



GBSAR

监测技术及其应用

主编 岳建平 邱志伟 徐佳



WUHAN UNIVERSITY PRESS
武汉大学出版社

GBSAR

监测技术及其应用

主编 岳建平 邱志伟 徐佳



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

GBSAR 监测技术及其应用/岳建平,邱志伟,徐佳主编.—武汉:武汉大学出版社,2021.3

ISBN 978-7-307-21760-7

I .G… II .①岳… ②邱… ③徐… III .工程测量—高等学校—教材 IV .TB22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2020)第 165352 号

责任编辑:杨晓露

责任校对:汪欣怡

版式设计:韩闻锦

出版发行: **武汉大学出版社** (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮箱: cbs22@whu.edu.cn 网址: www.wdp.com.cn)

印刷:武汉图物印刷有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:11.75 字数:276千字 插页:1

版次:2021年3月第1版 2021年3月第1次印刷

ISBN 978-7-307-21760-7 定价:30.00元

版权所有,不得翻印;凡购我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

21 世纪初, 自地基合成孔径雷达 (GBSAR) 监测系统被用于结构体的变形监测以来, 该技术已经在许多领域得到了成功的应用。目前, 较为成熟的地基雷达监测系统主要有: 欧盟综合研究中心研制的 LISA 系统、意大利 IDS 公司研发的 IBIS 系统、澳大利亚大地勘测公司生产的 SSR 系统等。GBSAR 监测系统在许多方面存在优点, 如: 测量范围广、精度高、连续观测、受观测条件影响小等, 成为变形监测领域的一项很有发展前景的新技术。

中国在该领域的研究虽起步较晚, 但也取得了较丰富的成果, 如在监测系统研制方面成功研制了边坡合成孔径雷达监测预警系统(简称“边坡雷达”, S-SAR), 该系统能对露天矿边坡、水电库岸和坝体边坡、山体滑坡、大型建构筑物的变形、沉降等实施大范围连续监测, 对各种塌陷灾害进行预警预报。另外, 在数据处理、分析等方面也取得了大量的成果。

为进一步完善该研究领域的相关理论, 拓展该技术的应用空间, 本书对该领域的研究成果进行了系统的整理和总结。本书系统介绍了 GBSAR 系统的构成、原理和特点, 阐述了影像配准、干涉图生成与相干性估计、相位解缠、形变信息提取等技术流程, 分析了形变监测中的误差来源, 研究了基于像素偏移量、点目标偏移量、永久散射体以及平均子影像集等时序分析方法, 详细介绍了该技术在大坝、滑坡、桥梁和矿山监测中的应用实例。

本书整体理论先进, 反映了当前该领域的最新研究成果; 紧密结合工程实际, 以典型的工程领域作为应用实例。本书可作为测绘工程、土木工程等相关专业教学用书, 也可作为科研人员、工程技术人员的参考用书。

本书的编写分工如下: 岳建平(河海大学)负责全书的内容组织和统稿; 邱志伟(江苏海洋大学)负责各章节内容的整理与翻译; 徐佳(河海大学)负责全书的整理与校对等工作。

本书在编写过程中查阅了大量参考文献, 在此对这些资料的作者表示衷心的感谢! 由于编者水平有限, 书中难免存在错误, 敬请读者批评指正。

编者

2020 年 1 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究目的与意义	1
1.2 变形监测新技术	2
1.2.1 测量机器人监测技术	2
1.2.2 GNSS 形变监测技术	2
1.2.3 激光技术	3
1.2.4 自动化监测技术	3
1.2.5 光纤传感监测技术	4
1.2.6 三维激光扫描技术	4
1.2.7 InSAR 监测技术	5
1.2.8 GBSAR 监测技术	5
1.3 国内外研究现状	6
1.3.1 InSAR 技术研究进展	6
1.3.2 GBSAR 技术研究进展	8
1.4 目前存在的主要问题	10
1.5 本书内容及章节安排	10
第 2 章 地基雷达系统简介	12
2.1 地基雷达系统的分类	12
2.1.1 合成孔径雷达系统	12
2.1.2 真实孔径雷达系统	14
2.1.3 新体制雷达系统	16
2.2 常用 GBSAR 系统介绍	17
2.2.1 LISA 系统(欧盟)	17
2.2.2 IBIS 系统(意大利)	18
2.2.3 SSR 系统(澳大利亚)	21
2.2.4 S-SAR 系统(中国)	22
第 3 章 GBSAR 干涉测量原理	24
3.1 GBSAR 成像原理	24
3.1.1 线性调频与脉冲压缩技术	24

