

基于动态变频的滑坡GNSS变形数据实时过滤及应用

亓星, 曹汝亮, 修德皓, 周飞

Real-time filtering and application of landslide GNSS deformation data based on dynamic frequency conversion

QI Xing, CAO Ruliang, XIU Dehao, and ZHOU Fei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202403010>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

综合InSAR技术和多源SAR数据在滑坡变形监测中的应用

Application of multiple InSAR techniques and SAR data from multi-sources to landslide deformation monitoring: A case study of the Zhixincun landslide in Jilin Province

于海明, 张熠斌, 方向辉, 徐思瑜, 徐誉维, 张旭晴 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(1): 155-162

基于实时地质灾害监测数据的预警预报动态阈值分析方法

Dynamic threshold analysis method of early warning and forecast based on real-time geo-hazards monitoring data

薛廉, 唐侨, 郑杰, 陆毅之 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(4): 11-21

国产GB-InSAR在特大型水库滑坡变形监测中的应用

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

郭延辉, 杨溢, 杨志全, 高才坤, 田卫明, 何玉童 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 66-72

基于普适型仪器的滑坡监测预警初探——以甘肃兰州岷县三处滑坡为例

Application of universal geo-hazard monitoring instruments in landslides and early warning of three landslides in Gansu Province: a case study in Minxian County and Lanzhou City of Gansu Province

侯圣山, 李昂, 陈亮, 冯振, 王立朝, 曹鹏, 刘军友, 郑浩, 李阳光, 黄鑫, 郭伟, 魏新平 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 47-53

滑坡变形高精度智能化监测预警技术研究与实践

Research and practice of high-precision intelligent monitoring and early warning technology for landslide deformation

李星宇 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 21-29

西气东输管道工程陕西岭湾村滑坡变形特征及成因机制分析

Analysis on deformation mechanism of the Lingwan Village landslide in Shaanxi Province section of the West-East Gas Pipeline Project

王子, 王栋, 姜帅, 李艳军, 安培源 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(3): 8-19



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202403010

亓星, 曹汝亮, 修德皓, 等. 基于动态变频的滑坡 GNSS 变形数据实时过滤及应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(3): 76-83.
QI Xing, CAO Ruliang, XIU Dehao, et al. Real-time filtering and application of landslide GNSS deformation data based on dynamic frequency conversion[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(3): 76-83.

基于动态变频的滑坡 GNSS 变形数据实时过滤及应用

亓星^{1,2}, 曹汝亮¹, 修德皓², 周飞³

(1. 四川轻化工大学土木工程学院, 四川自贡 643000;

2. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川成都 610059;

3. 四川省地质工程勘察院集团有限公司, 四川成都 610072)

摘要: GNSS 变形监测设备是获取滑坡各向变形量及变形发展趋势的主要地面监测设备, 由于监测过程中精度误差和偶然误差的存在, 常常导致基于变形数据计算的滑坡变形速率出现明显的误差波动, 造成实时监测预警的误报。文章针对现有典型 GNSS 变形监测数据的特点, 分析了过滤数据总量与最大偏差量的三阶段关系, 明确了 GNSS 数据过滤量可采用三阶段中缓慢降低阶段起点对应的 40 组数据进行, 同时提出了采用数据缓冲过滤区配合动态变频监测技术实现偶然误差的及时剔除, 最终基于最小二乘法和数据剔除方法实现 GNSS 变形数据的实时过滤, 并通过两处典型边坡监测进行验证, 为后续基于变形数据的滑坡实时分析预警提供技术参考。

关键词: 滑坡变形; 滑坡监测; GNSS 数据; 过滤尺度; 偏差剔除; 动态变频

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2025)03-0076-08

Real-time filtering and application of landslide GNSS deformation data based on dynamic frequency conversion

QI Xing^{1,2}, CAO Ruliang¹, XIU Dehao², ZHOU Fei³

(1. School of Civil Engineering, Sichuan University of Science and Engineering, Zigong, Sichuan 643000, China;

2. State Key Laboratory of Geo-Hazards Prevention and Geo-Environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 3. Sichuan Institute of Geological Engineering Investigating

Group Co. Ltd., Chengdu, Sichuan 610072, China)

Abstract: GNSS deformation monitoring devices are crucial ground monitoring tools for capturing multi-directional landslide deformations and their development trends. However, precision and random errors during monitoring often leads to significant fluctuations in computed deformation rates, leading to false alarms in real-time monitoring and warnings. This study addresses the characteristics of typical GNSS deformation monitoring data by analyzing the relationship across three stages between the total filtered data and maximum deviation. It establishes that the filtering of GNSS data should employ 40 data sets corresponding to the initial phase of the gradually decreasing stage. Furthermore, this paper proposes utilizing a data buffer filtering area combined with dynamic frequency monitoring techniques for the prompt elimination of incidental errors. Finally, based on the least squares method and data rejection techniques, the study achieves real-time filtering of GNSS deformation data, verified through monitoring at two typical slope sites. These methods provide a technical references for subsequent real-

收稿日期: 2024-03-06; 修订日期: 2024-04-19

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金项目(SKLG2022K008)

第一作者: 亓星(1988—), 男, 四川成都人, 博士, 副教授, 研究方向为地质灾害监测预警与预测评价。E-mail: qixing2009@163.com

time landslide analysis and early warning of landslides based on deformation data.

