

机载干涉合成孔径雷达 数据处理技术

丁赤飏 李芳芳 胡东辉 尤红建 著



科学出版社

机载干涉合成孔径雷达 数据处理技术

丁赤飏 李芳芳 胡东辉 尤红建 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书深入探讨了机载干涉 SAR 在地形测绘应用中的信号处理问题。首先,简单讲述了干涉 SAR 的基本概念、发展现状、应用领域等;然后,介绍了利用 SAR 进行干涉测量的原理、相干性、定位精度分析以及数据处理流程;在此基础上,以机载干涉 SAR 数据处理流程为线索,从运动补偿及成像、干涉处理、定标及区域网平差、数字高程模型重建及后处理等几个方面进行了系统、全面的阐述。

本书是作者近年来在 SAR 干涉测量领域的研究成果总结,内容具体实用,适合于从事遥感、测绘等领域的研究人员、技术人员以及高等院校相关专业的研究生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

机载干涉合成孔径雷达数据处理技术/丁赤飏等著. —北京:科学出版社, 2017. 2

ISBN 978-7-03-051866-8

I. ①机… II. ①丁… III. ①合成孔径雷达-研究 IV. ①TN958

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 034657 号

责任编辑:张海娜 纪四穗 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正设计

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>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 2 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017 年 2 月第一次印刷 印张:17 1/2 插页:4

字数:352 000

定价:108.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)是一种利用脉冲压缩技术和合成孔径原理实现二维高分辨率的微波成像雷达。作为一种主动式的对地观测手段, SAR 具有全天时、全天候、多波段、多极化、可穿透等优点。因此, 自 1951 年合成孔径的概念诞生以来, SAR 便得到了广泛的关注。目前, SAR 已经在灾害监测、国土测绘、资源勘探、农业估产及军事侦察等诸多领域得到了广泛的应用。

干涉合成孔径雷达(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)自 20 世纪 70 年代发展起来, 它将无线电干涉测量的理论和方法与 SAR 技术相结合, 能够在获取二维高分辨率图像的同时, 利用 SAR 复数据的相位信息提取地表的三维地形或微小形变, 具有很高的精度, 因而, 广泛应用于地形测绘、冰川研究、地震火山监测、海洋测绘、地面沉降监测、陆地覆盖分类等多个方面。

就地形测绘的应用而言, 星载 InSAR 系统具有覆盖范围宽、平台稳定的特点, 有利于进行全球测绘, 而机载 InSAR 系统则具有较高的空间分辨率和测量精度, 因而更适用于区域性高精度的地形测绘。本书针对机载平台下的 InSAR 技术在地形测绘中的应用, 从 InSAR 的基本原理入手, 围绕信号处理中的关键技术, 对运动补偿及成像、干涉处理、干涉定标及区域网平差、数字高程模型重建及后处理等几个方面进行了较为系统和全面的阐述。

本书作者承担了我国第一部机载 InSAR 系统的研制工作, 首次在国内实现了具有大比例尺测图能力的 InSAR, 对 InSAR 系统和信号处理技术有着较为系统和深入的认识。本书以作者近年来的研究工作和工程实践为基础, 并融入了其他研究者的研究成果, 以期较为全面地呈现该领域的研究进展, 从而为从事遥感、测绘等技术领域的研究生和科研人员提供有益参考, 也为促进我国 InSAR 技术的业务化应用贡献绵薄之力。

本书的主要内容如下: 第 1 章阐述 SAR 的发展历史及趋势, 对 InSAR 的基本概念、应用领域和发展现状进行总结概括, 并指出机载 InSAR 信号处理的关键技术; 第 2 章简要介绍 InSAR 地形测绘的基本原理, 阐述相干性、平地效应、高度模糊数等重要概念, 并给出机载 InSAR 信号处理的基本流程, 为后续各个信号处理步骤的介绍奠定理论基础; 第 3 章结合机载双天线 InSAR 及重轨 InSAR 的特点, 介绍运动补偿误差对干涉测量的影响及相应的补偿方法; 第 4 章针对机载 InSAR 干涉处理流程中的各个步骤, 较为系统地介绍其基本原理和常用方法; 第 5 章针对大面积区域的机载 InSAR 地形测绘, 介绍多景影像的同名点提取、干涉定标和区

域网平差方法;第6章介绍机载 InSAR 数字高程模型重建过程中的 DSM 后处理、正射校正及拼接方法。

林雪博士参与了本书 3.5 节内容的撰写,王山虎博士参与了 5.2 节内容的撰写,马婧博士参与了 5.4 节和 6.4 节内容的撰写,罗华硕士参与了 6.3 节内容的撰写,在此表示感谢。

本书的研究工作先后得到了国家 863 计划(项目编号:2007AA120302)、国家自然科学基金(项目编号:61331017、61401428)等项目的支持,在此一并表示感谢。同时,本书在研究和撰写过程中,还得到了中国科学院电子学研究所的吴一戎院士、洪文研究员、向茂生研究员、梁兴东研究员、雷斌研究员、胡玉新研究员、龙辉研究员、仇晓兰副研究员、孟大地副研究员等领导和同事的指导、帮助和支持,在此向他们表示衷心的感谢。

