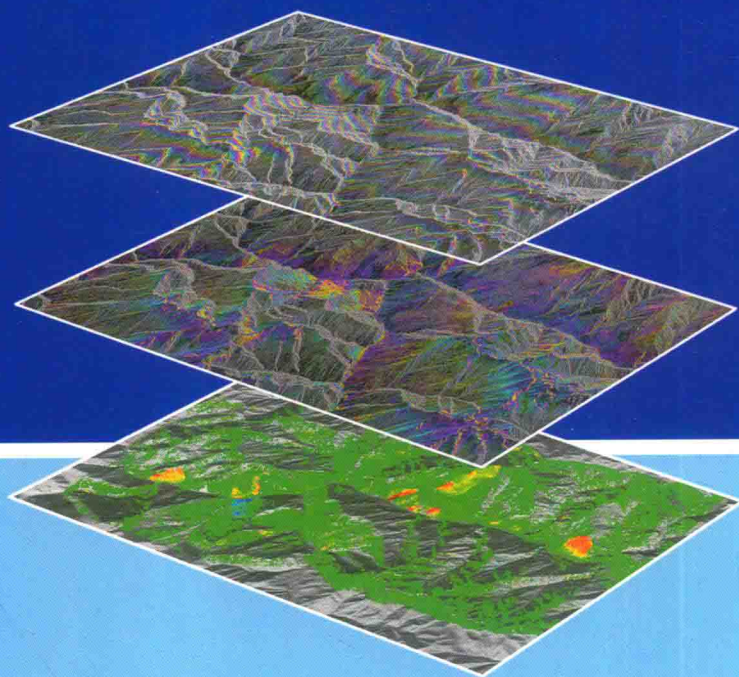


滑坡变形雷达遥感监测 方法与实践

廖明生 张 路 史绪国 蒋亚楠 董 杰 刘宇舟 著



张 路 著



科学出版社

滑坡变形雷达遥感监测方法与实践

廖明生 张路 史绪国 著
蒋亚楠 董杰 刘宇舟

科学出版社

版权所有,侵权必究

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

内 容 简 介

雷达遥感是遥感科学技术的重要分支,可以大面积快速获取高精度地表微小形变信息,近年来在地质灾害监测方面逐渐得到了广泛应用。本书结合作者多年来从事雷达遥感滑坡变形监测研究成果,兼顾基本原理、前沿发展和应用需求,由浅入深地针对不同滑坡的特点给出了具体的解决方案,为读者提供了较为全面的参考案例,并将提取到的形变序列与影响滑坡体稳定性的主要因素进行耦合分析,进一步深化了雷达遥感技术在工程地质领域的应用。

本书体系结构相对完整,可供从事地质灾害监测、测绘、遥感、工程地质、资源调查、地球物理和电子信息等领域的研究人员、工程技术人员和大专院校师生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

滑坡变形雷达遥感监测方法与实践/廖明生等著. —北京:科学出版社,2017.9
ISBN 978-7-03-054444-5

I. ①滑… II. ①廖… III. ①雷达技术-应用-滑坡-地质遥感 IV. ①P627

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 221099 号

责任编辑:杨光华 / 责任校对:董艳辉
责任印制:彭 超 / 封面设计:苏 波

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>

武汉中远印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本:787×1092 1/16

2017 年 9 月第 一 版 印张:12 1/4

2017 年 9 月第一次印刷 字数:287 500

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

我国地质灾害发生十分频繁且灾害损失极为严重。在常见的各类地质灾害中,滑坡数量占灾害总量超过 70%。其中,大型滑坡往往具有隐蔽性和突发性,难以主动防范和预测预警,对人民生命财产造成巨大损失并对社会公共安全构成严重威胁。随着我国综合国力的逐步增强,地质灾害防治工作逐渐从被动避灾、治灾转向主动防灾、减灾。事先发现和识别地质灾害隐患并实施科学的监测预警是变“被动”为“主动”,减少甚至避免造成群死群伤灾难性地质灾害事件发生的最重要手段。在滑坡的研究和灾害监测中,变形量是反映斜坡体当前稳定性及运动状态最直接的物理量。对坡体实施变形监测,可以客观真实地记录坡体变形的发展演变过程,对准确掌握坡体的现状以及预测坡体的发展趋势具有重要意义。因此,变形监测是研究滑坡演化规律最直接、有效的手段,并可为滑坡灾害早期识别和预报预警提供重要的决策依据。

滑坡灾害通常发生在地形地貌复杂的山区,在实际工程应用中,开展变形监测工作相对其他领域更为困难,常规的变形监测手段尤为费时费力,而雷达遥感方法显现出令人瞩目的优势。雷达遥感是遥感科学技术的重要分支,可以大面积快速获取高精度地表形变信息,近几年来在地质灾害监测方面得到了广泛应用。但是,在具体工程实践中尚存在许多实际困难,需要面向不同的具体应用需求来选择适当的解决方案。例如,合成孔径雷达数据中记录了相位和幅度信息,既可以利用相位信息来测量微小形变,监测精度可以达到厘米甚至毫米级,也可以利用影像中的幅度信息来探测年均几十厘米甚至数米量级的快速形变。

