

# 防空雷达 目标识别技术

---

Target Recognition Techniques of  
Surveillance Radar

丁建江 编著



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

# 防空雷达目标识别技术

Target Recognition Techniques of Surveillance Radar

丁建江 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

防空雷达目标识别技术 / 丁建江编著. —北京:国防工业出版社, 2008. 5

ISBN 978 - 7 - 118 - 05475 - 0

I. 防... II. 丁... III. 防空—目标识别雷达 IV. TN959. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 181897 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 100044)

京南印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850 × 1168 1/32 印张 6¼ 字数 150 千字

2008 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 24.00 元

---

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764

## 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  
第五届评审委员会组成人员

主任委员	刘成海				
副主任委员	王峰	张涵信	程洪彬		
秘书长	程洪彬				
副秘书长	彭华良	蔡镛			
委员	于景元	王小谟	甘茂治	刘世参	
(按姓氏笔画排序)	李德毅	杨星豪	吴有生	何新贵	
	佟玉民	宋家树	张立同	张鸿元	
	陈冀胜	周一宇	赵凤起	侯正明	
	常显奇	崔尔杰	韩祖南	傅惠民	
	舒长胜				
本书主审委员	王小谟				

# 前 言

防空雷达飞机目标自动分类和辨识一直是雷达目标识别领域研究的难点,也是我国防空预警系统急需解决的问题。现役防空雷达自动识别飞机的难点主要来自雷达体制,一是低分辨窄带单一极化发射信号不能完全激励飞机目标的物理特征,即特征信息不完整;二是可能有的特征信息被性能低下的防空雷达系统限制,即特征信息受限。

本书综合运用电磁散射理论、飞机气动力学理论、雷达系统理论、现代信号处理理论,比较系统地分析了飞机旋转部件调制特征产生的物理机理和现役防空雷达回波信号特点,剖析了防空雷达回波复包络的调制特性与飞机目标物理特征的对应关系,为从防空雷达飞机回波复包络中分析、提取和应用调制特征提供了物理解释。

全书共分6章。第1章是雷达飞机目标识别的概述。第2章描述雷达飞机目标识别的基础理论。第3章重点研究飞机回波调制特性参数建模。在分析调制机理和调制特性理论参数模型的基础上,提出了适合现役防空雷达实际的飞机回波调制特性的参数模型,详细分析讨论了实际飞机结构和飞行姿态、防空雷达参数和工作状态对该参数模型和调制特征的影响,并通过真实参数仿真与多种实际回波分析验证了该参数模型的正确性。第4章研究重点是分析与提取识别特征。基于对调制特征产生机理和防空雷达回波性质的理解,有针对性地提出了多种调制特征估计新方法,并在防空雷达回波中提取了与飞机物理特征相对应的幅度、相位和周期调制特征。第5章研究重点是识别特征运用与分类器设计。

基于这3种调制特征和最近邻分类法,提出了特征最近邻逐级分类法,实现了防空雷达3类多种飞机的自动分类,验证了调制特征用于防空雷达飞机目标自动分类的有效性,在此基础上为现役防空雷达设计了3种实用的目标识别系统。第6章是讨论防空雷达目标识别新思路。充分考虑现代战争军事需求、目标特性、战场环境、防空雷达装备与技术的实际发展,提出了几种适合防空雷达实际的飞机目标识别新思路。研究表明:防空雷达飞机目标回波复包络中含有由飞机旋转部件产生的调制特征,这种调制特征既与飞机物理特征相对应,又可用参数模型描述,还可通过现代信号处理方法提取出来,能有效地用于防空雷达飞机目标的自动分类。

该书具有三个明显的特点。第一个特点是综合性强,综合运用电磁散射理论、飞机气动力学理论、雷达系统理论、现代信号处理等理论来研究目标识别领域中“雷达探测—目标散射—信息处理”等关键问题。第二个特点是用“物理机理—数学模型—具体方法—实验验证—工程应用”联系的观点分析研究问题,比较系统地分析描述了飞机旋转部件调制特征产生的物理机理和现役防空雷达回波信号特点,剖析防空雷达回波复包络序列的调制特性与飞机目标物理特征的对应关系。第三个特点是理论与实际紧密结合,研究分析问题在充分考虑实际雷达、飞机和环境等主要因素的基础上,结合实际防空雷达飞机目标回波的数据,重点研究飞机目标特征产生的物理机理、回波特性的数学建模、回波中相对不变特征分析和提取方法、调制特征应用与分类识别器设计等理论与技术内容,有针对性地研究提出了多种调制特征估计与识别的新方法,这对解决各种雷达目标识别研究难题与新一代目标识别雷达的研发,具有较好的参考价值。

