

雷达遥感滑坡隐患识别与形变监测

Radar remote sensing for potential landslides detection and deformation monitoring

廖明生;董杰;李梦华;敖萌;张路;史绪国

引用本文:

廖明生, 董杰, 李梦华, 敖萌, 张路, 史绪国. 2021. 雷达遥感滑坡隐患识别与形变监测. 遥感学报, 25 (1): 332-341 DOI: 10.11834/jrs.20210162.

Liao M S, Dong J, Li M H, Ao M, Zhang L and Shi X G. 2021. Radar remote sensing for potential landslides detection and deformation monitoring. National Remote Sensing Bulletin, 25 (1): 332-341 DOI: 10.11834/jrs.20210162.

在线阅读 View online: <http://www.ygxb.ac.cn/thesisDetails?columnId=6489043>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

滑坡蠕变与遥感影像上植被异常关系

Relationship between landslide creep and vegetation anomalies in remote sensing images

遥感学报. 2020, 24(6):776-786.

CYGNSS土壤盐分反演方法研究: 以黄河三角洲为例

A remote sensing method for retrieving soil salinity based on CYGNSS: Taking the Yellow River Delta as an example

遥感学报. 2023, 27(2):351-362.

考虑植被端元变异性的光谱解混方法

Spectral unmixing method considering endmember variability of vegetation

遥感学报. 2023, 27(2):456-470.

FY-3D星微波湿温探测仪通道响应函数的影响分析

Effect analysis of spectral response function of microwave humidity and temperature sounder onboard the FY-3D satellite

遥感学报. 2023, 27(2):394-405.

改进局部稀疏系数的轻小型光子计数激光雷达去噪方法

Denosing method for light weight photon counting LiDAR based on an improved local sparse coefficient

遥感学报. 2023, 27(2):520-532.

雷达遥感滑坡隐患识别与形变监测

廖明生¹, 董杰², 李梦华^{1,3}, 敖萌¹, 张路¹, 史绪国⁴

1. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079;

2. 武汉大学 遥感信息工程学院, 武汉 430079;

3. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093;

4. 中国地质大学 地理与信息工程学院, 武汉 430074

摘要: 滑坡是全球发生最为频繁、造成损失最严重的自然灾害之一, 滑坡表面形变测量对于滑坡的早期识别、监测和预警具有重要意义。雷达遥感具有非接触式大范围空间连续覆盖和高精度形变测量等优势, 在滑坡地质灾害领域中取得了广泛的应用。本文概述武汉大学干涉雷达遥感团队近几年在利用雷达遥感监测滑坡形变方面的研究内容, 包括: 雷达遥感在滑坡形变监测中的可行性和适用性分析、大范围滑坡隐患识别、复杂山区滑坡形变测量、大梯度滑坡形变测量、滑坡三维形变提取等。

关键词: 遥感, 滑坡监测, 时间序列 InSAR, 像素偏移量追踪, 三维形变

引用格式: 廖明生, 董杰, 李梦华, 敖萌, 张路, 史绪国. 2021. 雷达遥感滑坡隐患识别与形变监测. 遥感学报, 25(1): 332-341

Liao M S, Dong J, Li M H, Ao M, Zhang L and Shi X G. 2021. Radar remote sensing for potential landslides detection and deformation monitoring. National Remote Sensing Bulletin, 25 (1) : 332-341 [DOI: 10.11834/jrs.20210162]

1 引言

滑坡是频繁发生、破坏最严重的全球自然灾害之一, 滑坡灾害的隐蔽性强、破坏性大, 对于人民生命财产和重要的基础设施安全造成了巨大的威胁。滑坡体表面形变是分析滑坡稳定性和危害性、垮塌预警的重要信息之一, 对于滑坡的大范围探测识别、长时间监测防治具有重要意义(许强等, 2015; 殷跃平和吴树仁, 2012)。

常规的形变监测手段适用于小范围监测, 不利于开展大规模应用。相比于地面传统测量技术以及机载星载光学遥感, 星载雷达遥感受天气影响小、覆盖范围大、测量精度高, 在潜在滑坡识别、滑坡形变监测以及灾害预警方面具有较大优势(郭华东, 2000; 郭华东和张露, 2019; Wasowski J和Bovenga F, 2014; 廖明生等, 2017)。

星载合成孔径雷达干涉测量 InSAR (SAR Interferometry) 技术能够准确提取地球表面微小形变信息, 测量精度可达到厘米级甚至毫米级(廖明生和林琿, 2003), 在滑坡地质灾害监测中得到了广泛应用(Hilley等, 2004; Zhao等, 2012; Sun等, 2015; 廖明生等, 2017; 史绪国等, 2019; 张路等, 2018; 王振林等, 2019; Carla等, 2019; Hu等, 2020)。在植被覆盖等复杂情况下, 常规的永久散射体 InSAR 技术(Crosetto等, 2016; 林琿等, 2017)无法获取足够的相干目标, 导致形变测量错误, 可以联合分析永久散射体和分布式散射体来增加测量点空间密度, 改善测量结果的可靠性(Dong等, 2018b; Ferretti等, 2011)。

由于受到相干性和相位解缠的限制, 基于相位信息的 InSAR 技术仅适用于缓慢形变滑坡。基于幅度的像素偏移量追踪 (POT) 方法通过互相关技

收稿日期: 2020-10-20; 预印本: 2020-12-26

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 41904001); 中国博士后科学基金(编号: 2018M640733); 测绘遥感信息工程国家重点实验室资助课题(编号: 18R03)

第一作者简介: 廖明生, 1962年生, 男, 教授, 研究方向为雷达干涉测量、极化干涉测量技术及其在地形测绘、地质灾害监测和基础设施安全等领域的应用。E-mail: liao@whu.edu.cn

通信作者简介: 董杰, 1988年生, 男, 特聘副研究员, 研究方向为时间序列 InSAR 算法及其在地表形变监测中的应用。E-mail: dongjie@whu.edu.cn

术测量像素的距离向和方位向二维形变，可用于测量大梯度滑坡形变 (Li 等, 2019b; Singleton 等, 2014)。

此外，三维形变能够直观地反映滑坡体的真实形变特征，对滑坡机理研究具有重要意义，但限制于 InSAR 技术的一维雷达视线方向形变监测能力，仅利用单一轨道卫星观测数据很难揭示真实的滑坡表面形变特征。随着 SAR 卫星系统的不断增加，可以通过联合多平台多轨道 SAR 数据反演滑坡表面三维形变信息 (Hu 等, 2014a; Shi 等, 2018)。