Keywords: landslide deformation; landslide monitoring; GNSS data; filtering scale; bias elimination; dynamic frequency conversion

0 引言

滑坡监测预警是有效减少人员伤亡和财产损失的重要防灾措施之一。近年来随着滑坡监测技术的不断发展, InSAR^[1-2]、三维激光^[3-4]、无人机摄影测量^[5-6]等非接触型边坡监测技术应运而生, 可以获取滑坡任意区域的变形数据, 但受制于无法进行实时数据分析, 一般用于滑坡隐患识别, 而对于有实时监测预警需求的滑坡灾害, 则主要依靠直接接触的变形监测技术, 如裂缝计^[7-8]、GNSS^[9-10]等, 通过直观可靠的地表变形监测, 分析滑坡变形发展趋势进行预警^[11-12], 如近年来广泛应用的切线角预警模型构建的滑坡变形预警技术, 成为了实现滑坡实时预警的可靠手段^[13]。这类监测技术应用过程中, GNSS 设备因其良好的全天候、多方向监测能力得到了广泛的应用, 成为滑坡变形监测最主要的设备之一^[14]。

GNSS 设备应用于滑坡变形监测时, 监测精度可达毫米级, 常见误差在 ± 5 mm 左右^[15], 但在受天气或设备本身定位解算异常影响时 GNSS 变形数据也可能出现异常波动, 导致根据变形量计算的滑坡变形速率产生明显震荡, 引起边坡变形监测的误报。因此, 针对监测数据误差问题, 一些学者提出了各种方法对变形量监测数据进行过滤, 以还原滑坡实际变形速率, 包括采用 Kalman 滤波及其改进^[16-18]、神经网络法^[19-22]、小波降噪法及其改进^[23-25]等, 这些方法都能在事后较好地平滑变形数据, 并且过滤后的数据趋势也与滑坡实际变形趋势基本相符, 但这类方法需要大量的前期数据进行分析, 无法真正应用到滑坡的实时预警中。由此, 部分学者开始应用具有一定实时数据处理能力的解析式过滤方法, 如各类最小二乘和回归拟合^[26-27]、移动平均法^[28]等, 以实现变形数据的实时过滤。其中, 最小二乘法由于同时考虑了时间序列的影响, 相对于移动平均能更真实地还原出滑坡变形发展趋势, 得到了更好的应用。

在基于 GNSS 监测的滑坡变形数据实时过滤过程中, 由于 GNSS 偶然误差的影响, 会导致常规最小二乘法过滤时无法有效剔除异常值, 导致预警误报的发生, 而目前单一的过滤方法都无法实现较好的过滤, 因此, 解决变形数据的实时过滤问题, 并实现异常误差值的实时剔除, 是还原真实滑坡变形数据的重要支撑, 也是实现滑坡变形真正实时有效预警的关键。

1 GNSS 变形数据误差特点

GNSS 获取的滑坡变形量误差一般可分为两类, 分别是精度误差和偶然误差(图 1)。其中, 由于设备定位精度影响导致获得的变形量在一定范围内反复波动的误差为精度误差, 具有一定的规律和波动幅度; 而偶然误差则是由于各类原因导致 GNSS 设备定位准确度产生的较大偏差, 使变形量监测中出现偶发的异常大跳点。在这两类误差影响下, GNSS 设备获得的滑坡变形量数据呈现明显的波动, 而根据变形量直接计算的滑坡变形速率也呈显著的规律波动和异常抖动, 难以进行可靠的变形预警。

