



极化雷达成像处理及应用

JIHUA LEIDA
CHENGXIANG
CHULIJI YINGYONG

肖顺平 王雪松 代大海 著
施龙飞 邢世其 徐 牧



科学出版社

· 013024742

TN957.52
12

极化雷达成像处理及应用

肖顺平 王雪松 代大海 著
施龙飞 邢世其 徐 牧



科学出版社



北航

C1632353

TN957.52

12

内 容 简 介

本书系统论述了极化雷达成像处理及应用的相关理论与技术。内容主要分为3部分:第1部分是极化雷达成像体制及其处理基础,包括雷达极化的概念和表征、极化雷达成像体制、极化 SAR 目标检测、目标极化散射机理分析、目标分解理论与地物分类等;第2部分是极化 SAR/极化 ISAR 特征提取与人工目标提取,主要包括全极化散射中心特征提取、参数估计及其性能分析、极化增强、人工目标提取等;第3部分是针对随机极化压制干扰和假目标欺骗干扰两种典型电子战条件下的极化雷达成像处理。

本书可供电子系统工程,特别是微波遥感和成像目标识别领域的科技人员使用,也可作为相关电子类专业研究生的教材,也可供相关学科研究的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

极化雷达成像处理及应用/肖顺平,王雪松,代大海等著. —北京:科学出版社,2013

ISBN 978-7-03-035933-9

I. 极… II. ①肖…②王…③代… III. ①雷达成像 IV. TN957.52

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 259844 号

责任编辑:余 丁 / 责任校对:钟 洋

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

保定市中华美凯印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年2月第一版 开本:B5(720×1000)

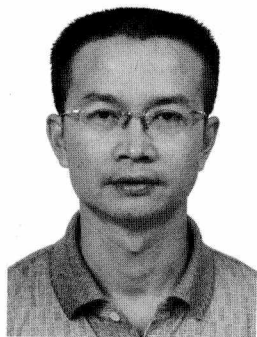
2013年2月第一次印刷 印张:20 1/4 彩插8页

字数:393 000

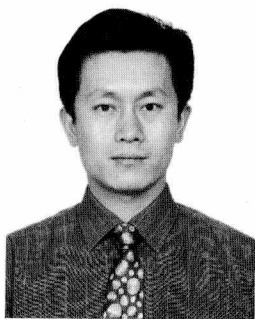
定价:80.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

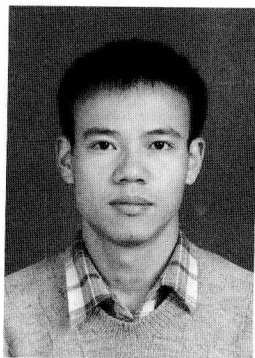
作者简介



肖顺平 男,汉族,1964年4月出生,教授,博士生导师,电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室副主任。国防科学技术大学国家重点学科信息与通信工程学术带头人之一,国家863专家,总装备部仿真技术专业组专家,中国电子学会无线电定位技术分会委员、副秘书长。主要从事信号处理与目标识别、综合电子战等方面的教学与科研工作。先后主讲《信号与系统》、《雷达原理与系统》、《电子系统建模、仿真与评估》、《雷达极化信息处理及其应用》等本科生、硕士生及博士生课程。



王雪松 男,汉族,1972年10月出生,教授,博士生导师。1999年在国防科学技术大学获信息与通信工程专业工学博士学位。全国百篇优秀博士学位论文获得者,曾获霍英东高校青年教师岗位奖,教育部新世纪优秀人才,享受国务院特殊津贴。出版专著7部,申请专利10余项,发表学术论文300余篇。



代大海 男,汉族,1980年12月出生,副教授,博士后。分别于2002年、2003年、2008年获国防科学技术大学学士、硕士、博士学位,并于2010~2012年在中国电子科技集团第三十八研究所从事博士后研究。曾获湖南省优秀硕士学位论文、湖南省优秀博士学位论文、中国博士后科学基金一等资助,荣立三等功1次,发表学术论文40余篇。

前 言

雷达成像具有全天候、全天时、分辨率高等优势。极化反映了电磁波的矢量特性,是电磁波除时域、频域和空域信息的又一可资利用的重要信息,充分挖掘极化信息为现代雷达探测系统性能的改善提供了广阔的空间。极化雷达成像是雷达成像发展的一个重要方向。

