

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.02.09

国产 GB-InSAR 在特大型水库滑坡变形监测中的应用

郭延辉^{1,2}, 杨 溢¹, 杨志全¹, 高才坤², 田卫明³, 何玉童⁴

- (1. 昆明理工大学公共安全与应急管理学院, 云南昆明 650093; 2. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 云南昆明 650051; 3. 北京理工大学信息与电子学院, 北京 100081; 4. 上海华测导航技术股份有限公司, 上海 200233)

摘要:水电站库区特大型滑坡的稳定性对于水电站坝工结构及周边人民生命财产安全具有重要影响, 对该类滑坡稳定性及变形趋势进行大范围实时精确观测可为滑坡提供可靠的预警和治理信息, 具有十分重要的意义。水电站库区滑坡传统监测方法主要以 GNSS 监测, 全站仪监测等为主, 本研究将国产先进的地基干涉合成孔径雷达系统 LKR-05-KU-S100, 应用于澜沧江大华桥水电站沧江桥—营盘滑坡和大华滑坡的监测。现场监测试验表明, 该系统精度较高, 可进行远距离、全天时、全天候、大范围监测, 对于大型及特大型滑坡的监测具有独特的优势和广阔的应用前景。

关键词: GB-InSAR; 差分干涉测量; 特大型滑坡; 变形监测; LKR-05-KU-S100

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)02-0066-07

Application of GB-InSAR in deformation monitoring of huge landslide in reservoir area

GUO Yanhui^{1,2}, YANG Yi¹, YANG Zhiquan¹, GAO Caikun², TIAN Weiming³, HE Yutong⁴

- (1. Faculty of Public Safety and Emergency Management, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China; 2. Power China Kunming Engineering Co. Ltd., Kunming, Yunnan 650051, China; 3. College of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 4. Shanghai Huace Navigation Technology Co. Ltd., Shanghai 200233, China)

Abstract: The stability of large-scale landslide in the reservoir area of hydropower station has an important impact on the safety of dam structure and surrounding people's life and property. Large-scale real-time accurate observation of the stability and deformation trend of this type of landslide can provide reliable early warning and control information for the landslide, which is of great significance. The traditional monitoring methods of landslide in the reservoir area of hydropower station are mainly GNSS monitoring and total station monitoring. In this study, the advanced GB-InSAR system LKR-05-KU-S100 is applied to the monitoring of Cangjiangqiao-Yingpan landslide and Dahua landslide of Dahuaqiao hydropower station on Lancang River. Field monitoring tests show that the system has high precision, and it can carry out long-distance, all-day, all-weather, and large-scale monitoring. It has unique advantages and broad application prospects for the monitoring of large and super-large landslides.

Keywords: GB-InSAR; differential interferometry; huge landslide; deformation monitoring; LKR-05-KU-S100

收稿日期: 2020-08-19; 修订日期: 2021-01-04

基金项目: 国家自然科学基金中智国际(地区)合作与交流重点项目(41861134008); 云南省应用基础研究计划项目(2018FB075); 云南省科技计划项目(科技惠民计划 2015RA069)

第一作者: 郭延辉(1985-), 男, 博士(后), 副教授, 主要从事地质灾害监测与预测预警方面的研究。E-mail: guoyanhui0818@kust.edu.cn

通讯作者: 杨 溢(1965-), 男, 博士, 教授, 主要从事地质灾害启动机理与防控方面研究。E-mail: 2919847230@qq.com

0 引言

随着国家一带一路和西部大开发战略的深入实施,一批世界级的水利水电工程项目正如火如荼的建设^[1]。由于西南高山河谷区地形地质条件复杂,在水利水电工程建设中,不可避免会出现大量不稳定斜坡,这些不稳定斜坡在降雨、地震或水位反复升降等情况下会发生滑坡灾害,严重时将危及水电站坝工程结构的安全,同时威胁周边居民的生命财产安全^[1]。因此对水电站库区滑坡开展变形监测,通过监测数据,获取滑坡的变形发展趋势,探究滑坡灾害的演化机制及防控措施,对保证工程运行安全,减少人员伤亡和经济损失具有重大意义^[2]。

