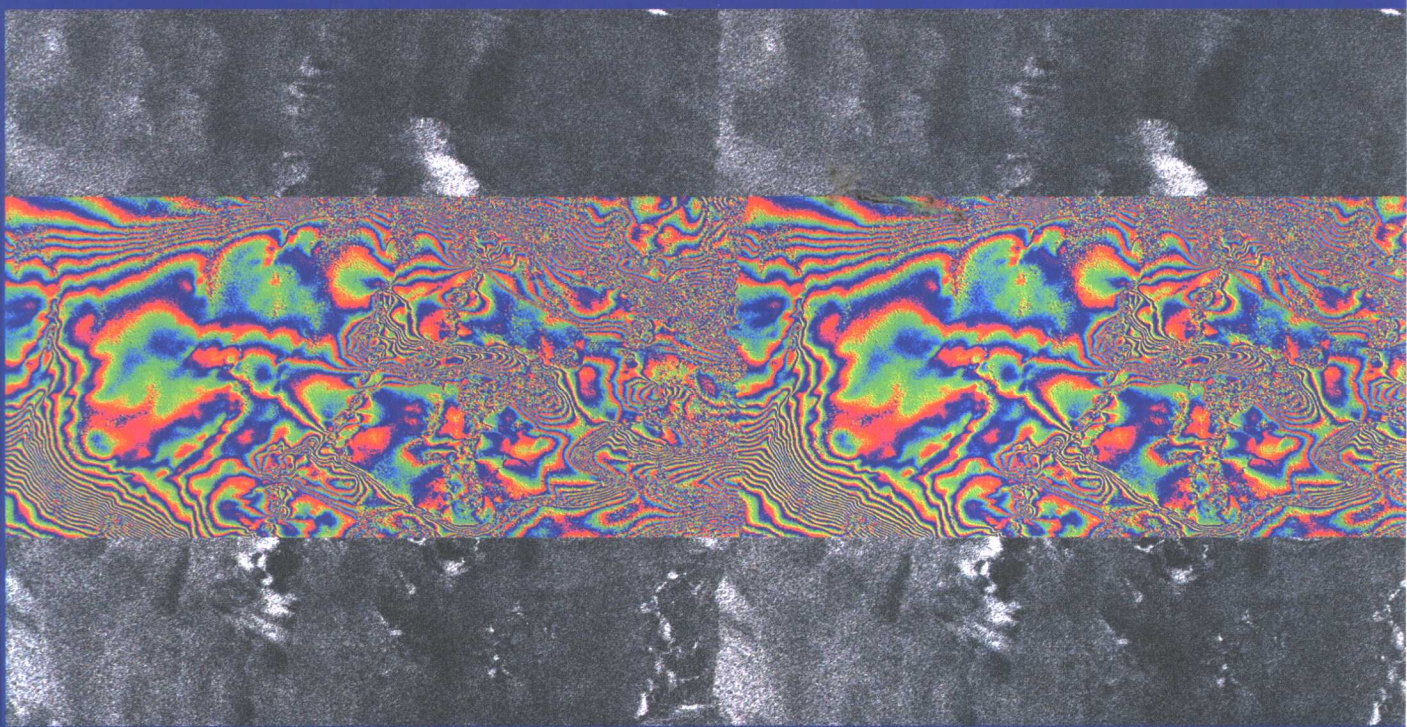


星载合成孔径雷达 干涉测量

王超 张红 刘智 著



6375



科学出版社

www.sciencep.com

星载合成孔径雷达 干涉测量

王 超 张 红 刘 智 著

科 学 出 版 社

2002

内 容 简 介

本书是作者在长期从事合成孔径雷达(SAR)干涉测量(InSAR)研究工作的基础上编写而成。它全面系统地阐述了合成孔径雷达干涉测量的基本理论、处理方法、系统实现及在地学领域的应用。全书共分七章,主要内容为:合成孔径雷达干涉测量概述;合成孔径雷达干涉测量原理;星载 InSAR 算法分析;相位解缠;SAR 极化干涉测量;InSAR 应用;未来 SAR 干涉测量发展。