极化雷达成像技术的出现大大拓宽了雷达的应用领域。利用高分辨极化雷达成像实现对人造目标的参数反演与特征提取是当前雷达图像解译领域研究的前沿课题。国防科学技术大学电子科学与工程学院长期从事雷达目标特性与目标识别技术研究,特别是近十年来参加完成了包括 973 国家重大基础研究项目、国家自然科学基金重点项目、武器装备预先研究项目等多项科研任务。本书是该团队在极化雷达成像处理及应用研究方面的成果总结,内容共分 7 章。

第 1 章绪论。归纳了雷达极化学的发展历程、研究内容和发展趋势,重点介绍了极化雷达成像及目标特征提取技术研究现状,总结了全极化高分辨信息处理的特点和优势。

第 2 章极化雷达成像及其处理基础。首先简要介绍了雷达极化的概念和表征方法,包括电磁波和目标的极化特性,表征目标极化信息的各种矩阵之间的关系等;接着介绍了典型的分时和同时极化雷达成像体制;重点介绍了作为极化 SAR 信息处理基础的极化 SAR 目标检测、极化 SAR 散射机理和目标分解理论。

第 3 章目标全极化散射中心特征参数估计与性能分析。针对全极化高分辨雷达体制,立足于相干极化理想点散射模型,系统研究了雷达目标全极化散射中心的参数估计方法;推导了相干极化理想点散射模型的极限性能;提出了 P-MUSIC 和 P-ESPRIT 两种性能优良的全极化散射中心参数估计方法;分别利用仿真和实测数据进行了验证和阐释,并从信号子空间角度揭示了 P-MUSIC 和 P-ESPRIT 方法的本质;以全极化极限性能作为参照,分析比较了二者的性能,证实了两者的准最优性。

第 4 章色散条件下目标全极化散射中心特征参数估计与性能分析。首先建立了能够精确描述雷达目标高频电磁极化散射机理的 CP-GTD 模型,该模型既可以给出散射中心的频率色散特性,又可以给出相干极化散射矩阵,二者结合,互为补充,完整地描述了雷达目标的高分辨极化散射特性;提出了基于 CP-GTD 模型的目标散射中心提取与参数估计方法,并从非相干性和相干性两个角度评估了其估计性能,利用仿真和实测数据进行了验证和应用;最后结合弹道导弹防御背景,

研究了全极化散射中心提取在弹道导弹目标识别中的应用,给出了极化散射中心在目标长度、进动频率等特征提取方面的应用。

第5章极化 SAR 图像目标对比增强与人造目标提取。首先对传统极化 SAR 目标对比增强方法进行了归纳比较并指出了传统方法的不足,提出了基于样本像素筛选的极化 SAR 目标对比增强方法和改善同类区域内部像素点间极化相似性的极化增强方法。利用高分辨极化 SAR 实测数据验证了新方法的有效性,可实现人造目标整体区域的有效增强,增强结果更有利于人造目标检测及提取等后续处理。接着阐述了传统基于散射机理分类的人造目标提取方法的原理及流程,通过对人造目标与自然杂波散射机理类型的对比,分析了传统提取方法在提取准确性及完整性等方面的不足;分别引入频谱相干性特征、极化通道相关性特征指导人造目标的提取,提出了基于散射机理分类与频谱相干性分析的极化 SAR 图像人造目标提取新方法。

第6章极化雷达超分辨成像和目标几何特征反演。首先针对全极化 ISAR 体制,从原始数据域出发,建立了能够精确描述雷达目标高频电磁极化散射的二维 CP-GTD 散射模型,提出了基于该模型的全极化 ISAR 超分辨成像,并在此基础上实现了 SAR/ISAR 目标全极化散射中心特征提取,有效解决了多极化通道条件下难以提取散射中心的相干极化特性信息的难题;针对 PolSAR 体制,从极化复图像域出发,将 P-ESPRIT 方法拓广到二维情形,推导出基于理想点散射模型的 PolSAR 超分辨成像与散射中心特征提取方法,解决了二维散射中心位置关联、极化相干散射矩阵同时估计等一系列难题,得到了其极限性能的解析表达式,并且利用仿真数据、暗室测量数据和实测 PolSAR 复图像数据,验证了本章模型方法的正确性和有效性。在此基础上,研究了极化 SAR 图像人造目标几何结构反演方法,利用空频域极化特征在全面揭示目标散射信息上的优势,设计了一种基于空频域极化特征的极化 SAR 图像人造目标几何结构反演策略。

