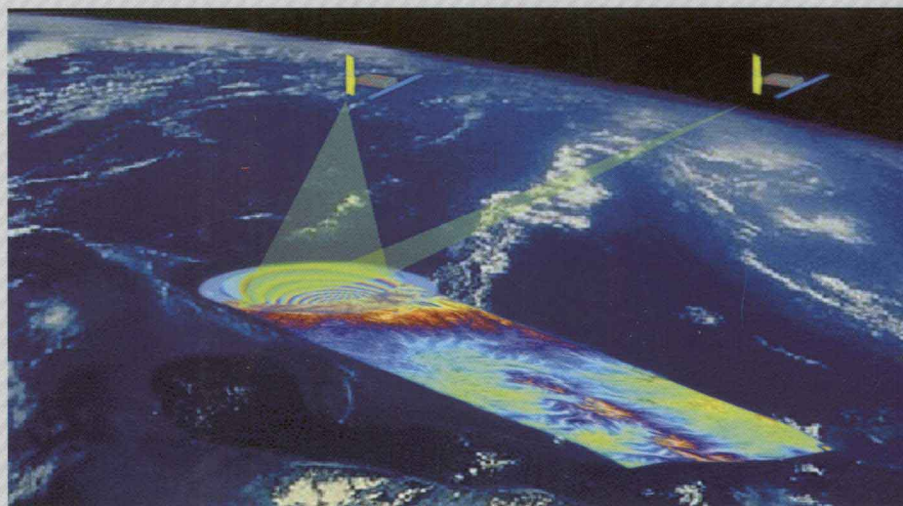




测·绘·科·学·与·技·术 著作系列

InSAR对地观测数据处理方法 与综合测量

何秀凤 何 敏 著



科学出版社

测绘科学与技术著作

InSAR 对地观测数据处理方法 与综合测量

何秀凤 何 敏 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要介绍 SAR 信号处理及 InSAR 技术在对地观测中的具体应用。书中首先介绍 SAR 图像的特征、SAR 干涉测量和差分干涉测量原理,详细描述 InSAR 数据预处理中斑点噪声的抑制和干涉基线的估计方法,全面系统地阐述了利用 SAR 幅度信息变化检测、利用干涉相干信息变化检测以及综合利用幅度和相干信息的变化检测的方法。最后,本书展示了 SBAS-DInSAR 技术、PS-DInSAR 技术和综合 InSAR 与 GPS 技术的地表形变监测研究成果。

本书可作为测绘工程和地质工程类高等学校研究生和高年级本科生的教学参考书,也可供相关专业的科技人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

InSAR 对地观测数据处理方法与综合测量/何秀凤,何敏著.

—北京:科学出版社,2011

(测绘科学与技术著作系列)

ISBN 978-7-03-032323-1

I. ①I… II. ①何… ②何… III. ①地面观测-数字图像处理
IV. ①P412.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 184973 号

责任编辑:童安齐 王 钰 / 责任校对:马英菊

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012年2月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2012年2月第一次印刷 印张: 15 1/2 插页: 8

印数: 1—1 500 字数: 299 000

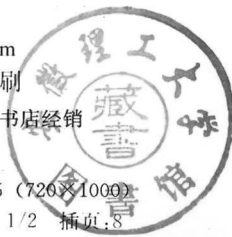
定价: 56.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137026 (BZ08)

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303



前 言

合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)是近 10 年发展起来的一项新的空间对地观测技术,也是一种独特的基于面观测的空间大地测量新技术。InSAR 技术利用星载或机载雷达信号的相位信息提取地球表面三维信息,能全天候、全天时地获取大面积地面精确三维信息,空间分辨率高,基本不受气候条件的影响。目前,在 InSAR 基础上扩展的差分干涉技术(differential InSAR, DInSAR)可测量微小的地表变形,已在研究地震变形、火山运动、冰川漂移、城市沉降以及山体滑坡等方面表现出强大技术优势和应用潜力。

