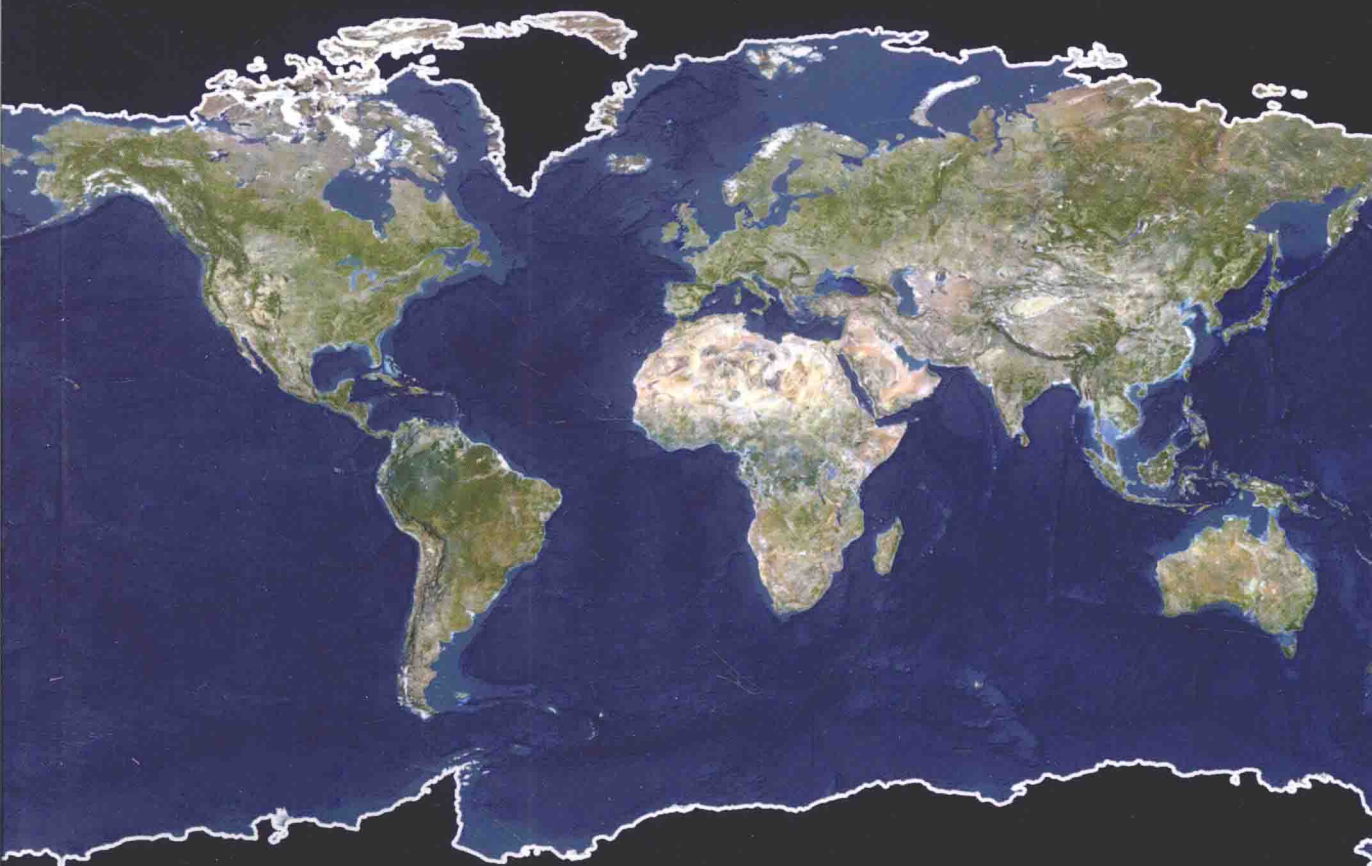


“十二五”国家重点图书出版规划项目

空间射频信息获取新技术丛书



合成孔径雷达成像

Imaging with Synthetic Aperture Radar

【法】 Didier Massonnet 著
Jean-Claude Souyris

邓云凯 等译

 中国工信出版集团

 电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

“十二五”国家重点图书出版规划项目
空间射频信息获取新技术丛书

合成孔径雷达成像

Imaging with Synthetic Aperture Radar

[法] Didier Massonnet 著
Jean-Claude Souyris

邓云凯 等译



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

内 容 简 介

本书由法国国家空间研究中心的两位专家合著而成,全面探讨了合成孔径雷达(SAR)成像技术。全书共五章,第1章涵盖了涉及电磁学、信号处理和图像处理等学科的雷达成像理论基础;第2章从几何学角度对SAR的核心技术雷达信号处理进行了通俗的论述;第3章考虑到图像辐射特性和雷达系统特点,从SAR系统设计到图像质量,详尽论述了雷达图像的几何特性和辐射特性之间的关系;第4章讨论SAR干涉基本原理和利用干涉图像提取地形信息及目标移动信息的应用方法;第5章全面描述目标散射特性的SAR极化学基本原理。全书最实用的特点是从几何学角度研究雷达成像,使成像结果具有更广泛的应用性。

本书推导缜密、实例丰富,提供了许多基于星载和机载SAR图像实例作为研究核心,便于读者理解和掌握基本概念,旨在为从事学术研究的学生、教师,以及从事该领域工作的科技人员提供参考。

Originally published in English under the title “Imaging with Synthetic Aperture Radar”

©2008 EPFL Press, Lausanne. All rights Reserved.

本书中文版翻译出版权由 EPFL Press 授予电子工业出版社,专有出版权受法律保护。

版权贸易合同登记号 图字:01-2009-1381

图书在版编目(CIP)数据

合成孔径雷达成像/(法)马森耐特(Massonnet, D.), (法)索里斯(Souyris, J. C.)著;邓云凯等译.

北京:电子工业出版社,2015.6

(空间射频信息获取新技术丛书)

书名原文:Imaging with Synthetic Aperture Radar

ISBN 978-7-121-21285-7

I. ①合… II. ①马… ②索… ③邓… III. ①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195993号

策划编辑:马 岚

责任编辑:张小乐

印 刷:三河市双峰印刷装订有限公司

装 订:三河市双峰印刷装订有限公司

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:14.25 字数:365千字 彩插:2

版 次:2015年6月第1版

印 次:2015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 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