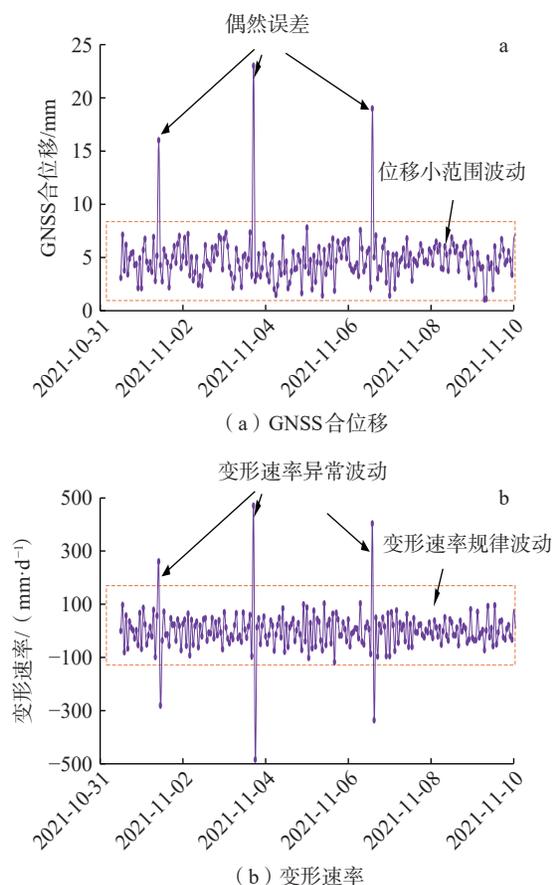


图 1 常见 GNSS 误差特征

Fig. 1 Common GNSS error characteristics

2 变形数据误差过滤方法

2.1 变形数据过滤尺度的确定

对于 GNSS 设备的变形误差过滤, 都是选取一定数

量的最新数据,采用各种过滤方法对获得的变形量数据进行实时过滤。而在滑坡变形监测过程中,影响数据过滤效果的最重要因素是数据的选取数量。不同的过滤方法在过滤数据数量不同时,过滤效果也不同。数据选取量越少,平滑后的偏差波动越大;数据选取量越多,平滑效果越好,但对于真正加速后产生的变形量增大则不容易及时识别。目前对于变形量数据的选取数量并没有统一的标准,主要根据经验选取一定数量的变形数据进行平滑,但两者之间应当有一个最佳平衡点,即在确保较好的数据偏差过滤效果的前提下,选取的数据数量最少以减小延迟。同时,还应当考虑不同 GNSS 设备或区域的差异,构建具有一定普适性的变形数据选取数量,以实现针对这类设备的通用变形数据量选用。

2.2 精度误差的过滤

对于 GNSS 的变形量精度误差的过滤,目前有很多方法都可以较好地实现数据过滤,如移动平均法、最小二乘法等,其中最小二乘过滤方法简单,拟合后直线斜率为滑坡变形速率,且拟合数据同时考虑了变形量时间序列,在监测频率变化时不会出现局部大幅度波动^[29]。因此,本文以常见的最小二乘法过滤为基础,通过搜集国内不同区域、不同型号的 GNSS 设备获取的边坡不同监测频率的变形量数据进行分析(图 2)。通过选取相同长度时间内边坡未产生明显变形的 GNSS 合位移

监测数据,并比较不同数据量选用下的变形量过滤偏差大小的规律,具体方法为:采用不同数量的数据进行最小二乘拟合,获得拟合后的直线位移,并计算其与实际位移量之间的最大偏差值,然后按时间依次向前推进,继续进行最小二乘拟合,并不断计算拟合位移量与实际位移量之间的最大偏差值,最终获得整个时间段上的最大偏差量值。最小二乘拟合的数据量需大于 3 组,因此分别采用 3~80 组数据作为数据选择总量各自进行拟合,最终建立不同数据总量与拟合后最大数据偏差量之间的关系(图 3)。

通过对比了甘肃省黑方台陈家 3#滑坡(监测频率 30 min)、江西省弋阳县三县岭滑坡(监测频率 1 h)、四川省理县薛城镇滑坡(监测频率 1 h)和云南省丽江市华丽高速边坡(监测频率 5 min)4 个区域不同监测频率的 GNSS 监测数据过滤效果的偏差关系发现(图 4),整体上 GNSS 监测数据随着拟合采用的数据总数量增多,拟合后的最大偏差值呈逐渐减小的趋势。不同类型的 GNSS 监测数据都具有大体相同的减小规律,即整体上随着拟合采用的数据总数量增多,GNSS 的最大偏差降低程度可以分为三个阶段:快速降低(数据量 3~15)、震荡降低(数据量 16~40)、缓慢降低(数据量>40)。在快速降低阶段,随着拟合数据量的不断增多,拟合后的 GNSS 变形数据最大偏差值呈大幅度下降的特征,数据