InSAR 技术一直处于不断的发展和进步之中,作者仅将近年来的研究成果进行了初步的梳理和总结,限于作者水平,书中疏漏之处在所难免,恳请读者不吝指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 SAR 发展概况	1
1.2 InSAR 概述	3
1.2.1 InSAR 的基本概念	3
1.2.2 InSAR 的发展现状	4
1.2.3 InSAR 的应用领域	10
1.2.4 机载 InSAR 信号处理的关键技术	11
1.3 本书内容概要	12
参考文献	13
第 2 章 SAR 干涉测量原理	17
2.1 InSAR 基本原理	17
2.2 InSAR 相干性	21
2.2.1 干涉相位统计特性	21
2.2.2 干涉相干性	24
2.2.3 去相干因素	25
2.3 机载 InSAR 三维定位精度分析	31
2.4 机载 InSAR 数据处理流程	34
2.5 小结	36
参考文献	36
第 3 章 机载 InSAR 运动补偿及成像处理	37
3.1 引言	37
3.2 机载 SAR 运动误差影响分析	37
3.2.1 运动轨迹误差影响	37
3.2.2 姿态误差影响	39
3.3 机载 SAR 运动补偿原理及方法	40
3.4 机载双天线 InSAR 运动补偿误差分析	42
3.4.1 单天线机载 SAR 运动补偿残余误差建模	43
3.4.2 无测量误差条件下运动补偿残余误差对干涉测量的影响	46
3.4.3 有测量误差条件下运动补偿残余误差对干涉测量的影响	49

3.4.4 基于高程迭代的 InSAR 运动补偿方法	53
3.4.5 实验结果分析	54
3.5 机载重轨 InSAR 运动补偿误差分析	61
3.5.1 高程误差影响	61
3.5.2 残余误差影响	64
3.5.3 宽波束机载重轨 InSAR 成像算法的局限性	65
3.5.4 一种适用于高分辨率宽波束 InSAR 的成像算法	69
3.5.5 残余误差估计与补偿	82
3.6 小结	90
参考文献	91
第 4 章 机载 InSAR 干涉处理	94
4.1 引言	94
4.2 干涉处理流程	94
4.3 预滤波	96
4.3.1 距离向预滤波	96
4.3.2 方位向预滤波	96
4.4 复图像配准	97
4.4.1 复图像配准基本步骤	97
4.4.2 常用复图像精配准方法	100
4.4.3 干涉相位质量评价	102
4.5 去平地效应	103
4.6 干涉相位滤波	105
4.6.1 干涉相位仿真	105
4.6.2 经典相位滤波方法介绍	107
4.6.3 基于经验模式分解的干涉相位滤波方法	112
4.6.4 基于小波变换和局部频率估计的干涉相位滤波方法	121
4.6.5 基于高阶奇异值分解的非局部干涉相位滤波方法	129
4.7 干涉相位解缠	138
4.7.1 相位解缠基本原理	139
4.7.2 相位解缠方法	140
4.7.3 一种质量指导法的快速实现方法	146
4.7.4 基于地形特征的相位解缠方法	149
4.8 小结	165
参考文献	166

第 5 章 机载 InSAR 定标及区域网平差	171
5.1 引言	171
5.2 SAR 图像匹配	172
5.2.1 基于不变特征的图像匹配基本原理	173
5.2.2 SIFT 算法原理	175
5.2.3 基于大尺度双边 SIFT 的 SAR 图像同名点提取方法	178
5.2.4 基于先验 DEM 的 SAR 图像同名点提取方法	185
5.3 机载 InSAR 定标	194
5.3.1 机载 InSAR 高程定标	195
5.3.2 机载 InSAR 平面定标	196
5.3.3 机载 InSAR 三维定标	198
5.4 机载 InSAR 区域网平差	199
5.4.1 逐景传递法	200
5.4.2 光束法	203
5.4.3 一种改进的大规模法方程矩阵求解算法	210
5.4.4 区域网平差方法对比实验	214
5.5 小结	223
参考文献	223
第 6 章 机载 InSAR 数字高程模型重建	227
6.1 引言	227
6.2 DEM 反演	228
6.3 DEM 后处理	228
6.3.1 水体和阴影区域自动提取及区分	229
6.3.2 水体区域 DEM 后处理	235
6.3.3 阴影区域 DEM 后处理	243
6.3.4 DSM 滤波	252
6.4 正射校正及拼接	260
6.4.1 逐点校正	261
6.4.2 分块校正	263
6.4.3 正射校正及拼接实验	264
6.5 小结	270
参考文献	270