3.1.2	合成孔径原理	26
3.1.3	GBSAR 成像算法	27
3.1.4	GBSAR 影像的主要特性	31
3.2	GBSAR 监测原理	32
3.2.1	InSAR 基本原理	32
3.2.2	GBSAR 几何测量原理	34
3.2.3	GBSAR 变形监测原理	37
3.3	GBSAR 变形监测方法	38
3.3.1	连续监测方法	38
3.3.2	非连续监测方法	40
第 4 章	GBSAR 干涉测量技术流程	41
4.1	SAR 影像配准	41
4.2	干涉图生成与相干性估计	44
4.3	相位解缠	46
4.4	大气相位估计	47
4.5	视线向(LOS)形变解算	49
第 5 章	GBSAR 误差源分析	51
5.1	雷达系统误差	51
5.1.1	多普勒质心差	51
5.1.2	噪声误差	51
5.2	数据采集误差	53
5.2.1	几何关系不一致	53
5.2.2	大气误差	54
5.3	数据处理误差	55
5.3.1	解缠误差	55
5.3.2	形变量解算误差	56
5.4	地基雷达监测精度测试	57
第 6 章	GBSAR 相位解缠方法	61
6.1	一维相位解缠	61
6.2	二维相位解缠	62
6.2.1	基于路径积分的解缠方法	63
6.2.2	基于全局最优的解缠方法	64
6.3	“2+1D”时空三维解缠方法	66
6.3.1	时序 1D 解缠方法	66
6.3.2	时空三维解缠实验	68

第 7 章 大气相位去除方法	71
7.1 大气相位影响分析	71
7.2 气象参数改正法	73
7.3 固定点法	75
7.3.1 一阶改正模型	76
7.3.2 二阶改正模型	76
7.4 二次曲面拟合法	77
7.4.1 基本原理	77
7.4.2 实例分析	79
第 8 章 GBSAR 时序分析方法	82
8.1 基于像素偏移量的时序分析	82
8.1.1 重采样后影像的像素偏移估计	83
8.1.2 地表水平向的形变恢复	84
8.2 基于永久散射体的时序分析	84
8.2.1 GBSAR 连续影像序列的干涉分析	85
8.2.2 GBSAR PS 点的相位差分模型	85
8.2.3 GBSAR PS 点的识别方法	87
8.2.4 PS 点目标相位序列的干涉分析	91
8.3 基于平均子影像集的时序分析	94
8.3.1 GBSAR 子影像集的平均影像图与 PS 点提取	94
8.3.2 平均影像序列的干涉分析与线性变形速率估计	95
第 9 章 变形监测数据融合方法	98
9.1 GBSAR 与光学影像融合	98
9.1.1 研究区概况	98
9.1.2 融合方法	98
9.1.3 结论	103
9.2 GBSAR 与 TLS 融合方法	103
9.2.1 概况	103
9.2.2 融合方法	105
9.2.3 结论	109
9.3 GBSAR 与 GNSS 融合方法	109
9.3.1 概况	109
9.3.2 融合方法	110
9.3.3 结论	115

第 10 章 大坝监测应用	116
10.1 实验区概况	116
10.2 实验方案	117
10.3 实验结果分析	119
10.3.1 影像相干分析与 PS 点提取	119
10.3.2 大气相位拟合与坝面形变分析	121
10.3.3 垂线数据比较与坝体变形分析	122
第 11 章 滑坡监测应用	125
11.1 Carnian Alps 滑坡	125
11.1.1 测区概况	126
11.1.2 滑坡形变监测方法	127
11.1.3 GBSAR 监测和数据处理	128
11.1.4 实验结果分析	129
11.2 Vallcebre 滑坡	132
11.2.1 测区概况	132
11.2.2 滑坡形变监测方法	133
11.2.3 实验结果分析	134
第 12 章 桥梁监测应用	138
12.1 香港汀九桥和青马大桥	138
12.1.1 桥梁概况	138
12.1.2 汀九桥形变监测	138
12.1.3 青马大桥形变监测	144
12.1.4 结论	145
12.2 Capriate 桥梁监测	146
12.2.1 Capriate 桥梁概况	146
12.2.2 桥梁监测方法	146
12.2.3 从雷达传感器获得的结果	149
12.2.4 结论	150
第 13 章 矿山监测应用	153
13.1 安家岭矿区监测与分析	153
13.1.1 测区概况	153
13.1.2 监测数据	154
13.1.3 形变分析	155
13.1.4 数据处理	157
13.1.5 实验结果分析	159