本文概述了武汉大学干涉雷达遥感团队近几年来利用雷达遥感技术进行滑坡隐患识别和高精度形变监测方面的研究进展，供同行专家学者们参考。具体包括雷达遥感滑坡监测可行性分析、隐患识别、快速形变量测、相干散射体目标应用、对流层大气延迟改正、三维形变场反演等几个方面，可以根据实际应用场景，合理利用这些方法形成有效的识别或监测方案。

2 雷达遥感滑坡监测可行性及适用性分析

在工程地质领域，按照滑坡形变速率的大小可以将滑坡分为从极其缓慢到极其快速 7 个类别 (Cruden 和 Varnes, 1996)，如表 1 所示。形变速率小于 13 m/月的滑坡都被认为是缓慢滑坡，极其快速滑坡形变速率超过 5 m/s。而在雷达遥感领域，受雷达卫星重访周期的限制，表 1 中的快速滑坡以及形变速率更大的滑坡无法通过星载雷达遥感技术来进行测量，可以考虑采用地基形变监测雷达进行实时监测。

表 1 滑坡速度等级分类 (Cruden 和 Varnes, 1996)

Table 1 The classification of landslide movement velocity (Cruden and Varnes, 1996)

| 等级分类 | 形变速率 |
|------|-------------------|
| 极其缓慢 | < 16 mm/a |
| 非常缓慢 | 16 mm/a — 1.6 m/a |
| 缓慢 | 1.6 m/a — 13 m/月 |
| 中等 | 13 m/月 — 1.8 m/h |
| 快速 | 1.8 m/h — 3 m/min |
| 非常快速 | 3 m/min — 5 m/s |
| 极其快速 | > 5 m/s |

基于 SAR 幅度影像的像素偏移量追踪 POT (Pixel Offset Tracking) 技术在大形变梯度区域不存在失相干和相位解缠问题 (Shi 等, 2015)，该技

术可探测的形变量级与雷达影像的空间分辨率、多视系数以及影像获取频率有关 (Jiang 等, 2011)。一般，该方法可探测的形变量级从数厘米到数十米不等，适用于形变速率较大的滑坡体，对应于表 1 中的非常缓慢到中等速度的滑坡形变速率。

3 大范围滑坡隐患识别

很多灾难性滑坡往往不在已有的滑坡编目数据库中，所以，非常有必要对潜在滑坡隐患进行早期识别 (许强 等, 2019)，本节分别以三峡库区和四川省丹巴县的实验研究为例，论述卫星 InSAR 技术应用于大范围滑坡隐患识别的可行性及其优势。

3.1 三峡库区滑坡隐患识别

滑坡 (包括山体崩塌) 占三峡库区地质灾害总量的 80%，给长江航运及人们的生命财产带来了巨大隐患。联合利用多轨道 InSAR 数据集进行大范围滑坡形变探测，对于三峡库区地质灾害防治来说具有重要的意义，本文采用 3 个相邻轨道 2006 年—2011 年获取的 ALOS PALSAR 数据集，对三峡库区秭归—奉节段坡体稳定性进行制图 (Shi 等, 2016)。

数据处理得到每个轨道的形变速率图后，通过相邻轨道重叠区域的偏差进行拼接。图 1 给出了三峡奉节到秭归段视线向平均形变速率图，3 个轨道数据集共提取到 17775238 个点目标，覆盖了大约 4800 km² 的范围。96% 点目标的形变速率分布在 -10 mm/a — 10 mm/a 区间内，说明整体稳定性较好。基于形变速率值大小，从中发现了 30 个活动性滑坡，覆盖范围大约 48 km²，为三峡库区的地质灾害防治提供有效参考。

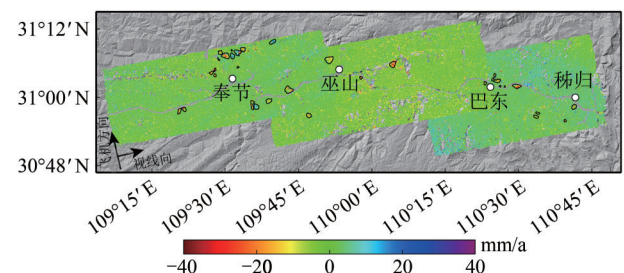


图 1 三峡库区平均形变速率

Fig.1 The InSAR average deformation rate in the Three Gorges Reservoir Region

3.2 四川省丹巴县滑坡隐患识别

四川省丹巴县位于青藏高原东部横断山脉的大渡河流域上游，区内地形陡峭，高差悬殊，地质环境脆弱，崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害发生频繁。随着人类工程活动的加强，区内地质灾害发育有加剧之势，多处滑坡复活变形，对当地居民生命和财产构成了巨大威胁。

采用历史存档的 ALOS PALSAR 数据，2006-12—2011-01 期间，共有 19 景时间序列影像。采用第 4 节讨论的相干散射体 InSAR 分析方法提取雷达视线方向形变速率，结果如图 2 所示。其中，大约 80% 的测量点形变速率绝对值小于 8 mm/a，说明大部分区域较为稳定。基于形变速率值，共识别 17 处不稳定滑坡 (Dong 等, 2018a)。

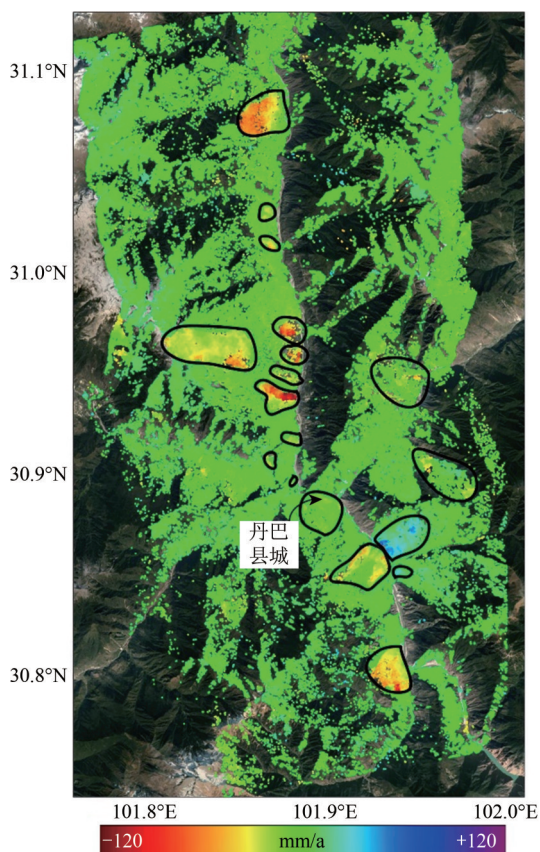


图 2 四川丹巴县 PALSAR 平均形变速率图

Fig.2 The InSAR average deformation rate in Danba County, Sichuan Province derived from the PALSAR data