本书内容新颖、实用,可供从事遥感、测绘、地质、地球物理、地震、林业、其他对地观测技术与应用学科领域的研究人员,大专院校相关专业高年级学生、研究生和教师使用。

图书在版编目(CIP)数据

星载合成孔径雷达干涉测量/王超,张红,刘智著. —北京:科学出版社,2002

ISBN 7-03-010314-9

I. 星… II. ①王…②张…③刘… III. 合成孔径雷达-干涉测量法
IV. TN958

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 018831 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2002年9月第一版 开本:787×1092 1/16

2002年9月第一次印刷 印张:15 1/2 插页:6

印数:1—2 000 字数:348 000

定价:50.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

序

北京现在正是初春时节，虽然没有“草长莺飞”，也是一派春意盎然。喜闻中国科学院遥感应用研究所王超研究员和他的小组的新著即将出版，受邀欣然作序。

我国的雷达遥感研究从国家“六五”计划以来，一直得到国家的支持，经过几代科学家的不断努力，无论是雷达系统研制还是应用研究都有了长足的进步。国家“十五”期间将在高技术研究发展计划中继续支持雷达遥感等高新技术，加强技术集成，促进应用，解决国家中长期发展和国家安全的战略性、前沿性和前瞻性问题，实现跨越式发展。2002年3月，携带多极化 SAR 的欧洲 ENVISAT 卫星顺利升空，预示着国际雷达遥感新高潮又将到来。随着我国加入世界贸易组织，我国将在更大范围和更深层次上参与经济全球化进程，对外开放将进入新的阶段，国际竞争日趋激烈。这些既为我国科学家们提供了新的机遇，也带来了新的挑战。

王超研究员从 1989 年开始就一直从事雷达遥感研究，作为一名年轻的科技工作者，十几年如一日潜心钻研雷达遥感的方法与应用。1995 年，他刚从意大利回国，又瞄准了雷达遥感的前沿领域——合成孔径雷达干涉测量 (InSAR)。当时国际该领域的研究刚刚兴起，我国则几乎还没人涉足该领域。王超同志给我写了一封信，希望得到支持，经我推荐，他获得了中国科学院院长基金、国家自然科学基金委员会主任基金，开始了雷达干涉测量领域的探索。此后，他先后申请主持了国家“863”计划信息获取与处理主题项目、国家自然科学基金、中国科学院知识创新工程重大方向项目等项目，并参加了国家自然科学基金重大项目、国家重点基础研究发展规划项目，不断深入探索，积累知识。作为项目合作专家，他参加了美国航天飞机 SIR-C/X-SAR 计划中国项目、日本 JERS-1 SAR 项目系统验证计划、欧洲空间局 ERS 计划、加拿大 GLOBESAR 计划、欧洲空间局 ENVISAT 项目、航天飞机

雷达测图任务 (X-SAR/SRTM) 等国际重大雷达遥感计划, 广泛的国际合作保证了他的研究工作始终与国际前沿研究保持一致。

目前国际上合成孔径雷达干涉测量研究正逐步走向成熟, 但我国尚无专门的著作, 这不能不说是一个缺憾。王超研究员将其近些年的研究成果整理出来让大家共享, 为其他从事这方面工作的同志们提供参考, 是一件很好的事情。

科学研究, 正是“不积跬步无以至千里”之事, 我国的科学大厦需要千千万万个甘于寂寞的科学家添砖加瓦。希望有更多的优秀青年科学家把自己的最新成果绘于众, 也可能曲高和寡, 但和者乃同道之人, 足矣!

王超

2002年3月

前 言

合成孔径雷达(SAR)最早发展于 20 世纪 50 年代初,作为有源系统,SAR 具有全天候、全天时工作能力,可在不同的微波频段、不同极化状态下得到地面目标的高分辨率图像,为人们提供各种有用的信息。SAR 首先在军事应用方面显示其卓越的优势,随着遥感技术的蓬勃发展,它很快成为微波遥感的重要工具,广泛地应用于国民经济的各个领域,如地形测绘、地质研究、防灾减灾、农林及海洋研究等诸多方面。

