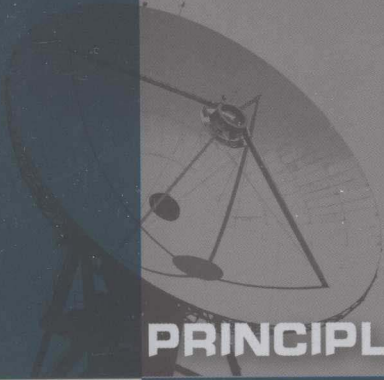




POLARIMETRIC SYNTHETIC
APERTURE RADAR BASIC
PRINCIPLES AND ITS APPLICATIONS

极化合成孔径雷达 基础理论及其应用

匡纲要 陈强 等编著



国防科技大学出版社

极化合成孔径雷达基础理论及其应用

Polarimetric Synthetic Aperture Radar Basic

Principles and Its Applications

匡纲要 陈 强 蒋咏梅 编著
陆 军 赵凌君

国防科技大学出版社
湖南·长沙

图书在版编目(CIP)数据

极化合成孔径雷达基础理论及其应用/匡纲要,陈强等编著. —长沙:国防科技大学出版社,2011.6

ISBN 978 - 7 - 81099 - 885 - 7

I. ①极… II. ①匡… ②陈… III. ①合成孔径雷达 IV. ①TN958

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 107762 号

国防科技大学出版社出版发行
电话:(0731)84572640 邮政编码:410073

<http://www.gfkdcbs.com>

责任编辑:耿 筠 责任校对:刘 梅

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

*

开本:787×1092 1/16 印张:19.75 字数:468 千 彩插:4

2011 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数:1 - 500 册

ISBN 978 - 7 - 81099 - 885 - 7

定价:46.00 元

前言

自雷达问世以来,尤其是过去三十多年里,现代科学技术的迅猛发展和大规模集成电路的出现,雷达系统结构和功能也发生了巨大而深刻的变化。在此期间出现的合成孔径雷达(SAR, Synthetic Aperture Radar)和雷达极化测量技术,被誉为雷达发展史上的技术革命。SAR 不仅将所观测的对象视为“点”目标,来测定其位置与运动参数,而且它不受日照和天气条件的限制,能全天候、全天时地获得目标和场景的高分辨率图像;雷达极化测量则通过交替发射一对正交极化的电磁波照射目标,然后采用一对正交极化天线同时接收目标散射回波,能完整地获取目标电磁波表征,为深入挖掘目标信息提供了可能。将成熟的 SAR 技术和雷达极化测量技术相结合的产物——极化 SAR(POLSAR, Polarimetric SAR),兼具了两者的技术优势,在灾害监测、环境监测、海洋观测、资源勘测、农作物估计、森林调查、测绘和军事等方面具有独特的优势。

本书旨在和读者一起深入探讨 POLSAR 图像解译涉及的理论和应用。全书共分八章。第 1 章回顾了雷达极化信息处理和利用的发展历程,详细分析了雷达极化信息在目标最优极化、散射特性分析、相干斑抑制、杂波统计建模、目标分类等方面的研究现状;第 2 章从麦克斯韦方程开始,依次介绍了电磁波极化波表征、极化基变换、可视化表征、天线最佳接收等内容;第 3 章根据雷达极化方程,导出了目标的 Sinclair 矩阵、Mueller 矩阵、Kennaugh 矩阵、相干矩阵、协方差矩阵等表征,讨论了它们的极化基变换及相应的过渡公式,介绍了 Huynen-Euler 参数等;第 4 章在详细分析现有目标特征极化理论基础上,分别研究了相干情形和非相干情形目标特征极化理论;第 5 章全面系统地介绍了目标极化分解理论,包括 Pauli 基分解、Krogager 分解、Cameron 分解等相干分解和 Huynen 分解、Cloude 分解、Freeman 分解、 H/α 分解等非相干分解;第 6 章分析了 POLSAR 图像相干斑形成机理及其影响,给出了 POLSAR 图像相干斑统计特性,并基于乘积噪声模型,推导了单、多视 POLSAR 图像杂波统计模型及其参数估计公式;第 7 章首先介绍了 POLSAR 图像的相干斑模型,然后分别对基于相对标准差最小、基于线性最小均方误差、基于最优纹理估计和基于空域类多视平均等现有相干斑抑制算法进行了全面、系统分析;第 8 章分析了现有的基于 Bayes 决策理论的有监督分类和基于散射特性的无监督分类,并针对现有算法不足提出了新的分类算法。

