



国防科技图书出版基金

© 胡国兵 宋军 李昌利 著

低截获概率雷达侦察信号 分析及可信性评估

Analyzing Reconnaissance Signal from Low Probability of
Intercept Radar and Its Credibility Evaluation



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

低截获概率雷达侦察信号 分析及可信性评估

Analyzing Reconnaissance Signal from Low Probability
of Intercept Radar and Its Credibility Evaluation

胡国兵 宋 军 李昌利



国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

低截获概率雷达侦察信号分析及可信性评估 / 胡国兵等著. —北京: 国防工业出版社, 2017. 8

ISBN 978 - 7 - 118 - 11332 - 7

I. ①低... II. ①胡... III. ①低截获概率雷达 - 雷达信号处理 IV. ①TN957. 51

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 210458 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 16 $\frac{3}{4}$ 字数 296 千字

2017 年 8 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

致 读 者

本书由中央军委装备发展部国防科技图书出版基金资助出版。

为了促进国防科技和武器装备发展,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。这是一项具有深远意义的创举。

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中央军委装备发展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,由中央军委装备发展部国防工业出版社出版发行。

国防科技和武器装备发展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。开展好评审工作,使有限的基金发挥出巨大的效能,需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,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	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	赵伯桥	
秘书长	赵伯桥			
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳		
委员 (按姓氏笔画排序)	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
	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		

序 言

在现代高技术战争中,雷达已成为获取战场信息不可或缺的装备与手段。在雷达电子战中,雷达与侦察接收机之间是对立的“矛盾”双方。随着电子侦察技术、反辐射导弹技术的快速发展,雷达作为“矛盾”的一方,在日益复杂的电子战电磁环境中,自身受到的生存威胁愈加严重。低截获概率雷达功耗较低,并且采用频率捷变、复杂调制等技术,因而有效提高了雷达的战场生存能力,近年来得到了快速发展。而作为“矛盾”的另一方,电子侦察接收机的主要作用是在复杂电磁环境中自适应地感知周围的信号,并对其调制方式、参数进行分析、识别及估计,为后续对抗措施提供基础。低截获概率雷达的广泛应用使得电子侦察接收机对信号进行检测、识别及参数估计变得更加困难,处理结果的可信性也难以保证。因此,不仅需要对接收到的低截获概率雷达信号进行精确的分析,而且需要对处理结果的可信性进行分析与判决,以便提高后续处理的精确度。近年来,对低截获概率雷达侦察信号进行分析并对其结果进行可信性评估,成为电子战信号处理领域的一个研究热点。

由胡国兵、宋军、李昌利三位青年学者合著的《低截获概率雷达侦察信号分析及可信性评估》一书共8章,内容涉及低截获概率雷达技术基础、常用低截获概率雷达信号的特征分析与调制识别、信号参数估计、盲分析结果的可信性评估等,涵盖了低截获概率雷达侦察信号分析与处理的关键环节。本书涉及到的理论与方法,经典与现代交相辉映、相得益彰,不仅包括常用的最大似然、分布拟合检验,还包括新颖的分数阶傅里叶变换、Bootstrap、极值分布等理论与方法。本书理论推导与仿真分析相结合,并对算法工程实现的复杂度进行了估算。特别地,本书对常用雷达侦察信号分析结果的可信性评估问题进行了较为系统的阐述,提出了一些独特的算法。

作者在各自博士学位论文、博士后研究的基础上,紧密结合相应的科研项目与多年积累的研究成果,并对雷达侦察信号分析领域的最新成果进行凝练,构成了本书的全部内容。本书受国防科技图书出版基金的资助,具有较强的应用价值与较高的学术水平。相信本书的出版对雷达电子战信号处理技术的发展会起到一定的推动作用。

前 言

在现代电子战(EW)中,为了提高雷达的反截获能力,低截获概率(LPI)雷达已得到广泛应用。LPI雷达,由于采用低功率、大带宽、频率捷变及复合调制等技术,对非协作条件下EW中截获接收机的信号处理带来了极大的挑战。对EW接收机而言,必须在缺乏信号先验信息、低信噪比及有限观测时间等条件下,对截获信号的检测、调制识别及参数估计等进行盲处理。因此,除了研究高效精确的处理算法之外,还须对其分析与处理结果的可信性进行评估,以提高整个信号处理系统的有效性与可靠性。目前,对LPI雷达侦察信号分析及其结果的可信性评估已成为雷达电子侦察中的重要课题。

