

弹道目标微多普勒效应 与特征提取

冯存前 贺思三 童宁宁 著

Micro-Doppler Effect and Micro-motion
Feature Extraction of Ballistic Targets



国防工业出版社
National Defense Industry Press

弹道目标微多普勒 效应与特征提取

Micro - Doppler Effect and Micro - motion
Feature Extraction of Ballistic Targets

冯存前 贺思三 童宁宁 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书系统介绍了弹道目标微多普勒效应与特征提取方法,共有6章。主要内容包括绪论、弹道目标运动特性及微多普勒效应、弹道目标复合运动平动补偿、弹道目标多分量微多普勒分离、弹道目标微动特征提取、总结与展望。

本书是作者在弹道目标微多普勒效应与特征提取方面部分研究成果的基础上完成的,可供高等院校相关专业高年级本科生、研究生以及相关科研院所的工程技术人员学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

弹道目标微多普勒效应与特征提取/冯存前,贺思三,童宁
宁著. —北京:国防工业出版社, 2016. 4
ISBN 978-7-118-10730-2

I. ①弹… II. ①冯… ②贺… ③童… III. ①弹道参
数-多普勒效应-研究 IV. ①TJ012.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 048741 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印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 10¼ 字数 185 千字

2016 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 99.00 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

前 言

弹道导弹以其射程远、精度高、杀伤威力大、机动突防能力强等优点,成为各个国家重点发展的武器装备,高密度、高强度的非接触式导弹战已经成为目前战争的主要方式。为了应对弹道导弹扩散造成的威胁,世界各军事强国,特别是美国和苏联早在 20 世纪 60 年代就开始进行弹道导弹防御技术和武器装备的研究。弹道导弹防御系统是包括助推段防御、中段防御和再入段防御在内的一体化系统,而中段防御由于导弹飞行持续时间长、飞行弹道可被精确确定和预测、作战效能高而被认为是弹道导弹防御的关键阶段。但是,母舱和助推器残骸伴随弹头惯性飞行形成目标群,加之分导式多弹头技术、诱饵技术的广泛运用,给中段防御系统的目标识别带来很大困难,美国导弹防御局的 Cooper 指出:“导弹防御的关键问题是能否成功地从诱饵和其他突防装置中识别出真弹头。这是一个非常棘手的问题,它已困扰了防御者 30 年。”因此,中段目标识别问题是反导系统研制的技术瓶颈,是公认的技术难题之一,它在很大程度上决定了反导系统发展的前途和方向。

在弹道目标飞行中段,主要利用目标的雷达特性进行识别。但是,弹道目标的形状、结构、表面材料电磁参数和常规运动特性等特征通常很难获取,而且随着诱饵技术包括材料技术、微控制技术和电磁特征控制技术技术的发展,利用传统特征已经很难从目标群中识别出真弹头,必须利用不依赖于目标结构、电磁等参数的细节特征进行识别。微动特征是目标的独特特征,包含更多的目标细节信息,中段弹道目标存在自旋、进动和章动现象,这些运动都是典型的微动形式。由于有效载荷的限制,诱饵质量分布特征和运动特征的可控性受限制,弹头和诱饵的微动特征存在明显差异。因此,在弹道导弹攻防对抗技术日趋激烈的形势下,基于微动特征的识别技术为中段弹道目标识别提供了新的突破口。

本书作者近年来在国家自然科学基金项目“组网雷达中弹道目标微动特征提取与三维成像技术研究”(No. 61372166)、国家自然科学基金青年项目“高分辨雷达欠采样条件下中段目标微动特征提取方法研究”(No. 61501495)、陕西省自然科学基金项目“弹道目标微动特征提取与成像技术研究”(No. 2010JQ8007)以及军队“2110 工程”军用电子科学与技术学科专业领域建设项目

的支持下,针对弹道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,深入阐述了弹道目标微多普勒效应的机理,论述了多种微多普勒信息获取方法,给出了不同情况下的微动特征提取方法。

