



Polarimetric Microwave Imaging

极化微波成像

杨汝良 等著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

极化微波成像

Polarimetric Microwave Imaging

杨汝良 戴博伟 谈璐璐 著
刘秀清 杨 震 李海英

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

极化微波成像/杨汝良等著. —北京:国防工业出版社,2016.12

ISBN 978-7-118-10563-6

I. ①极… II. ①杨… III. ①微波成像
IV. ①O435.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 008719 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)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 29 字数 600 千字

2016 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 128.00 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

序

遥感的基本原理是电磁波与自然界不同物质散射辐射特征的相互作用过程。微波遥感由于具有全天时、全天候探测能力,且在对目标宏观结构和组分物性的散射与辐射特性上,不同于其他电磁波谱段,在地球观测、深空探测及军事等领域发挥着重要的作用,并已成为空间遥感的前沿技术。

一种目标的特性信息主要表现在该目标电磁波的四种信息中,即幅度(强度)、相位、频率及极化特征等主要电磁波要素的变化。微波遥感技术发展及其广泛的应用已有半个多世纪。概括起来,科学家和广大用户的主要关注点集中在如何从目标的电磁波四要素中深度提取出能够反映观测目标真实性的基本信息,其中幅度、相位、频率响应信息的提出相对较早,并早已成功地应用于遥感中。而极化信息的提取由于技术和理论发展的限制,十几年来才做到全极化信息提取,从而使遥感在理论和技术方面有了本质性的提高,真正成为全电磁波信息技术。极化微波成像技术已成为当今微波遥感领域的重要发展方向之一。

极化微波成像雷达通过多通道发射和接收不同极化方式的电磁波,组成完备的极化基,获得极化散射矩阵,全面得到目标在观测方向上对任意电磁波的散射特性,大大提高了目标散射信息的获取能力。极化散射矩阵含有更加丰富的信息,使人们可以对目标的物理特性(方向、形状、表面粗糙度、介电常数等)进行深入分析、提取,促进参数反演的研究。极化微波成像雷达得到目标完整的散射信息,提取极化特征参数,为大面积地物分类、目标检测和识别提供了更充分的信息。

十几年来,极化微波成像雷达技术得到蓬勃发展,一系列星载、机载极化微波成像雷达系统相继问世。这些系统获取了大量极化微波成像数据,为人们研究极化信息提供了丰富的素材。各国学者在极化微波成像雷达数据的分析和应用方面开展了许多研究。在散射矩阵分解、目标极化特性分析、目标分类、地表参数反演、极化图像滤波等方面,获得许多研究成果。目前,极化微波成像雷达已在农作物分类估产、森林调查、生物量估计、海洋、地质、水文、资源、环境、灾害监测、军事等领域得到重要应用。

近年来,我国的极化微波成像雷达技术获得了长足的进步,星载、机载极化合成孔径雷达、极化干涉合成孔径雷达、极化微波散射计与辐射计陆续投入运行,极大地促进了我国极化微波成像雷达技术发展,缩小了与国际先进水平的差距。杨汝良研究员长期从事合成孔径雷达理论与技术研究,他作为我国“环境”一号(HJ-1C)卫星主载荷总设计师,成功研制了星载合成孔径雷达并将其送上轨道,获得了大量优质图像。杨汝良和他的团队是国内率先开展极化合成孔径成像雷达技术的团队之一,在极化微波成像雷达系统技术、信息处理及其应用方面取得了丰富的成果。

《极化微波成像》一书的主要章节、大量的仿真和实际实例是作者对其主要研究成果宝贵的理论升华和系统深入的总结,反映了近年来极化微波成像雷达系统和极化信息处理技术领域的新理论、新方法和新成果,是一部理论与实践相结合的优秀著作。

