

DOI: [10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202011051](https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202011051)

基于广播 RTK 边缘计算的北斗高精度 地质灾害监测系统及应用分析

朱 真, 江思义, 刘小明, 李志宇

(广西壮族自治区地质环境监测站, 广西南宁 530029)

摘要: 为提供全天候、全自动化、高精度变形监测服务,并最大限度降低空间环境因素对实时高精度定位的影响,基于数字调频广播(CDRadio)RTK(载波相位差分技术)边缘计算技术融合 GNSS(全球卫星导航系统)核心解析算法,开发了具有自主知识产权、结构开放的“基于广播 RTK 边缘计算的北斗高精度地质灾害监测系统”,该系统能长时间稳定运行,并能满足功能性需求和非功能性需求在内的所有用户需要。以广西梧州市长洲区宝石园 8 号地块不稳定斜坡为例,通过分析 2020 年 5—11 月的监测数据表明:整个坡体处于蠕变阶段,坡顶前缘有向外侧蠕动且下沉的趋势,整个坡体有向东南方向倾斜发育的趋势。系统通过建立良好的系统信息交互平台,将系统形成的统计分析信息高速便捷地传递给用户,提高用户系统管理、决策、应用能力;充分挖掘系统数据资源,提供实时预报服务,提高信息采集、传输、处理、分析、预报的准确性、可靠性,全面提高地质灾害监测预警预报管理能力,更好地为各级管理部门的决策和指挥抢险救灾提供科学依据。

关键词: 广播 RTK 边缘计算;北斗高精度;地质灾害监测;系统

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)05-0176-08

The Beidou high precision geological disaster monitoring system based on RTK edge calculation and its application analysis

ZHU Zhen, JIANG Siyi, LIU Xiaoming, LI Zhiyu

(Geological Environment Monitoring Station of the Guangxi Zhuang Autonomous Region,
Nanning, Guangxi 530029, China)

Abstract: To provide service of all-weather, full automation and high precision deformation monitoring and to furthest reduce the effects of space environment factors on the high precision real-time positioning, on the digital CDRadio edge of RTK GNSS core analytic computing technology fusion algorithm is used, and “the Beidou high-precision geological disaster monitoring system with edge calculation based on broadcasting RTK” is developed, which is characterized by the independent intellectual property rights and structure open. The system can run stably for a long time, and can satisfy the functional requirements and non-functional requirements of all users. Taking the unstable slope of block 8 in the Gemstone Garden in Changzhou District of Wuzhou as an example, the monitoring results from May to November 2020 are analyzed. The monitoring data show that the whole slope body is in the stage of slow development, and the front edge of the slope top has a tendency of peristaltically moving and sinking. The whole slope body tends to develop towards the southeast direction. Through the establishment of a good system information interaction platform, the statistical analysis information formed by the system is transmitted to users in a high speed and convenient way, which effectively improves the users' system

收稿日期: 2020-11-26; 修订日期: 2021-01-17

基金项目: 广西壮族自治区自然资源厅科研项目

第一作者: 朱真(1965-), 男, 硕士, 教授级高工, 从事地质灾害防治工程勘查、设计与施工工作。E-mail: 1210709748@qq.com

通讯作者: 江思义(1987-), 男, 硕士, 工程师, 从事地质调查和岩土工程勘查与设计工作。E-mail: 370333108@qq.com

management, decision-making and application ability. It can fully mine the data resources of the system, provide real-time forecasting services, effectively improve the accuracy and reliability of information collection, transmission, processing, analysis and forecast, comprehensively improve the ability of geological disaster monitoring, early warning and forecast management, and better provide scientific basis for the decision-making and command of management departments at all levels in emergency rescue and disaster relief.

Keywords: broadcast RTK edge calculation; high precision Beidou; monitoring of geological hazards; system

