



国防科技图书出版基金

The Interception,
Sorting and Recognition of the
Complex Modulation Signals

**复杂调制信号
截获、分选与识别**

刘锋 黄宇 王泽众 张鑫 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

复杂调制信号截获、 分选与识别

The Interception, Sorting and Recognition of
the Complex Modulation Signals

刘锋 黄宇 王泽众 张鑫 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

复杂调制信号截获、分选与识别 / 刘锋等著. —北京: 国防工业出版社, 2015. 3

ISBN 978 - 7 - 118 - 09471 - 8

I. ①复... II. ①刘... III. ①电子侦察 - 信号接收②电子侦察 - 信号分析 IV. ①TN971

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 030478 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 710 × 1000 1/16 印张 25¼ 字数 476 千字

2015 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 89.00 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

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需

要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金
评审委员会**

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员	王 峰				
副主任委员	吴有生	蔡 镭	杨崇新		
秘书长	杨崇新				
副秘书长	邢海鹰	贺 明			
委 员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书	
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利	
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣	
	李德仁	李德毅	杨 伟	肖志力	
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆 军	
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起	
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南	
	傅惠民	魏炳波			

前 言

近十年来,战场电磁信号环境日益密集复杂,各类新体制雷达不断涌现,雷达情报侦察面临着严峻挑战,尤其是对复杂调制信号的截获、分选与识别,已经成为了制约雷达情报侦察技术进步的“瓶颈”,是新型雷达情报侦察系统亟待解决的问题。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、分选与识别研究的团队之一,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、分选与识别新理论与新方法的探索与应用。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的研究空白。本书体系完整,内容全面,方法新颖,注重理论与应用的结合,含有大量的仿真示例,可以作为从事相关研究与应用的广大科技工作者和高校师生的参考书。

全书共 10 章,按复杂调制信号的截获、分选和识别三部分展开分析。

第 1 章为绪论部分。介绍了复杂调制信号、复制调制信号的截获、分选和识别研究现状及发展趋势,给出了全书的理论体系和主要内容。

第 2、3、4 章为复杂调制信号的截获部分。此部分同时包括信号的截获和特征提取,是本书的基础和重点,信号特征提取的优劣直接影响到对信号的分选和识别。假设复杂调制信号不存在时频交叠的情况,考虑对于单一复杂调制信号的截获和特征提取。本书将复杂调制信号分为线性调频类、线性调频连续波类、编码类信号和其它形式信号。线性调频类信号主要包括单分量线性调频和多分量线性调频信号等,主要采用了分数阶傅里叶变换的方法;线性调频连续波类信号主要包括对称三角线性调频连续波信号(STLFMCW)和非对称三角线性调频连续波信号(NSTLFMCW),对于该类信号,提出了采用周期 Wigner - Hough 变换的方法;编码类信号主要包括频率编码(如 FSK 码、Costas 码等)、相位编码(如 BPSK 码、QPSK 码、P1 码、P2 码、P3 码、P4 码、Frank 码等)等,对此类信号,提出了采用循环谱估计的方法;其它形式信号包括复合调制信号等形式,暂不作考虑。

第 5、6、7 章为复杂调制信号的分选部分。本书对于传统的雷达信号分选方法不再赘述,重点考虑当信号存在时频交叠时的分离问题。将信号分为交叠脉冲、交叠连续波和交叠信号进行分析,其中对时频交叠脉冲信号,提出了 Chirp 基稀疏分解的方法;对时频交叠连续波信号,提出了基于周期 Wigner - Hough 变换的方法;对时频交叠信号(同时存在脉冲和连续波),提出了基于独立分量分析的盲分离方

法。

第8、9章为复杂调制信号的识别部分。在上述截获、特征提取和分选的基础上,主要分析信号的参数识别和波形识别。参数识别分别从信号的分数阶傅里叶变换特征和循环谱特征进行分析,波形识别则在信号的细微时频特征基础上进行研究,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10章为回顾、建议和展望。

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、钟兆根、黄宇、邹世杰、孙大鹏、郑鹏、向崇文等同志,结合学位论文对复杂调制信号截获、分选与识别进行了广泛而深入的研究,他们所取得的有关成果对完成本书起到了重要作用,在此一并向他们表示感谢!