20 世纪 60 年代末,合成孔径雷达干涉测量技术(InSAR)发展起来,它是利用合成孔径雷达的相位信息提取地表的三维信息和高程变化信息的一项技术。合成孔径雷达干涉测量技术的出现大大地扩展了 SAR 的应用领域,它能够获取高精度的地形信息,同时还可以监测地球陆地表面和冰雪表面的微小变化,监测的时间间隔从几天到几年,可获得全球高精度的(毫米级)、高可靠性的(全天时、全天候)地表变化信息。这种从空中直接测量的技术是一种全新的研究地球表面的方法,在地球科学领域引起了极大的反响。更令人瞩目的是,这项技术可用于研究过去长时间无法到达的冰川和冰缘的变化情况,也可用于一些灾害性地表形变的探测,如地震、火山爆发、滑坡和大洪水等,因而越来越受到各国的重视,成为遥感研究的热点。

早期的 InSAR 研究主要利用机载系统,其应用有较大的局限性。进入 20 世纪 90 年代,一系列的星载系统 ERS-1/2、JERS-1、RADARSAT-1 先后发射成功,为全球提供了丰富的适合进行干涉处理的星载 SAR 数据,InSAR 研究逐步从纯理论研究阶段跨入实用研究的阶段。90 年代后期,InSAR 的应用研究领域不断得到扩展,从科学应用领域逐步延伸到商业应用领域;星载 SAR 数据得到充分的利用。此外还进行了大量的高分辨率机载 InSAR 的研究,聚束、宽频段、多极化、多星系统等多模式的 InSAR 研究也在如火如荼地进行。2000 年 2 月 11 日美国国家航空航天局(NASA)和国家影像与测绘局(NIMA)联合进行了航天飞机雷达地形测绘任务(SRTM),基于 InSAR 技术首次实现真正意义上的全球地形三维测绘。下一代新型 SAR 系统,ENVISAT(已于 2002 年 3 月发射成功)、RADARSAT-2、ALOS 等都充分地考虑了 InSAR 的应用,随着新型 SAR 数据的加入和研究的不断深入,对 InSAR 研究又提出了新的课题,但同时也意味着新的应用前景。我国目前也在开展 InSAR 的系统研究和应用研究,也有多项 InSAR 系统处在计划和实施阶段,因此有必要深入了解这项技术的基本理论、系统实现及应用,才有助于开展我国的相关研究工作,缩短与国际前沿研究之间的差距。

本书系统而全面地阐述了 InSAR 的基本理论、数据处理技术、系统实现及应用。全书共分为七章。第一章为绪论,首先以时间为序介绍了 SAR 的发展,然后介绍 InSAR 的发展以及现有的可用于 SAR 干涉测量的机载系统和星载系统,并对 InSAR 的应用做了总结。第二章首先从 InSAR 的成像几何原理入手,接着分析 InSAR 系统模型、相位特征和误差来源,最后深入分析差分干涉测量(D-InSAR)的基本原理和大气效应影响。第三章结合作者多年实际处理 InSAR 数据的经验,详细地介绍 InSAR 的数据处理的步骤和

具体算法,包括应用于地形测绘的 InSAR 算法和应用用于地表形变探测的差分干涉测量算法,并给出了相应的应用实例。第四章专门针对 InSAR 数据处理中的关键步骤——相位解缠的原理、算法进行详细的分析,从路径跟踪和最小范数两大相位解缠方向分析和比较各类算法的优缺点,并对近年来发展的新算法——基于网络规划的相位解缠算法进行详细的分析。每种算法作者都给出实际处理的结果和处理速度的分析,有利于读者进行有效地选择使用。第五章介绍 SAR 干涉技术与极化技术的结合——SAR 极化干涉测量 (POLInSAR)。首先介绍传统的 SAR 干涉测量与矢量干涉测量之间的异同,以及如何实现干涉相干的最优化处理,并对矢量差分干涉测量做了一定的分析。第六章结合作者多年的研究成果,较系统地阐述 InSAR 在各个领域中的应用研究,着重介绍 InSAR 的地表形变方面的应用。作者利用翔实的影像资料和研究成果分析 InSAR 应用的优势与局限性。第七章通过对未来 SAR 系统的介绍,分析和预测未来 InSAR 的发展趋势及应用前景。在两个附录中,分别介绍了基线的表示方法以及主要的 InSAR 处理软件。

各章的作者分别是,第一章:王超、张红;第二章:张红、王超;第三章:张红、王超;第四章:王超、张红、刘智、于勇;第五章:王超、张红;第六章:张红、王超、刘智、汤益先;第七章:张红。附录由张红、汤益先完成。

