



极化雷达成像基础与应用

Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications

【美】Jong-Sen Lee 【法】Eric Pottier 著

洪文 李洋 尹婧 等译

王卫延 审校



“十二五”国家重点图书出版规划项目 微波成像技术国家重点实验室译著系列
空间射频信息获取新技术丛书

极化雷达成像基础与应用

Polarimetric Radar Imaging
From Basics to Applications

[美] Jong-Sen Lee 著
[法] Eric Pottier

洪文 李洋 尹婧 等译
王卫延 审校

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书作者是两位国际著名的极化雷达专家,均长期从事极化雷达研究工作,有大量的极化研究成果,并有丰富的教学经验。本书反映了当前国际上极化技术的研究水平,涵盖了极化的基本理论、极化的处理算法、极化分类及其他应用。书中全面反映了作者长期的极化研究成果和素材,以及当前最新的极化研究进展和成果,形成了完整的极化理论体系。书中还给出了极化目标分解、极化分类、极化的其他应用等有价值的若干专题的丰富素材,特别是对于极化的相干斑滤波和极化目标分解阐述得尤其深刻和全面。

本书可作为极化雷达技术课程教材或从事相关学科研究必备的参考书。

Polarimetric Radar Imaging; From Basics to Applications & Jong-Sen Lee, Eric Pottier

ISBN: 978-1-4200-5497-2

Copyright © 2009 by Taylor & Francis Group, LLC.

Authorized translation from the English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC., All rights reserved.

本书英文版由 Taylor & Francis Group 出版集团旗下的 CRC 出版社出版,并经其授权翻译出版,版权所有,侵权必究。

Publishing House of Electronics Industry is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

本书中文简体版专有出版权由 Taylor & Francis Group, LLC 授予电子工业出版社,并限在中国大陆出版发行。专有出版权受法律保护。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2010-5779

图书在版编目(CIP)数据

极化雷达成像基础与应用/(美)李物森(Lee, J.), (法)鲍坎埃(Pottier, E.)著;洪文等译.

北京:电子工业出版社,2013.6

(空间射频信息获取新技术丛书)

书名原文: Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications

ISBN 978-7-121-20266-7

I. ①极… II. ①李… ②鲍… ③洪… III. ①极化(电子学)-合成孔径雷达-成像原理 IV. ①TN958

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 085884 号

策划编辑:马 岚

责任编辑:马 岚

文字编辑:陈 磊

印 刷:北京京师印务有限公司

装 订:北京京师印务有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:19.75 字数:506 千字

印 次:2013 年 6 月第 1 次印刷

定 价:59.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。



总序 Foreword

我国的雷达事业,经过数十年几代人的努力,从无到有,从小到大,从弱到强,在许多领域已经进入了国际先进行列。为了总结这些经验,给今后的雷达发展打好基础,前些年,我们在众多雷达专家、学者的支持和参与下,在总结长期雷达科研、生产、教学、使用经验的基础上,聚集体智慧,组织了“雷达技术丛书”的编写工作。该套丛书一经电子工业出版社隆重推出,便受到业内同行的热烈欢迎,也成为我国雷达界的一项重要科研成果。

转眼,距“雷达技术丛书”的出版已近十年,在我国国防建设与经济建设需求的推动下,在电子信息技术高速发展的基础上,雷达及雷达相关技术又有了新的进步。近年来,我国在相控阵天线及其发射接收组件技术方面取得了很大进步,并推广应用于各种对空目标监视雷达及各类机载雷达;开展了高分辨率多维雷达信息获取前沿技术研究,实现了机载与星载高分辨率合成孔径雷达(SAR)成像和超宽带雷达成像,这些都在国防建设和各个民用领域发挥着重要作用。在天线、微波、信号处理、数据处理等雷达基础技术快速发展的同时,与通信、网络技术的快速发展相同步,我国在雷达组网、雷达数据融合等雷达系统技术方面也取得骄人的进步,使得雷达成为空间射频信息获取的重要工具。特别值得一提的是,为适应航空、航天和空间应用的需要,我国在用于空间目标探测、跟踪和精密测量的大型单脉冲雷达与相控阵雷达技术方面获得了新的进展,其中相当部分拥有发明专利与自主知识产权。与此同时,在推动我国雷达技术进步的队伍中也涌现出不少优秀的年轻专家。在总结近几年雷达及雷达系统技术快速发展的基础上,为满足雷达信息获取的新要求,包括地基雷达对高速、高机动飞行目标及机载与星载雷达对地面、海面乃至地下目标获取信息的要求,我们再次组织编写了“空间射频信息获取新技术丛书”(以下简称丛书)。该套丛书的正式出版和推广,将有利于正确把握雷达技术发展方向,促进我国雷达事业的创新发展。