第7章典型有源干扰下极化雷达成像。研究了两种典型干扰下的极化雷达成像方法。针对随机极化压制干扰,提出了极化变换滤波方法。针对有源假目标欺骗干扰,结合分时极化测量体制,研究了 PolSAR 有源假目标干扰的鉴别和对消问题,并提出了相应的抗干扰成像方案。

本书由肖顺平教授、王雪松教授、代大海副教授、施龙飞博士后、邢世其博士和徐牧高工执笔,肖顺平教授拟定全书内容并审校全稿。在本书的撰写过程中,蒋兴才教授、王伟教授、张文明副教授、徐振海副教授、王涛副研究员、刘进讲师和常宇亮讲师等提供了多方面的支持和帮助,同时还得到了刘庆富、庞礴、张静克和韦超等研究生的帮助。本书还得到了庄钊文副校长、吴曼青院士和王国玉研究员的指导,在此一并表示衷心的感谢!

希望本书的出版能为国内从事雷达目标识别研究的广大科技工作者提供参考。由于时间仓促,水平有限,书中疏漏之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室

2012年9月于长沙

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 雷达极化学的发展历程、研究内容和发展趋势	2
1.2.1 雷达极化学的发展历程	2
1.2.2 雷达极化学的主要研究内容	4
1.2.3 雷达极化学的最新进展及发展趋势	6
1.3 极化雷达成像与目标特征提取技术研究现状	8
1.3.1 极化雷达成像系统发展概述	8
1.3.2 雷达目标全极化散射中心提取与参数估计	11
1.3.3 极化 SAR 目标增强和人造目标提取	13
1.3.4 极化雷达超分辨成像与目标特征提取方法	18
1.3.5 有源干扰下的极化雷达成像方法	22
1.3.6 高分辨极化信息处理的特点和优势	25
1.4 本书主要内容简介	28
参考文献	30
第 2 章 极化雷达成像及其处理基础	35
2.1 雷达极化概念和表征方法	35
2.1.1 电磁波的极化特性及其表征方法	35
2.1.2 目标的极化特性及其表征方法	36
2.2 极化 SAR 成像体制	38
2.2.1 SAR 成像基本原理	38
2.2.2 交替发射交替接收的极化 SAR 成像体制	39
2.2.3 交替发射同时接收的极化 SAR 成像体制	40
2.2.4 同时发射同时接收的极化 SAR 成像体制	41
2.3 极化 SAR 目标检测	41
2.3.1 最佳极化检测器	42
2.3.2 极化白化滤波检测器	43
2.3.3 极化匹配检测器	45
2.3.4 虚拟极化匹配检测	46

2.3.5	张量检测器	46
2.3.6	功率最大合成检测器	46
2.3.7	单极化检测器	47
2.3.8	极化检测算法性能比较	47
2.4	目标极化散射机理与目标分解	53
2.4.1	几种基本的散射机理	54
2.4.2	相干目标分解	57
2.4.3	部分相干目标分解	59
2.4.4	基于目标分解理论的极化分类方法	62
	参考文献	69
第3章	目标全极化散射中心特征参数估计与性能分析	71
3.1	全极化散射中心参数估计的极限性能分析	71
3.1.1	相干极化散射中心模型	72
3.1.2	相干极化散射中心模型参数估计的 CRB 矩阵	73
3.1.3	典型条件下 CRB 矩阵的简化分析	75
3.1.4	幅度、相位以及相位差的极限估计精度	78
3.2	全极化处理的最优性证明	80
3.3	全极化散射中心参数估计的 P-MUSIC 方法	83
3.3.1	P-MUSIC 方法原理	83
3.3.2	全极化条件下散射中心数目的估计	85
3.3.3	极化协方差矩阵的平滑处理	88
3.3.4	P-MUSIC 方法流程	89
3.3.5	性能分析与实验验证	90
3.3.6	小结	92
3.4	全极化散射中心参数估计的 P-ESPRIT 方法	93
3.4.1	P-ESPRIT 方法原理	93
3.4.2	性能分析与实验验证	95
3.4.3	小结	98
3.5	P-MUSIC/P-ESPRIT 的子空间解释及其准最优性	98
3.5.1	全极化与单极化方法差异的子空间解释	98
3.5.2	P-MUSIC/P-ESPRIT 方法的性能与全极化极限性能的对比分析	99
3.6	本章小结	99
	参考文献	100
第4章	色散条件下目标全极化散射中心特征参数估计与性能分析	102
4.1	目标 CP-GTD 模型及其特征参数估计方法	103

