

国防电子信息技术丛书

Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data:
Algorithms and Implementation

合成孔径雷达成像

——算法与实现

[美] Ian G. Cumming 著
Frank H. Wong

洪文 胡东辉 等译
吴一戎 审校



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

内 容 简 介

本书专门论述 SAR 成像处理算法及其涉及的数字信号处理理论和技术。全书首先讨论了合成孔径雷达基础知识,重点介绍 SAR 成像处理所涉及的信号处理理论、合成孔径基本概念、合成孔径雷达信号特征分析等;接着讨论 SAR 成像处理算法、实现及其比较,包括距离-多普勒算法、Chirp Scaling 算法、 ωK 算法、SPECAN 算法等成像处理算法,此外还论述了宽成像带 ScanSAR 工作模式的成像处理方法等;最后,本书讨论了 SAR 成像处理算法中的重要辅助算法,即多普勒参数估计,包括多普勒中心估计和方位调频率估计等。

本书重视细节,强调算法的工程实现,并提供了数据和习题等,对专门从事 SAR 成像处理研究人员而言是一本操作性很强的书籍,同时也是一本出色的教学和培训用书。此外,作为合成孔径雷达系统的核心技术之一,本书所探讨的 SAR 成像处理方面的知识也非常适合工程师和后续 SAR 图像应用单位的研究人员阅读。

© 2005 ARTECH HOUSE, INC.
685 Canton Street, Norwood, MA 02062.

本书中文翻译版专有版权由 Artech House Inc. 授予电子工业出版社,未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2006-1684

图书在版编目 (CIP) 数据

合成孔径雷达成像——算法与实现 / (美) 卡明 (Cumming, I. G.) 等著; 洪文等译.

北京: 电子工业出版社, 2007.10

(国防电子信息技术丛书)

书名原文: Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation

ISBN 978-7-121-04208-9

I. 合... II. ①卡... ②洪... III. 合成孔径雷达-成像原理 IV. TN958

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 048131 号

责任编辑: 马 岚 特约编辑: 马爱文

印 刷: 北京市天竺颖华印刷厂

装 订: 三河市金马印装有限公司

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: 28 字数: 717 千字

印 次: 2007 年 10 月第 1 次印刷

定 价: 69.00 元 (含光盘 1 张)

凡所购买电子工业出版社的图书有缺损问题, 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。

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、资源勘察、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的最重要手段之一。以其中的合成孔径雷达（SAR）技术为例，经过30余年的研究和发展，我国在系统研制、数据获取、信息处理及其遥感应用等方面取得了一系列重大的技术突破和丰硕的科研成果。

微波成像技术国家重点实验室主要从事以合成孔径雷达技术为代表的微波成像新概念、新体制和新方法研究。作为本实验室持续跟踪国际最先进微波成像技术的发展动态而组织开展的译著系列之一，本书专门论述SAR信号处理基础、成像处理算法及其实现。本书的作者都是专门从事SAR成像研究的知名学者，同时有着丰富的教学经验和地面处理系统研制经历。本书注重细节并且强调算法的工程实现，对专门从事SAR成像处理的研究人员而言具有较强的可读性和可操作性；同时，本书采取了信号处理基础、雷达系统等专业知识与合成孔径雷达成像处理相结合的深入浅出的阐述方法，这使得本书可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，中译本还完成了原书的勘误修订，并提供原版附带的数据光盘以供读者使用。

实验室译著系列由吴一戎和洪文负责选书和翻译的组织工作。参加本书翻译的有胡玉新、仇晓岚、周欢雪、谭维贤、孟大地和刘琳琳等。洪文和胡东辉完成了全书的校译，并由吴一戎对全书进行了终稿审定。本书的翻译还得到了中国科学院电子学研究所多位专家的帮助。需要说明的是，中译本的首要原则是尽可能准确地传达原著的学术观点。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，敬请广大同行读者批评指正。

作者简介

Ian G. Cumming

于多伦多大学获得工程物理专业理学学士学位,并于伦敦大学皇家学院获得计算与自动化专业博士学位。1977年加入MDA,在此进行SAR信号处理算法的研究(包括多普勒估计和自聚焦方法),并参与设计了SEASAT, SIR-B, ERS-1/2, J-ERS-1和RADARSAT以及多部机载雷达系统的SAR数字处理器算法。

