

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.01.008

联合北斗/GNSS 与 InSAR 技术监测高陡边坡形变的研究进展

何秀凤¹, 李 钢², 夏诸葛¹, 肖儒雅¹, 贾东振¹, 宋敏峰¹

(1. 河海大学地球科学与工程学院; 2. 水利部信息中心)

摘要: 概述了北斗/GNSS 与合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术的基本原理,重点回顾了二者 21 世纪以来的理论发展历程,深入分析了二者在联合监测变形领域的最新研究进展,总结了当前北斗/GNSS 与 InSAR 技术联合监测方法在高陡边坡工程形变监测与安全防护工作中面临的核心问题及潜在挑战,认为北斗/GNSS 与 InSAR 技术联合监测方法可实现厘米级精度与全域覆盖的统一,显著提升了高陡边坡变形监测能力,指出未来应在空天地一体化监测网络的基础上深化北斗与国产 SAR 卫星数据融合,同时发展面向高陡边坡监测的行业大模型。

关键词: 北斗卫星导航系统;全球卫星导航系统;雷达干涉测量技术;高陡边坡监测;变形监测;卫星大地测量

Research progress on integration of BDS/GNSS and InSAR for monitoring deformation of high-steep slopes

He Xiufeng¹, Li Gang², Xia Zhuge¹, Xiao Ruya¹, Jia Dongzhen¹, Song Minfeng¹

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University;

2. Information Center of the Ministry of Water Resources)

Abstract: The fundamental principles of Beidou navigation satellite system (BDS)/global navigation satellite system (GNSS) and interferometric synthetic aperture radar (InSAR) technology were outlined, with a focused review of their theoretical developments since the 21st Century. The latest research advances in their integrated application for deformation monitoring were analyzed in depth. Core issues and potential challenges currently faced by the combined BDS/GNSS and InSAR technology in monitoring engineering deformation and ensuring safety prevention for high-steep slopes were summarized. It is suggested that this integrated approach can achieve centimeter-level accuracy while enabling full-area coverage, significantly enhancing the capability for high-steep slope deformation monitoring. Furthermore, it is pointed out that future efforts should focus on deepening the integration of BDS and domestic SAR satellite data based on an integrated space-air-ground monitoring network, alongside the development of industry-specific large language models tailored for high-steep slope monitoring.

Key words: Beidou navigation satellite system; global navigation satellite system; interferometric synthetic aperture radar technology; high-steep slope monitoring; deformation monitoring; satellite geodesy

高陡边坡作为露天矿山、水利枢纽及交通路网等重大工程中的常见地质构造,其失稳引发的滑坡、崩塌等灾害严重威胁生命财产安全与基础设施可持续运营,一直受到工程界的广泛关注^[1]。随着我国“交通强国”战略推进与资源开发深入,高陡边坡工程规模与复杂性持续提升。此类边坡受岩体结构脆弱性、水文地质作用及工程扰动等多因素耦合影响,极易诱发滑坡、崩塌等突发性灾害^[2-3]。人工巡检及单一类型传感器布设等传统监测方法,存在数据离散性高、深部信息缺失及响应滞后等缺陷,难以捕捉高位危岩体的早期形变信号^[4]。因此,亟须引入新型空间大地测量技术和预警技术,发展多源协同、空天地一体化的智能监测体系,提升高陡边坡滑坡灾害防控能力。

北斗卫星导航系统(以下简称“北斗”)精密定位技术与合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术为高陡边坡形变监测与灾害防控提供了关键技术支撑,既可实现实时、精准的状态感知,也可依托大数据分析预测其

基金项目:江苏省基础研究计划项目(BK20251497);中央高校基本科研业务费专项资金项目(B250201054)

作者简介:何秀凤(1962—),女,教授,博士,主要从事 GNSS 卫星导航、InSAR 测量与地表面形变监测应用研究。E-mail:xfhe@hhu.edu.cn

通信作者:夏诸葛(1993—),男,讲师,博士,主要从事 InSAR 测量与地表面形变监测应用研究。E-mail:zhugexia@hhu.edu.cn

演化趋势,从而提升边坡安全保障能力。北斗是我国自主研发和建设的全球导航定位系统(GNSS),可以显著增强我国在高陡边坡安全监测等方面的预警能力^[5]。基于北斗播发的卫星导航信号,接收机在开阔区域无需互相通视即可获取高精度的三维绝对坐标信息,实现对目标的精确定位。然而,受到监测站点数量与分布的限制,北斗难以独立实现对高陡边坡中高位危岩体(如坡顶变形体)、隐蔽性滑坡体等区域的面状监测,仅能选取有限关键点进行站点布设,采取“以点代面”的策略进行监测。

InSAR 技术为一种干涉雷达遥感技术,利用相位干涉原理,通过处理多期合成孔径雷达(SAR)影像数据,可以实现对地表大尺度、毫米级微小形变的监测^[6],是复杂山区高陡边坡安全监测的有力工具。但 InSAR 技术也存在局限性,其无法直观地提供垂直或水平方向上的地面位移分量,只能反映卫星视线方向的形变分量。同时,因大气延迟效应和时空失相干等问题,导致 InSAR 数据处理中可能混入误差,掩盖或扭曲真实形变信号,从而影响对潜在边坡安全威胁的准确评估^[7]。

通过联合北斗/GNSS 与 InSAR 技术,构建起从点到面、从地面到空中的全方位、互补的高陡边坡一体化监控系统。该系统不仅能够实时捕捉高边坡的微小形变,还能精细描绘地形地貌,可以有效预测矿区、水利枢纽与交通路网等关键设施附近的高陡边坡潜在风险,并提升监测的准确性和可靠性^[8],可为高陡边坡安全监测、管理决策提供坚实的数据支持。

本文系统阐述北斗/GNSS 与 InSAR 技术等新型空间大地测量技术在高陡边坡监测的应用现状和前景,论证了新型空间大地测量技术赋能高陡边坡形变灾害监测与防控的重要性和必要性,有助于实现高陡边坡的信息化、智能化监测,以期更好地应对我国“交通强国”战略推进所带来的高陡边坡重大工程挑战。