本书是作者总结多年研究成果而写成的,力图兼顾入门性和前沿性两个方面。在建立基本概念的同时,详细论述 SAR 信号处理以及 InSAR 技术在对地观测中的具体应用,使读者对整个 InSAR 技术有系统性的认识。全书内容共十二章,分为四个部分。第一部分内容包括第一章和第二章,主要介绍 SAR 相关基本原理,建立基本概念,为后面详细介绍 InSAR 数据处理及其应用做铺垫。第二部分描述 SAR 信号分析和 InSAR 数据处理,包括第三章至第五章,详细介绍 InSAR 数据预处理中斑点噪声的抑制和干涉基线的估计,全面系统地分析不同地物的 SAR 后向散射特性,力图使读者较全面地理解 SAR 后向散射机制以及 InSAR 的数据预处理方法。第三部分探讨了 SAR 在地表变化检测中的应用,包括第六章至第九章,主要介绍根据在变化检测中利用 SAR 图像信息的不同,将 SAR 图像的变化检测分为三类,即利用幅度信息的变化监测、利用干涉相干信息的变化检测以及综合利用幅度和相干信息的变化检测。其中第六章和第七章介绍利用 SAR 幅度信息变化检测的典型应用;第八章阐述利用多时相 SAR 干涉相干信息变化监测的方法和具体应用实例;第九章介绍融合 SAR 幅度和相干信息变化检测方法,并利用实际数据进行实例分析。SAR 图像的信息有别于普通光学影像的信息,阅读第三部分内容,有助于读者理解和掌握 SAR 图像和光学影像之间的区别。第四部分阐述了 InSAR 在地表形变监测中的应用,包括

第十章至第十二章。首先说明常规 DInSAR 技术在地表形变监测中应用的局限性,然后重点阐述 SBAS-DInSAR 技术、PS-DInSAR 技术和综合 InSAR 与 GPS 技术的地表形变监测方法,此部分内容融合了作者及其课题组成员近几年来利用实际数据进行的大量研究成果。地表形变监测是 InSAR 众多应用领域中研究最早也是最活跃的研究内容,然而常规的 InSAR 地表监测存在许多局限性,阅读最后这部分内容,有助于读者了解学科的前沿和发展趋势。

本书内容反映了作者主持的两项国家自然科学基金项目(批准号:40974001、50579013)的研究成果。作者感谢国家自然科学基金委员会的资助;同时感谢罗海滨、黄其欢、常亮、仲海蓓、肖儒雅、陆晓燕、刘丽华等同学为本书提出的方法进行了大量的工程应用研究工作。

由于作者水平有限,书中不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

2010 年 12 月

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 InSAR 技术进展	1
1.1.1 SAR 的发展历史	1
1.1.2 InSAR 技术及其发展	3
1.1.3 我国合成孔径雷达与干涉测量技术发展现状	8
1.2 InSAR 数据处理软件	10
1.3 几种典型星载 SAR 卫星系统	12
1.3.1 ERS 系列雷达卫星	12
1.3.2 Envisat 雷达卫星	13
1.3.3 JERS-1 雷达卫星	14
1.3.4 ALOS 雷达卫星	15
1.3.5 Radarsat 雷达卫星	16
1.3.6 TerraSAR-X 雷达卫星	18
1.3.7 COSMO-SkyMed 雷达卫星	19
参考文献	20
第二章 SAR 干涉测量理论基础	25
2.1 SAR 成像原理	25
2.1.1 雷达的工作方式	25
2.1.2 真实孔径雷达成像原理	26
2.1.3 SAR 系统基本原理	28
2.2 SAR 图像的主要特性	30
2.2.1 侧视成像几何特性	30
2.2.2 斑点噪声特性	31
2.2.3 穿透特性	32
2.2.4 辐射特性	32
2.3 InSAR 及 DInSAR 技术	34
2.3.1 干涉相位组成	34
2.3.2 InSAR 原理	36
2.3.3 DInSAR 技术	37

2.4 雷达干涉测量数据处理流程	39
2.4.1 影像配准和重采样	39
2.4.2 干涉图和相干系数图生成	40
2.4.3 干涉图滤波	40
2.4.4 相位解缠	41
2.4.5 地理编码	41
参考文献	43
第三章 SAR 干涉图噪声抑制	45
3.1 概述	45
3.2 干涉图生成的前置滤波	46
3.2.1 距离向频谱位移滤波	46
3.2.2 方位向频谱位移滤波	47
3.3 均值滤波和自适应滤波相结合的 SAR 干涉图噪声抑制	47
3.3.1 多视数均值滤波	48
3.3.2 基于梯度的自适应滤波	48
3.3.3 均值滤波与自适应滤波相结合的综合滤波方法	49
3.3.4 试验结果与分析	49
3.4 基于小波域 HMT 模型 SAR 干涉图噪声抑制	52
3.4.1 基本原理	52
3.4.2 算法实现	54
3.4.3 试验结果与分析	54
3.5 基于静态小波变换 SAR 干涉图细节补偿噪声抑制	56
3.5.1 细节补偿概念	56
3.5.2 离散小波变换及 Mallat 算法	57
3.5.3 静态小波变换算法	58
3.5.4 细节补偿滤波方法的实现	59
3.5.5 试验结果与分析	59
参考文献	62
第四章 SAR 干涉基线估计方法	63
4.1 概述	63
4.2 轨道和基线	64
4.2.1 轨道基础知识	64
4.2.2 基线模型	66
4.2.3 InSAR 测量对基线精度的要求	68
4.2.4 最优基线参数	69

