出了相应的时频窗口参数设置方法。

第10章过采样数据的压缩技术,为解决高采样率与数据存储、传输、处理效率之间矛盾,介绍了两种数据压缩方法:一种为过采样信号的抽取技术;另一种为数据压缩和重构技术。

本书是作者在清华大学博士论文的基础上,结合长期工作实践编写而成的。本书所提出的新型时频特征曲线和调制识别特征等创新性成果,离不开博士生导师陆建华院士以及指导老师黄振副研究员的严格要求和精心指导,涉及的辐射源个体识别技术部分内容也包含了同事宋家乾助理研究员的辛勤劳动,数据压缩与重构内容部分采用了王莹桂博士的研究成果。另外,本书撰写过程中,刘必臻工程师、刘冰雁研究实习员在编排、校订等方面做了大量的工作,在此一并表示感谢。

为便于理解,本书在编写过程中既注重基本理论、基本概念和基本方法的阐述,又力求数学推导与数据仿真的统一。但是,由于著者水平有限,书中不可避免还存在一些疏漏和错误,恳请广大读者批评指正。

高勇

2016年10月

第1章 绪论	1
1.1 盲信号处理背景与需求	1
1.1.1 盲信号处理背景	1
1.1.2 盲信号处理基本内容	2
1.2 盲信号处理现状	3
1.2.1 特征参数估计研究现状	3
1.2.2 调制识别研究现状	4
1.2.3 符号识别研究现状	6
1.2.4 辐射源个体识别现状	6
1.3 时频分析方法发展历程与分类	8
1.3.1 时频分析方法的基本发展历程	8
1.3.2 时频分析方法的分类与基本特点	9
1.4 基本研究方法和内容	11
1.4.1 基本研究方法	11
1.4.2 基本研究内容	12
第2章 新型时频特征曲线及提取方法	14
2.1 引言	14
2.2 时频变换与时频函数选取	14
2.3 传统时频脊线及提取方法	21
2.4 载频时频曲线及提取方法	26
2.5 时频差值脊线及提取方法	28
2.6 时频脊系数曲线及提取方法	30

2.7 其他时频曲线及提取方法	32
2.8 本章小结	33

第3章 典型信号时频特征曲线形态分析

3.1 引言	34
3.2 典型信号的表达方式	34
3.3 典型信号时频脊线特征	41
3.4 典型信号载频时频曲线特征	50
3.5 典型信号时频脊系数曲线特征	60
3.6 典型信号零中频相位曲线特征	66
3.7 典型信号频谱冲激响应特征	73
3.8 典型信号短时频谱曲线特征	81
3.9 本章小结	85

第4章 基于时频特征的调制参数估计

4.1 引言	87
4.2 基于时频特征曲线的载频估计	87
4.3 基于时频特征的符号率估计和符号同步	89
4.3.1 不同曲线形状的符号率估计	89
4.3.2 数字信号符号同步及符号率修正	92
4.4 相位调制信号符号率估计	94
4.4.1 符号率估计算法	94
4.4.2 性能仿真及分析	97
4.4.3 结论	101
4.5 频率调制信号符号率估计	101
4.5.1 符号率估计算法	101
4.5.2 性能仿真及分析	103
4.5.3 结论	108
4.6 幅度调制信号符号率估计	108
4.6.1 符号率估计算法	108

4.6.2	性能仿真与分析	109
4.7	幅相调制信号符号率估计	112
4.7.1	符号率估计算法	112
4.7.2	性能仿真与分析	112
4.8	本章小结	113

第5章 基于时频特征的调制识别特征提取 115

5.1	引言	115
5.2	时频脊线二等分标准差比值特征	116
5.3	时频脊线 $[-\varepsilon, \varepsilon]$ 概率特征	118
5.4	时频脊系数曲线二等分均值比值特征	120
5.5	时频脊系数曲线方差特征	122
5.6	时频特征曲线符号率特征	124
5.7	短时频谱曲线极小、极大值特征	126
5.8	时频值聚类特征	127
5.9	其他调制识别特征	128
5.9.1	信号频谱特征	128
5.9.2	平方律特征	129
5.10	本章小结	129

第6章 调制识别分类器设计 131

6.1	引言	131
6.2	基于贝叶斯理论的调制识别	131
6.2.1	假设检验	131
6.2.2	最小错误概率准则	132
6.2.3	最小风险判决准则	134
6.2.4	信噪比对概率密度影响	135
6.3	基于识别树的自动识别方法	139
6.3.1	基本概念	139
6.3.2	分类树的建立	141