1 北斗/GNSS 与 InSAR 技术的原理

北斗/GNSS 与 InSAR 技术的各项指标见表 1。

表 1 北斗/GNSS 与 InSAR 技术指标
Table 1 Indicators of BDS/GNSS and InSAR techniques

技术	观测量	测量范围	测量精度	监测时效性
北斗/GNSS	水平、垂直向(三维)	点或局部区域(离散点)	毫米级	实时或准实时监测(采样率可达 200 Hz)
InSAR	视线向(一维)	大范围(空间连续、面状覆盖,可达数千公里)	厘米级至毫米级	有一定的时间延迟(数天至数十天,取决于数据获取和处理周期)
技术	获取变形量	垂直方向形变敏感度	现场作业	成本
北斗/GNSS	绝对量和相对量	敏感	需布设设备	设备初始投资较高(高精度接收机),但长期连续监测有效减少单位时间平均成本
InSAR	相对量	敏感	无需	SAR 数据获取与处理成本较高,但单次监测范围广,有效减少单位面积平均成本

1.1 北斗/GNSS 基本原理

北斗/GNSS 通过提供定位与短报文通信等功能,显著提升了高陡边坡安全监测管理的智能化与精准化水平,已成为保障我国重大工程边坡安全的重要技术基础。北斗/GNSS 高精度定位技术,包括精密单点定位(PPP)、静态差分技术和实时动态载波相位差分(RTK),已被广泛应用于各种监测领域^[9]。PPP 技术作为一种独立的定位技术,在绝对定位方面具备一定价值,但其在误差校正能力和非模型化误差的处理方面仍存在局限性。相比之下,静态差分技术通过消除观测数据中的共有误差,实现了高精度的相对位置测量^[10],在矿山、水利工程等设施微小形变的监测中得到了广泛应用。然而,静态差分技术在实时性方面的不足限制了其在快速形变监测中的应用。RTK 技术因能够实时监控快速或突变形变,在精密工程测量和安全性监测中变得日益重要。静态差分技术与 RTK 技术采用同样的双差观测方程,通过该方程可以计算接收机到基站的相对位置,并可以通过两次差分,消除或削弱具有高度空间相关性的误差,如卫星和接收机的钟差、电离层和对流层延迟误差等。

北斗/GNSS 在高陡边坡灾害监测领域还具有其他技术优势,例如,在遥感探测领域,可依托北斗/GNSS 发射的电磁波信号开展遥感监测。依据观测平台的差异,GNSS 遥感可划分为地基、空基与天基 3 种类型,能够针对性地满足不同领域的监测需求。北斗/GNSS 信号属于穿透能力较强的 L 波段信号,这一特性赋予其低成本、全天候连续监测的显著优势,不仅在气象水文、土壤湿度、水环境监测等领域展现出广阔的应用潜

力,更能为揭示高陡边坡形变与环境因子变化的耦合作用机制,提供多维度、高精度的数据支撑。此外,北斗独有的短报文通信功能,是其他 GNSS 不具备的核心优势^[11],该功能可突破地面通信网络限制,在偏远无信号区域或恶劣极端环境下保障数据与指令的稳定传输,对于高陡边坡灾害监测中水文数据回传、水雨情信息实时上报、洪涝诱发边坡灾害预警及应急响应指令下达等关键环节,具有不可替代的实用价值^[12-13]。

1.2 InSAR 技术基本原理

InSAR 技术最初应用在地形图绘制和获取地表三维数据^[14],随后被拓展至地表形变监测、工程设施监测和灾害监测预警等多个领域,以满足不同应用场景的需求。InSAR 技术通过将同一区域不同时间获取的多个复数图像进行共轭相乘获取相位差信息。在剔除地形相位干扰后,InSAR 技术可实现对地表形变的有效捕捉,这一改进方法被命名为差分合成孔径雷达干涉测量技术(D-InSAR),并于 1992 年兰德斯地震期间成功应用于地表形变的监测工作^[15]。然而,失相干噪声与大气延迟等误差源的存在,在一定程度上制约了 D-InSAR 技术的监测精度^[16]。

为克服 D-InSAR 技术的局限性,提升监测精度,学者们开发出了多时相 InSAR 技术(MT-InSAR),也称时序 InSAR 技术(TS-InSAR),通过分析差分干涉图像序列,识别高相干性稳定散射点,并用最小二乘法重建形变时间序列,精度通常为厘米至毫米级^[17],其主要技术发展进程如图 1 所示。依据依赖的主影像数量,MT-InSAR 技术主要分为两大类:①单一主影像的永久散射体技术(PSI)^[18],特别适用于城市地区,对于基础设施和裸露岩石等具有强烈反射性的物体建模效果显著;②基于多主影像的小基线集技术(SBAS)^[19],更适合于对分布式目标进行建模和分析,被广泛用于研究地源机制和大型断裂带等广泛的地表探测。但是,SBAS-InSAR 技术在处理复杂场景和精细监控目标时,对变形细节的捕捉具有局限性。为了解决这一问题,基于全分辨率的 SBAS 技术应运而生,即分布式散射体(DS-InSAR)技术,是 InSAR 技术领域的研究热点之一^[20-21]。