希望《极化微波成像》的出版,能有助于推动我国极化微波成像雷达技术的发展,并对从事微波、遥感、空间技术及其应用的科学研究人员和相关领域学生们带来福音。

夏景山

中国工程院院士
2015年6月18日

前 言

极化微波成像技术是当今微波遥感领域的一个重要发展方向。

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)作为微波成像技术的典型代表,是一种高分辨率微波成像雷达。它可以全天候、全天时对地面静止目标和运动目标进行成像,可以穿透天然植被、人工伪装,发现重要军事目标,因此成为对地观测的重要手段,受到各国的广泛重视。强烈的军用和民用需求推动了微波成像雷达系统的迅猛发展。进一步发展新型的微波成像雷达系统,提高对地观测系统性能,成为面临的迫切课题。极化微波成像技术是其中一个重要的发展内容。

极化微波成像雷达是一门获取、处理和分析介质散射电场极化状态的学科,处理散射电磁波的完全矢量特性。传统的合成孔径雷达采用单一的极化通道发射和接收电磁波,只能获得地物对某种单一电磁波的散射特性。极化合成孔径雷达通过多通道发射和接收不同极化方式的电磁波,组成完备的极化基,获得极化散射矩阵,全面得到目标在观测方向上对任意电磁波的散射特性,大大提高了目标散射信息的获取能力。极化散射矩阵含有更加丰富的信息,使人们可以对目标的物理特性,如方向、形状、粗糙度、介电常数等,进行深入分析、提取,促进参数反演的研究。极化合成孔径雷达得到目标完整的散射信息,提取极化特征参数,为大面积地物分类、目标检测和识别提供更多的有用信息。目前,极化合成孔径雷达已在农作物分类估产、森林调查、生物量估计、地质、水文、资源、环境、灾害监测、海洋、军事等领域得到重要应用。

课题组先后完成了国家“机载多极化合成孔径雷达系统研究”“星载双频多极化合成孔径雷达系统技术研究”等研究课题,开展了极化微波成像技术的国际合作,积累了丰富的研究经验。同时,还组织一批博士研究生较系统地深入地研究了极化微波成像和极化信息处理技术。本书是这批博士学位论文的研究总结。作为《高分辨率微波成像》一书的姊妹篇,本书试图较系统地论述极化微波成像雷达系统和极化信息处理技术,理论联系实际,尽可能地反映近年来这一领域的新理论、新方法和新成果。

本书由杨汝良策划和设计,执笔人员如下:杨汝良(第1、3章),李海英(第1、3章),戴博伟(第2、3、7、8、9、10、13章),谈璐璐(第2、4、5、11、12、15、16章),刘秀清(第6、9、10、13、14、17章),杨震(第6、13章),席育孝(第6章)。本书由杨汝良统稿和定稿。

本书研究极化微波成像和极化信息处理技术,包括极化合成孔径雷达系统技术、极化合成孔径雷达信息处理技术和极化合成孔径雷达应用处理技术三部分。

极化合成孔径雷达系统技术讨论了绪论、极化合成孔径雷达的理论基础,研究了极化

合成孔径雷达、极化干涉合成孔径雷达、简缩极化和简缩极化干涉合成孔径雷达和极化合成孔径雷达的极化定标技术。

极化合成孔径雷达信息处理技术主要讨论极化合成孔径雷达图像的分析、极化合成孔径雷达图像的统计特性、极化合成孔径雷达图像的相干斑抑制、极化合成孔径雷达图像的增强处理、极化合成孔径雷达图像的目标极化分解、极化合成孔径雷达图像的分类和目标检测技术。

极化合成孔径雷达应用处理技术研究了极合成孔径雷达数据的表面参数反演、极化干涉合成孔径雷达信息处理、简缩极化干涉合成孔径雷达信息处理和地形方位向倾斜对极化合成孔径雷达数据的影响与补偿等内容。

全书共 17 章,其结构安排如图所示。



本书较系统深入地研究了极化微波成像和极化信息处理技术,可供电子系统特别是微波遥感、微波成像雷达的研究人员、工程技术人员使用,亦可作为高等院校通信与信息系统、电子技术、计算机应用等相关专业的教师和研究生进行有关课题研究或课程教学时的参考书。