对于水电站库区滑坡监测,目前以全站仪、水准仪、GNSS等监测方法为主,虽然GNSS和全站仪等传统测量技术能获得相对较高精度的单点位移,但难以反映滑坡区域的整体变形,且容易受气候、时间、通视等条件的限制,更重要的是这些获取变形信息的方式都是接触式的,对于危险性较大的滑坡不适宜^[3]。测量机器人精度较高,但其布置测点比较困难,且受天气等通视条件的影响较大^[4]。三维激光扫描测量技术因能够监测滑坡整体变形而受到广泛关注,但其容易受雨、雪、雾等气象条件的影响,目前难以实现全天时、全天候的监测工作,且测量精度有待提高^[5]。

地基干涉合成孔径雷达(GB-InSAR)是一种非接触式监测方法。由于该监测技术工作在微波波段,所以能够全天时、全天候对大范围监测区域进行实时连续变形监测^[6]。相比星载与机载平台SAR,GB-InSAR在重访周期、使用方便性、监测视角以及使用成本等方面都更有优势^[7]。关于国外地基合成孔径雷达在工程灾害监测应用方面的研究,刘斌等^[8]采用意大利Ingegneria Dei Sistemi Company和University of Florence共同研制GB-InSAR系统IBIS-L,对大树场镇山体滑坡灾后稳定性进行了监测评估,分析了滑坡灾后形变演化特征;邱志伟等^[9]、邢诚等^[10]运用地基合成孔径雷达IBIS-L系统,对隔河岩大坝开展现场变形观测,通过数据分析,对大坝整体的监测结果和变形进行了分析;张昊宇等^[11]通过荷兰Metasensing公司研发的采用FMCW技术的Fast-GBSAR设备,对赤壁市陆水大坝放水前后的变形情况进行监测及对比分析;李如仁等^[12]通过对GB-InSAR与GIS的集成,将东二号煤矿露天采场边坡GB-InSAR得到的变形数据与GIS有机地连接起来,验证了该方法在变形信息数据展示和分析方面的优点。国内

地基合成孔径的研发和地质灾害监测方面,林德才等^[13]采用中国安全生产科学研究院自主研发的地基SAR形变监测系统,对浙江丽水“11·13”滑坡灾害进行应急救援监测,试验结果验证了边坡雷达能够较好的运用于滑坡灾害的应急监测和预警;李翔宇等^[14]采用内蒙古自治区方向图科技有限公司研发的MPDMMR-05-LSA1701型GB-InSAR系统,监测云南牛栏江堰塞湖红石岩岩质边坡形变,分析该岩质边坡的稳定性。此外,LUO等^[15]采用中国科学院电子所研发的ArcFMCW-SAR系统,提取滑坡数字高程模型和监测滑坡。

综上,目前国内工程安全监测所运用的地基合成孔径雷达系统主要是以意大利IDS公司的IBIS-L系统和荷兰的MentaSensing公司的Fast-GBSAR系统为主。国产GB-InSAR系统目前还很少,尚处于起步阶段。同时,国产GB-InSAR在水电站库区特大型滑坡变形监测中的应用报道较少。本文应用国产先进的新型地基干涉合成孔径雷达LKR-05-KU-S100监测系统,以澜沧江流域大华桥电站沧江—营盘桥滑坡和大华滑坡为研究对象,通过开展现场在线监测试验,分析该系统的精度以及适用性,研究成果对于大型及特大型滑坡灾害的监测预警以及国产雷达监测系统的应用推广具有重要意义。

1 地基合成孔径雷达技术测量原理

GB-InSAR的成像几何示意图见图1所示,图中y轴为方位向,水平轨道位于y轴,垂直于轨道方向为距离向,则其工作原理为:第一,天线向垂直于轨道方向(距离向)发射电磁波,在发射的过程中,同时需要接收地物回波;第二,雷达移动 Δy 到轨道下一位置重复发射电磁波,并接受地物回波,直到采集完设定长度L,然后根据二维回波数据重构地物的雷达反射系数分布^[14-15]。

图2为GB-InSAR分辨率示意图,距离向分辨率为^[16-17]:

$$\delta_r = \frac{c}{2B} \quad (1)$$

式中: c ——电磁波在空气中传播的速度,近似为光速;