本书是在清华大学工学博士论文“飞机目标调制特征的研究及应用”和雷达学院信号与信息处理学科研究生课程讲义“雷达目标识别”的基础上修改充实,加上近几年来在雷达目标领域科



研工作总结而完成的。本书研究成果得到了清华大学智能技术与系统国家重点实验室国家自然科学基金项目“非平稳/非高斯环境下的智能系统辨识与信号检测”(编号 69772023)、西安电子科技大学雷达信号处理国防重点实验室基金项目“基于时频高阶谱的雷达目标特征提取和自动目标识别”(编号 99JS01. 3. 1. JW0113)、总装备部重点科研项目“×××飞机自动辨识与告警系统”(编号 KJ04101)和“有源/无源一体化雷达体制论证”(编号 KJ06110)、空军雷达学院科研基金项目“雷达目标特性研究”(编号 LD200111)、中国电子科技集团公司基金项目“防空雷达飞机目标回波特性的分析与建模”(编号 SSS04LD03)、中国兵器装备集团公司基金项目“×××系列雷达目标识别功能的研究”(编号 BH07LD03)的大力支持。

在本书的写作酝酿阶段,得到了清华大学张贤达教授和北京航空航天大学毛士艺教授的积极鼓励和支持;初稿形成后,得到西安电子科技大学教授、中科院院士保铮教授的全面细致的审阅,提出了许多极其中肯的宝贵建议,为进一步修改指明了方向;阮崇籍、杨大志、吕金建、许红波等博士研究生参加了有关课题的研究,做了很多工作;国防工业出版社的同志们为本书的编辑出版也给予了极大的支持;借此机会向他们表示最诚挚的谢意。向本书参考文献的有关作者致以衷心的感谢。

由于作者水平所限,书中难免有不妥及错误之处,热忱欢迎读者批评指正。

# 目 录

<b>第 1 章 概论</b> .....	1
1.1 雷达目标识别 .....	1
1.1.1 雷达目标识别的一般描述 .....	1
1.1.2 雷达目标识别需求分析 .....	3
1.2 防空雷达飞机目标识别研究状况与进展 .....	6
1.2.1 国外研究现状与进展 .....	6
1.2.2 国内研究现状与进展 .....	9
1.2.3 飞机目标调制特征的研究和应用 .....	11
1.2.4 雷达目标识别研究动态的综述 .....	13
1.3 研究防空雷达目标识别的重点和思路 .....	15
<b>第 2 章 雷达目标识别的基础理论</b> .....	19
2.1 引言 .....	19
2.2 雷达目标识别系统的基本原理 .....	20
2.2.1 雷达识别系统的基本组成 .....	20
2.2.2 雷达识别系统的复杂性 .....	21
2.2.3 雷达识别的物理基础 .....	21
2.2.4 识别系统有效性评估指标 .....	22
2.3 现代信号处理与雷达目标特征提取 .....	23
2.3.1 现代信号处理技术在特征分析和提 取中的应用 .....	23
2.3.2 基于回波信号提取特征的主要方法 .....	26

