

GB-InSAR滑坡应急监测的快速建模与三维匹配试验及应用

张克利, 姚爱敏, 张建全, 闫宇蕾, 秦宏楠

Rapid modeling and 3D matching of GB InSAR landslide emergency monitoring: Method and application

ZHANG Keli, YAO Aimin, ZHANG Jianquan, YAN Yulei, and QIN Hongnan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202306047>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于地面三维激光扫描的三峡库区危岩体监测

Monitoring of dangerous rock mass in the Three Gorges Reservoir area based on the terrestrial laser scanning method

褚宏亮, 邢顾莲, 李昆仲, 王国利, 段奇三 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 124–132

基于无人机的滑坡地形快速重建与稳定性分析

Rapid remodeling of three-dimensional terrain and stability analyses of landslide based on UAV

张欢, 巨能攀, 陆渊, 万勋, 蹇志权 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 171–179

基于InSAR技术的缓倾煤层开采诱发顺层岩体地表变形模式研究

A study of deformation mode and formation mechanism of abedding landslide induced by mining of gently inclined coal seam based on InSAR technology

姚佳明, 姚鑫, 陈剑, 李凌婧, 任开, 刘星洪 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 135–146

舟曲江顶崖滑坡的早期判识及风险评估研究

A study of the early identification and risk assessment of the Jiangdingya landslide in Zhouqu county

韩旭东, 付杰, 李严严, 王高峰, 曹琛 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 180–186

基于InSAR技术的内蒙古巴彦淖尔市地面沉降演化特征及成因分析

An attribution analysis of land subsidence features in the city of Bayannur in Inner Mongolia based on InSAR

葛伟丽, 李元杰, 张春明, 张红霞, 王志超, 杨红磊 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 198–206

不同压实度下黄土填方边坡失稳的模型试验研究

A model test study of the instability of loess fill slope under different compactness

陈林万, 裴向军, 张晓超, 张硕, 钟玉健, 罗欣 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 137–147



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202306047

张克利, 姚爱敏, 张建全, 等. GB-InSAR 滑坡应急监测的快速建模与三维匹配试验及应用 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(6): 190-197.

ZHANG Keli, YAO Aimin, ZHANG Jianquan, et al. Rapid modeling and 3D matching of GB InSAR landslide emergency monitoring: Method and application[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(6): 190-197.

GB-InSAR 滑坡应急监测的快速建模与三维匹配 试验及应用

张克利¹, 姚爱敏¹, 张建全¹, 闫宇蕾¹, 秦宏楠²

(1. 北京城建勘测设计研究院有限责任公司, 北京 100101;

2. 中国安全生产科学研究院, 北京 100012)

摘要: 针对常规地基干涉合成孔径雷达(GB-InSAR)监测存在依赖地表控制坐标的问题, 通过露天可控模拟试验, 尝试利用三维激光扫描技术在扫描建模的同时, 获取雷达的位置坐标并将其统一到模型的局部坐标系中, 直接进行几何映射三维匹配, 减少了测量雷达真实坐标及仪器坐标与真实坐标相互转换的步骤。通过在贵州晴隆滑坡抢险行动中的实际应用, 能够直观判断危险源位置, 分析滑动路径, 效果良好。结果表明: 将三维激光扫描建模技术与几何映射匹配方法相结合, 能够在滑坡现场完成快速建模和匹配, 实现雷达变形数据的三维可视化。提出的方法可为快速定位滑坡危险源、分析滑动路径及受灾范围提供便利。

关键词: 滑坡; 监测; 应急; 地基干涉合成孔径雷达; 三维激光扫描技术; 数据匹配

中图分类号: X936; P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)06-0190-08

Rapid modeling and 3D matching of GB InSAR landslide emergency monitoring: Method and application

ZHANG Keli¹, YAO Aimin¹, ZHANG Jianquan¹, YAN Yulei¹, QIN Hongnan²

(1. Beijing Urban Construction Exploration & Surveying Design Research Institute Co. Ltd., Beijing 100101,

China; 2. China Academy of Safety Production Science, Beijing 100012, China)

Abstract: Traditional GB InSAR monitoring relies on surface control coordinates, which can be limiting. To quickly generate a digital elevation model (DEM) at the landslide disaster site, match it with radar deformation images, and achieve three-dimensional visualization of monitoring data, through controlled outdoor simulation experiments, three-dimensional laser scanning technology was used to capture the radar position coordinates during scanning. The position coordinates were integrated into the model's local coordinate system for direct geometric mapping and three-dimensional matching, which reduces the steps of converting the real coordinates of the measuring radar and instrument coordinates to the real coordinates. Applying this method to a landslide rescue operation in Qinglong, Guizhou can intuitively determine the location of the hazard source, analyze the sliding path, and achieve effective results. The findings indicate that combining 3D laser scanning with geometric

收稿日期: 2023-06-27; 修订日期: 2024-04-09

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 北京市科技新星计划项目(20220484141)

第一作者: 张克利(1992—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事岩土工程领域地质灾害的研究工作。E-mail: 1010295820@qq.com

mapping matching method enhances rapid modeling and matching at landslide sites, and achieves 3D visualization of radar deformation data. This study facilitates quick location of landslide hazards and analysis of sliding paths and affected areas.

