

测绘科技专著出版基金资助

雷达干涉测量

——原理与信号处理基础

廖明生 林瑋 著

SYNTHETIC APERTURE RADAR
INTERFEROMETRY

—— PRINCIPLE AND SIGNAL
PROCESSING

测绘出版社

测绘科技专著出版基金资助

雷达干涉测量
——原理与信号处理基础

Synthetic Aperture Radar Interferometry
—— Principle and Signal Processing

廖明生 林琚 著

测绘出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

雷达干涉测量——原理与信号处理基础/廖明生,林 琿
著.—北京:测绘出版社,2003.8

ISBN 7-5030-1187-4

I. 雷... II. ①廖...②林... III. 雷达—干涉测量
法 IV. P225.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 061674 号

测绘出版社出版发行

(100054 北京宣武区白纸坊西街3号)

河北三河市艺苑印刷厂印刷·新华书店经销
2003年8月第1版·2003年8月第1次印刷

开本:890×1240 1/32·印张:5.75

字数:145千字·印数:0001—3000册

定价:17.50元

内 容 提 要

雷达干涉测量(INSAR)是近十几年来非常活跃的研究领域,其一般理论日益成熟,应用前景颇为看好。本书结合作者多年来从事雷达遥感和 INSAR 技术研究的成果和实际经验,力图兼顾入门性和前沿性两方面,首先阐述本书的学科背景以及 INSAR 技术的发展、现状和存在的主要问题。然后在介绍雷达遥感的相关知识和 SAR 影像主要特点的基础上,系统地论述了雷达干涉测量技术的基本原理、成像模式、数据获取与数据处理的一般步骤等,并进一步探讨高程提取的理论精度、立体视觉与雷达干涉成像的联系与区别,试图从不同的角度理解干涉成像的原理。在数据处理和相关的算法方面,着重论述了复数 INSAR 影像对的自动配准、抑制干涉图噪声、相位解缠和数字高程信息提取等关键技术和实施算法等。对于每一个技术环节,尽量兼顾多种算法或实施途径,并进行分析对比,给读者提供多方面的理解。最后还介绍了 INSAR 技术的重要应用之一的差分干涉技术的基本原理和应用。

本书从雷达遥感基础开始到 INSAR 关键技术的论述,大致形成相对完整的结构,方便各种专业背景的读者阅读。可作为从事测绘、遥感、地理、地质灾害、自然资源、数字信号处理和影像信息科学等学科领域的研究人员、工程技术人员和大专院校师生阅读参考书,也可作为高等院校、科研院所的研究生专业课教材。

序一

大地测量学自空间技术的崛起以来发生了巨大的变革,不仅发展了空间大地测量学,而且促进了大地测量学与地球科学、空间信息科学的相互交叉和渗透。空间大地测量是对地观测的重要技术支撑之一,运用于诸多方面,例如,空间信息之时空坐标参考基准的建立,卫星的定轨、姿态的控制与测定,遥感影像基线的量测等。同时,对地观测技术的创新又丰富了空间大地测量的技术手段,合成孔径雷达干涉测量(INSAR)就是其中的一个重要的交叉领域。

作为雷达遥感的一个重要分支,INSAR 技术在过去的一二十年间取得了重大的突破,引起了遥感领域学者们的关注。虽然在某些数据处理环节采用的方法等方面仍然需要进一步的研究和发展,但是其主要的技术障碍已基本克服,正在朝实用化方向发展。从 INSAR 技术的发展过程来看,最初的动机是为了解决从合成孔径雷达影像提取地形信息(高程)的问题。该技术也确实为大面积快速获取高精度、高分辨率的地面高程信息提供了一条新的途径。

目前的 INSAR 技术的应用已经渗透到传统地形测绘以外的广阔领域,已成为空间大地测量学的一个重要领域。INSAR 技术提取高程的精度可达数米,而运用差分干涉手段(D-INSAR),量测高程的变化(地表的形变)可达厘米级甚至毫米级。INSAR 技术是通过遥感影像处理的方式量测地表形变,从空间尺度上可以高分辨率取样。卫星定位技术可以在地表上以点的形式测定地表形变,而 INSAR 可以在地面上以面的形式测定地表形变。因此通过 INSAR 对地壳形变的分析将对地震预报的研究,区域乃至全球的板块运动等方面做出贡献。此外,INSAR 可以在较短的时间间