为了验证 InSAR 探测结果，于 2017-04 组织了一次现场考察活动，现场排查取证，验证上述 17 处滑坡的存在，说明 InSAR 滑坡识别结果是准确可靠的。

4 复杂山区滑坡形变测量关键技术

在复杂山区环境下，InSAR 滑坡形变测量效果和精度容易受到陡峭地形、植被和气象条件等影响。一方面，在植被覆盖地区，相干点目标稀疏，传统时序 InSAR 技术探测的测量点较少，容易造成低估或错误现象 (Ferretti 等, 2011); 另一方面，在地形陡峭山区，对流程大气延迟明显，干扰 InSAR 形变测量的准确性 (Yu 等, 2018)。本节就这两方面内容进行讨论，并给出可行的解决方法。

4.1 基于相干散射体的滑坡形变测量

20 多年来，时间序列 InSAR 技术在滑坡地质灾害监测中得到了广泛应用，涌现出了一大批成功案例。但是，在复杂山区滑坡形变监测过程中，仍然存在一些棘手问题，比如，在植被覆盖情况下，常规时间序列 InSAR 技术很难提取到足够多的相干点目标，测量点空间密度较低，容易出现相位解缠错误，无法准确提取滑坡形变信息。Dong 等 (2018b) 提出的相干散射体 InSAR (Coherence Scatters InSAR, CSInSAR) 分析方法，通过联合分析永久散射体和分布式散射体目标来提升测量点空间密度，从而准确获取滑坡体表面形变信息。

以四川丹巴县甲居滑坡为例，收集 2006-12—2011-01 期间存档的 19 景 L 波段 ALOS PALSAR 数据，采用 PSInSAR、SBAS 和 CSInSAR 方法分别处理，获取的形变速率如图 3 所示。CSInSAR 形变速率图中的形变信号比 PSI 和 SBAS 结果更加清晰明显。与 PSInSAR 和 SBAS 方法相比，CSInSAR 方法探测的测量点数量更多，分别是 PSInSAR 和 SBAS 的 15 倍和 10 倍左右。

另外，采用外部 GPS 观测结果定量评估 CSInSAR 方法的精度和可靠性。甲居滑坡体上的 20 个 GPS 监测站数据采集时间为 2008-08—2013-02，完全覆盖 PALSAR 数据采集时间，其空间位置如图 3 (c) 所示中黑色点所示。为了方便对比，将 GPS 三维形变投影到 PALSAR 数据的 LOS 方向。以每个 GPS 监测站为中心，计算半径 50 m 以内所有 PALSAR 数据的测量点平均形变速率值。使用该速率均值与投影后的 GPS 形变速率对比，两者的散点图如图 3 (d) 所示，相关系数为 0.97，吻合度较高，形变速率差值的 RMSE 值为 10.5 mm/a。

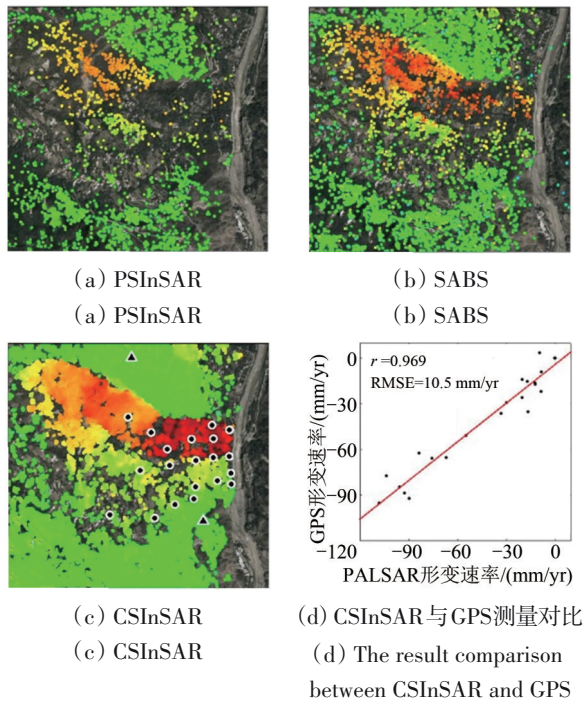


图3 甲居滑坡 ALOS PASAR 年平均形变速率图
Fig.3 The PALSAR-derived average deformation rate of Jiayu landslide

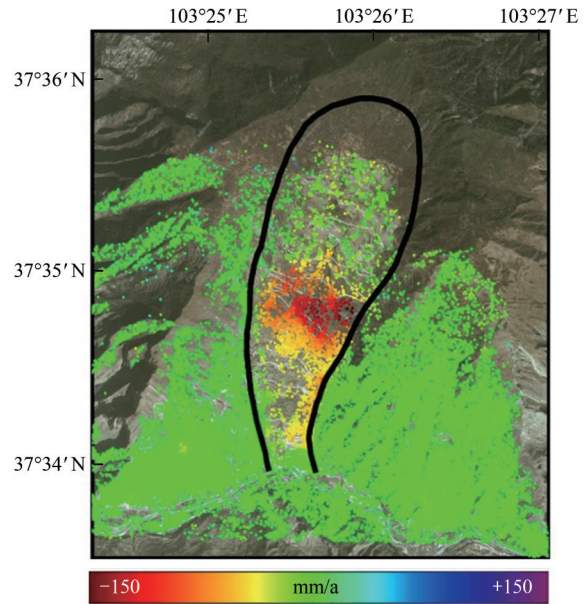
4.2 山区滑坡监测对流层大气延迟改正

山区滑坡监测中，对流层大气延迟是阻碍 InSAR 测量精度的主要因素之一。对流层大气延迟可分为垂直分层大气延迟和湍流混合大气延迟 (唐伟 等, 2017)。在地形陡峭的高山峡谷地区，与地形相关的垂直分层大气延迟表现出时间相关的季节性波动趋势 (Tang 等, 2016)。图 4 (a) 为从 2014-10—2018-05 期间的降轨 Sentinel-1 数据中提取的四川省理县西山村滑坡的雷达视线方向形变速率图。其中，稳定点 P1 的测量时间序列表现出季节性波动趋势，如图 4 (b) 和图 4 (c) 中的黑线所示。

