

合成孔径雷达侦察 与干扰技术

Reconnaissance and Jamming Technology to Synthetic Aperture Radar

蔡幸福 高晶 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

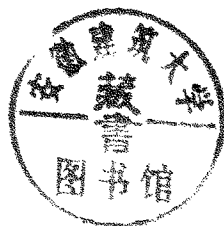


国防科技图书出版基金

合成孔径雷达侦察与 干扰技术

Reconnaissance and Jamming Technology to
Synthetic Aperture Radar

蔡幸福 高 晶 著



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

合成孔径雷达侦察与干扰技术/蔡幸福,高晶著.

—北京:国防工业出版社,2018.9

ISBN 978-7-118-11603-8

I. ①合… II. ①蔡… ②高… III. ①合成孔径雷达
IV. ①TN958

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第216664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)

天津嘉恒印务有限公司

新华书店经售

*

开本710×1000 1/16 印张11 $\frac{3}{4}$ 字数202千字

2018年9月第1版第1次印刷 印数1—2000册 定价69.00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	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

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种主动式微波相干成像装置,不仅能获得高分辨率的 SAR 图像,而且具有全天候、全天时、大尺度、远距离、连续观测的能力。尤其是星载 SAR,具有运行轨道高,飞行速度快,不受国界和领空限制的优点,既可实现长时间、大范围的战略侦察,又可进行高分辨率、高重复性的战术监视,在民用和军事领域发挥了重要作用。目前,世界各国对 SAR 的发展日益重视,其功能不断完善,应用领域不断拓展,已成为对地观测系统和侦察监视系统中不可或缺的探测工具。

对合成孔径雷达进行侦察和干扰的目的是削弱对方的信息获取优势,保护己方的信息安全,本书将结合合成孔径雷达的工作机理、技术特点、作战样式等,对该领域的侦察和干扰技术进行研究和论述,主要涉及 SAR 基本原理、SAR 信号的分选与识别、星载 SAR 观测区域判定、压制性干扰技术及应用模型、欺骗性干扰技术及应用模型和 SAR 干扰机的适应性分析等内容。本书为作者及团队多年研究成果的总结,主要内容受到国家自然科学基金、863 创新基金、军队科研等科研项目的支持,已获得军队科技进步二等奖 1 项、三等奖 2 项,部分关键技术和方法得到了推广和应用,同时,作者多次参与重大活动,负责相关对抗试验工作,积累了大量数据和实践经验,并将在实践中发现和解决的问题编入了本书内容,如星载 SAR 观测区域的判定、SAR 干扰机适用性、干扰样式的选择等问题,这些内容直接来源于实践,具有更强的指导性和可操作性。

在内容安排上,本书既注重系统、全面地介绍理论知识,又力求反映本领域的最新研究成果,强调工程实际应用,可作为高等院校控制科学与工程、电子工程等学科高年级本科生和研究生的参考书,也希望能为合成孔径雷达对抗技术及应用研究领域的科技工作者提供实用性强的参考与借鉴。

在编写过程中,我们参考了大量文献资料,对这些文献的作者们表示感谢。西北工业大学何明一教授和西安电子科技大学廖桂生教授在百忙之中审阅了书稿,提出了许多宝贵的意见建议,在此一并表示感谢。特别感谢国防工业出版社

对本书的出版给予了极大的关心,在内容安排上给予了热情的指导和帮助,感谢国防科技图书出版基金给予的资助。

由于作者水平有限,涉面不广,书中难免存在不当之处,诚恳欢迎广大读者批评指正。

作 者
2018 年 5 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 合成孔径雷达	1
1.1.1 合成孔径雷达简介	1
1.1.2 SAR 发展历程	1
1.1.3 SAR 发展趋势	6
1.1.4 SAR 应用领域	7
1.2 国内外研究现状	8
1.2.1 雷达信号分选与识别技术	8
1.2.2 合成孔径雷达压制性干扰技术	10
1.2.3 合成孔径雷达欺骗性干扰技术	12
参考文献	13
第 2 章 合成孔径雷达基本原理	17
2.1 引言	17
2.2 线性调频信号及脉冲压缩	17
2.3 点目标回波信号模型	19
2.3.1 回波信号模型	19
2.3.2 多普勒历程	21
2.4 距离徙动及其校正	22
2.4.1 距离徙动量	23
2.4.2 距离徙动校正的标准	25
2.4.3 时域距离走动校正	26
2.4.4 方位频域距离弯曲校正	26
2.5 距离-多普勒算法	26
2.5.1 变换到距离频域	27
2.5.2 距离向脉冲压缩	28
2.5.3 变换到 R-D 域	29
2.5.4 距离徙动校正	30
2.5.5 方位向脉冲压缩	31