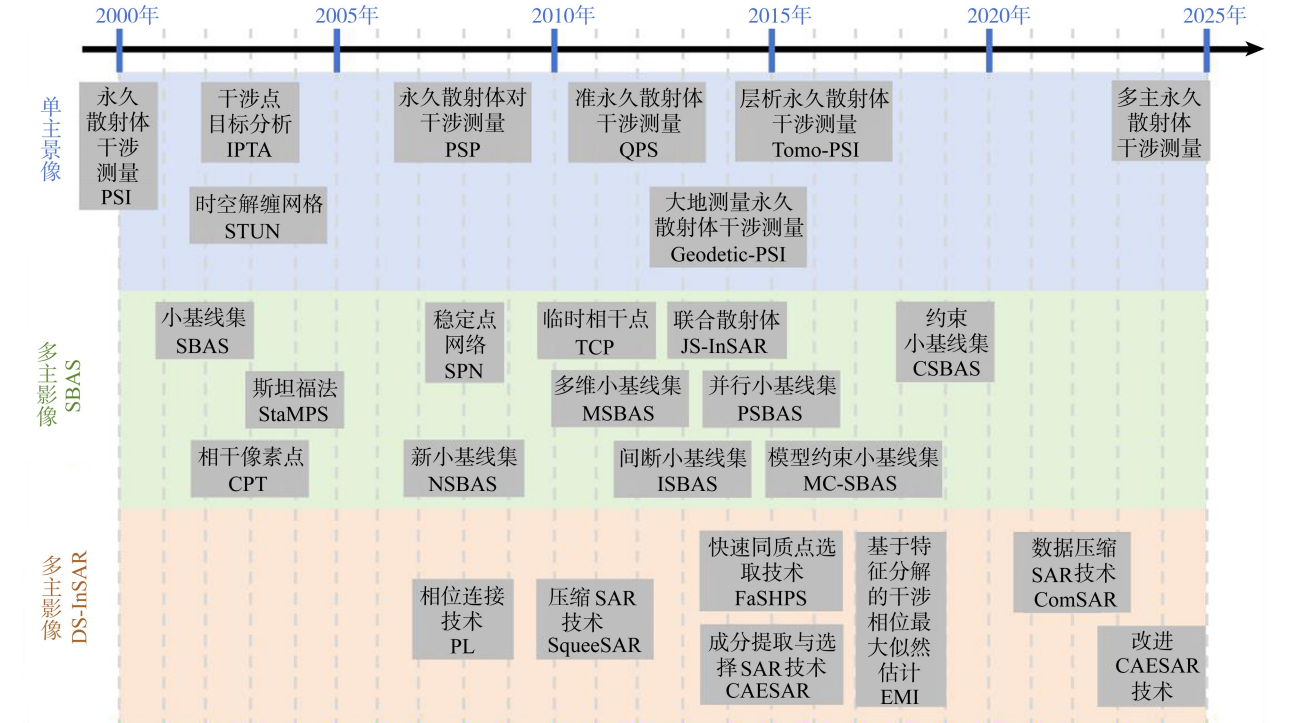


图 1 MT-InSAR 技术的发展进程

Fig. 1 Development process of MT-InSAR technique

1.3 北斗/GNSS 与 InSAR 技术联合监测方法

北斗/GNSS 与 InSAR 技术联合监测方法是当前地表形变监测领域的重要研究方向,二者在时空分辨率、观测维度和误差特性方面具有显著的互补性。北斗/GNSS 能够提供高时间分辨率、绝对三维形变信息,尤其擅长捕捉动态和突变形变,但其空间分辨率受限于接收机布设密度,难以实现面状连续监测。InSAR 技术则以高空间分辨率、大范围覆盖能力见长,能够获取地表连续的形变场,但其观测结果受限于雷达视线,仅

为形变的一维投影,且易受大气延迟、失相干等因素影响,时间分辨率相对较低。因此,两种技术的有机结合,可实现从“点”到“面”、从“相对”到“绝对”、从“一维”到“三维”的形变监测能力提升。

北斗/GNSS 与 InSAR 技术联合监测可在以下方面发挥关键作用:①北斗/GNSS 可作为外部验证数据,用于评估 InSAR 形变结果的精度和可靠性,尤其在滑坡、地震等同震或缓变形变场中,北斗/GNSS 提供的高精度点位形变信息是验证 InSAR 结果的重要依据;②北斗/GNSS 数据还可用于辅助 InSAR 相位解缠,通过提供绝对相位参考或约束解缠路径,阻断误差在相位梯度剧变(如高陡边坡、采空区等)区域级联,改善相位解缠效果,提升形变序列的鲁棒性与效率^[22-23];③北斗/GNSS 观测的天顶对流层延迟参数也可用于改正 InSAR 干涉图中的大气相位延迟,提升 InSAR 形变监测的准确性。例如,通过插值稀疏北斗/GNSS 站点数据或结合气象模型,可生成高分辨率的大气延迟改正场,显著抑制 InSAR 中的大气误差^[24-25];④北斗/GNSS 与 InSAR 技术联合监测能够实现地表三维形变场的重构。由于 InSAR 仅提供卫星视线方向的形变,而北斗/GNSS 可提供东、北、垂直 3 个方向的高精度形变信息,通过建立联合观测模型^[26-27],如基于加权最小二乘、方差分量估计、智能优化算法等模型,可将升、降轨 InSAR 面数据与北斗/GNSS 点数据融合,反演得到更真实、更全面的三维形变场,增强对形变机制的解释能力。

2 典型高陡边坡联合监测应用现状

2.1 矿区边坡灾害监测预警

北斗/GNSS 与 InSAR 技术联合监测方法应用于采矿高陡边坡形变的精准监测,已成为当前我国的研究热点问题之一^[28]。21 世纪初以来,我国露天矿山开采深度持续增大,由“采场”模式快速向“深坑”模式演进。长期高强度开采导致边坡稳定性问题日益凸显,如抚顺西露天矿、鞍千铁矿排土场、弓长岭铁矿、紫金铜矿等典型高陡边坡,其高度已突破 400 m,坡脚至坡顶的垂直落差普遍超过百米^[29]。在此背景下,传统的单点全站仪或水准测量方法,已难以满足“大范围、高精度、全天候”的现代监测需求。

北斗/GNSS 与 InSAR 技术联合监测方法可有效应对矿区高陡边坡监测的挑战。一方面,时序 InSAR 技术可在矿区大范围圈定高陡边坡不稳定区域,为北斗/GNSS 预警提供先验信息^[30-31];另一方面,北斗/GNSS 与 InSAR 技术联合监测方法可有效提升形变监测精度与效果^[29-34]。北斗/GNSS 与 InSAR 技术联合监测方法在我国露天矿山防灾减灾中具有显著的实践应用效果:自 2017 年以来,辽宁、福建、西藏等省(区)依托该联合监测技术,累计发布红色预警 30 余次,成功避让滑坡险情,避免经济损失超过 10 亿元^[29]。2023 年,应急管理部正式将“北斗/GNSS+InSAR 技术”纳入《露天矿山重大灾害防治推荐技术目录》,标志着该技术组合成功实现了从科研试验向标准化、规模化工程应用的跨越。北斗/GNSS 与 InSAR 技术联合监测方法可在高陡边坡灾害监测中构建起“大范围筛查—重点区域加密—险情实时预警”的全链条监测预警体系,有效助力防灾减灾从“被动应对”转向“主动防控”,为矿山高陡边坡风险区的国土空间规划、工程安全运维与应急响应提供有力支撑。