本书共分6章。第1章介绍了弹道导弹及弹道导弹防御系统的发展现状、弹道导弹目标识别技术、弹道目标的微多普勒效应的概念及应用;第2章分析了弹道目标的运动特性及其在不同体制雷达下的微多普勒效应;第3章主要论述了多普勒率法、多普勒极值法、共轭相乘法 and 微多普勒缩放分析法等弹道目标复合运动平动补偿方法;第4章主要论述了最短路径法、匹配空间变换法、全变差融合法、自适应聚类法以及最近邻域“选择”法等弹道目标多分量微多普勒分离方法;第5章主要论述了单/多部雷达条件下的弹道目标微多普勒特征提取方法;第6章总结了全书的内容,并展望了微多普勒效应理论在弹道目标识别领域的应用前景。

李松、李靖卿同志撰写了第4章的部分内容,研究生张栋、王义哲、赵双参与了本书的校对工作,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,加之弹道目标微多普勒效应研究仍属当前研究热点,有待于进一步深入研究和工程实践,因此本书难免有疏漏与不当之处,敬请读者批评指正。

作者

2015年9月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 弹道导弹及弹道导弹防御系统	1
1.2 弹道导弹目标识别	2
1.2.1 主动段识别	2
1.2.2 中段识别	3
1.2.3 再入段识别	4
1.3 弹道目标微多普勒效应及应用	4
1.3.1 弹道目标微多普勒效应的概念	5
1.3.2 弹道目标微多普勒效应分析与特征提取	6
1.4 本书内容结构	9
第 2 章 弹道目标运动特性及微多普勒效应	11
2.1 弹道目标中段平动特性	11
2.1.1 相关参数间关系	12
2.1.2 平动参数解算	13
2.2 弹道目标中段微动特性	15
2.2.1 旋转的微动特性	15
2.2.2 弹道目标进动的微动特性	18
2.3 弹道目标微多普勒效应	25
2.3.1 脉冲多普勒雷达中目标回波模型	25
2.3.2 LFM 体制下目标回波模型	26
2.3.3 不同体制下弹道目标微多普勒效应	29
第 3 章 弹道目标复合运动平动补偿	32
3.1 平动对微多普勒的影响	32
3.2 多普勒率法	35
3.2.1 最强散射点的多普勒提取	35
3.2.2 微多普勒与多普勒率的关系	36
3.2.3 平动参数估计与补偿	37

3.3	多普勒极值法	40
3.3.1	多普勒极值点与平动参数的关系	40
3.3.2	基本实现流程	41
3.4	共轭相乘法	43
3.4.1	延迟共轭相乘法	43
3.4.2	对称共轭相乘法	48
3.5	微多普勒缩放思想	56
3.5.1	多级延迟共轭相乘	56
3.5.2	微多普勒缩放的概念	59
3.5.3	基本实现流程及验证	61
第4章	弹道目标多分量微多普勒分离	67
4.1	弹道多目标微多普勒效应	67
4.1.1	旋转多目标微多普勒效应	68
4.1.2	进动多目标微多普勒效应	69
4.2	最短路径法	72
4.2.1	最短路径描述	72
4.2.2	Dijkstra 算法	74
4.2.3	基本实现流程	75
4.3	匹配空间变换法	79
4.3.1	预处理	79
4.3.2	匹配空间变换描述	81
4.3.3	基本实现流程	83
4.4	全变差融合法	86
4.4.1	时频域增强处理	86
4.4.2	全变差融合思想	87
4.4.3	算法仿真验证	90
4.5	自适应聚类法	95
4.5.1	自适应聚类描述	95
4.5.2	改进 Viterbi 算法	98
4.5.3	算法仿真验证	99
4.6	最近邻域“选择”法	102
4.6.1	最近邻域“选择”思路	102
4.6.2	微多普勒变化率分析法	105
4.6.3	算法仿真验证	106

第 5 章 弹道目标微动特征提取	110
5.1 单基地雷达微动特征提取	110
5.1.1 弹头目标宽带散射特性分析	110
5.1.2 弹头目标微多普勒效应	114
5.1.3 弹头目标微动特征提取	116
5.2 组网雷达微动特征提取	129
5.2.1 弹头目标投影长度分析	129
5.2.2 微动特征及结构特征提取	130
5.2.3 性能分析	131
5.3 组网雷达三维微动特征提取	137
5.3.1 弹头目标三维空间进动模型	137
5.3.2 基本实现流程	140
5.3.3 算法仿真验证	141
第 6 章 总结与展望	146
参考文献	148