13.2 平朔露天矿边坡监测.....	161
13.2.1 测区简介.....	161
13.2.2 数据获取.....	161
13.2.3 数据处理.....	162
13.2.4 数据分析.....	162
参考文献.....	166

第 1 章 绪 论

1.1 研究目的与意义

变形监测是指采用一定的测量手段对被监测对象（简称变形体）进行测量，以确定其空间位置及内部形态随时间变化的测量工作。变形监测又称变形测量或变形观测。变形体一般包括工程建筑物、技术设备以及其他自然或人工对象，如：大坝、桥梁、电视塔、大型天线、油罐、滑坡体等。

由于大型建筑物在国民经济中的重要性，其安全问题受到普遍的关注，政府和地方部门对安全监测工作都十分重视，因此，绝大部分的大型建筑物实施了监测工作。对建筑物进行安全监测的主要目的有以下几个方面。

1. 分析和评价建筑物的安全状态

工程建筑物的安全监测是随着工程建设的发展而兴起的一门年轻学科。改革开放以后，我国兴建了大量的水工建筑物、大型工业厂房和高层建筑物。由于工程地质、外界条件等因素的影响，建筑物及其设备在施工和运营过程中都会产生一定的变形。这种变形常常表现为建筑物整体或局部发生沉陷、倾斜、扭曲、裂缝等。如果这种变形在允许的范围之内，则认为是正常现象。如果超过了一定的限度，就会影响建筑物的正常使用，严重的还可能危及建筑物的安全。因此，在工程建筑物的施工和运营期间，都必须对它们进行安全监测，以监视其安全状态。

2. 验证设计参数

安全监测的结果也是对设计数据的验证，并可为改进设计和科学研究提供资料。由于人们对自然的认识不够全面，不可能对影响建筑物的各种因素都进行精确计算，设计中往往采用一些经验公式、实验系数或近似公式进行简化，在理论上不够严密，有一定的近似性。对正在兴建或已建工程的安全监测，可以验证设计的正确性，修正不合理的部分。另外，对于一些新型的大型建筑物（如特大型桥梁等），由于其结构特殊，可参考经验少，需要通过监测对设计的理论和参数等进行验证，以积累经验，完善设计理论。

3. 反馈设计施工质量

安全监测不仅能监视建筑物的安全状态，而且对反馈设计施工质量等起到重要作用。例如，葛洲坝大坝是建在产状平缓、多软弱夹层的地基上，岩性的特点是砂岩、砾岩、粉砂岩、黏土质粉砂岩互层状，因此，担心开挖后会破坏基岩的稳定，通过安装大量的基岩变形计，在施工期间及 1981 年大江截流和百年一遇洪水期间的观测结果表明，基岩处理后，变形量在允许范围内，验证了大坝是安全稳定的。

4. 研究正常的变形规律

由于人们认识水平的限制,对许多问题的认识有一个由浅入深的过程,而大型建筑物由于结构类型、建筑材料、施工模式、地质条件的不同,其变形特征和规律存在一定的差异,因此,对现有建筑物实施安全监测,从中获取大量的监测信息,并对这些信息进行系统的分析研究,可寻找出建筑物变形的基本规律和特征,从而为监控建筑物的安全、预报建筑物的变形趋势等提供依据。

1.2 变形监测新技术

变形监测方法主要有大地测量、GNSS 测量、摄影测量、三维激光扫描、专门测量等。大地测量的方法精度高、应用灵活、适用范围广,但野外工作量大;GNSS 测量技术可提供大范围的变形信息,但受观测环境影响大,如在山区峡谷,GNSS 卫星可见数少,几何强度差,多路径效应明显,定位结果可靠性低;摄影测量外业工作量少,可以提供变形体表面上任意点的变形,但精度较低;地面三维激光扫描技术遥测的距离有限,变形监测固有误差达数毫米,且随着遥测距离的增大精度降低快;专门测量手段相对精度较高,但仅能提供局部的变形信息。近年来,合成孔径雷达技术为变形监测开辟了一条新的道路,有广阔的应用前景。

随着电子技术、计算机技术、通信技术等技术的发展,变形监测技术有了显著的提高,从传统的光学经纬仪、光学水准仪测量,发展到 GNSS、三维激光扫描、InSAR 等新的监测技术,测量的速度、精度、覆盖度、自动化程度等多方面都有了显著的进步,下面介绍几种典型的监测技术。

1.2.1 测量机器人监测技术

测量机器人由带电动马达驱动和程序控制的 TPS 系统结合激光、通信及 CCD 技术组合而成,它集目标识别、自动照准、自动测角测距、自动跟踪、自动记录于一体,可以实现测量的全自动化。测量机器人能够自动寻找并精确照准目标,在 1s 内完成对单点的观测,并可以对成百上千个目标作持续的重复观测。