Keywords: landslide; monitoring; emergency; GB-InSAR; 3D laser scanning technology; data matching

近年来,我国全面加强应急管理工作,应急管理体系建设快速推进,突发事件应对能力显著提升^[1]。滑坡应急救援行动中,为避免二次滑坡事故的发生,保障救援人员的生命安全,必须针对滑坡体进行实时监测预警^[2]。

何朝阳等^[3]从预警流程和模型调度算法的角度研究基于时间驱动和数据驱动的预警模型调度方式,结合实时监测数据及特征,提出预警模型调度策略及预警信息发布策略,以期提高滑坡的预警精度。徐文正等^[4]利用短基线集技术结合地表 GPS 监测数据进行滑坡形变监测,基于 SBAS-InSAR 时间序列数据及长短时记忆网络开展滑坡形变预测研究,结果显示, LSTM 神经网络模型的预测结果始终保持较高的预测精度,预测效果最佳。程滔等^[5]进行野外地质勘察和 TM 光学遥感影像解译,通过 EnviSat SAR 数据差分干涉处理,获取研究区干涉形变场,提取出滑坡位移量,分析黄草湾至董家寺沿线的滑坡变形范围,划定了 4 个重点监视区。Noferini 等^[6]在 2007 年利用 GBSAR 系统对卡尼亚阿尔卑斯山发生的滑坡进行了两次监测,将雷达结果与 GPS 结果进行比较,证明了地基 SAR 技术的高精度性。Del 等^[7]将 GBSAR 应用于绘制意大利 Ruinon 滑坡不稳定区域随时间的表面变形,其高空间分辨率和时间采集速率使得地基 SAR 可以成为潜在灾难性滑坡不稳定事件的早期预警工具。

地基干涉合成孔径雷达(ground-based interferometric synthetic aperture radar, GB-InSAR)是基于差分干涉测量技术的表面位移遥感监测设备,近几年已用于山体滑坡、危岩体、水坝、露天煤矿和冰川移动^[8]等方面的监测工作,由于测量范围大、全天候、非接触式的优点,被用于滑坡救援应急监测中。为了快速直观地定位滑坡危险源,分析可能的滑动路径以及滑坡影响区域,需要对 SAR 形变图像与滑坡现场的 DEM 进行三维匹配,而匹配必须获取地基 SAR 导轨的精准坐标^[9]。滑坡救援行动中分秒必争,现场地形危险复杂, GPS 信号质量较差,在露天矿山和水坝监测中惯用的使用全站仪获取雷达导轨坐标的方法,不仅需要地表控制点,还要进行 DEM 的坐标转换,增加了应急现场任务量与人为操作误差,受到很大限制。因此研究在

滑坡应急救援行动中,如何快速获取监测区域 DEM 与地基 SAR 系统坐标,实现雷达形变图像与 DEM 的精准匹配,具有重要的实际意义。

依据露天可控模拟试验,对现场快速建模、雷达系统坐标获取、DEM 与 SAR 图像的快速匹配、结果验证等工作进行详细阐述,并将该方法应用到贵州某次应急抢险监测中,以验证该方法的有效性。

1 应急监测匹配方法及试验

1.1 快速建模

三维激光扫描技术是 20 世纪 90 年代发展起来的一种遥感监测技术^[10],能够完整重建扫描实物及快速获得原始测绘数据,最大特点就是精度高、速度快、逼近原形,并能够提供一个三维坐标系^[11]。基于上述技术特点,利用几何映射原理尝试将生成的模型与 SAR 二维变形图像进行匹配。

露天可控试验现场如图 1,在雷达监测目标区域布置 3 个角反射器 P₁、P₂、P₃,并架设三维激光扫描仪。试验所用的三维激光扫描仪配置参数如表 1,扫描仪的精密测量系统通过激光测距,反算直角坐标,以激光发射器为坐标原点建立一个系统局部坐标系, X 轴为仪器初始扫描方向, Z 轴为竖直方向,建立右手坐标系^[12]。

数据扫描根据现场规模大小及模型精度选择设

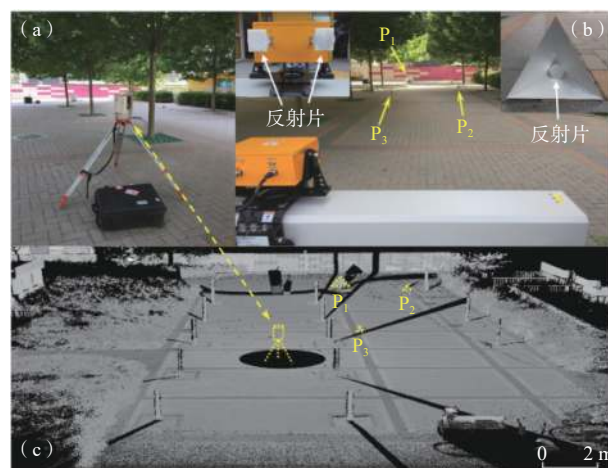


图 1 露天试验场景与数字高程模型示意图

Fig. 1 Test scenario and digital elevation model

表 1 三维激光扫描仪系统参数
Table 1 Parameters of 3D laser scanner system

参数类别	大小
激光发射频率/MHz	1.2
数据采样率/(点·s ⁻¹)	500 000
扫描视场范围/(°)	100×360
测距范围/m	2~2 500
定位精度/(mm·m ⁻¹)	±0.02