本书是作者针对国际 InSAR 领域的前沿发展,较系统地总结了几年来工作。徐冠华院士对作者从事该领域的研究给予了热情的鼓励和支持。研究过程中,作者得到了中国科学院遥感应用研究所陈述彭院士、童庆禧院士、郭华东研究员的热心指导和帮助;InSAR 地震研究工作得到了国家重点基础发展规划项目“大陆强震机理与预测研究”专家组叶叔华院士、马瑾院士、马宗晋院士、李延兴研究员等专家的指导;SAR 系统原理得到了中国科学院电子所舒士畏研究员、吴一戎研究员等的指导。中国科学院资源环境科学与技术局张琦娟女士、田二垒先生、冯仁国先生,国家自然科学基金委员会林海先生、吕克解女士、宋长青先生,国家“863”计划信息获取与处理主题专家组专家、中国科学院遥感所许多专家及国际合作项目的外国同行给予了支持,项目组的其他同仁参与了部分工作。

感谢北京师范大学资源与环境学院李小文院士、朱启疆教授、王锦地教授给予的帮助,感谢解放军信息工程大学和郑州测绘大学的张永生教授、潘时祥教授对研究工作的支持。

本书的研究工作和出版得到中国科学院知识创新工程(KZCX2-309)“微波遥感信息特征及目标特性研究”、国家“863”计划信息获取与处理主题(863-308-14-01(7))“差分干涉雷达的城市变化监测研究”、国家自然科学基金(JJ980602)“干涉雷达数据的相关分析及在作物分类中的应用”、国家自然科学基金(49781001)“SRTM 干涉测量的植被效应与散射机理分析”、国家重点基础发展规划项目(G1998040703)“大陆强震机理与预测”子课题(95-13-03-03)“星载 InSAR 技术测量垂直形变场的研究”和中国科学院院长基金的资助。

本书所采用的 ERS-1/ERS-2 SAR 数据由欧洲空间局(ESA)欧洲遥感卫星研究计划(ERSA03-374)提供,SIR-C/X-SAR 数据由美国 JPL 提供。在此表示衷心地感谢。

由于作者水平和写作时间所限,书中难免存在错误及不当之处,敬请读者不吝指教。

缩 语 表

- ALOS: Advanced Land Observing Satellite, 先进陆地观测卫星
- APS: Atmospheric Phase Screen, 大气相位变化
- ASI: Agenzia Spaziale Italiana (Italian Space Agency), 意大利空间局
- ATI: Along Track Interferometry, SAR 顺轨干涉测量
- CCRS: Canada Center for Remote Sensing, 加拿大遥感中心
- CNES: Centre National d'Etudes Spatiales, 法国全国空间研究中心
- CSA: Canadian Space Agency, 加拿大空间局
- DARPA: Defense Advanced Research Projects Agency, 美国防御先进研究计划署
- DPCA: Displaced Phase Centre Antenna, 置换相位中心天线
- DCRS: Danish Center for Remote Sensing, 丹麦遥感中心
- DCT: Discrete Cosine Transform, 离散余弦变换
- DEM: Digital Elevation Model, 数字高程模型
- D-InSAR: Differential SAR Interferometry, SAR 差分干涉测量
- DLR: Deutsche Forschungsanstalt fuer Luft-und Raumfahrt e. V. (German Aerospace Center), 德国空间局
- DTU: Technical University of Denmark, 丹麦技术大学
- ERIM: Environmental Research Institute of Michigan, 美国密歇根环境研究所
- ERS: European Remote Sensing Satellite, 欧洲遥感卫星
- ESA: European Space Agency, 欧洲空间局
- FEM: Finite Element Method, 有限元方法
- FFT: Fast Fourier Transform, 快速傅里叶变换
- GPS: Global Positioning System, 全球定位系统
- IF: Instantaneous Frequency, 瞬时频率
- InSAR: Interferometric Synthetic Aperture Radar, 合成孔径雷达干涉测量
- ITC: International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, 新西兰国际航空测量与地球科学研究所
- JERS: Japanese Earth-Resources Satellite, 日本地球资源卫星
- JPL: Jet Propulsion Laboratory, 美国国家航空航天局喷气推进实验室
- GMTI: Ground Moving Target Identification, 地面动目标识别
- LOS: Line Of Sight, 视线方向
- LS: Least Squares, 最小二乘
- MLE: Maximum Likelihood Estimate, 最大似然估算
- MR: Magnetic Resonance, 核磁共振
- MST: Minimum Span Tree, 最小生成树

