

基于地基雷达干涉测量技术的大坝边坡形变监测及应用

李翔宇¹, 雷添杰^{2*}, 陈文晋³, 赵春^{3*}

(1. 华北水利水电大学, 郑州 450000; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038;

3. 云南水投牛栏江堰塞湖工程建设有限公司, 昆明 650000)

摘要: 为了解决传统大坝边坡形变监测方法仅能获取点变形信息, 且监测周期长, 监测精度低, 无法进行实时监测等问题。本文以云南牛栏江红石岩边坡为例, 提出了基于地基雷达干涉测量技术 (GB-InSAR) 的大坝边坡形变监测。为了有效地监测边坡形变情况, 在详细分析地基干涉雷达测量技术原理及关键技术的基础上, 将其应用于该边坡稳定性实时监测中。试验表明: 采用地基雷达干涉测量技术对该边坡稳定性进行实时监测, 可以有效地监测边坡形变情况, 达到边坡灾害预警的目的。

关键词: 大坝边坡、形变监测、地基雷达干涉测量技术、灾害预警

中图分类号: P237; TD164

文献标识码: A

我国是全世界名副其实的坝工大国之一。然而由于自然灾害、地貌因素、水文因素、气候因素以及人为因素等方面原因, 导致我国每年都会面临边坡崩塌、边坡滑坡、泥石流等严重的地质灾害, 给社会的生态环境和人民的生命财产安全造成了巨大的损失。因此通过对边坡形变情况进行实时监测, 并将监测到的形变数据进行实时分析与处理, 对准确掌握边坡的形变情况、形变特征和形变趋势, 以及制定安全的防范措施及应急预案有着十分重要的意义。

传统的大坝边坡形变监测手段有全站仪、水准仪、测量机器人等, 虽然这些测量手段已经得到了广泛的应用, 但是其经常无法进行实时监测, 精度易受气候时间、气候、通视等条件限制。

合成孔径雷达 [1-2] (Synthetic aperture radar, SAR) 是一种高分辨率雷达, 其特点是分辨率高, 能进行全天时、全天候 (24 小时、全天候条件)、大范围 (数公里全面覆盖)、高精度 (监测精度达亚毫米) 的实时自动化监测, 可以在十分恶劣的环境条件下识别监测物体并获取监测物体的高分辨率雷达影像。差分干涉雷达 (D-InSAR) 是 SAR 的一个重要应用, 该技术已经在近十余年内得到了快速发展和应用 [3-4]。合成孔径雷达干涉技术 (InSAR) 主要包括星载和地基合成孔径干涉技术, 星载 InSAR 技术可以全天时、全天候工作, 能够获取大范围区域的地表沉降变形监测数据, 但是由于星载 InSAR 技术时常受大气干扰, 监测精度低, 且重返周期长, 分辨率低, 连续监测能力差。因此导致星载 InSAR 技术无法在大范围区域进行高精度的实时监测。而地基干涉合成孔径雷达技术 (GB-InSAR) 不仅具有连续观测性, 而且观测周期短, 监测精度高 (可达亚毫米), 分辨率高, 监测点可达百万级等优点, 该技术属于非接触性测量方法范畴, 适用于对边坡进行实时变形监测 [5]。本文以云南牛栏江堰塞湖红石岩边坡为例, 针对红石岩边坡的地貌、水文等特点, 采用 GB-InSAR 技术对红石岩边坡进行形变监测, 同时结合边坡的形变数据以及数据处理分析的结果, 进一步对该技术在红石岩边坡变形监测方面的可行性进行分析与评价。

收稿日期:

基金项目: “十三五”国家重点研发计划课题 (2018YFC1508502)