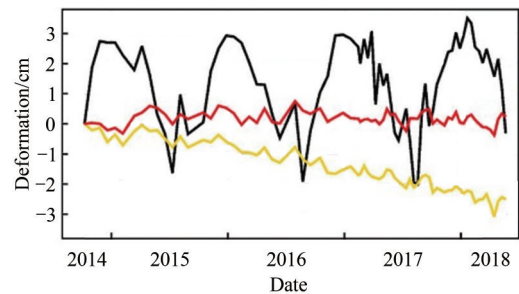
Dong 等 (2019) 提出了两种方法用于改正时间相关的垂直分层大气延迟，一是迭代线性差分相位——高程模型 (ILM)，二是多种数值气象模型大气延迟融合方法 (FDWM)。常规的线性差分相位——高程模型 (LM) 在稳定点易引入虚假的形变信号，如图 4 (b) 中黄色线所示，而迭代线性模型可避免此现象的发生，如图 4 (b) 中红色线所示。

数值气象模型大气延迟融合方法通过对多种数值气象模型计算出的大气延迟进行加权融合，

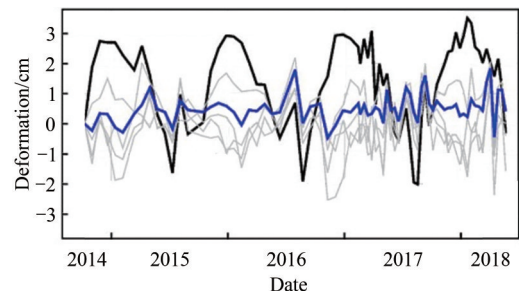
可以避免不同数值气象模型改正结果的过大异常值。从图 4 (c) 可以看出，ERA-I、ERA5、GACOS 和 MERRA-2 等 4 种气象模型融合改正后的形变序列更加接近于零值，且波动最小。



(a) 四川理县西山村滑坡 Sentinel-1 形变速率图
(a) The Sentinel-1 deformation rate of Xishancun landslide in Li County, Sichuan Province, and the deformation time series on point P1 corrected by



(b) 经验模型改正的 P1 点形变序列
(b) Empirical phase-elevation model



(c) 数值气象模型改正的 P1 点形变序列
(c) Numerical weather model
— 原始值 — LM — ILM
— 数值气象模型 — FDWM

图4 地形陡峭山区 InSAR 垂直分层大气延迟改正
Fig.4 The InSAR stratified delay correction steep mountain terrain

5 基于幅度信息的大形变梯度滑坡形变测量

基于幅度信息的像素偏移量追踪 (POT) 方法适合于大梯度滑坡形变测量。其算法的核心是将 SAR 幅度影像进行互相关匹配, 通过搜寻互相关系数最大值的位置, 来估算两幅影像之间相对的偏移量 (Strozzi 等, 2002)。

5.1 基于点目标的像素偏移量追踪方法

在常规的像素偏移量追踪方法基础上, 我们团队提出了基于点目标的像素偏移量追踪方法 PTOT (point-target offset tracking) (Hu 等, 2014b; Wang 和 Jonsson, 2015; 王腾和廖明生, 2017)。该方法只在预先选择的强散射体点目标上计算偏移量, 避免了传统 POT 方法逐点计算所引起的斑块效应, 并大大减少了计算量。同时, 可以采用更大的过采样倍数确定互相关峰值位置, 进而有效提高了 SAR 偏移量计算的精度和可靠性。Wang 和 Jonsson (2015) 利用 PTOT 方法从一对 COSMO-SkyMed 和一对 TerraSAR-X 影像中提取了 2011 年土耳其 Van 地震同震形变场, 证明了利用高分辨率 SAR 幅度影像可以在点目标上以数厘米的精度提取地表形变。

5.2 三峡树坪滑坡

随后, PTOT 方法成功应用在了三峡树坪滑坡的形变监测中 (Shi 等, 2015)。树坪滑坡上安装有若干角反射器, 利用 TerraSAR-X/TanDEM-X 卫星的条带模式数据集和高分辨率聚束模式数据集, 可以提取出滑坡体表面角反射上的时间序列形变。图 5 给出了树坪滑坡体上一个人工角反射体上从 2008 年—2013 年之间的方位向和距离向时间序列形变。其中方位向的最大累积形变量接近 2.5 m。通过分析时序形变, 发现滑坡体的变形与三峡库区水位的波动密切相关, 在库水位下降的时间段形变速率最大。

5.3 拉西瓦果卜滑坡

Li 等 (2019b) 一步将 PTOT 方法应用在自然场景中, 同时将时序 InSAR 中的小基线集 SBAS (Small BAseline Subset) 算法的思想引入到 PTOT 中。图 6 给出了时序 PTOT 算法流程。相比于单主

影像方法有效提高了时序 PTOT 方法的精度和可靠性。同时, 在研究中讨论了时序 PTOT 算法中像对组合策略对于时序形变测量精度的影响。

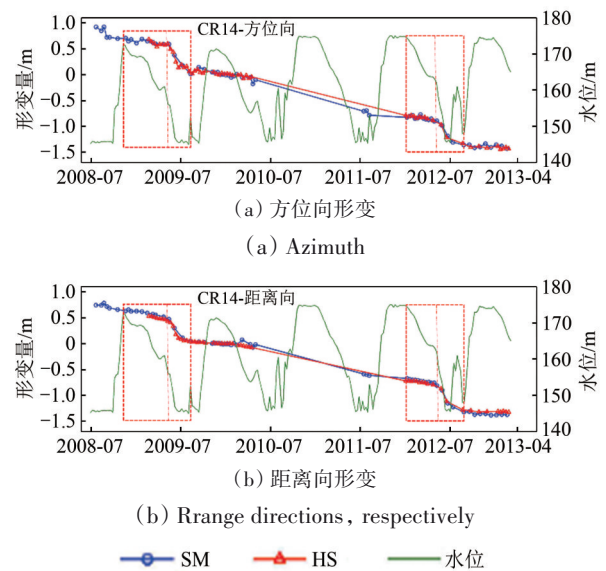


图 5 2008 年—2013 年间三峡树坪滑坡库水位与形变的关系

Fig. 5 The relationship between the deformation and reservoir water level for the Shuping landslide from 2008 to 2013