第 1 章 绪 论

1.1 SAR 发展概况

合成孔径雷达(synthetic aperture radar,SAR)是一种可实现二维高分辨率成像的微波成像雷达。合成孔径的概念可以追溯到 20 世纪 50 年代初。1951 年,美国 Goodyear 公司的 Wiley 率先提出通过频率分析的方法改善雷达的方位分辨率,并将其称为多普勒波束锐化,这为 SAR 的发展奠定了理论基础。随后,伊利诺伊大学控制系统实验室用相参雷达进行试验,证实了频率分析方法确实能提高方位分辨率,并于 1953 年 7 月采用非聚焦合成孔径的方法获得了第一幅 SAR 图像。同年在美国密歇根大学举办的暑期讨论会上,许多学者提出利用机载运动将雷达的真实天线合成为大尺寸的线性天线阵列的新概念,进一步推动了 SAR 向实用化方向发展。在此基础上,美国密歇根大学成功研制出第一个 X 波段机载 SAR 系统,并于 1957 年 8 月进行了飞行试验,获得了第一幅大面积聚焦的 SAR 图像。从此,SAR 得到了世界的广泛承认并引起了众多学者的关注。

SAR 系统接收到的回波数据是散焦的,信息存在于相位之中,因此需要通过相干处理得到聚焦图像。早期,SAR 是利用傅里叶光学原理,通过激光波束和透镜组来获取聚焦图像的。这种方法需要对安放在光路上的透镜组进行精细的调整,难以做到自动化处理。为了克服光学处理方法的固有缺陷,人们开始研究 SAR 数字信号处理器。1978 年,美国国家航空航天局(NASA)发射了第一颗 SAR 卫星 SEASAT,它的发射激发了许多数字信号处理方面的设计灵感,同时也促进了 SAR 数据在遥感应用中的广泛发展。此后,随着信号处理技术和雷达系统技术的不断改进,许多科技强国相继研制成功自己的星载 SAR 系统,如欧洲太空局的 ERS-1/2、日本的 J-ERS、加拿大的 RadarSAT-1/2 等。这些卫星的发射,获得了大量的对地观测数据,在全球掀起了 SAR 研究和应用的热潮。

SAR 具有全天时、全天候的工作能力,可以实现二维高分辨率成像,选择合适的波长,还能够穿透一定的遮蔽物。这些优点使其在军事侦察、灾害监测、地质测绘、资源勘探、环境保护等诸多方面得到了广泛的应用。随着 SAR 应用技术和应用领域的不断发展和拓宽,许多 SAR 的新体制和新概念纷纷涌现。目前 SAR 的发展趋势主要体现在以下几个方面。

1) 高分辨率宽测绘带

高分辨率和宽测绘带始终是 SAR 不懈追求的目标。在距离向,为突破宽带和

超宽带信号实现的技术难题,国际上普遍将调频步进信号和调频连续波作为备选信号体制。目前,一些 SAR 系统已经能够达到距离向亚米级甚至厘米级的分辨率。例如,美国的长曲棍球系列卫星第 5 颗在精细模式下能达到 0.3m 的分辨率,德国先进的机载 SAR 系统 PAMIR 更达到了厘米级的分辨能力。在方位向,为解决分辨率和测绘带宽之间的矛盾,发展出了一些新的成像模式,如滑动聚束模式,此外,许多新的工作体制也被提出,如方位多波束、同步轨道 SAR 等。

2) 多极化 SAR

早期的 SAR 系统工作在单一的极化状态,相当于对电磁波矢量进行了标量处理,无法完全获得包含在回波极化特性中的关于目标散射特性的信息。多极化 SAR 比单极化 SAR 包含更多的地物信息,通过极化信息的提取,可以最大限度地不同散射机制的目标区分开来,从而为地物的精细分类及目标参数反演提供了新方法。目前,许多先进的 SAR 系统都具备多极化或全极化的功能,如 Radar-SAT-2、TerraSAR-X 等。进一步,将极化技术与干涉技术结合,又发展出了极化干涉 SAR 技术,它利用干涉 SAR 能够进行高程测量的优势,可以分解处于不同高度上的散射机制类型,在植被参数反演、森林生物量估计等方面具有重要的应用价值,也成为量化遥感研究的一个重要方向。

3) 多平台 SAR

传统单一平台 SAR 电磁波的发射和接收由同一部雷达完成,多平台 SAR 则是指电磁波的发射和接收由位于不同空间位置的两部或两部以上的雷达完成,也称为分布式 SAR。与单平台系统相比,多平台系统具有隐蔽性好、安全性高、抗干扰能力强的优点,而且系统的灵活性更强,在高分辨率宽测绘带成像、干涉测量和动目标监测等方面都有明显的优势。另外,通过多颗卫星的组网观测,还可以缩短重访周期,提高 SAR 数据获取的时效性。双站 SAR 作为多平台 SAR 的一种最简单形式,成为近年来 SAR 领域的研究热点之一。

4) 高维成像能力

干涉 SAR 技术通过对同一场景两次观测得到的复图像对进行干涉处理,能够获得分辨单元内所有目标的平均高程信息,将 SAR 从常规的二维成像拓展到高程测量,是 SAR 发展历史上的一次革命性的飞跃。但是,干涉 SAR 并不具有高程向的分辨能力。近年来发展起来的三维 SAR 技术通过形成一个分布在立体空间中的采样阵列,能够获得观测对象的三维分辨能力,突破了干涉 SAR 无法实现高程分辨的局限。目前,学者针对多种三维成像体制如圆迹 SAR、下视三维 SAR、多基线层析 SAR 等开展了广泛的研究,由此带来的信号处理理论和方法也在蓬勃发展。