为使丛书较系统地总结和反映我国在空间射频信息获取与应用方面所取得的创新技术与理论成果,同时吸纳国外在该领域的相关前沿基础科研成果,为该领域技术发展提供借鉴作用,本套丛书除包括本版内容之外,还充实了国外引进版内容。全套丛书的内容定位主要突出空间射频信息获取技术的工程设计性,反映空间射频信息获取的新技

术。在本版内容中,强调总结我国科技人员近年来在空间射频信息获取技术领域取得的重大科技成果和突破性进展,框架设想上体现新技术和创新发展;在国外引进版内容上,重点吸纳国外空间射频信息获取技术领域的前沿基础科学研究和对该领域技术发展具有借鉴作用的新技术。全套丛书尽可能提供有关研究图表、数据、曲线和计算公式,使设计举例更具有实用性。

丛书的编写创作主要由领域内几位院士和众多中青年专家担纲,他们既要完成繁重的科研和管理任务,又要抓紧时间撰写书稿,工作十分辛苦,在此,我们谨代表丛书编委会,向各册作者和审稿专家表示深深的敬意!我们希望本套丛书所展示的新技术、新成果和新理论等能对从事该技术领域科研、设计、教学、管理工作的人员,部队干部、战士,以及高等学校相关专业的学生、研究生有所帮助,从而促进我国空间射频信息获取技术的发展,为国家信息化建设和国民经济建设作出贡献。

本套丛书的出版,得到了中国电子科技集团公司、中国电子科学研究院、南京电子技术研究所、西安电子科技大学等各参与单位的大力支持,得到了电子工业出版社领导和刘宪兰首席策划编辑的积极推动,得到了参与丛书工作全体同志的热情帮助,在此一并表示衷心的感谢!

丛书主编、中国工程院院士

王小谟 张光义

2013年5月

译者序

作为一种主动的航天、航空遥感手段，微波成像技术具有全天时、全天候工作的特点，在环境保护、灾害监测、海洋观测、资源勘查、精细农业、地质测绘、政府公共决策等方面有着广泛的应用，目前已成为高分辨率对地观测和全球资源管理最重要的手段之一。

极化合成孔径雷达(PolSAR)技术是高分辨率微波成像系统从单一的“影像”获取向量化测量工具发展的不可或缺的途径。与合成孔径雷达干涉测量系统(InSAR)相似，PolSAR系统不仅能够利用影像功率信息，其通道间的相对相位信息还可以定量地反映目标特性差异，从而在无监督地物分割分类、目标检测与识别、土壤湿度和生物量等地物参数估计方面存在重要的应用潜力和价值。

极化合成孔径雷达技术领域的研究涉及电磁矢量散射理论、多通道相干雷达系统及数据处理技术、量化地物参数反演及应用技术等，是基础理论与实验科学紧密结合并相互促进的典型研究领域之一。受限于目前国内在极化 SAR 基础理论、系统技术及数据应用等方面相互割裂的研究现状，迫切需要系统全面地了解在极化相干系统设计、数据处理及应用等方面的国际领先研究经验和成果。

本书是一部专门讨论极化合成孔径雷达成像基础理论、目标的极化特征模型及特征量、数据处理方法和多种反演应用算法的学术论著。本书的两位作者是当前活跃在极化 SAR 研究领域的知名学者，他们具有长期专门从事极化 SAR 成像研究的经历，是分别为美国国家航空与航天局喷气推进实验室(NASA-JPL)和欧洲空间局(ESA)提供技术咨询服务及数据处理支持的顶尖科学家，并拥有丰富的教学经验。

本书着重论述极化 SAR 的基本概念、数据处理原则与方法、极化 SAR 的典型应用算法等。该书注重选材的全面与组织架构的简洁，强调算法的基本原理与工程实现相结合，对专门从事极化 SAR 数据处理的研究人员而言具有较强的可读性和可操作性；同时，本书采取了电磁散射基础、统计信号理论、雷达系统等专业知识与极化合成孔径雷达图像滤波、地物目标分解分类及参数反演等应用相结合的阐述方法，从而使本书有望成为一本优秀的电子工程专业研究生教材。在整个翻译直至出版的过程中，两位作者给予了一贯的关注和支持。此外，中译本还完成了对原书的勘误和修订。在阅读本书时可以配合使用附录中提及的极化 SAR 数据处理软件 PolSARPro 及极化 SAR 样例数据。^①

