



复杂信号侦察理论 及应用（上）

刘锋 黄宇 王泽众 张鑫 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

复杂信号侦察理论及应用(上)

刘 锋 黄 宇 王泽众 张 鑫 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是目前国内外系统阐述现代电子对抗复杂信号侦察理论、方法、技术及应用的一部专著,分上下两册出版,其中上册是关于复杂信号的截获与特征提取,下册是关于复杂信号的分选、识别、定位与引导。全书共分 18 章,第 1 章~第 7 章为上册,第 8 章~第 18 章为下册。

本书为上册。第 1 章给出了复杂信号及其截获、分选、识别、定位及引导的定义和初步的理论体系,介绍了其研究现状和发展趋势;第 2 章给出了复杂信号分析与仿真;第 3 章研究了常用时频分析方法对几种典型复杂信号的截获性能;第 4~7 章为复杂信号截获与特征提取部分,重点研究了 LFM 类信号、LFMCW 类信号、编码类信号与复合调制信号的截获与特征提取,分别提出了分数阶傅里叶变换、周期 WHT、周期 FRFT、循环谱估计等方法。

本书可供从事电子对抗、雷达及通信等专业领域科研人员和工程技术人员使用,也可作为高等院校相关专业方向高年级本科生、研究生的专业教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

复杂信号侦察理论及应用(上)/刘锋等著. —北京:科学出版社,2016. 6
ISBN 978-7-03-049167-1

I. ①复… II. ①刘… III. ①信号处理-电子侦察 IV. ①TN971

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 142966 号

责任编辑:孙伯元 霍明亮 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 6 月第一次印刷 印张:30 1/2

字数:573 000

定价:198.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介



刘锋,生于1961年10月,陕西宝鸡人,分别于1982年、1995年及2009年获空军第二炮兵学院学士、西安电子科技大学硕士及北京理工大学博士,本、硕、博攻读的均是电子对抗专业或方向。现任海军航空工程学院电子信息工程系教授、博士生导师。兼任军队电子对抗情报专家组成员、海军信息战专家组成员以及中国声学学会水声分会委员。近四十年来,一直从事电子信息对抗理论及应用、复杂信号侦察理论及应用、综合电子战以及网络对抗等方面的教学与科研工作。曾主持和参加了十余项海军电子对抗装备重点型号的立项、研制、试飞及定型

等审查工作,主持了总装、海军新型电子对抗装备相关科研项目20余项,获军队科技进步奖多项、获国家发明专利多项。发表论文100余篇,其中被SCI、EI检索50余篇。出版著作5部,有4部获不同出版基金资助,其中获国防科技图书出版基金资助1部,获国家科学技术学术著作出版基金资助1部。

黄宇,生于1983年4月,湖南蓝山人,分别于2006年、2009年及2012年获海军航空工程学院电子对抗工程专业学士、电路与系统学科电子对抗方向硕士及信息与通信工程学科电子对抗方向博士。现任海军某电子对抗团工程师。一直从事电子对抗雷达侦察、分数阶傅里叶变换及其在雷达侦察中的应用研究方向的科研工作。参加了总装、海军电子对抗相关科研项目8项。发表论文30余篇,其中被SCI、EI检索10余篇,获国家发明专利2项。

王泽众,生于1983年4月,山东济南人,分别于2005年、2008年及2012年获海军航空工程学院电子对抗工程专业学士、电路与系统学科电子对抗方向硕士及信息与通信工程学科电子对抗方向博士。现任海军装备研究院某研究所工程师。一直从事电子对抗雷达侦察、周期Wigner-Hough变换及其在雷达侦察中的应用研究方向的科研工作。参加了总装、海军电子对抗相关科研项目9项。曾发表论文30余篇,其中被SCI、EI检索10余篇,获国家发明专利2项。

张鑫,生于1981年6月,山东烟台人,分别于2004年、2007年及2011年获海军航空工程学院电子对抗工程专业学士、电路与系统学科电子对抗方向硕士及信息与通信工程学科电子对抗方向博士。现任海军航空工程学院兵器科学与技术