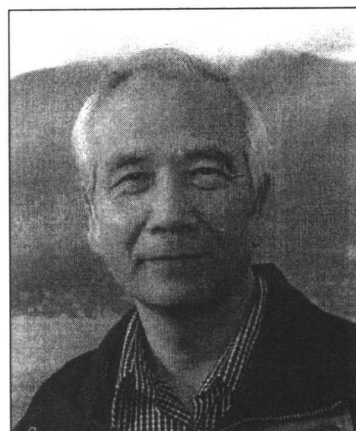
1993年, Cumming 博士任职于英属哥伦比亚大学电子与计算机工程系,担任MDA/NSERC雷达遥感方向的工业研究主席,所在的雷达遥感实验室从事SAR处理、SAR数据编码、星载SAR双路干涉、机载SAR顺轨干涉、极化雷达图像分类以及SAR多普勒估计等方面的研究,其工作详见 <http://www.ece.ubc.ca/sar/>。

1999年, Cumming 博士在位于Oberpfaffenhofen的德国宇航中心做了一年的访问学者。工作之余, Cumming 博士还喜好徒步旅行、滑雪和旅游。



Frank H. Wong

中文名黄熙焯, 祖籍广东新会, 于McGill大学获得电子工程专业工程学士学位, 于英国皇家大学获得电子工程专业科学理科硕士学位, 并于英属哥伦比亚大学获得计算机科学博士学位。1977年加入MDA, 最初几年从事Landsat和SPOT成像领域的工作, 接着专注于SAR, 开始从事机载和星载SAR处理和多普勒估计的工作, 并且在英属哥伦比亚大学雷达遥感实验室担任了18年图像处理的短期讲师。1999年在新加坡国立大学进行了为期一年的访问, 在此开展了双站SAR处理领域的研究。工作之余, 他喜欢象棋、桥牌和乒乓球。



序

星载合成孔径雷达(SAR)在地球遥感中的应用可以追溯至1978年的SEASAT,其100余天的飞行使人们得以初窥SAR在成像方面的巨大潜力。但直到1991年的ERS-1, SAR才真正做到了对地球的长期观测,并实现了成像模式的可靠运行。许多具有较强雷达遥感应应用背景的一国和跨国空间项目,确保了在环境监测及全球性变化研究方面都必不可少的数据获取的连续性。

此后,一些从未设想过的新应用相继出现,其中最振奋人心的莫过于SAR的干涉,即利用SAR复图像对的相干特性对地表形态、运动或去相关结构进行测量。目前,超过13年的连续不断的数据获取,使一些长期研究成为可能,近10年的信号积累已经揭示了每年1mm的陆地下沉(速率)以及海浪变化。通常需要对同一地区进行上百次成像、精确配准和分析,才能得到类似的结论。

由于SAR处理实现了从光学平台到数字信号处理器(DSP)的跨越式发展,以上应用不再是天方夜谭。数字处理使SAR图像的获取和重现变得十分便捷,它既能保证较大动态范围内的无失真图像输出,也保留了精确的相位信息,同时信号处理运算不受物理条件的限制。而且,到目前为止,SAR数字处理器仍在不断地从飞速发展的计算能力中获益。起初需要使用超级计算机或专用DSP进行SAR处理,而今天一台笔记本电脑就可以在适度的时间内处理出一幅图像。数字处理的巨大潜力和持续增长的SAR数据应用需求,促使许多研究机构和商业公司进行SAR处理器的开发,由此发展出了一些满足高分辨率、宽测绘带、高相位精度以及复杂成像模式的新算法。

数据的相干特性使SAR在图像结构与数据处理上与其他遥感技术截然不同。对这样一种系统及其信号的最恰当描述方式是复数方程,因而其处理手段应该是基于信号的,而非基于图像的。SAR处理固然离不开DSP,而DSP同样也从SAR中获益,SAR成像原理及处理算法本身已成为一类可以移植到其他领域中的颇具吸引力的DSP方法。SAR在一般意义上的成像原理方面与X射线断层摄影术很相似,因而从教学方面来说,对其进行研究也是非常有价值的。

但是,到目前为止,全面介绍SAR数字处理的书籍却并不多见,对该领域的了解还主要限于期刊、会议文集、内部报告以及专利,因此Cumming教授和Wong博士的这本书是非常独特的。