6.3.3	分类树的剪枝	142
6.3.4	数字信号识别树设计	143
6.4	基于支持向量机的自动识别方法	145
6.4.1	基本概念	145
6.4.2	核函数	146
6.4.3	多类 SVM	147
6.4.4	SVM 训练与识别	148
6.5	基于混合方法的自动识别方法	149
6.5.1	混合分类器种类	149
6.5.2	SVM 后接分类树	150
6.5.3	基于 SVM 的分类树	150
6.6	盲信号调制识别仿真	151
6.6.1	基于识别树的通信数字信号调制识别性能仿真	151
6.6.2	基于支持向量机的雷达信号调制识别性能仿真	156
6.7	本章小结	158

第7章 基于时频特征的数字信号盲解调 159

7.1	引言	159
7.2	相位调制信号解调盲算法	159
7.3	频率调制信号盲解调算法	162
7.4	幅度调制信号盲解调算法	163
7.5	性能仿真与分析	163
7.6	本章小结	170

第8章 辐射源个体识别特征提取 171

8.1	引言	171
8.2	个体识别特征产生根源及表现	172
8.2.1	个体识别特征产生的根源及表现	172
8.2.2	个体识别特征的原则和条件	173
8.3	辐射源信号暂态响应特征	174

8.3.1	暂态响应特征及其表征	174
8.3.2	暂态响应包络提取	175
8.3.3	暂态响应特征提取	177
8.4	辐射源信号的稳态特征	179
8.4.1	包络稳态特征	180
8.4.2	瞬时相位特征	180
8.4.3	瞬时频率特征	181
8.4.4	信道倒谱特征	182
8.4.5	包络分形特征	184
8.5	辐射源信号的非线性、非高斯等特征	185
8.5.1	信号包络高阶矩 J 特征	185
8.5.2	信号包络的峰度特征提取技术	186
8.6	机械扫描雷达扫描周期特征	187
8.6.1	圆周扫描雷达的扫描周期特征	187
8.6.2	圆周扫描雷达扫描周期的计算	188
8.7	本章小结	190
第9章 基于迭代结构的时频函数快速算法		192
9.1	引言	192
9.2	指数遗忘分布及其快速算法	193
9.3	基于指数结构的小波函数快速算法	193
9.3.1	余弦型窗函数及其快速算法	194
9.3.2	升余弦型窗函数及其快速算法	195
9.3.3	双指数型窗函数及其快速算法	197
9.4	相容性条件与小波函数参数设置	198
9.4.1	余弦型窗函数小波	198
9.4.2	升余弦型窗函数小波	199
9.4.3	双指数型窗函数小波	200
9.4.4	高斯型窗函数小波	200
9.5	性能比较仿真与运算复杂度分析	200
9.5.1	PSK 信号符号率估计性能仿真	201

9.5.2	DPSK 信号盲解调性能仿真	202
9.5.3	运算量和性能比较分析	202
9.6	本章小结	205
第 10 章	过采样信号的压缩技术	206
10.1	引言	206
10.2	采样信号的抽取	207
10.3	压缩重构技术概述	208
10.3.1	采样信号的压缩重构	209
10.3.2	采样信号的多任务压缩重构	211
10.4	一般性采样信号的多任务压缩重构	211
10.4.1	先验信息共享模型	212
10.4.2	基于拉普拉斯先验的多任务重构算法	216
10.4.3	降低参数维数的多任务重构算法	219
10.5	仿真实验与分析	227
10.5.1	采样信号的抽取算法仿真	227
10.5.2	一般性稀疏信号的多任务重构算法仿真	228
10.6	本章小结	234
参考文献		235

第 1 章

绪 论

本章首先介绍盲信号处理的需求背景、处理内容,以及各类盲信号处理的技术现状;其次介绍时频分析方法的主要发展历程,探讨各类时频分析方法主要特点;最后介绍本书主要技术思路。

1.1 盲信号处理背景与需求

盲信号处理,顾名思义,就是在没有先验信息条件下的信号处理。这种处理方式,在现实中有着巨大的需求,主要体现在以深空通信领域为代表的自主无线电技术,以及对非合作雷达、通信等目标信号进行接收和处理的电子侦察技术。