第 1 章 绪 论

空袭与反空袭作战已成为现代战争的主要形式之一,弹道导弹作为空袭的尖兵利器,以其速度快、威力大、射程远、打击精度高、突防能力强等特点,成为空袭作战中的“杀手锏”,是空袭作战中弱国对抗强国、大国慑服小国的最具杀伤性的攻击武器之一。目前,世界上至少有 40 个国家装备或部署弹道导弹。美国、俄罗斯等军事强国已经装备了全球射程覆盖完备、型号众多的弹道导弹,具备对全球任何国家或地区、任意固定军事目标的攻击能力^[1-3]。除美国、俄罗斯等军事强国之外,欧洲、印度等国家也竞相开展核技术及各种射程的弹道导弹的研究工作^[4,5]。随着弹道导弹扩散造成的威胁问题日益凸显,在大力发展弹道导弹突防能力的同时,弹道导弹防御系统的研究也越来越受到各国的重视。

弹道目标识别是弹道导弹防御系统有效发挥作用的核心难题之一。近年来,利用目标的微动特性来进行弹道目标识别已经受到了越来越多的关注。本章首先介绍了弹道导弹的特点,并简要描述了各国弹道导弹防御系统的组成,接下来深入分析了弹道目标识别的一般方法及可能采用的策略。在对弹道目标的微多普勒效应进行阐述后,介绍了当前弹道目标微多普勒效应的研究现状及应用前景,并给出了本书的结构安排。

1.1 弹道导弹及弹道导弹防御系统

不同弹道导弹的形状、飞行轨迹及运动姿态差异较大,但其飞行过程的变化规律基本一致。典型的弹道导弹飞行过程分为主动段、中段和再入段三个阶段。主动段是指导弹脱离发射架到助推器最后一级火箭熄火的阶段;中段是指导弹助推火箭关闭发动机后,导弹在大气层外飞行的阶段;再入段是指弹头及其伴飞物进入大气层向打击目标飞行的阶段。弹道导弹防御系统的防御范围涵盖了弹道导弹这三个飞行阶段的全过程,是包括主动段反导、中段反导和再入段反导在内的一体化系统。

为了应对日益严峻的反导形势,以美国、俄罗斯为首的各军事强国早在 20 世纪 60 年代就开始进行弹道导弹防御技术和装备的研究。目前,美国的弹道导弹中段和末段防御系统已经初具战力,主动段防御系统也即将形成。然而,美国

作为目前弹道导弹防御技术研究最为成熟的国家,一直奉行防御技术输出战略,其在新一阶段的弹道导弹防御系统建设规划中强调要不断加强一体化与全球化,确保“绝对安全”。

俄罗斯的弹道导弹防御系统研究至今已经发展了半个多世纪,并长期担负战备任务,其在弹道导弹防御领域具有雄厚的技术实力和很高的技术水平。俄罗斯金刚石—安泰设计局将安泰-2500、C-300和C-400战术反弹道导弹系统与改进后的A-135系统进行整合,并纳入统一的防御系统。目前,俄罗斯的反弹道导弹系统已处于持久战略状态。

欧洲的弹道导弹防御系统是北约战略构想的重要组成部分。北约拟在2020年前实现欧洲弹道导弹防御系统的“四步走”计划,计划构建由“爱国者”-3导弹防御系统、“萨德”战区高空区域防御系统(THAAD)、陆/海基宙斯盾系统以及配套的改进型预警雷达组成的反导系统,同时利用综合指挥控制系统实现整个导弹防御体系的联合指挥^[4]。

印度发展的是双层弹道导弹拦截系统,由大地防空导弹系统(PAD)在大气层外(高度50~80km)拦截目标,先进防空导弹系统(AAD)在大气层内(高度30km以下)拦截目标^[5]。PAD是在印度“大地”2近程弹道导弹基础上改进而成的拦截弹,AAD是印度在以色列帮助下研制的集防空和反导于一体的全新型拦截弹。

为了应对弹道导弹扩散造成的威胁,增强反导能力和防御效能,各国都竞相开展弹道导弹防御系统的研究。此外,随着弹道导弹攻防对抗技术的发展,分导式多弹头技术和诱饵技术广泛运用,导弹防御的难度越来越大^[6]。