本书第一作者领导的研究团队,是由教授、副教授、博士生和硕士生等数十人组成的

中、青年学术梯队,专业背景涉及地球空间信息科学和计算机科学等学科交叉的很多领域。在 SAR 和 POLSAR 图像解译技术的研究方面业已积累了十余年,先后培养了博士生、硕士生 30 余人,在国内外公开发表了与本书相关的学术论文 100 余篇。本书的研究成果先后得到了国防预研项目、国家高技术研究发展计划(863 计划)项目、国家高技术发展计划基金项目、国家自然科学基金、国防科技大学博士生创新基金资助项目以及中科院电子所、中电集团 38 所等兄弟单位合作项目的资助,作者对以上各个方面的支持表示热忱的感谢!

多年来,我们一直关注国内外 POLSAR 图像解译方面的研究动态并致力于该方面的科研工作,幸能索拾一二,以飨诸同仁。可以说,本书是所有作者与整个研究团队集体智慧的结晶,是整个研究团队辛勤劳动的结果。

本书适用于遥感图像信息处理、雷达、图像判读专业的研究人员、工程技术人员、高等院校教师等,亦可作为高等院校雷达、遥感信息处理等有关专业的博士或硕士研究生课程教材。在本书的撰写过程中,周晓光博士、王娜博士、胡粲彬博士、赵力文硕士、黄嘉辛硕士等提供了多方面的支持和帮助,在此表示衷心的感谢!

在本书的编著过程中,作者阅读和引用了大量国内外专家学者的论文和书籍,既重点介绍名家大师、泰山北斗们的学术成果,也兼顾具有闪光思想的研究报道,同时结合自身的研究成果,以使它们能够浑然一体、一脉传承。然而,我们深知,本书所反映的研究工作虽然取得了一定的研究进展,然而对于 POLSAR 图像信息处理而言,只是沧海一粟,路漫漫其修远,囿于作者水平,很多问题未遑一顾,本书只能是抛砖引玉,书中难免有不妥甚至错误之处,恳请读者批评指正。

作者

2011 年 3 月于国防科技大学

目 录

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 雷达极化信息处理与解译研究概述	(2)
1.1.1 兴起与发展	(2)
1.1.2 国内外研究现状	(5)
1.2 极化雷达系统与极化 SAR 图像解译系统	(13)
1.2.1 POLSAR 系统简介	(13)
1.2.2 图像解译系统介绍	(17)
1.3 本书内容简介	(18)
第 2 章 电磁波极化及其表征	(21)
2.1 电磁波基本场方程	(21)
2.1.1 麦克斯韦方程组	(21)
2.1.2 波动方程及其解	(22)
2.2 极化概念与极化椭圆	(24)
2.3 完全极化波数学表征	(26)
2.3.1 Jones 矢量及其参数化	(27)
2.3.2 Stokes 矢量及其参数化	(29)
2.3.3 Jones 矢量与 Stokes 矢量	(31)
2.3.4 一些常见的极化状态	(31)
2.4 极化基过渡矩阵	(32)
2.4.1 Jones 矢量过渡矩阵	(32)
2.4.2 Stokes 矢量过渡矩阵	(34)
2.5 电磁波极化的可视化表征	(35)
2.5.1 Poincare 极化球	(35)
2.5.2 极化比复平面	(37)

2.5.3 几何、相位参数平面	(38)
2.6 部分极化电磁波	(39)
2.6.1 部分极化波数学表征	(40)
2.6.2 波的分解理论	(41)
2.6.3 波的各向异性和熵	(43)
2.7 电磁波的最佳接收问题	(43)
2.7.1 天线有效长度定义	(44)
2.7.2 天线失匹配接收条件	(45)
第3章 雷达目标变极化表征	(47)
3.1 确定性目标极化表征	(47)
3.1.1 雷达散射截面	(47)
3.1.2 极化散射矩阵	(48)
3.1.3 散射坐标框架	(50)
3.1.4 极化散射矩阵矢量化	(53)
3.2 分布式目标极化表征	(54)
3.2.1 Mueller 矩阵	(55)
3.2.2 Kennaugh 矩阵	(56)
3.2.3 协方差矩阵	(57)
3.2.4 相干矩阵	(59)
3.3 不同极化表征之间的数学关系	(60)
3.3.1 Mueller 矩阵与极化散射矩阵	(60)
3.3.2 Kennaugh 矩阵与 Mueller 矩阵	(63)
3.3.3 协方差矩阵与相干矩阵	(64)
3.3.4 复数矩阵表征与实数矩阵表征	(65)
3.3.5 不同极化表征比较及其转换关系	(66)
3.4 不同极化表征的极化基过渡公式	(67)
3.4.1 极化散射矩阵极化基过渡公式	(67)
3.4.2 实数矩阵表征极化基过渡公式	(68)
3.4.3 相干矩阵极化基过渡公式	(70)
3.4.4 协方差矩阵极化基过渡公式	(71)
3.5 极化表征参数化及雷达目标方程	(72)