隔内对所考虑的地区重复进行大面积的量测,因而在时间测度上也具有较高的分辨率。对于形变场取样在时间和空间方面的高分辨率,由此也衍生出影像大地测量(imaging geodesy)的提法,或许有一天它会成为空间大地测量学科的一个分支。美国宇航局(NASA)在其面向今后 25 年的“固体地球科学(solid earth science program)”前瞻性研究计划中,INSAR 技术是其中重点发展的主要支撑技术。人们可以预期在今后一段时间里,INSAR 技术将是一个非常活跃的研究领域,在地球科学领域进一步发展它的作用。

在雷达遥感领域中,INSAR 本身也是一个交叉性很强的新领域,涉及遥感、电磁波传播、信号处理、影像处理与模式识别、空间大地测量和数字摄影测量等多个领域。然而,目前国内外系统讨论 INSAR 技术的专著尚不多见。现在廖明生、林琿两位年轻教授撰写了《雷达干涉测量——原理与信号处理基础》一书,结合作者从事雷达遥感和雷达干涉测量技术研究工作积累的研究成果和实际经验,将这样一个应用前景广阔的前沿技术从几个基本方面系统地介绍给读者,对于 INSAR 技术的研究和应用发展定会起到积极作用。该书不仅适合于遥感领域教育和科研工作者,而且值得推荐给空间大地测量、地球物理等诸多领域的教育和科技工作者阅读。

陈俊勇(中国科学院院士)

2002 年 11 月 2 日

序二

遥感技术近十多年来发展迅猛,已成为地球空间信息获取的重要手段,不仅能快速大面积测制各种比例尺的地形图和其他空间信息产品,而且在土地资源调查、环境监测、减灾防灾等领域也发挥着日益重要的作用。利用遥感影像进行目标的识别、信息提取和地形测绘等理论和技术的研究开发,拓展遥感技术在经济、社会可持续发展和军事等领域的应用,已经越来越受到各国的重视。同时,也对遥感影像信息的获取手段和信息处理技术提出了更高的要求。机载和星载主动式合成孔径雷达(SAR)就是在这样的背景下出现的新技术。

我们知道,在众多的新型遥感传感器中,合成孔径雷达以其能穿透云雾、烟尘及大面积获取地表信息的全天候全天时特点而受到重视,尤其是对于传统的光学传感器长年成像困难的地区(如热带雨林、云贵高原等)有着特别的意义。

从雷达影像提取高程信息是摄影测量与遥感领域长期关注的课题,也是地形测绘、自然灾害监测、自然资源调查等空间对地观测技术应用领域的先行基础工作,有着巨大的社会和经济效益。其中,雷达干涉测量(INSAR)是获取高精度、高分辨率地面高程信息的一种全新手段,而且差分雷达干涉技术(D-INSAR)还可以应用于地表微小形变的监测,前景颇为看好。

测绘遥感信息工程国家重点实验室自成立以来就开始跟踪国际上雷达遥感相关的前沿研究,并开展了相应的技术攻关工作。1994年至1996年间,本书作者之一廖明生教授当时作为联合培养博士生受委派前往中国科学院遥感应用研究所和丹麦技术大学及丹麦国家遥感中心,从事雷达遥感的专题研究;之后,他又承担

了国家自然科学基金项目和测绘科技发展基金项目等,参与国际合作计划,深入 INSAR 的探讨。最近两年,廖明生教授在香港中文大学继续从事有关 INSAR 的合作研究。

本书的另一作者林珲教授多年来致力于推动海外地理信息科学领域的学者与国内的合作,贡献良多,曾担任中国海外地理信息科学协会(CPGIS)首任会长。加入香港中文大学以后,更是秉承中文大学以中英双语为基础,融汇中西文化和知识的精髓,在中国科学院和香港中文大学支持下,于 1997 年成立了地球信息科学联合实验室,并在此基础上于 2000 年成立了中国遥感中心香港研究发展基地。林珲教授以该实验室为依托,开展了多项开拓性的研究课题,其中包括雷达遥感在内的许多遥感研究工作。