地质灾害由于其突然性、监测数据难以实时获取等特点,使监测工作异常困难^[1]。随着科学技术的发展,地质灾害监测方法和监测仪器设备日新月异^[2-3],监测仪器的研制向高性能、高精度、高效益、全方位、全自动的方向发展^[4-6]。目前,欧美和日本等发达国家基本利用通信技术实现了地质灾害的自动化实时监测^[1,7-10],在监测技术方面主要有布里渊散射光时域反射技术(BOTDR)、合成孔径雷达干涉测量技术(InSAR)、激光扫描技术(LIDAR)、岩石发声监测技术等。Hiroshige Ohno 等^[7]通过布里渊散射光时域反射技术(BOTDR),获得光纤在某一点的应变信息,如将光纤铺设在地质灾害高易发区域,可探知相关区域的形变;Marco Corsetti 等^[8]利用全新的对地观测技术——合成孔径雷达干涉测量技术(InSAR),通过提取地表的三维信息和高程变化信息,能够检测出毫米级别的地形变化,该技术进一步发展出差分干涉技术(DINSAR);Hannah M. Cooper 等^[9]通过激光扫描技术(LIDAR)对被检测物体进行快速网格扫描测量,通过激光点获取所接触物体表面的空间位置等信息,使测量物体的表面形态完整呈现,达到精准监测的目的;Haddad K 等^[10]通过岩石发声监测技术,利用岩体或岩石变形破坏过程中其贮存的部分能量以应力波的形式释放出来,产生声发射,据此达到监测目的。近年来,这些先进的监测技术在国内得到了大力推广,应用最为广泛的数据传输技术是 GPRS/CDMA 以及短信通信^[11-12]。

目前全球导航卫星系统(GNSS)定位技术的日益发展,使得工程测量更加精密。GNSS 不需要基准点和监测点之间通视,测量范围也不受限制,同时具有高数据采样率,因而其在工程变形监测方面,具有独特的测量优势^[13]。随着北斗卫星导航定位系统、传感器技术、现代通信技术及计算机技术的快速发展^[14-15],如何将这些先进技术应用于地质灾害监测与预警,实现地质灾害高性能、高精度、高效益、全方位、全自动的监测与预警,成为国内外学者研究的重要课题。

当前,地质灾害监测技术方法众多^[16-17]。传统的

地表变形监测技术通常采用全球导航卫星系统定位(GNSS)技术配合 4G 通信技术进行监测数据的采集和传输。实现该技术,一是需要在监测点周边建设卫星导航定位基准站,为监测点提供精确的定位信息;二是需要监测点有 4G 信号覆盖,用于发送定位数据和回传监测信息。因此,该类技术的局限性在于,一是需要在监测点周边建设成本较高的卫星导航定位基准站,二是对于边远山区等 4G 通信信号不稳定的地区监测稳定性不佳,三是每个监测点都需要支付后续数据流量费用。此外,如果不自行建设导航定位基准站,使用省级连续运行卫星定位服务参考站(CORS 站)系统提供导航定位服务,以提供测绘定位服务为主的平台也无法适应数量众多的监测点海量、不间断的定位服务请求。因此,为实现大规模地质灾害隐患点的实时监测,建立高效、精确、低成本的监测体系将具有重要的工程意义^[18]。

针对广西地质灾害发生数量众多、涉及范围较广的特点,由广西壮族自治区自然资源厅联合广西壮族自治区广播电视局、深圳思凯微电子有限公司、武汉大学等多家单位,研发建立了基于广播 RTK 边缘计算的北斗高精度地质灾害监测系统,本文全面系统论述了该系统设计组成、特点,分析了系统的可行性,并以广西梧州市长洲区宝石园 8 号地块不稳定斜坡为例进行了示范应用研究,为该系统更好地为各级管理部门的决策和指挥抢险救灾提供科学依据,为同类地区地质灾害监测预警做出贡献。

1 系统设计

基于广播 RTK 边缘计算的北斗高精度地质灾害监测系统是结合现代化工业自动化控制、卫星定位技术、现代通信技术、计算机网络技术、数据库技术、地理信息技术和信息分析预测技术^[19],采用的主要技术组成及特点分述如下。

1.1 高精度定位服务网络 RTK 差分定位技术

差分改正数的定位精度主要从以下几个方面进

行优化,其一,结合研究区低纬度的特点,采用 Melbourne-Wübbena 组合计算双差整周模糊度;其二,利用每条基线的 GNSS 观测值、双差整周模糊度、精确的基准站位置坐标等计算每条基线的电离层延迟、

对流层延迟及综合误差;其三,根据电离层变化率和宽巷组合进行实时周跳探测,削弱卫星钟差等造成的改正数误差精度影响,并插值确定网络 RTK 用户的差分改正信息。网络 RTK 数据处理流程图如图 1 所示。