NASA: National Aeronautics and Space Administration, 美国国家航空航天局
NASDA: National Aeronautics and Space Development Agency(Japan) , 日本国家航空航天发展署
NIMA: National Imagery and Mapping Agency, 美国国家影像与测绘局
NPF: Non Path – Following, 非路径跟踪
PCG: Preconditioned Conjugate Gradient, 预解共轭梯度
PDE: Partial Differential Equation, 偏微分方程
PDF: Probability Density Function, 概率密度函数
PF: Path Following, 路径跟踪
POLinSAR: Polarimetric SAR interferometry, SAR 极化干涉测量
PRF: Pulse Repetition Frequency, 脉冲重复频率
PS: Permanent Scatter, 永久散射体
RMS: Root Mean Square, 均方根
RTI: Repeat Track Interferometry, SAR 重复轨道干涉测量
SAR: Synthetic Aperture Radar, 合成孔径雷达
SIR: Shuttle Imaging Radar, 航天飞机成像雷达
SLC: Single Look Complex, 单视复影像
SNR: Signal Noise Ratio, 信噪比
SRTM: Shuttle Radar Topography Mission, 航天飞机雷达地形测绘任务
USGS: United States Geological Survey, 美国地质调查局
VLBI: Very Long Baseline Interferometry, 甚长基线干涉测量
X – SAR: X – band Synthetic Aperture Radar, X 波段合成孔径雷达
XTI: Cross Track Interferometry, SAR 交轨干涉测量

目 录

序
前 言
缩语表

1 绪论	(1)
1.1 合成孔径雷达的发展概况.....	(2)
1.2 合成孔径雷达干涉测量概述.....	(14)
参考文献	(24)
2 合成孔径雷达干涉测量原理	(32)
2.1 SAR 干涉测量基本原理	(33)
2.2 SAR 干涉测量系统模型	(37)
2.3 干涉相干.....	(42)
2.4 干涉相位的统计特征.....	(50)
2.5 InSAR 提取的 DEM 精度分析	(57)
2.6 SAR 差分干涉测量基本原理	(59)
2.7 大气效应对 SAR 干涉测量和 SAR 差分干涉测量的影响	(63)
参考文献	(65)
3 星载 SAR 干涉测量算法分析	(67)
3.1 星载 InSAR 获取地形信息算法概述	(68)
3.2 干涉图像对的预滤波.....	(71)
3.3 干涉复图像对的配准.....	(72)
3.4 SAR 干涉测量中的插值方法	(76)
3.5 相位数据质量评价.....	(78)
3.6 平地效应消除.....	(79)
3.7 干涉基线的估算.....	(81)
3.8 数字高程模型重建.....	(84)
3.9 差分干涉测量获取地表形变信息算法概述.....	(86)
3.10 永久散射体(Permanent Scatters)技术.....	(88)
3.11 SAR 差分干涉处理系统	(95)
参考文献	(98)
4 相位解缠	(99)
4.1 概述.....	(100)
4.2 一维相位解缠.....	(103)
4.3 二维相位场的一致性与不一致性.....	(105)
4.4 路径跟踪的相位解缠算法.....	(107)

4.5	最小范数法	(117)
4.6	基于网络规划的相位解缠算法	(138)
4.7	比较与结论	(145)
	参考文献	(147)
5	SAR 极化干涉测量	(151)
5.1	概述	(152)
5.2	矢量干涉测量	(153)
5.3	极化基(basis)转换	(155)
5.4	干涉相干最优化	(158)
5.5	最优算法的奇异值(SVD)解释	(160)
5.6	相干散射分解	(161)
5.7	矢量差分干涉测量	(163)
5.8	小结	(164)
	参考文献	(165)
6	SAR 干涉测量的应用	(167)
6.1	InSAR 应用概述	(168)
6.2	地形制图	(180)
6.3	地震形变探测	(187)
6.4	地面沉降监测	(198)
	参考文献	(206)
7	未来的 SAR 干涉测量	(215)
7.1	概述	(216)
7.2	InSAR 系统的发展	(217)
7.3	InSAR 的应用发展	(228)
	参考文献	(230)
附录		(232)
图版		