1.2 InSAR 概述

1.2.1 InSAR 的基本概念

20 世纪 70 年代初,干涉合成孔径雷达(interferometric SAR, InSAR)技术发展起来,它将无线电干涉测量技术与 SAR 技术相结合,在获取二维 SAR 图像的同时,能够利用 SAR 复数据的相位信息提取地表的三维信息和变化信息^[1]。在实现上,InSAR 通过两副天线同时观测或单天线不同航次观测,获取地面同一场景的复图像对。目标与两天线位置的路径差在复图像上形成相位差,利用该相位差与 InSAR 成像参数的几何关系,可以精确测量出图像上每一点的高程信息或变化信息^[2,3]。与传统的雷达立体像对测量技术^[4]相比,InSAR 技术在理论上可以获得波长量级的高程精度。

根据数据获取方式的不同,InSAR 可划分为单航过模式和重复轨道模式。

单航过模式是通过在同一平台上安装的两副天线在单次飞行中同时获取双通道的 SAR 数据,具有不受时间去相干影响、大气干扰效应小、基线稳定的优点。单航过模式根据基线构型的不同,又可以划分为交轨干涉(cross track interferometry, XTI)和顺轨干涉(along track interferometry, ATI)两大类。其中,XTI 是指基线与航向垂直的工作模式,该模式下,干涉相位由两副天线与地面目标之间的路径差引起,而路径差又与地形紧密联系,因此,XTI 模式可用于获取地物高程信息。ATI 是指基线与航向平行的工作模式,此时干涉相位主要由两次观测时间间隔内地面目标的位移变化引起,因此 ATI 常用于地面动目标检测、水流制图等方面。对于星载平台,其覆盖范围宽,有利于进行全球测绘,但在同一卫星平台上构建足够长的基线难度很大,SRTM 系统是迄今为止唯一的星载双天线 InSAR 系统。而机载单航过模式 InSAR 系统更容易实现,且具有较高的空间分辨率和测量精度,空间分辨率通常能达到 1m 或者更高,DEM 精度可以达到米级以下,因而广泛应用于高精度地形测绘应用中。

重复轨道模式是仅在雷达平台上安装单副天线,通过沿重复轨道的两次飞行获取 InSAR 数据,主要用于地表形变监测。与飞机平台相比,卫星平台具有稳定、周期性的运行轨道,容易进行基线控制和重构,因此星载重复轨道模式的应用更加广泛。通常,对于重复轨道 InSAR 测量,两次观测的轨道并非是完全重合的,即存在交轨基线分量,因而得到的干涉相位中既包含观测时间间隔内视线向的形变信息,也包含地形信息,消除其中的地形信息实现地表形变测量的技术称为差分 InSAR(differential InSAR, DInSAR)技术。差分干涉相位对地表形变非常敏感,因此差分 InSAR 可达到毫米级的测量精度。差分干涉技术原理类似于 ATI 技术,但其时间基线远大于后者,因而主要用于地面沉降、冰川监测等慢变化的测量。

随着 InSAR 技术的发展,又逐渐衍生出长时间序列 InSAR 技术、极化 InSAR 技术、多基线 InSAR 技术等多项新技术。

1) 长时间序列 InSAR 技术

差分 InSAR 技术在进行地表形变测量时,受时间、空间去相干以及大气效应^[5,6]等因素的影响,大大限制了其应用。长时间序列 InSAR(time series InSAR, TSInSAR)技术是获取同一区域多景不同时相的 SAR 数据,通过识别在长时间范围内相位和幅度变化稳定的点,利用这些稳定点上的相位特征,消除大气效应的影响,从而实现长时间尺度上的连续地表形变信息提取。该技术突破了传统差分 InSAR 时间和空间去相干的限制,能够最大限度地提高数据的利用率,提高形变测量的精度。常用的长时间序列 InSAR 处理方法有永久散射体(permanent scatterers, PS)方法、小基线集(small baseline subsets, SBAS)方法、相干目标(coherent target, CT)方法等。

2) 极化 InSAR 技术

极化 InSAR(polarimetric InSAR, PolInSAR)技术是将 InSAR 技术和极化 SAR 技术相结合,既保持了 InSAR 高程测量的能力,又引入了极化 SAR 对目标散射机制敏感的优势。将极化技术引入干涉应用,可以利用极化信息来改善数据的相干性,实现相干最优,从而能提高干涉测量的精度,并能更好地解释目标的散射机理,对于地表植被物理参数反演、森林结构参数估测等方面具有十分重要的应用价值。