3.5.1	Huynen - Euler 参数	(73)
3.5.2	Huynen 参数和目标结构方程	(75)
3.6	散射对称及简单目标极化特征图	(82)
3.6.1	散射对称性目标	(82)
3.6.2	简单目标及其极化特征图	(85)
第 4 章 目标特征极化研究		(89)
4.1	目标极化研究现状概述	(89)
4.2	相干情形目标特征极化	(92)
4.2.1	同极化通道情形	(92)
4.2.2	正交极化通道情形	(99)
4.2.3	收发天线无极化约束情形	(105)
4.2.4	Poincare 极化球表征	(106)
4.2.5	典型目标散射特性分析	(111)
4.3	非相干情形目标特征极化	(115)
4.3.1	收发天线有极化约束关系	(116)
4.3.2	收发天线无极化约束关系	(130)
第 5 章 目标极化散射特性研究		(135)
5.1	相干分解	(135)
5.1.1	Pauli 基分解	(136)
5.1.2	Krogager 分解	(138)
5.1.3	Cameron 分解	(140)
5.1.4	Polar 分解	(144)
5.2	Huynen 分解及其衍生分解	(145)
5.2.1	Huynen 分解	(145)
5.2.2	Barnes - Holm 分解	(149)
5.2.3	Yang 分解	(151)
5.3	Cloude 分解及其衍生分解	(152)
5.3.1	Cloude 分解	(153)
5.3.2	H/α 分解	(154)
5.3.3	H/α 替代参数	(159)

5.4	Freeman 分解及其衍生分解	(161)
5.4.1	Freeman 三成分分解	(161)
5.4.2	Yamaguchi 四成分分解	(164)
5.4.3	Freeman 二成分分解	(166)
5.4.4	Dong 四成分分解	(167)
5.5	混合型分解	(170)
5.5.1	Holm 分解	(170)
5.5.2	Van Zyl 分解	(171)
5.6	散射相似性理论	(172)
5.6.1	文献[77]定义的散射相似性	(173)
5.6.2	新的散射相似性	(173)
5.6.3	目标与球面散射的相似性	(177)
第 6 章	POLSAR 图像杂波统计建模	(183)
6.1	相干斑形成机理及其影响	(184)
6.2	POLSAR 图像相干斑统计特性	(186)
6.2.1	POLSAR 图像相干斑统计特性	(186)
6.2.2	强度/幅度相干斑统计特性	(187)
6.2.3	相位差相干斑统计特性 ^[180]	(190)
6.2.4	幅度积相干斑统计特性 ^[180]	(193)
6.2.5	双通道回波强度的联合概率分布 ^[180]	(193)
6.2.6	强度比和幅度比相干斑统计特性 ^[180]	(194)
6.3	基于乘积模型的 POLSAR 图像杂波统计特性	(195)
6.3.1	单通道和多通道 SAR 图像乘积模型	(195)
6.3.2	单视 POLSAR 图像杂波统计特性	(198)
6.3.3	多视 POLSAR 图像杂波统计特性	(200)
6.3.4	POLSAR 图像 G 分布族及相互转换关系	(203)
6.4	分布参数估计与拟合优度评估准则	(205)
6.4.1	两种常用的参数估计法	(205)
6.4.2	杂波统计分布参数矩估计公式	(206)
6.4.3	统计分布拟合优度评估准则	(207)
6.5	各种杂波统计分布拟合优度比较实验	(210)