2.6	点目标成像仿真	31
2.6.1	参数设置	32
2.6.2	仿真结果	32
2.7	实测数据成像	33
2.8	合成孔径雷达图像应用	34
2.8.1	典型目标的检测与识别	34
2.8.2	不同时相 SAR 图像的变化检测	39
	参考文献	45
第3章	合成孔径雷达信号的分选与识别	47
3.1	雷达辐射源信号与识别结构模型	47
3.1.1	雷达辐射源信号	47
3.1.2	辐射源识别的结构模型	51
3.2	合成孔径雷达指纹特征产生机理	51
3.2.1	合成孔径雷达发射机结构模型	51
3.2.2	SAR 发射机相位噪声模型	55
3.2.3	仿真试验	60
3.3	基于 MP-DE 的雷达辐射源信号特征提取	65
3.3.1	匹配追踪算法	65
3.3.2	基于匹配追踪方法的最佳原子提取	66
3.3.3	基于 DE-MP 的原子特征提取	68
3.4	基于增量模糊支持向量机的雷达辐射源信号识别	77
3.4.1	界定平凡训练数据	79
3.4.2	产生最小超球体	81
3.4.3	增量模糊支持向量机识别算法	81
3.4.4	仿真试验	81
	参考文献	84
第4章	星载合成孔径雷达观测区域的判定方法	86
4.1	引言	86
4.2	基于 STK 的星载 SAR 可视情况预报	87
4.2.1	STK 简介	87
4.2.2	对 SAR-lupe 卫星可视情况预报	88
4.3	观测区域的计算模型	92
4.3.1	条带式星载 SAR 的基本原理	92
4.3.2	视角模型	92
4.3.3	测绘带模型	94

4.3.4	观测区域模型	95
4.3.5	仿真计算	96
	参考文献	97
第5章	压制性干扰技术及其应用模型	98
5.1	引言	98
5.2	SAR 压制性干扰概述	98
5.2.1	基本原理	98
5.2.2	干扰方法	99
5.2.3	基于等效视数的干扰效果评估方法	102
5.2.4	噪声干扰仿真	103
5.3	移频干扰技术	108
5.3.1	对合成孔径雷达移频干扰的定性分析	108
5.3.2	固定移频干扰	110
5.4	脉间分段随机移频干扰	114
5.4.1	脉间分段随机移频干扰的机理	114
5.4.2	脉间分段随机移频干扰的成像输出	114
5.4.3	仿真试验	117
5.5	脉间分段随机移频干扰的应用模型	122
5.5.1	理论模型	122
5.5.2	单站防护方法	123
5.5.3	多站防护方法	124
	参考文献	130
第6章	欺骗性干扰技术及其应用模型	131
6.1	引言	131
6.2	欺骗性干扰概述	131
6.2.1	SAR 欺骗性干扰技术	131
6.2.2	传统的直达波欺骗性干扰原理	132
6.3	二维间歇采样转发干扰	136
6.3.1	间歇采样干扰信号	137
6.3.2	二维间歇采样转发干扰信号经距离向匹配滤波器的 输出	139
6.3.3	二维间歇采样转发干扰信号经方位向匹配滤波器的 输出	141
6.3.4	干扰效果分析	142
6.3.5	干扰参数分析	144

6.3.6	仿真试验	144
6.4	二维间歇采样转发干扰技术应用模型	150
6.4.1	适应性分析	150
6.4.2	应用模型	151
6.4.3	仿真试验	152
	参考文献	154
第7章	合成孔径雷达干扰机的适用性分析	155
7.1	引言	155
7.2	最大容许响应时间模型	155
7.2.1	理论模型	155
7.2.2	仿真计算	156
7.3	最大容许灵敏度模型	157
7.3.1	简化侦察方程	158
7.3.2	修正侦察方程	158
7.3.3	旁瓣侦察方程	158
7.3.4	仿真计算	160
7.4	电磁兼容评估模型	161
7.4.1	SAR 雷达方程	161
7.4.2	干扰功率模型	162
7.4.3	电磁兼容评估模型	163
7.4.4	仿真计算	166
	参考文献	167
	缩略语	168

CONTENTS

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Synthetic aperture radar	1
1.1.1	Introduction of SAR	1
1.1.2	Development history of SAR	1
1.1.3	Development trends of SAR	6
1.1.4	Application of SAR	7
1.2	Review of research	8
1.2.1	Sorting and recognition technology of radar signal	8
1.2.2	Blanket jamming technology to SAR	10
1.2.3	Deception jamming technology to SAR	12
	References	13
Chapter 2	Basic principle of synthetic aperture radar	17
2.1	Introduction	17
2.2	LFM and pulse compression	17
2.3	Echo signal model of point target	19
2.3.1	Echo signal model	19
2.3.2	Doppler history	21
2.4	Range migration correction	22
2.4.1	Range migration	23
2.4.2	Standard of RMC	25
2.4.3	Range walk correction in time domain	26
2.4.4	Range curvature correction in frequency domain	26
2.5	Range-doppler algorithm	26
2.5.1	Range-frequency domain	27
2.5.2	Pulse compression in range direction	28
2.5.3	Range-Doppler domain	29
2.5.4	RMC	30
2.5.5	Pulse compression in azimuth direction	31