站的次数和距离。根据地形、构筑物、植被等条件,选择一个地势较高、视野通透,能覆盖监测区域及雷达系统的位置进行扫描。对采集数据进行目标区域分割、数据滤波、去除植被、网格化、数据抽稀、平滑及填补空洞等一系列处理,最终生成现场监测目标区域的 DEM。

1.2 数据匹配原理

常规的 SAR 像模拟方法主要有 3 种:系统相干模拟方法、非相干影像模拟方法和基于 SAR 影像的模拟方法^[13]。其中,非相干影像模拟方法以 DEM 和雷达天线运行轨迹为输入参数,基于 SAR 成像几何建立成像方程与辐射模型^[14]。现对非相干影像模拟方法进行改进,使用三维激光扫描地形点云作为精细数字高程模型统一坐标进行匹配,该方法简单快捷,能够为应急监测争得时间。

为了将雷达导轨坐标统一到扫描仪建立的 DEM 坐标系中,试验在扫描地形数据的同时获取地基 SAR 导轨坐标。采用激光强反射标靶识别的方法,将两个反射片分别贴在雷达主机的发射天线和接收天线上,雷达主机移动到轨道左、右端点时刻,使用扫描仪各进行一次扫描,并保证两次扫描的位置不变,初始姿态不变。根据扫描仪工作原理,两次扫描采集的点云数据在同一坐标系下,利用软件反射片识别功能,分别读取雷达天线在导轨两端点的反射片中心坐标作为雷达位置坐标,如图 2 所示。为了验证数据匹配结果,同时使用反射片识别功能,读取角反射器的位置坐标,雷达与角反射器坐标信息见表 2。

1.3 模型 DEM 与形变图像的匹配

基于距离向和方位向条件的几何映射三维匹配方法是匹配方法中最快捷方法之一^[15],基本原理是将 SAR 到雷达形变图像每个分辨单元的距离与 SAR 到 DEM 每个空间点的斜距对应相等^[16];并且将 SAR 与雷达形变图像每个分辨单元的方位角和地基 SAR 与 DEM 每个空间点的方位角对应相等,同时满足以上两个条件时,将形变图像中该单元的像素赋给 DEM 中的对应点^[17],如图 3 所示。

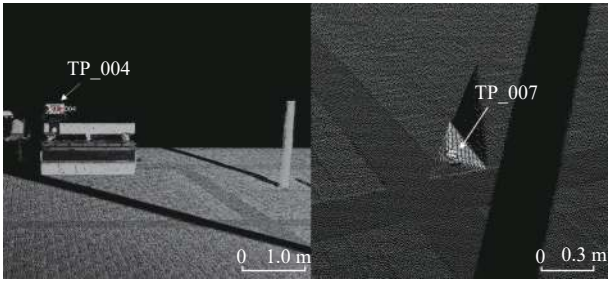


图 2 雷达位置端点与角反射器坐标识别示例

Fig. 2 Coordinate recognition of radar position endpoint and angle reflector

表 2 雷达端点与角反射器坐标
Table 2 Radarendpoint and corner reflector coordinates

点位	横坐标/m	纵坐标/m	高程/m
雷达左端点S1	7.127	-6.974	-0.139
雷达右端点S2	5.854	-7.289	-0.150
大角反射器P1	-2.209	18.758	-0.892
小角反射器P2	1.368	19.675	-1.110
小角反射器P3	1.469	5.888	-1.116

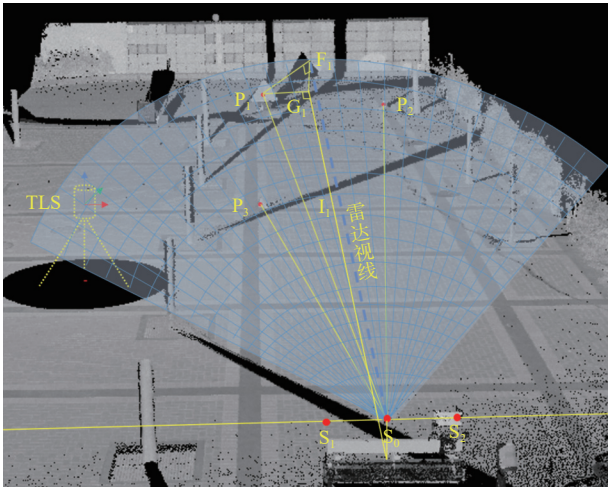


图 3 匹配原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of matching principle