作者简介: 李翔宇 (1993-), 男, 河南洛阳, 硕士研究生, 主要从事边坡灾害监测与预警, 邮箱: 752507468@qq.com。

1 GB-InSAR 的测量原理

GB-InSAR 是采用一种微波干涉技术的创新雷达，集成合成孔径雷达(SAR)、干涉测量技术(D-InSAR)和步进频率连续波技术(SFCW)等多种先进技术。其基本原理是通过 SAR 技术来提高 GB-InSAR 系统的方位向分辨率，通过 SFCW 技术来提高 GB-InSAR 系统的距离向分辨率，通过干涉测量技术获取 GB-InSAR 系统的高精度视线向形变。GB-InSAR 技术具有高精度、高空间分辨率、高采样频率和多角度观测等突出的技术优势[6]。

1.1 SAR 技术基本原理

合成孔径雷达成像是一种高分辨率微波遥感成像技术，该技术可以对边坡进行全天时、全天候监测、体积小、监测周期短、监测范围广、精度高、且受恶劣气候条件影响较小。合成孔径雷达(SAR)是利用小天线作为单个辐射单元，向某一固定方向移动，在不同的位置上接收同一监测物体返回的雷达信号并进行相关处理，进行成像[7]。通过小天线的运动形成一个等效的大天线，就可以获得高分辨率的星载合成孔径雷达图像(如图 1 所示)。根据合成孔径雷达成像技术原理得，设 GB-InSAR 系统发射的信号带宽为 B ，雷达信号波在空气中的传播速度为 c ，则 GB-InSAR 系统的斜距向分辨率为： $c/2B$ ，若 GB-InSAR 系统发射的信号波长为 λ ，系统在轨道上移动的最远距离为 L ，则 GB-InSAR 系统的方位向分辨率为： $\lambda/2L$ [8]。

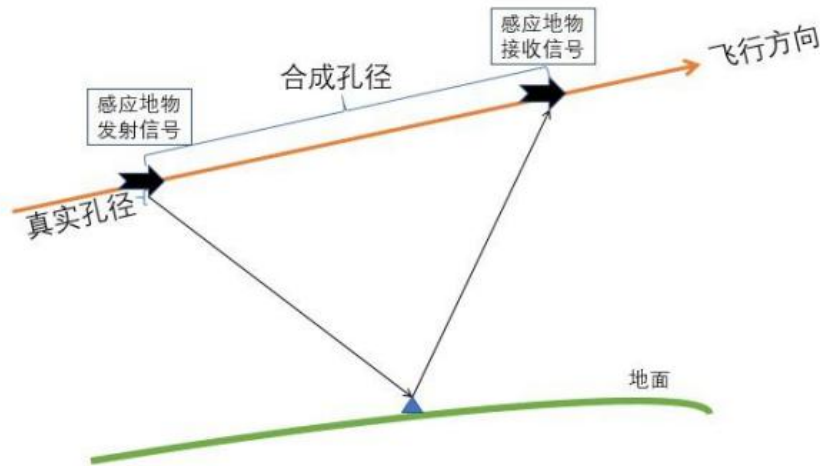


图 1 合成孔径雷达成像原理

本文采用的是 MPDMR-05-LSA1701 型号的 GB-InSAR 系统，该系统主要通过雷达信号接收器沿着滑动轨道进行移动而形成合成孔径效果，用于测量雷达小天线接收信号的幅度与相位信息，并通过差分干涉测量技术获取地基雷达监测区域的地形信息和相对形变信息，从而达到监测边坡形变的目的。GB-InSAR 以固定的视角不断地发射和接收回波信号，经过聚焦处理后形成极坐标形式的二维 SAR 影像。在影像像元内，距离向分辨率是固定不变的，而方位向分辨率与像元夹角及目标距离有关，将距离向与方位向进行结合，监测区域被分为若干个二维小像元(如图 2)，监测距离越远，方位向分辨率越低[9]。