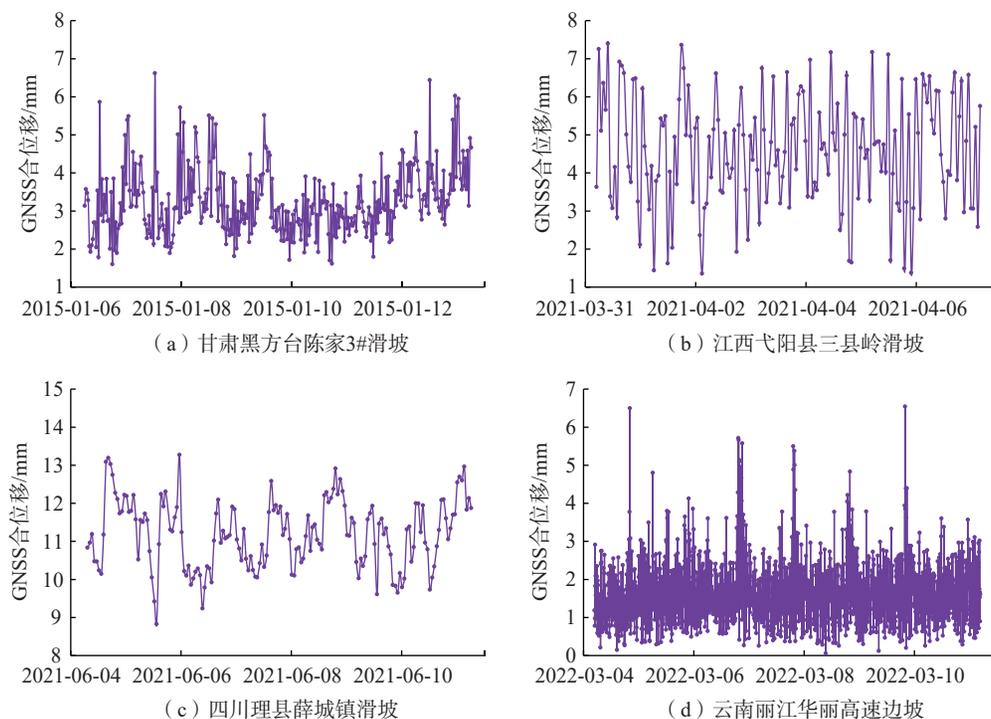


图 2 不同区域和不同类型的 GNSS 监测数据

Fig. 2 GNSS monitoring data across various regions and types

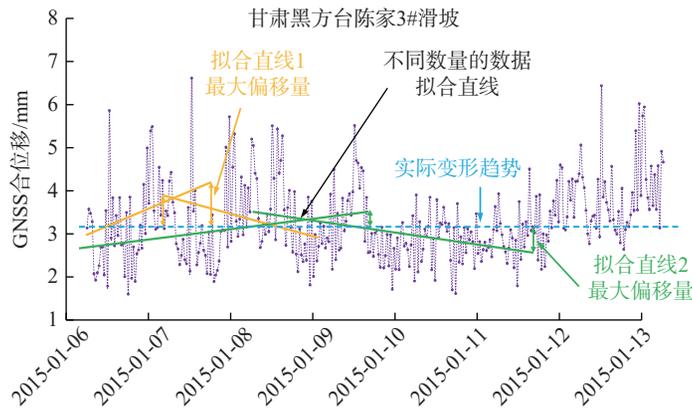


图3 过滤尺度确定方法示意图

Fig. 3 Schematic diagram of filter scale determination method

量越多, 偏差降低越明显; 在震荡降低阶段, 拟合后的 GNSS 变形数据最大偏差值呈波动下降的特征, 整体上随着数据量的增多偏差呈较大幅度降低, 同时中间也出现明显的震荡区域, 即随着数据量的增多, 最大偏差值可能出现小幅度的增大, 随后再继续降低; 在缓慢降低阶段, 随着拟合数据量的继续增多, 拟合后的 GNSS 变形数据最大偏差值呈缓慢下降的特征, 如拟合数据总数量增加一倍, 从 40 组数据增加至 80 组数据时, 所有 GNSS 的最大偏移量降低幅度仅约 20%, 偏差值的过滤效果并不好。

进一步明确该选取值是否有较好的适用性, 通过现有甘肃省黑方台陈家 3# 滑坡和云南省丽江市华丽高速边坡的监测数据按照每小时 1 组提取进行修正, 采用相同过滤方法对比不同监测频率下相同边坡的数据过滤规律 (图 5)。通过对比发现, GNSS 变形监测数据表现出的过滤阶段与频率无显著关系, 不同监测频率下仍然可以采用相同的三阶段进行划分, 在大约 40 个数据量时也处于缓慢降低阶段的起点。而不同频率对 GNSS 变形监测数据的过滤效果差异主要在于偏差的降低幅度, 这是由于监测频率过高使得数据量过于集中, 在局部时段内 GNSS 误差呈整体偏大或偏小时, 导致整个数据的偏差过滤都出现一定的偏差。而当监测频率大幅降低时, 数据量间的持续时间变长, 会克服局部时间段区域内数

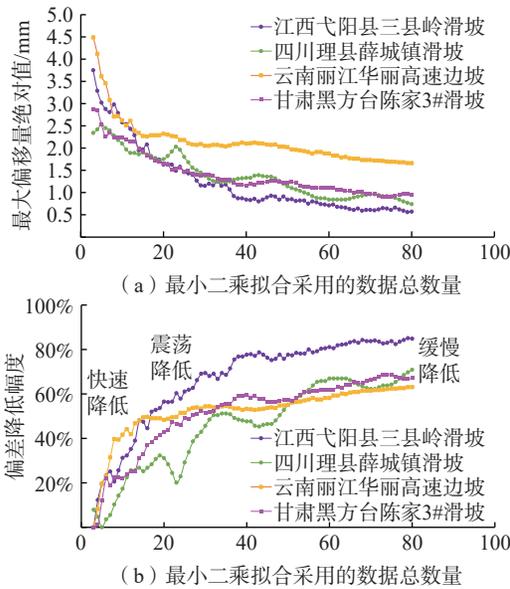


图4 GNSS 监测数据过滤效果的偏差关系

Fig. 4 Deviation relationship in GNSS monitoring data filtering effects

由此可见, 对于常见的 GNSS 监测数据的过滤, 可以以快速降低和震荡降低两阶段过滤效果为参考, 选用缓慢降低阶段起点的 40 个数据量进行数据过滤。为了

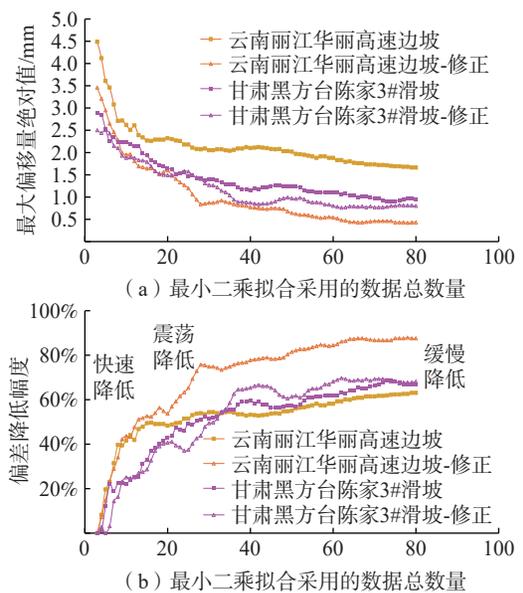


图5 不同频率下的 GNSS 监测数据过滤效果的偏差关系

Fig. 5 Deviation relationships in GNSS monitoring data filtering effects across different frequencies