基于以上原理,将模型网格单元化提高数据匹配速度,使灾害现场应用更加实用便捷。DEM 模型是由三维激光扫描生成的点云转换而成,空间分辨力高于雷达。一个雷达二维变形图像单元在匹配过程中会对应多个模型单元,不能实现一一映射关系,基于模型的高分辨率多单元特性,利用重采样和插值方法增强二者的匹配关系。选取最近邻方法(nearest neighbor method),即在遍历雷达变形图网格单元与三维空间模型单元的过程中,将图像网格点的像素取值为与其斜距、方位最近的三维空间模型单元的变形值,与雷达变形图网格单元相同大小范围内的模型单元均赋

予该值。

根据几何映射匹配原理(图3), 分别计算监测目标物体在模型与雷达形变图像中距离雷达位置的方位角和斜距, 模型方位角指的是目标点波束与雷达相

位中心波束的夹角, 而非水平投影方位角。

利用三角函数与空间立体几何方法, 则 DEM 中任意空间点的斜距与方位角的计算式为:

$$\begin{cases} l_i = \sqrt{\left(x_i - \frac{X_1 + X_2}{2}\right)^2 + \left(y_i - \frac{Y_1 + Y_2}{2}\right)^2 + \left(z_i - \frac{Z_1 + Z_2}{2}\right)^2} \\ \alpha_i = \arcsin \frac{\sqrt{(Z_1 - z_i)^2 + \frac{[2(X_2 - X_1)x_i + 2(Y_2 - Y_1)y_i + Y_1^2 - Y_2^2 + X_1^2 - X_2^2]^2}{4[(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2]}}}{l_i} \end{cases} \quad (1)$$

式中: α_i ——三维模型中任意点的方位角/rad;

l_i ——三维模型中任意点的斜距/m;

P_i ——三维模型中任意一空间点;

x_i, y_i, z_i ——空间点 P_i 的坐标值/m;

X_1, X_2, X_3 ——雷达天线扫描行迹起点 S_1 的坐标值/m;

Y_1, Y_2, Y_3 ——雷达天线扫描行迹终点 S_2 的坐标值/m。

在雷达形变图像中的具体计算式如下:

$$\alpha_{2D} = \arctan \frac{x_{2D}}{y_{2D}} \quad (2)$$

$$d_{2D} = \sqrt{x_{2D}^2 + y_{2D}^2} \quad (3)$$

式中: α_{2D} ——目标物体的方位角/(°);

x_{2D} ——方位向上的距离/m;

y_{2D} ——距离向上的距离/m;

d_{2D} ——目标物体的斜距/m。

DEM 与雷达监测数据的三维匹配结果如图4所示。

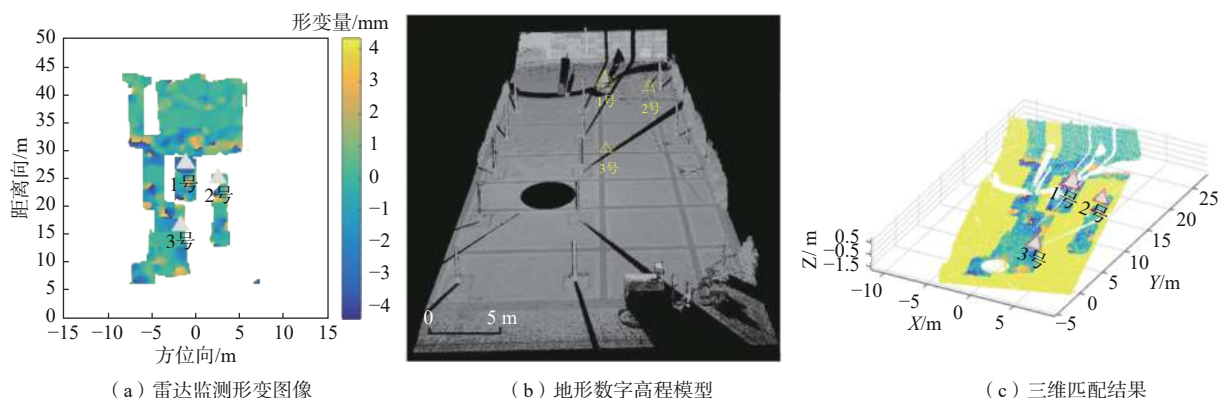


图4 DEM与雷达监测数据的三维匹配

Fig. 4 3D matching of DEM and radar monitoring data

1.4 匹配结果检验

根据匹配原理, 匹配结果的检验需要分别计算3个角反射器在雷达监测形变图像中的斜距和方位角^[18]与地形数字高程模型中的斜距和方位角, 对比分析误差。通过移动角反射器在雷达成像图上获得该角反射器的具体位置, 从而获得在形变图像中的相应位置如图5所示, 计算得到其方位角和斜距。根据数据处理过程中获取的雷达端点与角反射器位置坐标, 利用上述计算式计算3个角反射器到直线的距离, 再根据三角函数求得三维模型中角反射器到雷达位置的方位角与斜距。计算结果见表3、表4。结果表明, DEM

与地基 SAR 图像三维数据匹配在不大于 1 km 近距离监测时, 距离向平均误差小于 1.0%, 方位向平均误差小于 3.0%, 几何映射三维匹配结果比较理想, 能够满足滑坡应急监测过程中对危险坡体的分辨率需求。