1.1.1 盲信号处理背景

1. 自主无线电

自主无线电是由美国 NASA 首先提出来的,其背景是深空探测存在着无法回避的难题:深空探测器进行跨代组网,以及不同国家、不同部门进行相互合作时,各探测器无线通信手段所使用的技术规范不同,如数据速率、通信协议以及调制类型。

为解决这个问题,美国 NASA 于 2004 年提出了“自主无线电”新技术。这种技术无需人工介入,具有自主处理能力,只需要在仅具有很少先验信息条件下,自动完成信号特征参数提取、调制类型识别、符号同步、盲解调、盲解码等过程,实现与未知通信系统的通信,从而提高无线电通信性能,降低运行成本。

这种发源于深空通信的自主无线电技术,在低轨卫星通信上也具有广阔的应用前景。低轨卫星由于具有距离近、信号传播空间损耗小、测量参数精度高等优点,广泛应用于资源探测、气象、组网通信、光学成像、雷达成像、电子侦察、载人航天、科学实验等。如何将这些不同技术体制的卫星组成空间信息网络进行统一管理,以提高运行效率并降低运行成本,已成为航天领域的一个重要发展趋势,而自主无线电技术在卫星组网过程中能够发挥出巨大作用。

2. 电子侦察

电子侦察是使用专门的电子技术设备进行无源侦察,获取敌人军事情报的一种重要手段,包括无线电技术侦察、雷达侦察、测控信号侦察等。主要任务是侦察、侦听对方雷达、无线电通信、测控、敌我识别、导弹制导等电子设备所发射的信号,获取其技术参数、通信内容、所在位置等信息,以掌握对方辐射源的技术特征、威胁程度和兵力部署变动等情报。

电子侦察相比较雷达探测和光学侦察,具有隐蔽性和瞬时覆盖范围大等特点,已成为掌握对手情报的一个重要来源。

电子侦察在军事上主要用于电子对抗的电子情报支援和情报侦察等,在民用上可用于无线电管理、频谱监测、交通管制、航海航空救援等诸多领域。

1.1.2 盲信号处理基本内容

由盲信号处理定义出发,盲信号处理就是在不知道无线电信号发射时间、频率、方向、信号体制等信息下,对截获的信号进行分析,为信号反演进行处理的过程。

对于通信侦察信号来说,盲信号处理需要完成载频估计、调制类型识别、符号率估计、符号同步、盲解调、盲解码、协议分析等,对发射源身份估计和确认;从而获取信号所“隐藏”信息,对通信内容进行监听。

对于雷达侦察,盲信号处理需要完成信号分选、参数估计、定位处理、目标识别等处理过程,判断辐射源的威胁等级,为相关单元提供信息支援。

1.2 盲信号处理现状

1.2.1 特征参数估计研究现状

在盲信号处理中,符号率是对信号进行识别和解调的必要条件。

R. J. Mammone 等在研究 CW、BPSK 和 QPSK 信号调制类型识别问题时,就讨论了 PSK 信号符号率估计问题,其对符号率的估计是通过瞬时幅度进行统计得到的。B. S. Koh 等提出利用信号的包络经过傅里叶变换后提取波特率,这种方法与直接利用幅度信息估计符号率相比,在鲁棒性方面有了一定的提高,但该方法只能适应带限 PSK 信号和 QAM 信号,且抗噪性能不好。

文献[22,23]利用数字信号循环平稳特性与符号周期之间的关系,利用相同循环频率不同延时的循环自相关来构成特征向量,选择合适的循环频率区间,通过使该特征向量的范数最大化来搜索符号率;当特征向量的维数足够大时,该方法能够快速收敛,但它运算量太大,难以实用。

自 K. C. Ho 在文献[24]中提出利用 haar 小波变换进行符号率估计的算法以来,出现了很多基于小波变换的符号率估计算法研究。文献[25]针对文献[24]只利用单一固定尺度因子进行小波变换,只能适应特定的归一化载频信号的问题进行了改进:利用多个因子得到小波变换系数估计符号率。该方法虽然能够适应更大范围的归一化载频信号,但没有从根本上克服文献[24]的缺陷,这种采用固定尺度因子的方法忽略了信号频谱分布与小波时频特性之间的关系。文献[26-28]提出将信号变频到零中频后估计信号带宽,根据信号带宽确定小波变换的尺度并进行 haar 小波变换。这种方法虽然回避了文献[24,25]的问题,但引入了新的问题:需要对信号的载频和带宽进行精确的估计,当存在载频频偏时,估计性能迅速下降,稳定性差。此外,文献[22-28]中的方法在低信噪比条件下估计性能迅速恶化。