据整体偏大或偏小的问题,因此总体偏差降低幅度会增加,如图 5 中云南省丽江市华丽高速边坡 GNSS 监测频率从 5 min 降低至 1 h 时,同样的 80 组数据对应的时间段也从 400 min 变成 80 h,对应的偏差降低幅度也从 60% 增加至 85%。

根据分析发现,对于 GNSS 变形监测数据的过滤,可以以缓慢降低阶段起点对应的 40 个数据量作为过滤数据量尺度,对应变形数据的偏差降低幅度均超过 50%,能达到在尽量少的数据量前提下取得较好的过滤效果。

2.3 偶然误差的过滤

由于 GNSS 变形监测数据通过卫星获取并解算定位信息,在极端恶劣环境或偶然故障情况下,可能出现变形量监测值的大幅度偏差,即偶然误差(图 1)。这类误差呈偶发性,通过多个省份多个类型的 GNSS 数据进行统计分析发现,GNSS 均有一定的偶然异常值,且异常数据总量均小于全部数据总量的 10%,呈普遍性规律,这部分数据偏移量极大,可能是正偏移值(即出现极大的数据值),也可能是负偏移值(即出现极小的数据值),属于错误数据,本身没有意义。由于偶然误差的出现会导致计算出的变形速率出现显著的震荡,使基于变

形速率的预警产生误报,同时常规的过滤方法难以直接过滤这类误差,因此,最好的处理方式是及时剔除偶然误差,但这一过程需要实时条件下进行才能保证滑坡监测预警的实时性。

为了实现监测数据的实时过滤,同时及时判识并剔除偶然误差,可以采用设置一定缓冲过滤区的误差剔除方法(图 6)。考虑到 GNSS 变形监测数据过滤量在 40 个时,可以较好地实现常见精度误差的过滤,对应缓冲过滤区的数据量也设置为 40 个,具体过滤方法为:当 GNSS 变形监测数据获取到最新的变形量数据后,取最新的 40 组变形量监测数据作为数据缓冲区,由时间正序去掉 10% 的最大变形量(即从过去到最新时间顺序选取 4 组最大值),由时间倒序去掉 10% 的最小变形量数据(即从最新时间到过去顺序选取 4 组最小值)。采用该方法处理后,数据中的偶然误差极大值和极小值都被剔除,还原出仅有精度波动的有效数据;而剩余 32 组数据作为有效变形量数据,再采用最小二乘过滤方法进行过滤以获得滑坡变形速率信息。随着 GNSS 不断获取新的变形量数据,对应更新缓冲过滤区实现偶然误差的实时剔除和精度误差的实时过滤。

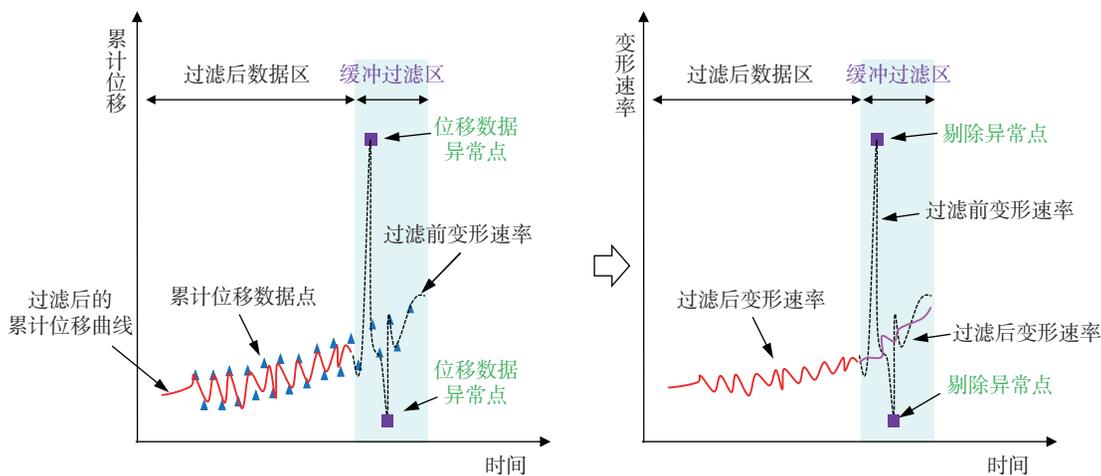


图 6 偶然误差数据缓冲过滤方法

Fig. 6 Data buffer method for filtering incidental errors

该方法的应用中,缓冲过滤区需要 40 个监测数据作为基数,按照常规 GNSS 变形监测数据 1 h/次的监测频率,对应缓冲过滤区的判断需要连续 40 h 的监测数据。需要说明的是,对于具有突发性特点的滑坡该方法难以及时判断其变形发展趋势。对此可以引入具有监测频率动态调节的自适应 GNSS 监测设备,在滑坡加速变形时通过自适应变频实现监测频率的自动增加。具体为:通过设置 GNSS 变形监测设备阈值为 S (S 大于设