本书是有关统计信号处理理论在LPI雷达侦察信号分析与处理应用方面的专著。针对LPI雷达侦察信号调制识别及参数估计这一主题,书中重点介绍了LPI雷达的技术基础及信号模型,典型LPI雷达调制信号的识别、参数估计及其盲分析结果的可信性评估等若干重要课题。本书在总结国内外相关领域最新研究成果的基础上,结合作者近年来从事有关雷达侦察信号分析与处理方面的研究与应用实践,选取了一系列新的研究成果,具有一定的深度、广度和新颖性。

本书从组织结构上分为三个部分,共8章。

第一部分(第1章、第2章)为LPI雷达侦察信号处理基础。第1章概述了LPI雷达信号处理的历史与现状,LPI雷达信号处理及其可信性评估的意义、方法,并对本书的内容结构进行了介绍。第2章重点介绍了LPI雷达技术和典型LPI雷达信号的模型及特征。第2章是后续章节的基础,不仅分析了LPI雷达的截获因子和实现途径,还重点介绍了常用LPI雷达信号,特别是复合调制雷达信号的瞬时频率特征。

第二部分(第3章、第4章)主要介绍LPI雷达侦察信号调制识别与参数估计算法。第3章分别从简单调制信号与复杂调制信号识别两个方面介绍了常用LPI雷达信号的调制识别算法。针对复杂调制方式,重点阐述了线性调频/二相编码(LFM/BPSK)复合调制信号、频移键控/二相编码(FSK/BPSK)复合调制信号和S型非线性调频信号的特征及识别方法。第4章介绍了常用LPI雷达调制信号参数估计算法。在总结LFM及BPSK两种单一调制信号参数估计的基础上,重点讨论了基于调制分离方法的LFM/BPSK复合调制信号及FSK/BPSK复合调制信号多参数估计问题,并对S型非线性调频信号参数估计进行了初

步探讨。

第三部分(第5章至第8章)涉及LPI雷达侦察信号盲分析结果的可信性评估方法。第5章介绍了正弦波频率估计的可信性评估方法。针对高斯白噪声背景下正弦波信号单次频率估计结果的可信性评估问题,分别介绍了基于局部最大势(LMP)检验及切比雪夫不等式(CI)的两种处理方法。第6章讨论了LFM信号盲分析结果的可信性评估问题,从时域与频域的角度分别介绍了循环平稳特性及纽曼-皮尔逊(N-P)检验两种方法。第7章从幅度与相位特征两个角度,分别介绍了相关累加模值曲线回归失拟检验、相关序列相位概率拟合分布检验及Bootstrap检验法三种BPSK信号盲分析结果可信性评估算法。第8章以LFM/BPSK复合调制信号为例,重点研究了复合调制信号的盲分析结果的可信性评估问题,介绍了基于相关谱峰值检验及相关谱极值分布拟合优度检验两种基于顺序统计量分析的处理算法。

附录部分给出了书中提及的部分信号模型及关键算法的Matlab代码,供读者参考学习。

本书第1章由胡国兵、宋军撰写,第2章至第4章由宋军、胡国兵撰写,第5章至第8章由胡国兵、李昌利撰写,附录部分由宋军负责整理,全书由胡国兵统稿。

本书是作者在博士后研究工作及博士论文的基础上写作而成的。成书之际作者由衷地感谢导师——南京航空航天大学的刘渝教授,感谢他多年来的培养和悉心指导,有幸在他领导的研究室中参加科研工作并得到锻炼使作者受益一生。同时,感谢周建江教授、张弓教授在作者攻读博士期间给予的学术指导。

衷心感谢河海大学的徐立中教授提供了优良的博士后研究工作环境,奠定了本书的写作基础。感谢美国新泽西理工大学的Ali Abdi博士及东南大学金石教授在访学期间给予的学术指导。此外,本书在写作过程中还得到了作者李昌利的博士学位论文指导教师——教育部长江学者特聘教授、国家杰出青年科学基金获得者、国家自然科学基金创新研究群体项目负责人、长江学者奖励计划创新团队雷达信号处理负责人、西安电子科技大学电子工程学院院长寥桂生教授的鼓励和指导,导师还欣然作序,在此向他致以最诚挚的谢意。