测量机器人可自带测量控制软件,也可通过电缆实现计算机远程控制,实现数据采集、储存和处理的一体化。采用多台测量机器人,可实现整个工程的自动化变形监测。目前,该项技术在城市地铁结构监测、大坝外部变形监测等工作中有着广泛的应用。

1.2.2 GNSS 形变监测技术

全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)是指利用卫星对地面上的用户进行定位、导航及授时等的所有导航卫星系统总称。目前,世界上主要的全球性、区域性及相关增强系统有:美国的 GPS(Global Positioning System)、俄罗斯的 GLONASS(俄文“Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema”)、中国北斗卫星导航系统(Beidou Navigation Satellite System, BDS)、欧洲的 Galileo 系统、日本的准天顶卫星导航系统(Quasi-Zenith Satellite System, QZSS)及印度的 NAVIC 系统(Navigation with Indian

Constellation)。GNSS 技术具有高精度、全天候、自动化、实时、连续、无需通视条件等优点，在大地测量学及其相关学科领域，如地球动力学、海洋大地测量、资源勘探、航空与卫星遥感、工程变形监测及精密时间传递等方面得到了广泛应用。

随着 GNSS 接收机的小型化以及价格的大幅降低，该技术在测绘工程领域得到普遍应用，特别是 20 世纪 90 年代，由于数据处理技术的日臻完善，使测量的速度和精度不断提高，GNSS 在我国的变形监测领域中得到应用。1998 年，我国的隔河岩大坝外部变形首次采用 GPS 自动化监测系统，对坝体表面的各监测点进行同步变形监测，并实现了数据采集、传输、处理、分析、显示、存储等的自动化，测量精度可达到亚毫米级。

目前，GNSS 在土木工程变形监测中得到广泛应用，如水利工程、桥梁工程、边坡、滑坡等，除了可监测静态的位移，还可进行动态实时位移、振幅、振动频率的测试等，具有十分广泛的应用前景。

1.2.3 激光技术

激光是 20 世纪以来，继原子能、计算机、半导体之后，人类的又一重大发明，被称为“最准的尺”和“最亮的光”。激光的发展不仅使古老的光学科学和光学技术获得了新生，而且促进了新兴产业的出现。激光可使人们有效地利用前所未有的先进方法和手段，去获得空前的效益和成果，从而促进生产力的发展。

激光技术在变形监测中的应用主要体现在激光准直系统上。激光准直系统是用激光束作为测量的基准线。激光具有良好的方向性、单色性和较长的相干距离，采用经准直的激光束作为测量的基准线，可以实现较长距离的工作。但激光束在大气中传输时会发生漂移、抖动和偏折，影响大气激光准直观测的精度。真空激光准直系统是在基于人为创造的真空环境中自动完成测量任务，大大减小了长距离监测过程中由于温度梯度、气压梯度、大气折光等因素对监测造成的漂移、抖动和偏折等影响。随着 CCD 技术的发展，激光监测的精度和速度大幅度提高。由于真空激光准直系统能够实现水平和垂直位移同步自动监测，具有测量精度高、长期可靠性好、易于维护等特点，是目前较为理想的大坝变形监测的一种方法。

我国从 20 世纪 70 年代初开始研究激光准直系统，70 年代后期开始研究真空激光准直系统，1981 年在太平哨坝顶建成运行。20 世纪 90 年代后期真空激光准直系统有了新的发展，采用密封式激光点光源、聚用光电耦合器件 CCD(面阵)作传感器，采用新型的波带板和真空泵自动循环冷却水装置等新措施和新技术，进一步提高了该系统的可靠性。激光技术的应用，提高了探测的灵敏度，减少了作业的条件限制，克服了一定的外界干扰。

1.2.4 自动化监测技术

随着我国大型土木工程的增多，对工程的安全监测工作提出了新的要求，其最突出的表现是要求测量工作的自动化，这就要求测量工作能够快速、自动完成，为数据的实时分析提供基础。

传感器是自动化观测必不可少的重要部件，它是根据自动控制原理，把被观测的几何量(长度、角度)转换成电量，再与一些必要的测量电路、附件装置相配合，组成自动测

量装置。目前,直接测量的电量有电容、电压、电感、频率、电阻等,通过一定的计算,可将这些电量转换成位移、温度等。在土木工程中常用的传感器有渗压计、应力计、土压力计、裂缝计等,集成式的自动化监测仪器有液体静力水准仪、引张线观测仪、垂线观测仪等,这些仪器为自动化监测系统提供了基本的技术保障。