CONTENTS

Foreword

Preface

Abbreviations

1 Introduction	(1)
1.1 Overview of SAR	(2)
1.2 Overview of SAR interferometry	(14)
References	(24)
2 Principles of SAR Interferometry	(32)
2.1 Basic principles of SAR interferometry	(33)
2.2 Model of InSAR system	(37)
2.3 Interferometric coherence	(42)
2.4 Phase statistics of interferogram	(50)
2.5 Accuracy analysis of DEM derived from InSAR	(57)
2.6 Basic principles of differential SAR interferometry	(59)
2.7 Atmospheric effects in InSAR and D-InSAR	(63)
References	(65)
3 Spaceborne InSAR Algorithm	(67)
3.1 Overview	(68)
3.2 Prefilter of SAR interferometric images	(71)
3.3 Image registration techniques	(72)
3.4 Interpolation methods for SAR interferometry	(76)
3.5 Evaluation of interferometric phase	(78)
3.6 Flat-earth removal	(79)
3.7 Baseline evaluation	(81)
3.8 DEM reconstruction	(84)
3.9 Overview of D-InSAR algorithms	(86)
3.10 Permanent scatters techniques	(88)
3.11 D-InSAR processing system	(95)
References	(98)
4 Phase Unwrapping	(99)
4.1 Introduction	(100)
4.2 One-dimension phase unwrapping	(103)
4.3 The consistency and non-consistency of two-dimension phase unwrapping	(105)
4.4 Path-following methods	(107)
4.5 Minimum-norm methods	(117)

4.6	Network programming method	(138)
4.7	Comparison and conclusions	(145)
	References	(147)
5	Polarimetric SAR Interferometry	(151)
5.1	Introduction	(152)
5.2	Vector SAR interferometry	(153)
5.3	Basis transformation	(155)
5.4	Optimum of interferometric coherence	(158)
5.5	SVD interpretation of optimum method	(160)
5.6	Coherent scattering decomposition	(161)
5.7	Vector differential SAR interferometry	(163)
5.8	Conclusions	(164)
	References	(165)
6	Applications of InSAR	(167)
6.1	Introduction	(168)
6.2	Topographic mapping	(180)
6.3	Earthquake deformation monitoring	(187)
6.4	Subsidence field detection	(198)
	References	(206)
7	Prospect of InSAR	(215)
7.1	Introduction	(216)
7.2	Future InSAR system	(217)
7.3	Future InSAR applications	(228)
	References	(230)
	Appendix	(232)
	Plates	

1

绪 论

Environmental monitoring, earth-resource mapping, and military systems require broad-area imaging at high resolutions. Many times the imagery must be acquired in inclement weather or during night as well as day. Synthetic Aperture Radar (SAR) provides such a capability. SAR systems take advantage of the long-range propagation characteristics of radar signals and the complex information processing capability of modern digital electronics to provide high resolution imagery. Synthetic aperture radar complements photographic and other optical imaging capabilities because of the minimum constraints on time-of-day and atmospheric conditions and because of the unique responses of terrain and cultural targets to radar frequencies.

—Sandia National Laboratories

雷达遥感经历了数十年的蓬勃发展,到了 20 世纪 90 年代,已成为空间对地观测技术的研究热点,在多个领域得到广泛的应用。本章首先回顾了合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar,简称 SAR)的发展历史,随后着重对合成孔径雷达干涉测量(Interferometric SAR,简称 InSAR)的原理、技术、发展及应用进行了全面的概括。

1.1 合成孔径雷达的发展概况

SAR 是 20 世纪 50 年代末研制成功的一种微波传感器,也是微波传感器中发展最为迅速和最有成效的传感器之一。作为一种主动式传感器,它能够不受光照和天气条件的限制实现全天时、全天候对地观测,还可以透过地表和植被获取地表下信息。这些特点使它在农业、林业、地质、环境、水文、海洋、灾害、测绘与军事领域的应用具有独到的优势,尤其是对传统的光学传感器成像困难的地区有着特别的意义。因为这种独到的优势,SAR 受到世界各国政府的高度重视与支持,在短短的 50 年间,从构思—实验室—机载—星载,其各个时期的发展都相当迅速,传感器、信号处理、应用技术等各个方面也在不断地发展与完善^[1~3]。