林珲教授也一直是测绘遥感信息工程国家重点实验室的客座教授,此后又被聘为该实验室的博士生导师。位居中港两地的地球信息科学领域的两个实验室之间长期以来都有密切的交流与合作,并卓有成效。现在两位年轻学者将他们近年来在雷达干涉测量方面的研究成果和心得总结出来,写成本书,作为两个实验室之间长期合作的一个结晶,我身为测绘遥感信息工程国家重点实验室的主任和地球信息科学联合实验室学术委员会委员尤其感到高兴。本书目标明确、内容精练、一气呵成。从合成孔径雷达遥感基础出发,直接进入雷达干涉测量,重点讨论了复数影像配准、干涉图生成与相位噪声滤波、相位解缠及向 DEM 的转换,最后简要叙述了差分干涉雷达测量及其应用。

在国外同领域理论研究相对成熟,应用拓展迅速的背景下,期望本书的出版能够起到推波助澜的作用,在推动 INSAR 技术在我国的研究和应用推广方面发挥应有的作用,并且为我国自主开发雷达观测卫星的计划和有关的高新产业打下一定的基础。

李德仁(中国科学院和中国工程院院士)

2002 年 11 月 5 日

序三

近十几年来,成像雷达遥感技术取得了突破性的进展,在许多领域得到了广泛的应用。无论是单独使用还是结合其他遥感数据一起应用,SAR影像已经成为十分重要的遥感数据。干涉雷达技术是雷达遥感的主要发展方向之一。2000年美国航天飞机雷达地形测图计划(SRTM)在11天内可以获取全球80%地表三维地形信息,展示了干涉雷达令人惊叹的能力。实际上其应用也已不再局限于最初的地形测绘领域,而已经扩展到灾害监测、资源调查等许多领域,应用潜力巨大。

INSAR与雷达遥感领域的其他许多方向一样,要达到业务化应用还需要研究解决一些关键问题。目前,该领域的研究方兴未艾,国际遥感界日益重视。我国幅员辽阔,突发性灾害和环境变化的实时动态监测等均对数据处理的自动化水平提出了更高的要求。但是,数据处理技术和手段的发展严重滞后,利用雷达影像更新地球空间信息能力的技术储备相对不足,难于满足雷达遥感技术大规模推广应用和国家信息产业发展战略以及国防建设的迫切需要。廖明生教授和林琿教授紧跟国际前沿雷达遥感的发展趋势,在总结作者承担的国家自然科学基金、香港研究资助基金和国家测绘科技发展基金等一系列研究项目的基础上,撰写了书稿《雷达干涉测量——原理与信号处理基础》,既反映了作者在相关领域独立自主的研究成果,也融入了国际上先进的理论和方法。该书无疑对推动理论探讨和深化应用研究,吸引更多的青年科技人员加强该领域的研究力量以及人才的培养等许多方面都有重要的学术意义和明显的实用价值。

该书系统综述了干涉雷达遥感的发展和有关雷达遥感的基础

知识,注重基本原理和基本方法的描述,也概括了近年来的前沿进展。从电磁波的传播等基础知识到地表形变监测的应用领域,整个内容基本形成了较完整的体系,适合不同专业背景的学者阅读或参考。

该书很快就要与大家见面了,笔者有幸先睹为快。作为为数极少的干涉雷达遥感专著,相信反映了作者数年心血的著作会得到读者的喜爱和关注,特别是在干涉雷达原理和信号处理方面,读者仍会从中受益匪浅。我祝贺这本专著的出版,并希望能得到读者的厚爱。

郭华东(研究员,中国科学院副秘书长)

2002年10月

前 言

雷达干涉测量(synthetic aperture radar interferometry, IN-SAR)技术成功地综合了合成孔径雷达(SAR)成像原理和干涉测量技术,利用传感器的系统参数、姿态参数和轨道之间的几何关系等精确测量地表某一点的三维空间位置及其微小变化。SAR本身是一种主动式微波传感器,由于其具有全天候、全天时获取数据,并能穿透云雾、烟尘和大面积获取地表信息的特点而成为对地观测领域不可或缺的传感器,尤其适用于传统光学传感器成像困难的地区。INSAR技术从1969年首次披露用于金星表面测绘以来,尤其在最近的十多年取得了重大突破,一般理论问题趋于解决,已成为雷达遥感领域中引人瞩目的重要分支。目前,INSAR技术正在朝实用化方向发展,并不断拓展应用领域。例如,在测绘领域,其大面积快速获取三维空间位置和微小形变的能力,不仅可以达到提取DEM的目的,而且使之迅速成为空间大地测量的高新技术手段之一。为了提高INSAR技术的可应用性,新的INSAR遥感计划也在孕育之中。随着INSAR遥感数据获取系统和信息处理手段的发展,有可能实现全球地表形变状况的准实时监测和更为准确的地质灾害预报等,应用潜力目前尚不可估量。