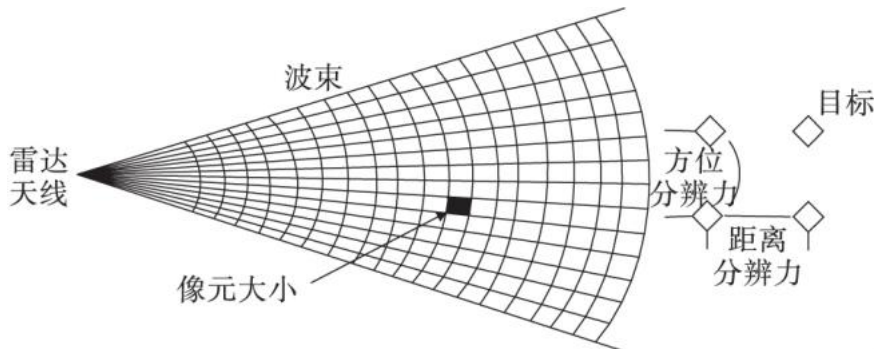


图 2 GB-InSAR 影像分辨率示意图

1.2 D-InSAR 原理

D-InSAR 即差分干涉测量，它是利用同一地区不同时间、不同相位的 SAR 影像，利用差分干涉测量原理，获取该监测区域的地表形变信息的技术手段。图 3 为 D-InSAR 对目标点 P 的干涉测量示意图。设固定观测基站观测目标点为 P，P' 为监测目标点 P 移动后的位置，移动后 P 与 P' 之间的距离为 d，P 点移动前后的相位分别为 φ_m 和 φ_s ，则两者的干涉相位为 $\Delta\varphi_{ms}$ 。

$$\Delta\varphi_{ms} = \varphi_s - \varphi_m = \frac{4\pi(SP' - MP)}{\lambda} = \frac{4\pi d}{\lambda} \quad (1)$$

式(1)中：MP 为监测目标点与监测基站的距离，SP' 为监测目标点发生形变后与监测基站的距离， λ 为雷达波长，由(1)得，目标点 P 的形变量 d 为：

$$d = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta\varphi_{ms} \quad (2)$$

式(2)是在空间基线为 0，不考虑其他因素干扰得到的理论公式，其中， λ 为雷达波长， φ_m 为雷达第一次成像的相位， φ_s 为雷达第二次成像的相位。通过两次接收雷达波的相位信息可以准确地计算监测物体的径向位移变化[10]。

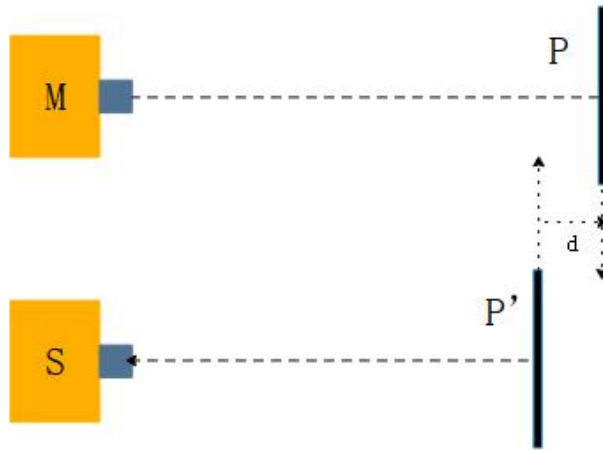


图 3 D-InSAR 干涉测量示意图

2 GB-InSAR 监测流程及技术

2.1 GB-InSAR 监测流程

红石岩边坡所处地势陡峭，地形复杂，外部山体形态变化不稳定，易受于人类活动和恶劣天气的影响，这些因素往往会对边坡监测产生极大的困难。因此，在监测前要整体规划，制定一个完整规范的监测流程。该工作流程主要包括：构建 GB-InSAR 监测体系、建立 GB-InSAR 监测系统、采集实验数据、数据处理、制作边坡形变图、建立边坡预警模型以及制定相应的安全措施和应急预案等。具体监测流程如图 4 所示。



