



国防科技图书出版基金

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

弹道目标微多普勒效应分析 与特征提取技术

冯存前 贺思三 童宁宁 李靖卿 著

 国防工业出版社
National Defense Industry Press

非外借



国防科技图书出版基金

弹道目标微多普勒效应分析 与特征提取技术

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

冯存前 贺思三 童宁宁 李靖卿 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

弹道目标微多普勒效应分析与特征提取技术 / 冯存前等著. —北京:国防工业出版社,2018.12

ISBN 978-7-118-11668-7

I. ①弹… II. ①冯… 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(2018)第238678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)

北京虎彩文化传播有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 15¼ 字数 268 千字
2018年12月第1版第1次印刷 印数 1—1000册 定价 98.00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,需要不断摸索、认真总结和及时改进,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 许西安 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

前 言

弹道导弹具有射程远、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当今战争的主要方式。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,正如美国导弹防御局的 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青年项目“弹道目标微动特征提取与成像技术研究”(No. 2010JQ8007)以及陕西省自然科学基金面上项目“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. 2014JM8308)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8章:第1章介绍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章分析弹道目标的平动、微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章主要论述单部雷达条件下的弹道目标微多普勒特征提取方法;第6章主要论述多部雷达条件下的弹道目标微多普勒特征提取方法,并实现了目标空间位置三维重构;第7章主要论述在宽窄带雷达混合组网的条件下利用 Hough 变换法、微动信息矩阵法、循环迭代法、散射中心关联法和微动周期一致性聚类法对弹道目标微动特征进行提取,实现了空间位置的重构;第8章总结全书的内容,并展望微多普勒效应理论在弹道目标识别领域的应用前景。

本书由冯存前、贺思三、童宁宁、李靖卿编著。冯存前编写第1、2、5、7和第4章部分内容并进行统稿,童宁宁编写第3章,贺思三编写第6章,李靖卿编写第4章部分内容。本书在编著过程中得到研究生张栋、王义哲、赵双、许丹、陈蓉、许旭光等的帮助,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
2018年6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	3
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	28
第 3 章 弹道目标复合运动平动补偿	31
3.1 平动对微多普勒的影响	31
3.2 多普勒率法	34

3.2.1	最强散射点的多普勒提取	34
3.2.2	微多普勒与多普勒率的关系	34
3.2.3	平动参数估计与补偿	36
3.3	多普勒极值法	38
3.3.1	多普勒极值点与平动参数的关系	38
3.3.2	基本实现流程	39
3.4	共轭相乘法	40
3.4.1	延迟共轭相乘法	40
3.4.2	对称共轭相乘法	45
3.5	微多普勒缩放思想	52
3.5.1	多级延迟共轭相乘	52
3.5.2	微多普勒缩放的概念	54
3.5.3	基本实现流程及验证	56
第4章	弹道目标多分量微多普勒分离	61
4.1	弹道多目标微多普勒效应	61
4.1.1	旋转多目标微多普勒效应	62
4.1.2	进动多目标微多普勒效应	63
4.2	最短路径法	66
4.2.1	最短路径描述	66
4.2.2	Dijkstra 算法	68
4.2.3	基本实现流程	68
4.3	匹配空间变换法	72
4.3.1	预处理	72
4.3.2	匹配空间变换描述	73
4.3.3	基本实现流程	75
4.4	全变差融合法	78
4.4.1	时频域增强处理	78
4.4.2	全变差融合思想	79
4.4.3	算法仿真验证	82
4.5	自适应聚类法	86
4.5.1	自适应聚类描述	86
4.5.2	改进 Viterbi 算法	89

4.5.3	算法仿真验证	90
4.6	最近邻域“选择”法	93
4.6.1	最近邻域“选择”思路	93
4.6.2	微多普勒变化率分析法	96
4.6.3	算法仿真验证	97
第5章	基于单一视角的弹道目标微动特征提取	100
5.1	弹头目标宽带散射特性分析	100
5.2	弹头目标微多普勒效应	104
5.3	弹头目标微动特征提取	106
5.3.1	基于轴对称特性的 ω_p 、 φ_p 提取	106
5.3.2	基于半锥角先验信息的章动角估计	107
5.3.3	算法仿真验证	109
第6章	同构组网雷达微动特征提取与空间位置重构	124
6.1	窄带雷达网中目标微动特征提取	124
6.1.1	微多普勒频率特性分析	124
6.1.2	基于频率补偿的散射中心匹配关联	126
6.1.3	进动与结构参数联合提取	127
6.1.4	仿真分析	129
6.2	宽带雷达微动特征提取	133
6.2.1	弹头目标投影长度分析	133
6.2.2	微动特征及结构特征提取	135
6.2.3	性能分析	136
6.3	宽带组网雷达微动参数优化求解	142
6.3.1	弹头目标三维空间进动模型	142
6.3.2	基本实现流程	144
6.3.3	算法仿真验证	145
6.4	弹道目标三维空间重构	148
6.4.1	窄带雷达网中目标微动三维重构	149
6.4.2	基于多站的旋转目标三维重构	154
6.4.3	弹道目标三维空间位置重构	162