点目标在 SAR 幅度影像上能够长时间保持稳定, 对于形变速率较小、地表变化较小的研究区域来说, 采用短时间基线的像对不仅无法提高精度, 而且可能会引起误差在时间维度上的累积效应。因此需要针对不同研究区域的实际情况合理选择基线组合策略。

在青海拉西瓦果卜滑坡形变监测的应用中, 使用高分辨率聚束模式的 TerraSAR 数据集, 时序 PTOT 方法相比于单主影像 PTOT 方法的结果形变测量结果的标准差减小约 25%, 可以优于 2 cm。时序 PTOT 方法结果与 ALOS-2 PALSAR-2 差分干涉结果对比, 标准差约 1.1 cm。

5.4 黄泥坝子滑坡

在滑坡体表面无法提取出足够多的点目标时, 就需要在变形体的局部采用传统的逐点计算的方法。对于狭长状的滑坡体, 当滑坡体较小或者 SAR 影像分辨率较低时, 传统 POT 方法采用矩形窗口匹配, 很难避免匹配窗口内同时包含稳定的和滑动的像元, 导致无法完整提取出滑坡体失稳后的形变。

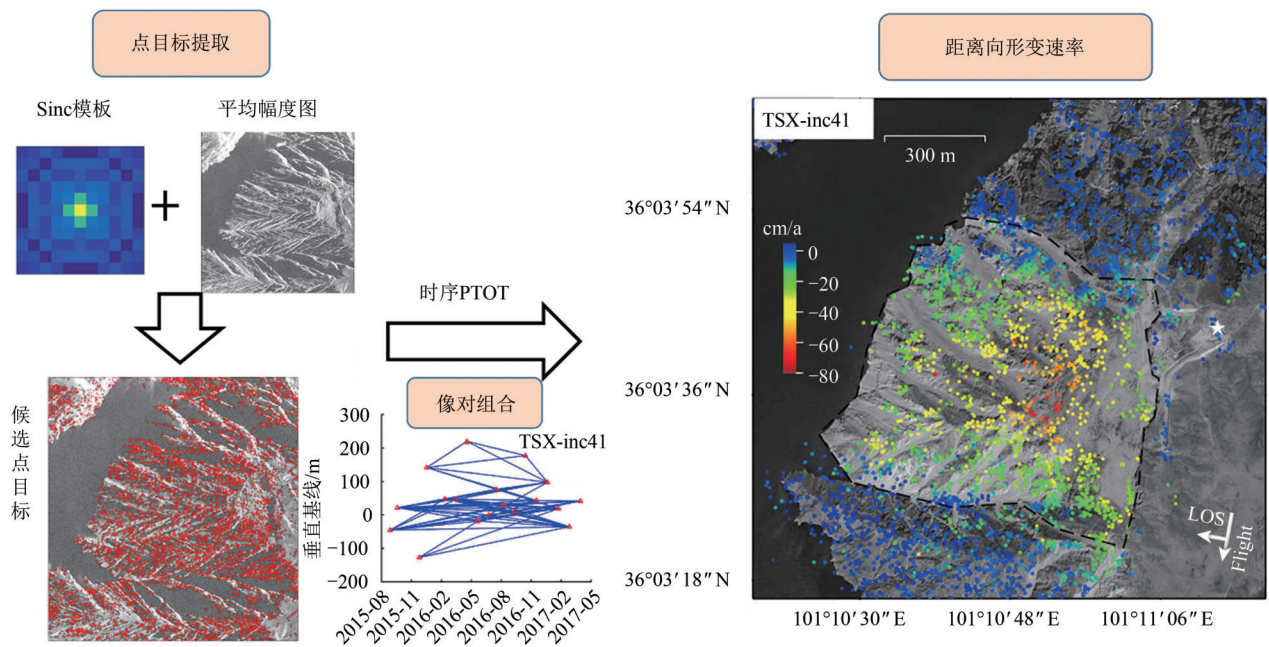


图 6 时序 PTOT 算法流程(以拉西瓦果卜滑坡为例)

Fig. 6 The algorithm procedure of time series PTOT, taking the Guobu landslide as an example

2017-08-08, 四川理县黄泥坝子滑坡发生部分失稳垮塌, 狭长状的滑坡体失稳后快速下滑, 威胁山脚的村庄及道路基础设施安全。我们利用 SAR 幅度影像确定滑坡失稳区域的掩膜窗口, 用自适应的不规则匹配窗口代替传统的矩形窗口, 提取出了黄泥坝子滑坡失稳后的较为完整的表面形变 (Li 等, 2019a)。图 7 (a) 为传统矩形窗口 POT 结果, 图 7 (b) 为自适应 POT 方法的结果。这为此类狭长型的快速变形滑坡体的形变监测提供了一个可行的解决方案。

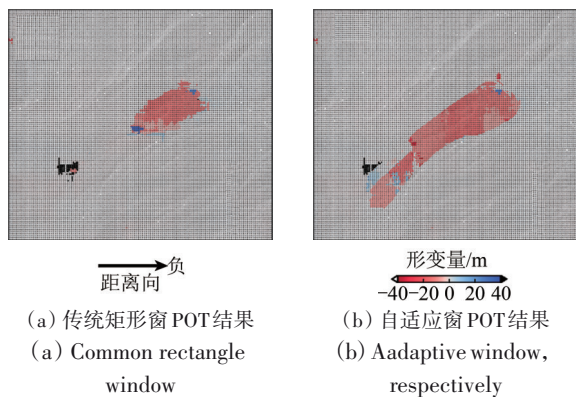


图 7 四川理县黄泥坝子滑坡 2017-07-23—2017-08-14 TerraSAR-X 影像距离向形变

Fig. 7 The deformation along the range direction derived from two TerraSAR-X images acquired on 23 July, 2017 and 14 August, 2017

6 滑坡三维形变提取

InSAR 技术在滑坡大范围形变探测和重点滑坡时序监测方面展现了巨大的应用潜力, 但限于其雷达视线方向的一维形变监测能力, 仅利用单一轨道卫星观测数据很难揭示真实的滑坡表面形变特征及其演化规律。随着 SAR 卫星系统的不断完善, 使得融合时间域和空间域均有重叠度的多源多轨道 SAR 数据成为可能, 但通常采用的融合方法是忽略南北方向甚至水平方向形变, 给滑坡灾害解译造成误判。所以, 滑坡体表面三维形变分析有助于滑坡灾害解译, 而且高精度的形变监测信息对于滑坡灾害机理研究至关重要。

