

基于时序 InSAR 的地表形变监测方法研究

夏乙漂

浙江工业职业技术学院, 浙江绍兴, 312000;

摘要: 时序 InSAR 技术通过处理长时间序列的 SAR 影像, 有效克服了传统差分干涉测量 (D-InSAR) 在时空失相干和大气延迟等方面的局限, 实现了对地表缓慢、持续形变过程的高精度监测。本文系统阐述了时序 InSAR 方法的核心技术演进, 重点综述了 PS-InSAR 与 SBAS-InSAR 等主流算法的原理与适用性, 并探讨了包括全散射体、多平台数据融合二维反演、以及融合主成分时空分析等在内的前沿方法创新。文章进一步分析了当前方法面临的大气延迟相位干扰、低相干区信号提取、以及相位解缠不准确等关键挑战。最后, 展望了未来通过融合人工智能、集成多源传感器以及建立标准化处理流程等技术路径, 以推动时序 InSAR 方法向更高精度、更高维度、智能化和业务化方向发展的趋势^{[1][2]}。

关键字: 时序 InSAR; 地表形变; PS-InSAR; SBAS-InSAR; 大气校正; 形变预测

DOI: 10.64216/3080-1508.26.02.033

引言

地表形变监测对于地质灾害防治、城市安全与重大工程运维至关重要。传统差分干涉测量 (D-InSAR) 技术虽能捕获两期影像间的形变, 但其应用受时间与空间失相干、大气延迟效应以及无法获取连续形变历史三大固有局限的严重制约^{[5][8]}。为解决这些问题, 时序 InSAR 技术应运而生。其核心思想是利用覆盖同一地区的数十甚至上百景 SAR 影像, 通过复杂的时序统计分析, 提取每个像素点 (或高相干点) 随时间变化的形变量, 从而将监测能力从静态“快照”提升至动态“电影”。

近年来, 随 Sentinel-1、TerraSAR-X、高分三号等 SAR 卫星数据的极大丰富与处理算法的持续创新, 时序 InSAR 方法研究取得了显著进展, 已从单一的形变速率制图, 发展到多维形变反演、超高精度信号提取、以及机理分析与趋势预测的深度融合阶段。同时, 中国首部《基于 InSAR 技术的地壳形变监测规范》(GB/T 44146-2024) 的实施, 标志着该技术正从科学研究走向标准化、业务化应用。在此背景下, 系统梳理时序 InSAR 方法的研究进展、剖析现存挑战并展望未来方向, 对推动该领域的技术发展与应用深化具有重要意义。

1 时序 InSAR 技术

在众多时序 InSAR 算法中, 永久散射体技术

(PS-InSAR)^[3]和小基线集技术 (SBAS-InSAR)^[4]是两种最具代表性且广泛应用的技术路线, 它们分别针对不同的地表覆盖类型和监测需求, 形成了互补的技术体系。

PS-InSAR 技术由 Ferretti 等人^[3]于 2000 年提出, 其核心思想是识别并利用在长时间序列中散射特性高度稳定的永久散射体, 这些点通常是人工建筑 (如屋顶、角反射器)、裸露的岩石、固定的基础设施等。通过分析这些 PS 点相位的时空特性, 可以高精度地估计其线性形变速率、高程残差, 并滤除大气相位。其优势在于城市区域可获取极高密度的监测点和毫米/年量级的精度, 但在植被茂密或地表变化剧烈区域, PS 点稀少, 适用性受限。

SBAS-InSAR 由 Berardino 等人^[4]于 2002 年提出, 旨在克服 PS 方法在自然区域的局限。该技术通过设置时空基线阈值, 将多景 SAR 影像组合成多个“短基线”干涉对集, 以最大限度地保持干涉相干性。通过奇异值分解 (SVD) 等方法连接各子集, 求解地表形变时间序列。SBAS-InSAR 的优势在于能利用分布式散射体, 在农田、山区、矿区等自然地表获得更均匀的监测点分布, 适合大范围的区域形变监测。实践中, 常将 PS 与 SBAS 方法融合 (如 PS+SBAS), 以兼顾精度与覆盖范围。