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

刘锋

2015年1月于烟台

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 复杂调制信号	1
1.3 复杂调制信号截获与特征提取研究现状	3
1.4 复杂调制信号分选与识别研究现状	5
1.4.1 基于脉冲描述字的分选识别	6
1.4.2 基于时频变换域的分选识别	8
1.5 研究内容	10
参考文献	13
第 2 章 LFM 类信号的截获与特征提取	19
2.1 引言	19
2.2 线性调频信号与分数阶傅里叶变换	20
2.2.1 线性调频信号	20
2.2.2 分数阶傅里叶变换	21
2.2.3 LFM 信号的分数阶傅里叶变换	22
2.3 基于 FRFT 的 LFM 信号的检测与参数估计	28
2.3.1 单分量 LFM 信号的检测与参数估计	28
2.3.2 多分量 LFM 信号的检测与参数估计	29
2.3.3 检测与估计性能	30
2.3.4 对中心频率的分辨能力	32
2.3.5 对调频率的分辨能力	36
2.4 基于 FRFT 的非均匀采样 LFM 信号的检测与参数估计	39
2.4.1 分段非均匀采样 LFM 信号检测	39
2.4.2 自适应非均匀采样 LFM 信号检测	44
2.4.3 伪随机非均匀采样 LFM 信号检测	46
2.4.4 非均匀采样 LFM 信号参数估计	47
2.5 基于 FRFT 的多分量 LFM 信号分辨	53

2.5.1	多分量 LFM 信号的分辨分析	53
2.5.2	LFM 信号尖峰的偏移	55
2.5.3	量纲归一化因子的优化	56
2.5.4	仿真验证	58
2.6	基于 FRFT 的多相编码信号检测与参数估计	61
2.6.1	多相编码信号的时频特征	61
2.6.2	多相编码信号检测与参数估计	66
2.6.3	多分量多相编码信号的检测与参数估计	73
2.7	基于 FRFT 的三角 LFMCW 信号检测与参数估计	75
2.7.1	对称三角 LFMCW 信号时频特征	75
2.7.2	对称三角 LFMCW 信号检测与参数估计	78
2.7.3	多分量对称三角 LFMCW 信号的检测与参数估计	87
2.7.4	广义三角 LFMCW 信号检测与参数估计	89
2.8	总结	97
	参考文献	98

第 3 章 LFMCW 类信号截获与特征提取

3.1	引言	100
3.2	LFMCW 信号描述及其周期 WHT	100
3.2.1	LFM 信号的 WHT 分析	100
3.2.2	LFMCW 信号及其周期 WHT	102
3.2.3	周期 WHT 算法性能分析	107
3.3	基于周期 WHT 的 LFMCW 信号检测与参数估计	115
3.3.1	高斯白噪声中 LFMCW 信号的统计特征研究	115
3.3.2	LFMCW 信号检测与参数估计算法	118
3.3.3	LFMCW 信号检测性能分析	122
3.3.4	LFMCW 信号参数估计性能分析	125
3.4	基于周期 WHT 的 STLFMCW 信号检测与参数估计	129
3.4.1	STLFMCW 信号及其周期 WHT 特征	129
3.4.2	周期 WHT 域 STLFMCW 信号检测与参数估计算法	131
3.4.3	STLFMCW 信号检测与参数估计流程	133
3.4.4	STLFMCW 信号检测与参数估计性能分析	134
3.5	基于周期 WHT 的多相编码信号检测与参数估计	139
3.5.1	多相编码信号及其周期 WHT 特征	139
3.5.2	周期 WHT 域多相编码信号检测与参数估计算法	143
3.5.3	多相编码信号检测与参数估计流程	144

3.5.4	多相编码信号检测与参数估计性能分析	145
3.6	总结	149
	参考文献	149
第4章	编码类信号截获与提取特征	159
4.1	引言	159
4.2	侦察信号的特征分析与提取研究现状	159
4.3	编码信号循环谱特征分析方法	162
4.3.1	基于平滑循环周期图的谱估计算法(SCPM)	162
4.3.2	基于平均平滑循环周期图的谱估计算法(ASCPM)	164
4.3.3	平均平滑核函数设计	164
4.3.4	窗函数相邻片段重叠长度对循环谱泄漏抑制的影响	165
4.3.5	典型编码信号 ASCPM 算法循环谱特征分析	167
4.3.6	复杂调制编码信号 ASCPM 算法循环谱特征分析	173
4.3.7	ASCPM 算法的计算复杂度分析	183
4.4	编码信号循环谱特征检测	184
4.4.1	多循环检测	185
4.4.2	单循环检测	186
4.4.3	渐近最优 χ^2 分布检测	188
4.4.4	二相编码信号单循环检测	192
4.4.5	四相编码信号单循环检测	193
4.4.6	多相编码信号单循环检测	195
4.4.7	频率编码信号单循环检测	195
4.4.8	性能分析	196
4.5	编码信号循环谱特征参数估计	197
4.5.1	相位编码信号循环谱特征参数估计	198
4.5.2	频率编码信号循环谱特征参数估计	202
4.5.3	Costas 码信号循环谱特征参数估计	206
4.5.4	平稳噪声对参数估计的影响	207
4.5.5	仿真验证和结论	210
4.6	总结	215
	参考文献	216
第5章	基于 Chirp 基分解的时频交叠脉冲信号分离	224
5.1	引言	224
5.2	雷达信号的 Chirp 基分解	224

