



国防科技图书出版基金

Missile-borne SAR Guidance:
Fundamentals and Key Techniques

弹载合成孔径雷达制导 及其关键技术

祝明波 杨立波 杨汝良 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

弹载合成孔径雷达制导 及其关键技术

Missile-borne SAR Guidance: Fundamentals
and Key Techniques

祝明波 杨立波 杨汝良 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

弹载合成孔径雷达制导及其关键技术 / 祝明波, 杨立波, 杨汝良编著. —北京: 国防工业出版社, 2014. 6
ISBN 978 - 7 - 118 - 09438 - 1

I. ①弹... II. ①祝... ②杨... ③杨... III. ①弹载雷达 - 合成孔径雷达 - 雷达制导 IV. ①TN96

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 104429 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 8 1/4 字数 228 千字

2014 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 96.00 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	杨崇新	
秘 书 长	杨崇新			
副 秘 书 长	邢海鹰	谢晓阳		
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	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

弹载合成孔径雷达制导,即采用弹载合成孔径雷达作为成像传感器来实现导弹精确制导的一种先进制导技术,兼具雷达制导和成像制导的优势,具有全天时、全天候、主动高分辨微波成像能力,是当前国内外精确制导技术的一个重要发展方向。

受技术条件所限,现阶段主要借助于景象匹配技术实现。因此,弹载合成孔径雷达制导涉及合成孔径雷达、制导和图像处理等技术,是一项跨雷达、导弹和信息处理多个学科门类的综合性技术。

总体上,可将弹载合成孔径雷达制导的研究内容划分为理论、技术和系统三个层面:一是理论层面,主要涉及导弹制导、合成孔径雷达等领域的基本原理以及将合成孔径雷达用于导弹精确制导的具体模式等;二是技术层面,主要包括导弹加装合成孔径雷达后弹道的优化设计、弹载合成孔径雷达成像、弹载合成孔径雷达制导参考图制备与景象匹配、导航制导等;三是系统层面,主要包括弹载合成孔径雷达成像匹配制导系统的建模、分析、设计、优化及研制、测试和试验等。

本书专门论述弹载合成孔径雷达制导的基本概念、主要特点、典型模式、关键技术等内容,是编著者近年来持续从事弹载合成孔径雷达制导概念与关键技术研究的成果总结。全书可分为三部分,共7章:

第一部分,即第1章,绪论。简要介绍了弹载合成孔径雷达制导的基本概念、主要特点与国内外研究状况。

第二部分,即第2章,弹载合成孔径雷达制导基础。主要介绍了弹载合成孔径雷达成像模式、系统参数、合成孔径雷达图像的特点、弹载合成孔径雷达制导应用模式及弹载合成孔径雷达制导关键技术综述。

第三部分,包括第3~7章。重点论述了弹载合成孔径雷达制导涉及的五项关键技术:弹道优化设计,弹载合成孔径雷达成像,弹载合成

孔径雷达制导参考图制备,弹载合成孔径雷达制导景象匹配,导弹定位。各章内容如下:

第3章,弹道优化设计。常规导弹的弹道主要由过载和突防要求决定,合成孔径雷达难以实现前视成像的局限性为导弹弹道的设计提出了新要求,因此使得弹道的优化设计成为弹载合成孔径雷达成像制导的一项关键技术。本章专门论述了弹载合成孔径雷达制导情况下的弹道优化设计问题,内容包括概述、弹道优化基础、优化方法及工具、弹道优化策略、弹道优化仿真。

第4章,弹载合成孔径雷达成像。与常规机载和星载平台不同,弹载条件下合成孔径雷达的运动具有高速、俯冲、非匀直等特殊性和要求成像必须具有实时性,这使得成像成为弹载合成孔径雷达制导得以有效实现的一项关键技术。本章专门论述了弹载情况下的合成孔径雷达成像问题,内容包括概述、成像几何关系与回波信号特性、子孔径成像常用算法及改进、大斜视成像、俯冲弹道成像。

第5章,弹载合成孔径雷达制导参考图制备。受当前技术所限,采用弹载合成孔径雷达制导时只能基于景象匹配技术实现目标的识别以及导弹的定位,而参考图(包括参考模板)又是景象匹配环节的一个重要因素,因此参考图与参考模板制备便成为弹载合成孔径雷达制导得以有效实现的一项关键技术。本章专门论述了弹载合成孔径雷达制导情况下的参考图与参考模板制备问题,内容包括概述、一般考虑、基于雷达图像模拟的参考图制备、基于遥感图像的参考图制备、参考模板制备实例。

第6章,弹载合成孔径雷达制导景象匹配。基于上述相同的道理,在弹载合成孔径雷达制导情况下,需要高精度、快速、稳健的景象匹配操作,因此景象匹配(本质上即图像匹配)亦成为弹载合成孔径雷达制导得以有效实现的一项关键技术。本章专门论述了弹载合成孔径雷达制导情况下的图像匹配问题,内容包括概述、图像匹配问题的描述、图像匹配算法综述、地面起伏影响及其校正、抗噪声合成孔径雷达图像匹配方法、利用边缘和统计特性的合成孔径雷达图像匹配算法。