近几年来国内也有许多的学者致力于INSAR技术的研究和应用推广,在“十五”期间更是列入了多个学科的优先研究领域,如国家自然科学基金地球物理和空间物理学科,“863”高技术研究计划等。相应的传感器研制计划也已经启动。但是,数据获取与处理的技术手段的发展相对国际先进水平仍然滞后,INSAR的数据处理几乎完全依赖昂贵的进口软件,难于满足雷达遥感技术大规模推广应用和国家的信息产业发展战略以及国防建设的迫切需

要。因此,只有结合雷达遥感领域国际前沿的发展趋势,加强 INSAR 技术及其数据处理的关键技术研究和技术创新,积极推动我国自主知识产权的数据处理软件平台开发,实现跨越式发展,才能适应未来对雷达对地观测技术发展的要求。

INSAR 是一个交叉性很强的新领域,涉及对地观测、电磁波传播、信号处理、影像处理与模式识别、空间大地测量和数字摄影测量等多个领域。目前和今后一段时间里,INSAR 技术仍然是非常活跃的研究领域,进一步研究发展的空间很大。但是,从初始的 INSAR 影像对到提取地面高程信息或地表形变信息的数据处理过程,包含有许多环节,欲使之形成成熟的技术体系,仍有许多关键问题有待研究或急需进一步完善。

作者多年来密切关注和跟踪 INSAR 技术的前沿发展,进行了多个课题的深入研究。虽然最初的探索是非常艰辛的,但是也积累了一些成果和形成自己的认识。本书的主要内容就是在作者进行研究工作的同时逐渐形成的,其中也参照了一些国内外的最新研究成果和英文版专著。

在最近的研究和教学活动中,我们特别注意到有许多的青年学者和研究生都对有关 INSAR 方面的研究有浓厚兴趣,迫切需要系统地深入阐述 INSAR 基本原理和方法的专著或教程。另一方面,在这样一个应用前景广阔的前沿技术领域,虽然在各种期刊和学术会议上已有大量的研究论文发表,但国内专门讨论 INSAR 技术的专著或教程极少,国外同领域的专著往往集中讨论某些比较专门内容,数量上也不多,特别是缺乏能够兼顾入门性和前沿性两方面的专著。因此,本书可望成为有关学者和研究生的重要参考书和教程,也期待能够对国内相关领域的理论方法研究、加速 INSAR 技术向各个应用领域的渗透和加强相关领域的后备人才的培养尽绵薄之力。

全书的内容安排将从电磁波传播的概念到雷达遥感的一般原理,再引出干涉雷达的原理,力图形成相对独立的体系,使得各种

专业背景的读者均能方便地阅读。第一章是概述,阐述本书的学科背景,使读者对这个领域发展的整体状况有一个较完整的了解;第二章介绍雷达遥感的基础知识和 SAR 影像的基本特点,以及后续章节将会涉及的参数等;第三章系统地论述了雷达干涉测量学的基本原理,成像模式,数据获取与数据处理的一般步骤;第四章至第七章则按照 INSAR 数据处理的流程,从数字复数信号处理的角度,深入讨论复数影像数据处理原理和相应的算法;最后的第八章,简要介绍了差分干涉技术(D-INSAR)的基本原理和应用,它是 INSAR 技术的重要应用之一的。全书的内容希望不仅能够让不同领域的研究人员或研究生较系统掌握 INSAR 的技术框架和相关算法的基本原理,而且能够使之迅速进入该研究领域的前沿或解决特定的应用问题。

在书稿的形成、修改和出版过程中,幸运地得到了许多知名学者和有关人士的帮助。陈述彭院士、徐冠华院士、陈俊勇院士、李德仁院士等始终关注和支持我们的研究工作。中国科学院郭华东教授、德国波茨坦地球科学研究中心夏耶教授、美国马萨诸塞州州立大学夏宗国教授首先审阅了初稿,从整体结构到一些技术细节的阐述等提出了宝贵的修改意见,并向出版部门给予了热情推荐。美国马里兰大学孙国清教授、美国东卡罗来纳大学王勇教授、丹麦技术大学 J. Dall 教授等为我们的研究工作提供了许多珍贵资料,对于本书的写作给予了大力支持和热情鼓励。澳大利亚新南威尔士大学葛林林博士、加拿大 Atlantis Scientific 公司等慷慨地提供了他们的研究成果作为本书第八章的实例分析。