4.1.1	雷达目标 CP-GTD 模型	103
4.1.2	基于 CP-GTD 模型的全极化散射中心参数估计	104
4.1.3	非相干性和相干性评估指标	106
4.1.4	仿真实验及性能评估	107
4.1.5	小结	111
4.2	目标 CP-GTD 模型方法的极限性能分析	112
4.2.1	CP-GTD 模型参数估计的 CRB	112
4.2.2	极化色杂波条件下的单点 CP-GTD 模型的 CRB 矩阵简化分析	113
4.2.3	实验结果分析	114
4.2.4	小结	119
4.3	基于 CP-GTD 方法的弹道中段目标特征提取	119
4.3.1	目标观测长度特征提取方法	120
4.3.2	目标进动频率特征提取方法	121
4.3.3	高分辨全极化条件下的弹道中段目标特征提取新方法	121
4.3.4	静态实测数据实验与结果分析	122
4.3.5	动态数据仿真实验与结果分析	123
4.3.6	小结	129
4.4	本章小结	129
	参考文献	130
第 5 章	极化 SAR 图像目标对比增强与人造目标提取	132
5.1	极化 SAR 图像目标对比增强方法	132
5.1.1	典型极化对比增强方法的分类及对比	132
5.1.2	基于样本像素筛选的极化 SAR 图像目标对比增强	135
5.1.3	基于改善极化相似性的高分辨极化 SAR 人造目标对比增强	147
5.1.4	小结	160
5.2	极化 SAR 图像人造目标提取	161
5.2.1	传统的极化 SAR 图像人造目标提取方法	161
5.2.2	基于散射机理分类与频谱相干性分析的极化 SAR 人造目标提取	168
5.2.3	基于散射机理分类与方位对称性判决的极化 SAR 人造目标提取	185
5.2.4	小结	191
	参考文献	192
第 6 章	极化雷达超分辨成像和目标几何特征反演	194
6.1	极化雷达超分辨成像与目标特征提取	194
6.1.1	基于 2D CP-GTD 模型的极化 ISAR 超分辨成像与特征提取	195
6.1.2	基于复图像数据的极化 SAR 超分辨成像与目标特征提取	205

6.1.3	全极化二维散射中心特征参数估计的极限性能分析	213
6.1.4	小结	216
6.2	基于极化空频特征的目标几何特征反演	217
6.2.1	典型散射结构的空频域极化特性	218
6.2.2	基于 2D CP-GTD 模型与 STFT 处理的空域极化特性分析	228
6.2.3	基于空频域极化特征的极化 SAR 图像人造目标几何结构反演	235
6.2.4	小结	259
	参考文献	259
第 7 章	典型有源干扰下极化雷达成像	262
7.1	抗随机极化干扰的极化 SAR 成像方法	262
7.1.1	极化变换的数学原理及性质	265
7.1.2	基于极化变换滤波的极化 SAR 抗随机极化有源压制干扰方法	274
7.1.3	小结	284
7.2	抗有源假目标干扰的极化 SAR 成像方法	285
7.2.1	雷达目标和有源假目标的极化 SAR 信号模型	286
7.2.2	有源假目标干扰的鉴别与对消方法	288
7.2.3	抗有源假目标干扰的极化 SAR 仿真实验与结果分析	292
7.2.4	小结	295
	参考文献	296
附录		298
附录 1	M_1 逆矩阵的求解	298
附录 2	极化色杂波条件下的单点散射模型 CRB 求解	298
附录 3	相干极化相位差的极限估计精度推导	301
附录 4	极化色杂波条件下 CP-GTD 模型参数 CRB 的求解与简化	303
附录 5	单位增益的线性极化变换等价于酉矩阵型极化变换	307
附录 6	最优加权 η 的求解	308
附录 7	互易矩阵的对角化	309
附录 8	相位描述子 γ, ϕ 的 PDF 求解	310
附录 9	极化散布密度的求解	311
彩图		313