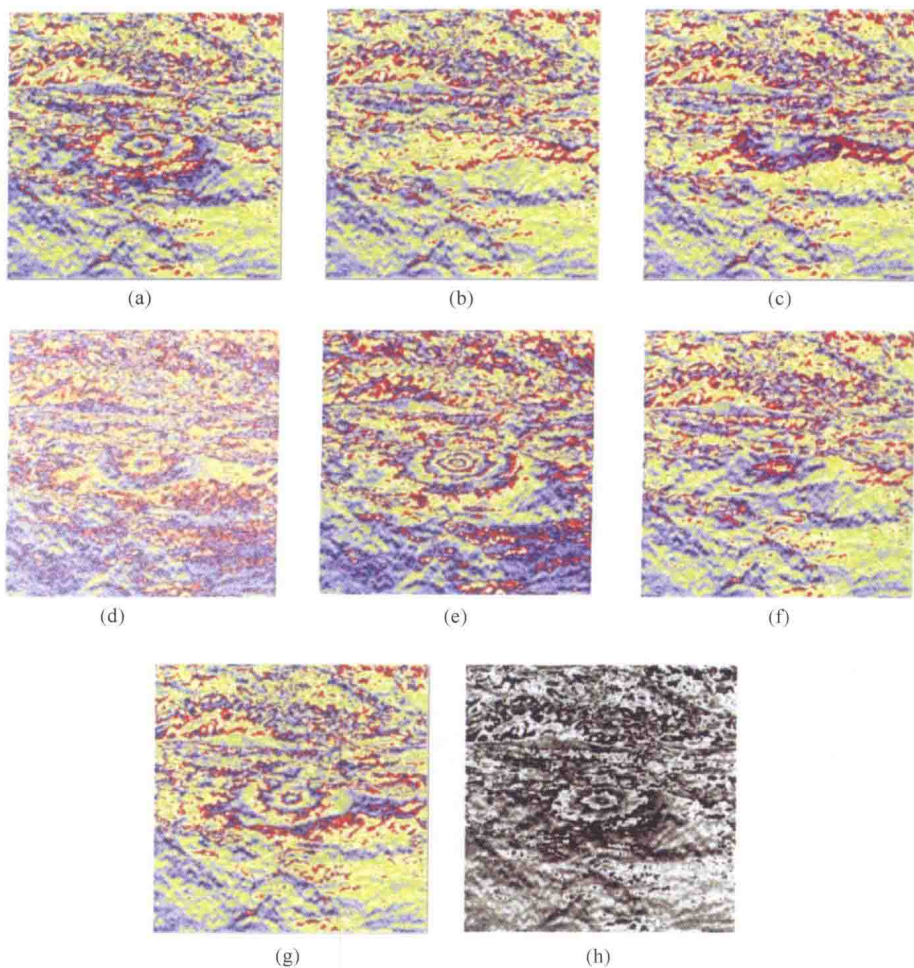


图 4.21 干涉图像实例

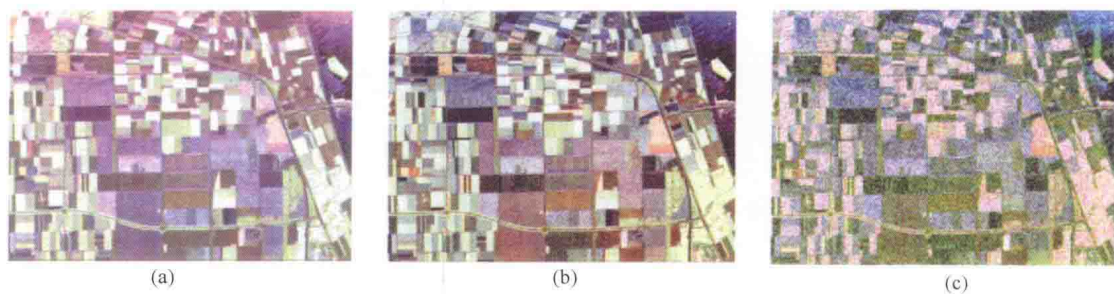


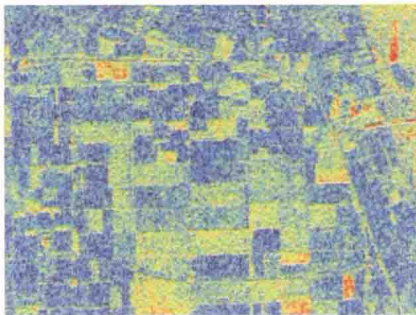
图 5.6 (a) JPL/AIRSAR 伪彩色极化图像, L 波段, Flevoland, 荷兰: $HH(R)$, $HV(G)$, $VV(B)$, 图像经过 Lee 极化相干斑滤波处理(感谢美国海军研究室的 J. S. Lee); (b) Pauli 分解: 单次散射(B), 0° 双次散射(R), 45° 双次散射(G), 经过 3×3 滑动窗平滑处理(POLSAR-PRO 结果); (c) Krogager 分解, 采用 POLSAR-PRO: $|S_{tl}|(B)$, $(|S_{ll}|, |S_{rr}|)$ 的最大值(R), $|S_{ll} - S_{rr}|(G)$, 经过 3×3 滑动窗平滑处理



图 5.7 对点目标进行预滤波获得的 Cameron 分解: 单次散射(蓝色), 双次散射(红色), 体散射(绿色), 四分之一波长偶极子(青色)



图 5.12 Freeman 分解, Flevoland, L 波段。 P_s (表面散射)为蓝色区域; P_v (体散射)为绿色区域; P_d (双反弹散射)为红色区域(POLSAR-PRO 分析结果)



