学术专著

# 雷达对抗信息处理

何明浩　著



清华大学出版社

学术专著

# 雷达对抗信息处理

**Radar Countermeasures Information Processing**

何明浩　著

清 华 大 学 出 版 社
北　京

版权所有，侵权必究。侵权举报电话：010-62782989　13701121933

**图书在版编目(CIP)数据**

雷达对抗信息处理/何明浩著.--北京：清华大学出版社，2010.5
ISBN 978-7-302-22294-1

Ⅰ.①雷…　Ⅱ.①何…　Ⅲ.①雷达对抗－信息处理　Ⅳ.①TN974

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 054950 号

**责任编辑**：邹开颜　赵从棉
**责任校对**：刘玉霞
**责任印制**：

**出版发行**：清华大学出版社　　**地　址**：北京清华大学学研大厦 A 座
http://www.tup.com.cn　　**邮　编**：100084
**社　总　机**：010-62770175　　**邮　购**：010-62786544
**投稿与读者服务**：010-62776969，c-service@tup.tsinghua.edu.cn
**质　量　反　馈**：010-62772015，zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn
**印 刷 者**：
**装 订 者**：
**经　销**：全国新华书店
**开　本**：153×235　**印张**：17.25　**插页**：1　**字　数**：289 千字
**版　次**：2010 年 5 月第 1 版　　**印　次**：2010 年 5 月第1次印刷
**印　数**：1～　000
**定　价**：　.00 元

产品编号：

# 作者简介



**何明浩**，教授，博士，博士生导师。空军级专家，中国电子学会电磁散射专业委员会委员，空军高级职称评审委员会委员。主要研究雷达系统工程、电子对抗信息处理以及电磁场与微波技术等。主持和参加了多项空军装备发展规划论证工作；主持了多种新型雷达和电子对抗装备的跟踪研究工作；主持参加了 10 多项总装和空军科研项目及军事理论的研究工作，获军队科技进步奖和军事理论研究成果奖共 15 项。发表学术论文 80 余篇，出版著作 4 部。

# 内容简介

《雷达对抗信息处理》为系统介绍现代雷达对抗信息处理基本理论、方法和实现技术的一本专著，全书内容共分 8 章。第 1 章介绍了雷达对抗的信号环境、雷达对抗信息处理的一般概念和雷达对抗信息处理的发展和现状；第 2 章阐述了雷达对抗信息处理中的几个关键问题，包括 PDW 生成、信号分选识别、脉内特征提取和辐射源的无源定位等；第 3 章介绍了利用 PRI 实现雷达信号分选的技术，内容涉及重频分选与检测的相关理论与方法；第 4 章探讨了采用多参数进行信号分选识别所涉及的特征参数选取和分类器选择问题；第 5 章讨论了雷达信号脉内调制特征分析的原理与特征提取方法；第 6 章介绍了对雷达辐射源进行无源定位的技术，包括对雷达辐射源定位的多站和单站无源定位技术；第 7 章探讨研究了单站被动目标跟踪的原理、内容以及相关算法；第 8 章探讨研究了单站无源定位中相关参数的测量技术，内容涉及波达角及其变化率和多普勒频率变化率等参数的测量原理与方法。

本书可供从事雷达和电子对抗专业的工程技术人员使用，也可作为该专业方向研究生的专业教材和参考书。

# Brief

This book is a monograph on modern radar countermeasures information processing, which introduces theory, methods, and implementation technology. There are 8 chapters in this book. Chapter 1 introduces the signal environment of radar countermeasures, generic concept, and development of radar countermeasures information processing. Chapter 2 introduces some key technologies of radar countermeasures signal processing, including the creating of PDW, sorting, and recognition of radar signals, extracting the intra-pulse modulation of radar signals and the passive location of radar emitter. Chapter 3 introduces the sorting technique of radar signals based on PRI, including the theory and methods of PRI sorting and detection. Chapter 4 discusses the methods of extracting the characteristic parameter and the choice of classifiers, which are used in multi-parameter signals sorting and recognition. Chapter 5 discusses the theory of radar signals intra-pulse modulation characteristic and the extraction algorithm of the characteristic. Chapter 6 analysis the technique of passive localization on radar signals emitter, including multi-observers and single observer passive location technique. Chapter 7 discusses the theory, content, and algorithm of the single observer passive tracking. Chapter 8 researches the parameter measurement technique of single observer passive localization, including the arrival of angle and its rate-of-change, Doppler frequency rate-of-change.