对于一个自动化监测系统,除了要有各种类型的传感器外,还需要测量控制单元、数据通信设备、电脑、测量控制软件等设备,以保证监测工作能顺利进行。

我国在 20 世纪 70 年代开始自动化监测系统的研究,并率先在水利工程中得到应用,目前我国的自动化监测水平已经达到国际先进水平。

1.2.5 光纤传感监测技术

常规传感器易受电磁干扰,在强电磁干扰的恶劣环境中,难以正常工作。为解决此问题,人们开始探索用光学敏感测量来取代机-电敏感测量。光纤和光通信技术的迅速发展,加速了这一进程,在 20 世纪 70 年代中期出现了一种新型的传感器——光纤传感器。它是光纤与光学测量相结合的产物,采用光作为敏感信息的载体,具有光学测量和光纤传输的优点,响应速度快、测量灵敏度高、精度高、电绝缘、安全防爆、抗电磁干扰等,特别适用于高压大电流、强电磁干扰、易燃易爆等恶劣环境。

光纤是以不同折射率的石英玻璃包层及石英玻璃细芯组合而成的一种新型纤维,它使光线的传播以全反射的形式进行,能将光和图像曲折传递到所需要的任意空间。具有通信容量大、速度快、抗电磁干扰等优点。以激光作载波,光导纤维作传输路径来感应、传输各种信息。凡是电子仪器能测量的物理量(如位移、压力、流量、液面、温度等)它几乎都能测量。光纤灵敏度相当高,其位移传感器能测出 0.01mm 的位移量,温度传感器能测出 0.01℃ 的温度变化。在土木工程监测中已应用于裂缝、应力、应变、振动等观测。

光纤传感技术是衡量一个国家信息化程度的重要标志,该技术已广泛用于军事、国防、航天航空、工矿企业、能源环保、工业控制、医药卫生、计量测试、建筑、家用电器等领域,已有的光纤传感技术有上百种,诸如温度、压力、流量、位移、振动、转动、弯曲、液位、速度、加速度、声场、电流、电压、磁场及辐射等物理量,都实现了不同性能的传感,并有着广阔的应用前景。

1.2.6 三维激光扫描技术

三维激光扫描技术出现在 20 世纪 90 年代中期,是继 GNSS 测量技术之后出现的测量新技术,它是通过直接测量仪器中心到测量目标的距离和角度信息,计算出测量目标的三维坐标数据,从而建立被测对象的三维形体。该技术在扫描测量时,不需要在测量物体上设置任何专用测量标志,可以直接对其进行快速测量,并获取高密度的坐标数据,得到一个表示测量物体的点集,称之为“点云数据”。该技术已经在数字城市、工程测量、变形监测等领域得到成功应用。

三维激光扫描技术在变形监测中的应用主要是基于两种变形监测方案:一是在变形体表面放置球形标志,通过比较各时段扫描数据中相同球心的坐标变化来提取变形信息;二是根据点云数据建立变形体的数字高程模型,统一坐标系后用基于模型求差的方法分析

变形。

利用该技术进行测量和变形分析具有如下优点：扫描测量的速度快；扫描点云高密度、高精度；测量过程数字化、自动化；实时、动态、主动性的扫描方式；扫描的非接触性；数据信息的丰富性；监测信息的可融合性；对外界环境要求低；使用方便。

1.2.7 InSAR 监测技术

合成孔径雷达干涉(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)技术是通过雷达采集得到的复数相位值以提取地表的三维信息,可全天时、全天候、高精度地进行大面积地表变形监测,是近些年来迅速发展起来的微波遥感新技术。InSAR 技术通过相距很近的两个天线得出的两幅 SAR 的复图像,由地面各点分别在两个复数图中的相位差,得到两复数图的干涉图,进而计算出地面各点在成像中电磁波所经过的路程差,最后得出地面各点地表的高度信息,形成三维地貌,生成数字高程模型(DEM)。该技术尤其适用于传统光学传感器成像困难的地区,现已成为地形测绘、灾害监测、资源普查、变化检测等很多微波遥感应用领域的重要信息获取手段。