系讲师。一直从事电子信息对抗理论及应用、循环平稳信号处理及其在雷达侦察中应用研究方向的科研工作。参加了总装、海军电子对抗相关科研项目 10 项。曾发表论文 30 余篇,其中被 SCI、EI 检索 10 余篇,获国家发明专利 2 项。

序 一

众所周知,当今世界的战争形态已经发生了根本性的变化,由过去的机械化战争转变为现在的信息化战争,将来决定信息化战争胜负的关键因素是夺取战场信息优势,而获得战场信息优势的主要手段是电子侦察。

今后,电子侦察面临的主要困难是对复杂信号的侦察问题。具体有以下三点。

一是密集复杂电磁环境的适应问题。当前,全球面临的电磁信号环境日趋密集复杂。密集是由于信号密度已由十几年前的每秒几十万脉冲变为现在的每秒几百万脉冲;复杂是由于世界各国竞相发展新体制雷达、通信及声呐等装备,使得信号调制类型越来越多、调制技术越来越复杂。密集造成了一个需大家共同面对的困难,即多信号的分选;复杂导致了一个世界性的难题,即对低截获概率信号的截获与识别。

二是非平稳信号或周期性平稳信号的侦察问题。复杂调制信号属于非平稳信号或周期性平稳信号,对其进行截获、分选、识别、定位及引导需在二维变换域内寻求解决的新方法。另外,复杂信号侦察是对复杂调制信号进行盲处理,属于认知电子战的范畴,目前国际上刚刚开始研究。

三是电子侦察装备的更新换代问题。复杂调制信号截获、分选、识别、定位及引导是制约现代电子情报侦察系统更新换代的瓶颈问题,到目前为止,该问题在国内外现役侦察装备上仍未得到很好的解决。

关于上述问题,无论是在理论研究方面,还是在装备研制方面,国内外均处于起步阶段,众多专家学者和科研人员为此做出了不懈的努力和大量卓有成效的探索,但一直没有一部较为系统地阐述复杂信号侦察理论及应用的著作。刘锋教授及其团队长期致力于复杂信号侦察领域的研究,并始终保持研究的一致性和连续性,在复杂调制信号截获、分选、识别、定位及引导等方面提出了许多新的理论和方法,先后有数十篇论文成体系地发表在国内外 SCI、EI 检索的期刊上,在这一领域形成了广泛的影响。《复杂信号侦察理论及应用》这本专著,是作者及其团队十多年来研究成果的提炼总结。

从国内外同类专著比较上看,该书从截获、分选、识别、定位及引导五个方面系统地研究了复杂调制信号的侦察问题,初步形成了复杂信号侦察理论及应用的理论体系。与 2009 年 Artech House 出版 Phillip 所著的 *Detection and Classifying Low Probability of Intercept Radar* 相比较:一是体系更完整,多了分选、识别、

定位及引导四部分内容;二是方法更新,多了 Wigner-Hough 变换、分数阶傅里叶变换及新提出的周期 Wigner-Hough 变换、周期分数阶傅里叶变换及信号 Chirp 基稀疏分解等;三是逻辑性更强,先对模拟调制类信号,后对数字调制类信号,再对复合调制类信号逐一展开分析处理。

从著述特色与写作水平上看,该书对三大类信号按五部分内容展开分析,结构合理,脉络清晰,思维连贯,语言流畅,图文并茂,可读性强。

该书的学术水平国内领先、国际先进,具有很高的学术价值和应用价值。其出版将填补复杂信号侦察理论及应用研究领域的空白,对我国电子信息对抗学科发展和雷达电子情报侦察装备发展具有积极推动作用,对从事电子对抗装备研制人员有着重要的应用价值。



中国科学院院士
中国工程院院士
2015 年 9 月 25 日

序 二

当今世界爆发局部战争的危机依然存在,各种不安全因素导致的局部冲突此起彼伏。从近几次爆发的局部战争来看,信息对抗对战争的胜负起到了决定性作用,夺取战场信息优势,掌握战场制信息权已成为世界各国的共识。电子侦察是获取战场信息优势的首要手段,是保证电子干扰和电子硬摧毁作战效能充分发挥的前提。