6.5.1 德国 E-SAR 实测极化数据	(210)
6.5.2 美国 AIRSAR 实测极化数据	(212)
第 7 章 POLSAR 图像相干斑抑制处理	(216)
7.1 相干斑噪声模型	(217)
7.1.1 单通道 SAR 图像噪声模型	(217)
7.1.2 POLSAR 图像噪声模型	(218)
7.2 基于相对标准差的相干斑抑制算法	(219)
7.2.1 极化白化滤波(PWF)	(220)
7.2.2 相干斑抑制性能分析	(221)
7.2.3 多视极化白化滤波(MPWF)	(222)
7.3 基于线性最小均方误差准则的相干斑抑制算法	(222)
7.3.1 最优加权滤波	(222)
7.3.2 矢量滤波	(223)
7.4 基于最优纹理估计的相干斑抑制算法	(225)
7.4.1 ML 纹理估计	(225)
7.4.2 MMSE 纹理估计	(226)
7.4.3 Gamma MAP 纹理估计	(227)
7.4.4 ME-MAP 纹理估计	(228)
7.4.5 矢量 LMMSE 纹理估计	(229)
7.4.6 实验比较	(229)
7.5 基于空域类多视平均的相干斑抑制算法	(232)
7.5.1 改进 Lee 滤波	(232)
7.5.2 IDAN 滤波	(235)
7.5.3 基于散射模型的相干斑抑制	(236)
7.5.4 基于像素筛选的 POLSAR 图像相干斑抑制算法	(237)
7.5.5 验证与评估	(242)
第 8 章 POLSAR 图像地物分类	(249)
8.1 利用统计特性的 POLSAR 图像有监督分类	(249)
8.1.1 Bayes 决策理论与分类算法评估准则	(250)
8.1.2 Gaussian ML 分类	(253)

8.1.3	Wishart ML 分类	(253)
8.1.4	基于 G 分布和 MRF 的 MAP 迭代分类	(256)
8.1.5	三种分类算法性能比较	(259)
8.2	利用散射特性的 POLSAR 图像无监督分类	(265)
8.2.1	利用 $H-\alpha$ 平面的散射分类	(266)
8.2.2	采用 H/α 替代参数的分类方法	(268)
8.2.3	基于散射相似性和散射随机性相结合的无监督分类新方案	(271)
8.2.4	对比实验与分析	(273)
8.3	综合利用统计特性和散射特性的 POLSAR 图像分类	(277)
8.3.1	H/α + Wishart 的无监督分类	(278)
8.3.2	Freeman 分解 + Wishart 的无监督分类	(279)
8.3.3	基于散射相似性和差异度的无监督分类	(282)
8.3.4	实验分析及与 Wishart 迭代法的比较	(285)
参考文献		(289)

第1章 绪 论

自雷达问世以来,随着现代科学技术和大规模集成技术的迅猛发展,雷达系统结构和性能发生了巨大而深刻的变化,其信号与信息处理技术也得到飞速发展。作为雷达信号与信息处理的重要内容之一,雷达极化研究正日益受到世界各国的广泛关注。下面将从应用需求、信息优势和系统发展三方面阐述雷达极化研究的必要性和紧迫性。

1. 现代战争对雷达系统提出了更高的要求,促使雷达技术不断向前发展

雷达性能的提高和功能的完善始终是雷达界科研人员追求的目标,而实际应用需求则是雷达技术不断向前发展的强大推动力。早期的雷达系统主要用于国土防空,其首要任务是检测目标是否存在,这在二次世界大战中得到充分体现。而现代战争则以电子战、信息战和精确制导武器等为主,其战场环境更加复杂,战争态势瞬息万变。战争胜败的重要因素是对敌我双方动态信息的实时监控和处理,这对作为战场“千里眼”的雷达系统提出了更高的要求:不但要求雷达系统具有超远程、高精度的探测能力,而且还应具备智能、快速的信息处理能力;不但可以准确获取目标位置、速度、轨迹、姿态等空间状态信息,而且还能提取目标大小、形状、材质、表面粗糙度等物理属性信息。与此同时,还要求雷达系统在面临敌方电子对抗、隐身目标攻击、超低空突防、反辐射导弹“四大威胁”的情况下,仍能安全、正常地工作。在这种背景下,提高雷达探测性能和完善雷达系统功能已成为当前一项必要且紧迫的重要任务。

2. 极化信息作为电磁波四个基本特征之一,为改善雷达系统性能提供了广阔空间

从信息论角度来看,雷达是以电磁波为传播媒介的目标信息采集与处理系统。在发射电磁波的激励下,目标对入射电磁波进行信息调制或加载,其散射回波中携带了目标信息,雷达通过对目标散射回波的接收和解调,能获得与目标相关的各种信息,这是雷达系统探测目标并获取目标物理信息的理论基础。而雷达探测性能的好坏主要取决于目标散射回波信息是否得到充分、有效的利用。根据电磁学理论,电磁波具有幅度、相位、频率、极化等四个基本特征,但长期以来,人们对目标散射回波的开发利用基本局限于其幅度、相位和频率,而对散射回波极化信息的利用并不多^[1-2]。作为其他特征的互补信息,极化描述的是电场矢端在传播截面上随时间变化的运动轨迹,充分开发利用极化信息将能完整地描述目标物理散射过程,进而进一步改善雷达系统性能。