传统 PS 技术是通过长时间 SAR 影像序列的分析来识别稳定反射点(即 PS 点),利用其差分干涉相位和组成分量的统计特点估计并消除大气及地形的误差,进而得到高精度的地表形变信息。但由于该技术受 PS 点提取以及大量的 SAR 影像条件限制,其更适用于人工建筑较多的城区。SBAS 技术是利用具有较短时空基线的影像序列进行干涉处理的方法。通过将所有 SAR 影像依据不同的时空基线分成若干个短基线子集,各子集内的影像进行差分干涉处理,以提高相干性和提高单一主影像条件下差分干涉图的数量,短基线集技术较适用于 SAR 影像数量较少城区的地表沉降分析。星载或机载 InSAR 技术虽然能够对地表变形进行大面积高精度的监测,但是该技术在工程化应用中仍存在以下问题:时空失相干影响监测结果的可靠性和可行性;受限于影像数量和空间分辨率,其监测结果的时空分辨率难以满足实际工程需要,特别是难以实现对单个建(构)筑物的精密监测。

1.2.8 GBSAR 监测技术

自 1999 年由 Tarchi 等首次利用地基雷达进行坝体结构监测以来,GBSAR (Ground-based SAR)干涉测量技术已经在许多领域得到了发展及应用。目前技术较为成熟的地基雷达监测系统主要有:欧盟综合研究中心(Joint Research Centre (JRC) of the European Commission)研制的 LISA 系统,该系统可在 C 到 Ku 波段工作,采用步进频率连续波信号体制(Step Frequency Continuous Wave, SF-CW),测程由几米到数千米,监测精度达到亚毫米级;意大利 IDS 公司和佛罗伦萨大学经过 6 年技术合作研发而成的 IBIS 系统,该系统是一个集步进频率连续波技术(SF-CW)、合成孔径雷达技术(SAR)和干涉测量技术为一体的高新技术产品,主要应用于地表变形监测和建筑物变形监测。IBIS 系统主要分为 IBIS-S 和 IBIS-L 两种型号。S 型主要用于对桥梁或高层建筑物的实时监测,能够对建筑主体表面某些形变点目标进行长周期连续观测;L 型主要是对大坝、边坡、矿区及冰川等面形状形变进行监测分析及预警。澳大利亚大地勘测公司生产的 SSR 系统,主要工作于 X 波段,带宽为 100MHz,系统采用实孔径天线扫描,最大发射功率为 30MW,测程约为

850m, 系统安装于专用的拖车上, 便于在监测区域灵活移动, 监测精度可达到 0.2mm, 且不受环境气候条件的影响。

目前国外许多科研机构及高校已在多个领域开展地基 InSAR 技术的相关研究, 包括欧盟综合研究中心, 意大利的佛罗伦萨大学(Florence University), 西班牙的加泰罗尼亚理工大学(Universitat Politècnica de Catalunya, UPC), 英国的谢菲尔德大学(Sheffield University), 澳大利亚的昆士兰大学(Queensland University), 韩国的国立江原大学(Kangwon National University), 日本的东北大学(Tohoku University)等。国内地基雷达主要在地基雷达系统设计、信号处理以及形变探测等方面做了大量研究。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 InSAR 技术研究进展

雷达刚开始是服务于军事的, 它是以极坐标形式来表示斜距和方位平面的显示器, 通过固定天线来探测飞机和船只等目标。侧视雷达(Side Looking Radar, SLR)是将传感器装载到移动平台上, 实现对地目标观测成像, 分辨率达到数十米级, 但其主要服务于军事, 限制了其发展。雷达的空间分辨率与雷达的天线成正比相关, 而真实孔径雷达受到天线尺寸的限制, 因此之前雷达的空间分辨率比较低。随着预告科学技术的发展, 美国国防部下属的研究机构融合合成孔径和脉冲压缩技术研制出合成孔径雷达, 同时也让雷达遥感成为对地观测领域的热点之一。在 20 世纪 80 年代中后期, 随着东西方冷战的结束, 主要服务于军事的 SAR 技术开始渐渐转入民用领域, 加速了学者们对其的研究。Cauley 等(2014)学者利用 SIR-A 对埃及和苏丹交界处沙漠的穿透能力进行试验, 确定了沙漠覆盖下的古河道, 开创了雷达在地质应用的新领域, 引起了其他学者对雷达遥感的兴趣。随着 SIR-B, SIR-C/X-SAR, Radarsat 计划的成功执行, 雷达遥感在测绘、农业、林业、地质等许多领域充分展示了其应用潜力。