中国工程院院士姜景山教授为本书作序,清华大学彭应宁教授、杨健教授和北京航空航天大学毛士艺教授等对本书提出了宝贵的意见,在此仅表诚挚的谢意。

感谢国防工业出版社对本书出版的支持。

极化微波成像和极化信息处理是一项正在迅速发展的技术,由于作者的能力和知识有限,疏漏和不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

杨汝良

2015年5月8日

目 录

第1章 绪论	1
1.1 极化合成孔径雷达系统	1
1.1.1 极化合成孔径雷达系统的发展	1
1.1.2 极化合成孔径雷达的极化层次分类和工作方式	5
1.1.3 极化干涉 SAR	5
1.1.4 简缩极化合成孔径雷达	7
1.1.5 极化合成孔径雷达定标技术	8
1.2 极化合成孔径雷达的数据处理	9
1.2.1 极化 SAR 图像的分析 and 统计特性	9
1.2.2 极化 SAR 图像的相干斑抑制	10
1.2.3 极化 SAR 图像的增强处理	11
1.2.4 极化 SAR 目标极化分解	11
1.2.5 极化 SAR 目标检测	13
1.2.6 极化合成孔径雷达图像的分类	13
1.3 极化合成孔径雷达应用技术	15
1.3.1 极化合成孔径雷达数据的表面参数反演	15
1.3.2 极化干涉合成孔径雷达的信息处理	15
1.3.3 简缩极化与简缩极化干涉合成孔径雷达信息处理技术	16
1.3.4 地形方位向倾斜对极化合成孔径雷达数据的影响	17
1.4 全书内容安排	18
参考文献	20
第2章 极化合成孔径雷达的理论基础	26
2.1 电磁波的基本理论	26
2.1.1 电磁波的特性与基本场方程	26
2.1.2 电磁波的传播	27
2.2 电磁波的极化特征及其表征	29
2.2.1 极化椭圆	29

2.2.2	Jones 矢量与极化比	31
2.2.3	Stokes 矢量与 Poincare 极化球	31
2.3	部分极化电磁波的表征	32
2.4	极化电磁波的收发与天线	34
2.4.1	电磁波的发射	34
2.4.2	全极化电磁波的接收	34
2.4.3	部分极化电磁波的接收	35
2.4.4	天线的极化匹配	35
2.5	目标极化散射特性的表征	36
2.5.1	FSA - BSA 约定	36
2.5.2	相干散射目标的表征——极化散射矩阵	37
2.5.3	去极化目标的表征	37
2.6	极化基变换	41
2.7	极化合成与极化特征图	42
2.7.1	概述	42
2.7.2	目标的散射模型及其特征图	43
2.8	小结	55
	参考文献	55
第3章	极化合成孔径雷达	56
3.1	合成孔径雷达原理	56
3.2	极化合成孔径雷达的极化层次分类	59
3.3	极化合成孔径雷达系统参数	61
3.3.1	极化合成孔径雷达技术参数	61
3.3.2	极化特征参数	69
3.4	极化合成孔径雷达系统的工作方式	71
3.4.1	极化时间分割工作方式	71
3.4.2	极化频率分割工作方式	72
3.4.3	极化编码分割工作方式	73
3.4.4	方位向极化空间分割成对脉冲串方式	75
3.4.5	简缩极化合成孔径雷达工作方式	81
3.5	小结	84
	参考文献	86
第4章	极化干涉合成孔径雷达	87