鉴于目前雷达遥感与滑坡研究的交叉领域中的专著在国内外尚不多见,我们梳理了近几年来的研究成果和实践案例形成本书,希望能够起到抛砖引玉的效果。考虑到可供不同领域的研究人员和工程技术人员参考和借鉴,力图保持本书的体系结构相对完整,兼顾星载雷达遥感变形监测的原理方法、前沿发展和实际应用案例等内容,针对不同的应用场景和目的给出具体的解决方案。

本书主要取材于作者近几年来承担的国家 973 计划课题“多源观测数据与滑坡机理模型同化理论与方法研究”(课题编号:2013CB733205)和“滑坡多源传感器网络立体观测研究”(课题编号:2013CB733204)以及三峡库区三期地质灾害防治重大科研项目“滑坡体雷达(微波)卫星变形监测数据处理系统研究”(课题编号: SXKY3-6-4)等的研究工作,主要内容来源于课题的研究报告,部分内容来源于所指导的研究生毕业论文,其中有些内容已在国内外有关的刊物上发表。除了作者之外,还有许多同事和研究生参与了相关的研究工作,对于本书的形成也有重要贡献。国家 973 计划项目“西部山区大型滑坡致灾因子

识别、前兆信息获取与预警方法研究”首席科学家黄润秋教授和专家组、项目研究团队对于我们课题的研究工作给予了诸多指导,亲密无间的讨论和碰撞使我们受益匪浅。长期以来,李德仁院士、张祖勋院士、郭华东院士、龚健雅院士和 Fabio Rocca 教授等对于我们在滑坡监测领域的拓展研究给予了坚定的支持。在本书完稿之际,向上述学者和同事一并表示衷心的感谢。此外,本书相关研究工作所使用的星载雷达数据由欧洲空间局(ESA)、德国宇航局(DLR)和日本宇航局(JAXA)等分别通过中欧合作“龙计划”、TerraSAR-X AO项目和 ALOS-1/ALOS-2 RA 项目提供,在此对这些机构多年来给予的大力支持致以诚挚的谢意。

本书作者之一于 2014 年在科学出版社出版了《时间序列 InSAR 技术与应用》一书,比较全面地阐述了近几年来发展迅速的时间序列 InSAR 分析方法及其应用。当时限于该书篇幅,有关滑坡变形监测方面的内容略有涉及而无法展开。因此,读者可以将该书看作本书的姊妹篇一并参考,或许有更好的阅读效果。无论如何,雷达干涉测量技术及其应用仍然处于不断发展之中,本书作者尽力将近几年来的研究成果进行了整理。但是,限于作者的水平,书中不足之处在所难免。成书过程中,作者还参考了国内外的许多著作和研究论文,虽然在参考文献中尽量列出并加以引用,仍然难免有疏漏之处。敬请各位专家和读者批评指正。

作 者

2017 年初夏于武汉大学星湖

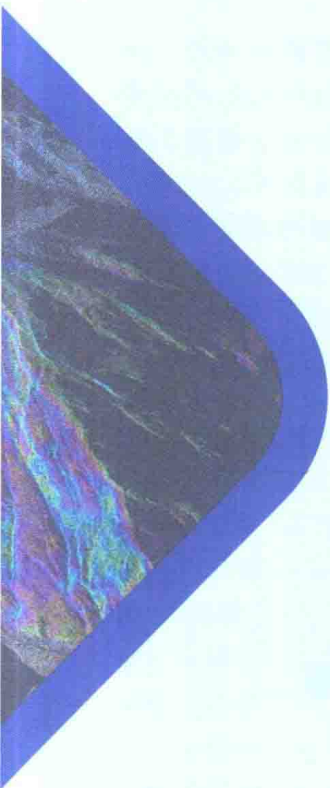
目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 滑坡灾害概述	2
1.2 滑坡变形监测的研究动态	4
1.3 面向滑坡监测的雷达遥感技术方法与应用研究动态	6
1.4 本书内容与组织结构	9
参考文献	10
第 2 章 雷达遥感形变监测原理与方法概述	17
2.1 雷达遥感基础	18
2.1.1 合成孔径雷达成像基本原理	18
2.1.2 合成孔径雷达成像影响因素	20
2.1.3 合成孔径雷达影像特点	24
2.2 雷达遥感系统发展	25
2.2.1 星载 SAR 系统	25
2.2.2 机载 SAR 系统	30
2.2.3 地基 SAR 系统	31
2.3 相干与非相干信息	34
2.3.1 SAR 影像特征信息	34
2.3.2 相干与非相干信息的综合利用	35
2.4 SAR 形变监测方法概述	37
2.4.1 InSAR/D-InSAR 基本原理	37
2.4.2 时间序列 InSAR 方法	40
2.4.3 像素偏移量分析技术	44
2.4.4 多孔径干涉测量	45
参考文献	46
第 3 章 基于差分干涉方法的滑坡形变信息提取	51
3.1 研究区域概述	52
3.1.1 巴东地区概况	52
3.1.2 黄河上游地区概况	53
3.2 复杂山区 InSAR 相干性分析	55