B ——GB-InSAR系统所发射的信号带宽。

方位向分辨率为:

$$\delta_\theta = \frac{\lambda}{2L} \quad (2)$$

式中: λ ——电磁波波长;

L ——轨道长度。

若GB-InSAR在不同时间,通过监测所获取的同一

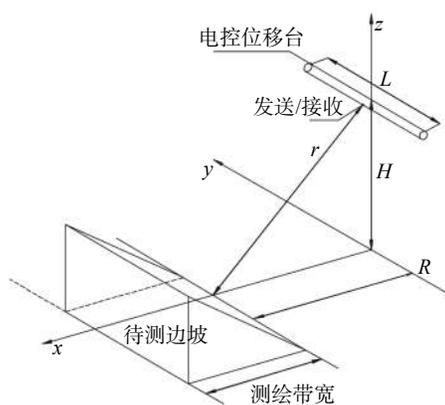


图 1 GB-InSAR 系统观测几何示意图

Fig. 1 Observation geometry schematic diagram of GB-InSAR system

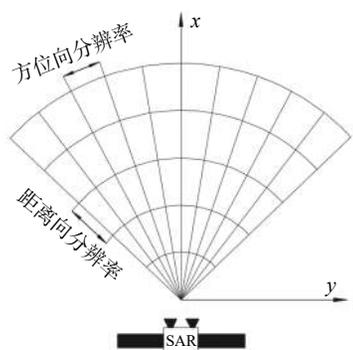


图 2 GB-InSAR 分辨率示意图

Fig. 2 Resolution diagram of GB-InSAR

目标区域的两幅 SAR 复图像, 其中第一幅 SAR 复图像记为 I_1 , 另一幅记为 I_2 ^[17]。通过复图像的对应像素共轭相乘, 即可获得两幅图像的相位差, 从而形成干涉相位图, 并求得干涉相位图中, 任意像素点 p 的相位差^[17]。根据解缠后的相位差, 即可求得图像中监测目标区域沿雷达视线方向的高精度形变值^[18-19]。

2 国产地基合成孔径雷达系统 LKR-05-KU-S100 组成及主要参数

2.1 LKR-05-KU-S100 系统组成

本研究采用国产先进的 LKR-05-KU-S100 系统(图 3)。该系统由北京理工雷科电子信息技术有限公司研发。LKR-05-KU-S100 系统主要包括雷达主机、数据处理单元、线性滑轨和能量供应单元四部分组成。系统采用的高精度电控位移台, 能够确保监测运行期间的平稳性和可靠性。系统调频连续波雷达通过发送线性调频的电磁波信号, 因此大大缩短成像时间, 而观测一次耗时也较短, 最短耗时小于 2 min。系统实时监测数据处理软件有二维和三维两种模式, 易于从监测成像结果中识别出地形相关信息。系统的数据处理单元可构建数据

库并将雷达监测数据通过网站的方式实时发布。此外, 雷达监测数据可以实现远程无线方式实时传输。



图 3 LKR-05-KU-S100 雷达系统组成图

Fig. 3 Composition of LKR-05-KU-S100 radar system

2.2 系统主要功能及参数

LKR-05-KU-S100 雷达系统主要功能有: (1) 可对监测目标区域进行远距离、大范围、非接触式监测; (2) 可长时间工作, 连续工作时间大于 100 d; (3) 能够精确测出目标对象的 0 ~ 50 Hz 的振动频率, 以及 1 ~ 4 阶振动频率, 因此能够对目标对象的振动信息监测; (4) 具有可远程遥控观测功能; (5) 雷达系统精度高, 可达到亚毫米级; (6) 具有设备使用节能环保, 数据采集与处理时间短等特点。雷达基本参数见表 1 所示, LKR-05-KU-S100 系统参数见表 2 所示。图 4 为雷达监测信息图像处理界面。

表 1 雷达基本参数表

Table 1 Radar basic parameter table

雷达组成	参数名称	参数取值
雷达控制单元	信号频段	Ku
	信号类型	SFCW
	孔径类型	合成孔径
	增益	18 dBi
天线	极化方式	VV
	主瓣-3 dB角宽	75°H/90°V