图 4 GB-InSAR 系统监测流程图

2.2 GB-InSAR 关键技术

GB-InSAR 关键技术主要含有图像配准、生成干涉图、相位解缠、相位估计、地理编码等技术。首先图像配准技术是生成干涉图的基础，也是 GB-InSAR 形变监测的关键步骤之一，通过 GB-InSAR 系统在轨道上的两次滑动将所获取的 SAR 影像中同一监测物体的像元匹配到同一位置的点位上，并利用该点位在两幅不同的时间获取的 SAR 影像重叠的相位信息计算 SAR 影像的相干值即可完成 SAR 影像的图像配准。在完成图像配准后，通过提取由二维 SAR 影像数据生成高质量干涉图的干涉相位为相位解缠做准备。由于噪声以及平地效应的存在，在完成相位解缠工作前不仅需对干涉图进行去噪处理，而且还要还需要去除平地效应，从而可以获得更加直观的高程信息和稀疏的干涉条纹，为相位解缠工作提供便利。干涉图噪声及平地效应会严重影响 GB-InSAR 数据处理中 SAR 影像的图像质量，导致相位解缠工作无法实现。只有有效地减少噪声及平地效应对干涉图的干扰，才能保证获取高质量的 GB-InSAR 形变图。相位解缠主要是将 GB-InSAR 获取的干涉相位的主值还原为真值，也是 GB-InSAR 形变监测的关键技术之一，相位解缠的准确性直接影响到 GB-InSAR 监测结果的精度[11]。大气相位校正是指当雷达电磁波信号经过大气层时，大气会对电磁波信号产生折射和散射影响，导致其传播路径延迟，从而形成大气效应，对干涉结果造成严重影响。因此在数据处理过程中，需要考虑到大气相位对监测结果的影响，以提高监测精度。最后完成以上工作的同时，采用多源数据融合技术，将 GB-InSAR 技术与其他监测技术结合并分析出边坡综合形变信息，再对获取的综合形变监测结果进行地理编码，并将雷达坐标系中的识别到的边坡的点、线、面等属性映射到同一个地理坐标系下。

3 红石岩边坡监测试验与结果分析

3.1 试验区概况

云南牛栏江红石岩堰塞湖工程位于牛栏江下游河段，该工程左岸部分位于云南省昭通市巧家县境内，右岸部分位于鲁甸县境内，中心位置位于东经 $103^{\circ} 36'$ 、北纬 $26^{\circ} 99'$ 。坝址距上游小岩头水电站厂房约 23km，距离下游天花板水电站取水坝约 17km，堰塞体长度约为 910 米，高约 103 米，总方量约为 1000 万立方米。该工程兼有防洪、供水、发电、灌溉、旅游等综合利用效益。枢纽工程上主要由堰塞体坝、右岸溢洪洞、右岸泄洪冲沙洞、右岸引水系统以及右岸岸边主副厂房等建筑物组成，设计灌溉面积 3.6 万亩，设计供水 114.5 万人，装机容量 20.1 万千瓦，总投资 35.9 亿元。

该工程边坡为典型岩质边坡，无植被覆盖，边坡高度落差大，地势陡峭，该边坡是由2014年8月3日鲁甸6.5级地震所导致山体大面积崩塌从而形成的。目前边坡下游部位坡面岩体为地震拉裂、损伤岩体、卸荷拉张裂隙发育、岩体破碎。该边坡右岸大部为厚层、巨厚层栖霞、茅口组灰岩，在高程1380m附近分布有厚度20m~40m的梁山组页岩、泥岩夹砂岩。根据现场地质人员对整个边坡下游侧进行实地勘察，对开挖外围的地质条件做出了简单的评价及危岩体的圈定。边坡现状如图5所示。

该边坡危岩体主要分为I类与II类，I类危岩区主要表现为平行边坡和垂直边坡的两组陡倾角裂隙切割，且宽度大，与坡面基本分离，呈孤立块体，稳定性极差；II类危岩区主要表现为平行边坡和垂直边坡的两组陡倾角裂隙切割，裂隙短小密集，但宽度不大，稳定系数较差。