This book may be useful to those engineering technicians who are engaged in radar, electronic countermeasure system, and signal processing system research. It may also be useful to upperclassman and graduates in colleges or universities.

# 序

21世纪是电子战、信息战时代，随着信息技术的发展及其在军事斗争中的应用，战争由物理维向信息维与认知维拓展，夺取和保持制信息权已成为现代战争中参战各方争夺的重点。近几场局部战争不断证明，信息的对抗已成为现代高技术条件下的重要作战样式，左右着战争的结局。从20世纪初，信息对抗伴随着无线电通信技术的问世而首先在战争中得到应用。从有电报开始就有对抗，经过100多年的发展，它已成为涵盖雷达对抗、通信对抗、光电对抗、网络对抗和水声对抗等多学科的、综合一体化的电子信息技术。

雷达对抗技术作为信息对抗技术的重要组成部分，经过半个多世纪的发展，已逐步系统化、成熟化，显现出强大的生命力和战斗力。雷达对抗信息处理是雷达对抗技术中最具生机与活力，也是最能反映高新技术进展的领域，是雷达对抗侦察系统的核心。在过去的50多年中，世界各国的众多专家学者在这方面进行了深入系统的研究，取得了丰硕的成果，极大地推动了这一学科领域的发展。

目前，雷达对抗信息处理理论与技术正日趋成熟，特别是随着现代电子战、信息战的激烈对抗和雷达技术的迅猛发展，雷达对抗信息处理领域的专家学者在应对这些新的问题和挑战方面，作了大量卓有成效的探索和研究，但一直没有一本较为系统地阐述雷达对抗信息处理理论与技术的著作。何明浩教授及其团队长期致力于雷达对抗信息处理领域的研究，提出了许多新的理论和方法，在这一领域具有广泛影响。《雷达对抗信息处理》这一专著，较为全面地总结了雷达对抗信息处理领域数十年的相关研究成果，系统阐述了雷达对抗信息处理的概念定义、基础理论和关键技术，书中很多内容都是作者及其团队多年来的研究积淀和创新拓展。本书是国内雷达对抗信息处理学科领域的第一本学术专著，可作为高等院校雷达、电子对抗和信号与信息处理专业高年级学生、研究生的专业课教材，也可供从事雷达对抗信息处理相关专业领域科研人员和工程技术人员学习参考。本书的出

版是信息对抗学科建设的重要成果，具有重要意义，对从事雷达对抗信息处理与应用领域的科技人员及高等院校师生大有裨益，必将有力地促进雷达对抗人才培养和武器装备建设，为我国信息对抗技术的发展做出重要贡献。

张锡祥

2010 年 3 月于成都

# 前　言

随着现代电子战的激烈对抗和雷达技术的迅猛发展，雷达对抗信息处理技术在新型的雷达对抗侦察系统中得到越来越广泛的应用，迫切的军事应用需求极大地推动了雷达对抗信息处理及其相关领域的发展。雷达对抗信息处理的相关理论和方法日趋系统和成熟，随着电磁环境日益密集、复杂和多变，新理论、新方法也不断涌现，仍处于方兴未艾的蓬勃发展之中；雷达对抗信息处理方法和技术军事应用背景很强，相关研究和消息保密十分严格，要想完整、系统与全面地阐述该领域的丰富知识和应用以及反映其最新的研究成果，难度很大。但高等院校、科研院所以及武器装备生产部门迫切需要一本较系统完整地阐述雷达对抗信息处理理论和技术的著作。为此，我们全面总结了近 20 年关于雷达对抗信息处理方面的相关研究成果，结合我们多年来的研究实践、教学体会和部队支援，写成此书，相信它能对从事雷达和电子对抗与应用领域的科技工作者及高等院校师生有所帮助。