2.6	Imaging simulation of point target	31
2.6.1	Parameters set	32
2.6.2	Simulation results	32
2.7	Imaging of real data	33
2.8	Application of SAR image	34
2.8.1	Detection and identification of typical target	34
2.8.2	Change detection of SAR image	39
	References	45
Chapter 3	Sorting and identification of SAR signal	47
3.1	Radar signal and identification structural model	47
3.1.1	Radar signal	47
3.1.2	Identification structural model	51
3.2	Generation mechanism of fingerprint feature of SAR	51
3.2.1	Structural model of SAR transmitter	51
3.2.2	Phase noise model of SAR transmitter	55
3.2.3	Simulation	60
3.3	Feature extraction of radar signal based on MP-DE	65
3.3.1	MP algorithm	65
3.3.2	Best atomic extraction based on MP	66
3.3.3	Atomic feature extraction based on MP-DE	68
3.4	Identification of radar signal based on IFSVM	77
3.4.1	Define ordinary training data	79
3.4.2	Produce the minimal hyper-sphere	81
3.4.3	IFSVM algorithm	81
3.4.4	Simulation	81
	References	84
Chapter 4	Decision method of observation area of spaceborne SAR	86
4.1	Introduction	86
4.2	Access report based on STK	87
4.2.1	Introduction of STK	87
4.2.2	Access report for SAR-lupe	88
4.3	Calculation model of observation area	92
4.3.1	Basic principle of spaceborne SAR	92
4.3.2	Angle model	92

4.3.3	Swath model	94
4.3.4	Observation area model	95
4.3.5	Simulation	96
	References	97
Chapter 5	Blanket jamming technology and its application model	98
5.1	Introduction	98
5.2	Overview of blanket jamming to SAR	98
5.2.1	Basic principle	98
5.2.2	Jamming method	99
5.2.3	Assessment method of jamming effect based on ENL	102
5.2.4	Simulation of noise jamming	103
5.3	Frequency shift jamming technology	108
5.3.1	Analysis of frequency shift jamming technology to SAR	108
5.3.2	Fixed frequency shift jamming technology	110
5.4	Interpulse subsection randomly-shift-frequency technology	114
5.4.1	Jamming mechanism	114
5.4.2	Imaging output	114
5.4.3	Simulation	117
5.5	Application model of interpulse subsection randomly-shift-frequency technology	122
5.5.1	Theoretical model	122
5.5.2	Protection method using signal jammer	123
5.5.3	Protection method using multiple jammers	124
	References	130
Chapter 6	Deception jamming technology and its application model	131
6.1	Introduction	131
6.2	Overview of deception jamming technology	131
6.2.1	Deception jamming technology to SAR	131
6.2.2	Traditional deception jamming mechanism of direct wave	132
6.3	2-D intermittent sampling repeater jamming technology	136
6.3.1	Intermittent sampling jamming signal	137
6.3.2	Output of pulse compression in range direction	139

6.3.3	Output of pulse compression in azimuth direction	141
6.3.4	Analysis of jamming effect	142
6.3.5	Analysis of jamming parameters	144
6.3.6	Simulation	144
6.4	Application model of 2-D intermittent sampling repeater jamming technology	150
6.4.1	Adaptability analysis	150
6.4.2	Application model	151
6.4.3	Simulation	152
	References	154
Chapter 7	Adaptability analysis of SAR jammer	155
7.1	Introduction	155
7.2	Maximum permissible response time model	155
7.2.1	Theoretical model	155
7.2.2	Simulation	156
7.3	Maximum permissible sensitivity model	157
7.3.1	Simplified reconnaissance equation	158
7.3.2	Amended reconnaissance equation	158
7.3.3	Side lobes reconnaissance equation	158
7.3.4	Simulation	160
7.4	Electromagnetism compatibility assessment model	161
7.4.1	SAR radar equation	161
7.4.2	Jamming power model	162
7.4.3	Electromagnetism compatibility assessment model	163
7.4.4	Simulation	166
	References	167
Abbreviations		168