3) 多基线 InSAR 技术

多基线 InSAR(multi-baseline InSAR)技术是单基线 InSAR 的扩展,能够克服单基线 InSAR 测高精度与相位解缠可靠性不可兼顾的矛盾。干涉基线越长,系统的高度模糊数越小,有利于获取高精度的 DEM 数据,但是长基线会使干涉条纹更加密集,不利于相位展开。多基线 InSAR 结合模糊度不同的多个干涉相位进行联合处理,能够提高相位解缠的稳健性,获得高精度的 DEM。另外,多基线 InSAR 通过在不同高度上的多次观测,能够形成在目标高度方向上的分辨能力,这样可以解决叠掩区域的干涉相位估计问题,实现复杂地形如陡峭山区、城市建筑物等的三维重建(图 1.1, 见文后彩图),这一技术也称为多基线层析(multi-baseline tomography)技术。

1.2.2 InSAR 的发展现状

雷达干涉测量的最初报道可以追溯到 1946 年, Ryle 和 Vonberg 构造了类似于 Michelson-Morley 干涉仪产生的无线电波,并能对一些新的宇宙电波进行定位^[2]。但直到 20 世纪 60 年代末才有了进一步的发展,1969 年美国喷气推进实验室的 Rogers 和 Ingalls 用雷达干涉仪对金星表面进行了观测^[8]。1972 年, Zisk 利

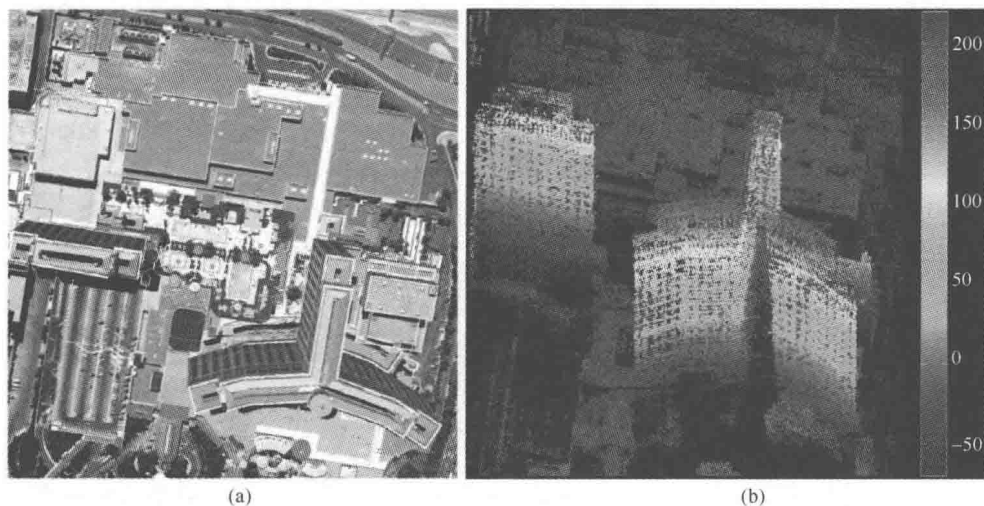


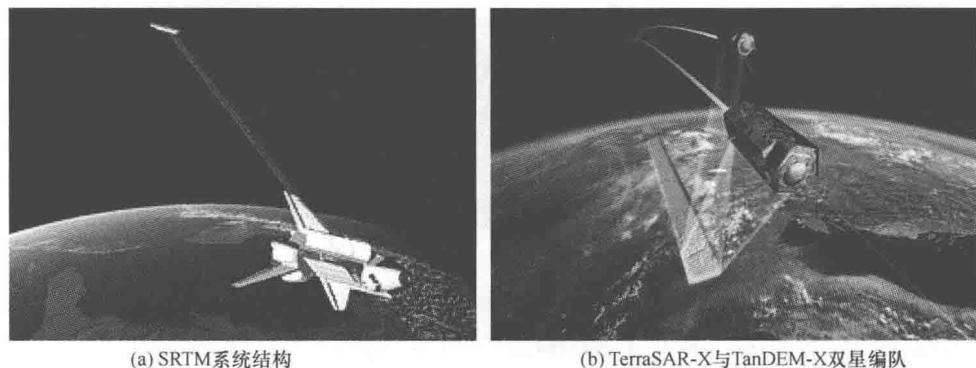
图 1.1 拉斯维加斯 Bellagio 酒店三维重建结果^[7]

用类似的方法实现了对月球地形的测量^[9]。1974 年, Graham 利用机载 InSAR 技术获得了满足 1 : 250000 地形制图要求的高程数据, 开创了 InSAR 技术获取地表三维信息的先河^[10]。1986 年, Zebker 和 Goldstein 等对 InSAR 技术在理论和实践上进一步完善, 获取了高程精度优于 10m 的更加实用的地形测绘结果^[11]。