首先,本书是由遥感测量中首台SAR数字处理器(可能也是使用时间最长的)的开发者撰写的。其次,它对现有的SAR算法进行了总结,并利用相干信号处理术语予以表述。本书与传统雷达书籍的不同之处在于,它是从处理角度而非雷达载荷角度进行讨论的。由于本书主要针对的是斜视角和孔径都相对较小的星载SAR,因而一些源于常规雷达的概念(有时显得多余)能以一种更清晰的简化方式予以表达。经验表明,一种技术虽然已得到了充分发展,但距其真正使用还有一段距离。然而,对本书所涉及的条带模式和ScanSAR模式处理算法而言,其在应用上已十分成熟。同时,本人希望该书后续版本能将聚束模式也包括在内。

无疑,本书作者具有深厚的教学素养,且在知识的传授上毫无保留(Ian Cumming 是位教授, Frank Wong 是英属哥伦比亚大学的短期讲师)。我与两位作者相交多年,对他们以简单易懂的方式阐释复杂问题的能力一直很钦佩。本书对 SAR 处理过程的介绍简明扼要、逻辑清晰、层次分明并且结构完整,全书首先回顾相关的信号处理基础,随后分别对传统的距离多普勒算法,各种 Chirp Scaling 方法以及参数估计进行介绍。所有章节都提供了丰富的图表示例,随书附带的光盘提供了一组 SAR 数据,以利于读者对书中算法进行有益的实验。

我深信,大学教师、研究生以及工程师们,无论是初学者还是 SAR 处理专家,都将从本书中获益。就我个人而言,如果在刚进入 SAR 处理领域时能读到类似的书籍,一定会少走许多弯路。

Richard Bamler 主任
遥感技术研究所
德国宇航中心(DLR)
Oberpfaffenhofen
2004年12月

前 言

内容范围

本书记述了作者在遥感 SAR 数据处理方面的经验,其中大部分素材已发表于早先的技术文献中,但汇集成书尚属首次。

作者在 SAR 方面的工作始于 1977 年在 MacDonalD Dettwiler (MDA) 进行的 SEASAT 数字处理器设计,随后又相继开发了 SIR-B, ERS-1, ERS-2, RADARSAT-1 以及 ENVISAT 处理器,与此同时也构建了一些机载 SAR 处理器,包括最近完成的一个双频极化干涉系统,随着目前 RADARSAT-2 处理器的开发,相关工作一直延续至今。本书试图对过去 27 年中积累的知识进行总结。

最初的工作是基于相干光学 SAR 处理器的。通过借鉴数字声呐,很自然地会将数字信号处理原理用于 SAR 数据。虽然军方早已介入了这方面的工作,但我们对此一无所知,因而几乎是从零开始进行 SAR 处理器设计的。

我们的经验主要来自于“遥感”SAR,这类 SAR 得到的地表图像一般用于地图绘制、地质学、海洋学、林学以及农业等方面,其分辨率通常在数米至数十米,测绘带约为 2000 ~ 8000 个采样,地面覆盖可达 150 km (ScanSAR 下甚至更宽)。

星载和机载 SAR 在数据处理上存在较大差异,能够同时满足对两类数据进行有效处理的平台在构建上比较困难。鉴于星载数据较易公开获得,本书一般针对这种情况进行算法讨论,在保持本书大框架的前提下,将对部分机载数据的处理差异进行简单解释。

本书主要从 DSP 角度对 SAR 处理进行说明,除了有助于理解 SAR 回波数据特性外,本书一般不详细论述雷达系统原理。

预期读者

本书主要面向 SAR 数据处理以及算法开发人员,阐述了大多数有助于理解和设计高质量和/或高吞吐量 SAR 处理器的技术细节。对于那些不具有较强 DSP 背景的读者,本书也介绍了一些相关理论。

此外,本书也将加深图像解译专家对 SAR 数据特性的理解。

作为 DSP 原理的具体应用,SAR 数字处理器在涉及大量标准 DSP 算法的同时,也引入了一些新的概念。因而,本书也将对那些希望进一步了解 DSP 实际应用的高年级学生或研究生有所帮助。

笔误、错印及疏漏

在此,作者对本书中可能出现的错误深表歉意,并希望读者予以批评指正。

在技术资料的引用上,尽量选取关系最密切、最原始的参考文献,但在许多情况下使用的是最为熟知的文章,这意味着作者的某些论点可能是值得商榷的,在此衷心希望其他专家予以指正。