4.3 几种典型的基线估计方法	70
4.3.1 基于卫星轨道状态矢量的基线估计	70
4.3.2 基于干涉图条纹频率的基线估计	71
4.3.3 基于外部信息的基线估计	71
4.3.4 典型基线估计方法实验结果比较	72
4.4 基于 Kalman 滤波和配准参数的基线估计	74
4.4.1 InSAR 成像几何	74
4.4.2 基线估计状态空间模型	75
4.4.3 基线估计观测模型	75
4.4.4 Kalman 滤波方程	75
4.4.5 时变基线估计	76
4.4.6 实验结果	76
参考文献	78
第五章 地物 SAR 后向散射特性分析	80
5.1 概述	80
5.2 地物雷达遥感机理	81
5.2.1 影响地物后向散射特性的因素	81
5.2.2 建筑物后向散射机制	83
5.3 地物 SAR 后向散射强度特性分析	85
5.3.1 不同地物类型 SAR 后向散射强度比较	85
5.3.2 地物后向散射强度的时间特性	89
5.3.3 地物后向散射强度特性分析总结	90
5.4 地物 SAR 干涉相干特性分析	91
5.4.1 干涉相干系数生成	91
5.4.2 地物相干特性分析	92
5.4.3 高相干性目标时序分析	95
5.4.4 地物干涉相干特性分析总结	97
5.5 地物后向散射强度特性与相干特性的关系分析	97
参考文献	98
第六章 利用 SAR 幅度信息的地表变化检测	100
6.1 概述	100
6.2 SAR 差异图像构造	101
6.3 基于广义高斯模型的变化检测	104
6.3.1 广义高斯分布模型的定义	104
6.3.2 SAR 幅度差异图像广义高斯分布模型的建立	104

6.3.3 广义高斯模型的参数估计	105
6.4 改进的 KI 变化阈值选取方法	106
6.5 实验结果与分析	107
6.5.1 模拟 SAR 图像变化检测实验	107
6.5.2 真实 SAR 图像变化检测实验	109
6.5.3 结论与分析	111
参考文献	112
第七章 利用 SAR 幅度信息评估地震引起的城市破坏程度	114
7.1 概述	114
7.2 地震前后建筑物 SAR 图像特征分析	115
7.2.1 研究区域与实验数据	115
7.2.2 地震前后建筑物 SAR 图像特征分析	117
7.3 地震引起的建筑物破坏程度评估模型	118
7.4 评估建筑物破坏程度的 SAR 图像处理流程	120
7.5 实验结果与分析	121
参考文献	124
第八章 利用多时相 SAR 干涉相干信息的地表变化检测	126
8.1 概述	126
8.2 InSAR 相干系数与相干系数变化指数	126
8.2.1 去相干源分析	126
8.2.2 相干系数快速估计	132
8.2.3 时间去相干系数估计	133
8.2.4 相干系数变化指数定义与估计	134
8.3 实验区相干系数变化指数分析	135
8.4 实验结果与精度评定	138
参考文献	140
第九章 融合多时相 SAR 幅度信息和相干信息的地表变化检测	142
9.1 概述	142
9.2 融合幅度信息和相干信息城市变化检测数据处理流程	143
9.3 多时相 SAR 图像差异特征估计	144
9.3.1 多时相 SAR 幅度差异特征估计	144
9.3.2 多时相 SAR 相干差异特征估计	145
9.4 基于二维模糊熵的差异特征融合与变化检测	145
9.4.1 差异特征二维直方图	145
9.4.2 融合差异特征的二维模糊熵表达	146