5.2.1	雷达信号时频特征	224
5.2.2	时频连续脉冲	226
5.2.3	时频交叠脉冲	227
5.3	基于 FRFT 的 Chirp 基提取	229
5.3.1	Chirp 基的依次提取	229
5.3.2	窗函数和时域分离	231
5.3.3	Chirp 基特征参数估计	233
5.4	时频交叠雷达侦察信号分离	234
5.4.1	Chirp 基拼接	234
5.4.2	信号分量求解	236
5.5	仿真分析	237
5.5.1	多分量信号	237
5.5.2	提取 Chirp 基特征	237
5.5.3	拼接 Chirp 基	240
5.5.4	提取信号分量	240
5.6	总结	241
	参考文献	242
第 6 章	基于周期 WHT 的时频交叠连续波信号分离	245
6.1	引言	245
6.2	基于周期 WHT 的 LFMCW 循环滤波检测与分离算法	245
6.2.1	交叠 LFMCW 信号循环滤波算法原理	245
6.2.2	基于单元平均的窄带频域陷波滤波器设计	248
6.2.3	单元平均的滤波门限设置	249
6.3	检测与分离算法用于类似 LFMCW 信号的可行性分析	250
6.3.1	检测与分离算法用于 STLFMCW 信号可行性分析	250
6.3.2	检测与分离算法用于类似 LFMCW 多相编码信号 可行性分析	251
6.4	仿真实验与分析	252
6.4.1	交叠 LFMCW 信号检测与分离	252
6.4.2	交叠类似 LFMCW 信号检测与分离	252
6.5	总结	256
	参考文献	256
第 7 章	基于独立成分分析的时频交叠信号盲分离	257
7.1	引言	257

7.2	盲信号分离	257
7.2.1	盲分离模型	257
7.2.2	独立成分分析方法	261
7.2.3	基于 ICA 的盲分离准则	264
7.2.4	鲁棒的白化处理	267
7.2.5	仿真分析	269
7.3	瞬态混合平稳雷达侦察信号盲分离	274
7.3.1	传统的雷达侦察信号分选原理	274
7.3.2	基于 ICA 的雷达侦察复信号盲分离	276
7.3.3	基于一阶 AR 模型的盲分离算法	278
7.3.4	基于 AR 模型阶数估计的雷达侦察信号盲分离	283
7.3.5	仿真分析	290
7.4	瞬态混合非平稳雷达侦察信号盲分离	296
7.4.1	基于时频分布的非平稳雷达侦察信号盲分离	297
7.4.2	基于时频分析量源数估计的自适应盲分离算法	300
7.4.3	性能仿真	303
7.5	卷积混合雷达侦察信号时域盲分离	308
7.5.1	基于非平稳特性的时域卷积盲分离	308
7.5.2	基于快速固定点算法的卷积混合信号盲分离	310
7.5.3	改进的快速固定点算法	315
7.5.4	仿真分析	320
7.6	卷积混合雷达侦察信号频域盲分离	323
7.6.1	基于非平稳特性的频域盲分离算法	323
7.6.2	频域盲分离的不确定性	324
7.6.3	侦察信号到达方位角估计	327
7.6.4	仿真分析	328
7.7	总结	332
	参考文献	334
第 8 章	复杂调制信号的参数识别	338
8.1	引言	338
8.2	基于 FRFT 的 LFM 类信号自动识别	338
8.2.1	基于 FRFT 的 LFM 类信号调制方式的识别	339
8.2.2	基于 FRFT 的 LFM 类信号脉内特征提取	344
8.2.3	基于 FRFT 的 LFM 类雷达信号侦察系统	344
8.2.4	仿真验证	345