本书中译本的翻译组织工作由微波成像技术国家重点实验室的微波成像新概念、新体制和新方法研究团队完成。本团队自 2006 年起开始在国家自然科学基金重大项目(多维度微波成像基础理论与关键技术 60890071)、科技部国际合作项目(先进极化技术林业应用的研究和论证 2008DFA11690、“龙计划”二期极化干涉 SAR 土地覆盖及地表形变信息提取

^① 采用本书作为教材的教师和学生，请登录原书出版社网站 www.crcpress/product/isbn/9781420054972 获取相关彩图信息。——编者注

技术 5344) 及 863 项目(面向对象的高可信 SAR 处理系统, 2011AA120401) 等国家级项目的支持下, 持续开展极化/极化干涉基础理论、数据处理及应用研究, 并直接参与了 Pol-SARPro 软件中算法模块的开发工作。

在两年多的翻译过程中, 译者与两位作者针对国内研究初步且尚无确定概念的内容和专业术语进行了多次沟通和深入的探讨, 以期最大限度地体现译文与原文研究水准的一致性。微波成像技术重点实验室的王卫延研究员以其极高的热情与深厚的学术功底对全书进行了译审, 帮助译者完成了中译本的勘误, 并得到了作者的确认和一致肯定。参加本书翻译的有洪文、李洋、尹嫄以及周勇胜、闫剑、陈琳和王鹏等研究生。本书的翻译还得到了中国科学院电子学研究所吴一戎院士、中国林业科学研究院资信所陈尔学研究员等多位专家的支持和帮助。鉴于译者的经验和时间约束, 翻译过程中难免存在未尽和疏漏之处, 敬请广大同行和读者批评指正。

作者简介

Jong-Sen Lee (李仲森) 于 1963 年获得中国台湾成功大学学士学位，并分别于 1965 年和 1969 年在位于马萨诸塞州剑桥市的哈佛大学获得硕士与博士学位。自 2006 年从华盛顿哥伦比亚特区的美国海军研究实验室 (Naval Research Laboratory, NRL) 退休以后，就留在那里担任顾问。目前，他还是中国台湾国立中央大学空间遥感研究中心的客座教授。30 年以来，Lee 博士一直从事与合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 和极化 SAR 相关的研究工作。他的相干斑滤波算法已经在包括 ERDAS、PCI 及 ENVI 在内的许多 GIS 软件中获得了应用。Lee 博士的研究方向包括控制理论、数字图像处理、辐射传输理论、SAR 和极化 SAR 信息处理。他所从事的极化 SAR 信息处理涵盖了雷达极化理论、极化 SAR 相干斑统计、相干斑滤波、极化 SAR 海洋遥感、监督与非监督极化 SAR 地表，以及土地利用分类。他已经发表了 70 余篇期刊文章、6 部书籍及超过 160 篇会议文章。

Lee 博士因其在 SAR 与极化 SAR 图像信息处理方面的贡献而成为 IEEE 终身会士，并于 2009 年获颁 IEEE GRS-Outstanding Achievement Award。在第三届及第四届欧洲合成孔径雷达会议 (EUSAR2000, EUSAR2002) 上分别与 E. Pottier 一起荣获最佳论文奖，与 D. Schuler 一起荣获最佳海报展示奖。退休时获颁美国海军杰出平民服务奖 (Navy Meritorious Civilian Service Award)，以表彰其在极化和干涉 SAR 研究上所获取的成就。他也担任 *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 的副编辑。

Eric Pottier 分别于 1987 年和 1990 年在法国雷恩一大获得信号处理与通信方向的硕士与博士学位，并于 1998 年开始在法国南特大学获得大学教职。在 1988 年至 1999 年间，他任南特大学 IRESTE 的副教授，同时担任电子与信息系统实验室极化组负责人。自 1999 年起，他在雷恩一大担任全职教授，完成此书时他是雷恩电子与通信研究所 (IETR-CNRS UMR 6164) 常务所长及成像与遥感组 SAPHIR 团队的负责人。他目前的研究与教学方向主要包括模拟电子学、微波理论及雷达成像，特别是雷达极化。他的研究兴趣广泛，包括雷达图像处理 (SAR, ISAR)、极化散射建模、监督/非监督极化分割，以及分类、极化基础和基础理论。