3.2.1 巴东地区差分干涉结果分析	55
3.2.2 黄河上游地区差分干涉结果分析	57
3.3 基于时序差分干涉的已知滑坡形变监测	61
3.4 基于时序差分干涉的潜在滑坡识别与形变探测	66
3.5 本章小结	71
参考文献	71
第4章 多轨道 InSAR 数据大范围滑坡形变探测	73
4.1 三峡库区概述	74
4.2 实验数据	76
4.3 大范围 InSAR 形变监测方法	79
4.3.1 小基线集 InSAR 方法	79
4.3.2 多轨道形变量测结果拼接	81
4.4 实验结果分析	81
4.4.1 平均形变速率	81
4.4.2 测量结果一致性分析	83
4.4.3 季节性降雨对大气的影响	85
4.4.4 滑坡稳定性影响因素	85
4.5 本章小结	87
参考文献	87
第5章 岛状冻土区高速公路边坡稳定性监测	91
5.1 实验区和实验数据	92
5.2 低相干区线状地物形变监测方法	94
5.3 北安—黑河高速公路沿线边坡形变信息提取	98
5.3.1 平均形变速率	98
5.3.2 形变时间序列分析	99
5.3.3 结果讨论	100
5.4 本章小结	100
参考文献	100
第6章 快速变形滑坡监测的 SAR 偏移量分析方法	103
6.1 SAR 影像像素偏移量分析方法(POT)	104
6.1.1 互相关算法	104
6.1.2 偏移量影响因素及理论模型	104
6.1.3 POT 技术形变探测精度分析	106
6.2 基于 POT 方法的滑坡表面形变探测	107

6.2.1 果卜实验区简介	107
6.2.2 实验数据和结果分析	108
6.3 SAR 影像点目标偏移量分析方法	111
6.3.1 点目标特征	112
6.3.2 点目标偏移量分析技术	113
6.3.3 时间序列点目标偏移量分析技术	114
6.4 基于 PTOT 方法的地震同震形变场提取	115
6.4.1 研究区简介	115
6.4.2 实验数据	116
6.4.3 D-InSAR 技术测量结果	117
6.4.4 点目标偏移量测量结果与对比分析	118
6.5 基于时序 PTOT 方法的三峡树坪滑坡形变监测	123
6.5.1 实验区和实验数据	123
6.5.2 滑坡体表面累积形变提取	126
6.5.3 滑坡表面形变时空格局分析	128
6.5.4 滑坡变形影响因素分析	132
6.6 本章小结	134
参考文献	134
第 7 章 滑坡体时序三维形变反演	137
7.1 三维形变提取方法概述	138
7.2 多视角 SAR 数据联合反演树坪滑坡累积三维形变	138
7.3 树坪滑坡时间序列三维形变提取方法	141
7.3.1 树坪滑坡时间演化模式	141
7.3.2 三次样条曲线拟合	142
7.4 树坪滑坡三维形变序列分析	144
7.5 本章小结	149
参考文献	149
第 8 章 滑坡形变与水文影响因子的耦合分析	151
8.1 陆面数据同化概述	152
8.1.1 数据同化的来源	152
8.1.2 陆面数据同化背景与发展	153
8.1.3 陆面数据同化系统的构成	154
8.1.4 数据同化方法的分类	156
8.2 耦合 SAR 形变观测数据同化方案	158

8.2.1 集合卡尔曼滤波原理	158
8.2.2 同化方案	161
8.3 树坪滑坡变形观测结果与分析	163
8.4 时间序列形变分解	167
8.4.1 时间序列形变分解法	167
8.4.2 形变分解结果与分析	169
8.5 滑坡形变观测数据与水文因子的响应机制分析	174
8.5.1 滑坡形变的外界影响因素	174
8.5.2 同化结果与分析	177
8.6 数据同化在滑坡研究中的应用前景	181
8.7 本章小结	182
参考文献	183



第 1 章

绪 论

滑坡是我国最主要的地质灾害,因此滑坡变形监测是我国地质灾害防治工作中的一项重要任务。本章首先阐述滑坡灾害的危害性和主要影响因素,然后通过总结比较各种滑坡变形监测技术手段的优缺点,指出星载雷达遥感具有的独特优势和应用价值,在此基础上回顾总结面向滑坡监测的雷达遥感技术方法与应用研究动态,最后简要介绍本书的主要内容与组织结构安排。