(e)



(f)

图 5.13 (e) 各向异性 A , Flevoland, 采用 POLSAR-PRO 数据。蓝色表示低数值, 红色表示高数值; (f) IHS 分解, Flevoland

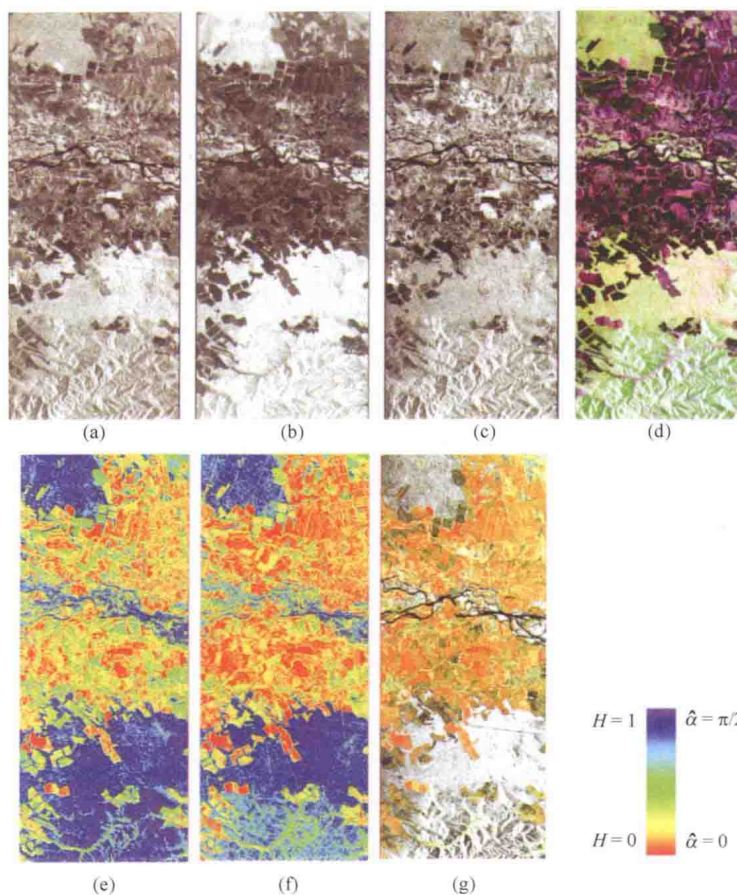


图 5.15 SIR-C 图像(L 波段, 24°), 俄罗斯,Ulan-Ude 区域(1994)。 (a) HH; (b) HV; (c) VV; (d) 彩色合成HH (R), HV (G), VV (B); (e) 熵 H ; (f) 平均 $\bar{\alpha}$ 系数; (g) IHS 合成, 强度(范围), 色彩(平均 $\bar{\alpha}$ 机制), 饱和度 $(1 - H)$