随着星载 SAR 技术的发展, 人们获取了大量的数据, 有关 InSAR 技术的研究得以全面展开。重轨干涉是星载 InSAR 系统最早和最普遍采用的模式, 为 InSAR 技术的研究提供了丰富的数据源, 对其最初阶段的发展起到了极大的推动作用。第一个应用于干涉测量的星载 SAR 系统是 SEASAT 系统。1988 年, Goldstein 等利用 SEASAT 数据获得了 Death Valley 的 Cottonball Basin 地形图^[12]。1991 年, 欧洲太空局成功发射了 ERS-1^[13] 卫星, 获得了丰富的数据, 使得 InSAR 技术成为研究的热点。1995 年, 欧洲太空局又发射了 ERS-2 卫星, 与 ERS-1 轨道参数几乎完全相同, 两颗卫星以相同的视角和相距 1 天的时间间隔对同一地区进行观测, 获取了相干性很高的干涉数据^[14]。1994 年, SIR-C/X-SAR 首次获取了多频段、多极化和多时相干涉数据, 大大推进了 SAR 遥感的反演问题研究, 同时也开启了 SAR 极化干涉测量的研究^[15]。1995 年, 加拿大发射的 RadarSAT-1 卫星^[16], 是第一个具有 ScanSAR 模式的星载 SAR 系统, 可进行多种模式成像, 但由于其轨道控制精度不高, 影响了干涉数据性能。2002 年, 欧洲太空局发射了 Envisat 卫星^[17], 该卫星工作在 C 波段, 具有重轨干涉能力, 可在 ScanSAR 模式下工作。2007 年, 加拿大发射了新一代商用卫星 RadarSAT-2^[18], 精细模式 SAR 分辨率为 3m, 重轨干涉的高程精度可达 10m。

2000 年, 美国的“航天飞机雷达地形测量任务”(Shuttle Radar Topography

Mission, SRTM) 是 InSAR 研究领域的又一个重要里程碑, 该任务利用“奋进号”航天飞机, 通过加装一个 60m 可伸缩长臂将一部 X 波段和一部 C 波段天线伸出舱外, 和舱内主天线构成了双天线 InSAR 系统, 如图 1.2(a) 所示。该系统对北纬 60° 至南纬 56° 的地形区域进行了测绘, 测绘面积超过了全球陆地面积的 80%, 产生了平面分辨率为 $30\text{m} \times 30\text{m}$ 、相对高程精度为 6m、绝对高程精度为 16m 的数字高程模型。这是迄今为止唯一由航天飞机搭载的双天线 InSAR 系统^[19,20]。



(a) SRTM系统结构

(b) TerraSAR-X与TanDEM-X双星编队

图 1.2 SRTM 系统结构和 TerraSAR-X 与 TanDEM-X 双星编队

分布式干涉是通过多个单天线星载 SAR 的分布式观测来实现类似于单航过干涉的工作模式, 从而可以克服重轨干涉中的时间去相干问题, 同时避免了在单星平台上构建长基线的问题, 且多颗卫星能实现多基线干涉, 有助于提高干涉性能。德国的 TanDEM-X 任务就是由两颗非常相似的卫星 TerraSAR-X 卫星^[21,22]与 TanDEM-X 卫星^[23-25]组成了星载分布式 InSAR 系统。TerraSAR-X 于 2007 年发射, 具有多极化和多种模式成像功能, 平面分辨率高达 1m。2010 年, TanDEM-X 卫星成功发射, 与 TerraSAR-X 组成双星编队, 典型的交轨基线长度为 250~500m, 如图 1.2(b) 所示, 能够产生分辨率为 $12\text{m} \times 12\text{m}$ 、相对高程精度优于 2m、绝对高程精度优于 10m 的 DEM 产品(图 1.3, 见文后彩图), 这是继 SRTM 后 InSAR 技术应用的又一个巨大飞跃。图 1.4 给出了意大利 Etna 火山利用 SRTM 和 TanDEM-X 任务生成的 DEM 对比图, 可见 TanDEM-X 的水平分辨率明显提升, 能够反映更多地形的细节信息。

20 世纪 90 年代以来, 伴随着导航技术的进步和高精度测绘的需求, 机载 InSAR 系统也得到了快速的发展。目前, 国外有多个国家拥有机载 InSAR 系统, 包括美国喷气推进实验室(JPL)的 AIRSAR^[28]和 GeoSAR^[29-31]、ERIM 的 IFSARE^[32]及 Sandia 国家实验室的机载 InSAR 系统^[33], 德国 DLR 的 E-SAR^[34]、F-SAR^[35]、Dornier 的 DO-SAR^[36]、FGAN 的 AER-II^[37]和 AeroSensing 的 AeS-1^[38], 加拿大遥感中心(CCRS)的 C/X-SAR^[39], 法国 ONERA 的 Ramses^[40], 丹麦技术