1.2 弹道导弹目标识别

弹道目标识别是导弹防御的核心技术之一,实际中多采用雷达目标识别技术。雷达目标识别主要根据目标的回波来鉴别目标,相关技术涉及雷达目标特性、目标特征提取方法和分类识别技术。识别的基本过程就是从目标的幅度、频率、相位、极化等回波参数中,分析回波的幅度特性、频谱特性、时间特性、极化特性等,以获取目标的运动参数、形状、尺寸等信息,从而达到辨别真伪、识别目标的目的。根据弹道导弹的不同飞行阶段,弹道导弹目标识别一般分为主动段识别、中段识别和再入段识别三个阶段。

1.2.1 主动段识别

主动段以弹道导弹从地(海)面等发射平台脱离发射装置开始,在助推火箭

的动力推动下,沿一定的弹道向空间爬升,直至一级火箭(助推装置)与主控装置分离。主动段是弹道导弹的脆弱阶段,此时弹道导弹的速度相对较慢、伴飞物较少,其雷达和红外特性显著,主要表现为火箭发动机强烈的尾焰,其观测手段主要包括预警雷达设备和红外预警卫星设备。此阶段弹道导弹雷达目标特性的可见度主要受其雷达散射截面(RCS)的影响,事实上,尽管该尾焰不会反射微波段的电磁能量,但它几乎会反射所有照射到它上面的高频段(HF)的电磁能。

但此阶段目标环境(包括人为干扰和杂波背景)较为复杂,且待识别主动段弹道导弹目标通常是动态的。由于观测设备性能有限,获取的目标参数不够全面,难以及时发现、识别弹道导弹。目前,主动段弹道导弹识别由于受到高置信度实时识别的限制,难以达到实用化以应付复杂战场环境的目的,多停留在理论或实验验证阶段。

1.2.2 中段识别

由于弹道导弹中段飞行时间较长,约占整个弹道导弹飞行阶段的80%,防御方有足够的时间做出决策,是公认的弹道导弹防御的关键阶段^[7,8]。目前,美国、俄罗斯等国的防御系统研究和实验主要集中于中段。在中段,母舱和导弹遗留下来的助推器残骸在地球引力的作用下在近似真空的环境中伴随弹头惯性飞行,形成扩散的目标群,给目标识别带来很大的困难^[9]。

弹道目标中段的特性主要包括雷达特性和红外特性。中段目标近似在真空中飞行,气动加热不明显,红外特性主要表现为自身辐射和背景辐射,现代诱饵技术已经能够通过加热装置模拟弹头的红外特性^[11]。在中段,主要利用目标的雷达特性进行识别。中段雷达目标特性识别大致有两个途径^[7,9]:一是“特征识别”,通过辨认信号特征来推演目标的特征信息,例如,利用回波信号的幅度、相位、极化频率特征及其变化来估计目标的飞行姿态、结构特征、材料特征等;二是“成像识别”,通过高分辨雷达成像,确定目标的尺寸、形状等。弹道目标识别是一种典型的非合作式目标识别,目标的形状、结构、表面材料电磁参数和常规运动特性等特征对先验信息要求较高^[12],而攻击方弹道导弹参数通常很难获取,这些特征在弹道导弹目标识别中的实用性受到限制。此外,随着诱饵技术包括材料技术、微控制技术和电磁特征控制技术的发展,利用RCS、尺寸、形状等传统特征已经很难从目标群中识别出真弹头,必须利用不依赖于目标结构、电磁等参数的细节特征。

近年来,利用目标微动信息进行目标识别的方法受到国内外研究机构和学者们的广泛关注^[13-18]。微动特征是目标的独特特征,包含更多的目标细节信息,利用微动特征的目标识别技术已经在空中的直升机、螺旋桨飞机、喷气式飞

机识别^[15,16]和地面的坦克、装甲车、人员和动物识别^[19,20]等领域得到了深入研究和初步应用。美国早在 20 世纪 70 年代就开始研究弹道目标微动特征^[21],其开发的识别算法和技术已经使装备的 S 波段相控阵雷达 AN/SPY - 1^[22]和 THAAD GBR X - 波段雷达^[23]具备利用微动特征识别威胁目标的能力。

1.2.3 再入段识别

当弹道导弹进入再入段时,弹道导弹的大部分伴飞物,如轻诱饵、碎片残骸及箔条等干扰物,会因大气摩擦而烧毁或降速,只有少量重诱饵会依然保持与弹道导弹相一致的运动状态。此阶段弹道导弹的运动特性可以为目标的识别提供依据,质阻比是其中非常关键的参数之一。