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

雷达性能的提高和功能的完善,始终是雷达工程界追求的目标。现代雷达不但要回答目标在哪里,还要回答是什么样的目标即雷达目标识别问题,这就需要雷达能够获取目标的大小、形状、姿态、表面材料的电磁参数和表面粗糙度等信息。雷达目标识别的效能主要取决于雷达所能获取的目标信息量的多少,而决定雷达获取目标信息量多少的最重要的指标是雷达分辨率。此外,由于电磁波本身的矢量性,还应利用全极化测量技术来丰富雷达目标特征信号。因此,很多雷达专家认为,最有希望解决雷达目标识别问题的研究方向是将全极化技术和高分辨技术综合。未来战场电磁环境变得异常复杂激烈,雷达工作区域内往往存在着大量的各式各样的干扰,这给雷达抗干扰提出了更高的要求。在现代战争条件下,雷达应定义为在复杂电磁环境下对远距离目标进行无线电探测、定位、测轨和识别的一种遥感设备。雷达成像技术、雷达极化技术以及二者结合的极化雷达成像技术都是在这种背景下应运而生的。

雷达成像能提供反映地面静止目标,地面、空中或空间运动目标(车辆、舰船、飞机及导弹、卫星等)的结构形状信息。虽然成像雷达的种类较多,形式上差别也比较大,但是大部分雷达成像技术在原理上都是相通的。雷达目标成像等效于给出目标的散射中心分布。理论上讲,目标空间散射中心的分布函数可以通过三维傅氏空间散射场的波矢量来重构。本书主要关注目前发展最快、应用最广的合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)和逆合成孔径雷达(inverse SAR, ISAR)及作为二者基础的高分辨距离像雷达(high resolution range profile, HRRP)。自 1951 年美国 Goodyear 航空公司的 Wiley 提出可利用多普勒信息提高雷达方位分辨率^[1],SAR 的理论与技术在世界范围内受到了极大重视,并获得飞速发展。当前,机载 SAR 应用已相当广泛,星载 SAR 成为空间对地观测技术发展的热点,多频段、全极化、可变视角和可变波束的多模式 SAR 已成为现实。国外对 ISAR 的研究起步较早,几乎与对 SAR 的研究同时开始。20 世纪 60 年代末,对转台上缩比目标模型的成像研究获得了成功。80 年代初,美国利用旋转目标成像原理成功获得了金星表面的高分辨雷达图像。此后,特别是 90 年代末以来,ISAR 技术越来越受到世界各国的重视,不少文献表明 ISAR 技术也已走向实

用化阶段。

雷达极化技术与雷达成像技术研究差不多同时兴起。1946年美国俄亥俄州立大学天线实验室的Sinclair提出用“极化散射矩阵”来表征雷达目标的极化散射特性,标志着雷达极化问题研究的开始。经过60多年的发展,相关的研究成果已非常丰富,积累了一大批基础性研究成果并逐步迈入实用阶段,以美国1958年研制的成功用于观测、跟踪卫星的Millstone Hill雷达和稍后成功用于弹道导弹防御研究的AMRAD雷达为标志,截至目前,已有相当数量的极化雷达问世。

特别需要指出的是,1985年美国加州理工学院的喷气推进实验室为美国国家航空航天局设计生产出世界上第一部机载极化合成孔径雷达(polarimetric SAR, PolSAR) NASA JPL/CV-990 SAR^[2],标志着PolSAR进入实用阶段。此后,随着极化测量技术的飞速发展、极化理论的日趋完善,PolSAR因能获取完整极化信息的显著优势而迅速成为SAR发展的主流方向之一。此外,报道称美国战略导弹防御系统的关键组成部分对空间多目标进行ISAR成像的X波段地基防御雷达系统(GBR)也具有全极化测量能力。当前,高分辨极化雷达处理与应用研究已成为国际雷达学界研究的前沿课题。

PolSAR的出现大大拓宽了SAR的应用领域,利用高分辨PolSAR实现对人造目标的参数反演与特征提取是当前SAR图像解译领域研究的前沿课题。立足于高分辨极化雷达这一新型体制,以战场侦察为应用背景,本书围绕典型有源干扰环境下的极化雷达成像及特征参数的精确获取这一迫切需求,深入开展了极化雷达成像及目标特征提取方法的研究。本书的研究均来自作者从事的实际研究工作,本书成果将丰富和完善雷达图像解译理论、促进高分辨极化雷达成像系统在国民经济和国防安全领域的推广应用。

1.2 雷达极化学的发展历程、研究内容和发展趋势

极化作为矢量波共有的一种性质,在红外、光学和雷达等领域均受到了广泛关注。就雷达而言,极化描述的是电磁波的电场矢量在传播截面上随时间的变化轨迹。它反映了电磁波的矢量特性,是电磁波除时域、频域和空域信息外的又一可资利用的重要信息,充分挖掘极化信息为现代雷达探测系统性能的改善提供广阔的空间。从时间上看,雷达极化学大致可以分为4个阶段;从内容上看,雷达极化学的主要研究内容可以分为两大方面;从最新进展上看,全极化和高分辨的结合是当前雷达极化学研究的发展趋势。