6.1 拉西瓦果卜滑坡

针对快速形变的滑坡, 在雷达坐标系的二维平面中, 像素偏移量方法可以同时获取距离向和方位向的二维形变。结合升降轨数据可以获得四个方向的独立观测量, 就可以利用最小二乘的方法解算三维形变场的 3 个未知分量。但是, 在复杂山区的滑坡应用中, 由于剧烈的地形起伏会引起叠掩、阴影等严重的成像几何畸变, 往往很难同时获取升轨和降轨的可用数据。采用不同入射角的两个轨道联合计算就成为一种替代方法。

在拉西瓦果卜滑坡的应用中,就采用这种方法成功提取出了滑坡体表面三维形变(Li等, 2019b)。图8给出的是果卜滑坡2015-12—2017-04月间的累积三维形变。其中颜色表示垂直形变,箭头的大小和方向表示水平形变。滑坡表面的三维形变场证实了果卜滑坡滑动倾倒的变形机理假设。

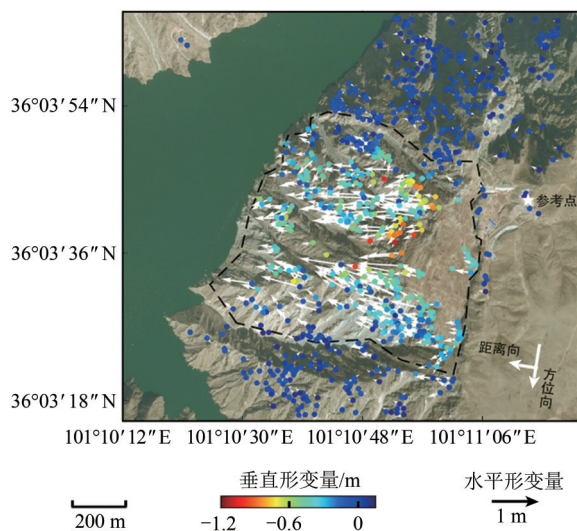


图8 拉西瓦果卜滑坡2015-12—2017-04的累积三维形变

Fig.8 The three-dimensional accumulative deformation of the Guobu landslide from December 2015 to April 2017

6.2 四川丹巴县甲居滑坡

对于缓慢形变的滑坡,在只有D-InSAR视线向形变测量结果的情况下,一般至少需要3个独立的观测,而对于一些特殊类型的滑坡,在重力作用下其位移方向是平行于地表发生的。如果能够得到地表坡度这一先验信息,那么只需要两个具有不同几何成像的观测结果就可以重建滑坡表面的三维形变场。Ao等(2019)提出采用地表平行位移模型获取甲居滑坡三维形变速率结果,如图9所示。结果显示,在水平方向上,甲居滑坡北侧具有明显水平形变,主要表现为沿着地形坡度位移,南侧相对稳定;垂直方向上,北侧形变较大,南侧形变较小。上述结果与GPS监测数据吻合较好,说明该滑坡以水平形变为主,伴随较小垂直形变。

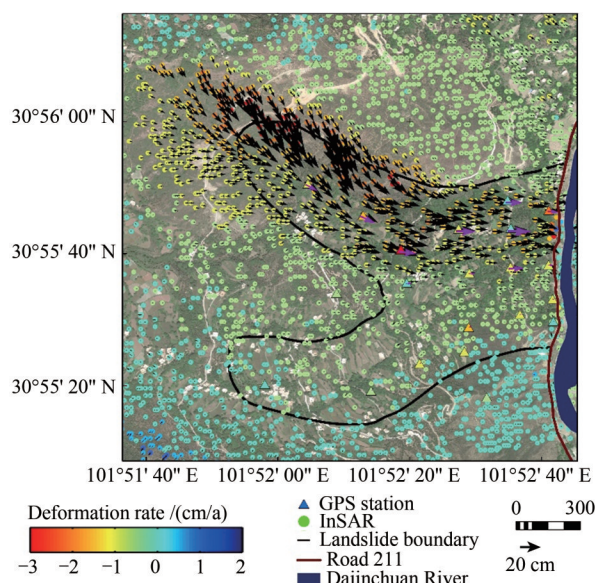


图9 甲居滑坡水平和垂直方向的形变速率场

Fig.9 The horizontal and vertical deformation rate of the Jiaju landslide

7 结论

雷达遥感为滑坡等地质灾害广域识别与长时间变形监测提供了一个全新的技术手段,可有效弥补传统观测方法的不足。本文简述作者团队在该领域近年来开展的滑坡监测专题研究工作,包括:雷达遥感在滑坡形变监测中的可行性和适用性分析、大范围滑坡隐患识别、复杂山区滑坡形变测量、大梯度滑坡形变测量、滑坡三维形变提取等。其中涉及的技术方法细节及结果详细分析可参见文中引用的参考文献。实际工作中,可以结合工程实践的需求形成合理的解决方案。这些方法同样可以推广应用到水电设施规划建设、山区交通设施安全运行和地质灾害应急调查等方面。

随着卫星星座计划的不断发展,SAR数据将同时具备覆盖幅宽广、空间分辨率高、重访周期短等特点,且雷达成像质量和干涉性能越来越好,更加有利于地表形变的获取。但是,SAR卫星系统的快速发展,也给地面数据处理工作带来了一些新的挑战,例如,现有的数据处理方法和软件程序很难应付海量SAR数据的高效准实时处理,而且,即使获取了InSAR形变结果,大范围高效的滑坡解译工作也存在瓶颈。为了解决这些问题,一方面,需要打破现有的时间序列InSAR分析思

路, 在借助 GPU 并行计算提升数据处理效率的同时 (Yu 等, 2020), 探索一种能够准实时更新的数据处理算法; 另一方面, 可将人工智能引入 InSAR 形变结果识别解译中, 实现从广域 InSAR 形变结果中自动识别可疑滑坡。最终实现滑坡的高效识别与监测甚至预警。

此外, 将遥感监测成果进一步分析解译, 结合滑坡模型等地质学知识, 对雷达遥感形变结果与滑坡潜在诱发因子之间进行耦合分析, 有助于理解滑坡的形变演化机制, 对滑坡灾害的早期预警、预报都具有非常重要的意义 (Jiang 等, 2016)。