1.1 滑坡灾害概述

我国是世界上地质灾害发生最为频繁的国家之一,地质灾害具有种类繁多、分布广泛且危害性大的特点。地质环境脆弱敏感、气象条件复杂多变以及人类活动的影响,是造成我国地质灾害频发的主要原因(Huang,2009;Schuster et al.,2001;Au,1998)。据国土资源部发布的《中国地质环境公报》披露,2001~2011年,我国共发生地质灾害310 853起,造成10 220人死亡和失踪,直接经济损失434.45亿元。根据国土资源部地质灾害应急技术指导中心编制发布的《全国地质灾害通报》(2010~2014年),2010~2014年,我国共发生地质灾害86 074起,造成4 636人死亡和失踪,直接经济损失约312亿元(图1.1),由此引起的交通设施中断、生产生活设施破坏等带来的间接经济损失更是难以估量。



图 1.1 我国因地质灾害造成的死亡和失踪人数及直接经济损失
(据《全国地质灾害通报》(2010~2014年))

在我国常见的各类地质灾害中(图1.2),滑坡数量占地质灾害总量的70%以上,是发生在山区最主要的地质灾害类型(李媛等,2004)。滑坡是指斜坡上的土体或岩体在重力作用下沿着贯通的剪切面顺坡向下滑动的地质力学现象(唐辉明,2008)。滑坡灾害是以岩土类型、地质构造、地形地貌等为内因,以降雨、融雪和地震等为自然外因,以开挖爆破、水库蓄水排水等为人为外因,经内外因综合作用而触发的复杂地质过程。在众多影响因素中,内因在该过程中占据主导地位,其中,岩土类型和地质结构为滑坡的产生提供了物质基础,地形特征则为滑坡的产生提供了可能环境。只有当斜坡具备了发生滑坡的基本内在条件,再加上大气降水、地下水变化及地震等自然因素,或人工开挖、爆破及堆填加载等人为因素的作用才有可能触发滑坡灾害。

我国滑坡灾害频发的主要原因包括(曾裕平,2009;黄润秋,2007):

- (1) 我国2/3的国土面积是山地,地貌类型复杂,地表起伏大,斜坡容易在加强的重力作用下失稳。
- (2) 地处太平洋板块和亚欧板块的交界处,地壳运动强烈,为地震诱发滑坡提供了条件。
- (3) 季风气候显著,降水集中在夏季,为滑坡发生提供了有利的诱发因素。

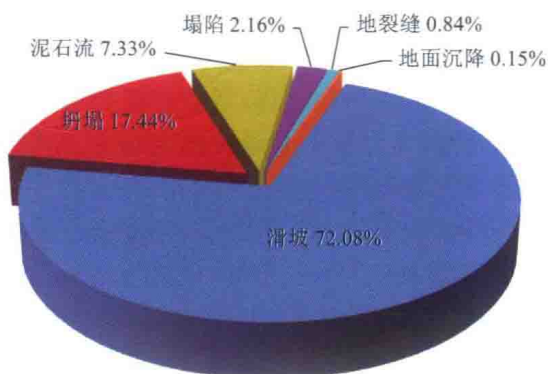


图 1.2 我国主要地质灾害的类型构成
(据《全国地质灾害通报》(2010~2014 年))

(4) 随着经济的发展,人类工程活动越来越频繁,任何破坏斜坡稳定条件的人类活动都可能诱发滑坡。

滑坡作为一种常见的地质灾害,其分布具有广泛性和相对集中性的地域特征。空间上主要分布在山区;从我国的太行山到秦岭,经鄂西、四川、云南到藏东一带滑坡发育密度极大(乔建平,1997);青藏高原以东的第二级阶梯,特别是西南山区和三峡库区为我国滑坡灾害的重灾区(王尚庆等,2011;黄润秋,2007)。而在时间分布上,滑坡灾变的发生具有明显的季节性,多发期集中在冰雪融化期和雨季汛期,尤其是大雨、暴雨、久雨的季节。

根据中国地质灾害数据库,1949~1995 年发生的滑坡灾害中,68.5%由降雨诱发,其他触发因素包括库水位涨落和地震等,占同一时期滑坡灾害的 31.5%。据统计,形成滑坡的外部因素中,90%以上的滑坡都与水的作用有着极为密切的关系。水之所以是影响边坡稳定最重要、最活跃的外在因素,主要原因在于水一旦渗入斜坡岩土体内,将会增加坡体容重并产生软化作用,降低岩土体的抗剪强度,加大孔隙水压力,进而可能诱发滑坡失稳。水的来源主要包括大气降水、地表水、地下水。其中,大气降水和地表水又可以转化为地下水,与斜坡岩土体发生上述复杂作用。总之,水的作用可以改变组成边坡的岩土的性质、状态、结构和构造等,从而影响坡体稳定性,诱发滑坡灾害。