表 2 LKR-05-KU-S100 系统基本参数

Table 2 Basic parameters of LKR-05-KU-S100 system

参数名称	参数取值
分辨率	距离分辨率: 0.3 m
	方位向: 4 mrad(可定制)
监测距离/m	10 ~ 4 000
监测精度/mm	0.1
工作环境/°C	-25 ~ 60
软件	软件数据接口开放, 界面简易, 操作方便
可定制性	可实现多源数据融合

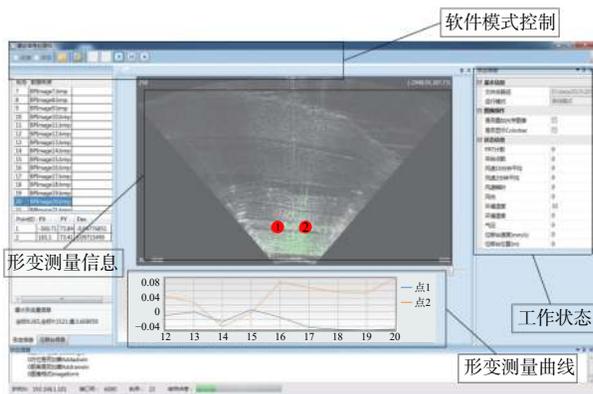


图4 雷达监测信息成像处理界面

Fig. 4 Radar monitoring information imaging processing interface

3 GB-InSAR 在大华桥电站沧江桥—营盘滑坡变形监测中的应用

3.1 沧江桥—营盘滑坡地质概况

大华桥水电站地处云南省怒江州兰坪县兔峨乡,是澜沧江干流水电基地上游河段规划的八座梯级电站中的第六级水电站。水电站大坝为碾压混凝土重力坝,坝顶长 231.5 m,坝高 106 m,水库总库容 $2.93 \times 10^8 \text{ m}^3$,电站装机容量为 $92 \times 10^4 \text{ kW}$ ^[20]。

沧江桥滑坡体距离大华桥电站下坝址 24 km,位于库区沧江桥的左岸,沧江桥滑坡体后缘为营盘堆积体(图 5)。沧江桥滑坡体具有明显的地貌形态特征,“圈椅状”比较明显,滑坡体后缘高程为 1 590 m,较宽,前缘高程 1 445 m,相对较窄,整个滑坡体前后缘高差超过 110 m。沧江桥滑坡体自然地形坡度约为 $10^\circ \sim 25^\circ$,沿澜沧江流向最宽约 1 200 m,而沿纵向长度最大为 900 m。沧江桥滑坡体后缘的营盘堆积体分布高程为 1 590 ~ 1 750 m,即营盘堆积体后缘高程为 1 750 m,营盘堆积体上部为营盘镇所在地。沧江桥—营盘滑坡体总体积约 $1.500 \times 10^4 \text{ m}^3$,属于特大型滑坡。滑坡体上部地形较破



图5 沧江桥—营盘滑坡全景及分区示意图

Fig. 5 Cangjiangqiao—Yingpan landslide panorama and zoning diagram

碎,冲沟发育。沧江桥—营盘滑坡体实测水位 1 457.17 ~ 1 759.51 m,总体水位变化不大^[19]。

3.2 沧江桥—营盘滑坡监测分析

为了监测沧江桥—营盘滑坡体的变形,根据现场实际情况及设备工作原理,沧江桥—营盘滑坡测点设置于滑坡对岸位置,测点距滑坡水平距离约 2 000 m。图 6 为现场实测沧江桥—营盘滑坡光学照片,图 7 为雷达强度影像及监测过程曲线图。