参考文献 (References)

- Ao M, Zhang L, Shi X, Liao M and Dong J. 2019. Measurement of the three-dimensional surface deformation of the jiaju landslide using a surface-parallel flow model. *Remote Sensing Letters*, 10: 776-785
- Carla T, Intrieri E, Raspini F, Bardi F, Farina P, Ferretti A, Colombo D, Novali F and Casagli N. 2019. Perspectives on the prediction of catastrophic slope failures from satellite InSAR. *Scientific Reports*, 9: 14137
- Crosetto M, Monserrat O, Cuevas-González M, Devanthery N and Crippa B. 2016. Persistent scatterer interferometry: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115: 78-89
- Cruden D M and Varnes D J. 1996. Landslide types and processes. *Special Report-National Research Council, Transportation Research Board*: 76
- Dong J, Liao M, Xu Q, Zhang L, Tang M and Gong J. 2018a. Detection and displacement characterization of landslides using multi-temporal satellite sar interferometry: A case study of danba county in the dadu river basin. *Engineering Geology*, 240: 95-109
- Dong J, Zhang L, Liao M and Gong J. 2019. Improved correction of seasonal tropospheric delay in InSAR observations for landslide deformation monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 233: 111370
- Dong J, Zhang L, Tang M, Liao M, Xu Q, Gong J and Ao M. 2018b. Mapping landslide surface displacements with time series SAR interferometry by combining persistent and distributed scatterers: A case study of jiaju landslide in danba, china. *Remote Sensing of Environment*, 205: 180-198
- Ferretti A, Fumagalli A, Novali F, Prati C, Rocca F and Rucci A. 2011. A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueSAR. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 49: 3460-3470
- Hilley G E, Bürgmann R, Ferretti A, Novali F and Rocca F. 2004. Dynamics of slow-moving landslides from permanent scatterer analysis. *Science*, 304: 1952-1955
- Hu J, Li Z, Ding X, Zhu J, Zhang L and Sun Q. 2014a. Resolving three-dimensional surface displacements from InSAR measurements: A review. *Earth-Science Reviews*, 133: 1-17
- Hu X, Wang T and Liao M. 2014b. Measuring coseismic displacements with point-like targets offset tracking. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 11: 283-287
- Hu X, Bürgmann R, Schulz W H and Fielding E J. 2020. Four-dimensional surface motions of the slumgullion landslide and quantification of hydrometeorological forcing. *Nature Communications*, 11: 2792
- Jiang M, Li Z, Ding X, Zhu J and Feng G. 2011. Modeling minimum and maximum detectable deformation gradients of interferometric SAR measurements. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13: 766-777
- Jiang Y, Liao M, Zhou Z, Shi X, Zhang L and Balz T. 2016. Landslide deformation analysis by coupling deformation time series from SAR data with hydrological factors through data assimilation. *Remote Sensing*, 8: 179
- Li M, Zhang L, Dong J, Tang M, Shi X, Liao M and Xu Q. 2019a. Characterization of pre- and post-failure displacements of the huangnibazi landslide in li county with multi-source satellite observations. *Engineering Geology*, 257: 105140
- Li M, Zhang L, Shi X, Liao M and Yang M. 2019b. Monitoring active motion of the guobu landslide near the laxiwa hydropower station in china by time-series point-like targets offset tracking. *Remote Sensing of Environment*, 221: 80-93
- Shi X, Liao M, Li M, Zhang L and Cunningham C. 2016. Wide-area landslide deformation mapping with multi-path ALOS PALSAR data stacks: A case study of three gorges area, china. *Remote Sensing*, 8: 136
- Shi X, Zhang L, Balz T and Liao M. 2015. Landslide deformation monitoring using point-like target offset tracking with multi-mode high-resolution TerraSAR-X data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 105: 128-140
- Shi X, Zhang L, Zhou C, Li M and Liao M. 2018. Retrieval of time series three-dimensional landslide surface displacements from multi-angular SAR observations. *Landslides*, 15: 1015-1027
- Singleton A, Li Z, Hoey T and Muller J P. 2014. Evaluating sub-pixel offset techniques as an alternative to D-InSAR for monitoring episodic landslide movements in vegetated terrain. *Remote Sensing of Environment*, 147: 133-144
- Strozzi T, Luckman A, Murray T, Wegmuller U and Werner C L. 2002. Glacier motion estimation using SAR offset-tracking procedures. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40: 2384-2391
- Sun Q, Zhang L, Ding X L, Hu J, Li Z W and Zhu J J. 2015. Slope deformation prior to zhouqu, china landslide from InSAR time series analysis. *Remote Sensing of Environment*, 156: 45-57