降水尤其是持续性强降雨往往是造成滑坡灾害的主要诱因。例如,2003 年 7 月 13 日,位于三峡库区长江支流青干河左岸的湖北省秭归县沙镇溪镇千将坪村因连日暴雨突然发生滑坡,据统计共造成 14 人死亡、10 人失踪、346 间房屋倒塌、1 067 亩^①农田毁坏,导致 4 家企业全部毁灭,严重破坏了道路等基础设施,造成直接经济损失超过 5 735 万元(Wang et al.,2008a)。2013 年 1 月 11 日,受连续雨雪浸泡影响,云南省昭通市镇雄县赵家沟村附近高处山体发生滑坡,滑坡方量达到 21 万 m³,造成 46 人死亡、2 人受伤的重大损失。

地震是触发滑坡灾害的另一重要诱因,强烈地震对山区地表巨大的破坏力所诱发的滑坡崩塌等次生灾害往往比地震直接造成的损失还要大。我国历史上地震频发,因地震

① 1 亩≈666.67m²

而导致的滑坡灾害非常严重,地震滑坡因其巨大的致灾力引起了社会广泛关注(黄雨等, 2010)。尤其是近年来发生在我国西南地区的多起大地震,包括 2008 年四川汶川地震、2013 年四川芦山地震和 2014 年云南鲁甸地震,都造成了数以千百计、规模不等的滑坡崩塌灾害,并形成了百余个堰塞湖,大大加重了地震灾害损失。特别是汶川地震、鲁甸地震引发山体崩塌滑坡形成的唐家山堰塞湖、牛栏江堰塞湖,最大库容量分别高达 3.2 亿 m^3 和 2.6 亿 m^3 ,对下游地区人民生命财产安全造成严重威胁,经过紧急抢险开挖导流槽泄洪,才成功降低库区水位得以解除警报。

除暴雨、地震等自然因素引发滑坡灾害外,人为活动对自然环境的扰动改造也是重要的滑坡成灾诱因。例如,2009 年 6 月 5 日发生在重庆市武隆县铁矿乡的鸡尾山特大滑坡事故,山体崩塌达 700 万 m^3 ,造成 74 人死亡、8 人受伤,灾后事故调查表明山体下方采矿活动通过应力环境调整和层状块裂岩体差异沉降两种方式对坡体形成的扰动可能是导致滑坡灾害的主要原因。2015 年 12 月 20 日发生在深圳市光明新区长圳红坳村凤凰社区渣土受纳场的特大滑坡事故,造成 73 人死亡、4 人下落不明、17 人受伤、33 栋建筑物被损毁掩埋、90 家企业生产受影响,涉及员工 4 630 人,造成直接经济损失 8.81 亿元。灾后调查查明引发此次事故的直接原因为一方面受纳场未实现有效排水导致堆填渣土含水过饱和,形成底部软弱滑动带;另一方面严重超量超高堆填加载,导致巨量渣土失稳滑出形成巨大的冲击力,造成重大人员伤亡和财产损失。

近年来随着全球气候环境变化以及人类活动的影响,滑坡灾害有逐年加重的趋势,给我国人民生命和财产安全带来了巨大威胁(黄润秋, 2007)。滑坡灾害的发生,往往造成巨大的人员伤亡和经济损失,有时甚至是毁灭性的破坏。据统计,我国平均每年因滑坡灾害造成的人员伤亡超过 400 人,经济损失超过 20 亿元(桑凯, 2013)。滑坡灾害灾变前的变形观测和分析,能够客观真实地反映成灾前岩土体的变形演化过程,可为灾害早期预报预警提供重要决策依据,因此构成了地质灾害防灾减灾举措中不可缺少的基础性工作。

1.2 滑坡变形监测的研究动态

滑坡作为一种极具破坏性的地质灾害,严重制约着灾害多发地的经济发展,并对社会公共安全构成严重威胁。在滑坡研究和灾害监测中,变形量是反映斜坡体当前稳定性及运动状态最直接的物理量,通常以时间序列的形式进行记录。对坡体变形开展周期性测量即实施形变监测,可以客观真实地记录坡体变形的发展演变过程,对了解掌握坡体的现状以及准确预测坡体变形的发展趋势具有重要意义。因此,形变监测是研究滑坡演化规律最直接、有效的手段,并可为滑坡灾害早期预报预警提供重要的决策依据,避免对人民的生命和财产安全造成损害(Michoud et al., 2016; Crosta et al., 2013; Liu et al., 2009)。

形变监测应用于滑坡灾害预警的一个成功案例是 1985 年发生在长江三峡秭归县境内的新滩滑坡。新滩滑坡是一个古滑坡体,历史上局部崩滑有数十次之多。1968 年,长江流域规划办公室对新滩滑坡及其周围的构造环境进行了全面勘探和研究,并由湖北省西陵峡岩崩调查工作处使用视准线法对地表位移进行长期监测。详尽的研究资料帮助研究人员成功预报滑坡,并在滑坡发生前成功转移了当地居民。虽然 1985 年 6 月 12 日凌