1.2.1 雷达极化学的发展历程

自1946年Sinclair提出雷达目标的极化散射矩阵的概念以来^[3],雷达极化技

术已经经历了 60 余年的研究。相关的文献和成果非常丰富,随着越来越多的极化雷达问世,越来越多的雷达极化研究成果迈入实用。总体而言,雷达极化学的发展大致可以分为 4 个阶段。

第 1 阶段,从 20 世纪 40 年代至 50 年代末,是雷达极化学的第 1 次研究高潮。以 Sinclair、Kennaugh、Gent、Deschamps 等的工作为代表,研究内容包括散射矩阵概念的提出与界定、目标最优极化理论、目标和地物杂波极化测量与极化特性研究等。这一阶段的工作为雷达极化学奠定了初步的理论基础。然而,由于受极化雷达技术水平的限制,这一阶段难以开展极化信息处理的应用研究,对极化信息在如目标检测、分类、识别等领域的应用潜力尚缺乏足够的认识。

第 2 阶段,从 20 世纪 50 年代末期开始,包括了整个 60 年代和 70 年代初期的短暂低潮。期间,Copeland 在 Kennaugh 的指导下,提出了第一个基于极化信息的简单形体的雷达目标分类和识别方案^[4]; Huynen 开展了大量的关于相干极化散射矩阵的测量工作,并发展了 Kennaugh 的目标最优极化概念^[5]。在这阶段中,除了极化测量技术略有进展外,其他方面的研究几乎全部停滞不前。不过也恰在这一时期,美国在弹道导弹防御和近地空间/深空探测等项目的牵引下研制了一系列大型空间探测和深空探测极化雷达(包括 Millstone Hill 雷达^[7]、AMRAD 雷达^[8]等)。从某种意义上说,正是由于这些大型极化雷达在目标检测和目标识别方面体现出的良好性能催生了第 3 阶段的研究热潮。

第 3 阶段,从 20 世纪 70 年代至 80 年代末的再次高潮,以 1970 年 Huynen 的博士论文《雷达目标唯象学理论》为开端,论文中 Huynen 阐述了极化散射矩阵元素与目标结构属性之间的内在联系,指出了利用极化信息进行目标分类和识别的可能性并最早提出了基于极化信息的雷达目标分解理论^[9]。Boerner 等对目标的极化散射特性作了深入的理论探讨^[10]; Poelman 提出虚拟极化匹配、单凹口极化滤波器、多凹口逻辑乘极化滤波器以及极化矢量变换等概念^[11]; Nathanson 和 Giuli 等研究提出了多种极化自适应滤波器实现方法^[12]; Kostinski 和 Boerner 等研究了极化对比度的最优化问题^[13]; 1980 年美国乔治亚理工学院研制成功了极化捷变雷达,随后又于 1984 年成功研制脉内极化捷变雷达^[14],利用极化编码技术实现了脉冲压缩^[15]; 1986 年 Guili 发表雷达极化学长篇综述性文章^[16],标志着窄带雷达极化问题的研究已基本发展成熟。

第 4 阶段,从 20 世纪 80 年代末至今的持续高潮期,其特点是极化与高分辨结合日益紧密。这一阶段以 1985 年美国加州理工学院的 JPL 实验室为美国 NASA 设计生产出世界上第一部机载极化 SAR 为开端。美、欧、俄、日、加等相继研发了能实现对地全极化观测的机载/星载 SAR 系统,报道称美国导弹防御系统的核心 GBR 雷达具备对空间多目标进行全极化 ISAR 成像测量能力。大量的高分辨极化雷达系统研制成功并投入使用,获得了大量的实测极化数据,以 Zebker、

Cloude、Cameron、van Zyl、Chamberlain、Novak、Pottier、Krogager、Yamaguchi 等为代表的众多学者结合这些数据开展了内容极为丰富的研究工作,又促进了高分辨极化信息处理的巨大发展。