书中的部分内容反映了作者之一在攻读博士学位期间的研究成果,体现了其导师张祖勋教授、郭华东教授、张剑清教授和 Poul Frederiksen 教授的学术思想。

其中涉及的研究工作得到了国家自然科学基金项目(编号:69782001)、香港研究资助局项目(编号:CUHK 4334/98E)和国家测绘科技发展基金项目(编号:99008)的资助。本书的出版荣幸地

得到了国家测绘科技专著出版基金的资助,并承蒙陈俊勇院士、李德仁院士、郭华东教授在百忙之中为本书欣然作序。

借此机会对上述人士和部门单位一并表示诚挚的感谢。

廖明生 书

2002年中秋
于香港中文大学



廖明生:

1962年生,江西龙南人。武汉测绘科技大学学士(1982年)、硕士(1985年),武汉测绘科技大学

与中国科学院遥感应用研究所、丹麦技术大学联合培养博士(2000年),曾赴日本东北大学、丹麦技术大学和香港中文大学进行合作研究。现任武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室教授,博士生导师,主要从事遥感影像信息处理及应用等方向的研究,近几年发表论文50余篇,专著1部。



林琚:

1954年生,祖籍广东汕头。中国科学院硕士(1983年),美国布法罗大学博士(1992

年)。现任香港中文大学教授,博士生导师,中国科学院暨香港中文大学地球信息科学联合实验室主任,中国遥感中心香港基地主任,国际欧亚科学院院士,香港摄影测量与遥感学会理事会主席,中国海外地理信息系统协会(CPGIS)首任会长,国内多个大学和科研院所客座教授、博士生导师等。目前研究方向包括雷达遥感及其应用、虚拟地理环境等,已发表学术论文100余篇,撰写专著6部,主编文集8部。

目 录

第一章 概 论	1
§ 1.1 引 言	1
§ 1.2 合成孔径雷达遥感的进展	4
§ 1.3 INSAR 技术的应用	11
§ 1.4 本书的内容安排和阅读建议	15
本章小结	16
第二章 合成孔径雷达遥感基础	17
§ 2.1 雷达遥感物理基础	17
§ 2.2 真实孔径雷达基本原理	22
§ 2.3 SAR 系统基本原理	26
§ 2.4 SAR 影像的主要特性	30
本章小结	35
第三章 雷达干涉测量概述	36
§ 3.1 INSAR 基本原理	36
§ 3.2 立体几何量测原理与干涉成像	41
§ 3.3 INSAR 成像的几种模式	44
§ 3.4 INSAR 技术存在的问题	45
本章小结	48
第四章 复数影像配准	49
§ 4.1 影像配准的基本原理	49
§ 4.2 干涉图质量的评估与影像配准精度	52
§ 4.3 INSAR 复数影像配准方法概述	56
§ 4.4 基于幅度影像的从粗到细匹配策略	61
§ 4.5 幅度影像相关系数用于精确匹配的局限性	68
§ 4.6 相干性测度用于精确配准	73
本章小结	83

第五章 干涉图生成与相位噪声滤波	84
§ 5.1 干涉图的生成	84
§ 5.2 在复数域对干涉图进行去噪处理的原理	89
§ 5.3 基于局部坡度(local slope)的自适应滤波	93
§ 5.4 中值-自适应平滑滤波	95
本章小结	103
第六章 相位解缠	104
§ 6.1 相位解缠概述	104
§ 6.2 相位解缠的基本原理	107
§ 6.3 典型的基于路径积分解缠方法	114
§ 6.4 最小二乘解缠方法	120
本章小结	123
第七章 从相位到 DEM 的计算	124
§ 7.1 从相位到高程的转换	124
§ 7.2 雷达影像的几何处理	125
§ 7.3 INSAR 数据的地理编码处理	129
本章小结	131
第八章 差分干涉技术及应用	132
§ 8.1 概 论	132
§ 8.2 差分干涉的基本原理	132
§ 8.3 D-INSAR 数据处理的间接方法	135
§ 8.4 关于 D-INSAR 数据应用的几点讨论	136
§ 8.5 D-INSAR 用于形变监测的实例	138
§ 8.6 GPS 技术发展概述	143
§ 8.7 GPS 技术与 INSAR 技术的集成应用	146
本章小结	150
参考文献	151
名词索引	163