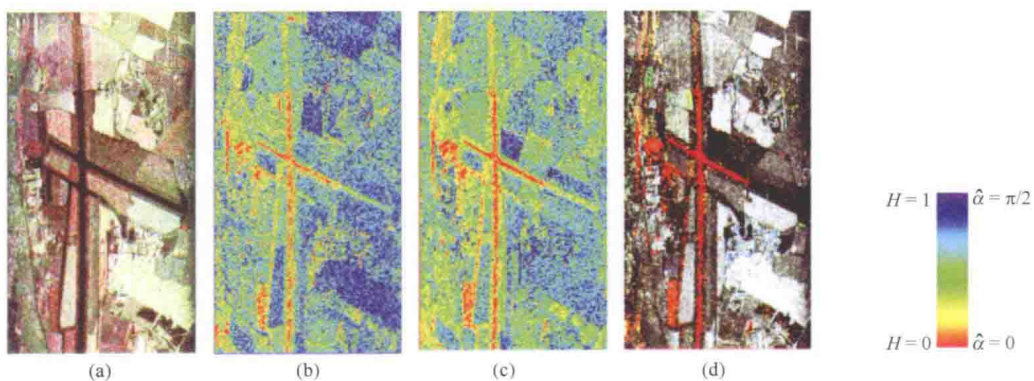


图 5.16 ONERA/RAMSES 机载图像, L 波段, 5 m 分辨率; (a) 彩色合成 HH(R), HV(G) 和 VV(B); (b) 熵 H ; (c) 平均 $\bar{\alpha}$ 系数; (d) IHS 合成, 强度(范围), 色彩(平均 $\bar{\alpha}$ 机制), 饱和度 $(1 - H)$

“空间射频信息获取新技术丛书”编委会

主 任: 左群声

副 主 任: 周万幸 敖 然

委 员: (以下按姓氏音序排列)

保 铮 贲 德 陈 涛 范义晨 郭 庆 韩宗杰
胡明春 黄培康 金 林 李 斌 李大圣 刘炳奇
刘宏伟 刘华军 刘明罡 罗 敏 马 林 潘宇虎
孙 俊 汪文英 王建民 王小谟 吴鸣亚 夏琛海
余振坤 张光义 张金平 张荣涛 赵玉洁 周志鹏

编委会秘书长: 刘宪兰 陈 玲

主 编: 王小谟 张光义

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、雷达数据整合等雷达系统技术方面也取得了骄人的进步，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，框架构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

合成孔径雷达作为一种全天时、全天候的主动微波遥感工具，在海洋观测、环境监测、灾害监测、农业估产、资源勘查、地质测绘和军事侦察等应用领域具有得天独厚的优势，吸引了世界各国遥感专家的目光。

本书的两位作者都是法国国家空间研究中心的资深研究人员，有着深厚的理论基础和丰富的工程经验，对合成孔径雷达成像技术有着独特而深刻的理解。本书基于对电磁波机理和合成孔径雷达原理的剖析，从成像几何的角度切入，对合成孔径雷达系统设计、成像处理、干涉测量和极化应用等多个方面展开了细致而深入的分析和讲解，在诸多合成孔径雷达成像的书籍中独树一帜，也为我们在实际工作中遇到的问题起到了难以替代的指导作用，有望成为一本对电子工程专业研究生和微波成像专业人士都具有参考价值的书籍。

本书的译者工作于中国科学院电子学研究所航天微波遥感系统部，长期从事星/机载合成孔径雷达系统设计、信号处理及微波遥感应用等方面的研究工作，曾先后参与了我国多型合成孔径雷达系统的研发。

本书译者结合合成孔径雷达领域的研究经验，在繁忙的工作之余，完成了本书的翻译工作。全书共5章，由邓云凯主译。张志敏、王宇、刘悦、徐伟、范瑾、何晓芝等协助参与翻译。本书的翻译工作还得到了中国科学院电子学研究所多位专家和学者的支持。

我们在翻译的过程中尽量准确地反映原书的学术观点，然而由于合成孔径雷达领域涉及专业面较广，我们对原著内容的理解难免有不够透彻之处，敬请各位同行和专家批评指正。

前 言

为什么还要编写一本关于雷达成像的书？尽管该领域专业性比较强，不为大众所熟知，而且已经有很多水平的著作，但我们仍有充分的理由这样做。

首先，随着近年来新技术和近年来项目的发展，该领域已经发生了变化。从 20 世纪 90 年代开始，新的星载和机载雷达系统数据的可用性，导致了快速的技术进步，与此同时，计算速度的大幅提高大大降低了雷达科研中运算的复杂度和成本，从而推动了这些新技术的发展。过去需要整个计算机中心运算多日的处理，现在可以在任何人的台式计算机上进行操作。这从根本上改变了数据处理的能力和算法的可选择性。其次，我们想从另一个角度描述雷达成像技术。因为雷达技术已经用于多种不同的技术领域，从而相应地对其有多种不同的研究方法。拥有电磁信号处理技术背景的专家们可能更喜欢利用纯粹的数学表达进行成像处理；研究雷达图像应用的专家愿意认为它是从真实孔径雷达中得到的；而从事其他领域图像处理，如光学成像和地震层析成像方面的专家，可能使用其他不同的研究方法。我们写这本书的目标是尽可能用几何学的方法研究雷达成像。这样做有很多不同的原因。我们认为几何学方法是一种比上述任何专业性方法更普遍适用的语言。虽然几何方法看起来比较简单，但非常精确。因此，我们认为它是在不回避雷达成像固有的任何困难和复杂性的情况下最简单可行的方法。最后，雷达产生的几何学图像将得到非常重要的应用。因此，探索雷达成像技术的最实际方法是直接通过其应用范围最广的途径展开研究。

