

复杂高位滑坡星-地InSAR协同监测与风险预警关键技术

蒋林宏

四川省第十地质大队 四川 广元 628000

摘要: 本文聚焦复杂高位滑坡星-地InSAR协同监测与风险预警关键技术。先介绍InSAR技术原理、发展及时间序列InSAR技术优势。接着阐述星-地InSAR协同监测技术,包括卫星与地基InSAR特点及协同方式、技术要点。通过四川省山区复杂高位滑坡案例,分析监测方法、风险预警与应急响应。评估技术应用效果,对比其他监测技术,最后展望未来发展方向,旨在为复杂高位滑坡监测与预警提供科学依据和技术支撑。

关键词: 复杂高位滑坡; 卫星InSAR; 地基InSAR; 协同监测; 风险预警

引言: 复杂高位滑坡具有隐蔽性强、危害大等特点,严重威胁人民生命财产安全。传统地质灾害监测技术存在监测范围有限、精度不足、受环境影响大等局限。InSAR技术凭借其高精度、全天候监测等优势,在地质灾害监测领域崭露头角。星-地InSAR协同监测技术结合卫星与地基InSAR优势,形成互补监测体系。深入研究该技术对复杂高位滑坡的监测与风险预警,对于提升地质灾害防治能力、保障社会安全稳定具有重要意义。

1 InSAR 技术概述

1.1 InSAR技术原理

InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar, 合成孔径雷达干涉测量) 技术是一种利用同一区域两次或多次过境的SAR (Synthetic Aperture Radar, 合成孔径雷达) 影像进行复共轭相乘处理,从而提取地物目标地形或形变信息的高精度遥感技术。其核心原理在于通过解析SAR影像中的相位信息,该信息蕴含了传感器与目标物之间的精确距离变化,进而实现毫米级至厘米级的地表形变监测和地形测量。InSAR技术通过比较不同时间获取的SAR影像间的相位差异,能够精确计算出地表微小形变,为地质灾害监测、冰川运动研究、城市沉降分析等领域提供了强有力的技术支持。

1.2 InSAR技术发展

自1957年密歇根大学首次利用机载SAR系统成功获取大面积聚焦SAR图像以来,InSAR技术经历了从机载到星载、从单一波段到多波段、多极化、高分辨率及高重访周期的显著发展;特别是1978年美国Seasat-A卫星的成功发射,开启了星载SAR发展的新纪元,各国相继发射了自己的SAR卫星,推动了InSAR技术的广泛应用。随着技术的不断进步,InSAR数据获取和处理能力大幅提升,不仅在地质灾害监测中发挥了重要作用,还在冰川运动、火山活动、城市形变等多个领域展现出巨大潜力^[1]。目前,InSAR

技术已成为地球科学研究不可或缺的工具之一。

1.3 时间序列InSAR技术

时间序列InSAR技术通过处理同一地区的多景SAR影像,有效降低了传统D-InSAR (Differential InSAR) 方法因大气延迟、时空失相关等因素引起的测量误差,将形变速率监测精度提升至厘米/年甚至毫米/年。该技术通过长期、连续的观测,能够捕捉地表微小形变的动态过程,为地质灾害预警、冰川运动监测等等提供了丰富的数据支持。PS-InSAR技术利用同一地物散射特性长时间保持稳定的点(如建筑物、裸露岩石)提取信息,获得较好的干涉信息,而DS-InSAR技术则通过提取PS目标和DS目标,在优化干涉对的同时提高了空间分辨率。这些技术使得大范围定性识别不稳定区域和进行滑坡灾害危险性评级分区成为可能,并揭示了滑坡体形变速率的季节性差异与降雨量变化之间的密切联系及其作用机理。SBAS-InSAR技术通过将空间基线和时间基线设置在一定范围内,使影像根据基线阈值进行组合,通过增加干涉对的数量来提高相干性,从而减小了时空失相关的影响,对意大利Maratea山谷的滑坡进行监测形变测量精度也得到了GPS观测结果的验证。这些技术不仅适用于单体地质灾害(如滑坡)的形变监测,还为大面积区域的地表形变研究提供了高时空分辨率的数据支持,对理解地表形变机制、进行灾害预警具有重要价值。

2 星-地 InSAR 协同监测技术

2.1 卫星InSAR监测技术

卫星InSAR技术依托卫星平台,实现了对地表形变的大范围、周期性监测。该技术利用合成孔径雷达(SAR)系统,通过发射和接收微波信号,记录地物的散射强度及相位信息,进而提取地形或形变数据。卫星InSAR的主要优势在于其覆盖范围广,能够跨越地理障碍,实现对偏远和难以到达区域的监测。然而,由于卫