致 谢

在此,作者对与本书关系密切的四批人员表示诚挚谢意。首先,作者要感谢多年来一起工作的许多同事,其中包括富于远见的公司创建人 John MacDonald 先生,正是由于他给予我们的巨大支持和充分信任,才使作者在许多人认为不可能的情况下,于 1977 年建立了第一部商用数字 SAR 处理器。同时,作者还要感谢本教研组前十年的组长 John Bennett 先生,其对问题的深刻洞察能力是我们所望尘莫及的。本组最初的成员还包括 Robert Deane, Robert Orth, Pietro Widmer 和 Pete McConnell, 他们与作者共同进行了 SAR 数据处理方面的探索。

随着 SAR 处理器市场的不断扩大,许多新成员加入了 MDA 团队,大多数人目前仍在其 SAR 教研组中工作,其中部分人员对 SAR 处理技术做出了重要贡献,包括 David Stevens, Gordon Davidson, Martie Goulding, Paul Lim 和 Tim Scheuer。

作者的大部分工作得到了加拿大和欧洲政府机构的资助(尤其是加拿大遥感中心、加拿大航天局和欧洲航天局),我们也一直与用户保持着技术上的密切联系,在此要特别感谢以下人员与作者进行的富有成效的合作,包括加拿大诸机构的 Keith Raney, Laurence Gray, Paris Vachon 和 Bob Hawkins 以及欧洲航天局的 Rudolph Okkes, Jean-Claude DeGavre 和 Yves Desnos。

在此还要提到另外两个较有影响的机构,虽然我们之间只是偶尔打交道,但许多算法却是同时提出的,并且都获益于对方的工作。其中包括美国喷气推进实验室(JPL)的 Charlie Wu, Michael Jin, Dan Held, Paul Rosen 和 Richard Garande, 他们开发了与本书相关的一些技术。同时,还包括德国宇航中心(DLR)的 Richard Bamler, Hartmut Runge, Michael Eineder, Alberto Moreira, Rolf Scheiber 和 Josef Mittermeier, 他们长期从事 SAR 处理算法的设计工作。这里,作者要特别感谢为本书作序的 Richard Bamler。以上人员的名字将在本书所引用的算法文献中不断出现。

作者还要对为本书提供素材的人员表示感谢。其中,MDA 的 Kjell Magnussen 对地球/卫星几何模型的定义提供了帮助; Politecnico di Milano 的 Fabio Rocca 教授给出了一些有关 ω KA 的深入理解;那不勒斯市 IREA-CNR 的 Riccard Lanari 博士提供了一种有关改进 SPECAN 算法的解释, JPL 的 Paul Rosen 提供了一幅 SRTM 图像; CCRS 的 Bob Hawkins 提供了两幅 Convair-580 机载 SAR 图像, Gordon Staples 提供了大量 RADARSAT 图像及含有原始数据的光盘;英属哥伦比亚大学雷达遥感研究组的许多研究生,包括 Shu Li, Millie Sikdar, Kaan Ersahin 和 Yewlam Neo, 阅读了本书的各个章节,并且进行了 RADARSAT 数据读取以及第 12 章和第 13 章的部分多普勒参数估计图的程序编写。

作者应感谢在本书不同撰写阶段参与审稿的人员。在撰写本书第一部分时, Ian Cumming 正在 DLR 度年假,许多人员对这一阶段的审稿提供了帮助。DLR 的 Juergen Holzner 对本书终稿进行了细致的审校。本书前两章写成后, Frank Wong 去新加坡国立大学的电子工程系进行讲学,其间许多人参与了审阅,他们当中包括英属哥伦比亚大学的 Bernd Scheuchl 和 Yewlam Neo, Calgary 大学的 Dave Alton 以及 MDA 的 Martie Goulding, Paul Lim 和 Norm Goldstein。

关于编辑制作，本书的文稿编辑 Eunice Ludlow 在文字表述方面花费了大量时间，以确保半专业人员能够理解本书的大部分内容，她对全文进行了细致的标点加注，以避免出现超过三行的语句。同样感谢 Rebecca Allendorf 以及 Artech House 的所有编辑人员，感谢他们在保持手稿风格方面付出的辛劳。