匹配误差的影响因素主要有数字高程模型分辨率、监测距离、雷达分辨率、监测目标区域地形特征及数据匹配算法等。几何映射匹配法是将数字高程模型的每个单元都按照方位角和斜距的数对形式进行编码, 雷达形变图像空间范围以观测近距 R_{\min} 、观测远距 R_{\max} 、方位向最大角度 α_{\max} 、方位向最小角度 α_{\min} 等参数界定, 同样按照方位角和斜距的数对进行编

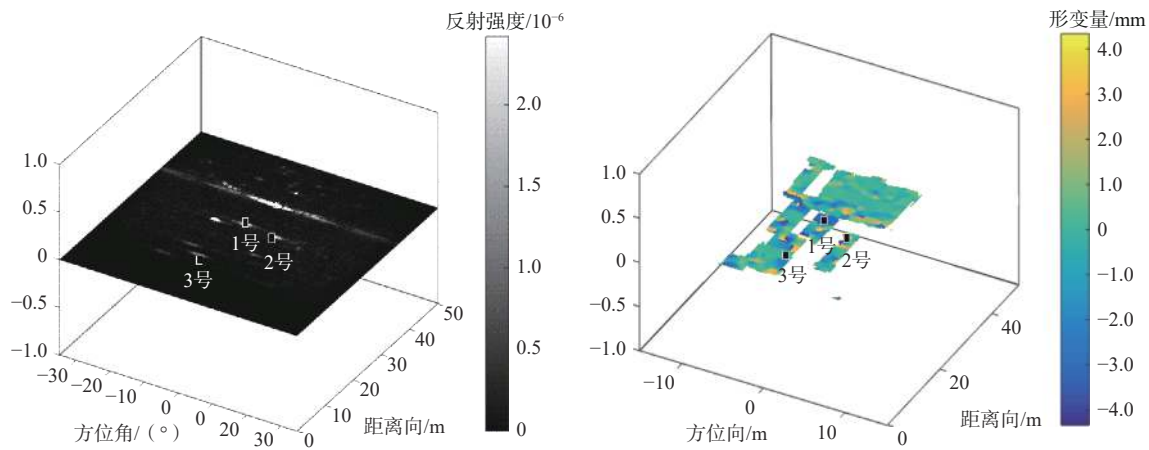


图 5 角反射器在成像图与形变图的位置

Fig. 5 Positions of corner reflector in the image and deformation map

表 3 角反射器与雷达的斜距

Table 3 Slant distance between corner reflector and radar

编号	形变图像中的斜距/m	模型中的斜距/m	误差分析/%
1	27.084	27.323	0.9
2	27.341	27.309	0.1
3	13.904	13.989	0.6

表 4 角反射器与雷达的方向角

Table 4 Angle between the corner reflector and radar

编号	形变图像中的方位角/(°)	模型中的方位角/(°)	误差分析/%
1	4.500	4.603	2.3
2	3.120	3.101	0.6
3	7.023	7.238	3.0

码。通过遍历数对进行匹配,数字高程模型分辨率及雷达自身分辨率越高系统匹配误差越小,分辨率低时采用插值法进行优化匹配,一定程度上增大匹配误差。

同等条件下,雷达与监测目标的距离越大,匹配误差越大。因为雷达的角度分辨率不变,如图 6 所示,距离分辨率也不变,距离越远雷达图像的分辨单元的面积越大,匹配误差也会增大。监测目标表面相对雷达视线的夹角越大,雷达在距离向分辨能力越

高,但夹角过大会影响到雷达微波的反射强度,监测目标的地形越复杂,造成相同方位角和斜距的数对增多,匹配误差增大。各种数据匹配算法有着自身的优势和不足,数据匹配算法的误差可以通过针对性优化而减小。

2 应用案例及效果分析

中缅天然气管道贵州晴隆段由于管道周围土体滑动失稳挤压管道,发生天然气泄漏爆燃事故。在抢修作业开挖的两侧存在高 15 m 左右的危险边坡。坡体土质松散,易发生快速变形,危及人员安全。根据现场踏勘调研,重点监测区域为如图 7 所示的区域 1 和区域 2,并将雷达站设定为对面稳定边坡上,距离区域 1 约 320 m,距离区域 2 约 400 m。雷达采集间隔设置为 10 min,监测范围水平夹角 60°,俯仰角 30°,覆盖整个事故现场。

通过研究国内近期数起滑坡案例可知,当前滑坡现场监测进行三维数据匹配实现变形数据可视化的很少,而在露天矿山边坡雷达监测中常见的建模及数据匹配方法通常需要 8 h 左右^[19],相对于传统矿山监测常见的数据匹配方法,通过优化匹配算法减少雷达真实坐标测量及仪器坐标与真实坐标相互转换的步骤,弥补应急抢险现场无控制基准点无法进行匹配的不足,实现监测数据三维可视化,减少坐标转换引起的误差,节约监测准备时间,提高工作效率。

