



地基合成孔径雷达的发展现状及应用

吴星辉¹ 马海涛² 张杰¹

1 北京科技大学土木与资源工程学院,北京,100083

2 中国安全生产科学研究院,北京,100012

摘要:为了使地基合成孔径雷达(ground-based synthetic aperture radar, GB-SAR)在地表微变形监测领域得到更广泛的应用,首先概述了GB-SAR的主要类型,并选择几种具有代表性的系统介绍了其工作原理及重要参数。然后以中国安全生产科学研究院自主研发的边坡合成孔径雷达型地基雷达为例,总结了常规差分干涉处理中的重要技术,利用相似模拟实验验证了GB-SAR的监测精度,并且展现了GB-SAR在露天矿山边坡监测、矿山排土场监测和山体滑坡应急救援监测方面的应用。最后提出了GB-SAR在变形监测中存在的一些问题以及后续发展中的建议。

关键词:GB-SAR;合成孔径;地质灾害;监测预警

中图分类号:P228;TN951

文献标志码:A

中国地形复杂多样,山地面积占全国总面积的2/3。除此以外,还有广阔的高原、盆地等,地形种类齐全,地质构造复杂。在自然因素和人为因素的影响下,地质灾害频繁发生。2018年,中国共发生地质灾害2 966起,造成105人死亡、7人失踪、73人受伤,直接经济损失达到14.7亿元。滑坡是自然灾害的重要灾种。中国是滑坡灾害高发国家,平均每年发生2万余起,伤亡1千余人,受灾人口近百万,每年造成的直接经济损失达数10亿元。例如,2016-09-28浙江省丽水市苏村发生山体滑坡,造成约20幢居民楼被泥石流冲毁,19人死亡,8人失联;2017-06-24四川省茂县山体垮塌,造成河道堵塞2 km,100余人被掩埋。

一般而言,露天矿山、自然山体、尾矿库坝体和河流大坝发生的坡体崩塌、滑坡、倾倒、泥石流等灾害发生频繁,造成的损失也很大。发生这些地质灾害的诱发因素有很多,在坡体宏观失稳之前,巨大的滑动力会大于这部分滑坡体的抗滑力,滑坡体会突然发生较大的土体滑动,分析滑坡体滑动的位移过程,需要研究岩土体内部发生的应力改变和滑坡体的位移规律等^[1]。因此,为了更好地研究边坡位移的运动特征和滑坡的启动模式,并且能够在滑坡体产生较大的土体滑动前进行预警,在山地边坡表面微变形监测技术方面,国

内外学者开展了大量的研究工作。

根据测量设备与监测对象之间的接触关系不同,变形监测技术主要分为两类——接触式和非接触式。接触式监测需要对监测对象固定且连为一体,这种方法的优点是成本较低、操作简单,但不适用于大场景和施工困难的区域^[2],具有代表性的接触式监测设备有GNSS(global navigation satellite system)变形监测系统和微芯桩变形监测系统。非接触式监测采用遥感技术,监测设备无需接触被测区域,该方法分为两种——布设测量点和无需布设测量点。布设测量点会受到地形限制,主要设备有全站仪。无需布设测量点设备主要有三维激光扫描仪、星载合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)、地基合成孔径雷达(ground-based SAR, GB-SAR)和地基真实孔径雷达(real aperture radar, RAR)。三维激光扫描仪不能实现全天时、全天候工作,易受雨、雪、雾等气象条件的影响^[3]。星载SAR干涉测量技术可以实现全天时、全天候的大范围监测,但受到卫星监测角度和访问权限的影响,实时监测受到限制^[4],同时星载SAR重访周期长,不能及时获取监测数据。GB-SAR和RAR可以对距离监测目标几十米到几千米的范围进行监测,还可以根据实际地形灵活选择监测点和雷达主机俯仰角。因

收稿日期:2019-03-11

项目资助:中央高校基本科研业务费专项资金(FRF-TP-18-015A3)。

第一作者:吴星辉,博士生,主要研究方向为岩土工程、边坡稳定性与位移监测。wuxinghui92@163.com

为微波收发不受气候条件影响,可以实现全天时、全天候监测,形变图像获取速度可以达到几分钟,该方法在国内外得到了快速发展,而且 GB-SAR 实现了国内自主研发,摆脱了国外的技术垄断。

1 地基雷达系统

地基差分干涉测量雷达目前多工作在 X 或者 Ku 波段,系统组成部分主要包括收发天线、供电模块、数据采集和存储单元、数据处理模块等。按照雷达成像模式的不同,可以分为两种类型——地基 RAR 和 GB-SAR。GB-SAR 按照扫描方式可以分为 3 种类型,即直线式扫描雷达、圆迹式扫描雷达和阵列式地基雷达。

1.1 直线式扫描雷达

直线扫描 GB-SAR 通过收发天线沿着滑轨做往返直线运动,把同一目标区域不同时间获取的 SAR 复图像结合起来,比较目标在不同时刻的相位差,获得目标的毫米级精度位移信息^[5]。

国外第一套直线扫描 GB-SAR 是由意大利 IDS 公司和佛罗伦萨大学联合研发的 IBIS(Image by interferometric survey of landslides and slopes)系统^[6]。国外代表性的 GB-SAR 系统研发机构有意大利 IDS 公司的 IBIS-FM 系统、挪威的 ISPAS 系统、法国 ONERA 的干涉测量雷达系统^[7]和西班牙 UPC 大学的 RiskSAR 系统^[8];国内有中国安全生产科学研究院的边坡合成孔径雷达(slope-synthetic aperture radar, S-SAR)系统^[9]、内蒙古自治区方向图科技有限公司的微变形监测雷达 LSA 系统和 PSA 系统、北京理工雷科电子信息技术有限公司的边坡形变监测系统^[10]等。