4.1	概述	87
4.2	极化合成孔径雷达干涉测量的基本原理	87
4.2.1	干涉 SAR 测量的基本原理	87
4.2.2	干涉 SAR 测量的去相关效应	89
4.2.3	干涉 SAR 测量误差分析	89
4.2.4	干涉 SAR 数据处理流程	90
4.3	标量干涉与矢量干涉	91
4.4	极化干涉相干最优理论	93
4.4.1	幅度相干最优算法	93
4.4.2	相位相干最优算法	96
4.5	相干散射分解	96
4.6	极化干涉 SAR 相干区域理论	97
4.6.1	相干区域理论	97
4.6.2	相干区域形状参数提取	98
4.7	小结	100
	参考文献	100
第 5 章	简缩极化和简缩极化干涉合成孔径雷达	102
5.1	概述	102
5.2	简缩极化合成孔径雷达的模式	102
5.3	简缩极化 SAR 数据重建全极化 SAR 数据	103
5.3.1	地物媒质对称性的影响	103
5.3.2	运用反射对称性条件重建全极化数据	104
5.3.3	$\pi/4$ 模式简缩极化协方差矩阵重建	105
5.3.4	DCP 模式简缩极化协方差矩阵重建	106
5.3.5	CTLR 模式简缩极化协方差矩阵重建	108
5.3.6	实验及结果分析	109
5.4	简缩极化 SAR 的极化分类分析	114
5.4.1	简缩极化 SAR 数据分类方法	114
5.4.2	实验结果及分析	115
5.5	简缩极化干涉合成孔径雷达	119
5.6	简缩极化干涉 SAR 数据重建全极化干涉 SAR 互协方差矩阵	120
5.6.1	$\pi/4$ 简缩极化干涉互协方差矩阵重建	120
5.6.2	DCP 简缩极化干涉互协方差矩阵重建	121

5.6.3	CTLR 简缩极化干涉互协方差矩阵重建	122
5.6.4	实验结果及分析	123
5.7	简缩极化干涉 SAR 相干最优	126
5.7.1	简缩极化干涉幅度相干最优	126
5.7.2	简缩极化干涉相位相干最优	126
5.7.3	实验结果及分析	127
	参考文献	130
第 6 章	极化合成孔径雷达的极化定标技术	131
6.1	合成孔径雷达定标技术	131
6.1.1	系统误差源	132
6.1.2	定标技术相关概念	133
6.1.3	系统定标模型	136
6.1.4	系统内定标	137
6.1.5	系统外定标	139
6.2	极化合成孔径雷达定标技术	143
6.2.1	系统定标模型	143
6.2.2	系统定标基本方法	145
6.3	极化合成孔径雷达系统的内定标	146
6.3.1	内定标通路分析	146
6.3.2	串扰分析	148
6.3.3	通道串扰及不平衡度的标定	149
6.4	极化合成孔径雷达系统的外定标算法	151
6.4.1	混合点目标和分布目标的定标算法——van Zyl 算法	151
6.4.2	极化数据相位和串扰定标的统一算法——Quegan 定标方法	159
6.4.3	分布目标定标算法——Sarabandi 算法	165
6.4.4	极化合成孔径雷达后验定标方法	171
6.4.5	点目标定标算法——Whitt 算法	174
6.4.6	JPL 极化定标方法	177
6.5	极化合成孔径雷达外定标算法的适用条件与精度分析	188
6.5.1	混合点目标和分布目标定标算法的适用条件和精度分析	188
6.5.2	分布目标定标算法的精度分析	191
6.5.3	点目标定标算法的精度分析	192
6.6	小结	194

参考文献	195
第7章 极化合成孔径雷达图像的分析	197
7.1 极化合成孔径雷达图像的基本分析方法	197
7.1.1 极化总功率与基本极化组合图	197
7.1.2 基于极化合成的分析方法	198
7.1.3 基于极化特征图的分析方法	199
7.1.4 不同极化组合下的回波功率比	199
7.1.5 目标回波的极化纯度分析	200
7.1.6 功率波动系数与部分极化系数	203
7.2 多频极化合成孔径雷达图像的表示方法	204
7.2.1 极化组合图像的伪彩色合成	204
7.2.2 多频段极化合成孔径雷达图像的伪彩色合成	205
7.3 极化合成孔径雷达图像的相关性分析	206
7.4 极化合成孔径雷达数据的最优极化度分析	208
7.4.1 目标最优极化度的求解	209
7.4.2 目标极化度的极值分析	211
7.4.3 目标极化度的动态范围分析	213
7.5 小结	214
参考文献	214
第8章 极化合成孔径雷达图像的统计特性	215
8.1 单视合成孔径雷达图像的统计特性分析	215
8.2 单视极化合成孔径雷达数据的统计特性分析	218
8.2.1 交叉极化项的统计特性分析	219
8.2.2 相同极化项的统计特性分析	219
8.3 多视极化合成孔径雷达图像的统计特性	223
8.3.1 数据的协方差矩阵及其统计分布规律	223
8.3.2 图像的相位差统计分布	224
8.3.3 图像幅度积的统计分布	227
8.3.4 两通道回波功率的联合概率分布	228
8.3.5 两通道回波功率比的概率分布	229
8.3.6 两通道回波幅度比的概率分布	231
参考文献	232
第9章 极化合成孔径雷达图像的相干斑抑制	234