雷达监测形变图为二维图像,变形较大的隐患点仅能通过距离和方位两个参数来推测现场滑坡危险源的具体位置,不能在变形图中直观地观察到危险源位置,无法分析滑动方向及影响范围,因此需要进行应急监测的数据匹配,匹配效果如图 8 所示。

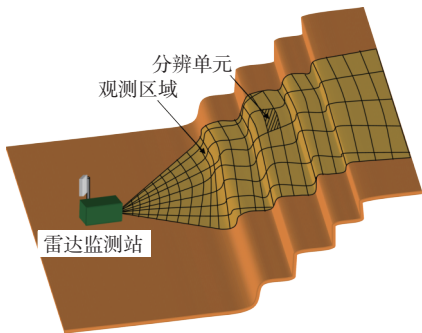


图 6 雷达监测分辨单元示意图

Fig. 6 Schematic diagram of radar monitoring resolution unit

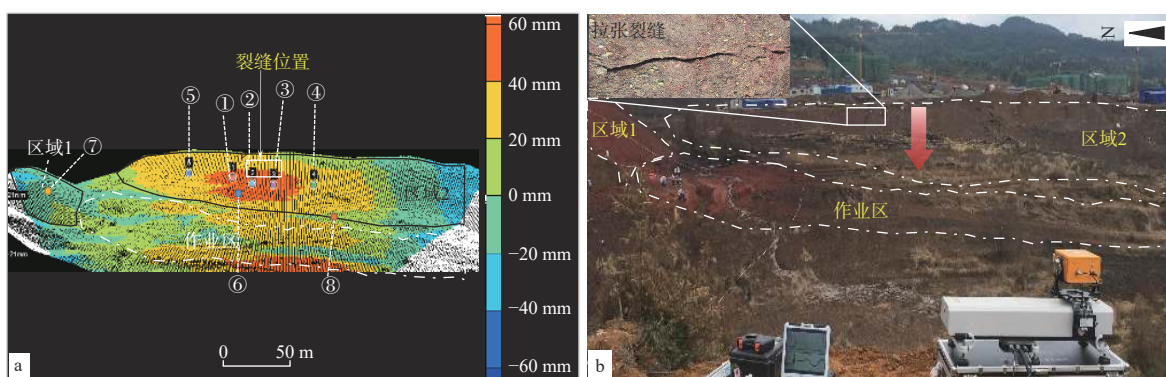


图7 雷达监测结果与事故现场对照关系

Fig. 7 Comparison of radar monitoring results and accident site

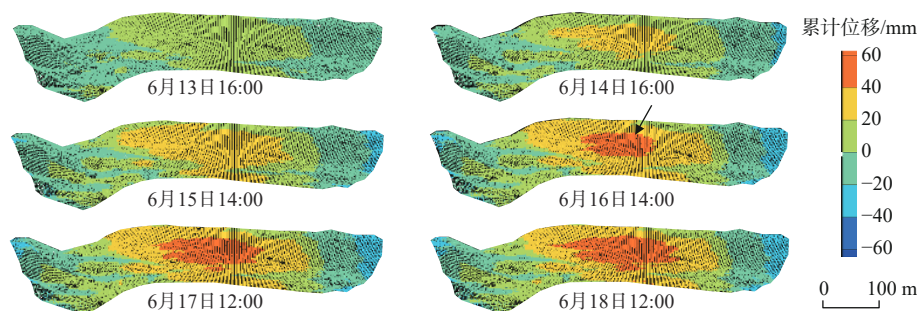


图8 累积形变监测结果

Fig. 8 Cumulative deformation monitoring

为进一步验证方法的有效性,对监测情况进行简要分析,并与现场边坡踏勘情况进行对照。累积形变实时监测结果如图8所示,16日下午2—8时现场降雨雨量较大,实时监测结果显示,重点监测区域2局部变形较大,累计位移达到40.0 mm,变形速率0.4 mm/h。根据数据匹配方法及雷达成像原理,靠近雷达变形显示红色,远离雷达变形显示蓝色,因此根据图中红色位置迅速定位危险源(图8箭头指示位置)并进行针对性现场踏勘,经现场确认在红色区域后缘(图7矩形框位置)发现多处拉张裂缝,最大宽度约13.0 mm,验证了上述数据匹配方法的可靠性。根据红色定位信息发现裂缝,边坡土体滑移方向垂直于拉张裂缝,由此判断危险边坡的滑移路径大致如图7(b)箭头所示。

在该区域选取8个监测点进行时程曲线分析,其中1、2、3、6号点在红色区域范围内,4、5、7、8号点作为对比。选点的累积位移曲线如图9所示,1、2、3、6号点的变形趋势基本一致,从6月15日凌晨1时开始,边坡土体变形速度逐渐缓慢增长,是由于抢险人员开始使用挖掘机进行开挖作业,开挖卸荷造成上部土体的变形。

6月16日14时随着降雨量增大,监测边坡呈现

突然加速变形趋势,速度高于6.0 mm/h并持续3 h,1、2、3、6号点的累计位移分别为46.5, 51.2, 48.3, 51.4 mm; 4、5号点呈匀速变形趋势并基本保持不变,累积位移达到16.5 mm; 7号点测点位于“区域1”,边坡滑移方向几乎与雷达视线方向垂直,累计位移为负值,向远离雷达方向变形。