最后，作者感谢家人在我们紧张无序的工作中所给予的耐心支持。

一幅机载 SAR 图像

在进入正文之前，先提供一幅 SAR 图像以飨读者，该图由搭载在 Convair-580 上的加拿大遥感中心 C 波段极化机载雷达得到，数据获取时间为 2004 年 9 月 30 日，成像区为哥伦比亚威斯特汉（Westham）岛上的测试场。

图 A.1 给出的是四个极化通道的合成图像。图像中心位于北纬 49.2° ，西经 123.1° ，测绘带为 10 km，该图由实时处理器经七视处理得到，图像经过了常规辐射校正。

由 MacDonalD Dettwiler 搭建的第一个实时数字 SAR 处理器于 1979 年交付 CCRS，并安装在 Convair-580 上。本图由 1986 年更新的第二代实时处理器得到。



图 A.1 Convair-580 实时处理出的哥伦比亚三角洲市兰德纳地区图像（由 CCRS 的 Bob Hawkins 提供）

目 录

第一部分 合成孔径雷达基础

第 1 章 概论	2
1.1 合成孔径雷达背景简介	2
1.2 遥感中的雷达	3
1.3 SAR 基础	3
1.4 星载合成孔径雷达传感器	7
1.5 内容概要	9
1.5.1 星载合成孔径雷达图像示例	10
参考文献	11
第 2 章 信号处理基础	14
2.1 简介	14
2.2 线性卷积	14
2.2.1 连续时间卷积	14
2.2.2 离散时间卷积	16
2.3 傅里叶变换	18
2.3.1 连续时间傅里叶变换	18
2.3.2 离散傅里叶变换	18
2.3.3 傅里叶变换性质	19
2.3.4 傅里叶变换示例	22
2.4 卷积的 DFT 计算	24
2.5 信号采样	25
2.5.1 采样信号的频谱	25
2.5.2 信号类型	26
2.5.3 奈奎斯特采样率和混叠	28
2.6 平滑窗	32
2.7 插值	33
2.7.1 sinc 插值	34
2.7.2 插值核的频谱	37
2.7.3 非基带和复插值	38
2.8 点目标分析	38
2.9 小结	42
2.9.1 金星坑的麦哲伦图像	42
参考文献	43

第3章 线性调频信号的脉冲压缩	45
3.1 概述	45
3.2 线性调频信号	45
3.2.1 时域表达	45
3.2.2 线性调频脉冲的频谱	47
3.2.3 调频信号采样	49
3.2.4 频率和时间不连续性	51
3.3 脉冲压缩	52
3.3.1 脉冲压缩原理	52
3.3.2 线性调频信号的时域压缩	53
3.3.3 频域匹配滤波器	57
3.3.4 窗效应	58
3.3.5 过采样率重定义	60
3.4 匹配滤波器的实现	60
3.4.1 目标定位和匹配滤波器弃置区	63
3.5 调频率失配	64
3.5.1 基带信号中的失配影响	64
3.5.2 非基带信号中的失配影响	66
3.5.3 滤波器失配和时间带宽积	67
3.6 小结	67
3.6.1 ENVISAT/ASAR 宽带图像	68
参考文献	69
附录3A 匹配滤波输出的推导	71
附录3B 相位失配误差推导	74
第4章 合成孔径的概念	75
4.1 概述	75
4.2 SAR 几何关系	76
4.2.1 术语定义	76
4.2.2 卫星地距几何	79
4.2.3 卫星轨道几何	81
4.3 距离等式	82
4.3.1 距离等式的双曲线模型	83
4.3.2 速度与角度的关系	84
4.4 SAR 距离向信号	86
4.4.1 发射脉冲	86
4.4.2 数据获取	87
4.5 SAR 方位向信号	88
4.5.1 什么是 SAR 中的多普勒频率	88
4.5.2 相干脉冲	89