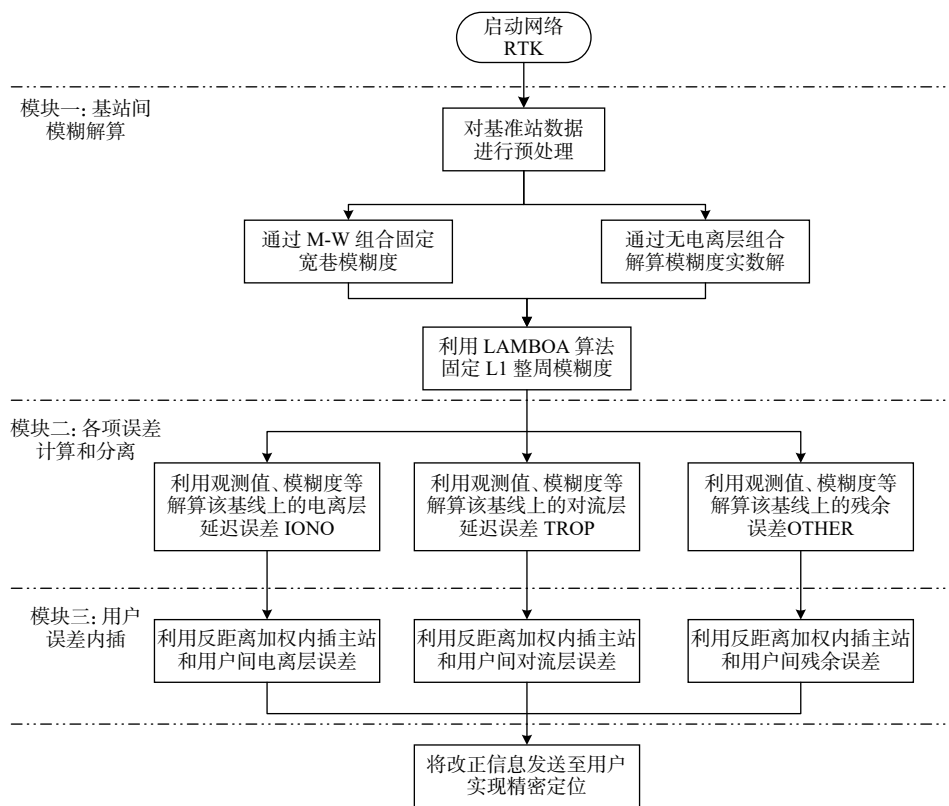


图 1 网络 RTK 数据处理流程图

Fig. 1 Network RTK data processing flow char

1.2 数据网格化优化技术

我国部分地区基准站网密度小,基准站组网技术存在缺陷,如少数地区不稳定或定位精度较差,导致用户服务量级较小等问题,拟采用数据网格化优化技术,在数据处理、数据分析等阶段实行高分辨率分区处理。并通过云平台授权管理用户的导航定位精度(米级/分米级/厘米级),实现对内有效地对基准站进行运维管理、对外高效地监管用户,开发智慧专题应用在地质灾害监测、桥梁监测、智慧农机等行业中,并形成一体化位置与导航服务和示范应用。

1.3 卫星导航地基增强信号播发技术

数字广播技术(CDRadio)用于卫星导航地基增强系统的建设,除了需要考虑差分数据传输过程中的时延与误码率等问题,更多的还需解决地基增强系统多个站点的联网问题,实现全国“一张网”的服务能力。此外,针对广播式播发差分数据带来的定位精度不均

匀、存在比例误差的问题,通常采用网格化处理来进行改善。这要求广播系统能有效支持多网格数据的同步传输和高效解析,以满足终端对低功耗、高可靠性的要求。

为此,在 CDRadio 数字广播技术的基础上,深入研究卫星导航增强数据的网格化播发技术和多频点广播信号的切换技术。该技术将某一区域划分网格,播发对应网格的卫星导航增强数据,再同手机切换信号基站原理类似,终端以接收信号强弱为判断指标,自动切换接收强信号频点。

2 系统特点

基于广播 RTK 边缘计算的北斗高精度地质灾害监测系统是以国家对地质灾害监测的标准和要求为依据、实时采集监测信息并传输到地灾监测中心进行分析与处理、具有高效实用、精准可靠、自动化程度