2.2 库区坝体与边坡灾害监测预警

库区高陡边坡失稳具有极高的破坏性,可能导致巨大的人员伤亡、经济损失、基础设施破坏以及环境恶化等一系列问题,尤其是在库区大坝与河流、湖泊沿岸等关键工程设施附近,可能影响设施正常运转,导致工程安全问题并诱发地质灾害。例如,1963 年意大利维昂特水库曾发生灾难性的高陡边坡坍塌事件,质量约 1.5 亿 t 的泥石冲入水库,引发等量水体瞬间溃泻,造成下游 5 个村庄被毁、超过 4 000 人遇难^[35]。因此,对库区坝体的安全监测具有重要的现实意义与工程价值。北斗/GNSS 与 InSAR 技术联合监测方法在时效性、高效性与精确性等核心维度上,为库区坝体形变监测提供了全新的技术路径与应用可能。

有效的库区高陡边坡预警系统(early warning system, EWS)需要具备足够的区域覆盖能力、快速的时间采样能力、足够的测量精度以及性价比^[36]。传统的边坡监测技术大多采用原位监测方式,受限于人力和时间,难以实现实时性、持续性和广域覆盖,尤其在偏远或地形崎岖地区实施具有挑战性^[37]。InSAR 技术可以提供广域库区高陡边坡检测、监测和风险评估,确定重点高陡边坡体;而在重点目标滑坡体上,北斗/GNSS 监测设备可实时监控边坡位移和变形。北斗/GNSS 与 InSAR 技术联合监测方法可以在不同尺度、不同维度、不同规模上精确捕捉不稳定高陡边坡的微小形变,增强灾害预警和应急管理的能力。例如,Zhou 等^[38]基于 GNSS 与 InSAR 联合框架,将异质集成机器学习与 MT-InSAR 形变速率耦合,构建“大范围筛查—重点

区域加密—险情实时预警”全链条体系,动态修正传统边坡编目易犯的高估/低估难题,实现厘米级形变监测和滑坡易发性快速更新。

北斗/GNSS 与 InSAR 技术联合监测方法在小浪底水库、板桥水库、龙羊峡水库等重要工程设施的稳定性监测中发挥出重要作用。例如,Xiao 等^[39]通过结合北斗/GNSS 与多波段 SAR 数据追溯历史形变、识别潜在库区安全隐患,并成功应用于南水北调东线工程中的双王城水库,实现了对长距离调水工程中大坝形变的高精度、空间连续监测,验证了联合监测技术在重大基础设施稳定性评估与安全预警中的有效性;Dai 等^[40]通过北斗/GNSS 与时序 InSAR 技术监测三峡大坝坝体形变与稳定性,并揭示了与降雨、库水位和工程扰动等因素相关的地表沉降现象,为大坝安全管理提供了数据支持。综上,北斗/GNSS 与 InSAR 技术联合监测方法不仅提高了监测的效率和精度,而且其可行性和有效性也经过了实践检验与应用验证,可以为库区高陡边坡的监测和风险控制提供一种精确、高效、实时的解决方案。

2.3 交通工程边坡灾害监测预警

公路、铁路等交通工程高陡边坡的稳定性直接关系重大基础设施安全,其灾害防治亟须兼顾大范围覆盖与高精度监测的技术手段。联合北斗/GNSS 与 InSAR 技术,可凭借其时空互补特性和不同维度破解这一难题。

北斗/GNSS 通过地面接收机连续追踪卫星信号,可提供边坡表面离散点位的实时三维位移信息,时间分辨率优异但空间覆盖密度受限。InSAR 技术利用雷达卫星影像的相位差异,具备广域地表厘米级至毫米级形变监测能力,尤其对视线方向微小位移极其敏感,可用于监测识别交通工程高陡边坡坍塌前可能出现的微小形变。例如,Xia 等^[41]在梅龙高速高填方边坡的研究中,成功利用时序 InSAR 技术捕捉到了高速边坡失稳前数周的预滑移信号,雷达视线方向形变速率可达 18.8 mm/a;Liu 等^[42]通过改进的时序 InSAR 技术,精准识别出德钦县 317 处活动性滑坡,其中 81.4%为流动型,这些高陡边坡多分布在海拔 4 000 m 以上的高山区域,对交通工程和部分城镇安全构成重大威胁。

北斗/GNSS 与 InSAR 技术联合监测方法的可靠性与预警价值,亦可通过典型工程应用案例得到充分验证:在昌赣高铁边坡监测项目中,Zhou 等^[43]融合时序 InSAR 与北斗 RTK 监测数据,构建起“大范围筛查—高精度加密—多源耦合预警”的协同监测体系,该体系与 InSAR 监测结果的均方根误差不超过 7.1 mm,显著提升了监测数据的可靠性;在罗马尼亚布加勒斯特地铁建设监测中,Gheorghe 等^[44]采用 InSAR 与 GNSS 协同监测技术,成功捕捉到自 2015 年 11 月起出现的异常加速沉降现象,合理推断其可能由地铁施工影响;在技术融合方法层面,Qiu 等^[45]提出一种时空滤波融合算法,有效破解了北斗/GNSS 与 InSAR 数据融合过程中,因空间矩阵病态性导致的监测精度偏低、数据波动较大等技术瓶颈,其在空间域与时间域的综合性能均显著优于传统融合方法。

综上所述,北斗/GNSS 与 InSAR 技术的深度协同,通过整合卫星遥感的大范围筛查优势与地面定位的高精度、高时效特性,并结合地质、气象等多源参数,已发展形成一套成熟的“面状筛查—点状加密—机制解析—阈值预警”交通工程高陡边坡灾害一体化监测预警技术体系。该体系不仅能高精度识别潜在隐患,更能捕捉灾害前兆信息并解析致灾机理,为重大交通基础设施的边坡安全提供了从早期识别到精准预警的全流程技术支撑。

3 技术挑战与局限

在复杂监测场景中实现北斗/GNSS 高精度定位面临着一系列挑战,主要包括周跳的探测与修正、粗差处理、整周模糊度固定和多路径效应的抑制与消除。当处在较为复杂的观测环境中时,北斗/GNSS 数据中可能包含多种异常值和显著的多路径效应以及非模型化误差,为高陡边坡形变监测带来挑战。北斗/GNSS 的现代化、北斗的创新星座布局以及六频信号的加入,使得对多系统多频信号环境下周跳的检测与修复理论成为研究新热点。北斗/GNSS 周跳是因卫星信号被遮挡或受干扰等原因而发生的载波相位跟踪中断,可能导致高精度定位所依赖的整周模糊度参数发生跳变,从而使定位结果从厘米级退化至米级,并显著增加数据处理的复杂度。多路径误差是由信号在到达接收机前受到周围环境物体反射或衍射而产生的,会导致信号的相位和幅度发生变化,理论上这种误差相当显著,目前普遍通过硬件、软件方式进行修正。近年来机器学习也开始应用于多路径误差检测领域,且具有独特优势,但当多路径效应较弱时,机器学习算法可能会误判