图6 沧江桥—营盘滑坡光学照片

Fig. 6 Optical photos of Cangjiangqiao—Yingpan landslide

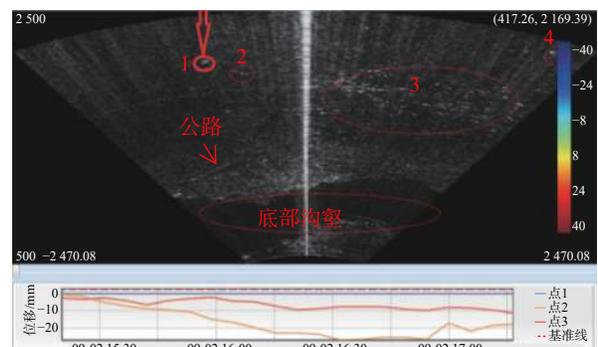


图7 沧江桥—营盘滑坡雷达强度影像及变化过程曲线图

Fig. 7 Radar intensity image and change process curve

根据边坡的雷达图像和边坡光学照片对比分析,可以发现:(1)雷达图像中 1 号区域宾馆及 3 号区域营盘镇房屋建筑的雷达回波较强,特征明显。(2)在雷达图像中,公路的回波特征较强,特征比较明显;(3)雷达图像中底部江面沟壑特征比较明显;(4)监测区域地表树木和杂草等植被茂密的地方,雷达回波比较弱,特征不明显;(5)观测距离相对于常规全站仪观测距离更远。综上,在对沧江桥—营盘滑坡体进行监测时,虽然测点距离坡面距离较远,受地表植被等影响,部分区域雷达回波较弱,特征不是很明显,但是滑坡区域内房屋建筑、公路路面、路堑和路堤、坡面裸露的区域等回波特征较强,特征非常明显,可根据这些典型区域对沧江

桥—营盘滑坡的整体稳定性进行有效的实时监测。

将监测过程中不同时刻滑坡表面的累积形变量监测结果,通过 Matlab 成像处理,生成沧江桥—营盘滑坡累积变形分布图(图 8)。根据监测结果,可以分析监测时间段内,监测区域不同位置的位移变化情况。分析可知:(1)限于监测时间,在监测时间段内,边坡最大位移主要出现在地表植被较茂密的地方,说明茂密的植被对于监测精度有一定影响。(2)整体来看,在监测时段内,监测区域内主要建筑物位置的位移很小,说明监测期内沧江桥—营盘滑坡整体基本处于稳定状态。(3)考虑到后期大华桥电站水库蓄水过程中,沧江桥滑坡体前沿被淹没,可能引起滑坡体复活,因此 GB-InSAR 在该边坡中的长期监测是必要且可行的。

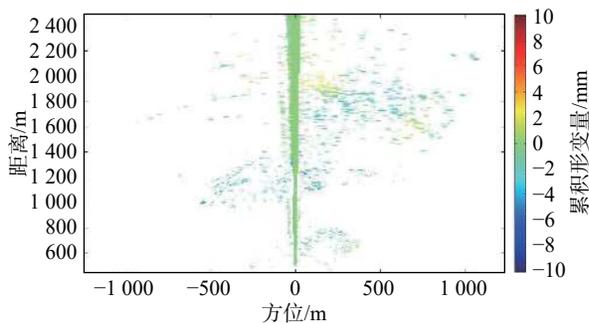


图 8 沧江桥—营盘滑坡累积变形分布图
Fig. 8 Cumulative deformation distribution of Cangjiangqiao—Yingpan landslide

4 GB-InSAR 在大华桥电站大华滑坡变形监测中的应用

4.1 大华滑坡地质概况

大华滑坡体距大华桥电站下坝址约 5.1 km,为典型的纵横等长式滑坡,其前缘高程为 1 410 m,后缘高程为 1 780 m,前、后缘长度约为 1 000 m,顺澜沧江流向宽度约 1 060 m。总体来看,滑坡体“圈椅”状特征比较明显,其前缘处于临空,而后缘及上下游侧缘则被基岩陡坡围限^[20](图 9)。整个滑坡堆积物体积大约为 $4\ 840 \times 10^4\ \text{m}^3$,属于特大型滑坡。滑坡物质主要由上下两部分组成,上部(表层 10~50 m)主要为崩积土夹碎块石,而下部(20~50 m)则主要为全、强风化紫红色板岩组成,紫色板岩大都发生倾倒变形,少部分虽保持原状层序,但大多呈碎块、碎片、碎屑状,且强度较低。水库正常蓄水位为 1 477 m 后,大华滑坡体前缘将有 67 m 的高度被淹没,水库蓄水发电后,库水位的反复升降可能对大华滑坡体的稳定产生较大影响^[20]。