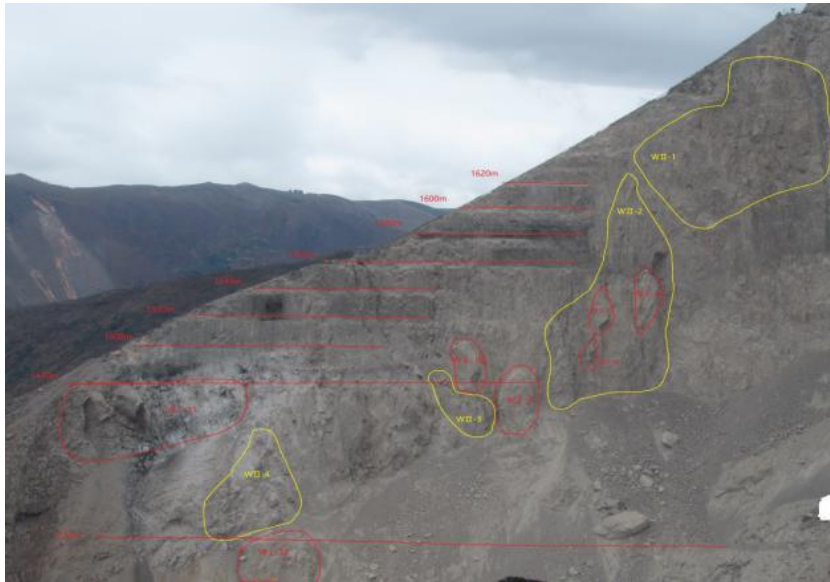


图5 该边坡现状及危岩体等级划分

由于I类危岩区岩体稳定性极差，将边坡右岸下游侧(1765m高程以下)危岩体细分分为7块，即I-6，I-7，I-8，I-9，I-10，I-11，I-12。II类危岩区稳定性较差，将边坡右岸下游侧(1765m高程以下)危岩体细分分为4块，即II-1，II-2，II-3，II-4。下面对该危岩体具体分布情况如表1所示：

表1 云南牛栏江堰塞湖红石岩边坡危岩体等级划分表

岩体等级	危岩体分布情况表	
	分布高程	状况
I-6 危岩体	1540m~1580m	该危岩体上下游侧可见平行于下游侧坡面的张开裂隙，裂隙张开宽度5~20cm，顶部张开较大。
I-7 危岩体	1640m~1460m	该危岩体可见顺坡面节理的张开裂隙，裂隙张开宽度10~20cm，垂直于坡面裂隙于顺坡面节理互相切割较为明显，基本与坡面脱离。 该危岩体表面较为松散，呈互相咬合状态，但其块径相对较小，但所有块体基本呈孤立块体。
I-8 危岩体	1500m~1520m	
I-9 危岩体	1420m~1470m	该危岩体发育顺坡向裂隙，宽50~100cm，上下全部贯通，已经和坡面分离，且块径巨大，危险性极大。
I-10 危岩体	1480m~1500m	该危岩体可见顺坡面节理的张开裂隙，裂隙张开宽度10~20cm，垂直于

I-11 危岩体	1440m~1470m	坡面裂隙于顺坡面节理互相切割较为明显。基本与坡面脱离 该危岩体可见顺坡面节理的张开裂隙，裂隙张开宽度 10~20cm，顺河向裂隙与顺坡面节理互相切割较为明显且密集，整个围岩处于倒悬状态。 该危岩体为梁山组砂岩页岩夹煤层，薄层状，节理密集，突出坡面较高，稳定性极差。
I-12 危岩体	1370m 附近，靠下游侧	
II-1 危岩体	1600m 附近，靠上游侧	该危岩体可见顺河向裂隙与顺坡面节理互相切割密集，整个围岩松散破碎。
II-2 危岩体	1470m~1620m，靠上游侧	该危岩体节理发育，短小密集，整个围岩松散破碎。
II-3 危岩体	1470m~1500m，靠上游侧	该危岩体节理发育局部裂隙张开 2~15cm，但未贯穿下部岩体，建议清除人工撬撬做系统支护。
II-4 危岩体	1470m~1390m	该危岩体节理发育，但未建大的卸荷裂隙，整个围岩破碎，局部有挂渣

3.2 GB-InSAR 的作业条件

为了更好地监测目标区域，在选择观测房时，应该考虑到以下条件[12]：

(1) 持续供电。为了保证设备可以连续 24 小时进行监测，GB-InSAR 系统需要持续供电。所以在安装 GB-InSAR 设备时，应保证对该设备的持续供电，若现场出现短时间断电情况，应采用 UPS 继续供电。