9.1	带相干斑噪声的极化合成孔径雷达回波模型	234
9.2	全极化合成孔径雷达图像相干斑的极化白化滤波	235
9.2.1	极化白化滤波算法	235
9.2.2	极化白化滤波参数估计方法	237
9.2.3	极化白化滤波算法的实验及结果分析	240
9.3	极化合成孔径雷达数据的矢量 Lee 滤波	243
9.3.1	基于最小均方根误差的 Lee 滤波算法	243
9.3.2	Refined Lee 极化矢量滤波算法	245
9.3.3	基于精细 Prewitt 算子的 Refined Lee 滤波算法	245
9.3.4	实验及结果分析	246
9.4	小结	250
	参考文献	250
第 10 章	极化合成孔径雷达图像的增强处理	251
10.1	极化数据预处理方法	251
10.2	极化 SAR 图像的对比增强	253
10.2.1	基于 Stokes 矩阵的对比增强	254
10.2.2	基于最大平均接收功率比的 Lagrangian 算子法对比增强	258
10.2.3	基于 SUMT 的对比增强数值解法	264
10.3	基于极化合成和目标同零的极化 SAR 图像杂波抑制	267
10.3.1	极化目标零理论	267
10.3.2	基于目标同零的极化 SAR 图像的杂波抑制	270
10.4	极化伪彩色合成	270
10.5	小结	276
	参考文献	277
第 11 章	极化合成孔径雷达图像的目标极化分解	279
11.1	目标相干极化分解	279
11.1.1	Pauli 分解	279
11.1.2	Krogager 分解	280
11.1.3	Cameron 分解	281
11.1.4	目标相似性参数分解	284
11.2	基于特征矢量的目标极化分解	286
11.2.1	Cloude - Pottier 分解	286
11.2.2	Cloude - Pottier 分解的信息增强	290

11.2.3	Huynen 分解	294
11.2.4	Holm 分解	297
11.2.5	van Zyl 分解	297
11.3	基于模型的目标极化分解	299
11.3.1	Freeman - Durden 分解	299
11.3.2	Freeman 两分量分解	301
11.3.3	Yamaguchi 四分量分解	302
11.3.4	多分量散射模型分解	305
11.4	极化干涉合成孔径雷达数据分解	307
11.5	小结	309
	参考文献	309
第 12 章	极化合成孔径雷达目标检测技术	310
12.1	合成孔径雷达目标检测概述	310
12.2	经典的极化目标检测器	311
12.2.1	最佳极化检测器	311
12.2.2	极化白化滤波检测器	312
12.2.3	极化匹配检测器	313
12.2.4	极化总功率检测器	314
12.2.5	功率最大合成检测器	314
12.3	基于目标特征参数的极化目标检测方法	314
12.3.1	基于极化相似性参数的极化目标检测方法	314
12.3.2	基于目标极化分解的目标检测方法	318
12.4	基于最优极化对比增强的目标检测方法	318
12.5	基于极化干涉合成孔径雷达数据目标检测方法	319
12.6	基于极化干涉相干矩阵特征值分解的目标探测技术	320
12.7	小结	320
	参考文献	321
第 13 章	极化合成孔径雷达图像的分类	322
13.1	极化合成孔径雷达图像的监督分类	322
13.1.1	基于人工神经网络的极化合成孔径雷达图像分类	322
13.1.2	基于 Wishart 最大似然估计 (ML) 的监督分类	322
13.2	极化合成孔径雷达图像的非监督分类	324
13.2.1	基于极化散射机理的图像分类	324