高的地质灾害监测系统。该系统可实现毫米级精准测量、实时远程监测;简单快速计算、整理海量数据;方便扩充其他数据采集终端;在线共享数据信息和及时预警,达到监测数据采集自动化、传输网络化、处理标准化、分析科学化。该系统基于微软的 NET 开发平台,利用 C++和 C#语言开发,应用面向对象的软件编程等理论与高新技术。系统中的广播 RTK 边缘计算技术、GNSS 数据处理算法、变形监测预报模型等最新技术具有自主知识产权,并集成 Internet 技术、LPWAN 技术、GPRS/CDMA 技术、数据库技术、计算机网络技术于一体,自动获取软、硬件监测数据信息,动态维持 GNSS 监测网。通过建立良好的系统信息交互平台,将系统形成的统计分析信息高速便捷地传递给用户,可有效提高用户系统管理、决策、应用能力;充分挖掘系统数据资源,提供实时预报服务,最大限度降低空间环境因素对实时高精度定位的影响;不仅提供全天候、全自动化、高精度变形监测服务,还提供了变形监测分析管理系统。方便用户自主接入基准站和监测站,对监测站变形数据进行实时和全天候全周期分析,统计监测点实时位移、位移速率、累计位移等,从多角度展示分析结果,对可能发生灾害的监测点进行实时预警,形成“一站式”地质灾害监测预警预报服务平台。

基于广播 RTK 边缘计算的北斗高精度地质灾害监测系统克服了传统地质灾害监测^[2](传感器类、声纳类、光波类、影像类、频谱类监测手段等)的不足,具有以下优势和特点:①结合了 GNSS 监测技术、FM 广播数据播发技术、LPWAN 通信技术,能实现大范围监测布网。②更加灵活,监测点位之间无须通视。③反应迅速,数据获取时间仅需几分钟。④定位准确,可直接提供三维坐标及其绝对或相对变化量,没有变形范围限制。⑤自动化程度高,实现了远程控制、监测、数据下载与共享,利于预警信息迅速发布。⑥可提供实时大气水汽含量并进行降雨预报,对地质灾害频发地区有很好的预警作用。

3 系统测试

3.1 系统功能测试

2020 年 6 月 1 日至 2020 年 6 月 30 日,对系统功能和技术指标进行了测试。测试内容包括功能可用性、性能指标及操作便捷性。旨在发现系统功能错误

或遗漏、数据结构或外部数据库访问错误、初始化和终止错误。测试方法包括错误推测法、边界值分析法、因果图法、等价类划分法等。系统界面操作简单明确,各项功能均能正常运行,性能指标满足系统设计要求,充分满足了用户的各项需要,可进一步进行推广应用。

3.2 数据传输稳定性测试

对 2020 年 3 月 20 日至 2020 年 6 月 1 日现场网络回传服务器的解算结果数据进行了分析,对系统的网络通信功能稳定性进行测试。选择测试站点 W001、W002、W003、W004 的数据参与了本次测试。其中,W001 站点位于监测边坡后侧稳定处,北侧有一处高压线输电塔,需着重分析其数据传输受高压电线的影响。测试结果表明,监测边坡 4 个测站的数据传输状态十分稳定,在测试期间从未出现数据丢失或中断现象,4 个点的回传结果中差分固定解比例分别为 99.52%、99.97%、99.99%、99.99%,即使是靠近高压电塔的 W001 点,差分固定解率也达到 99% 以上,满足实时动态监测的要求(表 1)。

表 1 监测点解算状态表			
Table 1 Solution state of the monitoring points			/%
监测点号	差分固定解	差分浮点解	单点定位解
W001	99.52	0.41	0.03
W002	99.97	0.02	0.01
W003	99.99	0.01	0.00
W004	99.99	0.01	0.00

由于变形监测工作环境的复杂性和不确定性,GNSS 信号容易受到强烈干扰,造成变形监测时间序列出现粗差,且变化波动范围较大。大规模粗差会导致无法准确反映变形体的实际变形,对其稳定性分析及评价甚至灾害预警应急都会带来不可忽视的影响,故对解算结果进行粗差探测十分必要。

3.3 解算结果精度分析

(1)粗差探测

测试采用经典粗差探测方法—— 3σ 法,结合最小二乘残差法得到解算结果坐标残差序列 R_n ,利用贝塞尔公式计算其标准差 σ ,如果解算结果存在大于 3σ 的残差,即: $|R_i| > 3\sigma, i=1,2,\cdots,n$,则被认为是粗差,置信水平为 99.7%。测试结果如图 2 所示。