以中国安全生产科学研究院的 S-SAR 系统为例,其工作在 Ku 波段,最远监测距离为 5 km, 1 km 处的方位向分辨率为 3 m,距离向分辨率为 0.3 m,图像获取周期为 1~10 min,可以获取亚毫米量级的形变测量精度,如图 1 所示。



图 1 典型直线扫描地基雷达系统

Fig. 1 Typical Linear Scanning Ground-Based Radar System

1.2 圆迹式扫描雷达

为了进一步提高 GB-SAR 的方位向分辨率,20 世纪 90 年代初,美国学者 Knaell^[11]最早提出了圆弧合成孔径雷达的概念。圆迹式扫描地基雷达通过收发天线在水平面内的圆周运动来进行圆弧扫描,旋转平台在旋转运动过程中,在指定位置输出触发脉冲信号,共有多个位置有触发信号输出。

圆迹式扫描雷达因其合成孔径特有的运动形式,在三维成像能力、方位向分辨率、高信噪比和 360°全方位监测等方面具有很大的优势。在成像算法上,与比较成熟的直线式扫描雷达相比,圆迹式扫描雷达算法还处于发展阶段^[12]。具有代表性的系统如韩国的 ArcSAR^[13]、意大利 IDS 公司的 IBIS-ArcSAR 系统^[14]、中国科学院电子所的 ArcFMCW-SAR 系统^[15]和内蒙古自治区方向图科技有限公司的微变形监测旋转雷达 RSA 系统等。

其中,IBIS-ArcSAR 系统采用旋转支撑臂的方式进行工作,实现 360°全覆盖监测,当设置最远监测距离为 5 km、监测范围为 360°时,只需要 40 s 就可完成一次全景监测。采用 4 只基于多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)技术的天线可以实现自动地理编码,实时获取场景数字地形模型。RSA 系统能够在 100~3 000 m 实现 360°全覆盖监测,周期为 10~20 min,可以获取比常规线扫描 GB-SAR 更高的方位向分辨率。

1.3 阵列式地基雷达

为了减少雷达图像的获取周期,提高地基雷达在应急救援领域的应用,国内外一些机构开展了基于 MIMO 体制阵列式 GB-SAR 的研发工作。MIMO 阵列式地基雷达采用特殊排列的多个天线发射和多个天线接收,形成一个大的合成孔径。阵列式地基雷达在工作时,各个发射天线分时发射,而各个接收天线同时接收,通过微波开关切换,实现不同天线之间的收发通道组合,进而完成阵列天线的二维成像,一次完整的扫描时间为几毫秒到几秒。同直线式扫描雷达和圆迹式扫描雷达相比,阵列式地基雷达监测周期短。具有代表性的阵列地基雷达有北京理工大学(北理工)研发的 MIMO-SAR 系统^[16],该系统的收发阵列为 16 发 16 收的线性阵列,共有 256 个虚拟阵元^[17]。

1.4 其他便携式地基雷达

采用地基差分干涉技术的地基雷达,除上述广泛应用于矿山边坡、尾矿库、大坝坝体、自然山体、排土场等大场景大范围的 GB-SAR 外,还

有部分地基真实孔径雷达,通过对单一目标体进行上百赫兹的高频率观测,可以实现对桥梁、塔、建筑物等进行动态或静态监测,采样频率自主设置,分析 0~50 Hz 的振动情况,测振精度可达 0.01 mm。如意大利 IDS 公司的 IBIS-S 系统和荷兰 MetaSensing 公司的 FastGBSAR 系统等^[18],其中 FastGBSAR 雷达系统有两种工作模式:合成孔径(SAR)模式和真实孔径(RAR)模式^[19]。合成孔径模式将雷达系统架设在直线轨道上,实现方位向和距离向的形变监测;真实孔径模式将雷达系统固定在三脚架上,实现距离向形变测量。真实孔径模式下的雷达系统主要用于塔、桥梁等建筑物的状态分析(本征频率、模态振型和振幅),优势是设备运输和安装简单方便,操作自动化程度高。

1.5 对比总结

上述 GB-SAR 的 4 个典型系统的工作原理相似,目前多工作在 X 或者 Ku 波段。直线型 GB-SAR 可以获得亚毫米级的形变测量精度,监测距离能够达到 5 km,由于其自身的便携性和稳定性,既可以对一个方向上的整个矿山边坡、矿山排土场、尾矿库坝体等进行实时变形监测,又可以应用于山体滑坡的应急救援。圆迹式 GB-SAR 在直线型 GB-SAR 监测精度的基础上,可以实现 360°大范围监测,适用于大型露天矿山边坡监测,从而实现整个矿坑的全覆盖实时监测,但过大的体积和扫描方式不适用于山体应急救援。阵列式 GB-SAR 的主要优势在于具有多个收发天线,能够实现 40 s 的扫描周期,未来可以用于应急救援的快速监测。便携式 GB-SAR 能够对小范围进行针对性监测,不适用于大范围的矿山边坡监测。