弹道系数(ballistic coefficient)又称质阻比(mass-to-drag),是弹头质量和外形的组合参数,集中体现了弹头总体飞行性能,是再入目标的主要识别特征之一。美国麻省理工学院在 20 世纪 60 年代就开始研究质阻比,并建立了质阻比与雷达测量之间的严格关系式,在再入目标质阻比估计及再入体设计上取得了一系列成果。20 世纪 70 年代以来,关于质阻比估计的公开文献较多,可是由于当时雷达精度、实验条件的限制,发现利用质阻比特性进行目标识别存在一定的局限性。目前,随着计算机、雷达探测等技术的发展,利用质阻比的识别又上升到一个新的高度,与其他识别方法相比,其识别速度快,简单直观,具有一定的研究价值。

弹道导弹防御系统是一个集成了多平台、多传感器的复杂系统,在整个反导作战的过程中,任何时候都不会只用一种特征进行识别,单一识别手段无法给出令人信服的结果。因此,必须综合应用各种识别手段。飞行过程中不同阶段的识别结果,同一阶段的多种手段的识别结果都必须加以综合利用,形成合理的识别决策流程,最终给出逼近真实情况的识别结果。

1.3 弹道目标微多普勒效应及应用

自从奥地利物理学家克里斯琴·多普勒(Christian Doppler)发现并提出了多普勒效应后,多普勒理论得到了广泛的关注和应用。多普勒理论指出,当观察者和物体之间存在相对运动时,物体辐射的电磁波波长会随着这种相对运动而变化,从而导致电磁波频率变化,通过对电磁波频率的测量和计算,就可以得到目标运动的信息^[24]。

然而实际生活中,只进行单一运动的目标很少,通常是目标整体存在平动的同时,目标的整体或组成部分还存在另一种微动,如汽车轮胎的转动、直升机旋

翼的转动、导弹飞行过程中的自旋运动等,这些微动会造成目标多普勒频谱产生调制,即所谓的微多普勒效应^[20]。相比于目标的整体平动,微动包含了目标更多的细节信息,因此在目标识别领域也得到了广泛的关注。

1.3.1 弹道目标微多普勒效应的概念

自电磁波发现以来,人们逐步掌握和开拓了长波、短波、超短波甚至是微波等领域,并且发现在一般情况下电磁波能够承载的信息量会随着频率的增高而增大。激光波长较短,频率较高,能较为敏锐地捕捉到待观测目标的微小运动,所以相干激光雷达系统最早发现和引入了“微动和微多普勒效应”概念。之后,美国海军研究实验室的 V. C. Chen 将它扩展到微波雷达并发表了一系列关于目标微多普勒效应的科研成果,他提出了微动的概念,并把它定义为除待测目标本身或其组成部件的质心平动之外的其他微小运动,如振动、转动、翻滚、摆动等。而目标产生的这些微小运动会引起多普勒频移,这就是微多普勒频率,或称为微多普勒^[13]。

弹道目标的微动特征不仅包括弹道目标为实现自身稳定、空间定向而产生的自旋运动,还包括受气流扰动和弹体分离、多弹头或诱饵释放时来自其他载荷横向力矩的干扰而引起的锥旋和摆动等微小运动^[25,26]。通过空间目标的力学分析可知^[27],微动特征与空间目标的质量大小、分布有关。由于弹道目标的有效载荷有限,诱饵与真弹头的质量大小及其质量分布不可能完全相同,这必然会导致诱饵与真弹头的自旋频率、锥旋矢量存在较大差异。因此,微动特征与目标的结构特征、电磁散射特性及常规运动特性等目标固有属性一样,可以作为弹道目标识别的重要特征。

激光雷达具有很高的测速精度,微多普勒现象很容易被激光雷达观测到,微动和微多普勒的概念最早从激光雷达中引入。1990年3月29日和10月20日,美国进行了两次 Firefly 实验,该实验将一枚装有可膨胀锥形气球诱饵的“北极犬”探测火箭发射到太空,通过指令将装在霰弹筒内的诱饵自旋弹出,然后充气膨胀成2m的锥体,在目标做一系列进动运动时,位于马萨诸塞州的激光雷达对诱饵释放过程进行了观测。这次实验成功地演示了激光雷达可观测到超过700km远的诱饵的展开、膨胀和微动过程,验证了目标运动信息作为中段识别特征的可行性^[28]。