2.4	智能模式识别与雷达目标识别的主要方法 .....	27
2.4.1	常用模式识别方法的比较 .....	27
2.4.2	雷达目标识别方法的分类 .....	29
2.5	目标雷达特性与目标物理特征的关系 .....	30
2.5.1	目标雷达特性的概述 .....	30
2.5.2	回波的 RCS 特性与目标尺寸和雷 达波长的关系 .....	32
2.5.3	回波的起伏谱特性与目标结构和运 动状态的关系 .....	36
2.5.4	回波的极化特性与目标结构和雷达 发射信号的关系 .....	38
2.5.5	回波特性与雷达系统稳定性的关系 .....	39
2.6	防空雷达识别飞机的难题与进一步挖掘特征的想法 .....	40
2.6.1	存在的难题和要解决的关键问题 .....	40
2.6.2	可选用的特征和进一步挖掘特征的想法 .....	41
<b>第3章</b>	<b>飞机目标电磁散射机理分析与特性建模 .....</b>	<b>43</b>
3.1	引言 .....	43
3.2	光学区防空雷达飞机局部散射机理与散射模型 .....	44
3.2.1	飞机目标局部散射机理 .....	45
3.2.2	飞机目标局部散射 RCS 模型 .....	45
3.2.3	飞机旋转部件局部散射机理与散射模型 .....	47
3.3	飞机旋转部件调制特性的理论参数模型和仿真分析 .....	49
3.3.1	理论通用参数模型的推导 .....	49
3.3.2	理论参数模型的仿真分析 .....	56
3.4	实际防空雷达螺旋桨飞机回波调制特性的 建模和仿真 .....	57
3.4.1	实际螺旋桨飞机对理论参数模型的影响 .....	57
3.4.2	实际防空雷达对理论参数模型的影响 .....	60

3.4.3	真实飞机和雷达参数对调制模型的 仿真分析.....	63
3.4.4	两种参数相近的螺旋桨飞机调制 特征的仿真比较 .....	66
3.5	实际回波序列中调制特性的分析与调制模型的验证 .....	67
3.5.1	最佳探测距离处回波调制特性的分析.....	68
3.5.2	近距离处回波调制特性的分析 .....	70
3.5.3	远距离切向处回波调制特性的分析 .....	71
3.5.4	回波序列分析和模型验证结论 .....	72
3.6	不同雷达回波分析对调制模型的验证.....	72
3.6.1	调制模型对雷达参数变化的适应性 .....	73
3.6.2	调制模型对不同雷达的适应性 .....	74
3.7	不同飞机回波调制模型和调制特征的比较 .....	75
3.7.1	不同飞机及旋转部件物理特征的比较.....	75
3.7.2	模型比较与仿真分析 .....	77
3.7.3	实际回波中调制特征比较与模型验证.....	81
3.8	研究结论.....	82
<b>第4章</b>	<b>识别特征的分析与提取方法 .....</b>	<b>84</b>
4.1	引言 .....	84
4.2	实际防空雷达飞机回波幅、相调制现象的 分析与理解 .....	85
4.3	实际防空雷达回波信号的性质和特点.....	94
4.4	幅度、相位调制特征的分析与提取 .....	96
4.4.1	传统幅、相统计模型的局限性.....	96
4.4.2	基于调制机理的相对量分析法 .....	97
4.5	幅、相调制特征的提取与飞机分类效果的讨论.....	98
4.6	周期调制特征的分析与提取 .....	102
4.6.1	时域无偏自相关分析法 .....	102

4.6.2	时域倒谱分析法	104
4.6.3	频域复 AR 双谱切片分析法	105
4.6.4	脉间相位差分析法	111
4.6.5	时频域 WVD 分析法	113
4.7	有效回波数与周期调制特征	116
4.7.1	谱分辨力的比较	116
4.7.2	有效回波数与防空雷达目标搜索和识别的兼顾	117
4.8	周期调制特征的提取与飞机分类效果的讨论	118
4.9	研究结论	121
<b>第 5 章</b>	<b>防空雷达目标识别系统设计</b>	<b>122</b>
5.1	引言	122
5.2	回波数据采集与预处理方法	123
5.2.1	特征提取对回波采集系统的要求	123
5.2.2	采集系统的设计特点与回波数据采集	123
5.2.3	回波数据预处理的一般方法	125
5.2.4	非线性调频回波中频采集预处理举例	126
5.3	信息特征与决策规则的选择	131
5.3.1	信息特征的选择	131
5.3.2	决策规则的选择	133
5.4	设计实例 1:基于调制特征自动分类飞机的实验	137
5.4.1	模板生成与自适应修改	138
5.4.2	逐级最近邻分类算法	138
5.4.3	调制特征分类有效性和局限性的讨论	140
5.5	设计实例 2:防空雷达自动辨识螺旋桨飞机的研究	141
5.5.1	辨识螺旋桨飞机的必要性和重要性	141
5.5.2	辨识螺旋桨飞机的有利条件	142
5.5.3	辨识螺旋桨飞机系统的软件设计	143