雷达干涉测量最初是对行星和月球表面进行测绘, 1965 年美国喷气推进实验室(JPL)的 Goldstein 开始对雷达干涉测量进行研究。1969 年雷达干涉测量用于对金星的测图计划, 1972 年成功提取了月球表面的高程面, 随着该技术的迅速发展, 学者们将其延伸应用于对地观测领域。1974 年 Graham 第一个完成了机载干涉雷达用于地形测绘的实验。1986 年 Zebker 和 Goldstein 第一次完成了 JPL 的机载系统实验。一个个实验的成功掀起了学者们对雷达干涉测量的研究热潮。1987 年 Goldstein 提出单轨纵向干涉方案以及对其的实验论证, 该技术的天线之间的基线很小, 导致获取的两幅影像差别不大, 仅有微小的相位差别。然而正是这微小的相位差别引起了广大学者的注意, 学者们根据相位在微妙的时间内微小的变化, 反演了雷达影像中像素的微小波动, 这同时透露了 InSAR 在目标运动速度中的敏感性。该技术可以被应用于提取海洋洋流的重要信息。传统的雷达干涉影像因其极化方式、波段较少等原因, 研究学者们不能通过影像的反射特性探测地表地物的特性, 因此发展多波段、多极化的干涉能力是当前雷达干涉测量的发展趋势。1997 年 Forster 利用极化数据推导出地形坡度和高程, 1998 年 Cloud 提出极化雷达干涉测量, 用于提高雷达干

涉测量的性能。2011年 Martinerie 和 Prescott 推出了轮状 InSAR 计划和星座计划，2001年 Ferretti 提出了地球同步轨道 SAR 概念模型。

20世纪中期，USA 成功研制出星载 SAR 技术，该技术开始服务于军方，后面慢慢转为民用，例如：导航定位、空中交通、天气预报、地球观测等，拉开了全球学者们研究 SAR 技术的帷幕。20世纪后期，InSAR 在变形监测应用方面表现出其独有的优势，推动了该技术不同搭载装置的成功研制，包括：星载、机载、地面移动平台等。世界各地研发工作站人员分别成立 SAR 研究小组，大大提高了 SAR 技术的发展速度。1999年 Rudolf, Tarchi 研制出地基遥感成像系统，20世纪后期，基于地面移动平台的 SAR 装置被研制出来，人们开始将其应用到大坝、桥梁、高层建筑物等变形体中来验证该装置的有效性和可靠性。Italy 雷达系统研究团队和 IDS 研发中心共同研发了图像干涉系统 (Image by Interferometric System, IBIS)，该系统采用高频线性测量，主要适用于建筑物、滑坡、桥梁等变形监测，该系统为 GBSAR 技术装置的控制中心，可以实时控制监测平台和后续雷达影像数据处理。接着 Farrar(2010) 利用 GBSAR 技术中的高采样率、高精度的 IBIS-S 装置完成对变形体模拟振动试验，同年，该学者将其应用到桥梁的变形监测中，在监测的同时，利用桥梁已有的振动传感器得到振动信息，与其对比结果表明，GBSAR 技术在桥梁监测中具有较大的潜力。Tarchi(2000) 首次将基于带有轨道的 IBIS-L 装置用于大片区域滑坡变形监测中，提取了监测区域内的二维位移场。2007年 Bernardini 通过一个带有主动角反射器的弹簧振动试验验证了 IBIS-S 的监测精度可达到 0.02mm。2008年 Carmelo Gentile 与 Giulia Bernardini 在 Capriaet 大桥安装可以记录速度的传感器，利用 IBIS-S 系统测量桥梁的振动速度，结果表明两者的速度一致性较高，从而验证了 IBIS-S 的可靠性。欧洲联合研究中心最早开始研究 GBSAR 系统的理论、系统设计、系统研发，首次将该技术应用到大坝的变形监测中，将其监测变形值与大坝内部的技术监测成果对比分析，结果表明，GBSAR 的监测结果同日常的技术监测结果比较吻合，敏感性更加强烈，是传统测量技术手段的一种有效的补充。2000年 Wimmer 和 Rosen 利用星载 InSAR 数据得到了扫描区域的 DEM 和变形量。2002年 Pieraccini 和 Tarchi 将地基雷达传感器安置在同一位置，以连续模式进行斜率监测，紧接着，学者们开始利用 GBSAR 来提高其他测量技术(例如，全站仪、三维激光扫描仪)的监测精度。2008年 Perna 使用机载 InSAR 实现变形监测。GBSAR 监测技术相对较新，主要用于变形监测，用于提取 DEM 的实验较少。Antonello(2004)、Nico(2005) 分别利用 GBSAR 提取了探测目标的 DEM。2008年 Lingua 第一次提出将三维激光扫描仪和地基雷达数据集成到滑坡监测中。