第7章,导弹定位。弹载合成孔径雷达完成高质量成像并实现与参考图或参考模板的高精度图像匹配后,如何从匹配结果出发进行导

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 弹载合成孔径雷达制导的概念与特点	1
1.1.1 基本概念	1
1.1.2 主要特点	2
1.2 国内外研究状况	4
1.2.1 国外研究状况	4
1.2.2 国内发展现状	8
参考文献	9
第 2 章 弹载合成孔径雷达制导基础	10
2.1 弹载合成孔径雷达成像模式	10
2.1.1 多普勒波束锐化	11
2.1.2 正侧视条带成像	13
2.1.3 聚束成像	14
2.1.4 斜视成像	15
2.1.5 前视成像	16
2.1.6 双站模式	18
2.1.7 环扫模式	19
2.2 弹载合成孔径雷达系统参数	21
2.2.1 工作频率	21
2.2.2 极化方式	21
2.2.3 入射角	22
2.2.4 分辨率	22

2.2.5	测绘带宽度	24
2.2.6	脉冲重复频率	25
2.2.7	天线尺寸	26
2.2.8	发射功率	26
2.3	合成孔径雷达图像特点	28
2.3.1	斜距与地距	28
2.3.2	透视收缩和叠掩	30
2.3.3	阴影	31
2.3.4	相干斑	33
2.4	弹载合成孔径雷达制导应用模式	33
2.4.1	分类	34
2.4.2	中制导应用模式	36
2.4.3	末制导应用模式	38
2.4.4	复合制导应用模式	41
2.5	弹载合成孔径雷达制导关键技术	42
2.5.1	共性关键技术	42
2.5.2	中制导应用关键技术	44
2.5.3	末制导应用关键技术	44
2.5.4	复合制导应用关键技术	45
	参考文献	46
第3章	弹道优化设计	48
3.1	概述	48
3.2	弹道优化基础	49
3.2.1	导弹运动模型	49
3.2.2	目标函数	51
3.2.3	约束条件	53
3.2.4	弹道优化模型	54
3.3	优化方法及工具	56
3.3.1	概述	56
3.3.2	优化方法分类	56

3.3.3	Radau 伪谱法	58
3.3.4	优化工具	63
3.4	弹道优化策略	64
3.4.1	基于遗传算法的优化策略	64
3.4.2	基于 SQP 算法的优化策略	71
3.4.3	基于 Radau 伪谱法的优化策略	74
3.5	弹道优化仿真	77
3.5.1	基于遗传算法的仿真	77
3.5.2	基于 SQP 算法的仿真	79
3.5.3	基于 Radau 伪谱法的仿真	83
	参考文献	86
第 4 章	弹载合成孔径雷达成像	90
4.1	概述	90
4.2	成像几何关系与回波信号特性	91
4.2.1	平飞弹道	91
4.2.2	俯冲弹道	99
4.3	子孔径成像常用算法及改进	105
4.3.1	SPECAN 算法	105
4.3.2	ECS 算法	108
4.3.3	改进 ECS 算法	115
4.3.4	扩展 RD 算法	120
4.4	大斜视成像	127
4.4.1	概述	127
4.4.2	时域去走动影响分析	127
4.4.3	算法流程	131
4.4.4	时域去走动产生的新问题	135
4.4.5	仿真分析	136
4.5	俯冲弹道成像	139
4.5.1	概述	139
4.5.2	算法流程	140

4.5.3 仿真分析	144
参考文献	146
第5章 弹载合成孔径雷达制导参考图制备	148
5.1 概述	148
5.2 一般考虑	148
5.3 基于雷达图像模拟的参考图制备	149
5.3.1 一般步骤	150
5.3.2 地理信息数据库	150
5.3.3 目标特性数据库	151
5.3.4 雷达模型	152
5.3.5 雷达图像模拟	155
5.4 基于遥感图像的参考图制备	159
5.4.1 一般步骤	159
5.4.2 预处理	159
5.4.3 匹配区选择	160
5.4.4 特征提取与分类	161
5.4.5 模板生成	162
5.5 参考模板制备实例	165
5.5.1 目标参考模板制备实例	165
5.5.2 边缘参考模板制备实例	175
参考文献	179
第6章 弹载合成孔径雷达制导景象匹配	181
6.1 概述	181
6.2 图像匹配问题的描述	182
6.2.1 数学描述	183
6.2.2 性能指标	184
6.2.3 匹配要素	185
6.3 图像匹配算法	195
6.3.1 概述	195