3. 极化雷达系统迅猛发展,雷达极化技术已成为当今雷达界的前沿课题

近年来,随着雷达极化测量技术和高分辨成像技术的逐渐成熟,结合两者优势的极化合成孔径雷达(POLSAR)应运而生,并逐渐取代了传统的低分辨、单极化体制雷达,成为现

代雷达系统发展的主流方向。由于该体制雷达能极大地拓展雷达系统对目标信息的获取能力和对复杂战场环境的感知能力,因而受到欧、美等发达国家的广泛关注。他们在 POLSAR 系统研制方面投入了大量的人力、物力,各种新型 POLSAR 系统相继诞生,如美国 AIRSAR、德国 E-SAR、P 日本 I-SAR 等机载系统和美国 SIR-X/C-SAR、加拿大 RADARSAT-2 等星载系统。与当前国际如火如荼的极化雷达系统研制趋势一致,有关雷达极化技术的研究也呈逐年递增趋势。据 SCI 检索统计,从 2004 年至今的六年里,在国际主要学术刊物上发表的关于雷达极化问题的研究文献多达千余篇,甚至,许多重要的国际学术会议还专门开辟了“雷达极化”研究专栏。种种迹象表明,雷达极化研究已成为当前国际雷达学术界的前沿课题。

1.1 雷达极化信息处理与解译研究概述

1.1.1 兴起与发展

尽管电磁波极化现象的发现可追溯到公元 1000 年,但有关雷达极化问题的研究却始于 20 世纪 40 年代末。1949 年,美国 Ohio 州立大学天线实验室的 G. Sinclair 首次提出了目标极化散射矩阵(即 Sinclair 矩阵)的概念^[3],从而拉开了雷达极化研究的序幕。自此以后,雷达极化研究经历了六十多年的不断发展,取得了一系列丰硕的研究成果^[4-19]。回顾雷达极化研究的发展史,大致可划分为三个发展阶段^[2,19]:

第一阶段(从 20 世纪 40 年代末至 20 世纪 70 年代末):经典雷达极化学的建立

早期的雷达系统只利用了电磁波的幅度特性,而忽视了其他的电磁特性。为了充分利用电磁波信息,从 20 世纪 40 年代末开始, Sinclair 就积极从事目标变极化效应的研究工作^[3]。他指出,在远场条件下,雷达目标可视为一个“极化变换器”,且可用一个 Sinclair 矩阵表征。继 Sinclair 之后, Kennaugh 于 50 年代初对目标极化散射矩阵进行了更深入的研究^[20]。在研究单静态、相干情形时,他发现,任何目标均存在天线接收功率最大或最小对应的最佳极化状态,这些最佳极化状态就是著名的目标特征极化,从而为经典雷达极化学奠定了初步的理论基础。1970 年,在深入研究 Kennaugh 工作的基础上, Huynen 发表了题为“雷达目标唯象学理论”的博士论文^[21]。在这篇博士论文中, Huynen 杰出的研究成果有:

(1)详细地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;

(2)发展了 Kennaugh 特征极化理论,利用 Poincare 极化球和 Stokes 矢量表征法导出了 Huynen 极化叉的概念。

这些研究成果最终促成了经典雷达极化学的形成。

除此之外,学者们在该阶段还开展了其他的研究工作^[22-24],如 Rumsey(1949—1951)、

Booker(1950)、Kals(1951)、Brickel(1965)及 Kuhl(1970)等工作。这些研究工作多集中在雷达目标和地杂波极化测量、雷达目标分类和识别等方面。总的来说,由于受当时雷达技术落后的限制,该阶段主要在理论方面开展了一些探索性工作。

第二阶段(从20世纪80年代初至20世纪90年代末):雷达极化研究步入高潮期

从20世纪80年代开始,雷达极化研究进入了崭新的时期。随着现代战争对雷达性能的更高要求以及人们对雷达极化应用前景的深入认识,雷达极化信息处理和应用研究受到世界各国的广泛关注。这一阶段有关雷达极化问题的研究呈现三方面的显著特点:

- (1)具备极化测量能力的实用化雷达陆续出现;
- (2)雷达极化理论研究持续、快速发展;
- (3)雷达极化应用研究全面展开。

1985年,结合成熟的高分辨成像技术和雷达极化测量技术,美国宇航局(NASA)下属喷气推进实验室(JPL)成功地研制出世界上第一部实用化的机载 POLSAR 系统。以此为开端,其他发达国家相继研制出自己的机载/星载 POLSAR 系统^[25-40]。其中已投入使用且较具代表性的机载 POLSAR 系统有:美国 NASA 的 JPL/DC-8 多波段(P/L/C)AIRSAR^[27-28]、德国宇航中心(DLR)的 DO228 多波段(P/L/S/C/X)E-SAR^[29-30]、加拿大遥感中心(CCRS)的双波段(C/X)CV580 SAR^[33]、丹麦遥感中心(DCRS)的 G-3 双波段(L/C)EMISAR^[35-36]、日本情报通信研究机构(NICT)和宇宙航空研究开发机构(JAXA)共同研制的 G-2 双波段(L/X)PISAR^[38],等等(如表 1.1 所示)。在星载 POLSAR 系统方面,主要有美国 NASA 研制的奋进号航天飞机搭载的 SIR-C/X-SAR、日本 JAXA 和日本资源探查用观测系统研究开发机构(JAROS)共同研制的 ALOS PALSAR,以及加拿大空间局(CSA)的 RADARSAT-2,等等^[39-40](如表 1.1 所示)。这些实用化 POLSAR 系统的成功研制为雷达极化问题的研究提供了大量实测的极化数据,极大地促进了雷达极化信息处理和利用研究,并在世界范围内掀起了一股研究雷达极化问题的热潮。

在实际应用需求推动和 POLSAR 系统不断发展这一背景下,该阶段雷达极化理论研究得到快速发展。其中较具有代表性的理论研究有:

(1)Boerner(1981—1991)、Van Zyl(1987)、Germond(1997)、Titin-Schneider(2007)等的特征极化理论研究^[41-64]。他们将特征极化概念推广到了非相干、双静态情形,并提出了表征目标特征极化的新手段——Van Zyl 功率密度图和 Agrawal 相位相关图。

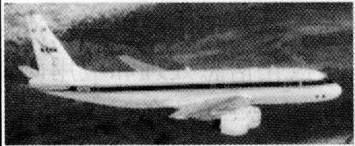
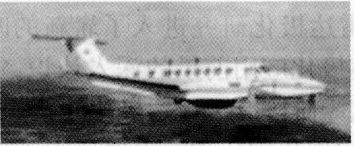
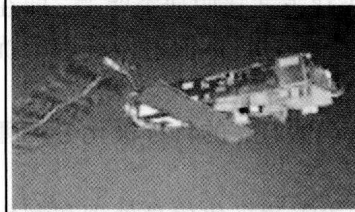
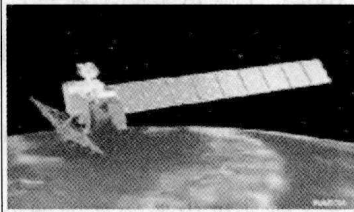
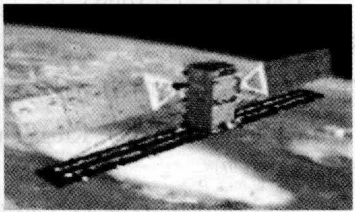
(2)Ioannidis(1979)、Cadzow(1980)、Kostinski(1987)、Mott(1997)、Yang(1991—2005)等的相对最优极化研究^[65-81],该研究通过调整收发天线极化状态来改变目标与杂波之间的天线接收功率之比,以达到增强目标、抑制杂波的目的。

(3)Kostinski(1988)、Stapor(1995)、王雪松等的天线最佳极化方式接收研究^[82-88],即在复杂电磁干扰环境下,通过调整接收天线极化状态实现接收天线对目标散射回波和干扰信号的天线接收功率之比最大。