进入 21 世纪以后,世界各国竞相研制新体制雷达、通信及声呐等装备,列装的新体制装备所占比例逐年上升,服役的老体制传统装备所占比例逐年下降。美国的新体制装备更新进度最快,俄罗斯次之,我国也已加快了新体制装备的研制步伐,“十二五”规划、“十三五”规划的投入明显加大。为了适应这一形势的变化,研究对付新体制雷达、通信及声呐等装备的新一代电子侦察系统和电子干扰系统的任务就提上了议事日程。为此,国内许多相关单位的专家学者和科研人员开始了坚持不懈的努力和艰苦卓绝的探索。刘锋教授所领导的研究团队是国内较早开展这一领域研究工作的团队之一,始终坚守这一研究方向,一贯致力于复杂信号截获、分选、识别、定位及引导新理论、新方法及其应用的研究与探索,并努力保持了研究工作的连续性和研究内容的一致性。

《复杂信号侦察理论及应用》这一专著,就是作者及其团队十多年来研究成果的积累与沉淀,并吸收了当今国内外该领域最新研究成果。作者从研究电子侦察的对象入手,对其进行了时域、频域及时频域仿真与分析,将其归纳为 LFM 类、LFMCW 类、编码类及复合类四大类复杂调制信号,分别从截获、分选、识别、定位及引导五个方面逐一对其展开研究,在不同的二维变换域里寻找每一类复杂调制信号所对应的最佳分析方法,立足于电子信息对抗学科电子侦察方向前沿领域,提出了许多新理论和新方法,其研究成果对我国雷达与电子对抗一体化装备发展具有积极的推动作用,对从事电子信息对抗装备研制的科研人员具有重要的应用价值。

该著作在指导思想上具有一定的前瞻性,在理论研究上具有一定的创新性,与国内外同类专著相比,其研究对象新,研究方法新,理论体系完整,学术水平处于国际水平。

张锡祥

中国工程院院士
2015 年 10 月 7 日

序 三

复杂调制信号截获、分选、识别、定位及引导是制约现代电子情报侦察系统更新换代的瓶颈问题,迄今为止,在国内外新的侦察装备研制上仍未得到很好解决。原因是现在的新体制雷达、通信及声呐等装备均采用了复杂调制信号,结果导致了信号的频谱极大地扩展,信号的功率谱密度极大地降低,形成了一种低截获概率信号,造成了电子侦察系统对此类信号截获的困难。另外,对信号进行调制的结果导致了信号的性质发生了根本性改变。若信号不被调制(如载频、重频均固定不变的脉冲信号),其性质属于平稳随机信号,用传统的傅里叶变换方法在一维变换域内寻求解决的方法即可。若信号被调制(如载频或重频均可变的脉冲信号),其性质将变为非平稳随机信号或周期性平稳随机信号,必须在二维变换域内寻找其他的变换方法。而到目前为止,对此类调制信号进行处理的理论体系仍未建立起来,这就是目前电子侦察装备一直不能够处理复杂调制信号的根本原因。

刘锋教授及其团队针对上述复杂信号侦察问题,将复杂信号分为模拟调制类、数字调制类及复合调制类三大类,分别对其从截获、分选、识别、定位及引导五个方面逐一进行了长期的、系统的深入研究,并提出了解决复杂信号侦察问题的许多新理论和新方法。《复杂信号侦察理论及应用》这一著作就是对他们十多年的研究工作所做的系统性总结与提炼,初步形成了复杂信号侦察理论及应用的理论体系。

该著作作者曾主持过多项有关电子对抗研究课题,参加过一系列电子对抗重点型号方案论证和各类审查工作,积累了经验和丰富了理论,使该专著具有理论与实际紧密结合的特点。相信该专著的出版将对我国电子信息对抗学科的发展和电子侦察装备的发展起到积极推动作用。可作为电子对抗领域研究生的教材和科技工作者的参考书。