晨发生的大滑坡使整个新滩古镇毁于一旦,但该镇 457 户共计 1 371 名居民及时撤离,无人员伤亡。新滩滑坡成功预报的科学实践说明,长期严密的坡体变形监测是滑坡科学预报预警的重要支撑手段(薛果夫等,1988)。

目前对滑坡表面形变进行测量的方法有很多,主要包括精密水准测量(李自立,2005)、全球卫星定位系统(global positioning system, GPS)测量(Wang et al., 2008a, 2008b)、时域反射(time domain reflectometry, TDR)测量(Drusa et al., 2012)、伸缩计(extensometer)(Corominas et al., 2000)、倾斜仪(inclinometer)(Minardo et al., 2014)、激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)测量(Jaboyedoff et al., 2012; Glenn et al., 2006)、地基合成孔径雷达(ground based-synthetic aperture radar, GB-SAR)(Del Ventisette et al., 2015; Crosetto et al., 2014)、无人机遥感(unmanned aerial vehicle remote sensing, UAVRS)(Niethammer et al., 2012)、星载合成孔径雷达(spaceborne SAR)(Wasowski et al., 2014; Berardino et al., 2003)和星载光学遥感(Delacourt et al., 2004; Hervás et al., 2004)等。表 1.1 对这些形变监测手段进行了比较分析。其中精密水准测量、TDR 及 GPS 等获取的都是离散点观测,监测范围较小,适合已知单体滑坡监测。但是对于山区等地形起伏较大的地方,应用这些方法所需仪器的布设和开展现场实测都非常困难。无人机遥感操作简单,但是由于平台稳定性较差,数据获取质量难以保证,适合应急响应和实时的灾情评估。LiDAR 和 GB-SAR 可以实现小范围高精度的连续面监测,星载光学遥感适用于大范围普查,但是精度较低,且容易受到天气因素的干扰,因而难以普及推广应用。

表 1.1 常用的滑坡形变监测方法

滑坡监测方法	监测对象	精度	监测范围	其他
精密水准测量	地表位移	高	点观测	耗费人力物力,受地形条件影响较大,主要针对已知滑坡体监测
全球卫星定位系统(GPS)	地表位移	高	点观测	获取地表三维形变,一般安装在已知滑坡体
时域反射测量(TDR)	滑坡内部形变	高	点观测	需要铺设光纤,小范围监测,一般安装在已知滑坡体
伸缩计(extensometer)	滑坡表面形变	高	点观测	原位传感器
倾斜仪(inclinometer)	滑坡内部形变	高	点观测	原位传感器
无人机遥感(UAVRS)	地表位移或高程变化	低	面观测	平台稳定性低,影像像幅较小,图像处理困难
激光雷达(LiDAR)	滑坡高程变化	高	面观测	适合小范围单体滑坡监测识别
地基合成孔径雷达(GB-SAR)	地表位移	高	面观测	观测频率高,但观测范围小,只适合单体滑坡监测
星载光学遥感	地表位移或高程变化	低	面观测	适用于形变较大的形变监测识别,受天气影响较大
星载合成孔径雷达(spaceborne SAR,简称星载 SAR)	地表位移	高	面观测	适合大范围滑坡监测识别,基本不受天气条件限制

相对于上述传统的形变监测方法,星载 SAR 在形变监测方面具有很多独特的优势。首先,与光学传感器不同,雷达传感器不依赖于太阳辐射,具有全天候主动观测能力。其次,雷达工作的微波谱段,其工作波长较长,可以穿透云雾,受云雾雨雪等恶劣天气的影响远小于光学遥感(廖明生等,2014,2003)。而且,由于雷达影像覆盖范围很大,可以进行大范围的地质灾害普查,这对传统的形变监测手段构成了重要补充。还有一个重要特点,雷达影像记录了相位和幅度信息,利用相位信息来测量微小形变,监测精度可以达到厘米级甚至毫米级,也可以利用幅度信息来探测快速形变。

近年来,星载 SAR 被广泛应用于滑坡地质灾害的监测,并取得了很多成功的案例。例如,可以通过差分干涉图中条纹变化发现滑坡(Shi et al.,2016a),通过时序雷达干涉测量分析方法获取滑坡变形速率(Shi et al.,2016b;廖明生等,2012),甚至可以得到滑坡前后高程与土方量的变化(Chen et al.,2014;Zhao et al.,2013)。然而在实际滑坡监测应用中,特别是在地形起伏较大的山区,雷达遥感的应用效果往往受到几何畸变和时间/几何/体散射去相干、大气扰动等影响因素的制约,具有一定的局限性。另外,经典的星载雷达干涉测量技术只能测量视线向的缓慢形变,对快速形变的探测能力很弱,同时对方位向(近南北向)形变的探测能力几乎为零。虽然基于幅度影像匹配的传统像素偏移量分析方法可以提取视线向和方位向快速形变,但其精度较低。