(4)Cloude(1988)、Krogager(1990)、Cameron(1990)、Freeman(1992)等的目标极化分解理论研究^[89-97]。

这些研究极大地丰富和发展了雷达极化理论,为雷达极化信息处理和利用提供了理论支撑。

表 1.1 已投入使用的典型机载/星载 POLSAR 系统

AIRSAR NASA/JPL(USA) DC8 P, L, C - Band(Q) 	AuSAR D. S. T. O(Aus) DC3(97) KingAir 350(00) Beach 1900C, X - Band(Q) 	EMISAR DCRS(DK) G3 Aircraft L, C - Band(Q) 
PHARUS TNO - FEL(NL) CESSNA - Citation II C - Band(Q) 	PISAR NASDA/CRL(J) GulfStream L, X - Band(Q) 	RAMSES ONERA(F) Transal C160 P, L, S, C, X, Ku, Ka, W - Band(Q) 
SAR580 Environment Canada(C) Convair CV - 580 C, X - Band(Q) 	AES 1 InterMap Technologies(D) GulfStream Commander X - Band(HH), P - Band(Q) 	DOSAR EADS/Dornier GmbH(D) DO228(89), C160(98), G222(00) S, C, X - Band(Q), Ka - Band(VV) 
STORM UVSQ/CETP(F) Merlin IV C - Band(Q) 	ESAR DLR(D) DO 228 P, L, S - Band(Q)/C, X - Band(S) 	MEMPHIS/AER FGAN(D) Transal C160 Ka, W - Band(Q)/X - Band(Q) 
ENVISAT/ASAR ESA(EU)2002 C - Band(S/T) HH, VV, (HH, VV) 	ALOS/PALSAR NASDA/JAROS(J)2006 L - Band HH, VV, (HH, HV), (VV, VH) 	RADARSAT - 2 CSA/MDA(CA)2007 C - Band(Q) 

注: USA—美国, Aus—澳大利亚, D—德国, DK—丹麦, F—法国, J—日本, NL—新西兰, C—加拿大。

伴随着雷达极化基础理论的快速发展,雷达极化应用研究在这一阶段也备受重视,尤其是 POLSAR 测量数据信息提取或 POLSAR 图像解译研究。尽管早期也有关于雷达极化的应用研究,但由于缺乏实测极化数据的支持,许多研究人员都望而却步。20 世纪 80 年代后,各种新型 POLSAR 系统的不断涌现,实测 POLSAR 图像资源的极大丰富,加速了极化信息在遥感等众多领域的应用研究。这些研究主要体现在: Van Zyl (1989)、Pottier (1998)、Cloude (1997)、Krogager (1998)、Kong (1998)、Pierce (1998)、Lee (1998)、Freeman (1998) 等的 POLSAR 图像地物分类研究^[98-148], Lee (1998)、Novak (1998)、Lopes (1998)、Liu (1998) 等的 POLSAR 图像相干斑抑制研究^[149-178], Kong (1988)、Novak (1990)、Lee (1994)、Freitas (2003)、Gambini (2006) 等的 POLSAR 图像杂波统计建模研究^[179-182], Novak、Jackson、Dekker、Sciotti 等的雷达目标极化检测研究^[183-190], Schuler (1996)、Reigber (2001)、Lee (2002) 等的地形参数反演^[191-201]及三维成像研究^[202-204], 等等。

第三阶段(从 20 世纪 90 年代末至今):雷达极化研究新动向

近年来,随着雷达测量技术的进一步发展,雷达数据获取已由单一观测方式向多极化、多波段、多角度、多时相等两个或两个以上观测方式联合发展。相应地,雷达极化问题的研究也出现了新动向,即极化信息与其他互补信息的融合,其中最为典型的是极化信息与干涉信息的有效组合^[205-210]。1998 年, Papathanassiou 等首先利用 SIR - C/X - SAR 数据研究了频率、极化对相干性的影响,这是将极化信息和干涉信息相结合的极化干涉 SAR 的最初起源^[205]。极化干涉 SAR 是极化和角度两个观测方式的综合,具备了干涉 SAR 对地表散射体高程敏感的特性和 POLSAR 对散射体形状、方向和介电特性等敏感的特性,从而能更有效地提取散射体结构等属性信息。目前,具备重复飞行极化干涉测量能力的极化干涉 SAR 有德国的 DLR E - SAR、日本的 PISAR、美国的 AIRSAR、法国的 RAMSES 等机载系统和 ALOS/PALSAR、RADARSAT - 2 等星载系统^[30-31,37]。从 2003 年起,欧安局每两年举办一次极化干涉 SAR 国际会议,主要针对极化干涉数据的理论和方法研究。可以预见,极化信息与其他互补信息的融合是未来雷达极化应用研究的必然发展趋势之一。

1.1.2 国内外研究现状

雷达极化是一门获取、处理和分析电磁波极化信息的学科。历经了六十余年的发展,雷达极化目前已成为现代雷达技术的重要分支,其研究内容涉及极化表征(第 2、3 章)、最优极化(第 4 章)、散射特性分析(第 5 章)等理论研究和 POLSAR 图像杂波统计特性(第 6 章)、相干斑抑制(第 7 章)、地物分类(第 8 章)等应用研究。