中国工程院院士
2015年10月9日

前 言

近十年来,战场电磁信号环境日益密集复杂,各类新体制雷达、通信及声呐等装备不断涌现,使得电子情报侦察系统面临的信号调制类型越来越多,调制样式越来越复杂。尤其是对复杂调制信号的截获、分选、识别、定位及引导问题,已经成为制约新一代电子情报侦察系统研制的技术瓶颈。国内外众多学者专家和科研人员为此做出了不懈的努力和探索,并取得了不少研究成果。作者所领导的研究团队是国内较早开展复杂调制信号截获、分选、识别、定位及引导等研究的团队之一。2002年,一次偶然的机会,作者有幸发现了电子侦察系统面对复杂调制信号会出现增批、漏批问题,但一直未能找到很好的解决方法。这件事促使作者最终下决心走向了一个新的研究方向,即“复杂信号侦察理论及应用”。后经深入系统研究,发现这是一个影响侦察系统更新换代的瓶颈,是当前一个世界性的难题,就连西方国家都未能很好解决。从此以后的十多年时间里,作者及其团队将全部精力和时间都集中在复杂信号侦察理论及应用领域,开展了系统深入的研究工作,并努力保持研究的一致性和连续性,始终致力于复杂调制信号截获、分选、识别、定位及引导的新理论与新方法的探索与应用。先后完成多项相关科研项目,获得多项国家发明专利,在国内外被SCI、EI检索的期刊上发表几十篇该领域学术论文。本书是作者及其团队十多年来研究成果的提炼总结,并吸收了国内外相关的最新研究成果,部分研究成果填补了该领域国内空白,初步形成了复杂信号侦察理论及应用的理论体系。

与美国人Phillip所著的*Detection and Classifying Low Probability of Intercept Radar*相比,该书学术思想超前,研究内容全面,研究方法新颖,体系结构完整,注重理论与应用的结合,并含有大量仿真示例。

目前我国电子信息对抗领域缺少一部关于复杂信号侦察理论方面的专著,高等院校缺少一部该方面的教科书,装备研制与生产单位和军队装备管理单位缺少一部该方面的参考书,因此本书的出版对从事相关装备研制与生产的科研人员、工程技术人员及研制监管人员具有重要的参考价值,同时也可作为高校高年级本科生与研究生的参考书或教科书。

全书按复杂信号的截获、分选、识别、定位及引导五个部分展开分析,共18章,第1~7章为上册,第8~18章为下册。

第1章为绪论,介绍复杂信号和全书的内容体系。

第2章为复杂信号分析与仿真,首先对复杂信号进行归纳整理及分类,然后

着重对几种常见的复杂信号分别在时域、频域及时频域进行了分析与仿真,通过对图形的比较和参数的分析得出信号在三个域的特征及其变化规律。

第3章为常用时频分析方法对几种典型复杂信号的截获性能分析。为了明确各类方法与典型复杂信号之间的最佳对应关系,本章重点讨论了各类时频分析方法对几种典型复杂信号截获性能的优劣问题。本章首先研究了六种基本时频分析方法(短时傅里叶变换、小波变换、Wigner-Ville 分布、伪 Wigner-Ville 分布、平滑伪 Wigner-Ville 分布、重排 Wigner-Ville 伪分布)对四种典型的复杂信号(LFM、FMCW、FSK、BPSK)时频变换,并进行了计算机仿真。给出了各种算法的优缺点及适用范围,总结出各类时频分析方法的时频特性,包括能量聚集性、交叉项抑制性、噪声抑制性、运算速度、适用范围等。

第4~7章为信号截获部分,重点研究了 LFM 类信号、LFMCW 类信号、编码类信号及复合信号的截获与特征提取。第4章提出了基于分数阶傅里叶变换的 LFM 类信号的截获与特征提取;第5章分别提出了基于周期 WHT 和周期 FRFT 的 LFMCW 信号截获与特征提取;第6章提出了平均平滑循环周期图的谱估计方法,研究了复杂调制编码信号的循环谱特征检测问题与复杂编码信号的循环谱特征分类问题;第7章提出了分别基于 FRFT、PWHT、FRFT 循环处理的 LFM-BC 信号截获与特征提取。