9.4.3 利用遗传算法获取模糊熵最优阈值	149
9.5 实验结果与分析	150
9.5.1 实验数据	150
9.5.2 差异特征提取	151
9.5.3 变化区域提取与分析	152
参考文献	154
第十章 利用 DInSAR 方法监测地表形变	155
10.1 概述	155
10.2 利用差分干涉测量方法获取 DEM	156
10.2.1 传统方法获取 DEM	156
10.2.2 航天飞机雷达制图任务 (SRTM)	157
10.2.3 星载重轨 SAR 干涉测量方法	158
10.2.4 SRTM 与星载重轨 SAR 干涉测量获取 DEM 精度比较	159
10.3 DInSAR 技术监测地震形变	162
10.3.1 研究区域概况	162
10.3.2 三通法差分干涉测量	163
10.3.3 两通法差分干涉测量	163
10.3.4 基于精密卫星轨道的三通法差分干涉测量结果	165
10.4 利用 DInSAR 技术监测南京地表沉降	169
10.4.1 南京地区 SAR 数据	170
10.4.2 南京地区 SAR 数据相干性分析	170
10.5 常规 DInSAR 技术监测地表形变的局限性	175
参考文献	177
第十一章 基于 SBAS-DInSAR 方法的地表形变监测	179
11.1 概述	179
11.2 SBAS-DInSAR 方法	179
11.3 附加约束条件的 SBAS-DInSAR 方法	181
11.3.1 矩阵奇异值分解	181
11.3.2 附加约束条件的 SBAS-DInSAR 方法	182
11.4 相干目标提取	184
11.5 离散点相位解缠	186
11.6 大气相位分离	187
11.7 SBAS-DInSAR 方法探测地表形变试验结果	188
11.7.1 研究区域与数据处理	188
11.7.2 精度分析与沉降原因探讨	194

11.8	SBAS-DInSAR 法的优势与不足	196
11.9	扩展 SBAS-DInSAR 形变监测方法	197
11.9.1	多平台 SBAS-DInSAR 方法	197
11.9.2	全分辨率 SBAS-DInSAR 方法	199
11.9.3	邻域差分 SBAS-DInSAR 方法	202
	参考文献	208
第十二章	综合 GPS、InSAR 及 PS-DInSAR 技术监测地表形变	210
12.1	概述	210
12.2	InSAR 视线向形变观测值与地表三维形变的关系	210
12.3	基于马尔可夫随机场的 GPS 和 InSAR 综合方法	212
12.3.1	能量函数的确定	212
12.3.2	模拟退火法求能量函数最小值	213
12.3.3	解析法求能量函数最小值	214
12.4	改进的基于马尔可夫随机场的 GPS 和 InSAR 综合方法	214
12.4.1	传统定权方法存在的问题	214
12.4.2	改进的定权方法	215
12.4.3	实验结果与分析	217
12.5	GPS 和 PS-DInSAR 综合方法及其在地面沉降监测中的应用	221
12.5.1	PS-DInSAR 技术及其特点	221
12.5.2	PS 差分观测方程及其参数求解	222
12.5.3	PS-DInSAR 技术在江苏盐城市地面沉降监测中的应用	224
12.5.4	PS-DInSAR 技术在江苏南通市地面沉降监测中的应用	228
12.5.5	利用 GPS 提高 PS-DInSAR 测量精度探讨	232
	参考文献	236

第一章 绪 论

1.1 InSAR 技术进展

InSAR 是一个多重嵌套的缩写词,由雷达 (radar, radio detection and ranging)、合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR)、合成孔径雷达干涉测量 (SAR interferometry, InSAR) 嵌套而成。这种嵌套关系反映了 InSAR 的发展经历了“地面探测雷达—成像合成孔径雷达—合成孔径雷达干涉”的过程,同时也说明了 InSAR 是合成孔径雷达遥感成像与电磁波干涉两大技术的融合^[1]。因此,在介绍 InSAR 技术的发展之前,首先介绍 SAR 的发展。

1.1.1 SAR 的发展历史

雷达出现于第二次世界大战期间,最初用于军事上探测空中和地面的运动目标,如飞机、舰船等,工作波长为米波和分米波。1951 年,Carl Wiley 首先发现多普勒频移现象能用来逻辑地合成一个更大的雷达孔径,因而极大地改善了真实孔径的方位向分辨率^[2],自此,掀起了对合成孔径雷达的理论和应用研究。1957 年 8 月世界上第一部实用的 X 波段 SAR 实验飞行成功地获得了密歇根州部分地区的 SAR 影像,并于 1960 年公布了所摄影像和该 SAR 样机的研究报告^[3]。