1.2.2 雷达极化学的主要研究内容

经过 60 余年的研究,随着雷达极化测量技术的发展和人们对目标电磁散射特性认识的逐步深入,雷达极化问题引起了国内外雷达界越来越广泛的关注。宽带信号产生、雷达成像等技术不断提高,促使雷达体制发生了极为深刻的变革,具有全极化测量、高分辨成像能力的雷达迅速崛起,逐渐取代了传统的单极化、低分辨雷达而成为现代雷达技术发展的主流,从而极大增强并扩展了雷达的探测功能和应用范围。雷达极化学已成为现代雷达技术的重要分支,其研究内容涉及电磁散射、信号处理、电子对抗及模式识别等多个学科领域。从内容上看,雷达极化学的主要研究内容可以概括为如下两大方面。

1. 极化表征与极化特性研究方面

极化表征与极化特性研究内容包括电磁波与雷达目标散射的极化表征、电磁波与雷达目标的极化特性、瞬态极化与瞬态极化统计学、天线极化特性与表征、目标最优极化理论及极化目标分解理论等。

极化表征理论是指那些用于表征电磁波或雷达目标的极化特性的理论概念方法的总称,是探讨如何更有效表征和刻画各种电磁波激励下雷达目标的极化散射特性的研究,极化表征理论的完善为深化极化特性的研究开辟了道路。自发现极化现象以来,基于时谐性的假设条件,学者先后提出了 Jones 矢量、椭圆几何描述子、极化相位描述子、极化比以及 Stokes 矢量等静态参数来描述完全极化电磁波的极化特性;对于准单色波,提出了部分极化的概念来描述其极化特性。为适应宽带电磁理论以及极化测量技术的发展,王雪松率先提出了“瞬态极化”的概念用以表征时变电磁波极化现象,建立了适用于描述时变电磁波的瞬态极化描述子参量集合。针对实际应用中电磁波的极化的不确定性和非平稳性,随机时变极化电磁波的统计特性、时频分布特性也日益受到重视。相应地,雷达目标极化特性的表征理论也经历了类似的发展过程。针对相干散射目标, Sinclair 提出可用一个二阶相干散射矩阵来描述目标电磁散射特性的全部信息;对于非相干散射的雷达目标,学者先后提出了 Mueller 矩阵、Kennaugh 矩阵、极化协方差矩阵和相干矩阵等方法来描述部分极化波激励下雷达目标的电磁散射特性;针对宽频带时变雷达目标,李永祯和曾勇虎分别从不同角度对瞬态极化理论进行了拓展和完善,提出了雷达目标的瞬态极化统计表征和瞬态极化时频分布表征方法。

极化特性是雷达极化信息应用的基础,研究内容包括电磁波和天线的极化特

性、雷达目标及有源干扰的极化特性、极化不变量理论、目标最优极化理论以及极化目标分解理论等,可认为有关目标极化特性的研究贯穿于雷达极化研究的各个阶段。特别值得指出的是,目标极化分解理论在 PolSAR 目标分类与识别中获得了广泛的应用。极化目标分解的基本思想是将目标的极化散射分解为几种基本散射机理的组合,然后根据分类单元与基本散射机理的相似性或直接利用所提取的新特征进行分类。其优点在于分类结果能较好地揭示地物的散射机理,有助于人们对图像的理解,而且由于分类时不需要训练数据,因此,适用范围广。极化目标分解的方法大致又分为两类:一类是针对目标散射矩阵的分解,此时要求目标的散射特性是确定的(或稳态的),散射回波是相干的,故也称相干目标分解(CTD),包括基于 Pauli 基的分解、Cameron 分解以及 Krogager 的 SDH 分解等;另一类是针对极化协方差矩阵、极化相干矩阵、Mueller 矩阵或 Kennaugh 矩阵的分解,此时目标散射可以是时变的,回波是部分相干的,因此,也称为部分相干目标分解(PCTD),包括 Huynen 分解、Freeman 等提出的奇次-偶次-漫反射分解、Cloude 分解、Holm&Barnes 分解及基于 Kennaugh 矩阵的最小二乘分解等。

2. 极化信息获取与处理研究方面

极化信息获取与处理的研究内容包括极化雷达测量及数据校准、极化滤波、极化检测、极化优化与增强、极化跟踪与关联、极化雷达成像、极化雷达抗干扰、雷达目标的极化特征提取、极化鉴别、极化分类与识别反演等。