随着雷达技术的发展,高分辨力雷达广泛运用,常规微波雷达已经具备探测目标微动的能力。2000年,V. C. Chen 最早发表了微波雷达中的微多普勒效应分析实验结果,证实了尽管微多普勒效应对雷达系统工作波长敏感,但借助于高分辨的时频分析技术,在微波雷达中仍可被观测到^[13]。美国海军导弹防御委员

会于 2001 年对海基雷达用于弹道导弹防御做了论证,文中指出,对于导弹防御雷达系统来说,微动特征同威胁目标自旋频率和其他非常规运动一样,蕴含了独一无二的特征,这些特征使雷达能够将弹头从诱饵和碎片中识别出来。2002 年,美国又资助了一项题为“基于相位导数测距的目标分辨”的研究,此项目对弹道导弹目标的自旋、进动和章动等现象的动力学原理进行了深入分析。目前,研究人员已经在微动原理与微多普勒机理分析、微动信号分析和微多普勒提取等方面取得了丰富的研究成果。

1.3.2 弹道目标微多普勒效应分析与特征提取

微动的动力学与运动学模型是建立微多普勒与目标参数定量关系和微动回波模型的前提,是利用微动进行目标识别的重要依据。根据电磁散射相关理论,目标的散射可以用目标上的几个局部散射源表示,在小的相对测量带宽和观测累积角度条件下,这些局部散射源可以用理想散射中心来近似^[29]。微多普勒产生的实质就是目标等效散射中心与雷达天线相位中心相对速度的时变性。

弹道目标的微动本质是一种非匀速运动或非刚体运动。在频域或时频域中,弹道目标回波的微动特征通常表征为时变非平稳的多分量信号,它与主体平动分量或其自身包含的微动分量相互叠加在一起。瞬时频率常用于解析给定时刻目标微动分量的变化趋势,但它对应于时变信号相位信息的导函数,不适用于同一时刻具有多个微动频率分量的信号。因此,为了有效地利用弹道目标的微动特征,分离和提取单分量微多普勒信号显得尤为重要。

微多普勒分离的目的就是为了实现目标主体回波与微动分量之间的分离以及多分量微动信号(包括多个目标或多个散射中心)的分离。为了有效地实现目标主体回波与微动分量之间的分离,国内外专家做了大量的研究,主要集中在多普勒谱或距离像序列中微多普勒的提取以及 ISAR 像中微多普勒分量的消除。所采用主要方法有小波分解、Chirplet 分解、经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)、投影变换算法等。2007 年和 2010 年,Thayaparan 利用小波分解中的四阶二叉树分解分别实现了多普勒谱中微多普勒特征的提取以及 ISAR 像中微多普勒信息的消除^[30,31]。徐艺萌利用小波分解与压缩感知相结合的方法,消除了颤振目标 ISAR 像中的微多普勒信息^[32]。V C Chen 将微多普勒信号转化成一簇 Garbor 基函数,并自适应地匹配于多分量微多普勒信号在时频域的局部特征^[33]。蔡权伟利用可逆跳跃 MCMC(Markov Chain Monte Carlo)方法近似生成多分量信号待测参数的概率分布,在 AM-FM 分解的基础上,通过贝叶斯计算估计出多分量信号的个数及相关参数,从而实现了多分量信号的重构分离^[34]。李松通过对干扰机接收的回波进行 AM-FM 处理,进而产生虚假

微多普勒信号,以达到干扰 IASR 像聚焦的效果^[35]。Huang 首先介绍了 EMD 分解的基本概念,但该方法容易引发模态混叠问题^[36]。罗迎利用 EMD 分解得到的趋势项分量完成了距离像序列中微动分量的提取^[37]。徐艺萌利用复数 EMD 分解消除了毫米波雷达中颤振目标 ISAR 像内包含的微多普勒分量^[38]。Stankovic 利用 Randon 变换从目标的 ISAR 像中分离出直升机的微动旋翼信号^[39]。张群利用 Hough 变换提取出运动目标的微多普勒分量^[40]。胡晓伟将回波时频信号进行逆 Randon 变换,结合最小熵准则和高斯拟合估计方法,实现了多旋转目标的平动补偿^[41]。此外,谢苏道利用最小熵值法消除了弹道类目标加速度分量等平动参量对微多普勒提取的影响^[42]。李星星利用航迹关联和滑窗检测相结合的方法在距离像序列消隐的情况下实现了平动补偿^[43]。Stankovic 利用 L-statistics 方法消除了微动目标 ISAR 像中的微多普勒分量^[44]。