5.6	设计实例3:防空雷达非合作目标识别系统的设计	144
5.7	国外防空雷达(系统)对目标综合识别的设计	146
5.7.1	美国“爱国者”防空系统的目标综合识别	146
5.7.2	法国空中卫士防空系统中目标综合识别	147
<b>第6章</b>	<b>防空雷达目标识别的新方法</b>	<b>149</b>
6.1	基于窄带/带宽技术相结合的目标识别方法	149
6.2	基于有源/无源技术相结合的目标识别方法	151
6.3	基于信息融合技术的目标识别方法	154
6.3.1	基于统计和估计的融合识别算法	155
6.3.2	基于信息论的融合识别算法	156
6.3.3	基于认识模型的融合识别算法	157
6.4	具有目标识别能力的新一代防空雷达的设计考虑	158
6.5	防空雷达目标识别技术研究的发展	159
<b>附录</b>	<b>国外目标识别功能试验雷达参数表</b>	<b>161</b>
<b>参考文献</b>		<b>165</b>

# Contents

<b>Chapter 1</b>	<b>Introduction</b>	1
1.1	Radar target recognition	1
1.1.1	General description for radar target recognition	1
1.1.2	Requirement analysis for radar target recognition	3
1.2	Research and advance in aircraft recognition of surveillance radar	6
1.2.1	Overseas research and advance	6
1.2.2	Domestic research and advance	9
1.2.3	Research and application in modulation signature of aircraft	11
1.2.4	Remark on research development of radar target recognition	13
1.3	Focus and ideas on target recognition of surveillance radar	15
<b>Chapter 2</b>	<b>The Basic theory on radar target recognition</b>	19
2.1	Introduction	19
2.2	The principle of radar target recognition system	20
2.2.1	The fundamental composition of radar target recognition system	20
2.2.2	Complexity of radar target recognition system	21
2.2.3	Physical basis of radar target recognition system	21

2.2.4	Evaluation index of efficiency for the recognition system .....	22
2.3	Modern signal processing and the extraction of radar target signature .....	23
2.3.1	The application of modern signal processing in analysis and extraction of signature .....	23
2.3.2	Methods of signature extraction from radar returns .....	26
2.4	Intelligent pattern recognition and the major means of radar target recognition .....	27
2.4.1	Comparison with the popular pattern recognition methods .....	27
2.4.2	Classification of radar target recognition methods .....	29
2.5	Relations between radar target characteristics and target physical property .....	30
2.5.1	Introduction to the radar characteristics of target .....	30
2.5.2	Relations between RCS characteristics of radar returns, target size and radar wavelength .....	32
2.5.3	Relations between the characteristics of target fluctuation spectrum target structure and motion status .....	36
2.5.4	Relations between polarization characteristics of radar returns, target structure and radar transmitted signal .....	38
2.5.5	Relations between the property of radar turns and the stability of radar system .....	39
2.6	The difficulty in digging features of aircraft recognition with surveillance radar .....	40



2.6.1	The difficulty and the key problems	40
2.6.2	The choosable features and ideas of feather digging features	41
<b>Chapter 3</b>	<b>Analysis of mechanism for aircraft scattering and model of characteristics</b>	<b>43</b>
3.1	Introduction	43
3.2	Aircraft local scattering mechanism and model of surveillance radar in optical region	44
3.2.1	Aircraft local scattering mechanism	45
3.2.2	RCS model of Aircraft local scattering	45
3.2.3	Local scattering mechanism and model of aircraft rotating parts	47
3.3	Theoretical parameter model and simulation analysis of aircraft rotating parts' modulation characteristics	49
3.3.1	Derivation of universal practical parameter model	49
3.3.2	Simulation analysis of practical parameter model	56
3.4	Modelization and simulation of propeller airplane's modulation characteristics by practical surveillance radar	57
3.4.1	Affection of practical propeller airplane to theoretical parameter model	57
3.4.2	Affection of practical surveillance radar to theoretical parameter model	60
3.4.3	Simulation analysis of modulation model by true aircrafts and surveillance radar	63
3.4.4	Comparison by simulation of modulation features for two approximate propeller airplanes	66