4.5.3	PRF 的选择	90
4.5.4	方位向信号强度和 Doppler 历程	90
4.5.5	方位向参数	92
4.6	二维信号	93
4.6.1	信号存储器中的数据排列	94
4.6.2	解调后的基带信号	96
4.6.3	SAR 冲激响应	97
4.6.4	典型雷达参数值	97
4.7	SAR 分辨率与合成孔径	98
4.7.1	分辨率的带宽推导	98
4.7.2	合成孔径	100
4.8	小结	101
4.8.1	温哥华岛的窄幅 ScanSAR 图像	103
	参考文献	104
	附录 4A 近似雷达速度的推导	105
	附录 4B 正交解调	107
	附录 4C 合成孔径的概念	111
第 5 章	SAR 信号的性质	115
5.1	简介	115
5.2	低斜视角下的信号频谱	115
5.2.1	距离多普勒域频谱	116
5.2.2	二维频谱	117
5.3	一般情况下的信号频谱	117
5.3.1	距离向傅里叶变换	118
5.3.2	方位向傅里叶变换	119
5.3.3	距离向傅里叶逆变换	121
5.4	方位混叠与多普勒中心	124
5.4.1	方位混叠和模糊的起因	124
5.4.2	多普勒中心	126
5.4.3	多普勒模糊	128
5.4.4	距离向的多普勒中心变化	129
5.5	距离单元徙动	132
5.5.1	RCM 的分量	133
5.5.2	同一距离处的多个目标	134
5.5.3	目标轨迹卷绕	135
5.6	点目标示例	136
5.6.1	仿真参数	136
5.7	SAR 处理算法初窥	140
5.7.1	时域匹配滤波	140

5.7.2 机载实时处理图像	141
5.7.3 非聚焦 SAR	142
5.7.4 更好的处理算法	143
5.8 小结	144
参考文献	145
附录 5A 距离向 / 方位向的耦合	147
附录 5B 方位调频率注释	150

第二部分 SAR 处理算法

第 6 章 距离多普勒算法	154
6.1 简介	154
6.2 算法概述	154
6.3 低斜视角下的 RDA	156
6.3.1 雷达原始数据	156
6.3.2 距离压缩	157
6.3.3 方位向傅里叶变换	159
6.3.4 距离徙动校正	160
6.3.5 残余 RCM 导致的展宽	164
6.3.6 方位压缩	166
6.3.7 低斜视下的 RADARSAT-1 图像	169
6.4 大斜视角情况	170
6.4.1 斜视的处理改进	170
6.4.2 SRC 的实现	172
6.4.3 星载和机载中的 SRC 方式	174
6.4.4 SRC 仿真试验	175
6.4.5 机载 L 波段雷达图像示例	179
6.5 多视处理	179
6.5.1 子视时频关系	180
6.5.2 子视抽取、检测及求和	181
6.5.3 等效视数	183
6.5.4 多视处理示例	183
6.5.5 调频率误差	187
6.5.6 多视处理图像	188
6.6 小结	189
参考文献	190
第 7 章 Chirp Scaling 算法	192
7.1 介绍	192
7.1.1 Chirp Scaling 算法概览	192
7.2 Chirp Scaling 原理	194

7.3	RCMC 中的 Chirp Scaling	200
7.3.1	一致 RCMC 和补余 RCMC	200
7.3.2	RCM 的精确表达	202
7.4	变标方程推导	203
7.4.1	补余 RCM 量级示例	205
7.5	CSA 处理细节	206
7.5.1	距离处理	206
7.5.2	方位处理	209
7.6	处理示例	210
7.6.1	点目标仿真处理	210
7.6.2	SRTM/X-SAR 数据处理	213
7.7	小结	215
	参考文献	215
第 8 章	ωK 算法	219
8.1	简介	219
8.1.1	ω KA 概述	219
8.2	参考函数相乘	221
8.3	Stolt 插值	223
8.3.1	变量代换	223
8.4	对 Stolt 映射的理解	226
8.4.1	Stolt 映射的组成部分	226
8.4.2	基于傅里叶变换性质的理解	227
8.4.3	基于支持域的理解	230
8.4.4	基于成像几何关系的理解	231
8.5	误差分析	232
8.6	近似 ω KA	233
8.6.1	近似项	234
8.6.2	与 RDA 和 CSA 的关系	235
8.6.3	近似 ω KA 的误差讨论	235
8.7	处理示例	236
8.7.1	完整 ω KA 仿真	236
8.7.2	近似 ω KA	240
8.7.3	X 波段机载聚束雷达图像示例	241
8.8	小结	241
	参考文献	243
	附录 8A 波数域的 Stolt 映射	245
第 9 章	SPECAN 算法	249
9.1	简介	249