第8~12章为信号分选部分,重点研究了交叠脉冲、交叠连续波和二者同时存在情况下的信号分离问题,分别采用了 Chirp 基稀疏分解、周期 Wigner-Hough 变换、周期 FRFT 和基于独立成分分析的盲分离方法;第8章提出了基于 Chirp 基分解的时频交叠脉冲信号的分离;第9章提出了基于周期 WHT 的 LFMCW 循环滤波检测与分离算法;第10章提出了基于周期 FRFT 的多分量 LFM 连续波雷达信号分离;第11章提出了基于周期 FRFT 的时频交叠雷达侦察信号分选;第12章提出了基于独立成分分析的时频交叠信号盲分离。

第13、14章为信号识别部分,分别从参数识别和波形识别研究了信号的调制类型识别;第13章提出了在分数阶傅里叶变换域和循环谱域的信号识别方法;第14章提出了复杂调制信号的波形识别方法。

第15章为复杂信号辐射源识别,重点讨论复杂信号识别知识库与侦察数据均不完整情况下的辐射源识别问题,涉及黑板系统、遗传算法以及非精确推理等方法。

第16章为复杂信号辐射源定位,主要分析机载单站无源定位和机载多站无源定位。

第17章为面向复杂信号的干扰引导,主要讨论复杂信号威胁等级评估、干扰资源优化配置及干扰引导辅助决策的问题。

第18章为回顾、建议和展望。

在本书的研究与撰写过程中,曾经得到了我国电子对抗领域创始人之一、电子对抗界元老林象平教授和我国雷达与电子对抗领域著名专家、两院院士、北京理工大学名誉校长王越教授的悉心指导和方向引领,两位前辈曾经的辛勤培养与帮助对本书的完成起到了关键性作用。我国电子对抗领域著名专家张锡祥院士、雷达领域著名专家王小谟院士、陈志杰院士以及陆军研究员的无私指导与帮助,对本书的完成起到了重要的指导作用。曾经或正在海军航空工程学院电子信息工程系信息对抗方向学习的博士生张鑫、徐会法、王泽众、黄宇、钟兆根、向崇文等同志,硕士生韩吉衢、孙大鹏、邹世杰、郑鹏、李笑尘、宦爱奇等同志,结合学位论文对复杂调制信号截获、分选、识别、定位与引导进行了广泛而深入的研究,他们所取得的有关研究成果对完成本书起到了重要的作用。李笑尘、宦爱奇两位同志还分别对本书的有关章节进行了校对和整理,在此一并向他们表示感谢!最后还要感谢国家科学技术学术著作出版基金委员会对本书出版的资助。

由于新体制雷达、通信等技术发展极为迅速,电子情报侦察新理论、新技术日新月异,加上作者的水平有限,书中难免存在不足之处,殷切希望广大读者批评指正。

刘 锋

2016年1月

目 录

上 册

序一

序二

序三

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 复杂信号	2
1.3 复杂信号截获与特征提取研究现状	3
1.4 复杂信号分选与识别研究现状	6
1.4.1 基于脉冲描述字的分选与识别	8
1.4.2 基于时频变换域的分选识别	9
1.5 研究内容	12
参考文献	17
第 2 章 复杂信号特征分析与仿真	24
2.1 引言	24
2.1.1 复杂雷达信号	25
2.1.2 复杂通信信号	29
2.1.3 雷达调制信号分类	31
2.2 脉内线性调频信号的分析与仿真	33
2.2.1 线性调频脉冲信号	33
2.2.2 线性调频连续波	41
2.3 相位编码信号的分析与仿真	47
2.3.1 二相编码信号	47
2.3.2 四相编码信号	49
2.3.3 多相编码信号	50
2.3.4 T1 码、T2 码、T3 码、T4 码分析与仿真	61
2.4 脉内频率编码信号的分析与仿真	66
2.4.1 频率编码脉冲信号	66