第 7 章 异构组网雷达微动特征提取	171
7.1 基于 Hough 变换的旋转目标三维重构	171
7.1.1 雷达网系统模型分析	171
7.1.2 匹配度矩阵构建	173
7.1.3 三维重构	173
7.1.4 仿真分析	176
7.2 基于微动信息矩阵的三维微动特征提取	179
7.2.1 混合体制组网雷达系统构建	180
7.2.2 多分量微动特征分析与分离	180
7.2.3 微动信息矩阵构建及解算	183
7.2.4 微动特征及结构参数估计	184
7.2.5 仿真分析	185
7.3 基于微多普勒相关性的进动目标微动特征提取	189
7.3.1 微多普勒相关性分析	189
7.3.2 基于微多普勒和差比的宽窄带匹配关联	190
7.3.3 微动特征与结构参数估计	191
7.3.4 仿真分析	192
7.4 基于散射中心融合关联特性的三维微动特征提取	196
7.4.1 混合体制组网雷达特性分析	196
7.4.2 基于系数加权的三维锥旋矢量提取	197
7.4.3 基于散射中心融合关联的微动特征及结构参数解算	199
7.4.4 仿真分析	201
7.5 多弹头目标三维微动特征提取	204
7.5.1 多进动弹头微多普勒分析	204
7.5.2 多弹头目标的多站微动周期匹配	207
7.5.3 弹头目标微动特征提取与三维重构	210
7.5.4 仿真分析	212
第 8 章 总结与展望	218
参考文献	220

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Ballistic missile and ballistic missile defense system	1
1.2 Ballistic missile target recognition	2
1.2.1 Recognition in boosting phase	3
1.2.2 Recognition in midcourse	3
1.2.3 Recognition in reentry phase	4
1.3 Micro-Doppler effect of ballistic targets and its application	4
1.3.1 Concept of micro-Doppler effect of ballistic targets	5
1.3.2 Analysis of micro-Doppler effect and feature extraction of ballistic targets	6
1.4 Framework of this book	9
Chapter 2 Motion characteristics and micro-Doppler effect of ballistic targets	11
2.1 Translational motion characteristics of ballistic targets	11
2.1.1 Relationship among relevant translational motion parameters	12
2.1.2 Calculation of translational motion parameters	13
2.2 Micro-motion characteristics of ballistic targets in midcourse	15
2.2.1 Micro-motion characteristics of rotating targets	15
2.2.2 Micro-motion characteristics of precession targets	18
2.3 Micro-Doppler effect of ballistic targets	25
2.3.1 Echo model of pulse Doppler radar	25
2.3.2 Echo model of linear frequency modulated radar	26
2.3.3 Micro-Doppler effect of ballistic targets under various radar systems	28
Chapter 3 Translational motion compensation of complex motion of ballistic targets	31
3.1 Influence on micro-Doppler of translational motion	31

3.2	Doppler rate algorithm	34
3.2.1	Doppler extraction of the strongest scattering point	34
3.2.2	Relationship between micro-Doppler and Doppler rate	34
3.2.3	Estimation of translational motion and compensation	36
3.3	Doppler extremum algorithm	38
3.3.1	Relationship between translational motion parameters and Doppler extremum points	38
3.3.2	Basic implementation process	39
3.4	Conjugated multiplication algorithm	40
3.4.1	Delayed conjugated multiplication algorithm	40
3.4.2	Symmetry conjugated multiplication algorithm	45
3.5	Methods of micro-Doppler zooming algorithm	52
3.5.1	Multi-order delayed multiplication	52
3.5.2	Concept of micro-Doppler zooming	54
3.5.3	Basic implementation process and verification	56

Chapter 4	Multi-component micro-Doppler separation of ballistic targets	61
4.1	Micro-Doppler effect of group ballistic targets	61
4.1.1	Micro-Doppler effect of rotating group targets	62
4.1.2	Micro-Doppler effect of precession group targets	63
4.2	Shortest path algorithm	66
4.2.1	Description of shortest path algorithm	66
4.2.2	Dijkstra algorithm	68
4.2.3	Basic implementation process	68
4.3	Matched space transform algorithm	72
4.3.1	Pretreatment	72
4.3.2	Description of matched space transform	73
4.3.3	Basic implementation process	75
4.4	Total variation fusing algorithm	78
4.4.1	Time-frequency domain enhancement	78
4.4.2	Total variation fusion algorithm	79
4.4.3	Algorithm simulation and verification	82
4.5	Adaptive clustering algorithm	86
4.5.1	Description of adaptive clustering	86