图 1-1 世界上第一幅数字处理的 SAR 图像
(图中所示为加拿大魁北克 Trois 河地区*)

1951:1951 年 6 月美国 Goodyear 宇航公司的 Carl Wiley 首先提出:可以利用频率分析方法改善雷达的角分辨率^[1]。与此同时伊利诺依大学控制系统实验室独立地用非相参雷达进行实验,证实频率分析方法的确能改善雷达的角分辨率。

1952:1952 年第一个实用化的 SAR 系统研制成功。

1953:安装在 DC-3 飞机上的 SAR 系统(频率为 930MHz)获取了第一幅 SAR 影像(图 1-1)。当时的信号存储介质采用磁带,信号处理器为商用的频率分析器。这是合成孔径原理和合成孔径雷达发展的最初阶段。

1957:1957 年 8 月美国密歇根大学雷达和光学实验室研制的 SAR 系统进行了飞行实验,得到了第一张全聚焦的 SAR 图像。从此,合成孔径原理和合成孔径雷达被人们所认识,并得到不断发展。图 1-2 是合成孔径雷达成像几何示意图。

20 世纪 60 年代:美国开展了大量的机载 SAR 实验。

20 世纪 70 年代:美国密歇根环境研究所(ERMI)和国家航空航天局喷气推进实验室(JPL)研制出 1.25GHz 和 9GHz 多极化合成孔径雷达,这样的多频率、多极化雷达成像系统对雷达遥感具有重大的贡献^[2],数字图像处理技术同时开始应用于雷达影像的分析与处理。

1972:1972 年 4 月,美国国家航空航天局(NASA)的喷气推进实验室(JPL)进行了机载 L 波段 SAR 的实验,获得了颇有希望的成果,引起了海洋学术界的关注,至此合成孔径雷达卫星被列入 NASA 海洋卫星计划。

1978:1978 年 6 月 27 日 JPL 发射了载有 SAR 的海洋卫星 SEASAT。SEASAT SAR

* <http://radarsat.mda.ca/background/index.shtml>

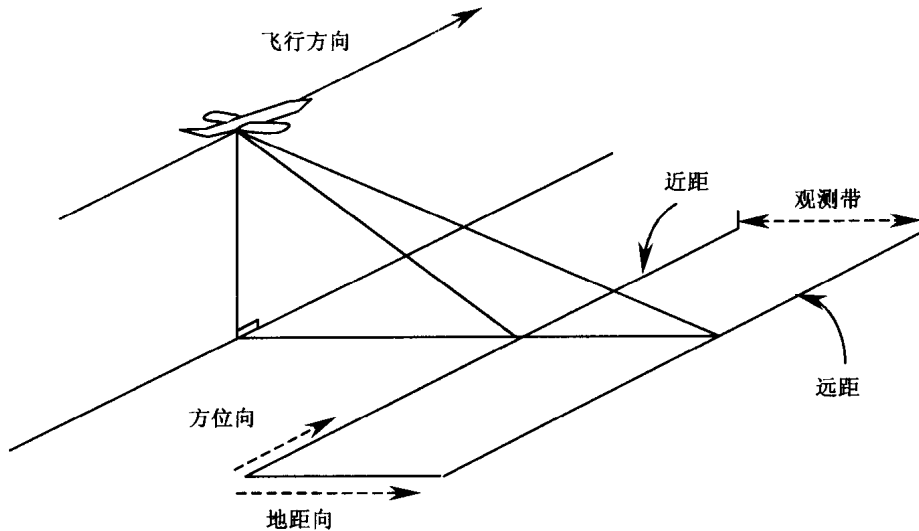


图 1-2 合成孔径雷达成像几何示意图

为 L 波段, HH 极化, 入射角为 23° , 分辨率 25m (距离向) \times 25m (方位向), 观测带宽 100km , 具体的参数见表 1-1。其主要任务是监测全球海面波场和极地海冰的状况。由于电源系统短路于同年 10 月 10 日停止运行, 在轨运行 105 天, 收集了 42 个小时的数据, 获得了大量的人类从未获得过的海洋、地质和地形方面的信息。SEASAT 的发射标志着合成孔径雷达已成功地进入从太空对地面观测的新时代, 标志着星载 SAR 由实验研究向应用研究的关键转变。

