



国防科技图书出版基金

雷达目标 微多普勒效应

Micro-Doppler Effect of Radar Targets

张群 罗迎 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

雷达目标微多普勒效应

Micro-Doppler Effect of Radar Targets

张群 罗迎 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

雷达目标微多普勒效应 / 张群, 罗迎著. —北京:
国防工业出版社, 2013. 10

ISBN 978 - 7 - 118 - 09070 - 3

I. ①雷... II. ①张... ②罗... III. ①雷达目标 - 多
普勒效应 - 研究 IV. ①TN951

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 243703 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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 77% 字数 219 千字

2013 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 36.00 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出出版。

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	陆 军	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
	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

雷达目标识别技术在雷达系统中一直起着举足轻重的作用,同时也是雷达技术发展中最为活跃的部分之一。宽带/超宽带信号处理技术、半导体技术和计算机技术的突飞猛进,使得雷达从单一的定位、测轨功能发展到同时具备多种特征量测量的能力,从而深刻地改变了雷达的内涵,即从传统的用于检测、测距和测角等坐标参数测量的观测跟踪雷达,发展为用于目标精细结构和精细运动特征提取等目的的特征测量雷达。一般来说,雷达目标特征信息隐含于雷达回波中,通过特定的波形设计和对回波幅度与相位的处理、分析与变换,可以得到目标的雷达散射截面(RCS)及其起伏统计模型、多普勒谱、高分辨雷达像、目标极化散射矩阵等特征量。但随着目标特征控制技术的快速发展,假目标和诱饵已经能够精确模仿真实目标的 RCS、轨道、几何结构、表面材料等特征,使得基于传统特征量的雷达目标识别变得困难甚至失效。微动是由目标的特殊结构在特定的受力作用下引起的,常常是目标“独一无二”的运动状态,属于目标的精细特征。由于微动为小幅运动,可控性低,对目标微动的模仿十分困难,因此基于微动特征的目标识别技术已被认为是雷达目标识别技术中最具发展潜力的技术之一,近年来得到了国内外研究人员的广泛关注。

本书作者近年来在国家自然科学基金项目“运动目标的微多普勒信息提取技术研究”(No. 60672032)、国家自然科学基金项目“MIMO 雷达系统中运动目标微多普勒特征提取及成像技术研究”(No. 60971100)和国家自然科学基金青年基金项目“基于资源优化调度的雷达

目标微多普勒特征认知提取方法研究”(No. 61201369)的支持下,针对雷达目标微多普勒效应理论及相关技术开展了较为深入的研究。本书结合作者近年来的研究成果,从微多普勒效应分析和微多普勒特征提取方法两方面深入阐述了雷达目标微多普勒效应机理,分析了各种微动目标在不同雷达体制下的微多普勒效应,论述了多种不同的微多普勒特征提取方法和三维微动特征重构方法。

全书共分7章。第1章介绍了雷达目标微多普勒效应的概念、基本原理、应用领域、研究历史与现状;第2章~第4章分析了各种不同雷达体制中目标的微多普勒效应,其中第2章主要论述了窄带雷达中目标的微多普勒效应;第3章主要论述了宽带雷达中目标的微多普勒效应;第4章主要论述了双基雷达中目标微多普勒效应;第5章和第6章阐述了微多普勒特征提取方法,其中第5章详细论述了时频分析、图像处理、正交匹配追踪分解、经验模式分解和高阶矩函数分析等微多普勒特征分析与提取方法;第6章论述了三维微动特征重构方法;第7章总结了全书内容,并对微多普勒效应理论的发展前景做了展望。

在本书的撰写过程中,得到了吴一戎院士、金亚秋院士的指导和大力支持,在此表示衷心的感谢。博士研究生邓冬虎撰写了第5.5节,博士研究生李开明、杨小优、梁颖、顾福飞以及硕士研究生赵园青、徐艺萌参与了本书的校对工作,在此一并表示感谢。

由于作者研究范围和研究精力所限,关于微多普勒效应研究的诸多方面本书未能全部涉及。同时,由于雷达目标微多普勒效应研究仍处于飞速发展当中,许多理论和工程技术都有待于进一步深入研究和工程实践,因此本书难免有不当和错误之处,敬请读者批评指正。