自 1989 年以来，Pottier 博士已经指导从雷达极化理论到遥感应领域的超过 60 名研究生获得了硕士及博士学位。在国际会议中担任了 31 次分会场主席，并担任 21 个国际论坛及会议的科学与技术委员会成员。在 36 次国际会议和 16 次国内会议上受邀进行了演讲。他出版了 7 部专著、38 篇期刊文章及超过 250 篇会议和论坛文章。他曾通过众多机构或组织 (DLR、NASDA、JRC、RESTEC、ISAP2000、IGARSS03、EUSAR04、NATO-04、PolInSAR05、IGARSS05、JAXA06、EUSAR06、NATO-06、IGARSS07 和 IGARSS08) 授课或举办过雷达极化方向的讲座。

Pottier 博士因其在 SAR 极化理论及遥感方面的贡献而成为 IEEE 会士。他与 J. S. Lee 共同获颁第三届欧洲合成孔径雷达会议 (EUSAR2000) 最佳论文奖。另外还获得 2007 年 IEEE GRS-S Letters 杰出论文奖。因其在地理科学和遥感学教育方面的卓越贡献，荣获 2007 年 IEEE 地学及遥感领域的 GRS-S 教学奖。

序

1983 年到 1988 年期间举办的 NATO ARWs^① 是首次从雷达目标检测开始对极化雷达遥感 60 年以来曲折的历史发展脉络进行详尽评估的专题讨论会。来自西欧、北美、日本和东北亚的 120 多位顶尖专家通过纯数学建模的方式综合评估了矢量电磁散射及成像的数学物理方法, 并利用 NASA-JPL AIRSAR 首次获取的极化合成孔径雷达数字图像对模型原理进行了验证。

在该阶段中缺乏相关的知识普及型教材, 而一系列探索性教材正在酝酿当中。情况于 1992 年有所改变, 该年度的 IEEE-GRSS IGARSS 会议专门设置了极化分会, 有关极化雷达与极化 SAR 的文章数量展现出前所未有的增长趋势。该分会安排了一系列重要的活动, 其规模相当于一场微型极化专题讨论会。我们当时都致力于为先进的极化 SAR、极化干涉 SAR、多模态 SAR 层析及全息影像获取开发成像算法及工具。期间使用了在 1994 年航天飞机任务中获取的优质 SIR-C/X-SAR 极化图像, 以及不断增长的机载全极化 SAR 系统所获取的图像。这些机载系统包括: NASA-JPL 的 AIRSAR 系统、CCRS 的 Convair C-580 系统、DLR 的 E-SAR 系统、ONERA 的 RAMSES 系统, 以及 CRL(NICT)/NASDA(JAXA) 的 PiSAR 系统。

在此之后, 新教材的出版工作再次陷入了停滞。这主要是因为工作的重点集中在验证极化成像雷达体制在遥感领域中的应用潜力上, 并转而推动几个知识普及型项目, 例如 EU-TMR 和 EU-RTN 在极化雷达方面的合作、ONR-NICOP 在宽带干涉感知及监测方面的专题讨论会、近年发展起来的两年一届的 EUSAR 和 ESA-POLINSAR 会议。本书在极化雷达成像方面极具价值, 而两位作者为上述工作做出了巨大贡献, 由此推动了极化雷达成像基础理论及其应用的不断发展。

对编辑并出版一本教材的需求已经迫在眉睫。这本教材应简明且全面地覆盖雷达、极化 SAR 及干涉方面的问题。国际组织接下来优先要做的是利用成功发射的新一代星载全极化 SAR 传感器进行感知、成像并监测压力变化。这三部传感器分别是日本 JAXA 于 2006 年 1 月发射的 ALOS-PALSAR(L 波段), 加拿大 CSA/MDA 于 2007 年 12 月发射的 RADARSAT-2(C 波段), 德国 DLR/Astrium 于 2007 年 6 月发射的 TerraSAR-X(X 波段)。尽管目前使用的星载全极化 SAR 传感器可以极大地改进全球影像获取及地表覆盖测图能力, 并在全球变化检测方面成为了宝贵的工具, 但接下来更为复杂的问题是无法通过单独部署机载或星载平台来完成实时监测自然灾害区域, 以满足减灾应用的需求。由于机载及星载多模式 SAR 成像系统还不能完全满足需求, 接下来必须快速发展重轨差分极化干涉 SAR 层析技术, 并尽一切努力

① Boerner, W-M. et al. (eds.), 1985, *Inverse Methods in Electromagnetic Imaging*, Proceedings of the NATO-Advanced Research Workshop(18-24 Sept. 1983, Bad Windsheim, FR Germany), Parts 1&2, NATO-ASI C-143, (1500 pages), D. Reidel Publ. Co., Jan. 1985.