8.3	基于广义循环谱特征的编码信号分类	347
8.3.1	循环谱特征与时频分布的关系	347
8.3.2	广义时频核函数设计	348
8.3.3	广义循环谱特征分析	350
8.3.4	广义循环谱特征提取	352
8.3.5	基于广义循环谱特征的调制样式分类	353
8.4	总结	355
	参考文献	355
第9章	复杂调制信号的波形识别	357
9.1	引言	357
9.2	复杂调制雷达信号波形识别原理及方法	357
9.2.1	雷达信号波形识别原理	357
9.2.2	基于时频分布的波形识别	358
9.2.3	基于其它特征的波形识别	359
9.3	复杂调制雷达信号波形特征	359
9.3.1	基于功率谱密度的特征	359
9.3.2	基于瞬时信号属性的特征	360
9.3.3	基于时频域波形特征	360
9.3.4	基于循环谱和高阶统计量的特征	363
9.4	基于多特征组合神经网络的波形识别	365
9.4.1	神经网络	365
9.4.2	多特征组合神经网络设计	366
9.4.3	仿真分析	368
9.5	总结	369
	参考文献	369
第10章	回顾、建议与展望	371
10.1	回顾	371
10.1.1	初步形成了复杂调制信号处理理论体系	371
10.1.2	对复杂调制信号进行了分类处理	372
10.1.3	建立了对交叠信号处理的理论体系	372
10.1.4	对分类信号选取了合适的研究方法	372
10.2	问题与建议	373
10.2.1	背景模型和复杂背景下的性能分析	373
10.2.2	更加量化的性能分析	373

10.2.3	多种方法的分析比较	374
10.2.4	加强对复合调制信号的分析	374
10.2.5	加强对信号识别的研究	374
10.2.6	加强对交叠信号的分离研究	374
10.3	研究方向展望	374
10.3.1	基于雷达信号稀疏特征的分选与识别	374
10.3.2	时频交叠信号环境下的分选与识别	375
10.3.3	调频连续波信号的截获与特征提取	375
10.3.4	噪声雷达信号的截获与特征提取	375
10.3.5	复合调制信号截获、分选与识别	375
10.3.6	复杂调制信号辐射源识别	375
10.3.7	复杂调制信号辐射源定位	376
10.3.8	面向复杂调制信号的干扰引导	376

CONTENTS

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Introduction	1
1.2 Complex Modulated Signals	1
1.3 Research Status of Complex Modulated Signals Interception and Feature Extraction	3
1.4 Research Status of Complex Modulated Signals Sorting and Recognition	5
1.4.1 Sorting and Recognition Based on Pulse Description Word	6
1.4.2 Sorting and Recognition Based on Time – frequency domain	8
1.5 Research Contents	10
References	13
Chapter 2 Interception and Feature Extraction of LFM Signals	19
2.1 Introduction	19
2.2 LFM Signal and FRFT	20
2.2.1 LFM Signal	20
2.2.2 FRFT	21
2.2.3 FRFT of LFM Signal	22
2.3 Detection and Parameter Estimation of LFM Signal Based on FRFT	28
2.3.1 Detection and Parameter Estimation of Single – component LFM Signal	28
2.3.2 Detection and Parameter Estimation of Multi – component LFM Signal	29
2.3.3 Performance of Detection and Estimation	30
2.3.4 Resolution Ability of Center – frequency	32
2.3.5 Resolution Ability of Chirp – rate	36
2.4 Detection and Estimation of Nonuniform Sampled LFM Signal Based on FRFT	39

2.4.1	Detection of Segmenting Nonuniform Sampled LFM Signal	39
2.4.2	Detection of Adaptive Nonuniform Sampled LFM Signal	44
2.4.3	Detection of Pseudo Random Nonuniform Sampled LFM Signal	46
2.4.4	Parameter Estimation of Nonuniform Sampled LFM Signal	47
2.5	Resolution of Multi – component LFM Signal Based on FRFT	53
2.5.1	Resolution Analysis of Multi – component LFM Signal	53
2.5.2	Peak Shift of LFM Signal	55
2.5.3	Optimization of Dimensional Normalization Factor	56
2.5.4	Simulation Results	58
2.6	Detection and Parameter Estimation of Polyphase Coded Signals	
	Based on FRFT	61
2.6.1	Time – frequency Features of Polyphase Coded Signals	61
2.6.2	Detection and Parameter Estimation of Polyphase Coded Signals	66
2.6.3	Detection and Parameter Estimation of Multi – component Polyphase Coded Signals	73
2.7	Detection and Parameter Estimation of TLFMCW Signal	
	Based on FRFT	75
2.7.1	Time – frequency Features of STLFMCW Signal	75
2.7.2	Detection and Parameter Estimation of STLFMCW Signal	78
2.7.3	Detection and Parameter Estimation of Multi – component STLFMCW Signal	87
2.7.4	Detection and Parameter Estimation of General TLFMCW Signal	89
2.8	Summary	97
	References	98

Chapter 3 Interception and Feature Extraction of LFMCW Signal 100

3.1	Introduction	100
3.2	Description of LFMCW Signal and PWHT	100
3.2.1	WHT Analysis of LFM Signal	100
3.2.2	LFMCW Signal and PWHT	102
3.2.3	Performance Analysis of PWHT Algorithm	107
3.3	Detection and Parameter Estimation of LFMCW Signal Based on PWHT	115