1981:1981 年 11 月 12 日美国“哥伦比亚”号航天飞机搭载成像雷达 SIR-A 顺利升空。SIR-A 也是 L 波段, HH 极化, 标定入射角为 50° (表 1-1)。其观测任务共 3 天, 对美洲的北部、中部和南部、非洲、亚洲和大洋洲的 $1\,000\text{万 km}^2$ 的研究区成像, 其中包括 3 个位于中国的实验区, 北部两个成像条带分别穿过华北中部、甘肃北部及新疆中部, 南部一个成像条带穿越海南岛、云南和西藏。从 SIR-A 雷达影像上成功地观测到撒哈拉沙漠的地下古河道, 显示了 SAR 具有穿透地表的能力, 引起国际科技界的震动^[4]。图 1-3 是中国新疆柯坪地区的 SIR-A 影像。

1983:1983 年原苏联利用 COSMOS 雷达卫星进行海洋测绘, 同时利用 Verena-15 和 Verena-16 宇宙飞船对金星进行雷达测绘。

1984:1984 年 10 月 5 日美国进行了“挑战者”号航天飞机搭载 SIR-B 的实验。SIR-B (性能参数见表 1-1) 是 SIR-A 的改进型, 工作于 L 波段, 其天线波束指向可机械改变, 从而能够提供不同视角($15^\circ \sim 60^\circ$)下目标后向散射系数变化的第一手空间实验资料。该系统同时实现了 SAR 立体成像以及数字记录和数字处理。SIR-A 和 SIR-B 系统提供了大量的影像数据, 为 SAR 的应用提供了丰富的资料。

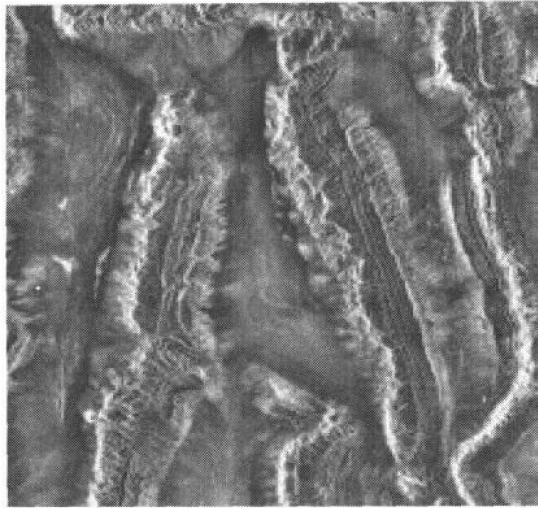


图 1-3 中国新疆柯坪地区 SIR-A 影像(1981/12/12)*

表 1-1 SEASAT, SIR-A, SIR-B 系统性能参数

系统参数	SEASAT	SIR-A	SIR-B
发射时间	1978/06/27	1981/11/12	1984/10/05
轨道高度(km)	800	259	354, 257, 224 ^①
轨道倾角(°)	108	38	57
波段(cm)	23.5	23.5	23.4
频率(GHz)	1.275	1.278	1.282
极化	HH	HH	HH
视数	4	6	4
视角(°)	20.5	47	15~60
入射角(°)	23	50	15~64
系统带宽(MHz)	19	6	12
最小脉冲重复频率(Hz)	1 464	1 463	1 464
最大脉冲重复频率(Hz)	1 647	1 640	1 824
方位向分辨率(m)	25	40	25
距离向分辨率(m)	25	40	58~17
观测带宽度(km)	100	50	10~60
天线类型	共电馈电	共电馈电	共电馈电
天线长度(m)	10.7	9.4	10.7
天线宽度(m)	2.16	2.16	2.16

①前 22 个运行周期的运行高度为 354 km, 其后的 11 个运行周期时运行高度为 257 km, 其余时间的运行高度为 224 km

1987: 1987 年 7 月原苏联发射的“COSMOS-1870”卫星上配备了一部分辨率为 25m 的 S 波段 SAR 系统。该雷达卫星轨道高度 270km, 运行周期为 2 年, 主要对人类无法进入的地区进行雷达成像测绘, 监测海洋表面污染, 鉴别海冰和对厚冰区的舰船进行导航等。

* <http://visibleearth.nasa.gov/cgi-bin/viewrecord?6126>