因此,必须进一步探索高精度提取方位向形变和快速形变的方法。此外,单一轨道雷达遥感观测获取的形变不能直接反映真实地表的三维形变,需要研究三维形变提取的方法来更加直观地反映形变模式。基于目前灾害频发的现状与日益积累的星载 SAR 数据,有必要开展星载 SAR 滑坡监测理论方法研究,准确识别滑坡隐患,精确获取滑坡变形数据,为滑坡预报预警提供依据。1.3 节将对星载 SAR 的发展历史及基于星载 SAR 遥感的滑坡灾害监测技术的研究动态与发展趋势进行简要回顾和总结。

1.3 面向滑坡监测的雷达遥感技术方法与应用研究动态

自 1978 年第一颗雷达卫星 Seasat 发射以来,雷达传感器获取的影像已经在测绘、海洋、陆地灾害等各个领域发挥了重要作用。雷达遥感在城市地面沉降、火山、地震等灾害监测中的作用主要是进行地表形变信息提取,采用的主要技术包括基于相位信息的雷达干涉测量和基于幅度信息的像素偏移量分析技术(pixel offset tracking,POT)。InSAR 技术包括传统的差分干涉测量(differential interferometric synthetic aperture radar,D-InSAR)和时间序列差分干涉测量两大类。

InSAR 技术在发展初期的主要用途是利用对同一目标成像的两景雷达影像的回波信号相位差来获取地表高程信息。在 InSAR 测高技术的基础上,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration,NASA)的喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory,JPL)的 Gabriel、Goldstein 和 Zebker 提出发展了 D-InSAR 的理论,并用星载合成孔径雷达验证了 D-InSAR 技术可以应用于监测地表微小形变(Gabriel

et al.,1990)。同时他们经过研究指出,随着 ERS-1(European Resource Satellite-1)等卫星发射升空,星载雷达传感器同样可以应用此技术并对滑坡、地震等地质灾害进行监测,这个设想很快得到证实。1993 年,法国学者 Massonnet 等利用 ERS-1 干涉成功获取 Landers 地震引起的地表变化,所测结果与 GPS 测量数据高度吻合(Massonnet et al.,1994,1993)。之后,D-InSAR 技术很快引起了各国学者的注意,并掀起研究的热潮。D-InSAR 技术先后被应用在地震、火山、冰流等灾害监测方面,并相继取得了成功(Carnec et al.,1999;Mattar et al.,1998;Lu et al.,1997;Vachon et al.,1996)。

D-InSAR 作为一项重要的形变监测技术在滑坡形变监测中取得了成功应用,同时也暴露出一些问题。1996 年,法国学者 Fruneau 等(1996)首先对覆盖法国阿尔卑斯地区 La Clapiere 滑坡的 ERS-1 影像对进行差分干涉处理,证明了 D-InSAR 技术可以用于小范围形变监测,同时发现在植被覆盖较多的地方存在去相干现象,导致 D-InSAR 无法获取到有效信息。2000 年,日本学者利用 JERS-1 SAR 数据进行干涉测量,成功实现了对日本 Itaya 滑坡的形变监测,同时发现了大气条件等因素对干涉测量结果的干扰影响(Kimura et al.,2000)。2000 年开始,Xia 等(2004,2002)和一些研究机构在中国三峡地区多处典型滑坡体上安装布设角反射器,用于辅助 ENVISAT ASAR 干涉测量开展滑坡形变监测,并取得了一定成果。但是,总的来看时间去相干现象严重影响了差分干涉测量的大范围应用。

大气和去相干等因素的影响严重制约了 D-InSAR 的应用。一些研究团队提出了多种解决方案来尽可能克服这些因素的干扰影响。这些方案按照处理策略主要归结为三大类。

(1) 通过识别和分析雷达影像中具有稳定散射回波信号的点目标对应的像元来提取形变信息。2000 年,意大利学者 Ferretti 等基于这个思路率先提出了永久散射体干涉测量(Permanent Scatter InSAR,PSI)技术,利用不同时相获取的雷达影像中的稳定散射目标(人工建筑、角反射器等)来准确估计干涉图中的地形误差、大气扰动等,经验证可获得毫米级的测量精度(Ferretti et al.,2011,2007,2001,2000)。类似的 PSI 算法包括 GAMMA 公司的相干点目标分析(Interferometric Point Target Analysis,IPTA)(Raetzo et al.,2007;Werner et al.,2003)、Kampes 的时空网络解缠算法(spatio-temporal unwrapping network,STUN)(Kampes,2006)、Hooper 的 StaMPS(stanford method for persistent scatterers)(Hooper et al.,2004)等。这类方法主要适用于人工目标分布密集的城市场景区域,在城市地表沉降监测中得到了广泛的应用。