图 9 大华滑坡全貌及分区图

Fig. 9 Overall view and zoning map of Dahua landslide

4.2 大华滑坡监测分析

大华滑坡测点位于滑坡对岸公路边,距滑坡水平距离约为 290 m。大华滑坡雷达强度影像见图 10。可以发现:(1)雷达图像中乡村公路、路堑及路堤边坡的回波特征较强,雷达影像特征比较明显;(2)雷达图像中的下部的滑坡前缘回波比较强,特征也比较明显;(3)滑坡区域内裸露地表处的雷达回波较强,特征较明显;(4)滑坡监测区域的地表树木和杂草等植被茂密的地方,雷达回波比较弱,特征不是很明显;(5)在方位向零点处存在较为明显的亮线,与实际观测场景存在一定出入,在分析时,应当仔细甄别,降低这一区域的影响。同时,需要进一步改进优化监测系统,使得方位向零点处监测结果尽可能与实际变形情况相符。综上,在对大华滑坡体进行监测时,监测距离相对于沧江桥—营盘滑坡有所减小。滑坡区域内乡村公路路面、路堑和路堤,坡面裸露的区域等回波特征较强,特征非常明显,可根据这些典型区域对大华滑坡的整体稳定性进行有效的实时监测。整体来看,大华滑坡的雷达影像图比沧江桥—营盘滑坡雷达影像图要清晰,说明随着距离缩小,雷达影像图清晰度有所提高。

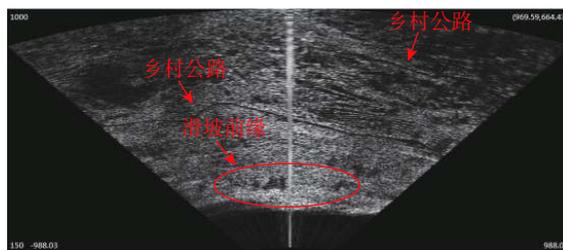


图 10 大华滑坡雷达强度影像图

Fig. 10 Radar intensity image of Dahua landslide

图 11 为大华滑坡监测位移过程曲线,图 12 为大华滑坡累积变形分布。图中可以发现:在监测时间段内,大华滑坡坡面位移较小,选取的 4 个测点中,最大位移量约为 2 mm。因此,大华滑坡基本处于稳定状态。考

虑到后期大华桥电站水库蓄水过程中, 滑坡体前沿被淹没, 可能引起滑坡体复活, 因此采用 GB-InSAR 对该滑坡进行长期监测, 特别是蓄水过程中进行实时监测是非常必要的^[21-22]。

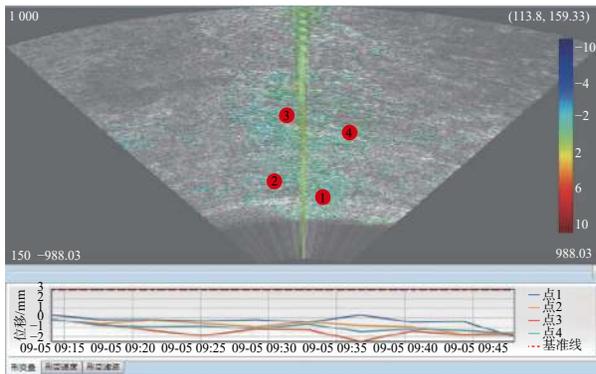


图 11 大华滑坡监测过程曲线

Fig. 11 Dahua landslide monitoring process curve

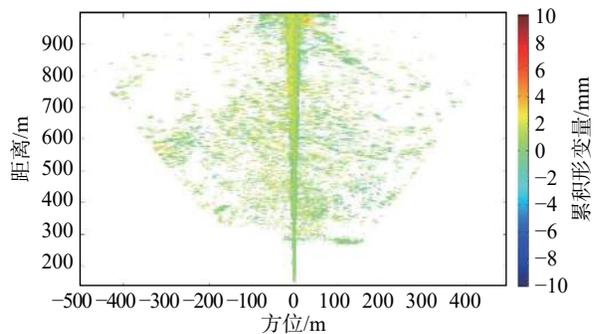


图 12 大华滑坡累积变形分布图

Fig. 12 Distribution of accumulated deformation of Dahua landslide

5 结论

本研究基于国产先进地基合成孔径雷达系统 LKR-05-KU-S100, 在云南大华桥水电站沧江桥—营盘滑坡和大华滑坡进行了现场监测试验, 通过对监测结果进行深入分析, 可得到如下结论:

(1) 现场监测试验表明, 若监测滑坡区域地表植被茂密, 则监测精度会降低, 因此对于植被茂密区域的数据处理, 需要进行仔细甄别, 谨慎处理。

(2) 地基合成孔径雷达在监测过程中, 对于滑坡区域内建筑物、公路、裸露地表等回波特征强, 测量精度高、误差小。因此在对滑坡进行大范围监测时, 可选取上述回波特征较强的区域为典型特征点作为滑坡整体变形和稳定性分析的依据。

(3) 本次试验表明, 国产 LKR-05-KU-S100 地基合成孔径雷达系统具有高精度、远距离、全天时、全天候、测量范围大等优点, 对于大型及特大型滑坡等地质

灾害的监测具有独特的优势和良好的应用前景。如何提高地表植被影响下的测量精度, 并将所观测的视线方向的变形量, 转化为三维方向的位移量, 仍需要进一步研发。

参考文献 (References):

- [1] 王自高. 西南水利水电工程地质灾害问题与预防措施研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013. [WANG Zigao. Study on geological hazards and preventive measures of water conservancy and hydropower projects in Southwest China[M]. Beijing: China Water&Power Press, 2013. (in Chinese)]
- [2] 王自高, 何伟, 王昆. 水利水电工程中地质灾害预防与地质环境保护对策[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2012, 23(2): 70-74. [WANG Zigao, HE wei, WANG kun. Geological hazard prevention and environment protection for water conservancy and hydropower engineering[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2012, 23(2): 70-74. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 吴星辉, 马海涛, 张杰. 地基合成孔径雷达的发展现状及应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 1073-1081. [WU Xinghui, MA Haitao, ZHANG Jie. Development status and application of ground-based synthetic aperture radar[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 1073-1081. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 张伟琪, 王利, 曲轩宇. 基于测量机器人的黄土滑坡变形监测及结果分析[J]. 测绘工程, 2019, 28(3): 66-69. [ZHANG Weiqi, WANG Li, QU Xuanyu. Deformation monitoring and result analysis of loess landslide based on georobot[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2019, 28(3): 66-69. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 于欢欢, 徐亚富, 谢洪波. 基于三维激光扫描技术的边坡变形监测应用研究[J]. 中州煤炭, 2015(12): 111-113. [YU Huanhuan, XU Yafu, XIE Hongbo. Application of slope deformation monitoring based on Three-Dimensional laser scanning technology[J]. Zhongzhou Coal, 2015(12): 111-113. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 刘国祥, 张波, 张瑞, 等. 联合卫星SAR和地基SAR的海螺沟冰川动态变化及次生滑坡灾害监测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 980-995. [LIU Guoxiang, ZHANG Bo, ZHANG Rui, et al. Monitoring dynamics of Hailuogou glacier and the secondary landslide disaster based on combination of satellite SAR and ground-based SAR[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 980-995. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 蒋留兵, 杨凯, 车俐. 地基合成孔径雷达对目标三维变形的监测[J]. 测绘通报, 2020(3): 35-38. [JIANG Liubing, YANG Kai, CHE Li. Monitoring of 3D deformation of target by ground-based synthetic aperture radar[J]. Bulletin of