(2) 监测距离及范围。在施工现场布设过程中，应根据施工现场所处位置的地貌、水文等条件将雷达设备的监测距离及监测范围控制在合理的范围内，雷达设备最远监测距离应小于 5Km，最大覆盖范围应小于 10km²，在此基础上，监测距离越大，雷达接收回波信号越弱，其误差效果越大，监测效果越差，所以根据现场实际情况选择合适的监测距离。

(3) 通视条件。GB-InSAR 系统应该在能见度高的条件下工作，若能见度较低，则对 GB-InSAR 系统的监测结果造成一定的误差，影响其监测精度。同时在雷达设备与监测目标之间不能有障碍物的存在，例如岩石、树木、设备、无关人员等。如果存在障碍物，监测目标的反射强度会减弱，最终影响监测设备的数据处理结果。

(4) 设备安放点稳定性。在监测过程中，雷达监测设备应平稳放置，不能受到振动。所以在选址过程中，要考虑将监测房安置于水平地面上。

(5) 仪器架设位置。观测边坡时，应对设备视线方向和主滑移方向的夹角进行权衡，夹角越小，监测雷达对形变信号的强度越敏感，但不利于接收回波信号。

(6) 滑坡植被。GB-InSAR 系统的雷达波频率较高，波长较短，其雷达信号对目标物体的形变比较敏感，但如果在监测区域内存在大量的植被，由于空气流动的影响，植被会发生摇摆，雷达无法很好地接收监测目标的形变信号，最终会影响到 GB-InSAR 系统的监测效果。因此监测区域应选择植被稀疏的区域。

3.3 实验方案与数据分析

根据该边坡的实际条件，结合被监测边坡的地质条件及危险区域的分布范围，将 GB-InSAR 设备安置于被监测边坡正南方向的地基较稳定处。为了确保 GB-InSAR 设备在监测过程中不受降水、大风等恶劣天气条件的影响，并满足其在恶劣天气条件下仍然正常连续监测的要求，在红石岩边坡正南方向相对稳定的基岩上建立监测房。将 GB-InSAR 设备安置于监测房中对边坡进行形变监测，监测房的建立可以有效地

避免设备因不利天气条件而对监测结果产生影响，保证设备 24 小时连续监测。同时将监测边坡的系统服务器放置于监测房中，监测人员可以通过客户端对 GB-InSAR 设备的监测结果进行数据分析以及实时预警。GB-InSAR 设备采用 24 小时连续监测，测量频率 7min/轨，水平方向观测角度 -34.6° 至 $+34.6^{\circ}$ ，监测雷达的中心视线与水平夹角约为 25° ，距离向分辨率 0.2m，方位向分辨率为 5.5mrad。并对边坡监测区域的形变情况进行实时监测及实时数据分析与处理[13]。

该监测站于 2018 年 12 月 20 日开始部署，并于 2018 年 12 月 21 日开始试运行并对红石岩边坡进行监测，试运行时间段为 2018 年 12 月 21 日至 2018 年 12 月 31 日。该设备于 2019 年 1 月 1 日正式运行，本文选取监测时间段为 2019 年 1 月 1 日至 2019 年 1 月 31 日所采集到的数据并对其进行分析。地基监测雷达在监测期间共获取 3410 幅 SAR 影像，该 GB-InSAR 设备观测距离为 300m~500m，观测范围覆盖整个边坡区域。该设备主要针对监测区域的 1-10 号点位进行数据分析，如图 6 所示。