2 雷达数据处理

对于真实孔径和合成孔径的地基差分干涉雷达,其数据处理技术上会有一定的差别。本节以地基合成孔径系统为例,对地基合成孔径差分干涉雷达的技术现状进行介绍。虽然 3 种类型(直线式、圆迹式、阵列式)的 GB-SAR 在成像处理和扫描方式上有较大的差别,但核心技术都是通过零基线差分干涉测量技术获取距离向和方位向的二维图像^[20]。距离向通过步进频率连续波技术实现高分辨率;方位向利用天线在直线轨道匀速运动和孔径综合技术实现高分辨率。

在 GB-SAR 差分干涉处理技术上,国内外很多学者提出了不同的形变处理算法,虽然处理流

程上会有一些差别,但主要的处理技术相同,主要流程包括图像配准、差分干涉、相位滤波、相位解缠、大气相位补偿、形变结果反演计算、地形数据和形变结果配准等步骤。在地基雷达图像配准过程中,将第 1 组数据图像作为主图像,其他组数据图像作为辅图像,经过差分干涉处理,获取差分干涉图。基于选择出的主图像,对差分干涉图进行相位滤波、相位解缠和大气相位补偿处理,即可以实现形变量的解算,处理流程如图 2 所示。

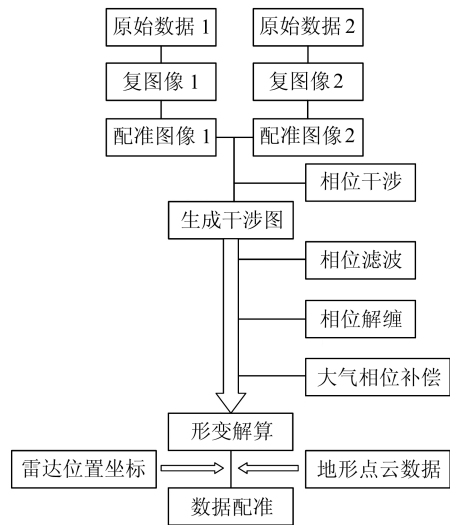


图 2 地基 SAR 差分干涉处理流程

Fig. 2 Scheme of Ground-Based SAR Differential Interferometric Processing

2.1 差分干涉

把同一目标区域不同时间获取的 SAR 复图像结合起来,通过比较目标在不同时刻的相位差,获得目标的毫米级精度位移信息。SAR 图像中的每一个像素点均是复数,其幅度通常用来解译成像场景及研究散射特性,相位则可以用来获取目标区域的高程信息或者形变信息。GB-SAR 进行形变测量时,雷达位置固定不动,不同图像之间的空间基线为零,对两幅图像进行对应像素的复共

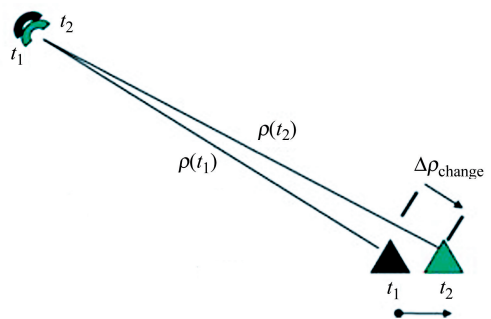


图 3 GB-SAR 差分干涉测量原理示意图

Fig. 3 Schematic Diagram of Ground-Based SAR Differential Interferometry

乘相乘,即可实现差分干涉处理。图3为GB-SAR差分干涉测量原理示意图。理想情况下,差分干涉相位 $\Delta\phi$ 与视线方向的形变量 ΔP 线性相关,可以表示为:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} [\rho(t_1) - \rho(t_2)] = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta\rho \quad (1)$$

$$\Delta P = \frac{C}{4\pi f_c} \cdot \phi(p) \quad (2)$$

式中, λ 为微波波长; C 为光速; f_c 为电磁波频率; $\rho(t_1)$ 为第1次测量距离; $\rho(t_2)$ 为第2次测量距离; $\Delta\rho$ 为两次测量距离差值; $\phi(p)$ 为 p 点的相位变化。

2.2 形变量结果反演

干涉图经过相位解缠、大气相位补偿等处理后,可以获得到形变相位 $\Delta\phi$,基于式(1)与式(2)即可实现形变量 ΔP 的解算。但实际上解算出的形变量数值是距离向视变形分量,即目标区域的真实形变量在雷达视线方向的投影分量。图4为雷达监测形变示意图。对于GB-SAR系统,成像时是将雷达的二维成像平面在三维地形内进行投影,其地理编码问题可以视为一个由雷达二维成像坐标系向空间三维直角坐标系转换的问题。

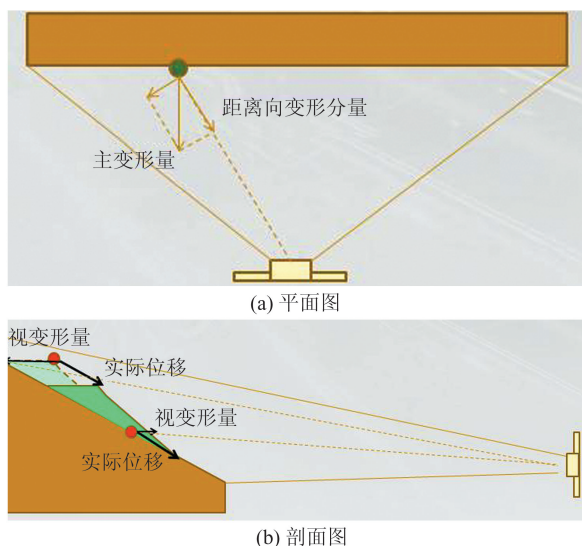


图4 雷达监测形变示意图

Fig. 4 Diagram of Radar Monitoring Deformation

2.3 形变结果与地形数据配准

为了将GB-SAR的二维图像进行三维直观展示,需要将形变量在三维地形上进行准确定位及显示,即转换为形变结果与地理地形数据配准的问题。对于地基RAR系统,其除了基于差分干涉进行形变测量外,一般也同时具备三维地形测量能力,可以很方便地进行形变数据和地理地形数据的配准。对于地基SAR系统,由于其不具