Boerner, W-M. et al. (eds.), 1992, *Direct and Inverse Methods in Radar Polarimetry*, NATO-ARW, Sept. 18-24, 1988, Proc., Chief Editor, 1987-1991, (1938 pages), NATO-ASI Series C: Math & Phys. Sciences, vol. C-350, Parts 1&2, D. Reidel Publ. Co., Kluwer Academic Publ., Dordrecht, NL, 1992. Feb. 15.

来发展载有多波段多模式全极化 SAR 传感器的高轨平台。平台应不仅限于军用，更应该用于区域性环境灾害监测和控制，并检测全球变化现象带来的冲击。

上述非凡的成就帮助我们逐渐开始了解极化雷达成像，同时也使我们对一本专门教材的需求变得紧迫起来。这样一本教材应该足够简要，且能够全面地综合基本理论及由数字运算工具辅助的处理算法。由 Jong-Sen Lee 和 Eric Pottier 撰写的这本书精准而卓越地满足了以上要求，并且用 PolSARpro 工具箱对一系列应用进行了验证。这是一本非常简明的教材，用 400 余页^①覆盖了从基础到应用的全部内容，可以在未来相当长的一段时间内作为可以实际操作的基础教材。这本教材精选了 10 章内容，其中第 1 章对全书进行了详尽的总结。本书提供的基础性知识将帮助我们解决那些紧迫的任务，如日益增长的大规模重复性洪水或干旱所导致的庄稼绝收、火山爆发所引起的全球变化，以及地震与海震引发的海啸等。现在是利用本书所包含的基础方法去解决这些可怕难题的时候了。

在这里祝贺本书的两位作者，他们的远见卓识与真诚奉献汇集成这样一本姗姗来迟的优秀的极化雷达成像基础与应用教材。无论是现在还是未来，我们的星球都承受着严重的环境压力变化，而本书在解决上述挑战时所发挥的作用是无与伦比的。

Wolfgang-Martin Boerner 博士
退休教授
伊利诺伊大学芝加哥分校

^① 指英文原著的页数。——编者注

致 谢

感谢 Wolfgang-Martin Boerner 教授为本书撰写序,他将毕生心力都贡献于极化雷达的发展,且经常以“polarimetry co-strugglers”来鼓励其他研究同伴。近 20 年以来,极化雷达在 Wolfgang-Martin Boerner 教授的激励下取得了许多重要的进展并最终使本书得以完成。此外,还要感谢美国海军研究实验室的 Thomas Ainsworth 博士和 Boerner 教授阅读本书并提出宝贵意见。感谢法国雷恩一大的 Hab Laurent Ferro-Famil 博士为本书第 9 章的撰写所做的贡献。对于他们的帮助,我们在此呈上最诚挚的谢意。

还有许多同行为本书提供了所需的素材,他们是:美国海军研究实验室的 Thomas Ainsworth 博士、Dale Schuler 博士及 Mitchell Grune;法国雷恩一大的 Laurent Ferro-Famil 博士和 Sophie Alain-Bailhache 博士;中国台湾国立中央大学的 Kun-Shan Chen 教授和 Abel J. Chen 教授;美国伊利诺伊大学芝加哥分校的 Wolfgang-Martin Boerner 教授;意大利联合研究中心的 Gianfranco de Grandi 博士;德国宇航中心的 Konstantinos Papathanassiou 博士与 Irena Hajnsek 博士;丹麦 DDRE 的 Ernst Krogager 博士;苏格兰 AELc 的 Shane Cloude 博士;意大利欧洲空间局 ESRIN 的 Yves-Louis Desnos 博士;西班牙 UPC 的 Carlos Lopez Martinez 博士。在这里要感谢他们在许多研究项目中对我们的帮助,与他们的友谊是我们最珍贵的财富。若没有他们的重要贡献,本书是无法最终完成的。