1978 年 6 月发射升空的海洋卫星 (Seasat-A) 上的合成孔径雷达系统首次获取了大范围高分辨率海域图,并显示了光学遥感未观察到的特征^[4]。卫星运行虽然短促,但是实现了距离和方位分辨率均为 25m 的高质量 SAR 图像,完成了微波雷达对海洋的全天候、全天时观测。在此之后,1981 年和 1984 年美国又成功地利用哥伦比亚号和挑战者号航天飞机发射了单频、单极化成像雷达 SIR-A 和 SIR-B,其中 SIR-A 雷达图像发现了撒哈拉大沙漠的地下古河道,引起了科技界的广泛关注^[5]。

进入 20 世纪 90 年代之后, SAR 卫星技术得到飞速发展,欧洲空间局 (European Space Agency, ESA) 于 1991 年 7 月利用阿里亚娜-4 火箭发射了欧洲遥感卫星 1 号 (European Remote Sensing Satellite, ERS-1), 1995 年又发射了 ERS-2 卫星,并与 ERS-1 形成串行模式 (tandem mode),可在一天内对相同地区进行扫描形成 SAR 干涉图,为星载 SAR 干涉测量研究与应用提供了大量优质的数据资料,从而揭开了新一轮干涉 SAR 研究的热潮^[5]。

加拿大于 1995 年 11 月成功地发射了第一颗商业化雷达卫星 Radarsat-1, 这颗雷达卫星为 C 波段, 单极化 (HH), 可选用 25 种不同模式的波束, 单视图像分辨率达 9m, 且视角在较大范围 ($10^{\circ} \sim 60^{\circ}$) 内可调。此外, 苏联 1991 年发射的 ALMAZ-1 和日本 1992 年发射的 JERS-1 成像雷达卫星, 虽然都存在一定的故障或性能不佳问题, 但为其后的研究工作奠定了基础, 特别是 L 波段的 JERS-1 系统受空间基线和时间去相干影响相对 C 波段系统较小, 在去相干严重地区优势明显。

由美国航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 研制的 LightSAR (light synthetic aperture radar) 卫星于 2002 年 7 月 1 日升空, 该系统将 L 波段用于重复轨道干涉测量和获取目标的表面特征, 采用 HH、HV、VH 和 VV 等 4 种极化方式, 有多种工作模式, 分辨率为 3~100m, 入射角为 $20^{\circ} \sim 53^{\circ}$ 。

2002 年 3 月欧洲空间局发射的 Envisat 卫星载有 10 类有效载荷, 其中搭载的先进合成孔径雷达系统 (advanced synthetic aperture radar, ASAR) 工作在 C 波段, 继承了 ERS-1/2 成像模式的优点, 并在覆盖率、入射角范围、极化和工作模式选择上增加了新的功能。在交替极化模式情况下, 发射和接收的极化方式可以任意选择, 使两种极化能够同时成像, 入射角为 $15^{\circ} \sim 45^{\circ}$, Envisat ASAR 影像具有不同的空间分辨率, 主要用于海洋监测、地球环境监测及气候变化对地球环境的影响等研究。

Radarsat-2 是加拿大继 Radarsat-1 之后的新一代商用合成孔径雷达卫星。为了保持数据的连续性, Radarsat-2 继承了 Radarsat-1 所有的工作模式, 并在原有的基础上增加了多极化成像, 3m 分辨率成像, 双边 (dual-channel) 成像和动目标检测实验 (moving object detection experiment, MODEX)。Radarsat-2 与 Radarsat-1 拥有相同的轨道, 为了获得两星干涉数据, Radarsat-2 比 Radarsat-1 滞后 30min。Radarsat-2 的用途是给用户提全极化方式的高分辨率星载合成孔径雷达图像, 在地形测绘、环境监测、海洋和冰川的观测等方面都有很高的实用价值。

日本于 1993 年开始了先进陆地观测卫星 (advanced land observing satellite, ALOS) 系统的概念性研究以及相应的遥感传感器制造和试验研究, 2006 年 1 月 24 日成功发射 ALOS 卫星。ALOS 采用高分辨率和微波扫描, 搭载相阵型 L 波段合成孔径雷达 PALSAR (phased array type L-band synthetic aperture radar), 主要用于发展陆地探测技术, 在测图、区域性观测、灾害监测和资源调查等方面做出了贡献。

由意大利航天局和意大利国防部共同研发的 COSMO-SkyMed 系统由 4 颗雷达卫星组成星座。2010 年 11 月 6 日在美国加利福尼亚范登堡空军基地第二太空发射台将 COSMO-SkyMed 系统的第 4 颗雷达卫星送入太空, 标志着整个星座组