备监测精度),采用 5 min/次的动态监测对比方式进行判断,当实际监测数据和最新记录的 GNSS 数据之差大于阈值 S 时,认为变形可能存在加速情况,此时记录最新的监测数据;当实际监测数据和最新记录的 GNSS 数据之差小于阈值 S 时,认为变形尚不明显,仍然采用 1 h/次的常规监测频率获取数据。以此不断进行比对和记录,实现滑坡变形在进入加速变形期间能自动将监测频率调整到最高 5 min/次,对应 40 组变形监测数据的最

小时间间隔仅为不足 4 h, 对于不具有强烈突发性的滑坡, 可以及时有效地识别出加速且不会导致误报。

3 过滤方法应用效果探讨

四村滑坡位于四川省茂县黑虎乡, 为降雨诱发的堆积体变形滑坡, 该区域近年来已实施了自动化监测, 并布设了 1 套 GNSS 监测站。通过前几年的监测获取了一段时间的 GNSS 变形监测数据(图 7a), 该滑坡整体处于基本稳定状态。但在 2018 年 4 月 12 日到 13 日出现了一次较明显的加速过程(图 7b), GNSS 监测站全程获取了该次加速变形的位移变化数据。通过提取该加速变形区间的 GNSS 合位移, 并分别采用最小二乘法 and 剔除误差后的最小二乘法拟合该区域的变形速率进行对比发现(图 7c), 变形速率的变化特征在剔除误差前后基本一致, 能有效反映出 GNSS 合位移先增大后减缓时表现出的滑坡变形速率增大和减小, 两者之间一致性较好, 并未出现明显的延迟或显著差异。

同时, 以最新的彭州市某矿山边坡 GNSS 变形监测数据为例, 进一步验证该方法的过滤效果。该矿山边坡为矿山开采后形成的人工边坡, 目前较为稳定, 未产生明显变形。GNSS 监测站获取了边坡 2024 年 1 月份的变形数据(图 8a), 可见虽然边坡无明显变形, 但获取的 GNSS 原始累计合位移数据有明显的异常跳跃点(图 8b), 导致了根据累计位移计算的变形速率呈上下波动状态

(图 8c), 最大变形速率达到 283.81 mm/d, 显然不符合实际情况。采用数据过滤方法处理, 剔除 10% 最大数据和 10% 最小数据后采用最小二乘拟合, 得到的变形速率较稳定地在 0 附近(图 8c), 实时反映出了边坡的真实变化状态。

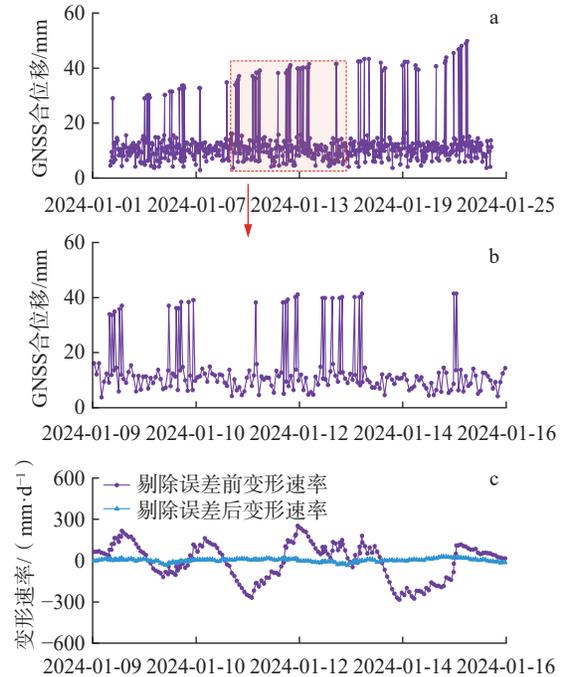


图 8 彭州某矿山边坡匀变速阶段变形速率过滤特征

Fig. 8 Characteristics of deformation rate filtration in the homogeneous velocity phase of a mine slope in Pengzhou

可见, 结合了数据过滤和偶然误差剔除的 GNSS 变形数据过滤方法, 可以在实时监测的情况下去掉大偏差数据, 且不影响监测数据的实际发展趋势判定, 两者的结合为滑坡变形的及时预警提供可靠的数据过滤算法。

4 结论

(1) 滑坡 GNSS 变形数据存在精度误差和偶然误差, 其中精度误差可以通过数据解析式过滤的方法实时过滤, 偶然误差则应通过剔除的方式进行过滤。

(2) 以最小二乘法进行解析式过滤时发现, 随着参与过滤的数据总量增多, GNSS 过滤后的变形量数据偏差大小呈快速降低、震荡降低、缓慢降低三个阶段, 可以选取缓慢降低阶段起点对应的数据量值 40 组数据确定为过滤尺度, 在确保过滤效果的前提下减少数据延迟。

(3) 通过构建数据缓冲剔除 GNSS 变形数据可能出现的偶然误差, 同时采用自适应变频技术的方式, 使构建数据缓冲区导致的数据分析滞后时间减小到最短不足 4 h, 为滑坡的实时预警预报提供及时可靠的数据