全书所用的一些极化 SAR 影像示例来自于 JPL AIRSAR,特别是经常用到在美国旧金山地区获取的数据。森林及地物分类章节采用了 DLR E-SAR 获取的影像数据,对人工目标结构进行极化特征分析的章节则采用了丹麦的 EMISAR 数据。感谢以下团队的负责人获取了如此有价值的数:Jakob van Zyl 博士、Yunjin Kim 博士、Alberto Moreira 教授和 Soren Madsen 博士。

写作本书的计划起始于欧洲空间局在意大利 Frascati 举办的 2003 届极化干涉 SAR 专题讨论会(2003 Pol-InSAR Workshop),在会上我们决定共同完成一本极化 SAR 的书籍。我们意识到本书的写作是一项非常棘手的任务,出版商在进度延缓时给予了我们鼓励,以使我们能按时交稿。在这里要感谢 Taylor & Francis, CRC Press,它积极地为本书的印制保存了许多彩图,读者可以在 http://www.crcpress.com/e_products/downloads/default.asp 下载。感谢美国电气和电子工程师协会允许我们使用其出版过的素材。

本书的第一作者^① Jong-Sen Lee 要感谢 Eric Pottier 教授为本书简明完整的表述所做出的努力。Eric 获颁 2007 年度 IEEE 教育奖,以表彰其在推动雷达极化及其应用与教学方面的贡献。他是雷达极化领域的最佳资讯对象,并一直用渊博的学识及无边的热情启发我和其他研究人员。能够与我的法国挚友一起工作并完成这项事业是我最大的荣耀。我还要感谢 NRL 的管理者们,特别是 Ralph Fiedler 博士在我 2006 年退休以前一直坚定地支持我在雷达极化方面的研究。我还要感谢多年以前我研究生学习期间哈佛大学的 Larry Y. C. Ho 教授给予

^① 此段为第一作者所写。——编者注

我的指导与帮助。最后，还要感谢我深爱的妻子 Shu-Rong 给我的爱与陪伴。以此书纪念我的母亲 Yu-Yin Hu 在困难的年代里尽其所能地将我抚养成人。

本书的第二作者^① Eric Pottier 与 Jong-Sen Lee 博士初次会面是在 1995 年 IGARSS'95 会议期间，我从未想象过某一天能够有幸与 Jong-Sen Lee 博士合著此书。Jong-Sen Lee 博士凭借 Lee 滤波器而举世闻名，该滤波器是目前国际上相干斑滤波的参考标准。我与 Jong-Sen 从 1995 年起开始紧密合作并成为朋友。双方定期交流极化雷达方面的研究内容，共同完成了 *Wishart $H/A/\bar{\alpha}$ Unsupervised Segmentation of PolSAR Data* 一文，该文章在 EUSAR2000 会议期间获颁“SAR 领域重大贡献奖”。我与 Jong-Sen Lee 博士相处得非常愉快。无论是过去、现在还是未来，我都非常高兴能够与 Jong-Sen 合作，他无疑是当今国际上极化/极化干涉 SAR 信息处理领域的杰出专家之一。我很荣幸能够与 Jong-Sen 共同经历和分享这段著书的经历。谢谢你，*Shihan Söke Sensei Jong-Sen*。

在此，谨以此书献给三位我在极化领域中的良师益友。第一位是帮助我理解极化基本原理的 J. Richard Huynen 博士。在我早期攻读博士学位期间很荣幸得到他的个人帮助。需要特别提及的是我的好朋友 Shane R. Cloude 博士。在 1993 年 9 月到 1996 年 1 月期间，我们在法国南特大学共同度过并经历了一段极化研究的最好时光，我们的两大成就包括支持当地的足球队以及建立了 $H/A/\bar{\alpha}$ 极化目标分解理论。最后，谨以我最深的谢意献给 Wolfgang-Martin Boerner 教授，*le grand migrateur*。他是我 20 年中最亲密、最严格也是最强有力的支持者。感谢他一直以来的友谊、协助、永恒的热情与无尽的鼓励。最后要感谢我深爱的父母 Jacques 与 Bernadette，他们对我个人理想的永恒支持与鼓励伴随我一生。