作者在研究和写作的过程中还得到了南京理工大学电子对抗专家赵惠昌教授、西安电子科技大学苏洪涛教授、东南大学赵力教授、厦门大学信息科学与技术学院邓振森教授及作者工作过的南京信息职业技术学院王钧铭教授、王维平教授、顾斌教授、鲍安平副教授、丁宁副教授、李震涛副教授及现单位金陵科技学院田锦教授、胡兴柳教授、陈正宇副教授、姜志鹏老师的帮助与指导。课题组成员杨莉、吴珊珊及高燕三位老师帮助校阅了全稿,在此一并表示感谢。

本书得到了国家自然科学基金(61101211)、江苏省自然科学基金(BK2011837, BK20161104)、江苏省政府留学基金(JS2007)、江苏省高校自然科

学基金(13KJB220003)、江苏省“333 高层次人才培养工程”科研基金(BRA2013171)、江苏省第十二批次六大人才高峰项目(DZXX022)、金陵科技学院高层次人才引进项目(jit-b-201630)及南京市重点学科(电子科学与技术)等项目的资助,本书的撰写是在以上科研工作经历的基础上完成的。

在此向所有的参考文献作者及为本书出版付出辛勤劳动的同志表示感谢。

由于作者的水平有限,书中难免会有不妥和疏漏之处,恳请广大专家及同行批评指正。

作者

2016年8月28日 于方山下

目 录

第1章 绪论	1
1.1 电子战与 LPI 雷达	1
1.2 相关技术的研究现状	4
1.2.1 LPI 雷达侦察信号的分析与处理	4
1.2.2 信号盲分析结果的可信性评估	6
1.3 本书的内容与结构	9
参考文献	12
第2章 LPI 雷达技术及信号模型	17
2.1 引言	17
2.2 截获因子	17
2.2.1 影响截获因子的因素	18
2.2.2 低截获概率技术	19
2.3 低截获概率雷达信号模型	20
2.3.1 线性调频信号	20
2.3.2 非线性调频信号	21
2.3.3 相位编码信号	22
2.3.4 频率编码信号	24
2.3.5 复合调制信号	24
2.4 本章小结	27
参考文献	27
第3章 常用 LPI 雷达信号的调制方式识别	29
3.1 引言	29
3.2 简单调制信号识别	33
3.2.1 单频正弦波生成特性	34
3.2.2 滤波预处理	38
3.2.3 识别算法	40

3.2.4	性能仿真与分析	44
3.3	LFM/BPSK 复合调制信号特征分析与识别	47
3.3.1	信号模型及特征	47
3.3.2	识别算法	48
3.3.3	性能仿真与分析	54
3.4	FSK/BPSK 复合调制信号特征分析与识别	58
3.4.1	信号模型	58
3.4.2	识别算法	59
3.4.3	性能仿真与分析	63
3.5	S 型非线性调频信号特征分析与识别	67
3.5.1	信号的构建及相位特征分析	67
3.5.2	识别算法	70
3.5.3	性能仿真与分析	73
3.6	本章小结	74
	参考文献	74
第 4 章	常用 LPI 雷达调制信号的参数估计	78
4.1	引言	78
4.2	几个基本算法	79
4.2.1	LFM 信号参数估计	79
4.2.2	BPSK 信号参数估计	89
4.2.3	改进型频域滤波算法	93
4.3	LFM/BPSK 复合调制信号参数估计	96
4.3.1	调频系数和起始频率的估计	97
4.3.2	码速率估计	98
4.3.3	性能仿真与分析	98
4.4	FSK/BPSK 复合调制信号的参数估计	100
4.4.1	码元宽度与载频估计	100
4.4.2	码速率估计	102
4.4.3	性能仿真与分析	102
4.5	S 型非线性调频信号的参数估计	103
4.5.1	参数估计算法	103
4.5.2	性能仿真与分析	104
4.6	本章小结	105
	参考文献	105