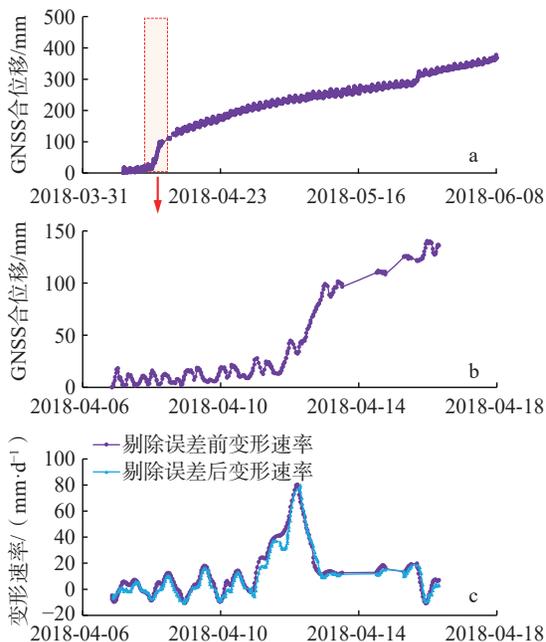


图 7 四村滑坡加速阶段变形速率过滤特征

Fig. 7 Deformation rate filtering characteristics of deformation rate in acceleration stage of Sicun landslide

支持,满足非突发性滑坡基于变形速率的预警需求。

(4)通过对典型滑坡 GNSS 变形数据的应用验证,该方法可以实现变形速率误差波动的有效过滤,同时偶然误差的剔除也对滑坡实际变形速率不产生明显延迟,可以较好地还原滑坡实际变形发展趋势,具有一定的普适性和适用性。

参考文献(References):

- [1] CASCINI L, FORNARO G, PEDUTO D. Analysis at medium scale of low-resolution DInSAR data in slow-moving landslide-affected areas [J] . *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, 64(6): 598 - 611.
- [2] KURSAH M B, WANG Yong, BAYOH H D, et al. A comparative study on the predictive ability of archived and SBAS-InSAR inventories for landslide susceptibility using frequency ratio model in Western Area, Sierra Leone [J] . *Environmental Earth Sciences*, 2021, 80(10): 387.
- [3] TEZA G, PESCI A, GENEVOIS R, et al. Characterization of landslide ground surface kinematics from terrestrial laser scanning and strain field computation [J] . *Geomorphology*, 2008, 97(3/4): 424 - 437.
- [4] ZHANG Jieyuan, LI Haibo, YANG Xingguo, et al. Quantitative assessment of rockfall hazard in post-landslide high rock slope through terrestrial laser scanning [J] . *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(10): 7315 - 7331.
- [5] TEMPA K, PELJOR K, WANGDI S, et al. UAV technique to localize landslide susceptibility and mitigation proposal: A case of Rinchending Goenpa landslide in Bhutan [J] . *Natural Hazards Research*, 2021, 1(4): 171 - 186.
- [6] JIAO Qisong, JIANG Wenliang, QIAN Haitao, et al. Research on characteristics and failure mechanism of Guizhou Shuicheng landslide based on InSAR and UAV data [J] . *Natural Hazards Research*, 2022, 2(1): 17 - 24.
- [7] 许强,彭大雷,何朝阳,等. 突发性黄土滑坡监测预警理论方法研究——以甘肃黑方台为例 [J] . *工程地质学报*, 2020, 28(1): 111 - 121. [XU Qiang, PENG Dalei, HE Chaoyang, et al. Theory and method of monitoring and early warning for sudden loess landslide: A case study at Heifangtai terrace [J] . *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(1): 111 - 121. (in Chinese with English abstract)]
- [8] WANG Honghui, NIE Donglin, TUO Xianguo, et al. Research on crack monitoring at the trailing edge of landslides based on image processing [J] . *Landslides*, 2020, 17(4): 985 - 1007.
- [9] HASTAOGLU K O, POYRAZ F, TURK T, et al. Investigation of the success of monitoring slow motion landslides using Persistent Scatterer Interferometry and GNSS methods [J] . *Survey Review*, 2018, 50(363): 475 - 486.
- [10] 许强. 对滑坡监测预警相关问题的认识与思考 [J] . *工程地质学报*, 2020, 28(2): 360 - 374. [XU Qiang. Understanding the landslide monitoring and early warning: Consideration to practical issues [J] . *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(2): 360 - 374. (in Chinese with English abstract)]
- [11] PEI Huafu, ZHANG Feng, ZHANG Siqi. Development of a novel Hall element inclinometer for slope displacement monitoring [J] . *Measurement*, 2021, 181: 109636.
- [12] ZHAO Ya, ZOU Kangni, LIU Jiayi, et al. Current status and progress of market application of engineering technologies for slope monitoring and early warning [J] . *Frontiers in Science and Engineering*, 2021, 1(2): 6-11.
- [13] 许强,曾裕平,钱江澎,等. 一种改进的切线角及对应的滑坡预警判据 [J] . *地质通报*, 2009, 28(4): 501 - 505. [XU Qiang, ZENG Yuping, QIAN Jiangpeng, et al. Study on a improved tangential angle and the corresponding landslide pre-warning criteria [J] . *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(4): 501 - 505. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 白正伟,张勤,黄观文,等. “轻终端+行业云”的实时北斗滑坡监测技术 [J] . *测绘学报*, 2019, 48(11): 1424 - 1429. [BAI Zhengwei, ZHANG Qin, HUANG Guanwen, et al. Real-time Beidou landslide monitoring technology of “ light terminal plus industry cloud” [J] . *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(11): 1424 - 1429. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 亓星. 突发性黄土滑坡监测预警研究——以甘肃黑方台黄土滑坡为例 [D] . 成都: 成都理工大学, 2017. [QI Xing. Study on monitoring and early warning of sudden loess landslide: A case study of Heifangtai loess landslide in Gansu Province [D] . Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [16] ACAR M, OZLUDEMIR M T, EROL S, et al. Kinematic landslide monitoring with Kalman filtering [J] . *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2008, 8(2): 213 - 221.
- [17] 金亚兵,杨傲. 基于 Kalman 滤波模型的边坡灾害自动化监测预警平台 [J] . *工程勘察*, 2021, 49(8): 55 - 60. [JIN Yabing, YANG Ao. Automatic monitoring and early warning platform of slope disaster based on Kalman filtering model [J] . *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2021, 49(8): 55 - 60. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 彭鹏,单治钢,董育烦,等. 基于 Kalman 滤波融合算法的库区滑坡动态变形监测综合信息提取 [J] . *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(8): 1520 - 1525. [PENG Peng, SHAN Zhigang, DONG Yufan, et al. Application of multi-sensor valuation in dynamic deformation for landslide monitoring based on Kalman filtration fusion theory [J] . *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(8): 1520 - 1525. (in Chinese with English abstract)]