2.4.2	频域中的频率编码脉冲信号	68
2.4.3	时频域中的频率编码脉冲信号 FSK	69
2.5	FSK/PSK 信号的分析与仿真	70
2.6	频率-相位编码复合调制信号分析与仿真	72
2.6.1	子脉冲内 LFM 调制-Barker 编码复合信号	72
2.6.2	信号脉宽内 LFM 调制-Barker 编码复合信号	78
2.7	复合线性调频信号分析与仿真	82
2.8	侦察信号环境仿真	84
2.8.1	侦察方程和侦察系统运动模型	85
2.8.2	雷达侦察信号仿真	88
2.9	小结	94
	参考文献	94
第3章	常用时频分析方法对几种典型复杂信号的截获性能分析	96
3.1	引言	96
3.2	短时傅里叶变换	96
3.2.1	信号模型	97
3.2.2	仿真条件	98
3.2.3	STFT 仿真与分析	98
3.3	WVD 仿真与分析	101
3.3.1	不同信噪比下的 LFM 信号的 WVD 时频图	101
3.3.2	不同信噪比下的 FMCW 信号的 WVD 时频图	102
3.3.3	不同信噪比下的 FSK 信号的 WVD 时频图	103
3.3.4	不同信噪比下的 BPSK 信号的 WVD 时频图	103
3.4	伪 Wigner-Ville 分布仿真与分析	104
3.4.1	不同信噪比下的 LFM 信号的 PWVD 时频图	105
3.4.2	不同信噪比下的 FMCW 信号的 PWVD 时频图	105
3.4.3	不同信噪比下的 FSK 信号的 PWVD 时频图	106
3.4.4	不同信噪比下的 BPSK 信号的 PWVD 时频图	107
3.5	平滑伪 Wigner-Ville 分布仿真与分析	107
3.5.1	不同信噪比下的 LFM 信号的 SPWVD 时频图	108
3.5.2	不同信噪比下的 FMCW 信号的 SPWVD 时频图	108
3.5.3	不同信噪比下的 FSK 信号的 SPWVD 时频图	109
3.5.4	不同信噪比下的 BPSK 信号的 SPWVD 时频图	110
3.6	重排平滑伪 Wigner-Ville 分布仿真与分析	111
3.6.1	不同信噪比下的 LFM 信号的 RSPWVD 时频图	111

3.6.2	不同信噪比下的 FMCW 信号的 RSPWVD 时频图	112
3.6.3	不同信噪比下的 FSK 信号的 RSPWVD 时频图	112
3.6.4	不同信噪比下的 BPSK 信号的 RSPWVD 时频图	113
3.7	小波变换	114
3.7.1	小波变换定义	115
3.7.2	小波变换仿真与分析	115
3.8	时频方法特征表现性能分析	117
3.9	小结	120
第 4 章	LFM 类信号的截获与特征提取	122
4.1	引言	122
4.2	线性调频信号与分数阶傅里叶变换	123
4.2.1	线性调频信号	123
4.2.2	分数阶傅里叶变换	124
4.2.3	LFM 信号的分数阶傅里叶变换	125
4.3	基于 FRFT 的 LFM 信号的检测与参数估计	131
4.3.1	单分量 LFM 信号的检测与参数估计	131
4.3.2	多分量 LFM 信号的检测与参数估计	132
4.3.3	检测与估计性能	134
4.3.4	对中心频率的分辨能力	135
4.3.5	对调频率的分辨能力	140
4.4	基于 FRFT 的非均匀采样 LFM 信号的检测与参数估计	144
4.4.1	分段非均匀采样 LFM 信号检测	144
4.4.2	自适应非均匀采样 LFM 信号检测	149
4.4.3	伪随机非均匀采样 LFM 信号检测	151
4.4.4	非均匀采样 LFM 信号参数估计	153
4.5	基于 FRFT 的多分量 LFM 信号分辨	159
4.5.1	多分量 LFM 信号间的分辨分析	159
4.5.2	LFM 信号尖峰的偏移	161
4.5.3	量纲归一化因子的优化	162
4.5.4	仿真验证	164
4.6	基于 FRFT 的多相编码信号检测与参数估计	167
4.6.1	多相编码信号的时频特征	167
4.6.2	多相编码信号检测与参数估计	173
4.6.3	多分量多相编码信号的检测与参数估计	180
4.7	基于 FRFT 的三角 LFM CW 信号检测与参数估计	183