备三维地形测量能力,为了得到三维定位显示效果,一般利用三维激光扫描仪或者无人机倾斜摄影技术来辅助测量。图5为中国安全生产科学研究院对矿山边坡进行形变监测和地理地形配准的结果,通过图5中的色带条可以很直观地看到形变量大的红色区域。

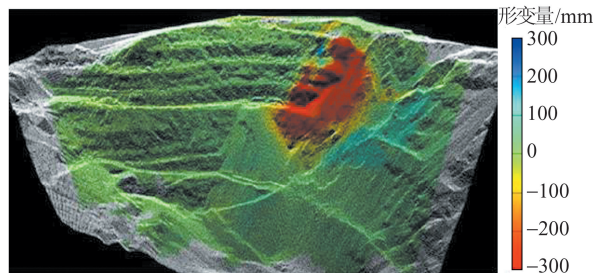


图5 形变监测结果与地理地形配准实例

Fig. 5 Example of Deformation Monitoring Results and Geographic Terrain Registration

3 应用案例

GB-SAR在形变监测领域已经得到了广泛应用,国内外学者也对GB-SAR做过许多应用试验,并发表了很多文章阐述GB-SAR的应用案例。本文以中国安全生产科学研究院S-SAR型边坡雷达开展的验证实验和监测应用案例为例,首先通过三维激光扫描仪(three-dimensional laser scanner, TLS)与角反射器对GB-SAR的监测精度进行验证,然后阐述了GB-SAR在矿山岩质边坡和废石排土场的应用实例,最后展示了GB-SAR在地质灾害应急救援中的典型应用。

3.1 GB-SAR干涉形变监测精度验证实验

通过在形变验证方案中设置被测目标物的形变量为可控量来验证GB-SAR的实测形变精度,与三维激光扫描技术比对,证明GB-SAR具备毫米级高精度的形变监测能力。

为了评估中国安全生产科学研究院自主研发的S-SAR型GB-SAR的形变监测精度,对同一目标物同时采用TLS和GB-SAR进行扫描。利用角反射器模拟边坡表面的巨型岩石,通过轨道带动角反射器模拟边坡表面岩石的线性形变。首先利用TLS对设置有角反射器的场景进行至少二次扫描,对得到的点云进行表面重构得到平面,计算平面之间的距离得到形变结果;然后利用GB-SAR对同一目标物进行监测,处理几何成像,通过形变解算得到形变结果;最后对比两次的形变结果。图6为GB-SAR干涉形变监测精度验证实验的流程图。

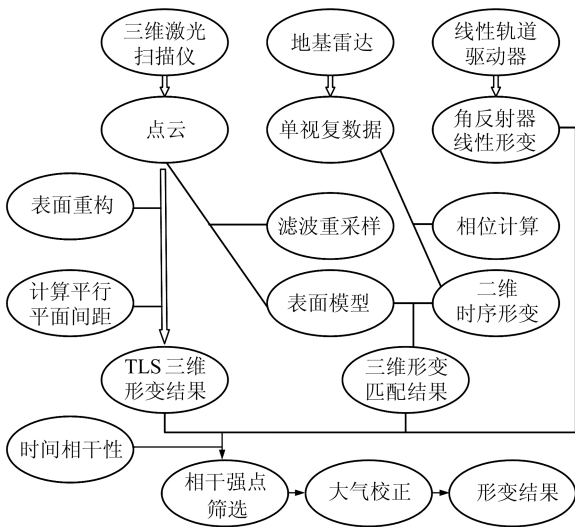


图 6 GB-SAR 干涉形变监测精度验证实验流程图
Fig. 6 Flow chart of Verification Experiment of Interferometric Deformation Monitoring Accuracy by Ground-Based SAR

实验连续获取了 15 幅雷达图像,选择角反射器点进行分析。图 7 为 6 个目标物像素点的时序位移变化序列,在这 15 幅图像中,GB-SAR 和 TLS 形变量呈现出相同的变化趋势,且误差在亚毫米级。本次实验初步验证了 S-SAR 型 GB-SAR 的亚毫米级监测精度,实验中还存在一些不足,需设计新的可控场景形变验证实验(非微波暗室),有待对数据作进一步处理。

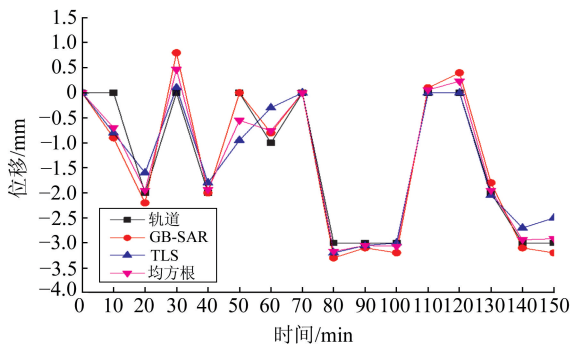


图 7 时序位移变化序列
Fig. 7 Sequence of Time Series Shifts

3.2 露天矿山边坡监测

广东省大宝山矿业公司露天采场地形属岭南中高山地。雷达天线的俯角设置为 2° , 雷达布置高度为 10 m, 距离边坡斜距为 2.5 km, 能够监测的边坡水平长度达 900 m。为了实现长期监测,避免雨雪天气影响,建立了边坡雷达监测室。