13.2.2	基于 Cloude - Pottier 分解的 H/α 非监督分类	327
13.2.3	基于 Cloude - Pottier 分解信息增强的 H/γ 非监督分类方法	327
13.2.4	基于 Cloude - Pottier 分解和 Wishart 的极化 SAR 非监督分类	328
13.3	双频段全极化 SAR 图像 $H/\alpha/\text{Wishart}$ 非监督分类方法	330
13.3.1	双频段全极化 SAR 分类方法	330
13.3.2	种类的缩减聚合方法	332
13.3.3	双频段全极化 $H/\alpha/\text{Wishart}$ 分类处理流程及结果分析	333
13.4	极化干涉合成孔径雷达图像的分类	335
13.4.1	极化干涉合成孔径雷达数据的 $H_{\text{int}}/A_{\text{int}}$ 非监督分类	335
13.4.2	极化干涉合成孔径雷达图像的非监督 Wishart ML 分类	336
13.4.3	极化干涉 SAR 图像非监督 Wishart ML 分类实验结果	338
13.4.4	极化干涉非监督 Wishart ML 分类的问题和解决方法	342
13.5	多频段极化干涉 SAR 图像的非监督 Wishart ML 分类	345
13.6	小结	347
	参考文献	348
第 14 章	极化合成孔径雷达数据表面参数反演	351
14.1	引言	351
14.2	SPM 小扰动模型	352
14.3	表面散射体的二阶散射分布	353
14.4	极化表面散射模型	354
14.5	表面参数反演	357
14.5.1	表面粗糙度反演	357
14.5.2	土壤湿度反演	358
14.5.3	实验和表面参数反演	358
14.6	小结	362
	参考文献	362
第 15 章	极化干涉合成孔径雷达信息处理	364
15.1	极化干涉合成孔径雷达森林参数反演技术	364
15.1.1	多层植被结构模型	364
15.1.2	三阶段反演方法	367
15.1.3	最大似然反演方法	372
15.1.4	散射中心分辨方法	377
15.2	极化干涉合成孔径雷达农田参数反演技术	381

15.2.1	农田植被散射模型	381
15.2.2	农田植被参数反演过程	383
15.3	极化干涉合成孔径雷达的 DEM 提取技术	385
15.4	极化干涉 SAR 目标检测技术	386
15.4.1	地表遮盖下目标检测技术	386
15.4.2	森林覆盖条件下目标检测技术	387
15.5	极化相干层析技术	390
15.6	小结	392
	参考文献	392
第 16 章	简缩极化干涉合成孔径雷达信息处理	395
16.1	简缩极化干涉 SAR 植被高度反演技术研究	395
16.1.1	简缩极化干涉 SAR 数据的植被参数三阶段反演方法	395
16.1.2	不同模式简缩极化干涉 SAR 的树高反演性能比较	399
16.2	简缩极化干涉 SAR 地物分类技术	401
16.2.1	简缩极化干涉 SAR 的替换一致性系数及 Shannon 熵参数	402
16.2.2	简缩极化干涉 SAR 数据的分类流程	403
16.2.3	实验结果及分析	404
16.3	小结	405
	参考文献	405
第 17 章	地形方位向倾斜对极化合成孔径雷达数据的影响及补偿	407
17.1	地形倾斜对电磁波极化的影响	407
17.1.1	地形方位向倾斜对电磁波极化的影响	407
17.1.2	极化方位角与地形距离向倾斜的依赖关系	407
17.2	地形方位向倾斜引入的方位角偏移的估计	409
17.2.1	方位角偏移的圆极化估计方法	410
17.2.2	方位角偏移的散射矩阵估计方法	414
17.2.3	方位角偏移的极化特征图估计方法	415
17.2.4	方位角偏移的 Cloude 目标极化分解估计方法	416
17.3	影响方位角估计精度的因素	417
17.3.1	雷达频率的影响	417
17.3.2	去极化的影响	418
17.3.3	极化定标的重要性	419
17.3.4	雷达响应动态范围的影响	420