并过度削弱相位数据,因此机器学习算法的可靠性与适宜性需要进一步研究。此外,快速而精确地固定整周模糊度是北斗在高精度形变监测中的关键^[46]。北斗/GNSS 多频信号技术,尤其是长波组合观测值的生成在复杂环境中展现出应用潜力,为整周模糊度的快速固定提供了创新解决方案。尽管如此,在狭窄巷道中实现模糊度的高效和精确固定^[47],仍是研究中需克服的难题。

InSAR 技术在实际应用中也受观测环境复杂性与低相干性问题的制约,易引发信号相位失真及衰减误差,进而影响监测结果的准确性与可靠性。与此同时,在数据处理与干涉影像解析过程中,大气效应的影响必须予以考虑并妥善处理。当前针对大气效应的改正策略主要分为两大类:一类是借助外部数据源或气象模型直接对干涉图进行改正,以剔除大气相位成分^[24-25];另一类则通过分析干涉图中大气误差的分布特征,构建相应模型进行定量估算。相位解缠是时序 InSAR 获取高精度形变信息的关键步骤,其精度和稳健性对结果至关重要^[48]。在实际应用中,高陡边坡常处于相干散射体稀疏区域,易因相位连续性假设失效引发相位解缠错误。为提升解缠精度与稳健性,可通过优化解缠空间网络的弧段质量及密度实现这一目标^[49]。尤其在高陡边坡工程的相位解缠过程中,往往需面对低相干区域与高噪声环境的双重挑战,因此需结合不同高陡边坡及工程建筑物的结构特征,采用适配的优化方法,以保障解缠结果的精度与稳健性。

北斗/GNSS 与 InSAR 技术联合监测方法同样面临诸多技术挑战:①异源观测数据间最优权比的确定尚缺乏统一理论框架,直接影响联合平差的精度与稳健性;②大气延迟误差与多路径效应在两种技术中的作用机制存在差异,其协同改正与抑制技术仍有待完善;③随着北斗/GNSS 与 InSAR 技术的持续发展,有效观测数据呈快速增长态势,对数据的获取、存储及处理能力提出了更高要求。其中,如何实现大数据的高效、自动化处理与融合,已成为当前研究的核心重点。基于云计算的分布式存储体系有望成为解决上述数据存储与处理难题的有效途径。在数据处理算法层面,国内外学者已开展系列探索,提出并行化、分布式等高性能计算手段,以及压缩求解、增量更新等高效算法,为北斗/GNSS 与 InSAR 大数据的快速协同处理提供了可行思路。但需注意的是,现有算法性能与计算资源配置仍需进一步优化提升。联合监测技术的发展需在理论算法、存储设备及计算硬件等多维度持续深化研究,具体包括优化数据聚合、压缩及并行处理策略,研发高效时序估计新算法,构建面向异构数据融合的新模型等。未来,随着多源遥感数据的深度集成、人工智能技术的融合应用以及云计算平台的支撑赋能,北斗/GNSS 与干涉测量联合监测技术将迈入更高效、更可靠的应用新阶段,并在智慧城市建设、重大工程安全监测、地质灾害预警等关键领域发挥更为重要的作用。

4 未来应用与展望

近年来北斗/GNSS 与 InSAR 技术为推进高陡边坡工程安全与防控提供了强大的感知能力,已在矿山高陡边坡监测、水电工程库区边坡监测、交通工程边坡监测、地质灾害隐患点稳定性监测等领域取得了众多成功案例。

4.1 强化“空天地一体化”高陡边坡监测感知网络

《加快建设交通强国五年行动计划(2023—2027 年)》明确提出,要构建现代工程建设管理体系,提升工程安全管理水平,强化重大基础设施安全保障体系建设。在矿山、水利以及交通等关键边坡工程领域,传统原位监测或光学卫星在暴雨、雾霾等复杂气象条件下,对高陡边坡变形和地质灾害隐患的识别能力会受到严重影响,进而影响预警系统的及时性和应急响应的效率。因此,发展高陡边坡监测与防控专用 SAR 卫星,以及扩展相关观测体系显得尤为关键。在我国商业航天快速发展和相关行业多元需求的推动下,越来越多的专用卫星将在不久的将来发射升空,为我国提供高分辨率、高频次的卫星数据。同时,需结合已有对地观测卫星体系,加入来自地基和空基的传感器,如北斗/GNSS、InSAR、热红外相机、激光雷达、无人机平台等,研究如何准确、高效地融合多平台多源异质数据,提升交通工程高陡边坡、矿山高陡边坡、水电工程库区高陡边坡等全要素智能感知能力。

4.2 加强北斗与国产化 SAR 卫星数据的高陡边坡融合应用

深化北斗卫星导航系统与国产高分辨率 SAR 卫星数据的融合应用,是构建自主可控、高时效性高陡边坡监测预警体系的核心方向。北斗凭借其全球覆盖、高精度实时定位及独有的短报文通信能力,为高陡边坡关键位置提供毫米级位移监测基准,并在无网络区域实现监测数据实时回传与预警指令可靠下发,彻底打通预警链路。同时,国产 SAR 卫星在高陡边坡监测中的适用性呈现清晰的层次结构,其核心在于波段特性与

系统设计的差异(表 2)。L 波段的 SAR 卫星凭借其强大的穿透性、对缓慢形变的极高敏感性以及多星短重访优势,成为在植被覆盖区进行大范围、长时序毫米级形变监测与隐患普查的最优且最可靠选择。C 波段卫星群则在分辨率、重访周期与监测灵敏度上取得了最佳平衡,其亚米级分辨率和天级重访能力使其成为对重点区域进行精细化刻画与快速形变过程应急监测的高效互补平台。X 波段的 SAR 卫星虽因其较弱的穿透性和对几何畸变的敏感性限制了其在茂密植被区的应用,但对于某些特定指标场景下的高陡边坡监测(高分辨率、微变形变识别等)具有无可替代的价值。