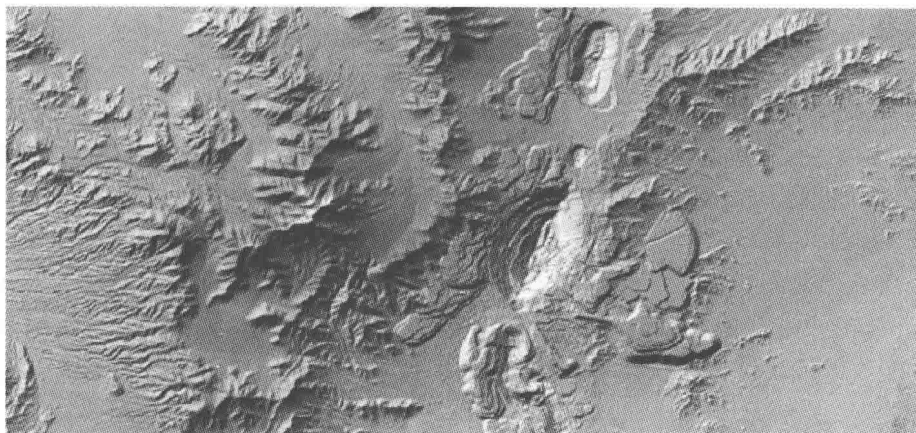


图 1.3 智利铜矿区域 TanDEM-X 生成的 DEM^[26]

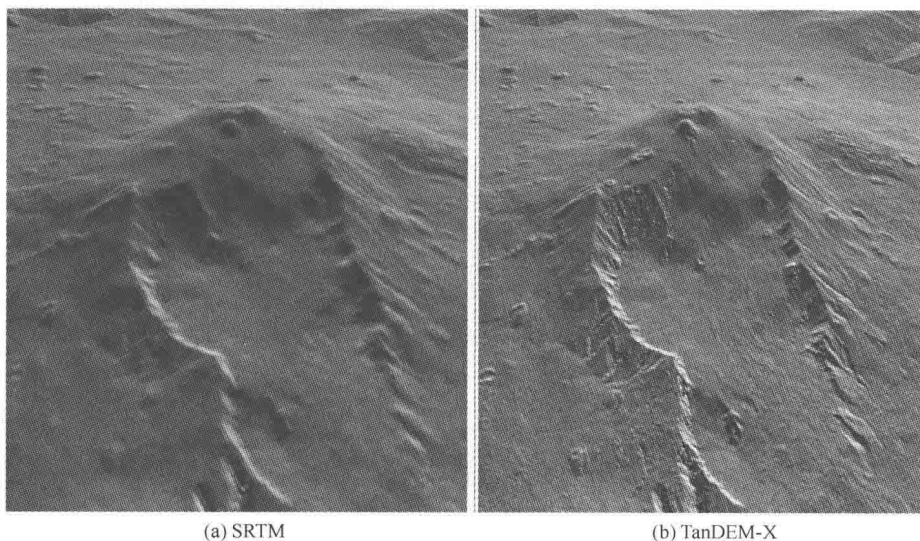


图 1.4 意大利 Etna 火山 SRTM 与 TanDEM-X 生成的 DEM 对比^[27]

大学的 EMISAR^[41], 日本 CLR/NASDA 的 PISAR^[42], 巴西 Orbit 遥感中心的 OrbiSAR^[43]等。

机载 InSAR 系统灵活性强, 目前很多机载 InSAR 系统都具有多波段、多极化、多工作模式的特点。NASA/JPL 于 1988 年研制出 AIRSAR 系统, 该系统可同时工作在 C、L、P 三个波段, 有三种工作模式: 极化 (POLARSAR) 模式、交轨干涉 (TopSAR 或 XTI) 模式及顺轨干涉 (ATI) 模式。ATI 模式是试验性的, 沿飞机机身上的两对天线 (C 波段和 L 波段各一对) 可获取 ATI 数据, 用于探测洋流运动的方向。TopSAR 系统可以工作在标准模式和乒乓模式, 实际高程误差为 3~40m。

德国 DLR 的 E-SAR 系统最初于 1988 年研制成功,之后经过多次升级改造。可工作在 X、C、L、P 四个波段,其中 X 波段为交轨和顺轨工作模式,L、P 波段为重轨工作模式,并通常结合多极化模式进行,该系统搭载 IGI CCNS4/Aerocontrol IId 导航系统,重轨基线可控制在 10m 以内。从 20 世纪 90 年代至今,E-SAR 进行了多次干涉测量试验,德国 DLR 发表了包括运动补偿、干扰抑制、差分干涉等一系列研究成果,并衍生出了多基线层析 SAR、极化层析 SAR 等新的干涉技术。为了进一步提高系统性能,2006 年 DLR 在 E-SAR 系统基础上研制了该系统的升级版 F-SAR。F-SAR 可工作在 X、S、C、L、P 五个波段,在 X、S 波段具有交轨干涉能力,在 X 波段还具有顺轨干涉能力,在 C、L、P 波段具有重轨干涉能力,其中,重轨干涉模式是 F-SAR 系统的标准工作模式。

随着机载 InSAR 系统技术日益成熟,InSAR 开始逐渐向商业化方向迈进。1997 年,Intermap 公司首次主导“Indonesia Map”工程,开创了 InSAR 系统商业化运作的先河。ERIM 的 IFSARE 系统是全球第一个商业化的交轨干涉系统。随后,Intermap 公司又进行了“Nextmap Britian”和“Next USA”测图工程^[44]。