Jong-Sen Lee
Eric Pottier

^① 以下两段为第二作者所写。——编者注

目 录

第 1 章 极化雷达成像概论	1
1.1 极化雷达成像简史	1
1.1.1 引言	1
1.1.2 成像雷达的发展概况	2
1.1.3 极化雷达成像的发展概况	2
1.1.4 极化雷达成像教学	4
1.2 合成孔径雷达成像概述	4
1.2.1 引言	4
1.2.2 SAR 成像几何构型	5
1.2.3 SAR 空间分辨率	6
1.2.4 SAR 图像处理	7
1.2.5 SAR 复数图像	8
1.3 机载和星载极化 SAR 系统	10
1.3.1 引言	10
1.3.2 机载极化 SAR 系统	11
1.3.3 星载极化 SAR 系统	14
1.4 内容概要	17
参考文献	21
第 2 章 矢量电磁波与极化表征	23
2.1 单色平面电磁波	23
2.1.1 波动方程	23
2.1.2 单色平面波解	23
2.2 极化椭圆	26
2.3 琼斯矢量	27
2.3.1 定义	27
2.3.2 特殊酉群 $SU(2)$	28
2.3.3 正交极化状态与极化基	29
2.3.4 极化基变换	30
2.4 斯托克斯矢量	32
2.4.1 平面波矢量的实数表示方法	32
2.4.2 特殊酉群 $O(3)$	34
2.5 电磁波协方差矩阵	34
2.5.1 电磁波极化度	35
2.5.2 电磁波各向异性和电磁波熵	36

2.5.3 部分极化电磁波的二分量分解理论	36
参考文献	37
第3章 电磁矢量散射算子	39
3.1 Sinclair 极化后向散射矩阵 S	39
3.1.1 雷达方程	39
3.1.2 散射矩阵	41
3.1.3 散射坐标系	45
3.2 目标散射矢量 \mathbf{k} 与 Ω	46
3.2.1 引言	46
3.2.2 双站散射体制	46
3.2.3 单站后向散射体制	47
3.3 极化相干矩阵 T 与极化协方差矩阵 C	48
3.3.1 引言	48
3.3.2 双站散射体制	48
3.3.3 单站后向散射体制	49
3.3.4 散射对称性	50
3.3.5 特征矢量/特征值分解	53
3.4 极化 Mueller 矩阵 M 和 Kennaugh 矩阵 K	54
3.4.1 引言	54
3.4.2 单站后向散射体制	54
3.4.3 双站散射体制	57
3.5 极化基变换	59
3.5.1 单站后向散射矩阵 S	59
3.5.2 极化相干矩阵 T	61
3.5.3 极化协方差矩阵 C	62
3.5.4 极化 Kennaugh 矩阵 K	62
3.6 目标的极化特征	63
3.6.1 引言	63
3.6.2 目标的特征极化状态	64
3.6.3 Sinclair 矩阵 S 的对角化	65
3.6.4 标准散射机制	67
参考文献	71
第4章 极化 SAR 相干斑统计特性	74
4.1 SAR 图像相干斑的基本性质	74
4.1.1 相干斑的形成	74
4.1.2 瑞利相干斑模型	75
4.2 多视 SAR 图像相干斑统计特性	77
4.3 纹理模型和 K 分布	79

4.3.1	归一化多视强度图像的 K 分布	79
4.3.2	归一化多视幅度图像的 K 分布	80
4.4	相干斑的空间相关效应	80
4.4.1	等效视数	81
4.5	极化和干涉 SAR 相干斑统计特性	81
4.5.1	复高斯分布与复 Wishart 分布	82
4.5.2	极化 SAR 数据的蒙特卡罗仿真	83
4.5.3	仿真方法验证	84
4.5.4	复相关系数	84
4.6	单视和多视极化 SAR 数据的相位差分布	85
4.6.1	相位差分布的另一形式	87
4.7	多视乘积分布	88
4.8	多视强度联合分布	89
4.9	多视强度比和幅度比分布	90
4.10	多视概率密度函数的实验验证	91
4.11	多视极化数据的 K 分布	97
4.12	小结	100
附录 4. A		100
附录 4. B		101
附录 4. C		103
附录 4. D		103
参考文献		104
第 5 章	极化 SAR 相干斑滤波	106
5.1	SAR 图像相干斑滤波介绍	106
5.1.1	SAR 相干斑噪声模型	106
5.2	单极化 SAR 相干斑滤波	109
5.2.1	最小均方误差滤波器	110
5.2.2	基于边界对齐窗的相干斑滤波: 精改的 Lee 滤波器	111
5.3	多极化 SAR 相干斑滤波算法回顾	114
5.3.1	极化白化滤波器	114
5.3.2	多视极化 SAR 数据的 PWF 推广	115
5.3.3	最优加权滤波器	116
5.3.4	矢量相干斑滤波器	117
5.4	极化 SAR 相干斑滤波	118
5.4.1	极化 SAR 相干斑滤波准则	119
5.4.2	精改的 Lee 极化 SAR 相干斑滤波	119
5.4.3	基于区域生长技术的极化 SAR 相干斑滤波	122
5.5	基于散射模型的极化 SAR 相干斑滤波	123
5.5.1	演示验证和评估	126