6.3.2	经典算法	196
6.3.3	高性能算法	198
6.3.4	快速算法	199
6.3.5	稳健算法	201
6.4	地面起伏影响及其校正	203
6.4.1	地面起伏影响	204
6.4.2	匹配定位分析	204
6.4.3	垂直投影校正	204
6.5	抗噪声合成孔径雷达图像匹配方法	205
6.5.1	算法介绍	205
6.5.2	仿真分析	206
6.6	利用边缘和统计特性的合成孔径雷达图像匹配算法	209
6.6.1	基于统计特性的相似性度量	209
6.6.2	分层搜索策略	210
6.6.3	匹配流程	211
6.6.4	仿真分析	211
	参考文献	214
第7章	导弹定位	218
7.1	概述	218
7.2	导弹定位原理	219
7.2.1	基本原理	219
7.2.2	测量误差来源	220
7.2.3	定位模型	221
7.3	导弹定位精度分析	222
7.3.1	仅考虑距离和多普勒测量误差	222
7.3.2	考虑速度、高度和参考点位置误差	225
7.4	导弹定位解算	230
7.4.1	最小二乘迭代解算	230
7.4.2	闭式解算	234
	参考文献	242

Contents

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Concept and Characteristics of Missile-borne SAR	
	Guidance	1
1.1.1	Basic Concept	1
1.1.2	Characteristics	2
1.2	Research Status at Home and Abroad	4
1.2.1	Research Status Abroad	4
1.2.2	Research Status at Home	8
	References	9
Chapter 2	Missile-borne SAR Guidance Fundamentals	10
2.1	Imaging Modes of Missile-borne SAR	10
2.1.1	DBS Mode	11
2.1.2	Side Looking Mode	13
2.1.3	Soptlight Mode	14
2.1.4	Squint Mode	15
2.1.5	Forward Looking Mode	16
2.1.6	Bistatic Mode	18
2.1.7	Circular Scanning	19
2.2	System Parameters of Missile-borne SAR	21
2.2.1	Operating Frequency	21
2.2.2	Polarization Mode	21
2.2.3	Incident Angle	22

2.2.4	Resolution	22
2.2.5	Swath Width	24
2.2.6	PRF	25
2.2.7	Antenna Dimension	26
2.2.8	Transmission Power	26
2.3	Characteristics of SAR Image	28
2.3.1	Range and Slant Range	28
2.3.2	Foreshortening and Layover	30
2.3.3	Radar Shadow	31
2.3.4	Speckle	33
2.4	Application Modes of Missile-borne SAR in	
	Guidance	33
2.4.1	Classification	34
2.4.2	Application in Mid-course Guidance	36
2.4.3	Application in Terminal Guidance	38
2.4.4	Application in Combined Guidance	41
2.5	Key Techniques of Missile-borne SAR Guidance	42
2.5.1	Mutual Key Techniques	42
2.5.2	Key Techniques of Mid-course Guidance	44
2.5.3	Key Techniques of Terminal Guidance	44
2.5.4	Key Techniques of Combined Guidance	45
	References	46

Chapter 3 Trajectory Optimization 48

3.1	Introduction	48
3.2	Fundamentals of Trajectory Optimization	49
3.2.1	Missile Motion Model	49
3.2.2	Objective Function	51
3.2.3	Constraint Condition	53
3.2.4	Mathematic Model	54
3.3	Optimization Methods and Tools	56

3.3.1	Introduction	56
3.3.2	Classification	56
3.3.3	Introduction of RPM	58
3.3.4	Optimization Tools	63
3.4	Strategy of Trajectory Optimization	64
3.4.1	Optimization Strategy Based on GA	64
3.4.2	Optimization Strategy Based on SQP	71
3.4.3	Optimization Strategy Based on RPM	74
3.5	Simulation	77
3.5.1	Simulation Based on GA	77
3.5.2	Simulation Based on SQP	79
3.5.3	Simulation Based on RPM	83
	References	86

Chapter 4 Missile-Borne SAR Imaging Method 90

4.1	Introduction	90
4.2	Imaging Geometry and Echo Signal Characteristics	91
4.2.1	Level Trajectory	91
4.2.2	Diving Trajectory	99
4.3	Common Subaperture imaging Algorithms	105
4.3.1	SPECAN Algorithm	105
4.3.2	ECS Algorithm	108
4.3.3	Improved ECS Algorithm	115
4.3.4	Extended RD Algorithm	120
4.4	High Squint Imaging Algorithm	127
4.4.1	Introduction	127
4.4.2	Analysis of Range-Walk Removal Effect	127
4.4.3	Algorithm Flow	131

4.4.4	Problems of Range-Walk Removal	135
4.4.5	Simulation Corroboration	136
4.5	Imaging for Dive Trajectory	139
4.5.1	Outline	139
4.5.2	Algorithm Flow	140
4.5.3	Simulation Corroboration	144
References		146

Chapter 5 Reference Map Generation for Missile-borne SAR

Guidance		148
5.1	Introduction	148
5.2	General Considerations	148
5.3	Reference Map Generation Based on Radar Image Simulation	149
5.3.1	General Steps	150
5.3.2	Geographic Information Database	150
5.3.3	Target Characteristic Database	151
5.3.4	Radar Model	152
5.3.5	Radar Image Simulation	155
5.4	Reference Map Generation Based on Remote Sensing Images	159
5.4.1	General Step	159
5.4.2	Pretreatments	159
5.4.3	Matching Area Selection	160
5.4.4	Feature Extraction and Classification	161
5.4.5	Template Generation	162
5.5	Examples of Reference Template Generation	165
5.5.1	Example of Target Reference Template Generation	165
5.5.2	Example of Edge Reference Template Generation	175