星轨道周期和重访时间的限制,其时间分辨率相对较低,难以实现对形变区域的定点连续监测。尽管如此,卫星InSAR在区域性地表形变监测、地质灾害预警等方面仍具有不可替代的作用,为地质环境变化研究提供了重要的数据支持。

2.2 地基InSAR监测技术

地基InSAR系统作为星载InSAR的重要补充,以其高时空分辨率和亚毫米级测量精度,在地表形变监测中发挥着不可替代的作用;相较于卫星InSAR,地基InSAR系统能够提供更为精细的地表形变信息,尤其适用于对单体建筑物、露天尾矿坝、冰川运动等的高精度形变监测。通过矢量网络分析仪、实孔径雷达等先进技术,地基InSAR系统实现了对地表形变的精确捕捉和详细分析。例如,在露天尾矿坝的监测中,地基InSAR系统能够实时监测坝体的微小形变,及时发现潜在的安全隐患;在城市单体建筑物监测中,能够捕捉到建筑物微小的形变,为城市安全提供有力保障^[2]。同时,地基InSAR系统还能够在冰川运动、山体滑坡等自然现象的监测中发挥重要作用,为科学研究提供了宝贵的数据支持。

2.3 星-地InSAR协同监测

星-地InSAR协同监测技术结合了卫星InSAR的大范围监测与地基InSAR的高精度监测优势,形成了互补的监测体系,显著提高了监测的精度和效率;卫星InSAR负责大范围的形变监测,快速识别出潜在的形变区域;而地基InSAR则对这些区域进行高精度的精细监测,提供详细的形变数据;这种协同监测方式不仅提高了数据的准确性和可靠性,还大大增强了对于突发地质灾害的快速响应能力;通过星-地InSAR协同监测,可以实现对复杂地质条件下地表形变的全面、实时监测,为地质灾害预警和防治提供科学依据。

2.4 技术要点

在星-地InSAR协同监测技术中,高精度配准是确保数据准确性的关键。地基InSAR系统提供的亚毫米级测量精度,使得对单体建筑物的精确监测成为可能。通过先进的配准算法,如迭代最邻近算法,可以实现卫星影像和地基影像之间的高精度配准,解决三维空间中的配准难题。同时,数据处理与融合技术也是至关重要的。利用先进的数据处理算法,如小波变换、卡尔曼滤波等,可以实现多源数据的融合与分析,提高监测数据的准确性和可靠性。另外,实时监测与预警系统的建立,结合卫星InSAR的宏观监测数据和地基InSAR的精细监测数据,能够实现对地质灾害的全面、实时监测和预警,为防灾减灾提供有力支持。

3 复杂高位滑坡监测案例分析

3.1 案例背景

以四川省山区大湾村复杂高位滑坡为例,该区域地形极为复杂,山高谷深,坡度陡峭,地质条件脆弱,岩土体结构松散且易风化。历史上,该区域曾多次发生滑坡灾害,每一次滑坡都带来了严重的人员伤亡和巨大的财产损失,对当地居民的生命财产安全构成了极大威胁。滑坡发生时,大量岩土体快速下滑,掩埋道路、房屋,阻断交通,严重影响当地的生产生活秩序。鉴于该滑坡的严重危害性和复杂性,对其进行长期、有效的监测显得尤为迫切和重要,通过科学的监测手段,提前发现滑坡迹象,为防灾减灾提供有力支持。

3.2 监测方法

针对该复杂高位滑坡,采用了多种监测方法相结合的策略。卫星InSAR监测方面,充分利用Sentinel-1A、ALOS-2、TerraSAR-X等卫星数据,这些卫星具有不同的分辨率和重访周期,能够实现对滑坡区域的大范围、周期性形变监测,快速识别出潜在的滑坡隐患区域。地基InSAR监测则是在滑坡体附近合理部署地基SAR设备,该设备具有高时空分辨率,可实时、精确地监测疑似滑坡体的微小变形信息。此外,通过多源数据融合技术,将卫星和地基InSAR数据进行有机整合,充分发挥两者的优势,有效提高监测的精度和可靠性,为滑坡的准确判断和预警提供坚实的数据基础^[3]。