为了掌握大宝山矿生产开挖后实际边坡的变形情况,研究最终的边坡稳定性状况,对大宝山露天边坡进行监测。累计监测共 500 余天,约为

12 000 h, 共采集到位移图像 36 000 余帧, 累计出具月监测报告 20 余份。

广东省多雨季, 雨水是滑坡的重要致灾因素。为了探究降雨强度对边坡位移的影响, 针对 2018-10-20 发生的降雨, 选取持续降雨的 7 d 与降雨后 4 d 的 9 个监测点数据进行分析, 以该区域中心划分 9 个监测点, 分别为 1#~9#, 水平间距为 20 m。图 8 为滑坡前后的累积位移曲线与相应的降雨强度, 可以看出, 降雨强度与边坡速度曲线具有良好的一致性。2018-10-20 至 2018-10-24 为小到中雨, 位移速度变化不大, 对应图 8 的前半段。发生大幅度位移前期, 降雨入渗使岩土体抗剪强度降低, 并在一定的降雨强度和降雨量下保持短暂的稳定平衡, 持续的强降雨打破了这种短暂平衡, 10-24 降雨量达到峰值 (14.6 mm/d), 且位移量增加, 最大降雨强度处位移速度开始增加, 边坡位移进入加速阶段初期。但位移峰值并不是在降雨过程中发生的, 而是在降雨结束后的 10-27 出现, 说明边坡位移变形呈现一定的滞后性。因为随着降雨渗入和岩土体的吸水软化, 裂隙扩展和滑动面贯通需要经过一定的时间来完成。位移峰值之后的 1~2 d, 降雨结束后仍会导致边坡发生一定程度的变形, 但变形速度不大, 边坡变形可能是由于雨水蒸发后的表面缝隙固结。边坡达到新平衡状态后, 后期非强降雨对其影响不大。监测数据基本上与现场实际情况相吻合。

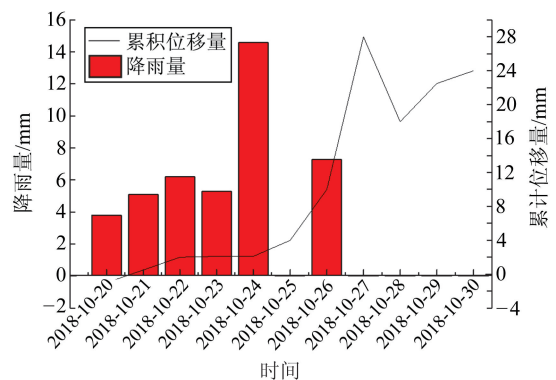


图 8 降雨量与累计位移量关系图
Fig. 8 Relationship Between Rainfall and Cumulative Displacement

3.3 矿山排土场监测

紫金山金铜矿排土场位于露天采场北面区域, 设计等级为一级, 其西南侧约 1 km 处是江山崇大坝, 主要为露天采场废石排弃堆置场。露天采场剥离岩石包括金矿剥离废石、铜矿基建与生产剥离废石及江山崇排土场废石二次搬运。根据排土场设计, 东西长 1 737 m, 南北宽 1 673 m, 外

坡坡角 $30^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 。最低排土平台标高 580 m, 最高排土平台标高 910 m^[21]。

图 9 为三维地形投影下的雷达成像结果, 监测周期为 11 个月^[22]。基于雷达图像获取的累积形变量结果在这 11 个月的监测周期内, 有 4 部分区域(A、B、C、D 区域)呈现明显的正形变量。A、B、C、D 区域均为矿车排放废石区域, 随着时间的累积, 位移连续增加。E 区域为明显的负形变量, 其原因是此区域属于现场开挖处。

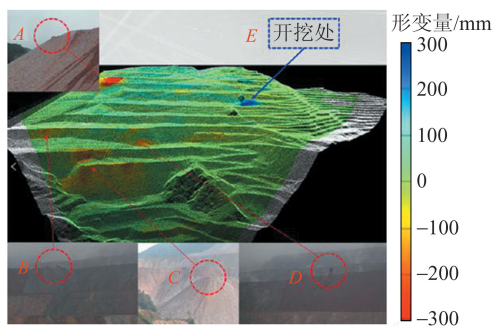


图 9 成像结果与实际施工图
Fig. 9 Imaging Results and Actual Construction Drawings

3.4 应急救援山体滑坡监测

中国安全生产科学研究院自主研发的 S-SAR 主要参与了浙江丽水山体滑坡灾害应急救援、广东深圳光明新区渣土受纳场滑坡事故应急救援、福建泰宁泥石流灾害应急救援、浙江丽水遂昌县苏村山体滑坡事故应急救援、四川茂县特大滑坡灾害应急救援、贵州毕节纳雍山体崩塌灾害应急救援、云南文山州麻栗坡特大山洪泥石流救援、北京房山区大安山乡军红路滑坡灾害应急救援救援和两次金沙江山体滑坡堰塞湖风险监测应急救援等 10 余次应急救援任务。