表 2 典型国产干涉 SAR 卫星参数

Table 2 Parameters of typical domestic Chinese interferometric SAR satellites

卫星名称	波段	重访周期	空间分辨率(最高)/m	主要工作模式	监测特点
陆探一号	L	单星 8 d/双星 4 d	3	条带、推扫等多种模式	对植被覆盖区穿透性强、相干性高,但对形变敏感性略低于 C/X 波段卫星
涪城一号	C	单星 11 d/星座组合可达 2~3 d	小于 1	聚束、条带、扫描	植被穿透性与相干性较高,综合性能强
高景二号	X	组网后可达小时级	0.5	条带、(高分辨率)聚束等	高分辨率,易受失相干影响,对形变敏感性高
宏图一号(女娲星座)	X	组网后可达小时级	小于 0.5	分布式干涉、车轮编队	

优化高陡边坡观测体系的关键在于多源协同,通过北斗高精度三维形变监测结果与国产 SAR 卫星的广域面状形变信息,构建一个以 L 波段进行宏观筛查,引导 C/X 波段实施高频详查的从宏观到微观的多层次立体化监测网络,形成点面结合、空天地一体的智能感知网络。这不仅保障了核心形变信息获取的连续性与安全性,摆脱对外依赖,更能通过星座组网实现按需定制观测(如高频次监测、应急响应),显著提升广域隐患筛查与局部变形精细捕捉的时效性和灵活性。结合先进数据处理与智能解译模型,将实现对高陡边坡从毫米级位移捕捉、大范围高陡边坡区域的三维形变场构建到灾害演化智能分析的全链条防控,提升异常识别的空间连续性与精度稳定性,为国家重大基础设施安全提供更坚实、自主的科技支撑。

4.3 深度学习与行业大模型助力高陡边坡监测与防控体系

高陡边坡灾害防控亟须高精度、实时化与可溯源的监测预警手段。将深度学习模型融入北斗/GNSS 与 InSAR 技术联合监测,可形成强大的智能化解决方案。该方案的核心在于协同发挥 InSAR(大范围、周期性形变探测)与 GNSS(点位高精度、高时间分辨率监测)的优势。通过 InSAR 广域筛查锁定隐患区,再利用 GNSS 对关键点位进行持续精准监测与验证,构建全面的形变场信息。相关实践^[50]表明,集成“InSAR 广域监测—GNSS 精准验证—深度学习模型智能预测”的技术框架成效显著。深度学习模型可深度挖掘海量多源监测数据,精准捕捉复杂形变规律,实现灾害的超前预测与预警;同时,通过可解释性分析揭示降雨、水位变动等关键触发因子,使预警具备可溯源性。展望未来,构建面向高陡边坡监测的垂直行业大模型(如高陡边坡智能监测大模型)是重要发展方向。此类大模型通过对海量历史监测数据与灾害案例的预训练,具备更强的泛化能力与知识迁移能力,有望实现跨区域、多场景监测预警能力的快速部署及形变识别、预测、溯源、风险评估一体化的多任务协同,为决策提供更智能的技术支撑^[51-52]。将北斗/GNSS、InSAR 技术与行业大模型深度融合,可以驱动高陡边坡监测防控向全域感知、智能预警、知识驱动的更高水平跃升,为国家重大工程安全提供更坚实的保障。

参考文献:

[1] 徐卫亚,陈世壮,张贵科,等. 基于 PSO-LSSVM-BP 模型的高边坡力学参数反分析及稳定性评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(5): 52-59. (Xu Weiya, Chen Shizhuang, Zhang Guike, et al. Inverse analysis of mechanical parameters of high slope based on PSO-LSSVM-BP model and stability evaluation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(5): 52-59. (in Chinese))

[2] 徐峥辉,王伟,宋月,等. 粤港澳大湾区并发复合灾害敏感性评估[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(4): 99-107. (Xu Zhenghui, Wang Wei, Song Yue, et al. Sensitivity assessment of parallel complex disaster in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(4): 99-107. (in Chinese))

[3] 王伟,丁聪,刘世藩,等. 基于移动最小二乘法的阶跃型滑坡预警曲面模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53