可见,测试结果表明监测期内站点坐标在东西方向(E)、南北方向(N)和高程方向均存在毫米级位置偏移,不存在显著坐标变化。

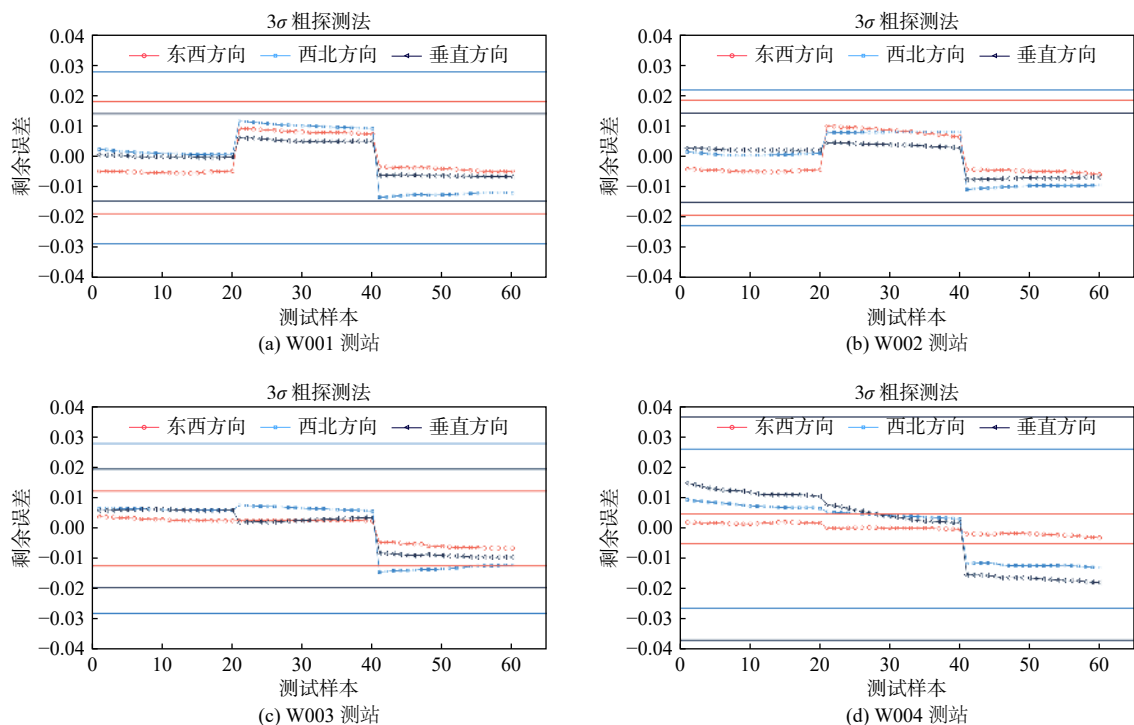


图 2 测站粗差探测结果
Fig. 2 Detection results of station gross error

(2)内符合精度

测试选取的监测点无基准坐标,故通过评价内符合精度,以估计的最似然估值为比对基准,反映解算坐标序列之间的离散程度,一般用标准差 σ 来度量。表 2 是测试期内 4 个监测点东西、南北和高程方向的标准差。

表 2 监测点标准差			
Table 2 Standard deviations of the monitoring points			
监测点号	东西方向	南北方向	高程方向
W001	0.006 1	0.009 4	0.004 8
W002	0.006 3	0.007 4	0.004 9
W003	0.004 1	0.009 3	0.006 5
W004	0.001 6	0.008 7	0.012 2

可见,标准差基本保持在毫米级,考虑监测点实际运动的情况,解算结果十分稳定。

在遵循软件工程基本原则的同时,充分考虑标准化、可扩展性、实用性、现实性、安全性、前瞻性等建设原则,开发的集设备监控、管理数据处理、信息交互、定位、空间环境监控于一体的北斗高精度地质灾害监测系统,能长时间稳定运行,满足功能性需求和非功能性需求在内的所有用户需要。