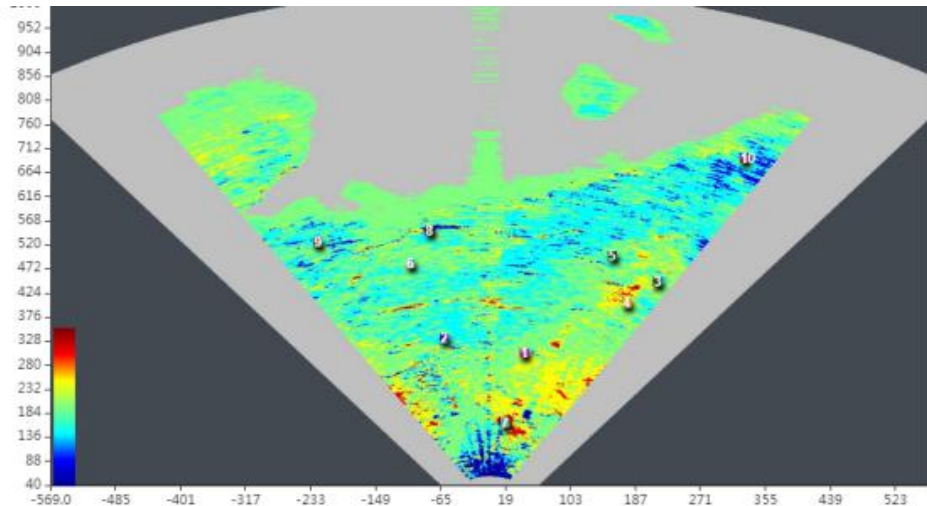


图 6 1-10 号点位分布图

GB-InSAR 设备在 1 个月的监测期间监测出整个边坡区域 1-10 号点位分别出现不同程度的形变，如表 2 所示。其中 7 号点位、8 号点位、9 号点位、10 号点位的形变量最大，累计形变量分别达到 40.6mm、-35.48mm、-12.52mm、-16.06mm。当形变量为负值时，即表示 GB-InSAR 雷达监测的物体朝远离雷达方向发生形变；当形变量为正值时，即表示 GB-InSAR 雷达监测的物体朝靠近雷达方向发生形变。

为了进一步描述边坡形变的情况及细节，对累积形变量最大的 7-10 号点位的形变情况进行重点分析，如图 7 所示。分析图 7 可知：在 1 个月的监测期内，7 号点位的平均形变速率为 1.31mm/d；形变速度范围在 $-2\text{mm/d} \sim 8\text{mm/d}$ 之间，形变加速度范围在 $-6\text{mm/s}^2 \sim 6\text{mm/s}^2$ 之间。8 号点位的平均速率为 -1.14mm/d ；形变速度范围在 $-25\text{mm/d} \sim 15\text{mm/d}$ 之间，形变加速度范围在 $-11\text{mm/s}^2 \sim 13\text{mm/s}^2$ 之间。9 号点位的平均速率为 -0.4mm/d ；形变速度范围在 $-11\text{mm/d} \sim 13\text{mm/d}$ 之间；形变加速度范围在 $-4\text{mm/s}^2 \sim 5\text{mm/s}^2$ 之间。10 号点位的平均速率为 -0.52mm/d ；形变速度范围在 $-3\text{mm/d} \sim 5\text{mm/d}$ 之间；形变加速度范围在 $-6\text{mm/s}^2 \sim 5\text{mm/s}^2$ 之间。





图 7 7-10 号点位打点曲线分析

依据该边坡的形变结果，对该边坡形变区域进行了现场实地考察，该边坡右岸上方由于施工方正在进行清渣作业，导致部分石头、尘土下滑，因此导致 7 号点位与 10 号点位累计形变量增加。该边坡左岸下方由于施工方进行爆破作业同时加上近期雨雪天气的干扰，因此导致 8 号点位与 9 号点位累计形变量增加。总体上，GB-InSAR 监测结果为施工现场的安全保障提供了有效的数据支持。红石岩工程项目部技术人员根据现场监测数据及时地进行了施工人员撤离并对边坡左岸上方崖壁进行了防护网加固工作，有效地避免了边坡灾害的发生。