- (1):95-102. (Wang Wei,Ding Cong,Liu Shifan,et al. Stepwise landslide warning surface model with moving least squares[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(1):95-102. (in Chinese))
- [4] 程强,董秀军,余建华,等. 典型高陡边坡高位地质灾害调查及评估[J]. 工程地质学报,2017,25(增刊1):289-294. (Cheng Qiang,Dong Xiujun,Yu Jianhua, et al. High position geological disaster investigation and evaluation of typical high-steep slope [J]. Journal of Engineering Geology,2017,25(Sup1):289-294. (in Chinese))
- [5] 徐一剑. 我国沿海城市应对气候变化的发展战略[J]. 气候变化研究进展,2020,16(1):88-98. (Xu Yijian. Development strategy of China's coastal cities for addressing climate change[J]. Climate Change Research,2020,16(1):88-98. (in Chinese))
- [6] 周佰铨,翟盘茂. 未来的极端天气气候与水文事件预估及其应对[J]. 气象,2023,49(3):257-266. (Zhou Baiquan,Zhai Panmao. The future projections of extreme weather,climate and water events and strategic responses[J]. Meteorological Monthly,2023,49(3):257-266. (in Chinese))
- [7] 李泽红,董锁成,石广义. 关于制定“‘丝绸之路经济带’重大工程建设与安全科技支撑计划”的思考[J]. 中国科学院院刊,2015,30(1):37-45. (Li Zehong,Dong Suocheng,Shi Guangyi. Science and technology supporting program for key projects construction and safety of silk road economic belt[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2015,30(1):37-45. (in Chinese))
- [8] 朱建军,李志伟,胡俊. InSAR 变形监测方法与研究进展[J]. 测绘学报,2017,46(10):1717-1733. (Zhu Jianjun,Li Zhiwei,Hu Jun. Research progress and methods of InSAR for deformation monitoring[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2017,46(10):1717-1733. (in Chinese))
- [9] Zumbege J F,Heflin M B,Jefferson D C,et al. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks[J]. Journal of Geophysical Research:Solid Earth,1997,102(B3):5005-5017.
- [10] 段举举,沈云中. GPS/GLONASS 组合静态相位相对定位算法[J]. 测绘学报,2012,41(6):825-830. (Duan Juju,Shen Yunzhong. An algorithm of combined GPS/GLONASS static relative positioning[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2012,41(6):825-830. (in Chinese))
- [11] Yang Yuanxi,Liu Li,Li Jinlong,et al. Featured services and performance of BDS-3[J]. Science Bulletin,2021,66(20):2135-2143.
- [12] 张同伟,李凌瑛. 基于北斗系统的地质灾害监测系统建设[J]. 电气技术,2021,22(1):99-103. (Zhang Tongwei,Li Lingying. Construction of geological disaster monitoring system based on Beidou system[J]. Electrical Engineering,2021,22(1):99-103. (in Chinese))
- [13] 李曦亭,王磊之,商守卫,等. 流域、区域和城镇防洪工程工况与调度变化的洪涝互馈效应研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(2):12-18. (Li Xiting,Wang Leizhi,Shang Shouwei, et al. Research on mute feed effect of flood and waterlogging under change of working condition and dispatching of flood control project in basin,sub-basin and urban[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(2):12-18. (in Chinese))
- [14] Bamler R,Hartl P. Synthetic aperture radar interferometry[J]. Inverse Problems,1998,14(4):R1-R54.
- [15] Massonnet D,Rossi M,Carmona C,et al. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry[J]. Nature,1993,364(6433):138-142.
- [16] 朱建军,杨泽发,李志伟. InSAR 矿区地表三维形变监测与预计研究进展[J]. 测绘学报,2019,48(2):135-144. (Zhu Jianjun,Yang Zefa,Li Zhiwei. Recent progress in retrieving and predicting mining-induced 3D displacements using InSAR[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2019,48(2):135-144. (in Chinese))
- [17] 何秀凤,高壮,肖儒雅,等. InSAR 与北斗/GNSS 综合方法监测地表形变研究现状与展望[J]. 测绘学报,2022,51(7):1338-1355. (He Xiufeng,Gao Zhuang,Xiao Ruya,et al. Application and prospect of the integration of InSAR and BDS/GNSS for land surface deformation monitoring[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2022,51(7):1338-1355. (in Chinese))
- [18] Ferretti A,Prati C,Rocca F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2000,38(5):2202-2212.
- [19] Berardino P,Fornaro G,Lanari R,et al. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2002,40(11):2375-2383.
- [20] Ferretti A,Fumagalli A,Novali F, et al. A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2011,49(9):3460-3470.
- [21] Minh D H T,Tebaldini S. Interferometric phase linking:algorithm,application,and perspective[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine,2023,11(3):46-62.

- [22] 罗海滨,何秀凤. GPS 控制点辅助 InSAR 相位解缠算法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2017,42(5):630-636. (Luo Haibin,He Xiufeng. InSAR phase unwrapping algorithms with the aid of GPS control points[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2017,42(5):630-636. (in Chinese))
- [23] Gudmundsson S,Carstensen J M,Sigmundsson F. Unwrapping ground displacement signals in satellite radar interferograms with aid of GPS data and MRF regularization[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2002,40(8):1743-1754.
- [24] Yu Chen,Penna N T,Li Zhenhong. Generation of real-time mode high-resolution water vapor fields from GPS observations[J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres,2017,122(3):2008-2025.
- [25] Yu Chen,Li Zhenhong,Penna N T. Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction using a GPS-based iterative tropospheric decomposition model[J]. Remote Sensing of Environment,2018,204:109-121.
- [26] 罗海滨,何秀凤,刘焱雄. 利用 DInSAR 和 GPS 综合方法估计地表 3 维形变速率[J]. 测绘学报,2008,37(2):168-171. (Luo Haibin,He Xiufeng,Liu Yanxiong. Estimation of three-dimensional surface motion velocities using integration of DInSAR and GPS[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2008,37(2):168-171. (in Chinese))
- [27] 汪友军,胡俊,刘计洪,等. 融合 InSAR 和 GNSS 的三维形变监测:利用方差分量估计的改进 SISTEM 方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2021,46(10):1598-1608. (Wang Youjun,Hu Jun,Liu Jihong,et al. Measurements of three-dimensional deformations by integrating InSAR and GNSS:an improved SISTEM method based on variance component estimation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2021,46(10):1598-1608. (in Chinese))
- [28] Del Soldato M,Confuorto P,Bianchini S,et al. Review of works combining GNSS and InSAR in Europe[J]. Remote Sensing,2021,13(9):1684.
- [29] 刘善军,吴立新,毛亚纯,等. 天-空-地协同的露天矿边坡智能监测技术及典型应用[J]. 煤炭学报,2020,45(6):2265-2276. (Liu Shanjun,Wu Lixin,Mao Yachun,et al. Spaceborne-airborne-ground collaborated intelligent monitoring on open-pit slope and its typical applications[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(6):2265-2276. (in Chinese))
- [30] 魏恋欢,封秋月,毛亚纯,等. 基于多轨道 SBAS 方法的露天矿高陡边坡形变监测[J]. 东北大学学报(自然科学版),2020,41(10):1445-1451. (Wei Lianhuan,Feng Qiuyue,Mao Yachun,et al. Deformation monitoring of high steep slope in open-pit mine with multi-orbit SBAS[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science),2020,41(10):1445-1451. (in Chinese))
- [31] 于冰,王冰,刘国祥,等. 融合 DT 和 SDFPT 的时序 InSAR 矿区形变监测与分析[J]. 自然资源遥感,2024,36(1):14-25. (Yu Bing,Wang Bing,Liu Guoxiang,et al. Deformation monitoring and analysis of mining areas based on the DT-SDFPT combined time-series InSAR[J]. Remote Sensing for Natural Resources,2024,36(1):14-25. (in Chinese))
- [32] Tondaś D,Ilieva M,Van Leijen F,et al. Kalman filter-based integration of GNSS and InSAR observations for local nonlinear strong deformations[J]. Journal of Geodesy,2023,97(12):109.
- [33] Zhang Jinlong,Yang Rui,Qi Yuan,et al. A study on the monitoring of landslide deformation disasters in Wenxian County, Longnan City based on different time-series InSAR techniques[J]. Natural Hazards,2024,120(12):11851-11875.
- [34] Tao Qiuxiang,Liu Ruixiang,Li Xuepeng,et al. A method for monitoring three dimensional surface deformation in mining areas combining SBAS-InSAR,GNSS and probability integral method[J]. Scientific Reports,2025,15(1):2853.
- [35] Lacroix P,Handwerger A L,Bièvre G. Life and death of slow-moving landslides[J]. Nature Reviews Earth & Environment,2020,1(8):404-419.
- [36] Xia Zhuge,Motagh M,Li Tao,et al. The June 2020 Aniangzhai landslide in Sichuan Province,Southwest China:slope instability analysis from radar and optical satellite remote sensing data[J]. Landslides,2022,19(2):313-329.
- [37] De Blasio F V. Introduction to the physics of landslides;lecture notes on the dynamics of mass wasting[M]. Dordrecht:Springer,2011.
- [38] Zhou Chao,Gan Lulu,Cao Ying,et al. Landslide susceptibility assessment of the Wanzhou district:merging landslide susceptibility modelling (LSM) with InSAR-derived ground deformation map[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2025,136:104365.
- [39] Xiao Ruya,Gao Xiaoyuan,Wang Xun,et al. Measuring dam deformation of long-distance water transfer using multi-temporal synthetic aperture radar interferometry;a case study in South-to-North Water Diversion Project,China[J]. Remote Sensing,2024,16(2):365.
- [40] Dai Keren,Li Zhenhong,Xu Qiang,et al. Entering the era of earth observation-based landslide warning systems;a novel and exciting framework[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine,2020,8(1):136-153.