5.5.2	降斑效果	126
5.5.3	主要散射机制的保持效果	127
5.5.4	单一散射目标特征的保持效果	129
	参考文献	130
第 6 章	极化目标分解理论	133
6.1	引言	133
6.2	基于 Kennough 矩阵 \mathbf{K} 的二分量分解	135
6.2.1	基于现象的 Huynen 分解	135
6.2.2	Barnes-Holm 分解	138
6.2.3	Yang 分解	141
6.2.4	目标的二分量分解问题	143
6.3	基于特征矢量的目标极化分解	144
6.3.1	Cloude 分解	145
6.3.2	Holm 分解	147
6.3.3	van Zyl 分解	148
6.4	基于散射模型的目标极化分解	149
6.4.1	Freeman-Durden 三分量分解	149
6.4.2	Yamaguchi 四分量分解	154
6.4.3	Freeman 二分量分解	158
6.5	相干分解	160
6.5.1	引言	160
6.5.2	Pauli 分解	160
6.5.3	Krogager 分解	161
6.5.4	Cameron 分解	163
6.5.5	球坐标分解	167
	参考文献	168
第 7 章	$H/A/\bar{\alpha}$ 极化分解理论	171
7.1	引言	171
7.2	单一散射目标情况	171
7.3	随机媒质散射的概率模型	172
7.4	旋转不变性	174
7.5	极化散射参数 $\bar{\alpha}$	175
7.6	极化散射熵 (H)	177
7.7	极化散射各向异性度 (A)	177
7.8	三维 $H/A/\bar{\alpha}$ 分类空间	179
7.9	基于特征值的新参数	184
7.9.1	SERD 和 DERD 参数	185
7.9.2	香农熵	187

7.9.3 基于特征值的其他参数	188
7.10 相干斑滤波对 $H/A/\bar{\alpha}$ 的影响	192
7.10.1 极化熵(H)参数	193
7.10.2 各向异性度(A)参数	193
7.10.3 平均 α 角($\bar{\alpha}$)参数	196
7.10.4 $H/A/\bar{\alpha}$ 的估计偏差	196
参考文献	197
第8章 极化 SAR 地物与土地利用分类	199
8.1 引言	199
8.2 基于复高斯分布的最大似然分类器	199
8.3 针对多视极化 SAR 数据的复 Wishart 分类器	200
8.4 Wishart 距离度量特征	201
8.5 基于 Wishart 距离度量的监督分类	203
8.6 基于散射机理和 Wishart 分类器的非监督分类	205
8.6.1 实验结果	207
8.6.2 改进的 $H/A/\bar{\alpha}$ Wishart 分类器	209
8.7 基于散射模型的非监督分类	211
8.7.1 实验结果	213
8.7.2 讨论	217
8.8 分类能力的定量比较: 全极化 SAR、双极化 SAR 与单极化 SAR	217
8.8.1 基于最大似然分类器的监督分类评估	218
参考文献	223
第9章 极化干涉 SAR 森林制图与分类	225
9.1 引言	225
9.2 极化干涉 SAR 的散射表征	229
9.2.1 极化干涉相干矩阵 T_0	229
9.2.2 极化干涉复相干性	230
9.2.3 极化干涉相干最优	232
9.2.4 极化干涉 SAR 数据统计特性	234
9.3 森林制图与森林分类	235
9.3.1 森林区域分割	235
9.3.2 体散射类型地物的非监督极化干涉 SAR 分类	235
9.3.3 极化干涉 SAR 森林监督分类	238
附录 9. A 计算最优干涉相干系数对的统计量	239
参考文献	240
第10章 极化 SAR 应用示例	242
10.1 人造建筑物极化特征分析	242
10.1.1 斜距向多次反射回波	243