9.1.1	SPECAN 算法概述	249
9.2	SPECAN 算法的推导	250
9.2.1	SPECAN 的卷积推导	251
9.2.2	几何解释	251
9.2.3	混叠与 FFT 长度	254
9.2.4	输出采样间隔	255
9.2.5	FFT 有效输出点数	256
9.2.6	后续 FFT 位置	258
9.2.7	FFT 输出结果的拼接	259
9.3	多视处理	260
9.4	处理效率	262
9.5	距离徙动校正	265
9.5.1	时域线性 RCMC	265
9.5.2	数据倾斜与校直	265
9.6	相位补偿	266
9.7	关于图像质量的一些问题	269
9.7.1	拼接点处的频率间断	269
9.7.2	方位调频率误差	271
9.7.3	扇贝辐射效应	273
9.8	处理示例	279
9.8.1	仿真点目标	279
9.8.2	SPECAN 算法处理出的 ERS 图像	281
9.9	小结	282
	参考文献	283
第 10 章	ScanSAR 数据处理	285
10.1	简介	285
10.2	ScanSAR 数据获取	286
10.3	单一 Burst 中的目标压缩	289
10.4	全孔径处理算法	291
10.5	SPECAN 算法	292
10.6	改进 SPECAN 算法	293
10.6.1	算法概述	293
10.6.2	SRTM 处理示例	296
10.7	SIFFT 算法	297
10.8	ECS 算法	299
10.9	Burst 图像拼接	301
10.10	小结	303
10.10.1	RADARSAT-1 的 ScanSAR 图像	304
	参考文献	304

第 11 章	算法比较	308
11.1	简介	308
11.2	算法精度回顾	308
11.2.1	RDA	308
11.2.2	CSA	308
11.2.3	ω KA	308
11.3	处理功能对比	309
11.3.1	距离等式形式	310
11.3.2	方位匹配滤波器的实现	310
11.3.3	RCMC 的实现	310
11.3.4	SRC 实现	311
11.4	处理误差概述	311
11.4.1	方位匹配滤波器中的 QPE	311
11.4.2	SRC 中的 QPE	312
11.4.3	残余 RCM	312
11.4.4	处理误差量级示例	313
11.5	计算开销	315
11.5.1	基本算法运算	315
11.5.2	RDA	316
11.5.3	CSA	317
11.5.4	ω KA	317
11.6	算法利弊	318
11.6.1	RDA 利弊	318
11.6.2	CSA 利弊	318
11.6.3	ω KA 利弊	319
11.7	小结	319
11.7.1	墨西哥海峡的 ASAR 图像	320

第三部分 多普勒参数估计

第 12 章	多普勒中心估计	322
12.1	简介	322
12.1.1	多普勒中心频率	322
12.1.2	星载 SAR 几何	322
12.1.3	本章概述	324
12.2	多普勒中心精度要求	326
12.2.1	基带中心的精度要求	326
12.2.2	多普勒模糊的精度要求	331
12.3	多普勒中心的几何计算	331
12.3.1	多普勒中心计算示例	334
12.3.2	偏航角和俯仰角控制	335

12.4	基于接收数据的基带中心估计	335
12.4.1	基于幅度的估计方法	336
12.4.2	基于相位的估计方法	339
12.5	基于接收数据的多普勒模糊估计	343
12.5.1	基于幅度的 DAR 估计方法	343
12.5.2	基于相位的 DAR 估计方法	346
12.5.3	多波长算法	348
12.5.4	多视互相关法	351
12.5.5	多视差频法	355
12.5.6	PRF 变调法	358
12.5.7	DAR 算法比较	358
12.6	全局估计原理	360
12.6.1	空间变化检测	360
12.6.2	估计器质量检测	361
12.7	曲面拟合法	363
12.7.1	全局多项式曲面拟合	363
12.7.2	基于几何模型的全局拟合	364
12.7.3	自动拟合过程	365
12.8	小结	367
	参考文献	367
	附录 12A 多普勒计算详细步骤	370
	附录 12B DAR 算法中的偏移频率	376
第 13 章	方位调频率估计	380
13.1	简介	380
13.2	方位调频率精度要求	380
13.3	方位调频率的几何计算模型	382
13.4	方位线性调频率的数据估计	385
13.4.1	最大对比度法	385
13.4.2	视错位法	386
13.4.3	基于相位的自聚焦方法	390
13.5	小结	391
13.5.1	一部小型 SAR 系统——MiSAR	391
	参考文献	392
附录 A	RADARSAT 数据光盘	393
	缩略语对照表	395
	符号表	398
	参考书目	401
	索引	415