本书以雷达对抗侦察系统中的信息处理技术为研究对象，全面阐述了雷达对抗信息处理的基本原理与主要技术，既注重对雷达对抗信息处理基本概念与理论的叙述，又对其实现方法作了介绍；在内容上主要覆盖现代雷达对抗侦察系统中比较成熟的雷达对抗信息处理技术，兼顾了其前沿知识和发展趋势；在公式的推导上力求准确、严密，但也删舍了一些十分复杂的推导过程。很多内容取材于各阶段的研究、论证、试验报告，以及各阶段从事研究的博士及硕士研究生论文内容，在介绍基础知识的基础上，力求反映雷达对抗信息处理的新思想、新理论、新概念和新技术。

本书内容是在何明浩教授及其团队经过 10 多年探索研究和试验实践的基础上总结归纳出来的，从事该方向工作的博士及硕士研究生对推进雷达对抗信息处理技术的研究做出了贡献，付出了辛勤劳动。王建涛博士后对全书的结构、内容提出了许多好的建议，在试验研究和书稿撰写方面，朱元清教授、郁春来博士、陈昌孝博士、韩俊博士、冒燕硕士、郭国华硕士和徐璟硕士等做出了很大贡献，在此一并表示谢意。

由于雷达对抗信息处理理论和技术发展极为迅速，军事应用领域甚广，加上作者水平有限，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。

何明浩

2010 年 3 月于武汉

# 目　　录

缩略语 …… 21

**第 1 章　绪论** …… 1
1.1　雷达对抗信号环境分析 …… 1
1.1.1　雷达对抗信号环境的定义 …… 1
1.1.2　信号环境在雷达对抗侦察系统中的参数和描述 …… 2
1.1.3　雷达对抗信号环境的特点 …… 3
1.2　雷达对抗信息处理的一般概念 …… 4
1.2.1　雷达对抗侦察系统 …… 4
1.2.2　雷达对抗信息处理的历史 …… 5
1.2.3　雷达对抗信息处理的功能 …… 7
1.3　雷达对抗信息处理发展与现状 …… 8
1.3.1　雷达信号分选与识别 …… 8
1.3.2　雷达信号脉内调制特征分析 …… 12
1.3.3　雷达辐射源的无源定位 …… 13
1.4　本书的主要内容 …… 17
参考文献 …… 18

**第 2 章　雷达对抗信息处理的几个关键问题** …… 22
2.1　脉冲描述字的生成 …… 22
2.1.1　载频的测量 …… 22
2.1.2　到达角的测量 …… 26
2.1.3　到达时间的测量 …… 28
2.1.4　脉宽的测量 …… 29
2.1.5　脉幅的测量 …… 30
2.1.6　PDW 的采集和存储 …… 31

2.2 信号的分选与识别 …… 32
2.2.1 信号分选与识别的基本原理 …… 33
2.2.2 信号分选与识别的技术 …… 34
2.3 雷达信号脉内特征分析 …… 35
2.3.1 脉内调制信号特性 …… 35
2.3.2 脉内特征分析原理 …… 36
2.3.3 雷达信号脉内特征分析技术 …… 37
2.4 对雷达辐射源的无源定位 …… 38
2.4.1 无源定位的特点与主要技术指标 …… 38
2.4.2 无源定位的基本原理 …… 40
2.4.3 无源定位的发展及现状 …… 42
2.5 本章小结 …… 45
参考文献 …… 45