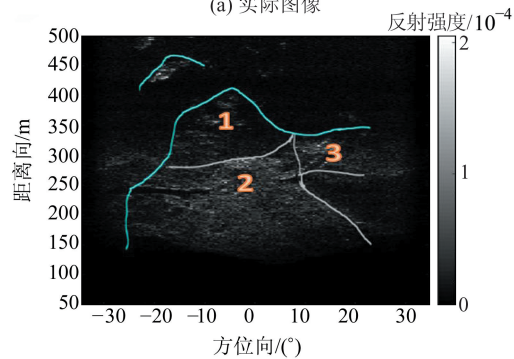
2018-08-11, 北京市房山区 X209 军红路大安山乡 K19+300 处发生山体塌方, 造成道路阻断。中国安全生产科学研究院携带 GB-SAR 监测系统于 2018-08-12 至 2018-08-20 对崩塌边坡进行实时监测, 为抢险施工作业提供了安全保障。

如图 10 所示, 图 10(a) 为监测边坡光学图像, 图 10(b) 为雷达成像图, 图像灰度反映了坡面残余体不同位置的反射强度。区域 1 对应顶部岩体, 数量较多、体积较大的崩塌残余岩石位于该区域; 区域 2 对应下部滑移体; 区域 3 为滑坡侧翼的松散层, 属于滑坡影响区域, 具有潜在的滑移危险。拟在形变结果区域 1、2、3 中分别选定特征点, 分析其位移变化情况。选取 2018-08-13 T14:07—2018-08-14 T08:07 上述 3 个区域形变量较大的位置点进行分析, 具体形变结果如表 1 所示。



观测近距: 50 m 观测远距: 500 m 横向覆盖范围: 360 m

(a) 实际图像



高度覆盖范围: 约 260 m 空间分辨单元: 0.8 m²

(b) 雷达图像

图 10 雷达图像和实物对应关系

Fig. 10 Correspondence of Radar Image and Physical Object

表 1 监测区域位移分析

Tab. 1 Displacement Analysis of Monitoring Area

区域	点号	位移最大值 /mm	发生时间	位移累积量 /mm
1	P_1	15.44	2018-08-14 T07:53	15.44
	P_2	12.27	2018-08-14 T07:53	12.27
	P_3	16.44	2018-08-14 T07:53	16.44
	P_4	17.16	2018-08-14 T07:53	17.16
2	P_1	8.54	2018-08-14 T07:53	8.54
	P_2	9.03	2018-08-14 T07:53	9.03
	P_3	9.91	2018-08-14 T07:53	9.91
	P_4	8.51	2018-08-14 T07:53	8.51
	P_5	5.60	2018-08-14 T00:22	5.04
	P_6	6.31	2018-08-14 T06:51	6.21
3	P_1	-3.02	2018-08-14 T04:37	-2.73
	P_2	-5.28	2018-08-14 T02:07	-4.42
	P_3	-3.35	2018-08-14 T02:07	-2.25
	P_4	14.90	2018-08-14 T00:22	14.33

区域 1 各点在该时间段内位移量为最后时刻位移减去监测初始位移, 统计如下: P_1 为 7.2 mm, P_2 为 5.25 mm, P_3 为 12.17 mm, P_4 为 12.88 mm。区域 1 各目标点累积位移如图 11(a) 所示, 累积形变一直在上升, 夜间降雨期间, 累积形变上升明显。区域 1 各目标点瞬时位移速度如图 12(a) 所示。区域 2 各点在该时间段内位移量统计如下: P_1 为 7.47 mm, P_2 为 7.82 mm, P_3 为 8.83 mm, P_4 为 7.11 mm, P_5 为 5.04 mm, P_6 为 6.21 mm。区域 2 各目标点累积

位移如图 11(b)所示,累积形变一直在上升,夜间降雨期间,累积形变上升明显。区域 2 各目标点瞬时位移速度如图 12(b)所示。区域 3 各点在该时间段内位移量统计如下: P_1 为-1.74 mm, P_2

为-3.84 mm, P_3 为-2.93 mm, P_4 为-13.62 mm。区域 3 各目标点累积位移如图 11(c)所示,形变一直在负向累积,且有增大趋势。区域 3 各目标点瞬时位移速度如图 12(c)所示。