6号点的累计位移大于1号、2号点,是由于靠近作业开挖区优先发生变形,坡体在降雨环境下发生牵引式滑动。综上,红色危险坡体向作业区快速变形,于是发布了预警,建议施工单位立即停止开挖,对危险边坡进行处置,处置后变形速率减缓,趋于稳定。6月13日上午8时,应急监测队员架设雷达安装调试的同时,按照前期试验流程进行现场扫描、数据处理、快速建模、雷达系统坐标获取、数据匹配、结果检验等一系列工作,检查数据质量合格,上午10时正式开始监测,共历时2 h。截至18日下午6时管道修复工作完成,共连续监测106 h,发布1次预警,本次应急监测有效保障了抢修作业的安全有序进行。

3 结论

(1)基于GB-InSAR的滑坡灾害应急监测中,利用

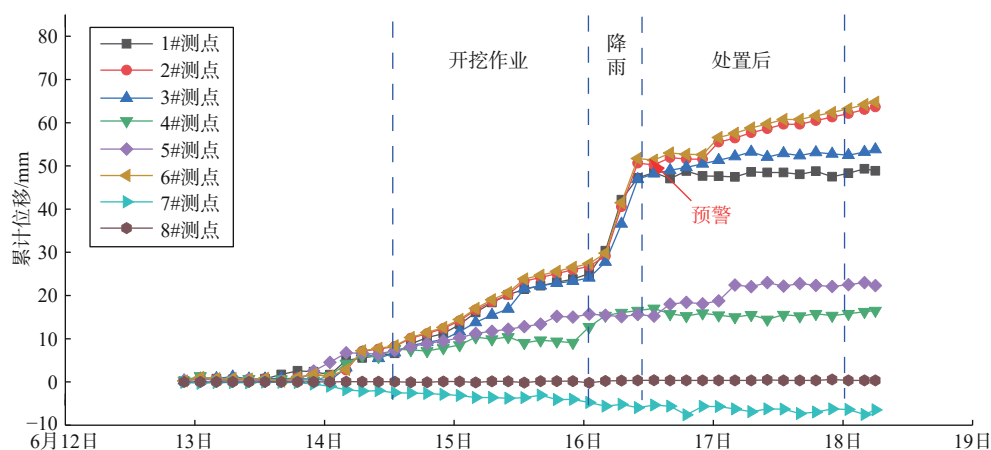


图 9 选点累积位移曲线

Fig. 9 Selected point cumulative displacement curve

三维激光扫描技术对危险坡体进行快速扫描建模, 同时将 SAR 系统坐标统一到仪器局部坐标系中, 使用几何映射法能够将雷达变形图像和数字高程模型进行快速有效的数据匹配, 突破了灾害现场没有可用地表控制坐标的限制, 基本实现灾害现场的变形信息三维可视化。实践证明, 使用仪器坐标进行几何映射匹配的方法在近距离监测时, 距离向平均误差小于 1.0%, 方位向平均误差小于 3.0%, 能够满足滑坡应急监测过程中对危险坡体的分辨率需求。

(2) 滑坡灾害应急抢险行动中, 利用三维激光扫描技术进行建模, 并使用基于仪器坐标系的几何映射数据匹配方法比矿山雷达监测使用的传统匹配方法节省 6 h 左右。通过匹配能够快速定位滑坡危险源, 可以指导抢险人员进行针对性现场踏勘巡查, 有利于分析可能的滑动路径及受灾范围, 给应急抢险指挥部提供可靠的数据支撑。

参考文献 (References):

- [1] 李湖生. 非常规突发事件应急准备体系的构成及其评估理论与方法研究 [J]. 中国应急管理, 2013(8): 13 - 21. [LI Husheng. Study on the composition of emergency preparedness system for unconventional emergencies and its evaluation theory and method[J]. China Emergency Management, 2013(8): 13 - 21. (in Chinese)]
- [2] 马海涛, 张亦海, 于正兴. 滑坡速度倒数法预测模型加速开始点识别及临滑时间预测研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(2): 355 - 364. [MA Haitao, ZHANG Yihai, YU Zhengxing. Research on the identification of acceleration starting point in inverse velocity method and the prediction of sliding time[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(2): 355 - 364. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 何朝阳, 许强, 巨能攀, 等. 滑坡实时监测预警模型调度算法优化研究 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(7): 970 - 982. [HE Chaoyang, XU Qiang, JU Nengpan, et al. Optimization of model scheduling algorithm in real-time monitoring and early warning of landslide[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(7): 970 - 982. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 徐文正, 卢书强, 林振, 等. 联合 InSAR 与神经网络的范家坪滑坡形变监测及预测研究 [J/OL]. 水文地质工程地质, 2024, (2024-03-01) [2024-04-08]. [XU Wenzheng, LU Shuqiang, LIN Zhen, et al. Combination of InSAR and neural networks for the deformation monitoring and prediction of Fanjiaping landslide[J/OL]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, (2024-03-01) [2024-04-08]. 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202308028. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 程滔, 单新建, 董文彤, 等. 利用 InSAR 技术研究黄土地区滑坡分布 [J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(1): 98 - 101. [CHENG Tao, SHAN Xinjian, DONG Wentong, et al. A study of landslide distribution in loess area with InSAR[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(1): 98 - 101. (in Chinese with English abstract)]
- [6] NOFERINI L, PIERACCINI M, MECATTI D, et al. Using GB-SAR technique to monitor slow moving landslide[J]. Engineering Geology, 2007, 95(3/4): 88 - 98.
- [7] DEL VENTISETTE C, CASAGLI N, FORTUNY-GUASCH J, et al. Ruinon landslide (Valfurva, Italy)