第 1 章 绪 论

1.1 合成孔径雷达

1.1.1 合成孔径雷达简介

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种主动式微波相干成像雷达,不仅能获得高分辨率的 SAR 图像,而且具有全天候、全天时、大尺度、远距离、连续观测的能力。特别是星载 SAR,既可实现长时间、大范围的战略侦察,又可进行高分辨率、高重复性的战术侦察,在近几场局部战争中发挥了重要作用^[1]。在海湾战争中,美国用“长曲棍球”SAR 成像卫星发现了伊拉克的地下军事设施;在北约空袭南联盟期间,为了解决恶劣天气的影响,北约调用两颗 SAR 成像卫星每天两次飞过战区,进行打击前的情报侦察和打击后的毁伤评估,对战争的进程有着显著的影响。目前,世界各国对星载 SAR 的发展日益重视,其功能不断完善,应用领域不断拓展,已成为对地观测系统和天基侦察监视系统不可或缺的探测工具,国外典型的星载 SAR 系统如表 1-1 所列。

表 1-1 国外星载合成孔径雷达系统

名称	国籍	工作模式	分辨率	用途
FIA1-4	美国	条带、聚束、扫描	1m、0.3m、3m	军用
Lacrosse5	美国	条带、聚束、扫描	1m、0.3m、3m	军用
SAR-Lupe 1~5	德国	聚束、条带	0.7m	军用
TerraSAR-X	德国	条带、聚束、扫描	3~15m、1~3m、15~30m	军用
TecSAR	以色列	条带、聚束、扫描	3m、1m、8m	军用
Cosmo-skymed 1-4	意大利	条带、聚束、扫描	3~15m、1m、30m	军民两用
Radarsat-2	加拿大	精细、扫描	不优于 3m	民用
Alos	日本	聚束、扫描	7~44m、100m	民用
RISAT	印度	聚束	3~12m、2m、25~50m	民用

1.1.2 SAR 发展历程

1. 国外 SAR 发展历程

合成孔径雷达技术源于美国,在欧美发达国家不断完善与发展,其应用领域

也得到不断推广。类似于其他高新技术,目前欧美发达国家在合成孔径雷达最先进的理论、技术和方法方面占据优势。国外 SAR 的发展历程可分为起步、发展和成熟 3 个阶段。

1) 起步阶段

1951 年 6 月,美国 Goodyear 航空公司的 Carl Wiley 首先提出利用频率分析的方法改善雷达的角分辨率,并将其称为多普勒波束锐化。与此同时,伊里诺斯大学控制系统实验室的一个研究小组采用相干机载雷达数据,研究运动目标检测技术。1952 年,C. W. Shervin 第一次提出了采用相位校正的全聚焦阵列概念,还提出了运动补偿的概念,正是这些新思想最终导致了 X 波段相干雷达的研制。1957 年,美国密歇根大学雷达和光学实验室研制的 SAR 系统获得第一张全聚焦的 SAR 图像,从此 SAR 逐步进入人们的视野。

1967 年,Greenberg 首先提出在卫星上安装 SAR 的设想。由于卫星具有飞行高度高、测绘带宽大、可以大面积成像等优点,科学家开始了以航天飞机、卫星等为载体的空载 SAR 研究,并取得了巨大进展。1972 年,喷气动力实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)进行了 L 波段星载 SAR 的机载校飞。

1978 年 6 月 27 日,美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)成功地发射了全球第一颗装载了合成孔径雷达的人造地球卫星(SEASAT-A),对地球表面 1 亿 km^2 的面积进行了测绘,转发了不同地形特征的 SAR 数据,获得了大量过去未曾有过的信息,引起了科学家们的极大重视。SEASAT-A 的发射标志着 SAR 已成功进入从太空对地观测的新时代,标志着星载 SAR 由实验研究向应用研究的关键转变。

2) 发展阶段

由于合成孔径雷达具有全天时、全天候对地观测,以及能透过地表和自然植被探测地下浅层目标的能力,因此在其发展的起步阶段便受到了世界各国的重视。合成孔径雷达也经历了由单波段、单极化、单工作模式、固定入射角向多波段、多极化、多工作模式、多入射角发展的过程。

1981 年 11 月 12 日,美国“哥伦比亚”号航天飞机搭载 SIR-A 顺利升空。雷达影像上成功观测到撒哈拉沙漠的地下古河道,显示了 SAR 具有穿透地表的能力,引起国际科技界的震动。1984 年 10 月 5 日,美国进行了“挑战者”号航天飞机搭载 SIR-B 的实验。SIR-A 和 SIR-B 都源于 SEASAT-A,都工作于 L 波段。其中 SIR-A 的轨道高度为 252km,分辨率为 37m,而 SIR-B 的轨道高度为 250~326km,倾角为 57° ,测绘带宽为 50km,分辨率为 35m。与 SIR-A 的主要不同在于 SIR-B 的波束俯视角可变,而且 SIR-B 可采用光学和数字两种方式记录和处理图像,比 SEASAT 的非实时数字处理的成像速度要快。

1987 年 7 月,苏联发射的 COSMOS-1870 卫星上配备了一部分辨率为 25m