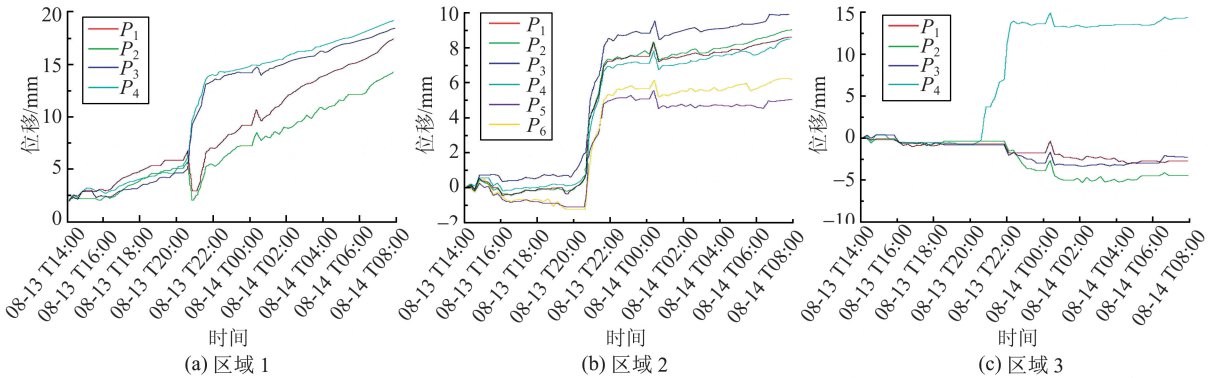


图 11 选点累积形变随时间变化曲线

Fig. 11 Curves of Cumulative Deformation over Time of Selected Points

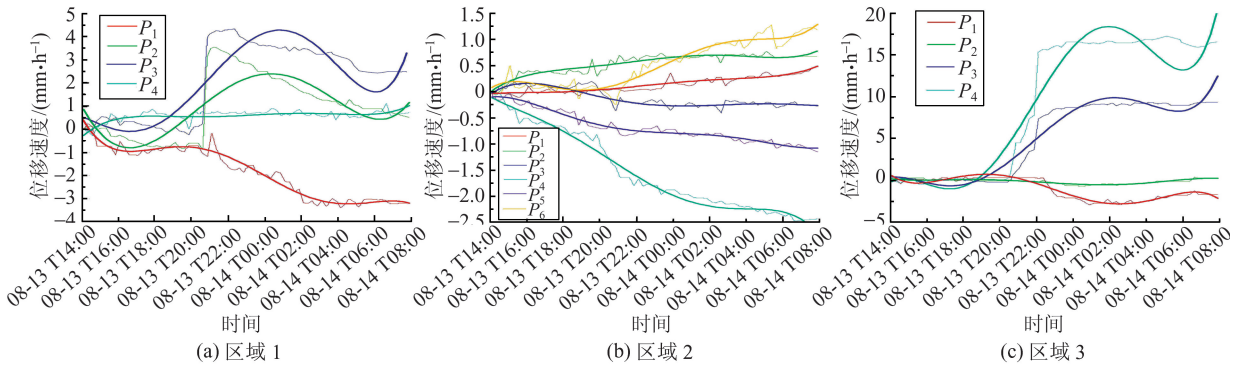


图 12 选点位移速度随时间变化曲线

Fig. 12 Curves of Displacement Velocity over Time of Selected Points

在 3 个区域中,区域 1 选取 4 个特征点进行分析,区域 2 选取 6 个特征点进行分析,区域 3 选取 4 个特征点进行分析。区域 1 整体表现为沿坡面向下运动,降雨期间位移有加速趋势,监测期间该区域内表面岩石不稳定,单日点位移最大为 12.88 mm,平均为 9.37 mm。区域 2 整体表现为沿坡面向下运动,降雨期间位移有加速趋势,单日点位移最大为 8.83 mm,平均为 6.99 mm。区域 3 整体形变量以沉降为主, P_4 点表面岩石松散形变量较大,形变速度有加速趋势,单日点位移最大为 13.62 mm,平均为 1.28 mm。在监测形变区域中,区域 1 的形变相对较大,区域 2 的形变较小,区域 3 的 P_2 和 P_4 两点形变较大。降雨期间,整体形变都比较大。

能够监测到的是距离向变形量,无法观测微质点沿物体表面移动但宏观无位移、无变形的运动,如陀螺自转和瀑布流水等。虽然这种极限情况在岩土体中不会发生,仍存在误差。当 GB-SAR 的观测对象为连续小变形时,某时刻某质点的视变形量被认为近似等于该质点位移沿视线的分量。

2) 预警与预报。GB-SAR 可以实现滑坡自动预警但做不到预报。地质灾害的预报需要对地灾的发生时间、可能发生灾害的位置以及灾害强度进行说明,并能够保持较高的准确率。

3) 没有绝对的预警阈值。GB-SAR 对地质灾害的自动预警不能依靠绝对的形变量预警阈值,应综合分析变形速度、发生形变的面积和变形趋势。没有普适性的滑坡预报模型,也没有绝对不变的滑坡预警值,目前预报准确率最高的方法是速度倒数法,预警的触发需要人工分析。

4 存在的问题及建议

4.1 存在的问题

1) 欧拉坐标系与拉格朗日坐标系。GB-SAR

4.2 建议

中国自主研发的 GB-SAR 已经在地质灾害领域得到了广泛应用。为了解决 GB-SAR 在三

维地理信息方面的缺陷,应研发地基 RAR 来获取三维雷达图像。在预警预报方面,将地基雷达与人工智能和互联网相结合,实现自动预警预报。地基雷达只是表面位移监测的手段之一,为了提高预报准确率,还要结合裂缝监测、内部位移监测和应力监测等其他监测技术。

5 结 语

本文综述了 GB-SAR 的发展现状及应用实例。首先介绍了 GB-SAR 的几种典型系统,按照扫描模式的不同,将其划分为直线式、圆迹式、阵列式和其他便携式 4 种类型。然后以直线式 GB-SAR 为例,详细介绍了差分干涉形变测量技术原理、形变量解算和雷达图像与地形数据配准等 3 个关键技术。接着以 GB-SAR 监测典型应用为例,通过与 TLS 数据对比,验证了 GB-SAR 的监测精度,展现了其在露天矿山边坡监测、废石排土场监测、地质灾害应急救援监测等方面的应用。最后对 GB-SAR 目前存在的问题进行了总结,对未来 GB-SAR 的发展提出了建议。