极化测量及数据校准是雷达极化信息获取的实现基础。早期的极化雷达,如 Millstone Hill 雷达和 AMRAD 雷达等采取的是单极化发射、全极化接收模式^[7,8]。这种体制通过对两接收极化通道信号的融合,可将信噪比平均提高几个分贝,保证了对目标稳定的检测性能,还可以实现对固定极化干扰的抑制。但是,这种体制仅能够测量目标散射矩阵的一系列元素,无法获取完整的目标极化散射特性信息。分时极化测量体制是最早出现的全极化测量体制,通过两个正交极化通道“轮流发射、同时接收”,雷达在相邻脉冲重复周期内可以轮流测得目标极化散射矩阵的两列,从而得到整个极化散射矩阵的估计。这种体制也是目前应用最多的,包括美国 JPL 实验室的 CV-990、DC-8、SIR-C, MIT 林肯实验室的 ADTS (advanced detection technology sensor, ADTS)以及加拿大 CCRS/DREO 的 Pol-SAR 系统等。由于大多数雷达目标的极化散射矩阵往往对姿态十分敏感,对于高速弹道目标的特性测量等诸多实际应用场合,在两次相邻观测期间,目标相对于雷达的空间位置和观测姿态均已发生变化,这意味着两次相邻观测得到的两个列矢量不是来源于同一个极化散射矩阵,因此,也不能得到目标完整的极化散射矩阵,这是分时极化测量在对动目标测量时的固有缺陷。针对分时极化测量体制的这一缺陷,Giuli 等提出了同时极化测量体制,采用两个正交极化通道同时发射、同

时接收,在单个脉冲内即可完成全极化测量。相较于分时极化测量体制,同时极化测量体制具有显著优势,是目前极化测量技术的发展趋势。极化测量的数据校准一般与极化测量体制和测量系统的具体构成密切相关,目前已有多种用于极化测量数据校准的模型和方法。

诸如极化滤波、目标极化检测、极化优化、雷达目标极化增强及极化 SAR 图像相干斑抑制等极化信号处理和诸如雷达目标极化跟踪和关联等极化数据处理问题,是雷达极化信息处理研究的重要内容。这部分研究内容的显著特点是极化域作为一个概念被提出来:雷达发射信号及雷达目标回波信号都被看成一个矢量信号,而非常规的标量信号,这样促进了一个量化的极化域信号处理和数据处理体系的出现。特别值得说明的有 3 点:①极化域处理不是简单的多维信号处理问题,相较于时域、频域和空域的特殊性,有关高分辨极化雷达信息处理的特点和优势将在本书中详细阐述;②所谓极化信号处理并非一般理解的只在极化域进行处理,有时它必须与其他时域、频域及空域等信息联合起来处理;③这部分内容往往连同第 1 部分内容一起构成了后续特色应用层面的基础。

极化雷达抗干扰、雷达目标的极化特征提取、极化鉴别、极化分类与识别反演等属于雷达极化信息处理比较有特色的应用。从某种程度上讲,这部分研究内容里极化信息的作用表现得更为突出,它不是解决由“不好”到“好”或由“好”到“更好”的问题,而是解决由“不能”到“能”的问题。例如,极化抗干扰问题,研究目的在于解决从时域、频域及空域等角度都不能有效解决的干扰抑制问题;基于全极化信息的特征提取问题,研究的是如何提取与极化散射机理密切相关的特征,从而进行基于极化特征的目标分类与识别;极化鉴别问题,研究的是如何基于雷达目标和假目标干扰极化特性的差异实现真假鉴别问题;高分辨极化分类与识别反演,研究的是利用不同目标间的高分辨极化特性差异,结合高分辨和全极化的优势,来完整揭示目标的极化散射机理,其研究内容已经接近于人们长期追求的雷达目标物理特性和几何结构反演这一目的。

1.2.3 雷达极化化学的最新进展及发展趋势

高分辨成像和全极化测量都是现代雷达测量的重要发展方向,它们从不同方面刻画了目标的散射特性。高分辨成像技术极大地提高了雷达目标在距离、方位及高度等方向上所能达到的分辨率,提供了雷达目标细微特征表征能力,大大降低了极化描述模型的模糊性;而极化技术使高分辨技术描述的结构信息更为全面,这是因为目标的极化信息与其形状有着本质的联系,通过极化信息的提取,可获取目标表面粗糙度、对称性和取向等其他参数难以表征的信息,是完整刻画目标特性所不可或缺的。早在 1991 年 Chamberlain 等就结合极化和一维距离高分辨信息提出了目标瞬态极化响应(TPR)的概念,并利用极化椭圆曲线拟合技术对