20世纪70年代，我国开始慢慢重视雷达技术的研究，投入了大量的物力、财力、人力，成立了很多重大的科研院所和研究机构，鼓励国内学者们投入其中，开启了我国雷达事业的大门。经过20多年的努力，我国的雷达遥感研究紧跟世界科技发展的前沿并取得了丰硕的成果，在雷达的穿透性研究、洪水遥感监测和雷达图像纹理信息提取等方面均有较大突破。GBSAR 的研究近几年在国内才开始发展，GBSAR 研究理论、应用实施等方面尚有欠缺，无法达到国外的研究水平。国内的研究机构和研究团队在做相关实验时常用的是国外的产品，如意大利的 IBIS-L, IBIS-S 等。通过不懈的努力，国内学者成功开发了移动平台下的 SAR 装置，并结合干涉测量成像系统 (IBIS) 说明微变形远程监测技术的应用

领域和特点。2010 年刁建鹏第一次将 IBIS-S 架在 CCTV 新台地,进行了长达 1 小时的动态监测,实验结果和理论值十分吻合,从而验证了 IBIS-S 在高层建筑物上的动态监测是可行的。刘德煜(2009)分别将 IBIS-S 系统和 GPS 监测技术应用于武汉阳逻长江大桥的监测系统中,结果表明, GPS 适用于超大跨度桥梁的监测,而 IBIS-S 更适用于平面位移较小的桥梁。2011 年,河海大学黄其欢利用 IBIS-L 监测装置对湖北省隔河岩大坝进行了监测分析,结果验证了该系统能够满足大坝监测精度要求,与传统的监测技术实现互补分析,最终实现了大坝的高空间分辨率以及连续的变形监测。2013 年,武汉大学的邢诚等人研究了基于地基合成孔径雷达干涉技术的微变形监测系统 (IBIS-S) 的工作原理及关键技术,通过实验验证了该系统对目标物变形量监测能达到较高的监测精度 (0.05mm 以下)。2014 年,韩贤权等将 GBSAR 技术应用于大坝监测实验,分析了该技术在在大坝安全状态评估中的实际意义。

1.3.2 GBSAR 技术研究进展

1. 影像配准

影像配准是 GBSAR 数据处理的第一步。虽然 GBSAR 的轨道是固定的直线,但在实际的测量过程中,由于轨道、时间或视角上的细微偏差,所获得的 InSAR 影像在距离向和方位向都会出现一定程度的扭曲和错位,从而降低观测数据对的相干性,使得 GBSAR 的测量精度下降。由于 GBSAR 测量变形时对精度要求较高,要达到毫米或亚毫米级,所以要对两幅 SAR 影像进行高精度配准。影像配准有很多算法,常用的有基于干涉条纹(相位)的配准、基于灰度(信号幅度)的配准和基于干涉图频谱(频域 SNR)的配准,这些算法虽然计算量较大,但精度都比较高,可达到 0.1 个像素,满足图像配准的精度要求(亚像素级)。程海琴(2012)提出基于相干曲面移动拟合的 InSAR 影像高精度配准方法,颜林(2010)提出利用约束 Delaunay 三角网生成算法对影像进行配准,得到了较好的配准结果。

2. 干涉图生成与相位噪声滤波

将高精度配准后的两幅 InSAR 影像进行共轭相乘并取相角,即可生成干涉条纹图。由于干涉图中包含系统噪声和数据处理引入的噪声,这些噪声的存在会影响干涉图的信噪比,降低相干性,最终影响变形监测的精度,所以要对干涉图进行滤波。噪声滤波有前置滤波和后置滤波。前置滤波是指在生成干涉图之前对原始复影像进行滤波,后置滤波是指在形成干涉图后对其进行滤波。虽然在生成干涉图之前进行了前置滤波,但仍然有一些噪声存在,所以生成干涉图后要再次进行滤波。常用的干涉条纹图滤波方法为周期均值滤波。张俊(1998)提出小波软阈值滤波算法对雷达影像上的斑点噪声进行滤除,廖明生(2003)提出基于雷达影像干涉条纹图的复数空间自适应滤波算法,达到了较好的滤波效果。

3. 相位解缠

干涉图在完成滤波后,只剩下了包含形变信息的相位,但这个相位只是 $[-\pi, \pi]$ 区间的主值,需要加上 2π 的整数倍才能得到反映真实形变量的相位值。由相位主值得到真实相位值的过程称为相位解缠。干涉图的相位解缠在 GBSAR 数据处理中是非常关键的环节,解缠的结果直接影响形变测量的精度。常用的相位解缠方法有最优估计法、路径跟踪法、边缘分析或区域分割法、基于最小二乘原理方法等。由于 GBSAR 系统的空间基线为