1.1.2.1 极化表征理论

极化表征理论是探讨客体极化特性描述的概念和方法,它包括电磁波极化表征、目标变极化效应表征、天线极化表征等。纵观雷达极化理论研究历程,极化表征理论是目前研究得最为广泛、深入的基础理论。在电磁波极化表征方面,针对“时谐波”,学者们已提出了 Jones 矢量、极化比、Stokes 矢量、极化椭圆几何描述子和相位描述子等表征方式^[1,4,6]。

针对单色波,也给出了极化度、波的协方差矩阵、部分极化波 Stokes 矢量等描述手段。在目标极化表征方面,对于确定性目标, Sinclair 提出采用一个 2×2 极化散射矩阵来描述其变极化效应。对于分布式目标,学者们又提出了 Mueller 矩阵、Kennaugh 矩阵、极化协方差矩阵和相干矩阵等高阶统计量表征方式^[207-209]。需指出,这些高阶统计量同样可用于表征确定性目标,且此时这些高阶统计量与极化散射矩阵之间存在非线性映射关系。此外,为适应宽带电磁理论及极化测量技术发展,王雪松等还提出了“瞬态极化”概念,并建立了时变电磁波和目标的瞬态极化表征的描述子^[2]。

1.1.2.2 最优极化理论

最优极化理论,是指根据某种判决函数(如天线接收功率最大,或以天线接收功率为自变量的函数最大)来选取最优的收发天线极化状态,从而改变目标之间的功率差别或其他散射特征差别。从数学上角度看,最优极化理论实质是一个非线性函数的极值求解问题。最优极化研究始于 20 世纪 50 年代。截至目前,根据判决函数最优极化研究可分为特征极化和相对最优极化两部分;根据研究对象不同,也可分为相干情形和非相干情形,其中前者针对确定性目标,后者针对分布式目标;根据收发天线之间是否存在极化约束,还可分为通道约束情形(如同极化通道、正交极化通道等)和不存在极化约束情形。图 1.1 对目标最优极化的求解算法进行了总结。

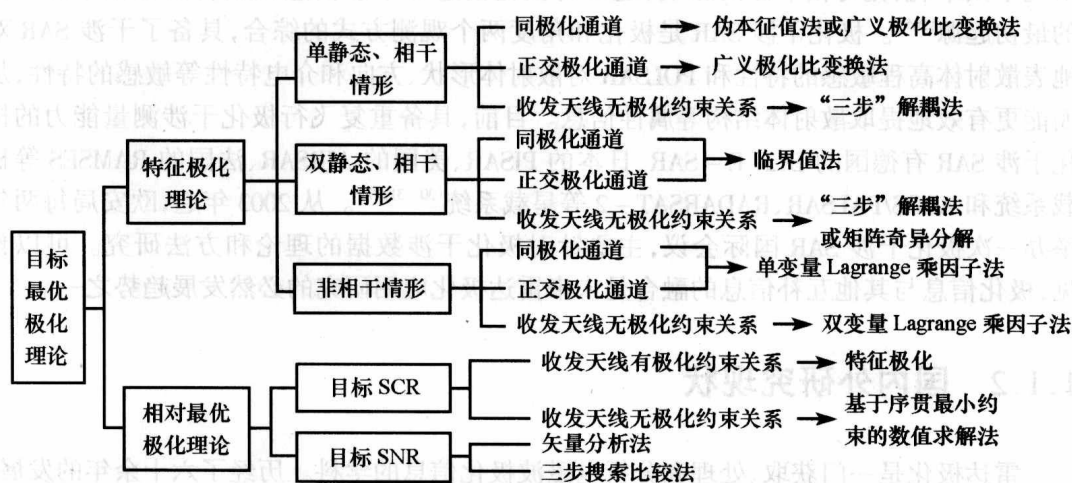


图 1.1 最优极化算法研究

1. 在特征极化研究方面

1952 年, Kennaugh 首次提出了“目标特征极化”概念^[20], 并针对单静态互易相干情形同极化通道目标特征极化进行了研究, 拉开了目标特征极化研究的序幕。1970 年, Huynen 首次采用 Poincare 极化球表征了 Kennaugh 目标特征极化, 并导出了著名的 Huynen 极化叉, 奠定了目标特征极化表征的基础^[21]。20 世纪 80 年代后, POLSAR 系统获取的大量实测数据有力地推动了雷达极化学的发展。在目标特征极化理论研究方面, 伊利诺伊州立大学的 Boerner 研究小组^[43,45]和喷气推动实验室(JPL)的 Van Zyl 等^[54]作出了杰出贡献, 他