1.2.2 调制识别研究现状

对接收到信号调制类型的识别是盲信号处理的重要内容。对深空通信来说,信号调制类型识别是进行后续处理、实现自主通信的重要前提;对雷达信号而言,脉内调制类型及其调制参数是描述雷达的重要特征,也是进行目标识别的重要依据。正因为如此,调制识别一直是信号处理的一个热点问题,国内外很多学者针对这个问题做了大量的研究工作,并且发表了大量的研究成果。归纳起来,这些方法大致可以分为如下两类:决策论识别方法和统计模式识别方法。

1. 决策论识别方法

决策论识别方法是采用概率论和贝叶斯理论来进行信号识别的。它根据信号的统计特性,通过理论分析得到检验统计量后,与一个合适的参考门限进行比较,形成判决准则。检验统计量通常是基于使损耗函数最小化原则选取的。

1990年,A. Ploymoms 和 Kim 等提出了基于准对数似然比的识别方法,在高斯噪声环境下,得到准对数似然函数以区分 MPSK 信号,在信噪比大于零时,有较好的识别效果。Boiteau 等和 W. Wei 等分别在 1998 年和 2000 年提出了最大似然分类算法,通过信号的似然函数最大化实现对信号的分类。

在数字通带调制信号的调制识别研究中,还陆续出现了一些新的特征统计量及其构造方法,其中包括 MPSK 信号统计矩测量、MPSK 与 MQAM 信号调制星座图及其最大似然估计、MFSK 的高阶相关以及信号的归一化振幅等特征量。

利用判决理论识别的方法最早有基于相位识别方法和平方律识别法等,这两种方法都能够对 BPSK 和 QPSK 信号进行识别。基于相位识别方法能够直观地利用调制相位的不同,对信号相位差分获得检验量,实现相位调制信号的识别。平方律识别法是将收到的信号进行平方运算,经过平方后 BPSK 信号成为 CW 信号,QPSK 信号则变成 BPSK 信号,信号的频谱分布也会发生相应的变化,据此可识别出两种信号。这两种方法运算简单,易于实现,但是只能识别 BPSK 和 QPSK 信号,可识别的种类太少。

2. 统计模式识别方法

基于统计模式识别的方法包括两个步骤:一是对信号特征进行统计,构造信号的特征统计量,并针对具体的调制类型进行特征参数统计并统计结果,然后划分调制识别的门限;二是根据制定的准则,提取待识别信号的特征量并与识别门限进行比较,对调制类别作出判决。

在信号调制自动识别中,有很多参数可以作为识别的特征统计量,相应地,也有很多方法用于特征统计量的构造。比较常用的特征统计方法包括概率密度函数、能量检测器、信号谱相关分析、信号时频分析以及瞬时频率等。

概率密度函数是一个比较典型的特征统计量构造方法,可通过直方图、Parzen 窗等方法得到。构造的常用参数包括一阶矩特征、二阶中心矩特征、三阶中心矩特征、四阶中心矩特征等。Liedtke 提出的信号幅度、频率、差分相位直方图等用于自动分类的方法也属于概率函数一类,这种方法在信噪比大于 18dB 时能有效识别 2ASK、2FSK、2PSK、4PSK 等信号,抗噪能力较差。

功率谱方法是从观测数据中估计出相关函数,然后对相关函数进行傅里叶变换,就可以得到信号的功率谱。功率谱估计的方法有布莱克曼—图基法、周期图法和平均周期图法等。

在统计模式识别方法中,还有一组比较常用的识别特征,包括零中心归一化瞬时幅度密度最大值、零中心归一化瞬时幅度绝对值的标准偏差、瞬时频率的方差、大小波系数的方差、信号的四阶累计量之比等。

此外,人们还将分形理论、混沌理论、复杂性理论、累积量等技术应用于调制识别,提出了一些新型的调制识别方法。

3. 总结

总体来说,目前关于信号调制类型自动识别的研究,具有两个特点:①大部分算法都只关注某一局部问题,如有的只考虑到 PSK 信号和 QAM 信号的识别,有的只进行 PSK 调制进制的识别,有的进行不同调制类型的识别,缺乏系统性;②这些调制识别方法,采用的特征参数各不相同,如果采用这些方法进行系统的识别,不仅采用的特征参量比较多,而且涉及的数学方法也比较多。

因此,如果要系统性地对盲信号的调制类型进行识别,必须充分考