(2) 通过选取合适的干涉像对,构造短空间基线和时间基线干涉图序列(small baseline subset,SBAS)来尽可能保持相干性。同时,还可以进一步在距离向和方位向进行滤波来提高相干性,在短时间内保持相干性的分布式散射体也会被纳入计算,比较适合非城市场景下的应用。这类方法在提出的最初阶段还通过对干涉图做多视处理来进一步提高相干性(Schmidt et al.,2003;Berardino et al.,2002)。但是,干涉图做多视处理对点目标有增加噪声的作用。因此,保持干涉图的分辨率且考虑分布式目标的算法及其特性的研究相继发表(Hooper,2008;Lanari et al.,2004),这些算法的测量精度号称可以达到

毫米级(Lanari et al., 2007; Casu et al., 2006)。

(3) 根据雷达影像中的点目标和分布式点目标特性分别选点,联合进行分析解算。代表性算法包括 StaMPS (Hooper, 2008), SqueeSAR (Ferretti et al., 2011), Quasi-Permanent Scatterers InSAR (QPS-InSAR) (Perissin et al., 2012), Temporarily Coherent Point InSAR (TCP-InSAR) (Zhang et al., 2012), 这些方法的提出进一步拓展了传统 D-InSAR 技术的应用范围,在滑坡形变监测中发挥了重要作用。

作为一个滑坡地质灾害多发的国家,我国在雷达遥感滑坡监测领域近年来也取得了很大的进展。2008 年, Wang 等(2008c)利用 QPS-InSAR 技术首先对三峡巴东地区滑坡进行分析,成功探测到两个处于活动状态的滑坡体。2012 年,廖明生等(2012)采用 PSI 技术对高分辨率 X 波段 TerraSAR-X 数据进行分析,虽然取得了一定成功,但由于 TerraSAR-X 数据波长较短,受到去相干影响严重,并没有达到预期效果。作为国内第一个引入 InSAR 技术的滑坡监测研究实验区,三峡地区只在少数典型的滑坡上取得了成功应用,并没有实现大范围的形变监测。2012 年, Zhao 等(2012)和美国学者合作利用时间序列干涉图、相干图及强度图对美国加利福尼亚州北部和俄勒冈州南部的区域进行滑坡体制图,发现降雨是影响当地滑坡形变的主要因素。2014 年, Zhu 等(2014)提出利用角反射器辅助 PSI 解算,利用 GPS 数据进一步优化滑坡形变监测结果,成功应用到陕西北部滑坡监测并实现毫米级精度。2014 年, Chen 等(2014)利用网络 PS-InSAR (PS-InSAR networking) 技术生成大光包滑坡数字高程模型(digital elevation model, DEM),并估算出大光包滑坡产生的堆积体方量。2014 年,程海琴等(2014)针对 SBAS 算法提出一种三维空间因子大气长波相位建模方法改正干涉图中的大气误差,并在汶川地震后滑坡探测中取得较好的效果。2016 年, Sun 等(2016)提出了一种基于多项式的差分干涉图大气和轨道误差改正算法,并将改正后的差分干涉图用于时间序列分析,成功探测到 2010 年舟曲泥石流灾难发生前滑坡体的时间序列形变。2015 年, Tang 等(2015)提出利用相干点目标和分布式目标结合的时间序列分析方法对汶川地震震后坡体稳定性进行评估,并指出该地区大气信号主要与高程起伏相关(Tang et al., 2015)。

传统的 InSAR 和时间序列方法已被证实可有效用于对滑坡体表面缓慢形变的监测,然而对于形变梯度较大的快速形变,这些方法在解缠时通常会出现跳变,从而导致对形变的严重低估(Wasowski et al., 2014)。2013 年, Zhang 等(2013)用 D-InSAR 研究了青海拉西瓦水电站附近果卜段滑坡,但由于滑坡形变太大和叠掩等原因, D-InSAR 处理结果并不能有效观测到形变信号。类似的案例还有三峡库区树坪滑坡, PSI 测量得到的树坪滑坡体的表面形变量级远远低于 GPS 测量值(廖明生 等, 2012)。

目前,利用 SAR 影像对快速形变进行估计的方法主要有两种。一种是利用 SAR 影像的幅度信息的像素偏移量分析算法(POT)。另外一种是利用相位信息提取方位向形变的多孔径干涉测量技术(multiple aperture interferometry, MAI)。2006 年, Bechor 等(2006)提出将两组雷达回波信号的方位向频谱分为前视、后视两个子带分别进行干涉处理生成干涉图,通过计算前视、后视干涉图间的相位差来获取方位向形变,这就是所谓的多孔径干涉测量技术,在相干性较高时,其测量精度要比 POT 方法高。但是, MAI 和