- Surveying and Mapping, 2020(3): 35–38. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 刘斌, 葛大庆, 张玲, 等. 地基雷达干涉测量技术在滑坡灾后稳定性评估中的应用 [J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(8): 674–677. [LIU Bin, GE Daqing, ZHANG Ling, et al. Application of monitoring stability after landslide based on ground-based InSAR [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2016, 36(8): 674–677. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 邱志伟, 岳建平, 汪学琴. 地基雷达系统 IBIS-L 在大坝变形监测中的应用 [J]. 长江科学院院报, 2014, 31(10): 104–107. [QIU Zhiwei, YUE Jianping, WANG Xueqin. Application of ground-based radar system IBIS-L to dam deformation analysis [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31(10): 104–107. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 邢诚, 韩贤权, 周校, 等. 地基合成孔径雷达大坝监测应用研究 [J]. 长江科学院院报, 2014, 31(7): 128–134. [XING Cheng, HAN Xianquan, ZHOU Xiao, et al. Application of GB-SAR to dam monitoring [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31(7): 128–134. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 张昊宇, 周克勤, 宋亚腾, 等. 基于新型 FMCW 地基合成孔径雷达的大坝变形监测 [J]. 长江科学院院报, 2017, 34(12): 33–37. [ZHANG Haoyu, ZHOU Keqin, SONG Yateng, et al. A novel FMCW GB-SAR based dam deformation monitoring [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(12): 33–37. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 李如仁, 杨震, 余博. GB-InSAR 集成 GIS 的露天煤矿边坡变形监测 [J]. 测绘通报, 2017(5): 26–30. [LI Ruren, YANG Zhen, YU Bo. Slope deformation monitoring of open pit coal mine by GIS integrated GB-InSAR [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017(5): 26–30. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 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(Sup1): 284–289. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 李翔宇, 雷添杰, 陈文晋, 等. 基于地基雷达干涉测量技术的大坝边坡形变监测及应用 [J]. 安徽农业科学, 2020, 48(9): 221–225. [LI Xiangyu, LEI Tianjie, CHEN Wenjin, et al. Deformation monitoring and application of dam slope based on ground-based radar interferometry [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2020, 48(9): 221–225. (in Chinese with English abstract)]
- [15] LUO Y, SONG H, WANG R, et al. Arc FMCW SAR and applications in ground monitoring [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(9): 5989–5998.
- [16] 江桥, 彭军还, 杨红磊, 等. 改进小基线集技术的 GB-InSAR 铁路边坡监测 [J]. 测绘科学, 2017, 42(12): 140–145. [JIANG Qiao, PENG Junhuan, YANG Honglei, et al. GB-InSAR railway slope monitoring of improved small baseline subset technology [J]. Science of Surveying and Mapping, 2017, 42(12): 140–145. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 郭鹏, 张昊宇, 陈力, 等. 新型 FMCW 地基合成孔径雷达在大桥变形监测中的应用 [J]. 测绘通报, 2017(6): 94–97. [GUO Peng, ZHANG Haoyu, CHEN Li, et al. A novel FMCW GB-SAR based bridge deformation measurement campaign [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017(6): 94–97. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 姜春生, 汪剑, 何玉童. 地基合成孔径雷达在大坝安全监测中的应用 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017, 28(2): 146–149. [JIANG Chunsheng, WANG Jian, HE Yutong. Application of ground synthetic aperture radar in dam safety monitoring [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2017, 28(2): 146–149. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 杨红磊, 彭军还, 崔洪曜. GB-InSAR 监测大型露天矿边坡形变 [J]. 地球物理学进展, 2012, 27(4): 1804–1811. [YANG Honglei, PENG Junhuan, CUI Hongyao. Slope of large-scale open-pit mine monitoring deformations by using ground-based interferometry [J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(4): 1804–1811. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 孙凯辉, 张永辉, 杨须宁. 大华桥水电站库区岸坡类型分析及塌岸预测 [J]. 资源环境与工程, 2016, 30(3): 369–373. [SUN Kaihui, ZHANG Yonghui, YANG Xuning. Type analysis of bank slope and prediction of bank collapse for reservoir area of Dahuaqiao hydropower station [J]. Resources Environment & Engineering, 2016, 30(3): 369–373. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 罗冠枝, 高文伟, 王国卫, 等. 库岸斜坡失稳及其涌浪灾害风险分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(1): 8–17. [LUO Guanzhi, GAO Wenwei, WANG Guowei, et al. Risk analysis of surge disaster and slope instability on reservoir bank [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(1): 8–17. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 梁桂星, 覃小群, 崔亚莉, 等. 分布式水文模型在岩溶地区的改进与应用研究 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(2): 60–67. [LIANG Guixing, QIN Xiaoqun, CUI Yali, et al. Improvement and application of a distributed hydrological model in karst regions [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(2): 60–67. (in Chinese with English abstract)]