- [19] 张敏敏, 吕晓军, 贾新春, 等. 基于 GPS 和神经网络的滑坡位移监测算法 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(8): 51 - 54. [ZHANG Minmin, LYU Xiaojun, JIA Xinchun, et al. Landslide displacement monitoring algorithm based on GPS and neural network [J]. Computer Measurement & Control, 2018, 26(8): 51 - 54. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 胡海洋, 邹进贵, 张艺航. 基于 BP 神经网络的自适应 Kalman 滤波在滑坡沉降监测中的应用研究 [J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(6): 236 - 239. [HU Haiyang, ZOU Jingui, ZHANG Yihang. Application of adaptive Kalman filter based on BP neural network in landslide settlement monitoring [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2019, 42(6): 236 - 239. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 翟会君, 翟亚锋, 朱涛, 等. 基于回归-ELM 神经网络模型的滑坡变形及失稳预测模型 [J]. 河北工业科技, 2017, 34(6): 440 - 447. [ZHAI Huijun, ZHAI Yafeng, ZHU Tao, et al. Prediction model of landslide deformation and instability based on regression-ELM neural network model [J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2017, 34(6): 440 - 447. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 董力豪, 刘艳辉, 黄俊宝, 等. 基于卷积神经网络的福建省区域滑坡灾害预警模型 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(1): 145 - 153. [DONG Lihao, LIU Yanhui, HUANG Junbao, et al. An early prediction model of regional landslide disasters in Fujian Province based on convolutional neural network [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(1): 145 - 153. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 伍琪琳. 边坡变形监测数据的小波降噪和粗糙惩罚平滑 [D]. 杭州: 浙江大学, 2011. [WU Qilin. Wavelet denoising and rough penalty smoothing of slope deformation monitoring data [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese with English abstract)]
- [24] BNOU K, RAGHAY S, HAKIM A. A wavelet denoising approach based on unsupervised learning model [J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2020, 2020(1): 36.
- [25] 周勇, 焦胜宇, 赵发俊. 基于 S 变换的不稳定斜坡 GNSS 数据信息提取 [J]. 测绘技术装备, 2021, 23(3): 71 - 73. [ZHOU Yong, JIAO Shengyu, ZHAO Fajun. GNSS data extraction of unstable slopes based on S transform [J]. Geomatics Technology and Equipment, 2021, 23(3): 71 - 73. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 郭献涛, 黄腾, 臧妻斌, 等. 基于最小二乘三维表面匹配算法的滑坡变形测量 [J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1421 - 1427. [GUO Xiantao, HUANG Teng, ZANG Qibin, et al. An approach for monitoring landslide deformation using least-square matching algorithm [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5): 1421 - 1427. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 罗文强, 冀雅楠, 王淳越, 等. 多监测点滑坡变形预测的似乎不相关模型研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊 1): 3051 - 3056. [LUO Wenqiang, JI Yanan, WANG Chunyue, et al. Study on seemingly unrelated model for landslide deformation prediction at multi-monitoring points [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Sup 1): 3051 - 3056. (in Chinese)]
- [28] 邓继辉, 陈柏林. 基于时间序列分析的滑坡变形动态预测研究 [J]. 长江科学院院报, 2012, 29(10): 78 - 81. [DENG Jihui, CHEN B L. Dynamic prediction of landslide deformation based on time series analysis [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(10): 78 - 81. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 亓星, 修德皓, 程关文, 等. 滑坡变形监测数据的实时过滤方法及应用 [J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(7): 129 - 138. [QI Xing, XIU Dehao, CHENG Guanwen, et al. Real time filtering method and application of landslide deformation monitoring data [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(7): 129 - 138. (in Chinese with English abstract)]