**第 3 章 基于 PRI 的信号分选** …… 48
3.1 雷达信号 PRI 的数学描述 …… 48
3.1.1 重频固定 …… 48
3.1.2 重频参差 …… 49
3.1.3 重频滑变 …… 50
3.1.4 重频抖动 …… 50
3.1.5 重频分组 …… 51
3.1.6 重频正弦调制 …… 51
3.1.7 重频脉冲群 …… 51
3.1.8 受控的重频 …… 52
3.2 直方图分选 …… 52
3.2.1 统计直方图分选 …… 52
3.2.2 累积差直方图分选 …… 53
3.2.3 序列差直方图分选 …… 55
3.3 平面变换技术 …… 58
3.4 基于 PRI 变换的脉冲重复间隔估计 …… 63
3.4.1 PRI 变换的原理 …… 64
3.4.2 PRI 变换的检测门限 …… 66
3.4.3 运算量分析 …… 67

3.4.4 改进的 PRI 变换算法 …… 67
3.5 SDIF 和 PRI 变换相结合的信号分选 …… 70
3.6 本章小结 …… 73
参考文献 …… 73

**第 4 章 基于多参数的信号分选与识别** …… 75
4.1 特征参数选取 …… 75
4.1.1 相像系数 …… 75
4.1.2 熵值 …… 76
4.1.3 小波包 …… 77
4.1.4 复杂度 …… 78
4.2 分类器选择 …… 78
4.2.1 BP 神经网络 …… 79
4.2.2 Kohonen 神经网络 …… 81
4.2.3 RBF 神经网络 …… 83
4.2.4 支持矢量机 …… 90
4.3 性能分析 …… 95
4.3.1 特征参数的影响 …… 96
4.3.2 分类器的影响 …… 97
4.4 本章小结 …… 100
参考文献 …… 100

**第 5 章 雷达信号脉内特征分析** …… 103
5.1 脉内有意调制特征分析的传统算法 …… 103
5.1.1 雷达信号脉内特征的数学描述 …… 104
5.1.2 瞬时自相关算法 …… 105
5.1.3 短时傅里叶变换 …… 107
5.1.4 实时频谱分析法 …… 109
5.1.5 调制域分析法 …… 109
5.2 脉内有意调制特征分析的现代算法 …… 110
5.2.1 Winger-Vill 分布 …… 110
5.2.2 小波分析 …… 115
5.2.3 重排算法 …… 123

5.2.4 时频原子特征提取…… 126
5.3 雷达信号指纹特征识别 …… 130
5.3.1 指纹特征识别的基本概念…… 130
5.3.2 雷达信号指纹识别技术的发展和现状…… 131
5.3.3 雷达信号指纹特征识别存在的问题…… 134
5.3.4 雷达信号指纹特征分析举例…… 137
5.4 本章小结 …… 140
参考文献…… 140

**第 6 章 无源定位技术**…… 143
6.1 无源定位的基本原理 …… 143
6.1.1 空间定位原理…… 143
6.1.2 无源定位的坐标系和坐标转换…… 146
6.1.3 无源定位误差的度量…… 152
6.2 多站无源定位技术 …… 156
6.2.1 测向交叉定位…… 156
6.2.2 时差定位…… 160
6.2.3 测向-时差定位 …… 166
6.3 利用空频域信息的单站无源定位技术 …… 167
6.3.1 质点运动学分析的数学基础…… 167
6.3.2 利用空频域信息的单站无源定位模型…… 169
6.3.3 利用空频域信息的即时定位原理…… 172
6.3.4 即时定位的测距误差分析…… 173
6.4 本章小结 …… 175
参考文献…… 175

**第 7 章 单站被动目标跟踪技术**…… 178
7.1 非线性 Bayes 跟踪滤波算法 …… 179
7.1.1 最优贝叶斯滤波…… 179
7.1.2 EKF 及其衍生算法 …… 180
7.1.3 UT 变换及 UKF 滤波算法 …… 185
7.1.4 粒子滤波算法…… 188
7.2 利用空频域信息的简化 UKF 算法 …… 189