建成功。四颗雷达卫星都携带 X 波段高分辨率合成孔径雷达,前三颗 COSMO-SkyMed 雷达卫星分别于 2007 年 6 月 8 日、2007 年 12 月 9 日和 2008 年 10 月 25 日发射。COSMO-SkyMed 雷达卫星的最高分辨率为 1m,扫描带宽为 10km,该卫星星座特有的高重访周期为雷达干涉测量提供了更为广阔的应用领域。

阿根廷于 2007 年 12 月 31 日发射了 SAOCOM 卫星,由两个 L 波段 SAR 卫星组成星座,卫星轨道高度约为 629km,最大重访周期 16 天。意大利的 COSMO-SkyMed 星座和阿根廷的 SAOCOM 星座收集的数据是全世界特有的,二者将联合营运提供与环境监视及风险管理、环境资源管理、海事管理及科学应用相关的数据与服务。

最引人注目的德国 TerraSAR-X 雷达卫星,于 2007 年 6 月 15 日成功发射,它是由德国教育科技部、德国航天局及 Astrium GmbH 公司三家单位合作研制的 X 波段合成孔径雷达卫星^[6]。作为民用卫星,TerraSAR-X 提供世界最高分辨率的雷达观测数据,具有全天候观测能力,可提供多种极化方式、多种分辨率的数据产品,应用于土地利用、基础地图、突发事件检测、农产品和森林情况监测等多个领域。此外,2010 年 6 月 21 日成功发射的 TanDEM-X 雷达卫星与 TerraSAR-X 组成串行飞行模式,预计在两年半的时间内完成对全球的地形测量,其地面分辨率将达到 12m,高程的精度优于 2m^[7]。

1.1.2 InSAR 技术及其发展

一幅 SAR 图像包括两种信息,即后向散射的强度(幅度)信息和相位信息。在 SAR 图像最初的应用中,由于单幅 SAR 图像的相位信息是杂乱无章的,没有规律性,人们只利用了后向散射的强度(幅度)信息,而没有考虑相位信息。随着研究与应用的发展,一次偶然的机会,科学家将两幅具有相干性的 SAR 图像进行干涉处理,发现相位信息表现出很强的规律性,由此诞生了 InSAR 技术^[8]。在两幅 SAR 图像的基础上,引入更多的 SAR 图像或外部信息,进行差分处理。DInSAR 技术是基于 InSAR 技术发展起来的。然而,在 DInSAR 技术的应用中,发现 DInSAR 技术受到时空基线去相关的影响,当空间基线超过临界基线或研究区植被覆盖严重时,DInSAR 技术不能成功应用。为了克服时空基线去相关对常规 DInSAR 的影响,出现了基于时间序列分析的差分干涉测量技术,如 PS-DInSAR、CR-DInSAR 和 SBAS-DInSAR 等。

1. InSAR 地形测量阶段

InSAR 是利用雷达复数数据相位值来提取地表三维地形信息的,由 Rogers 等^[9]于 1969 年提出并应用于金星表面观测的。1974 年,Graham^[10]首次利用机载双天线 X 波段合成孔径雷达干涉测量得到地形高度图像,Graham 以机载双天

线单航过光学 SAR 成像处理为背景, 阐述了 SAR 干涉测量用于数字高程制图的原理, 并推导了干涉图中暗条与入射角及地面高度的关系。

1985 年, 美国喷射推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) 的 Zebker^[11] 和 Goldstein^[12] 研究利用机载 SAR 干涉获取地形。他们在飞机上安装相距 11.1m 的两个 SAR 天线, 获得 2~10m 分辨率的地形数据。他们于 1986 年发表的观测试验结果引起了全世界学者的广泛关注。

Goldstein 等^[12] 在 1988 年用机载 SAR 干涉技术处理了 Seasat 卫星影像的数据。他们所研究的测试区是位于美国死谷 (Death Valley) 中的棉球盆地 (cotton ball basin), 利用相隔 3 天的 Seasat SAR 数据生成的地形图和公开发表的美国地理测绘图 (US Geological Survey maps, USGS) 相符性很好。此后, 他们开始利用干涉技术来处理 SIR-B 数据, 相应的 SAR 图像亚像元级精确配准以及相位解缠的基本方法也相继出现^[13]。Li 及 Goldstein 在 1990 年研究了不同的基线长度对地形制图所产生的影响, 并提出了最优基线的概念^[14]。