瞬时频率常用于描述目标的微动特征,但瞬时频率不适用于同一时刻具有多个微动频率分量的信号,因此从多普勒谱、距离像序列或 IASR 像中分离和提取出单分量微多普勒信号具有十分重要的意义。多分量微动信号的分离采用主要方法有 Viterbi 算法、EMD 分解、投影变换、盲信号分离等算法。Stankovic 和 Dijurovic 率先利用最小代价函数路径寻优,提取了一种多分量信号瞬时频率估计的 Viterbi 算法^[45,46]。关永胜和李坡利用 Viterbi 算法分别提取出了微动多目标的微动频率^[47,48]。Bao 利用复数 EMD 分解方法分离出 ISAR 像中的多分量微多普勒信号^[49]。王宝帅和杜兰利用 EMD 分解方法在多普勒谱中分离出多类典型飞机的微多普勒特征,实现了飞机目标的有效分类^[50]。王兆云利用 Hough 变换分别提取出锥体目标各滑动散射中心的微多普勒特征^[51]。李坡利用 Hough 变换和三次相位函数(Cubic Phase Function, CPF)相结合的方法分离出线性调频信号(Linear Frequency Modulation, LFM)微多普勒分量和 SFM(Sinusoidal Frequency Modulation)微多普勒分量^[52]。向道朴用独立成分分析(Independent Component Analysis, ICA)算法将低分辨率雷达网获取的群目标回波信号进行分离处理,结合时频分析方法实现群目标分辨^[53]。郭琨毅根据微多普勒信号的稀疏性,利用欠定盲分离(Underdetermined Blind Source Separation, UBSS)方法,实现了微多普勒信号的分离^[54]。Wang 利用盲信号分离方法分离出多分量微多普勒信号^[55]。此外,邵长宇和李飞利用最近邻域数据关联算法选取椭圆内统计距离最小的测量值为更新状态,提出了一种基于多目标跟踪的多分量微多普勒分离方法^[56-58]。罗迎利用曲线的光滑性实现多散射点微多普勒曲线的分离^[37]。高昭昭利用微动特征的周期性,分离出多旋转散射中心的微多普勒特征^[59]。

V. C. Chen 指出,目标的微多普勒特征不受限于雷达的距离分辨^[60],升级改造的高性能窄带低分辨雷达也足以在多普勒域中产生目标的微多普勒特

征^[25,26],而宽带高分辨雷达甚至可以得到目标的距离像信息及高维像。因此,基于微多普勒信息的特征提取方法主要分为两类:一类是利用高性能低分辨率雷达获取目标的微多普勒特征或散射中心分布规律等目标固有特性,从而实现目标的粗分类及特征提取;另一类是通过高分辨力成像雷达获取目标的成像特征,如一维距离像(High Resolution Range Profile, HRRP)、二维逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)像以及多维(包含俯仰角等)像等。由于可以直接通过距离像、方位像进行匹配识别,这类方法可以获取目标的尺寸、结构等更为精细的特征,从而实现目标的精确识别及特征提取。归纳可知,基于微多普勒信息的特征提取方面的研究可分为微动模式识别、微动特征提取及基于微多普勒信息的结构特征提取三个方向。

在微动模式识别方面,关永胜通过对回波信号谱的分析,对进动、摆动、自旋微动模式的分类进行了研究^[61]。韩勋通过对回波信号时频图的分析,对弹头的进动、章动、自旋微动模式进行了研究^[62]。