4 应用实例

4.1 研究实例概况

广西是地质灾害较为频发的地区之一。梧州市长洲区宝石园 8 号地块不稳定斜坡处于构造剥蚀-侵蚀丘陵地貌区,地层岩性处于碎屑岩与花岗岩交界地带,该不稳定斜坡位于梧州市区长洲区新闻路北侧,其中人工边坡坡高 8.1~63.0 m,坡宽 138.5 m,西部分 4 级放坡,下部 3 级 8.0~9.0 m,坡度 45°~52°,上部第 1 级 8.0~23 m,坡度 50°~60°,东部、中部产生滑坡后大致形成直线型边坡,坡度 48°~52°,坡脚滑坡堆积体高度 10.0~17.0 m,坡度 20°~40°;整个人工边坡坡面裸露,无防护措施;上部自然坡度 5°~10°,植被较发育,覆盖率达到 80% 以上,主要生长松树、灌木、杂草等,在坡脊位置架设了 2 座高压线电塔,其中最近 1 座距人工边坡坡脚 36.0 m,电塔基础采用独立基础,埋深 4.0~5.0 m;边坡主要物质成分由第四系坡积黏土、残积砂质黏性土及全风化、强风化岩组成;受降雨影响,人工边坡坡面岩土体经常出现剥坠落现象,2016 年在开挖、降雨等影响下该边坡出现明显变形,边坡坡面出现滑坡,体积约 5 850 m³,边坡坡顶出现 5 条主要卸荷裂缝,裂缝最宽达 0.4 m,大部分具下错现象,最大下错 0.5 m。目前该斜坡稳定性差,在强降

雨影响下有可能产生整体失稳,出现整体滑坡。监测试点位于小区北面山坡,坡面布设有 6 个 GNSS 表面位移监测设备(图 3)。GNSS 监测设备结构将多种器件集于一体,柱体内部有 GNSS 接收机、CDRadio 接收机、LORA 模块、锂电池和电源控制器;柱体外部有避雷针、北斗天线、CDRadio 天线、LORA 天线和太阳能板(图 4)。



图 3 边坡范围及监测设备布置情况
Fig. 3 Slope area and monitoring equipment layout



图 4 基合主设备结构及现场情况
Fig. 4 Structure and site condition of the main equipment

2020 年 5 月 1 日至 2020 年 11 月 17 日监测的水平位移及沉降结果如表 3、图 5 所示。

4.2 监测结果分析及建议

梧州宝石园北部边坡坡顶存在明显的裂缝,且土质松动,上部由碎土层覆盖,发生滑坡危险性较高。在此监测项目中,S001 号点位于坡顶后缘,处于整个

表 3 监测点变形监测结果

Table 3 The measurement results of the monitoring points

监测点号	水平位移				垂直位移	
	累计位移/ mm	平均水平 位移/mm	平均位移速率/ (mm·d ⁻¹)		累计沉降/ mm	累计沉降速率/ (mm·d ⁻¹)
	Δx	Δy	ΔHr	ΔHr/d	Δh	Δh/d
S001	2.27	2.59	3.44	0.02	3.28	0.02
S002	6.52	1.83	6.77	0.04	5.83	0.03
S003	4.58	6.14	7.66	0.04	9.85	0.05
S004	2.67	4.13	4.92	0.03	15.26	0.08
S005	3.23	1.08	3.41	0.03	12.57	0.14
S006	12.31	6.11	13.74	0.15	11.29	0.13

坡体中较为稳定的区域,S002、S003、S004、S005、S006 监测点依次沿坡顶自西向东排列,处于现有裂缝前端,所处位置较为松动,易发生滑坡甚至塌方危险。

2020 年 5 月的监测数据分析比较表明,整个坡体处于蠕变阶段,坡顶前缘有向外侧蠕动且下沉的趋势。S001 号点累计位移与解算误差值处于同一水平,可视该点几乎处于静止状态。S002、S003 监测点位水平方向坡体外沿移动约 7 mm,S004、S005 监测点位水平方向坡体外沿移动 4~5 mm,S006 号监测点垂直方向位移达 14 mm,且垂直方向均有明显下沉。整个坡体有向东南方向倾斜发育的趋势。

鉴于以上分析,建议加强现场巡查及坡体东南侧的灾情预防,预留应急缓冲区域,避免在坡脚危险区域停靠车辆、盖建住房,时刻关注该边坡的发育情况。

5 结论

(1)“基于广播 RTK 边缘计算的北斗高精度地质灾害监测系统”基于数字调频广播(CDRadio)RTK 边缘计算技术融合 GNSS 核心解析算法开发,具有自主知识产权,结构开放,提供全天候、全自动化、高精度变形监测及分析管理服务,满足功能性需求和非功能性需求在内的所有用户需要。

(2)“基于广播 RTK 边缘计算的北斗高精度地质灾害监测系统”能有效提高信息采集、传输、处理、分析、预报的准确性、可靠性,全面提高地质灾害监测预警预报管理能力,更好地为各级管理部门的决策和指挥抢险救灾行动提供科学依据。