7.2.1 基于空频域信息的单站被动目标跟踪模型…… 190
7.2.2 简化 UKF 算法 …… 193
7.3 利用空频域信息的稳定 UKF 算法 …… 195
7.3.1 利用空频域信息的单站被动目标跟踪系统特点…… 195
7.3.2 极坐标系中单站被动目标跟踪模型…… 199
7.3.3 PCUKF 被动目标跟踪算法 …… 200
7.4 单站被动目标跟踪算法性能分析 …… 202
7.4.1 不同观测精度下的滤波性能…… 203
7.4.2 单个观测量对滤波性能的影响…… 206
7.5 本章小结 …… 209
参考文献…… 209

**第 8 章 单站无源定位中的参数测量技术**…… 212
8.1 波达角测量技术 …… 212
8.1.1 全向振幅单脉冲测向技术…… 212
8.1.2 相位干涉仪测向技术…… 215
8.1.3 数字测向技术…… 216
8.2 波达角变化率测量技术 …… 219
8.2.1 波达角变化率取值分析…… 219
8.2.2 接收信号的相位差模型…… 220
8.2.3 波达角变化率的测量技术…… 221
8.3 多普勒频率变化率测量技术 …… 224
8.3.1 多普勒频率及其变化率的数学模型…… 224
8.3.2 多普勒频率变化率测量原理和方法…… 228
8.3.3 DFREFE 类算法 …… 231
8.3.4 DFREPE 类算法 …… 235
8.4 本章小结 …… 250
参考文献…… 250

# Contents

Abbreviation ····· *21*

**Chapter 1 Introduction** ····· 1

1.1 The analysis of radar countermeasure signal environment ····· 1

1.1.1 Definition of radar countermeasure signal environment ····· 1

1.1.2 Parameters and description of signal environment in radar countermeasure reconnaissance system ····· 2

1.1.3 Characteristics of radar countermeasure environment ····· 3

1.2 General concept of radar countermeasure information processing ····· 4

1.2.1 Radar countermeasure reconnaissance system ····· 4

1.2.2 History of radar countermeasure information processing ····· 5

1.2.3 Function of radar countermeasure information processing ····· 7

1.3 Actuality and developing trend of radar countermeasure information processing ····· 8

1.3.1 Radar signal sorting and recognition ····· 8

1.3.2 Intra-pulse modulation signature analysis of radar signal ····· 12

1.3.3 Passive location of radar emitter ····· 13

1.4 Primary content of this book ····· 17

References ····· 18

**Chapter 2 Some key technologies of radar countermeasures signal processing** …… 22
2.1 Creation of PDW …… 22
2.1.1 Frequency measurement …… 22
2.1.2 Angle of arrival measurement …… 26
2.1.3 Time of arrival measurement …… 28
2.1.4 Pulse width measurement …… 29
2.1.5 Pulse amplitude measurement …… 30
2.1.6 Collection and proceeding of PDW …… 31
2.2 Signal sorting and recognition …… 32
2.2.1 Basic theory of signal sorting and recognition …… 33
2.2.2 Technique of signal sorting and recognition …… 34
2.3 Intra-pulse characteristic analysis of radar signal …… 35
2.3.1 Characteristic of intra-pulse modulated signal …… 35
2.3.2 Theory of intra-pulse characteristic analysis …… 36
2.3.3 Technique of radar signal intra-pulse characteristic analysis …… 37
2.4 Passive location of radar emitter …… 38
2.4.1 Characteristic and main technique index of passive location …… 38
2.4.2 Basic theory of passive location …… 40
2.4.3 Passive location and its developing actuality …… 42
2.5 Brief summary …… 45
References …… 45

**Chapter 3 Signal sorting based on PRI** …… 48
3.1 Math description of radar signal's PRI …… 48
3.1.1 Fixed repetition frequency …… 48
3.1.2 Staggered repetition frequency …… 49
3.1.3 Slip repetition frequency …… 50
3.1.4 Jittered repetition frequency …… 50
3.1.5 Grouping repetition frequency …… 51
3.1.6 Sinusoid Modulated repetition frequency …… 51