GeoSAR 系统是一个单航过柔性基线构型的机载 InSAR 系统,该系统于 1997 年启动,由 NASA/JPL 负责系统设计和数据处理,2000 年开始由 Fugro EarthData 公司负责系统的商业运作。该系统的两副 P 波段天线分别安装在两侧机翼末端,形成一个独特的柔性基线结构,为此专门配备了激光基线测量系统(LBMS),用于实现毫米级的基线重构,如图 1.5 所示。GeoSAR 的 X 波段和 P 波段可以同时工作,能够分别获取植被冠层和底层的 DEM,进而实现对树高信息的提取,图 1.6(见文后彩图)显示了对同一地区利用 X 波段和 P 波段分别测绘得到的 DEM。自 2002 年 GeoSAR 成功完成首次商业运作“哥伦比亚热带雨林区测图工程”以来,该系统已经参与完成诸多商业计划任务,成为机载 InSAR 系统商业化运作的典范。



两副X波段天线
两副P波段天线
(a) GeoSAR机载平台



(b) GPS/IMU系统

图 1.5 GeoSAR 系统搭载平台及 GPS/IMU 系统^[31]

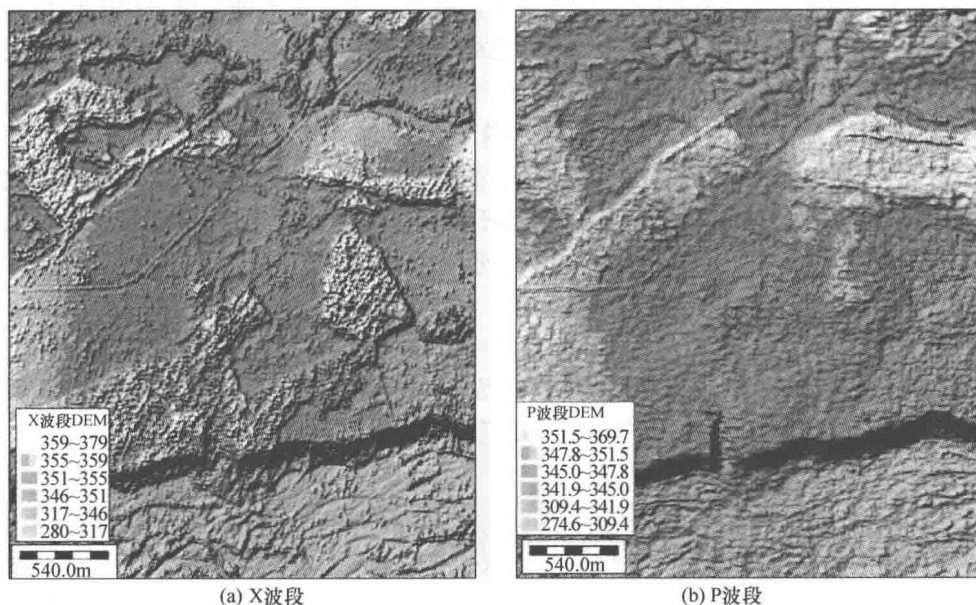


图 1.6 GeoSAR 系统 X、P 波段 DEM 测绘结果^[31]

巴西 Orbit 遥感中心研制的 OrbiSAR-1 系统可搭载于小型飞机如 Cessna 207A、Dornier 228 等之上,其工作于 X、P 两个波段,其中 X 波段为 HH 极化双天线交轨模式,用于获取数字表面模型,P 波段为全极化重轨模式,用于获取数字地形模型。

总之,在进入 20 世纪以后,机载 InSAR 系统的性能得到了很大的提高,大部分系统的空间分辨率可保持在 2m 以内,高程精度优于 2m,其中, AeS-1 系统、OrbiSAR 系统、F-SAR 系统的高程精度更是达到 0.5m 以内。可见,目前机载 InSAR 系统技术日渐成熟完善,进一步朝着实用化、商业化的方向发展。

我国 InSAR 技术的研究与应用起步较晚,20 世纪 90 年代起,中国科学院电子学研究所、中国科学院遥感与数字地球研究所、北京航空航天大学、北京理工大学、南京航空航天大学、西安测绘研究所、西安电子科技大学等院校与科研单位均开展了 InSAR 的研究,但主要是利用国外星载干涉数据对 InSAR 信号处理进行研究。“十五”期间,国家 863 计划课题“机载干涉 SAR 系统”开启了我国 InSAR 实际系统的研制进程。2004 年,中国科学院电子学研究所研制成功国内首部机载 InSAR 系统原理样机^[45],并于 2004 年 5 月成功进行了飞行试验,获取了三维雷达影像图。该系统工作在 X 波段,采用标准模式,交轨基线为 0.56m,生成的 DEM 数据平面分辨率为 $2\text{m} \times 2\text{m}$,高程精度为 2~5m。它的研制成功验证了 InSAR 技术的应用潜力,填补了我国 InSAR 系统研制的空白,为进一步开展 InSAR 技术研