- activity in relation to rainfall by means of GBInSAR monitoring[J]. *Landslides*, 2012, 9(4): 497 – 509.
- [8] 于海明, 张熠斌, 方向辉, 等. 综合 InSAR 技术和多源 SAR 数据在滑坡变形监测中的应用——以吉林治新村滑坡为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(1): 155 – 162. [YU Haiming, ZHANG Yibin, FANG Xianghui, et al. Application of multiple InSAR techniques and SAR data from multisources to landslide deformation monitoring: A case study of the Zhixincun landslide in Jilin Province[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2024, 35(1): 155 – 162. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 张亦海, 于正兴, 温经林, 等. 边坡雷达变形图与航测模型配准方法及应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(增刊 1): 2817 – 2825. [ZHANG Yihai, YU Zhengxing, WEN Jinglin, et al. Application of matching method of the deformation map of slope radar and UAV aerial survey model in landslide monitoring[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(Sup 1): 2817 – 2825. (in Chinese)]
- [10] 周定义, 左小清, 喜文飞, 等. 基于 SBAS-InSAR 技术的深切割高山峡谷区滑坡灾害早期识别 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(2): 16 – 24. [ZHOU Dingyi, ZUO Xiaoqing, XI Wenfei, et al. Early identification of landslide hazards in deep cut alpine canyon using SBAS-InSAR technology[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(2): 16 – 24. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 谢谟文, 胡嫚, 杜岩, 等. TLS 技术及其在滑坡监测中的应用进展 [J]. 国土资源遥感, 2014, 26(3): 8 – 15. [XIE Mowen, HU Man, DU Yan, et al. Application of TLS technique to landslide monitoring: Summarization and prospect[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2014, 26(3): 8 – 15. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 林德才, 马海涛, 宋宝宏. 边坡雷达在滑坡应急救援行动中的应用 [J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(增刊 1): 284 – 289. [LIN Decai, MA Haitao, SONG Baohong. Application of slope radar in emergency rescue of landslide[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2016, 12(Sup 1): 284 – 289. (in Chinese)]
- [13] 吴星辉, 璩世杰, 马海涛, 等. 边坡雷达系统在露天矿边坡监测中的应用 [J]. 金属矿山, 2018(2): 188 – 191. [WU Xinghui, QU Shijie, MA Haitao, et al. Application of slope radar system in slope displacement monitoring of surface mine[J]. *Metal Mine*, 2018(2): 188 – 191. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 董秀军, 黄润秋. 三维激光扫描技术在高陡边坡地质调查中的应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 2): 3629 – 3635. [DONG Xiujun, HUANG Runqiu. Application of three-dimensional laser scanning technology in geological survey of high and steep slopes[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(Sup 2): 3629 – 3635. (in Chinese)]
- [15] 张永红, 张继贤, 杨崇源. 基于影像模拟的 SAR 几何校正准自动方法 [J]. 遥感学报, 2003, 7(2): 106 – 111. [ZHANG Yonghong, ZHANG Jixian, YANG Chongyuan. A quasi-automatic rectification method of SAR image based on image simulation[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2003, 7(2): 106 – 111. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 郑翔天. 基于边坡雷达的形变灾害特征提取方法研究 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2019. [ZHENG Xiangtian. Research on feature extraction method of deformation disaster based on slope radar[D]. Beijing: China University of Mining & Technology(Beijing), 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 赵东寅, 申其鸿, 马海涛, 等. 国产地基合成孔径雷达监测预警系统在紫金山金铜矿露天采场边坡位移监测的应用 [J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(4): 54 – 58. [ZHAO Dongyin, SHEN Qihong, MA Haitao, et al. Application of domestic ground based synthetic aperture radar monitoring and warning system in slope displacement monitoring on open pit of Zijinshan gold/copper mine[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2015, 11(4): 54 – 58. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 杨晓琳, 谭维贤, 林赞, 等. 基于单特显点调频连续波阵列 SAR 系统幅相误差校正方法研究 [J]. 电子与信息学报, 2014, 36(11): 2672 – 2677. [YANG Xiaolin, TAN Weixian, LIN Yun, et al. Amplitude and phase errors correction method for FMCW array SAR system using single prominent point echo[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(11): 2672 – 2677. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 谢志昆. 基于点云特征的 SAR 图像配准技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2023. [XIE Zhikun. Research on SAR image registration technology based on point cloud features[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 王支农