第 5 章 正弦波频率估计的可信性评估	108
5.1 引言	108
5.2 常用正弦波频率估计算法	109
5.2.1 最大似然估计算法	109
5.2.2 基于 DFT 的准最佳估计算法	109
5.2.3 基于相位信息的估计算法	114
5.3 基于 LMP 检验的正弦波频率估计可信性检验	114
5.3.1 特征分析	115
5.3.2 算法描述	117
5.3.3 性能的理论分析	122
5.4 基于 CI 不等式的正弦波频率估计可信性检验	123
5.4.1 切比雪夫不等式	123
5.4.2 统计量的确定	123
5.4.3 判决规则与门限	124
5.4.4 性能的理论分析	125
5.5 性能仿真与分析	127
5.5.1 性能理论分析的正确性	127
5.5.2 实例分析	129
5.5.3 算法的复杂度分析	130
5.6 本章小结	131
参考文献	131
第 6 章 LFM 信号盲分析结果的可信性评估	134
6.1 引言	134
6.2 基于循环平稳分析的 LFM 信号盲分析结果可信性检验	135
6.2.1 特征分析	136
6.2.2 算法描述	141
6.2.3 错误概率的理论推导	142
6.3 基于 N-P 检验的 LFM 信号盲分析结果可信性检验	147
6.3.1 N-P 检验	147
6.3.2 特征分析	148
6.3.3 算法描述	151
6.4 性能仿真与分析	154
6.4.1 信噪比及门限对检验性能的影响	155
6.4.2 信号参数变化对检验性能的影响	157

6.4.3	算法的性能对比	160
6.4.4	算法的复杂度分析	161
6.5	本章小结	162
	参考文献	162
第7章	BPSK 信号盲分析结果的可信性评估	164
7.1	引言	164
7.2	基于线性回归失拟检验的 BPSK 信号盲分析结果可信性检验	165
7.2.1	线性回归失拟检验	165
7.2.2	特征分析	166
7.2.3	算法描述	170
7.3	基于相位序列拟合优度检验的 BPSK 信号盲分析结果可信性检验	171
7.3.1	拟合优度检验	171
7.3.2	特征分析	173
7.3.3	算法描述	176
7.4	基于 Bootstrap 方法的 BPSK 信号盲分析结果可信性检验	184
7.4.1	Bootstrap 意义下的假设检验	185
7.4.2	特征分析	186
7.4.3	算法描述	187
7.5	性能仿真与分析	190
7.5.1	仿真条件	190
7.5.2	信噪比对检验性能的影响	190
7.5.3	信号参数变化对检验性能的影响	193
7.5.4	算法的复杂度分析	197
7.6	本章小结	198
	参考文献	199
第8章	复合调制信号盲分析结果的可信性评估	201
8.1	引言	201
8.2	顺序统计量基础	201
8.2.1	一维顺序统计量分布	201
8.2.2	一维最大值分布的极限分布	202
8.3	基于恒虚警准则的 LFM/BPSK 复合调制信号盲分析结果可信性检验	204
8.3.1	相关谱特征分析	206

8.3.2	算法描述	212
8.3.3	性能的理论分析	215
8.4	基于 GEV 分布拟合检验的 LFM/BPSK 信号盲分析结果	
	可信性检验	217
8.4.1	相关谱的 GEV 分布	218
8.4.2	算法描述	219
8.5	性能分析与仿真	221
8.5.1	信噪比对检验性能的影响	221
8.5.2	信号参数变化对检验性能的影响	223
8.5.3	算法的复杂度分析	231
8.6	本章小结	232
	参考文献	232
附录 A	部分算法的 Matlab 代码	234
A.1	典型 LPI 雷达信号模型 Matlab 代码	234
A.2	DPT 法 LFM 信号参数估计 Matlab 代码	237
A.3	FRFT 法 LFM 信号参数估计 Matlab 代码	238
A.4	A-M 法正弦波频率估计 Matlab 代码	242
A.5	Abatzoglou 迭代法正弦波频率估计 Matlab 代码	243
A.6	修正 RIFE 法正弦波频率估计 Matlab 代码	245