参 考 文 献

- [1] Yang Guanghua, Zhong Zhihui, Zhang Yucheng, et al. Analysis of Mechanism and Mechanical Characteristics of Landslide Disaster[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(2): 4 009-4 017(杨光华,钟志辉,张玉成,等. 滑坡灾害的机制与力学特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016,35(2):4 009-4 017)
- [2] Zhang Dehui, Lu Xiaohui, Li Tianlong. Application of GNSS Surface Displacement Monitoring System in High Rock Slope[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2008(1): 36-38(张德辉,卢晓辉,李天龙. GNSS 实时形变监测系统在岩质高边坡中的应用[J]. 勘察科学技术,2018(1):36-38)
- [3] 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(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)
- [4] Chen Yiqu. Deformation Measurement Techniques Based on InSAR[D]. Chengdu:University of Electronic Science and Technology of China, 2013(陈怡曲. 基于 InSAR 的形变监测技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2013)
- [5] Zhou Lü, Guo Jiming, Hu Jiyuan, et al. Accuracy Verification and Analysis of Ground-Based Synthetic Aperture Radar Based on Two-Dimensional Deformation Field[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(2): 289-295(周吕,郭际明,胡纪元,等. 基于二维形变场的地基 SAR 精度验证与分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(2): 289-295)
- [6] Liu Hui, Xu Qing, Jin Guowang, et al. Urban Buildings MIMO Downward-Looking Array SAR 3D Simulation Under Non-ideal Trajectory[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(3): 413-421, 442(刘辉,徐青,靳国旺,等. 非理想航迹城市建筑群 MIMO 下视阵列 SAR 三维仿真[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(3): 413-421, 442)
- [7] Zhao Dongyin, Shen Qihong, Ma Haitao. 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(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)
- [8] Aguasca A, Broquetas A, Mallorqui J, et al. A Solid State L to X-band Flexible Ground-Based SAR System for Continuous Monitoring Applications [C]. 2014 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Anchorage, AK, USA, 2014
- [9] Lin Decai, Ma Haitao, Song Baohong. Application of Slope Radar in Emergency Rescue of Landslide [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2016, 12(S1): 284-289(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(S1):284-289)
- [10] Hu C, Zhu M, Zeng T, et al. High-Precision Deformation Monitoring Algorithm for GBSAR System: Rail Determination Phase Error Compensation [J]. *Science China: Information Science*, 2016, 59(8):1-16
- [11] Knaell K. Three-Dimensional SAR from Practical Apertures[J]. *Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering*, 1995, 2 562:31-41
- [12] Lin Wei, Tan Weixian, Hong Wen, et al. Polar Format Algorithm for Circular Synthetic Aperture Radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(12): 2 802-2 807(林贇,谭维贤,洪文,等. 圆迹 SAR 极坐标格式算法研究[J].

- 电子与信息学报, 2010, 32(12): 2 802-2 807)
- [13] Lee H, Lee J, Kim K, et al. Development of a Truck Mounted Arc-Scanning Synthetic Aperture Radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 52(5): 2 773-2 779
- [14] Viviani F, Micheline A, Mayer L, et al. IBIS-Arc-SAR: An Innovative Ground-Based SAR System for Slope Monitoring[C]. 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Valencia, Spain, 2018
- [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): 5 989-5 998
- [16] Hu C, Wang J, Tian W, et al. Design and Imaging of Ground-Based Multiple-Input Multiple-Output Synthetic Aperture Radar (MIMO-SAR) with Non-collinear Arrays[J]. *Sensors*, 2017, 17(3): 1-19
- [17] Xu Zigeng. Research on Vulnerable Weaknesses and Interference Methods in Co-located MIMO Radar [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016(徐自耕. 单基 MIMO 雷达易受干扰薄弱环节分析与干扰方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016)
- [18] Rödelsperger S, Meta A. Meta Sensing's Fast-GB-SAR: Ground Based Radar for Deformation Monitoring[J]. *Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering*, 2014, doi: 10.1117/12.2067243
- [19] Rödelsperger S, Coccia A, Vicente D, et al. The Novel Fast GBSAR Sensor: Deformation Monitoring or Dike Failure Prediction[C]. 2013 Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (AP-SAR), Tsukuba, Japan, 2013
- [20] Monserrat O, Crosetto M, Luzi G. A Review of Ground-Based SAR Interferometry for Deformation Measurement[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, 93: 40-48
- [21] Qin Hongnan. Study on Waste Dump Landslide Inducement Mechanism and Monitoring and Early Warning Technology of Zijinshan Gold and Copper Mine[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2016(秦宏楠. 紫金山金铜矿排土场滑坡诱发机理及监测预警技术研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2016)
- [22] Xue Wu, Zhang Yongsheng, Wang Tao, et al. High Precision Positioning of Unmanned Helicopter with Area Array Images[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(2): 246-253(薛武, 张永生, 王涛, 等. 无人直升机面阵影像高精度对地定位[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(2): 246-253)

Development Status and Application of Ground-Based Synthetic Aperture Radar

WU Xinghui¹ MA Haitao² ZHANG Jie¹

¹ Civil and Resource Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

² China Academy of Safety Science and Technology, Beijing 100012, China

Abstract: In order to promote the wider use of ground-based synthetic aperture radar (GB-SAR) in the field of surface micro-deformation monitoring, this paper summarizes the main types of GB-SAR and introduces the working principles and important parameters of some representative systems. By taking the S-SAR (slope-synthetic aperture radar) ground-based radar independently developed by the China Academy of Safety and Production Science as an example, the key processing techniques utilized by the GB-SAR are introduced. Experiments verify the accuracy of GB-SAR. It also shows the application of GB-SAR in open pit mine slope monitoring, mine dumping site and landslide emergency rescue. Finally, the problems and suggestions of GB-SAR in monitoring are proposed.

Key words: ground-based SAR; synthetic aperture; geological disaster; monitoring and early warning

First author: WU Xinghui, PhD candidate, specializes in geotechnical engineering, slope stability and displacement monitoring. E-mail: wuxinghui92@163.com

Foundation support: The Fundamental Research Funds for the Central Universities, No. FRF-TP-18-015A3.