一直以来，我们的同行雷达专家对他们的工作时刻充满热情。曾参与雷达处理的任何人都不曾放弃这项技术，即使职业生涯发生变化。当然，试图解释这种情况必然是不全面的，因人而异。但我们相信，这种情况取决于两个因素。首先，雷达成像技术涉及很多交叉领域的知识，因此为了理解这种完全由计算机产生的图像的复杂性，需要有一个信心的飞跃。几乎任何人都可以理解光学成像，但是很难理解雷达成像。事实上是信号相位的抽象性质以及使用的精确重建技术造成了这一显著障碍。越过此障碍的人则发现他们已经进入了专业领域的队伍。从专家的角度，我们并不认为雷达成像比其他观测技术领域更为深奥，但事实上，因为这个障碍的存在，使得它看起来复杂得多。与此同时，进行雷达成像与研究时，现象和采用的调查方法有着本质的联系。此外，雷达成像中的位置和速度的模糊关系与复数形式的 Helsenberg 量子力学原理有着惊人的相似之处，这导致雷达成像有着复杂的理论基础。在雷达极化和量子力学之间也有几个相似的类比。正是雷达成像领域的基本概念才引出了我们上面所提到的各种研究方法。

本书分成五章。第 1 章(SAR 成像的必备理论工具)阐述了一些基本原理，由于雷达成像技术自身的多样性，使其跨越电磁场、信号处理和图像处理领域。我们对电磁波的传播和极化、微波天线的辐射、雷达测量原理和傅里叶变换的特性，依次进行了阐述。

第2章(SAR信号处理: SAR技术核心)采用的是不熟悉遥感理论或在信号处理和雷达物理学方面先验知识不多的读者易于理解的阐述方式,从几何学的角度描述雷达信号处理,读者只需具有基本科学背景即可。第3章(从SAR设计到图像质量)主要涉及辐射测量方面的研究。通过辐射测量和确定雷达/目标通信距离的评估,详细描述了雷达成像的几何(分辨率)特性和辐射测量(雷达回波振幅)特性。第4章(SAR干涉测量技术)阐述了SAR干涉测量的原理和主要应用。干涉技术主要提供两方面的信息:地形信息和地面目标运动信息,它们通常同时存在于一幅图像中。最后,第5章(极化SAR:最大限度获取目标的特征信息)旨在阐述极化的基础理论,从而使通过改变极化方式实现雷达测量的拓展成为可能。

致 谢

本书基于法国国家空间研究中心(CNES)图卢兹中心在1986年至2007年间开展的雷达成像活动。Michel Courtois 鼓励我们编写这本易于读者理解的 SAR 成像书籍, Pierre Moskwa 在这本书完成的最后阶段提供了帮助和支持。在此,我们对这两位 CNES 前任主管表示衷心感谢。