- Tang W, Liao M and Yuan P. 2016. Atmospheric correction in time-series SAR interferometry for land surface deformation mapping—a case study of taiyuan, china. *Advances in Space Research*, 58: 310-325
- Wang T and Jonsson S. 2015. Improved sar amplitude image offset measurements for deriving three-dimensional coseismic displacements. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, PP: 1-8
- Wasowski J and Bovenga F. 2014. Investigating landslides and unstable slopes with satellite multi temporal interferometry: Current issues and future perspectives. *Engineering geology*, 174: 103-138
- Yu C, Li Z, Penna N and Crippa P. 2018. Generic atmospheric correction model for interferometric synthetic aperture radar observations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123: 9202-9222
- Yu Y, d' Alessandro M M, Tebaldini S and Liao M. 2020. Signal processing options for high resolution SAR tomography of natural scenarios. *Remote Sensing*, 12(10), 1638
- Zhao C, Lu Z, Zhang Q and de la Fuente J. 2012. Large-area landslide detection and monitoring with ALOS/PALSAR imagery data over northern california and southern oregon, USA. *Remote Sensing of Environment*, 124: 348-359
- Guo H. 2000. Theory and application of radar earth observation. *Science Press* (郭华东. 2000. 雷达对地观测理论与应用. 科学出版社)
- Guo H, Zhang L. 2019. 60 years of radar remote sensing: Four-stage development. *Journal of Remote Sensing*, 23(6):1023-1035 (郭华东, 张露. 2019. 雷达遥感六十年: 四个阶段的发展. 遥感学报, 23(6):1023-1035)
- Liao M, Lin H. 2003. Synthetic aperture radar interferometry—Principle and signal processing. *Surveying and Mapping Press* (廖明生, 林琿. 2003. 雷达干涉测量——原理与信号处理基础. 测绘出版社)
- Liao M, Zhang L, Shi X, Jiang Y, Dong J, Liu Y. 2017. Radar remote sensing deformation monitoring method and practice of landslides. *Science Press* (廖明生, 张路, 史绪国, 蒋亚楠, 董杰, 刘宇舟. 2017. 滑坡变形雷达遥感监测方法与实践. 科学出版社)
- Lin H, Ma P, Wang W. 2017. Urban infrastructure health monitoring with spaceborne multi-temporal synthetic aperture radar interferometry. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 46(10): 1421-1433 (林琿, 马培峰, 王伟玺. 2017. 监测城市基础设施健康的星载MT-InSAR方法介绍. 测绘学报, 46(10):1421-1433)
- Shi X, Zhang L, Xu Q, Zhao K, Dong J, Jiang H, Laio M. 2019. Monitoring slope displacements of loess terrace using time series InSAR analysis technique. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 44(7): 1027-1034 (史绪国 张, 许强, 赵宽耀, 董杰, 蒋厚军, 廖明生. 2019. 黄土台塬滑坡变形的时序InSAR监测分析. 武汉大学学报·信息科学版, 44(7): 1027-1034)
- Tang W, Liao M, Zhang Li, Zhang L. 2017. Study on InSAR tropospheric correction using global atmospheric reanalysis products. *Chinese Journal Of Geophysics*, 60(2): 527-540 (唐伟, 廖明生, 张丽, 张路. 2017. 基于全球气象再分析资料的insar对流层延迟改正研究. 地球物理学报, 60: 527-540)
- Wang T, Liao M. 2017. Coseismic displacement derived from Sentinel-1 data: Latest techniques and case studies. *Journal of Remote Sensing*, 22(S1), 124-131 (王腾, 廖明生. 2017. Sentinel-1卫星数据提取同震形变场: 最新技术及震例. 遥感学报, 22(S1), 124-131)
- Wang Z, Liao M, Zhang L, Luo H, Dong J. 2019. Detecting and characterizing deformations of the left bank slope near the Jinping hydropower station with time series Sentinel-1 data. *Remote Sensing for Land and Resources*, 31(2): 204-209 (王振林, 廖明生, 张路, 罗恒, 董杰. 2019. 基于时序sentinel-1数据的锦屏水电站左岸边坡形变探测与特征分析. 国土资源遥感, 31(2):204-209)
- Xu Q, Dong X, Li W. 2019. Integrated space-air-ground early detection, monitoring and warning system for potential catastrophic geohazards. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 44(7): 957-966 (许强, 董秀军, 李为乐. 2019. 基于天—空—地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(7): 957-966)
- Xu Q, Tang M, Huang R. 2015. Monitoring, warning and emergency treatment of large-scale landslide, *Science Press* (许强, 汤明高, 黄润秋. 2015. 大型滑坡监测预警与应急处置. 科学出版社)
- Yin Y, Wu S. 2012. Research on landslide monitoring early warning and emergency prevention technology. *Journal of Engineering Geology*, 21: 281-281 (殷跃平, 吴树仁. 2012. 滑坡监测预警与应急防治技术研究. 工程地质学报, 21: 281-281)
- Zhang L, Liao M, Dong J, Xu Q, Gong J. 2018. Early detection of landslide hazards in mountainous areas of west China using time series SAR interferometry—a case study of Danba, Sichuan. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 43: 2039-2049 (张路, 廖明生, 董杰, 许强, 龚健雅. 2018. 基于时间序列insar分析的西部山区滑坡灾害隐患早期识别——以四川丹巴为例. 武汉大学学报·信息科学版, 43: 2039-2049)

Radar remote sensing for potential landslides detection and deformation monitoring

LIAO Mingsheng¹, DONG Jie², LI Menghua^{1,3}, AO Meng¹, ZHANG Lu¹, SHI Xuguo⁴

1. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

3. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

4. School of Geography and Information Engineering, China University of Geoscience, Wuhan 430074, China

Abstract: Landslides are one of the most frequent natural disasters around the world. The surface deformation measurement is important for early identification, monitoring and early warning of landslides. Radar remote sensing has the advantages of large-scale non-contact high-precision deformation measurement, which has been widely used in the field of landslide geological disasters. This paper summarizes the recent research results of the InSAR group in Wuhan University in landslide deformation monitoring using radar remote sensing. The researches include the feasibility and applicability of radar remote sensing in landslide deformation monitoring, large-scale identification of potential landslides, measurement of landslide deformation in complex mountainous areas, measurement of landslides with large deformation gradients, 3D deformation extraction of landslide, etc. The landslides have varying movement velocities. The phase-based InSAR method is only suitable to monitor very slow-moving landslides, while the amplitude-based offset tracking method can measure relatively large landslide movements. The potential active landslides across wide areas can be identified through inspecting the InSAR deformation rates. We took the Three Gorges Reservoir Region and Danba County as examples to demonstrate the effectiveness of InSAR landslide identification. Once the landslides are found out, we apply satellite InSAR to conduct fine monitoring of some important landslides. The Coherent Scatterers InSAR (CSInSAR) combines persistent scatterers and distributed scatterers to efficiently increase measurements points to ensure robust InSAR deformation results in complex mountainous regions. Meanwhile, we proposed two methods to correct the tropospheric atmospheric delays for time series InSAR analysis when studying single landslide. One is the Iterative Linear Model (ILM) as an improved version of the traditional Linear Model. The other is to fuse tropospheric delays predicted by several global weather models (FDWM) with different temporal intervals and spatial resolutions. The amplitude-based offset tracking method is applied to measure fast landslide movements. Particularly, a new Time-Series Point-like Target Offset Tracking (TS-PTOT) method is proposed to retrieve time-series surface displacements at point-like targets from SAR image pairs properly combined with large temporal baselines and small spatial baselines. We took the Shuping landslide, Guobu landslide, and Huangnibazi landslide as examples to prove the ability of offset tracking method for monitoring fast moving landslides. In addition, three-Dimensional (3D) displacement field, which can render the real movement of the slope surface, is of great significance to the analysis of deformation characteristics and deformation mechanism of a landslide. We took the Guobu landslide and the Jiaju landslide as examples to present the 3D displacements extraction from multiple observations.

Key words: remote sensing, landslide monitoring, time series InSAR, pixel offset tracking, 3D deformation

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.41904001)