Contents

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Electronic Warfare and the LPI Radar	1
1.2	Research Reviews on Related Technologies	4
1.2.1	LPI Radar Reconnaissance Signal and Analyzing Processing	4
1.2.2	Credibility Evaluation of Blind Analyzing Results of the Signal	6
1.3	Contents and the Structure of the Book	9
	References	12
Chapter 2	LPI Radar Technologies and the Signal Models	17
2.1	Introduction	17
2.2	Intercept Factor	17
2.2.1	Ingredients Affecting the Intercept Factor	18
2.2.2	LPI Technology	19
2.3	Signal Models of the LPI Radar	20
2.3.1	Linear Frequency Modulation Signal	20
2.3.2	Nonlinear Frequency Modulation Signal	21
2.3.3	Phase Shift Keying Signal	22
2.3.4	Frequency Shift Keying Signal	24
2.3.5	Hybrid Modulation Signal	24
2.4	Chapter Summary	27
	References	27
Chapter 3	Modulation Recognition of Common LPI Radar Signals	29
3.1	Introduction	29
3.2	Modulation Identification of Simple Radar Signals	33

3.2.1	Properties of Extraction of Single-tone Sinusoid	34
3.2.2	Preprocessing Filtering	38
3.2.3	Identification Algorithm	40
3.2.4	Performance Simulations and Analyses	44
3.3	Feature Analysis and Modulation Identification of LFM/BPSK Hybrid Modulation Signals	47
3.3.1	Signal Model and Features	47
3.3.2	Identification Algorithm	48
3.3.3	Performance Simulations and Analyses	54
3.4	Feature Analysis and Modulation Identification of FSK/BPSK Hybrid Modulation Signals	58
3.4.1	Signal Model and Features	58
3.4.2	Identification Algorithm	59
3.4.3	Performance Simulations and Analyses	63
3.5	Feature Analysis and Identification of S-type Nonlinear Frequency Modulation Signals	67
3.5.1	Signal Model and Features	67
3.5.2	Identification Algorithm	70
3.5.3	Performance Simulations and Analyses	73
3.6	Chapter Summary	74
	References	74
Chapter 4	Parameter Estimation of Common LPI Radar Signals	78
4.1	Introduction	78
4.2	Several Fundamental Algorithms	79
4.2.1	Parameter Estimation of LFM Signals	79
4.2.2	Parameter Estimation of BPSK Signals	89
4.2.3	Improved Frequency Domain Filtering Algorithm	93
4.3	Parameter Estimation of LFM/BPSK Hybrid Modulation Signals	96
4.3.1	Estimations of the Frequency Modulation Coefficient and the Initial Frequency	97
4.3.2	Symbol Rate Estimation	98
4.3.3	Performance Simulations and Analyses	98

4.4	Parameter Estimation of FSK/BPSK Hybrid Modulation	
	Signals	100
4.4.1	Symbol Width and Carrier Frequency Estimations	100
4.4.2	Symbol Rate Estimation	102
4.4.3	Performance Simulations and Analyses	102
4.5	Parameter Estimation of S-type Nonlinear Frequency	
	Modulation Signals	103
4.5.1	Algorithm for Parameter Estimation	103
4.5.2	Performance Simulations and Analyses	104
4.6	Chapter Summary	105
	References	105
Chapter 5	Credibility Evaluation of Sinusoid Frequency Estimate ...	108
5.1	Introduction	108
5.2	Common Sinusoid Frequency Estimation Algorithms	109
5.2.1	Maximum Likelihood Estimation	109
5.2.2	Suboptimum Frequency Estimations Based on DFT	109
5.2.3	Phase-based Frequency Estimations	114
5.3	Credibility Evaluation of the Sinusoid Frequency Estimate Based on	
	the LMP Criterion	114
5.3.1	Feature Analysis	115
5.3.2	Algorithm Description	117
5.3.3	Theoretical Performance Analysis	122
5.4	Credibility Evaluation of the Sinusoid Frequency Estimate Based on	
	the Chebyshev Inequality	123
5.4.1	Chebyshev Inequality	123
5.4.2	Statistic Determination	123
5.4.3	Decision Criterion and Threshold	124
5.4.4	Theoretical Performance Analysis	125
5.5	Performance Analysis by Simulations	127
5.5.1	Verification of Correctness of Theoretical	
	Performance Analyses	127
5.5.2	A Case Study	129
5.5.3	Complexity Analyses of Algorithms	130