作 者

2013年1月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 目标散射点模型	1
1.2 微多普勒效应的概念	3
1.2.1 多普勒效应	3
1.2.2 微多普勒效应	5
1.3 微多普勒效应研究与应用	7
1.4 本书内容结构	17
参考文献	18
第 2 章 窄带雷达中目标微多普勒效应	22
2.1 旋转目标微多普勒效应	22
2.2 振动目标微多普勒效应	31
2.3 进动目标微多普勒效应	35
2.4 雷达平台振动对目标微多普勒效应的影响	42
参考文献	46
第 3 章 宽带雷达中目标微多普勒效应	47
3.1 宽带信号回波模型	49
3.2 线性调频信号体制雷达中目标微多普勒效应	51
3.2.1 线性调频信号	51
3.2.2 一维距离成像	52
3.2.3 旋转目标微多普勒效应	55

3.2.4 振动目标微多普勒效应	60
3.2.5 进动目标微多普勒效应	64
3.3 线性调频步进信号体制雷达中目标 微多普勒效应	67
3.3.1 一维距离成像	67
3.3.2 微动引起的距离像走动和卷绕	69
3.3.3 旋转和振动目标微多普勒效应	72
3.4 线性调频连续波信号体制雷达中目标 微多普勒效应	75
3.4.1 线性调频连续波信号	75
3.4.2 微动引起的距离像走动和展宽	76
3.4.3 旋转和振动目标微多普勒效应	79
参考文献	81
第4章 双基雷达中目标微多普勒效应	82
4.1 双基地雷达	82
4.2 窄带双基雷达微多普勒效应	83
4.3 宽带双基雷达微多普勒效应	90
4.3.1 双基雷达距离分辨率	90
4.3.2 微多普勒效应	92
参考文献	98
第5章 微多普勒特征分析与提取	99
5.1 时频分析方法	99
5.1.1 时频分析方法简介	99
5.1.2 基于时频分析的微多普勒特征分析	106
5.2 图像处理方法	113
5.2.1 数学形态学图像处理	114
5.2.2 Hough 变换法	118

5.2.3 图像处理方法在 SFCS 雷达微多普勒 特征提取中的应用	121
5.3 正交匹配追踪分解法	132
5.3.1 窄带雷达应用	133
5.3.2 宽带雷达应用	134
5.4 经验模式分解法	150
5.5 高阶矩函数分析法	160
5.5.1 窄带雷达应用	160
5.5.2 宽带雷达应用	172
5.6 几种方法的比较	185
附录 5 - A	187
附录 5 - B	189
参考文献	189
第 6 章 三维微动特征重构	191
6.1 多基雷达技术	191
6.2 窄带 MIMO 雷达三维微动特征重构	193
6.2.1 窄带 MIMO 雷达微多普勒效应	193
6.2.2 旋转目标三维微动特征重构	195
6.3 宽带 MIMO 雷达三维微动特征重构	201
6.3.1 正交频分线性调频 (OFDM - LFM) 信号	201
6.3.2 微多普勒效应	203
6.3.3 旋转目标三维微动特征重构	206
6.4 进动目标三维微动特征重构	211
6.4.1 分布式组网雷达中进动目标回波模型	212
6.4.2 三维进动特征重构	213
附录 6 - A	226
参考文献	229

第7章 总结与展望	231
-----------------	-----

英文缩略语	233
-------------	-----

Contents

Chapter 1 Preface	1
1.1 Scattering model of radar target	1
1.2 Concept of micro-Doppler effect	3
1.2.1 Doppler effect	3
1.2.2 micro-Doppler effect	5
1.3 Research and applications of micro-Doppler effect	7
1.4 Outline of the book	17
References	18
Chapter 2 micro-Doppler effect in narrowband radar	22
2.1 micro-Doppler effect of targets with rotation	22
2.2 micro-Doppler effect of targets with vibration	31
2.3 micro-Doppler effect of targets with precession	35
2.4 Influence on micro-Doppler effect when radar platform vibrating	42
References	46
Chapter 3 micro-Doppler effect in wideband radar	47
3.1 Echo model of wideband radar	49
3.2 micro-Doppler effect in linear frequency modulated signal radar	51
3.2.1 Linear frequency modulated signal	51