4 结论

试验表明该系统可以不受暴风雨、雾霾等恶劣天气条件影响，能够全天候地低边坡进行实时监测，该系统在雷达视线上监测精度可达毫米级别，且具有距离远、范围大、连续空间覆盖、全自动等优点。本文通过 MPDMR-05-LSA1701 型号的 GB-InSAR 系统对云南牛栏江红石岩边坡进行监测试验，并通过试验分析出边坡 7-10 号点位累计形变量大，并根据试验数据及时对边坡左岸上方崖壁进行了防护网加固措施，有效地避免了边坡灾害的发生。

参 考 文 献：

- [1]BERARDINO P,COSTANTINI M.Use of differential SAR interferometry in monitoring and modelling large slope instability at Maratea (Basilicata, Italy) [J]. Engineering Geology, 2003, 68(1-2):31-51.
- [2]王桂杰, 谢谟文等. D-InSAR 技术在大范围滑坡监测中的应用[J]. 岩土力学, 2010, 31(4):1337-1344.
- [3]Peng Zhang, Zheng Zhao. EVALUATION OF DATA APPLICABILITY FOR D-INSAR IN AREAS COVERED BY ABUNDANT VEGETATION[c]. The ISPRS Technical Commission III Midterm Symposium on "Developments, Technologies and Applications in Remote Sensing", 2018.
- [4]Xi Li, Guoman Huang. ATMOSPHERIC PHASE DELAY CORRECTION OF D-INSAR BASED ON SENTINEL-1A[c]. The ISPRS Technical Commission III Midterm Symposium on "Developments, Technologies and Applications in Remote Sensing", 2018.
- [5]杨红磊, 彭军还. GB-InSAR 监测大型露天矿边坡形变[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(04):1804-1811.
- [6]麻源源. 地基雷达在水电站边坡形变监测中的应用[J]. 工程勘察, 2018, (12):53-54.
- [7]张毅. 基于 InSAR 技术的地表变形监测与滑坡早期识别研究[D]. 兰州大学, 2018.
- [8]赵东寅. 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(4):54-58.
- [9]黄其欢. GBInSAR 隔河沿大坝变形监测试验[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(3):48-49.
- [10]刘作利, 刘景玉, 申修强, 马辉. 唐山马兰庄铁矿露天开采边坡变形监测的 GB-InSAR 技术[J]. 现代矿业, 2018, (588):166-167.
- [11]麻德明, GB-InSAR 的监测流程和关键技术[J]. 海洋开发与管理, 2018, (8):82-83.
- [12]刘斌. 地基 InSAR 技术及其典型边坡监测研究[J]. 中国地质调查, 2018, 5(01):75-77.
- [13]于怀昌. 基于物联网技术的栾川魏家沟滑坡监测预警系统研究与实践[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学)

学版), 2018, 39(06): 46-50.

Deformation Monitoring and Application of Dam Slope Based on Ground-based Radar Interferometry

Li Xiangyu¹, Lei Tianjie², Chen Wenjin³, Zhao Chun²

(1. North China University of Water Resources and Hydropower, Zhengzhou 450000, China

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

3. Yunnan Shuitou Niulan Jiangyan Saihu Engineering Construction Co., Ltd. Kunming 650000, China)

Abstract: In order to solve the problems of traditional dam slope deformation monitoring methods, such as only obtaining point deformation information, long monitoring period, low monitoring accuracy and unable to carry out real-time monitoring. This paper takes the Hongshiyuan slope of Niulanjiang River in Yunnan Province as an example, and puts forward the deformation monitoring of dam slope based on Ground-based Radar Interferometry (GB-InSAR) technology. In order to effectively monitor the deformation of slope, the principle and key technology of Ground-based Radar Interferometry is analyzed in detail and applied to the real-time monitoring of slope stability. The test results show that the real-time monitoring of slope stability by Ground-based Radar Interferometry can effectively monitor the deformation of slope and achieve the purpose of early warning of slope disasters.

Key words: Dam and slope; Deformation monitoring; GB-InSAR; Disaster warning

作者简介: 李翔宇(1993—), 男, 河南洛阳, 硕士研究生, 主要从事边坡灾害监测与预警, 邮箱: 752507468@qq.com。

通讯地址: 北京市海淀区玉渊潭南路水科院大厦 D 座。

手机号: 15139979630。