4.7.1	对称三角 LFM CW 信号时频特征	183
4.7.2	对称三角 LFM CW 信号检测与参数估计	187
4.7.3	多分量对称三角 LFM CW 信号的检测与参数估计	197
4.7.4	广义三角 LFM CW 信号检测与参数估计	200
4.8	小结	208
	参考文献	209
第 5 章	LFMCW 类信号截获与特征提取	212
5.1	引言	212
5.2	LFMCW 信号描述及其周期 Wigner-Hough 变换	213
5.2.1	LFM 信号的 WHT 分析	213
5.2.2	LFMCW 信号及其周期 WHT	215
5.2.3	周期 WHT 算法性能分析	219
5.3	基于周期 WHT 的 LFMCW 信号检测与参数估计	228
5.3.1	高斯白噪声中 LFMCW 信号的统计特征研究	228
5.3.2	LFMCW 信号检测与参数估计算法	231
5.3.3	LFMCW 信号检测性能分析	235
5.3.4	LFMCW 信号参数估计性能分析	238
5.4	基于周期 WHT 的 STLFMCW 信号检测与参数估计	242
5.4.1	STLFMCW 信号及其周期 WHT 特征	242
5.4.2	周期 WHT 域 STLFMCW 信号检测与参数估计算法	244
5.4.3	STLFMCW 信号检测与参数估计流程	246
5.4.4	STLFMCW 信号检测与参数估计性能分析	247
5.5	基于周期 WHT 的多相编码信号检测与参数估计	252
5.5.1	多相编码信号及其周期 WHT 特征	252
5.5.2	周期 WHT 域多相编码信号检测与参数估计算法	257
5.5.3	多相编码信号检测与参数估计流程	257
5.5.4	多相编码信号检测与参数估计性能分析	259
5.6	LFMCW 信号及其 FRFT	263
5.6.1	线性调频连续波信号	263
5.6.2	LFMCW 信号的 FRFT	263
5.7	周期分数阶傅里叶变换	264
5.7.1	周期 FRFT 的定义	264
5.7.2	LFMCW 的 PFRFT	265
5.8	基于 PFRFT 的 LFMCW 信号检测与参数估计	266
5.8.1	检测与估计算法	266

5.8.2 估计性能分析	267
5.8.3 检测性能分析	269
5.9 仿真实验与分析	271
5.9.1 比较 LFM CW 信号的 PFRFT 和 FRFT	271
5.9.2 基于 PFRFT 的 LFM CW 检测和估计性能	272
5.10 小结	274
参考文献	275
第 6 章 编码类信号截获与提取特征	280
6.1 引言	280
6.2 侦察信号的特征分析与提取研究现状	281
6.3 编码信号循环谱特征分析方法	283
6.3.1 基于平滑循环周期图的谱估计算法(SCPM)	283
6.3.2 基于平均平滑循环周期图的谱估计方法(ASCPM)	285
6.3.3 平均平滑核函数设计	285
6.3.4 窗函数相邻片段重叠长度对循环谱泄漏抑制的影响	286
6.3.5 典型编码信号 ASCPM 算法循环谱特征分析	289
6.3.6 复杂调制编码信号 ACSMP 算法循环谱特征分析	295
6.3.7 ASCPM 算法的计算复杂度分析	305
6.4 编码信号循环谱特征检测	307
6.4.1 多循环检测	307
6.4.2 单循环检测	308
6.4.3 渐近最优 χ^2 分布检测	311
6.4.4 二相编码信号单循环检测	315
6.4.5 四相编码信号单循环检测	316
6.4.6 多相编码信号单循环检测	317
6.4.7 频率编码信号单循环检测	318
6.4.8 性能分析	319
6.5 编码信号循环谱特征参数估计	320
6.5.1 相位编码信号循环谱特征参数估计	320
6.5.2 频率编码信号循环谱特征参数估计	325
6.5.3 Costas 码信号循环谱特征参数估计	330
6.5.4 平稳噪声对参数估计的影响	331
6.5.5 仿真验证和结论	334
6.6 小结	339
参考文献	340