1991 年欧空局发射了 C 波段 ERS-1 (European Remote Sensing Satellite) 卫星, 人们可以利用由 ERS-1 获取的两幅相隔一定时间的 SAR 图像进行干涉处理。1995 年, ERS-2 的发射使得同时利用 ERS-1 和 ERS-2 相隔 1 天的图像进行干涉处理成为可能, 大大提高了处理的精度。2000 年初, 美国“奋进”号航天飞机采用 InSAR 技术, 在 11 天内, 成功地获取了覆盖地球表面 80% 的精度达 30cm 的高分辨率地形数据, 实现了迄今为止高精度的全球数字高程模型 (DEM) 的构建。

2. DInSAR 形变监测阶段

DInSAR 是在 InSAR 基础上发展起来的。1989 年 Gabriel 等^[15] 首次论证了 SAR 差分干涉技术可用于探测厘米级精度的地表形变, 并用 Seasat L 波段 SAR 测量美国加利福尼亚州东南部的英佩瑞尔河谷 (Imperial valley) 灌溉区的地表形变, 但他的工作并没有得到足够的重视, 直到 1993 年 Massonnet 等^[16] 利用 ERS-1 SAR 数据采集了 1992 年的 Landers 地震 ($M=7.2$) 的形变场, 并将 DInSAR 的测量结果与其他类型的测量数据以及弹性形变模型进行比较, 结果相当吻合, 其研究成果发表在 Nature 上, 引起了国际地震界的震惊, SAR 差分技术在探测地表形变方面的威力才被大家所认识。此后, DInSAR 在地球表面形变探测方面的研究在世界各国开展起来, 早期主要是开展形变比较明显的地震、火山活动的监测研究, 随着 DInSAR 技术的不断成熟和研究的深入, 研究重点逐渐转移至地面沉降、山体滑坡等细微持续的地表形变。

DInSAR 应用最普遍且最有效的是测量地震形变场, 世界上较为活跃的几个地震区都已使用 DInSAR 技术对地震引起的形变场进行了成图, 如 1992 年美国加

州兰德斯地区的 $M=7.2$ 级地震^[17], 1993 年美国加州尤里卡山谷地区的 $M=6.1$ 级地震^[18], 1994 年美国加州北岭地区的 $M=6.7$ 级地震^[19], 1997 年美国赫克托矿山地区 $M=7.1$ 地震^[20], 2003 年伊朗 Bam 地震^[21], 1995 年希腊北部 Grevena 地震^[22]。DInSAR 技术可以使人们直接获取大范围的、连续空间覆盖的断层位移和运动速率等定量化的基础数据, 为深入了解地震重复间隔、潜在震源区等问题, 从而认清地震应力-应变的积累与释放过程提供准备。在我国, 利用 DInSAR 技术研究地震形变发展得很快, 如王超^[23]、单新建^[24,25]等利用 DInSAR 技术获取了 1998 年 1 月 10 日张北—尚义地震 ($M=6.2$) 的同震形变, 并利用同震形变场图像对张北—尚义地震的破裂特征进行了研究, 获取了发震断层的几何学和运动学参数; 单新建^[25]、张景发^[26]等深入研究了 1997 年 11 月 9 日西藏玛尼 $M=7.4$ 级地震震前一年的地壳形变和同震形变。研究表明, 发震断层两侧的变形场在垂向距断层 110km 的区域仍受同震形变场影响, 且地表破裂带造成的非相干性条带贯穿整个图像, 长约 110km。许才军等^[27]利用 L 波段 ALOS/PALSAR 数据对 2008 年汶川地震 ($M=8.0$) 做了较为详细的研究, 获取覆盖震区的同震形变场, 与 GPS 同震观测结果进行了比较分析, 两者之间具有很好的一致性, 通过传统差分干涉获取到的形变量精度可以达到厘米级。

准确地进行地表形变监测能够对火山爆发进行预测, DInSAR 形变监测技术不需要先期布置地面控制点, 这样可保证人员的安全, 同时, SAR 数据能够对整个火山地区进行制图, 这种大范围的详细空间覆盖数据能够提供有关岩浆移动和其他运动过程的重要信息。1995 年 Massonnet 等^[28]利用差分干涉测量数据监测意大利的 Etna 火山形变, 证明了利用 DInSAR 技术监测火山形变的可行性。目前已有许多学者利用 DInSAR 技术研究火山形变情况, 如意大利的 Etna 火山^[29]、阿拉斯加活火山^[30]等。Fujiwara 等^[31]利用 L 波段的 JERS 卫星对日本伊豆半岛火山进行了研究; Sigurjon Jonsson 对 Isabela 和 Fernandina 岛屿的 Darwin 和 Sierra Negra 火山进行了研究^[32]; Rosen 等对 Kilauea 火山进行了研究^[33]; Carn 对印度尼西亚热带潮湿地区的爪哇岛上的火山利用 JERS 进行了研究, 探讨了 DInSAR 技术在热带潮湿地区的可行性^[34]。