在中段弹道目标微多普勒特征获取方面,国防科技大学的刘永祥根据刚体动力学的知识建立了锥体目标的空间进动数学模型,导出了进动参数和目标惯量比之间的关系,提出可利用目标的纵横惯量比作为特征进行真假弹头识别^[63]。为了计算惯量比,必须估计目标的进动周期与进动角两个进动参数。基于这一基本结论,国内各单位对不同雷达观测条件下的进动周期及进动角估计进行了广泛研究。针对高性能低分辨率雷达,Liu 和 Ghogho 利用 RCS 序列的周期性来估计弹头进动周期^[64]。刘永祥和黎湘利用尖锥弹头 RCS 关于姿态角的近似解析关系式,对 RCS 随姿态角变化的单调区域进行分类讨论,估计尖锥目标的进动角^[65]。而雷鹏和刘进则分别利用 Hough 变换对进动弹头暗室测量数据的参数估计展开了研究^[66,67]。针对宽带回波数据,姚汉英和罗迎提出了基于距离像序列散射中心投影位置变化的进动参数估计方法^[68,69]。金光虎基于宽带回波数据,系统分析了弹道目标的进动对距离像和 ISAR 像的影响,研究了进动目标距离像和 ISAR 像的变化规律,提出了基于距离像序列及 ISAR 像序列的进动参数估计算法^[70]。Liu 通过对回波信号的稀疏分解提取进动参数^[71]。总的来说,由于进动周期对应了观测量的变化周期,其估计基本原理相对简单、对应物理意义明确,发表的文献主要注重于如何在短观测时间内提高进动周期的估计精度^[72]。进动角的估计则相对复杂,其基本原理是认为从回波信号所提取某个参数的变化幅度与进动角存在对应关系,从而估计进动角,而所提取参数的变化幅度通常不仅与进动角有关,还与目标的结构参数有关,因此在进动角提取时通常需要已知某些参数,如目标结构参数、雷达视线方向等。艾小锋提出利用多视角一维距离像序列目标投影长度的变化对进动角及目标长度进行联合估计,

在没有任何先验信息的条件下实现了进动角的高精度估计,体现了组网雷达在微动参数估计上的优越性能^[73]。雷腾利用多站一维距离像重构了锥体弹头上各等效散射中心的三维空间位置,对锥体弹头的各个参数进行了估计^[74]。

刚体目标微动导致目标相对于雷达视线的姿态随时间周期变化,可基于微动信息实现刚体目标的二维高分辨成像,从而进一步获得目标的结构参数。Zou 分析了弹头进动对 ISAR 成像的影响,指出利用传统成像算法难以获得聚焦的 ISAR 像^[75]。根据所利用微多普勒信息的时间长度,现有的基于微动信息的 ISAR 成像算法主要分为两类:①利用多个周期的回波信号,通过对信号的匹配分解获得目标的二维高分辨成像^[76-78];②利用一个周期内的回波信号,将观测时间内的微动等效为高阶复杂运动,利用复杂运动目标成像算法获得微动目标聚焦的 ISAR 像,如雷腾利用瞬时成像方法获得弹道目标聚焦的 ISAR 像^[79]。

1.4 本书内容结构

弹道目标识别技术是战略预警能力和反导作战能力的集中体现,本书围绕弹道目标的微多普勒效应,主要介绍弹道目标微动信号分离与特征提取方法,系统深入地研究了中段目标回波信号建模仿真、微多普勒信息获取、微动特征提取等相关问题。全书的具体章节内容如下。

第2章论述了弹道目标在中段的运动特性及微多普勒效应。首先依据椭圆弹道理论分析了中段平动的动力学原理,得到中段目标的平动模型;然后依据惯量守恒原理,推导了中段目标进动的动力学模型,从而获得中段目标运动模型。在此基础上,结合脉冲多普勒(Pulse Doppler, PD)体制及线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)高分辨体制,分析了微动对高/低分辨雷达回波的影响及表现形式,给出了基于准静态法的弹道中段目标回波仿真方法,得到了中段目标回波信号。PD 雷达以其卓越的杂波抑制性能受到世人瞩目,广泛应用于目标预警、探测及制导雷达。线性调频体制雷达多用于地基高分辨空间目标探测雷达,研究它的微多普勒效应有利于反导作战的现实需求。

第3章论述了弹道目标主体平动回波分量的补偿方法。中段目标的微动叠加在平动之上,平动的存在将会使时频面中的多普勒结构发生平移、倾斜和折叠,使多普勒模型参数增加甚至破坏微多普勒在时频面中的结构,使参数化提取方法的失效,在微动参数提取前,必须进行平动补偿处理。本章重点介绍了多普勒率法、多普勒极值法、共轭相乘法和微多普勒缩放分析法在弹道目标平动补偿方面的应用。本章内容是第4章的基础。

第4章论述了平动补偿后弹道目标多分量微动信号的分离方法。中段目标