4. 5. 2	Improved Viterbi algorithm	89
4. 5. 3	Algorithm simulation and verification	90
4. 6	Nearest neighbor “selection” algorithm	93
4. 6. 1	Method of nearest neighbor selection	93
4. 6. 2	Micro-Doppler rate analysis algorithm	96
4. 6. 3	Algorithm simulation and verification	97

Chapter 5 Micro-motion feature extraction of ballistic targets based on unilateral view 100

5. 1	Analysis of wideband scattering characteristics of warhead targets	100
5. 2	Micro-Doppler effect of warhead targets	104
5. 3	Micro-motion feature extraction of warhead targets	106
5. 3. 1	Extraction of ω_p, φ_p based on symmetrical characteristics	106
5. 3. 2	Nutation angle estimation based on prior information of half-cone angle	107
5. 3. 3	Algorithm simulation and verification	109

Chapter 6 Micro-motion feature extraction and spatial position reconstruction under homogeneous netted radar 124

6. 1	Micro-motion feature extraction under narrowband radar networks	124
6. 1. 1	Analysis of characteristic of micro-Doppler frequency	124
6. 1. 2	Scatters match and correlation based on the frequency compensation	126
6. 1. 3	Combined extraction of precession and structure parameter	127
6. 1. 4	Performance analysis	129
6. 2	Micro-motion feature extraction under the wide band radar system	133
6. 2. 1	Analysis of projection length of warhead targets	133
6. 2. 2	Micro-motion feature and structure feature extraction	135
6. 2. 3	Performance analysis	136
6. 3	Optimization approach for micro-motion parameters under wideband radar networks	142
6. 3. 1	Precession model of warehead target in 3-D space	142
6. 3. 2	Basic implementation process	144
6. 3. 3	Algorithm simulation and verification	145

6.4	3-D spatial reconstruction of ballistic targets	148
6.4.1	3-D spatial reconstruction of micro-motion targets under narrow band radar	149
6.4.2	3-D spatial reconstruction of rotating targets based on multistation	154
6.4.3	3-D spatial position reconstruction of ballistic targets	162
Chapter 7 Micro-motion feature extraction under heterogeneous netted radar		171
7.1	3-D reconstruction of rotating target based on Hough transform	171
7.1.1	Analysis of netted radar system	171
7.1.2	Establish of matching degree matrix	173
7.1.3	3-D reconstruction	173
7.1.4	Simulation analysis	176
7.2	3-D micro-motion feature extraction based on micro-motion information matrix	179
7.2.1	Establishment of hybrid-scheme radar network	180
7.2.2	Analysis and separation of multi-component micro-motion feature ...	180
7.2.3	Establishment and calculation of micro-motion information matrix ...	183
7.2.4	Estimation of micro-motion and structure parameters	184
7.2.5	Simulation analysis	185
7.3	Micro-motion feature extraction of precession target based on mico-Doppler correlation	189
7.3.1	Analysis of micro-Doppler correlation	189
7.3.2	Match and correlation of narrowband and wideband radars based on micro-Doppler sum-difference ratio	190
7.3.3	Micro-motion feature and structure parameters estimation	191
7.3.4	Simulation analysis	192
7.4	3-D micro-motion feature extraction based on scatter fusing and correlation	196
7.4.1	Analysis of characteristic of hybrid-scheme radar network	196
7.4.2	Extraction of 3-D conning vector based on weighted coefficient ...	197
7.4.3	Micro-motion feature and structure parameters estimation based on scatter fusing and correlation	199

7.4.4	Simulation analysis	201
7.5	3-D micro-motion feature extraction of group warhead targets	204
7.5.1	micro-Doppler analysis of multiple precession targets	204
7.5.2	Multiple-station micro-motion period match of multiple warhead targets	207
7.5.3	Micro-motion feature extraction and 3-D reconstruction of warhead target	210
7.5.4	Simulation analysis	212
Chapter 8	Review and prospects	218
References		220

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,印度和一些北约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识别弹道目标已经受到了越来越多的关注。弹道目标的微动特性是弹道中段目标识别的重要依据之一。组网雷达的出现为弹道目标中段特征提取和目标识别提供了更多可测参数,有效地克服了单部雷达视角的局限性以及提取信息精度较低的缺点。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。微动特征与目标的质量大小、分布特性有关,因此微动特征与目标的结构特征、电磁散射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。本章首先介绍弹道导弹的特点,并简要描述各国弹道导弹防御系统的组成,接下来深入分析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