在城市地表沉降监测方面, 1997 年, Marco^[35]利用 6 个 ERS SAR 图像对对美国加利福尼亚 Belridge 油气田 1992 年到 1996 年的沉降进行了监测, 所得结果与常规方法吻合得很好, 最大误差小于 5mm; 同年, Massonnet 等^[36]对美国加利福尼亚 East Mesa 地区地热场活动引起的地面沉降进行了研究, 其结果与水准测量的结果相一致; 1998 年 Fielding 等^[37]利用 ERS SAR 数据监测油田的地面快速沉降; 1999 年 Wegmuller 等^[38]利用 1992 年 8 月至 1996 年 5 月的 ERS 数据监测意大利 Bologna 城的沉降情况, 并与水准测量数据和 GPS 数据进行分析比较, 得到较一致的形变场和形变速率结果; 2001 年, Hoffmann 等^[39]对美国拉

斯维加斯山谷由地下水位变化引起的季节性的地面沉降和回升进行了研究,为进一步研究含水层结构提供了条件;2003年,Vincent等^[40]对地下核试验引起的地面沉降进行了研究,指出与普通遥感相比,InSAR技术在探测范围1~2km、量级数厘米的地面沉降方面具有较大优势;1998年Galloway等^[41]研究了加州地区地表沉降与含水层系统压缩之间的关系;同年,Hoffmann^[42]研究了加利福尼亚地区Antelope山谷由于抽取地下热水资源发电而导致的地面沉降,并且研究了其含水层的周期变化与地面沉降的关系,由于该地区是地热资源丰富的地区,植被稀少,图像相干性很好,研究表明DInSAR能以毫米级精度监测该地区每年周期性的沉降。

我国地面沉降现象日趋严重,受其驱动,利用InSAR技术监测地面沉降在我国得到快速发展,在苏州、沧州、天津和上海等一些大城市取得一批有价值的研究成果。2002年,王超等^[43]利用1993年到2000年的ERS-1/2 SAR数据对苏州地面沉降进行了监测,通过与水准数据的比较证明,所得结果与水准观测值的相关度达0.943,标准误差均值为0.1706,测量精度可达5mm。2006年,Gong等^[44]利用JERS-1 SAR数据对沧州地区由地下水开采造成的地面沉降进行了研究,所得结果与实地观测值相一致。2004年,李陶等^[45]利用ERS-1/2 SAR数据对天津市1992年到1997年的地面沉降进行了研究,发现4个沉降漏斗,且测得其中一个沉降漏斗的沉降速率为3.1cm/a,与水准获得的结果一致。2008年,为了克服C波段SAR数据的去相干问题,Damoah-Afari等^[46]利用1992年到1998年8幅JERS-1 SAR数据对上海地面沉降进行了监测,所得累计沉降图与其他测量方法所得结果一致。刘国祥等^[47]利用ERS-2 SAR数据对建立在近海回填地基上的香港赤腊角机场的稳定性进行了研究,获取了赤腊角机场近乎一年内的非均匀沉降量,该结果与水准数据的相关度达到0.89。

3. 基于时序分析的差分干涉测量形变监测阶段

随着DInSAR技术应用的不断扩展,其缺陷如大气扰动的影响、时间和空间去相干问题变得越来越突出。为了克服上述缺陷,人们提出永久散射体差分干涉测量(PS-DInSAR)、人工角反射器差分干涉测量(CR-DInSAR)、短基线差分干涉测量(SBAS-DInSAR)等新技术。

1) 永久散射体差分干涉测量(PS-DInSAR)技术

PS-DInSAR技术最早由意大利Ferretti等^[48]提出,其特点是通过长时间SAR影像序列的分析来识别稳定反射点即PS点。由于PS点的尺度小于SAR影像分辨单元的大小,因而在进行DInSAR处理时,即使SAR影像对的空间基线较长,PS点仍能保持较高的相干性。利用长时间SAR影像序列,通过对PS点上差分干涉相位各组成分量的简单统计假设可以估计并消除PS点上大气和地形