3.3 风险预警与应急响应

在风险预警与应急响应方面,首先构建了科学合理的预警模型。基于丰富的历史滑坡数据,综合运用确定性模型和不确定性概率模型,结合实时监测数据,对滑坡发生的可能性和危害程度进行准确评估,实现灾害的精准预警。当监测数据出现异常,达到预警阈值时,及时发布预警信息,通过多种渠道迅速传达给相关部门和人员。相关部门根据预警信息,迅速启动应急预案,采取有效的应急措施,如疏散周边居民、封闭危险区域、调配救援物资等。通过及时响应预警,能够在滑坡灾害发生前或初期,最大程度地减少灾害损失和风险,保障人民群众的生命财产安全。

4 复杂高位滑坡星-地InSAR协同监测技术应用与展望

4.1 技术应用效果评估

四川省山区复杂高位滑坡监测中,星-地InSAR协同监测效果显著。卫星InSAR大范围覆盖,短时间内对滑坡区域初步筛查,快速锁定潜在形变区。如用Sentinel-1A卫星数据,一个月内识别出滑坡体周边约5平方公里多个形

变异常区,缩小范围、提高效率。地基InSAR对卫星识别区域精细监测,滑坡体关键部位地基SAR设备可实时获毫米级形变数据。以滑坡体前缘疑似滑动区为例,一个月累计形变量达5毫米且形变速率加快。多源数据融合整合两者数据,提高精度与时空连续性,能更准反映滑坡动态,如某次降雨中提前24小时预警,避免损失。

4.2 与其他监测技术的对比

与传统地质灾害监测技术比,星-地InSAR协同监测优势明显。传统方法如地面位移计、测斜仪,虽能提供较准局部形变数据,但监测范围有限,布置大量设备成本高,还受地形限制。与光学遥感技术比,InSAR不受天气和光照限制,可全天候监测。光学遥感靠图像几何变形分析,精度低、难捕捉微小形变,InSAR通过相位分析,可实现毫米级监测。与GPS监测技术比,GPS监测点布置稀疏,难大面积连续监测,信号易受遮挡干扰,InSAR一幅影像可覆盖大面积,空间分辨率和监测效率更高^[4]。

4.3 未来发展方向

随着科技的不断进步,星-地InSAR协同监测技术在复杂高位滑坡监测与风险预警领域具有广阔的发展前景。在技术层面,未来可以进一步提高InSAR数据的分辨率和精度。通过研发新型的SAR卫星和地基InSAR设备,采用更先进的信号处理算法,实现亚毫米级的形变监测精度,为地质灾害的早期预警提供更准确的数据支持;在数据处理和分析方面,可以引入人工智能和机器学习技术。利用深度学习算法对大量的InSAR数据进行自动分析和分类,提高数据处理的速度和效率,同时能够更准确地识别出滑坡体的形变特征和演化规律。例如,通过构建神经网络模型,对滑坡体的历史形变数据进行训

练,预测未来一段时间内的形变趋势,为风险预警提供更科学的依据;在应用层面,可以拓展星-地InSAR协同监测技术的应用范围。除了地质灾害监测外,该技术还可以应用于城市规划、基础设施建设、生态环境监测等领域。例如,在城市规划中,利用InSAR技术监测城市地表的沉降情况,为城市的安全建设和可持续发展提供决策支持;在基础设施建设中,对桥梁、隧道等大型工程进行形变监测,保障工程的安全运行。

结束语

星-地InSAR协同监测技术在复杂高位滑坡监测与风险预警中成效显著,通过案例分析可见其在精准识别形变、及时预警等方面作用突出,且与传统技术相比优势明显。随着科技发展,该技术在数据精度、处理分析及应用范围上有广阔提升空间。未来,应持续探索创新,推动技术升级,使其在更多领域发挥价值,为地质灾害防治、城市规划等提供更可靠支持,守护人民生命财产安全与社会稳定发展。

参考文献

- [1]杨春宇,文艺,潘星,等.基于SBAS-InSAR的山体滑坡形变监测分析[J].测绘通报,2023,(11):12-17.
- [2]许强,朱星,李为乐,等."天-空-地"协同滑坡监测技术进展[J].测绘学报,2022,51(7):1416-1436.
- [3]毛宇鑫,冀鸿兰,杨震,等.基于InSAR技术的黄河内蒙古段河岸形变监测与影响因素分析[J].农业工程学报,2025,41(5):87-95.
- [4]刘文涛,雷浩川,马顺.基于数据同化理论的InSAR技术黄河上游滑坡监测预报[J].地质与资源,2024,33(2):230-236.