3.2.2	Range imaging	52
3.2.3	micro-Doppler effect of targets with rotation	55
3.2.4	micro-Doppler effect of targets with vibration	60
3.2.5	micro-Doppler effect of targets with precession	64
3.3	micro-Doppler effect in stepped-frequency chirp signal radar	67
3.3.1	Range imaging	67
3.3.2	Migration and wrapping of range profile induced by micro-motion	69
3.3.3	micro-Doppler effect of targets with rotation or vibration	72
3.4	micro-Doppler effect in LFM continuous wave radar	75
3.4.1	LFM continuous wave	75
3.4.2	Migration and broadening of range profile induced by micro-motion	76
3.4.3	micro-Doppler effect of targets with rotation or vibration	79
	References	81
Chapter 4	micro-Doppler effect in bistatic radar	82
4.1	Bistatic radar	82
4.2	micro-Doppler effect in narrowband bistatic radar	83
4.3	micro-Doppler effect in wideband bistatic radar	90
4.3.1	Range resolution of bistatic radar	90
4.3.2	micro-Doppler effect	92
	References	98
Chapter 5	micro-Doppler feature analysis and extraction	99
5.1	Time-frequency analysis method	99

5. 1. 1	Introduction of time-frequency analysis method	99
5. 1. 2	micro-Doppler feature analysis based on time-frequency analysis	106
5. 2	Image processing method	113
5. 2. 1	Mathematical morphology image processing	114
5. 2. 2	Hough transform	118
5. 2. 3	Application of image processing method in micro- Doppler feature extraction in SFCS radar	121
5. 3	Orthogonal Matching Pursuit Decomposition method	132
5. 3. 1	Application in narrowband radar	133
5. 3. 2	Application in wideband radar	134
5. 4	Empirical-Mode Decomposition method	150
5. 5	High-order moment function analysis method	160
5. 5. 1	Application in narrowband radar	160
5. 5. 2	Application in wideband radar	172
5. 6	Comparison of these methods	185
	Appendix 5-A	187
	Appendix 5-B	189
	References	189

Chapter 6 Three-dimensional micro-motion feature

	reconstruction	191
6. 1	Multi-static radar techniques	191
6. 2	Three-dimensional micro-motion feature reconstruction in narrowband MIMO radar	193
6. 2. 1	micro-Doppler effect in narrowband MIMO radar	193
6. 2. 2	Three-dimensional micro-motion feature reconstruction of rotating targets	195

6. 3	Three-dimensional micro-motion feature reconstruction in wideband MIMO radar	201
6. 3. 1	Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) – LFM signal	201
6. 3. 2	micro-Doppler effect	203
6. 3. 3	Three-dimensional micro-motion feature reconstruction of rotating targets	206
6. 4	Three-dimensional micro-motion feature reconstruction of targets with precession	211
6. 4. 1	Echo model of targets with precession in distributed radar networks	212
6. 4. 2	Three-dimensional micro-motion feature reconstruction of precession	213
	Appendix 6-A	226
	References	229
Chapter 7	Review and prospects	231
English	abbreviations	233

第1章 绪 论

雷达作为检测及识别工具在现代高技术战争中占有重要地位。随着现代雷达技术的发展,雷达的功能早已突破原来的目标检测及定位的范畴,对非合作目标的自动识别已成为其重要功能,而如何提取特征、提取什么样的特征来进行识别则是自动目标识别的核心技术之一。近年来,随着现代信号处理技术的快速发展和宽带雷达技术的成熟,雷达目标识别技术已取得了相当丰富的成果。但目标识别与反识别是“矛”与“盾”的关系,随着目标识别技术的进步,目标反识别技术也相应发展。各种与真实目标有着高逼真度的有源、无源诱饵干扰技术,以及虚假目标数字合成技术的发展与实用,都给目标的探测与识别带来了新的困难。

近年来,雷达目标的“微多普勒效应(micro-Doppler Effect 或 m-D Effect)”成为了目标特征提取与识别领域的研究热点,基于微多普勒特征的目标识别技术已被认为是雷达目标识别技术中最具发展潜力的技术之一。本章首先介绍了目标散射点模型,接下来阐述了微多普勒效应的基本概念,介绍了当前国内外在雷达目标微多普勒效应研究与应用方面的概况,并给出了本书的内容结构。

1.1 目标散射点模型

雷达发射信号照射到目标上产生后向散射信号的物理过程是非常复杂的,与雷达视角、极化方式、入射波长,以及目标的结构和材质等都有关系。尽管麦克斯韦方程确定了电磁波的散射机制,但在实际应用