[13] Beena K S,Kavitha P E,Narayanan K P. Model studies on laterally loaded piles in sloping clay bed[J]. Indian Geotechnical Journal,2018,48(1):114-124.

[14] 程刘勇,许锡昌,陈善雄,等. 斜坡基桩水平极限承载力及影响因素模型试验和数值模拟[J]. 岩土力学,2014,35(9):2685-2691. (Cheng Liuyong, Xu Xichang, Chen Shanxiong, et al. Model test and numerical simulation of horizontal bearing capacity and impact factors for foundation piles in slope[J]. Rock and Soil Mechanics,2014,35(9):2685-2691. (in Chinese))

[15] Zhang Jianwei, Wang Xiaojun, Wang Hao, et al. Model test and numerical simulation of single pile response under combined loading in slope[J]. Applied Sciences,2020,10(17):6140.

[16] Jala Y,Sawant V A, Mishra A. Development of p - y curves from numerical study of long piles in sandy slope[J]. Ocean Engineering,2025,319:120275.

[17] 乃麒元. 黏土斜坡地中水平受荷桩承载特性研究[J]. 路基工程,2021(3):128-133. (Nai Qiyuan. Load-bearing characteristics research on horizontal load pile in clay slope base[J]. Subgrade Engineering,2021(3):128-133. (in Chinese))

[18] Khati B S,Sawant V A. Variation in lateral load capacity of pile embedded near slope with ground inclination and edge distance[J]. International Journal of Geotechnical Engineering,2020,14(7):740-751.

[19] 刘静. m 法计算斜坡桩水平承载力的适用性研究[D]. 长沙:中南林业科技大学,2019.

[20] 鲍金虎,苏静波,吴锋,等. 深厚软黏土地基中大直径单桩基础现场水平受荷试验及 p - y 曲线适用性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(3):127-134. (Bao Jinhui, Su Jingbo, Wu Feng, et al. Field horizontal loading test and p - y curve applicability of large-diameter single pile foundation in deep soft clay groundsill[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(3):127-134. (in Chinese))

(收稿日期:2025-08-19 编辑:熊水斌)

(上接第 69 页)

[41] Xia Zhuge,Zhou Chao,Wang Wandu, et al. Collapse of Meilong expressway as seen from space: detecting precursors of failure with satellite remote sensing[J]. Journal of Earth Science,2025,36(2):835-838.

[42] Liu Xiaojie,Zhao Chaoying, Yin Yueping, et al. Refined InSAR method for mapping and classification of active landslides in a high mountain region: Deqin County, southern Tibet Plateau, China[J]. Remote Sensing of Environment,2024,304:114030.

[43] Zhou Lyu, Wei Bangding, Ma Jun, et al. Monitoring and analysis of side-slope deformation along Changgan high-speed railway based on time-series InSAR and BDS techniques[J]. Natural Hazards,2024,120(14):13469-13491.

[44] Gheorghe M, Armas I, Dumitru P, et al. Monitoring subway construction using Sentinel-1 data: a case study in Bucharest, Romania[J]. International Journal of Remote Sensing,2020,41(7):2644-2663.

[45] Qiu Dongwei, Wang Yuzheng, Zhang Yunlong, et al. Settlement monitoring data fusion approach for high-speed railways based on GNSS and InSAR[J]. Journal of Applied Remote Sensing,2023,17(3):034507.

[46] Li Bofeng, Feng Yanming, Shen Yunzhong. Three carrier ambiguity resolution: distance-independent performance demonstrated using semi-generated triple frequency GPS signals[J]. GPS Solutions,2010,14(2):177-184.

[47] Zhang Xiaohong, He Xiyang. Performance analysis of triple-frequency ambiguity resolution with BeiDou observations[J]. GPS Solutions,2016,20(2):269-281.

[48] Wu Zhipeng, Wang Teng, Wang Yingjie, et al. Deep learning for the detection and phase unwrapping of mining-induced deformation in large-scale interferograms[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2021,60:5216318.

[49] Jiang Mi, Guarnieri A M. Distributed scatterer interferometry with the refinement of spatiotemporal coherence[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2020,58(6):3977-3987.

[50] Zhou Chao, Ye Mingyuan, Xia Zhuge, et al. An interpretable attention-based deep learning method for landslide prediction based on multi-temporal InSAR time series: a case study of Xinpu landslide in the TGRA[J]. Remote Sensing of Environment,2025,318:114580.

[51] Kalla D, Smith N, Kuraku S, et al. Study and analysis of chat GPT and its impact on different fields of study[J]. International Journal of Innovative Science and Research Technology,2023,8(3):827-833.

[52] 陈晓楠,靳燕国,许新勇,等. 南水北调中线干线智慧输水调度的思考[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):46-55. (Chen Xiaonan, Jin Yanguo, Xu Xinyong, et al. Thinking on smart water dispatching in the South-to-North Water Diversion Middle Route Project[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(5):46-55. (in Chinese))

(收稿日期:2025-08-22 编辑:刘晓艳)