机载和星载 SAR 图像是本书的核心内容。我们要感谢意大利宇航局(ASI)、加拿大宇航局(CSA)、德国航空航天中心(DLR)、欧洲宇航局(ESA)、日本宇航局(JAXA)、美国喷气推进实验室(JPL)、美国国家航空航天局(NASA)、法国国家宇航办公室(ONERA)的 NPO Mashinostroyeniye 公司允许我们使用其部分处理结果。同时我们也要感谢以各种途径对本书给予支持的同事和朋友们。无疑我们无法列出所有要感谢的人,如果没有 Thierry Amiot, Pierre Borderies, Jerome Bruniquel, Paul-Francois Combes 教授, Bruno Cugny, Pascale Dubois-Fernandez, Pierre-Louis Frison, Thuy Le Toan, Jon Sen Lee, Henri-Jose Mametsa, Philippe Marchal, Anjali Mathur, Eric Pottier 教授, Nadine Pourthie 和她的学生,以及 Ceine Tison, Ridha Touzi 和 Heilene Vadon 的帮助,这本书很难准确完成。

这本书的编写工作得以顺利进展,还要衷心感谢 Daniel Rosenfeld, 他在关键时刻表示了对我们工作的浓厚兴趣,并建议我们联系洛桑联邦高等工业大学 EPFL 出版社出版此书。同时感谢来自 EPFL 出版社的 Frederick Fenter 的耐心和支持。

感谢图卢兹 Coup de Puce 公司的译者,特别是 Ian Margo 和 Gayle Trager Berthias, 耗费了大量时间将我们“辞藻华丽”的法语翻译成地道的英语。最后,我们还要郑重感谢匿名审稿人为提高此书的质量做出了巨大贡献。

目 录

第 1 章 SAR 成像的必备理论工具	1
1.1 电磁波的传播与极化	1
1.1.1 麦克斯韦方程组	1
1.1.2 电磁波极化	3
1.1.3 部分极化波	8
1.1.4 附加内容: $SU(2)$ - $O^+(3)$ 的同态代数方法	12
1.2 微波天线的电磁辐射	14
1.2.1 简介	14
1.2.2 电磁辐射方程	14
1.2.3 电磁辐射方程的求解	15
1.2.4 天线方向图、方向性系数和增益	15
1.2.5 平面天线的辐射	15
1.2.6 天线阵列	18
1.2.7 合成孔径雷达天线技术	19
1.3 波和自然表面的相互作用——雷达测量的物理基础	20
1.3.1 简介	20
1.3.2 表面散射	20
1.3.3 体散射	27
1.3.4 电磁波的穿透特性	29
1.3.5 倾斜对散射测量的影响	30
1.4 信号处理的内容: 傅里叶变换和采样定理	31
1.4.1 简介	31
1.4.2 实周期函数的傅里叶级数	31
1.4.3 傅里叶变换	31
1.4.4 傅里叶变换(FT)的性质	32
1.4.5 标准函数的傅里叶变换	32
1.4.6 实信号采样	35
1.4.7 采样定理(香农定理)	36
1.4.8 快速傅里叶变换(FFT)算法	38
1.4.9 二维傅里叶变换	39
参考文献	39

第 2 章	SAR 信号处理: SAR 核心技术	40
2.1	简介	40
2.2	合成孔径雷达基本原理	41
2.2.1	一种新颖的对地观测手段	41
2.2.2	距离向分辨	42
2.2.3	三个基本的雷达频率	42
2.2.4	合成孔径的直观几何学理解	44
2.2.5	合成孔径解析几何模型	48
2.3	频域表示法	52
2.3.1	在频域表示的相位分布	53
2.3.2	非零多普勒中心	54
2.3.3	多普勒中心估计	56
2.3.4	平均多普勒(多普勒中心)估计	56
2.3.5	归一化多普勒中心估计(整数部分)	58
2.3.6	距离徙动	59
2.3.7	距离向处理	61
2.3.8	饱和效应	62
2.3.9	干扰影响	63
2.3.10	雷达走-停近似	64
2.4	SAR 聚焦算法	65
2.4.1	通用的预处理步骤——距离压缩	65
2.4.2	时域处理	66
2.4.3	距离多普勒(“经典”)算法	67
2.4.4	一种可选的技术—— Ω_k 处理器	67
2.4.5	细微形变——chirp scaling	67
2.4.6	PRISME 算法——一种多级处理技术	67
2.4.7	非聚焦处理——一种特殊情况	69
2.4.8	非聚焦处理技术的一个实用例子	70
2.4.9	另一种特殊情况——去斜处理	70
2.4.10	没有近似的处理技术	72
2.5	系统约束条件	73
2.5.1	雷达系统设计	73
2.5.2	时序约束	73
2.5.3	不同类型的雷达数据	74
2.5.4	欺骗自然规律的诀窍	75
2.6	几何特性	78
2.6.1	关于距离对图像影响的实例	78