(3)梧州宝石园北部不稳定斜坡坡体应用“基于广播 RTK 边缘计算的北斗高精度地质灾害监测系统”进行了示范监测,监测表明:整个坡体处于蠕变阶段,边坡顶部前沿有向外侧蠕动且下沉的趋势,整个坡体有向东南方向倾斜发育的趋势。

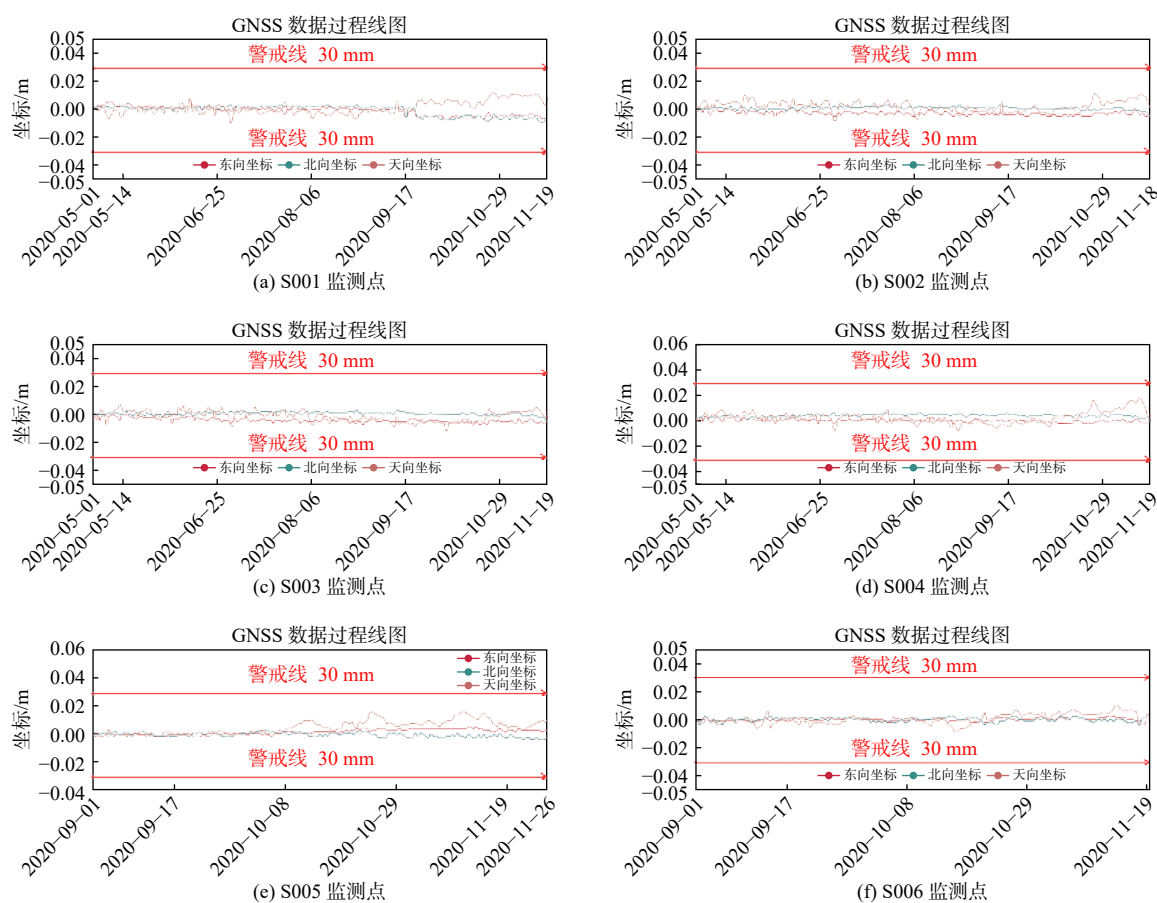


图 5 监测点水平位移曲线

Fig. 5 Horizontal displacement diagram of monitoring point

参考文献 (References) :