2.6.2	几何位置方程	80
2.6.3	垂直雷达摄影测量	83
2.6.4	雷达摄影测量和干涉技术	84
2.6.5	倾斜雷达摄影测量	84
2.6.6	雷达测角	84
2.7	超分辨率技术简介	85
2.8	双基雷达数据处理和几何特征	86
2.8.1	直达波	88
2.8.2	三角分辨率	88
	参考文献	89
第3章	从 SAR 设计到图像质量	90
3.1	简介	90
3.2	点目标的雷达方程和雷达散射截面(RCS)	91
3.2.1	损耗因素	93
3.3	分布目标的雷达特征——后向散射系数 σ^0	94
3.4	SAR 合成处理之前雷达-目标链路的信噪比(SNR)	94
3.5	SAR 合成处理过程中信噪比的变化	95
3.5.1	点目标	96
3.5.2	分布目标	99
3.6	雷达设备噪声等效后向散射系数 $\sigma^0(NE\sigma^{0inst})$	100
3.6.1	提高分辨率的能量代价	100
3.7	图像模糊度对 $NE\sigma^{0inst}$ 的影响——总图像噪声($NE\sigma^{0tot}$)	100
3.7.1	距离模糊	100
3.7.2	方位模糊	101
3.7.3	距离和方位模糊的结合考虑	103
3.7.4	总 $NE\sigma^0(NE\sigma^{0tot})$	103
3.8	平台产生的数据量	105
3.9	传输数据率	105
3.9.1	信源编码	107
3.10	定标和相应的图像质量要求	109
3.10.1	内定标	110
3.10.2	外定标	110
3.10.3	定标需求和期望的科学成果	111
3.11	斑点噪声和图像统计特性	112
3.11.1	物理来源	112
3.11.2	完全形成的斑点的统计特性	113
3.11.3	斑点噪声:乘性特征与建模	114

3.11.4	纹理效应	115
3.11.5	多视图像中的斑点噪声	115
3.11.6	相干斑抑制滤波器	118
3.12	脉冲响应(IR)	121
3.12.1	距离脉冲响应(RIR)	122
3.12.2	方位脉冲响应(AIR)	122
3.12.3	复图像频谱, ISLR, PSLR, 加权的作用	123
3.13	图像质量的辐射要素	125
3.13.1	估计和分析 $NE\sigma^{0tot}$	125
3.13.2	模糊度估计	125
3.13.3	辐射分辨率	126
3.14	图像质量的几何要素	127
3.14.1	空间分辨率和像素尺寸	127
3.14.2	几何失真	127
3.14.3	图像定位	128
3.15	雷达图像解译	130
3.15.1	数据描述	130
3.15.2	多普勒频谱评估	132
3.15.3	平台位置	132
3.15.4	饱和效应	133
3.15.5	方向性效应	133
3.15.6	能否仅从图像完全描述雷达设备的特征	134
	参考文献	134
第4章	SAR干涉测量技术	136
4.1	SAR干涉测量原理和局限性	136
4.1.1	SAR的特殊应用	136
4.1.2	干涉测量技术发展简史	136
4.1.3	干涉技术及SAR图像的物理特性	137
4.1.4	SAR图像的相位差	138
4.1.5	干涉测量中相位信息的鲁棒性	138
4.1.6	几何和表面变化引起的局限性	138
4.1.7	排除系统因素	141
4.2	干涉处理步骤	142
4.2.1	SAR图像配准	142
4.2.2	计算图像间的相位差	142
4.2.3	最后一步处理	145
4.3	干涉测量在地形方面的应用	145