- [1] 尚小伟. GNSS多基站变形监测系统技术研究与应用分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2018. [SHANG Xiaowei. Technology research and application analysis of GNSS multi base-stations deformation monitoring system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 董颖, 朱晓冬, 李媛, 等. 我国地质灾害监测技术方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2002, 13(1): 105 - 107. [DONG Ying, ZHU Xiaodong, LI Yuan, et al. Technical methods of geological hazard monitoring in China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2002, 13(1): 105 - 107. (in Chinese)]
- [3] 韩子夜, 薛星桥. 地质灾害监测技术现状与发展趋势[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(3): 138 - 141. [HAN Ziyue, XUE Xingqiao. Status and development trend of monitoring technology for geological hazards[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2005, 16(3): 138 - 141. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 杨文韬. GPS动态变形监测的单历元数据处理方法研究与软件实现[D]. 长沙: 中南大学, 2007. [YANG Wentao. Research and software implementation of single epoch metadata processing method for GPS dynamic deformation monitoring[D]. Changsha: Central South University, 2007. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 吴悦, 曹修定, 胡景山. 应用于地质灾害监测的 μ C/OS-II系统[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(3): 130 - 133. [WU Yue, CAO Xiuding, HU Jingshan. Application of μ C/OS-II technology in the geological hazard monitoring[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008, 19(3): 130 - 133. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 徐文年. 基于CORS系统的变形监测方法研究与应用[D]. 沈阳: 东北大学, 2013. [XU Wennian. Methods research and application of deformation monitor based on CORS[D]. Shenyang: Northeastern University, 2013. (in Chinese with English abstract)]
- [7] OHNO H, NARUSE H, KIHARA M, et al. Industrial applications of the BOTDR optical fiber strain sensor[J]. Optical Fiber Technology, 2001, 7(1): 45 - 64.

- [8] CORSETTI M, FOSSATI F, MANUNTA M, et al. Advanced SBAS-DInSAR technique for controlling large civil infrastructures: an application to the genzano di Lucania dam[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2018, 18(7): E2371.
- [9] COOPER H M, ZHANG C Y, DAVIS S E, et al. Object-based correction of LiDAR DEMs using RTK-GPS data and machine learning modeling in the coastal Everglades[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2019, 112: 179 – 191.
- [10] HADDAD Karim, MUNOZ Patricio, GALLO Enrico, et al. Application of Internet of Things technology for sound monitoring during large scale outdoor events[C]// INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, 2019.
- [11] 朱永辉. 基于北斗卫星的地质灾害实时监测系统研究与应用[D]. 北京: 清华大学, 2010. [ZHU Yonghui. The real-time monitoring system for geological disasters based on compass satellite system[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 曹修定, 阮俊, 展建设, 等. 滑坡的远程实时监测控制与数据传输[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2002, 13(1): 61 – 65. [CAO Xiuding, RUAN Jun, ZHAN Jianshe, et al. Long distance real time monitoring and control of landslide and data transmission[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2002, 13(1): 61 – 65. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 曹庭泉. 基于深度学习的GNSS变形监测时间序列建模方法及应用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019. [CAO Tingquan. Time series modeling method and application research of GNSS deformation monitoring based on deep learning[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 张攀, 朱敦尧, 董红波. 北斗卫星导航系统在智慧城市建设中的应用探讨[J]. *全球定位系统*, 2013, 38(4): 71 – 74. [ZHANG Pan, ZHU Dunyao, DONG Hongbo. Discussion about the applications of BeiDou navigation satellite system in the construction of smart City[J]. *GNSS World of China*, 2013, 38(4): 71 – 74. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 董文, 潘建平, 阳振宇, 等. 高分二号卫星数据在地质灾害调查中的应用——以重庆万州区为例[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(1): 106 – 111. [DONG Wen, PAN Jianping, YANG Zhenyu, et al. Application of GF-2 satellite data in geological hazard survey: a case study in Wanzhou District of Chongqing City[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(1): 106 – 111. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 刘宇. 地质灾害实时监测与信息集成系统关键技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015. [LIU Yu. Study on the key technology of geological hazard real-time monitor and information management integration system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 石爱军, 马娟, 齐安文, 等. 物联网技术在突发地质灾害应急响应中的应用研究[J]. *水文地质工程地质*, 2014, 41(5): 148 – 152. [SHI Aijun, MA Juan, QI Anwen, et al. Research on application of the Internet of Things (IOT) platform of geological disaster emergency response[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2014, 41(5): 148 – 152. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 陈其针, 仲平, 张贤, 等. 构建中国自然灾害防灾减灾新体系[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(4): 1 – 4. [CHEN Qizhen, ZHONG Ping, ZHANG Xian, et al. Establishment of an innovative system of natural disaster prevention and mitigation in China[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(4): 1 – 4. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 刘晓茹. 配电自动化中通信系统的设计与评价方法的研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2009. [LIU Xiaoru. Study on communication system plan and evaluation method in the distribution automation system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张明霞