表 1: PS-InSAR 与 SBAS-InSAR 技术特点对比

特性	PS-INSAR	SBAS-INSAR
核心思想	选取稳定点目标 (PS 点)	组合短基线干涉对
适用场景	城市、建筑区、裸露岩石	自然区域、农田、植被覆盖区、冰川冻土
点密度	在高相干区密度极高	在自然区域密度高于 PS 方法

特性	PS-INSAR	SBAS-INSAR
优势	精度极高, 抗噪能力强	覆盖范围广, 适用于自然地表
局限	在自然区域点密度低	在城市区域可能受失相干影响

2 应用案例分析

2.1 城市地面沉降监测

城市地面沉降是融合时序 InSAR 技术应用最为广泛的领域之一。以北京平原地区为例, 由于长期过度开采地下水, 该区域经历了数十年的持续地面沉降。中南大学张兴等利用 3MSC-InSAR 算法, 融合了 C 波段 ERS (1992-2003 年) 和 ENVISAT (2003-2010 年) 降轨数据, 以及 X 波段 TerraSAR-X (2010-2015 年) 和 C 波段 Sentinel-1 (2015-2022 年) 升轨数据, 成功实现了北京平原长达 30 年的地面沉降连续监测^[14]。监测结果显示, 该地区存在多个沉降漏斗中心, 最大累积沉降量可达 1.5 米。通过独立成分分析 (ICA) 算法, 研究人员识别出三个主要时空分量: S 型特征分量、加速特征分量和回弹特征分量。基于 S 型模型预测, 北京平原的地面沉降将在 2030 年左右基本结束, 这一趋势与北京市禁止开采地下水的政策和南水北调工程实施后地下水位的恢复密切相关。

2.2 交通基础设施形变隐患筛查

高速公路、铁路等线性基础设施穿越复杂地质单元时, 沿线隐患的早期识别至关重要。

在高速公路采空区路域筛查方面, 朱世超等^[11]基于 SBAS-InSAR 技术, 利用 2019-2023 年 Sentinel-1 数据, 对某穿越煤矿采空区的高速公路路段进行监测。研究获取了沿线年平均形变速率场, 成功识别出形变速率超过 -10 mm/a 的局部沉降隐患区, 其空间分布与采空区位置吻合, 实现了从“人工巡检”到“面域筛查”的转变, 为后续精准布设地面监测网提供了依据。在高速铁路沉降规律分析方面, 桓鹏^[12]综合运用 PS-InSAR 与 SBAS-InSAR 方法, 对京雄高铁全封闭声屏障段进行监测。结果表明, 高铁沿线形变整体平稳, 但车站区域 (霸州北站、北落店站) 因列车启停荷载动力效应, 其沉降速率明显高于区间线路。该研究通过与水准数据对比验证了监测结果的可靠性, 揭示了高铁沉降的差异化特征。

2.3 地质灾害监测与预警

时序 InSAR 技术在地质灾害监测领域的应用取得了显著进展, 特别是在滑坡早期识别、演化过程监测和形成机理研究方面。长江设计集团三峡院在三峡库区藕塘滑坡的监测实践中, 创新构建了“InSAR—地质力学”耦合分析框架, 利用多频段卫星数据, 融合 GNSS 与无人机 LiDAR 点云, 建立了时空连续的高精度形变场,

揭示了库水位升降引发滑坡位移速率变化的动力学规律^[13]。结合 2015 年至 2024 年间的 InSAR 数据, 研究人员重构了滑坡形变时序演变图谱, 最终形成了“形变速率—库水位—降雨量”三级预警模型, 实现了地质灾害防治从“被动应急”向“主动防控”的转变。

3 挑战与发展趋势

3.1 当前面临的技术挑战

尽管融合时序 InSAR 技术在地表形变监测中取得了显著进展, 但仍面临一系列技术挑战需要克服。

数据质量与可用性问题是制约技术广泛应用的重要因素。虽然 SAR 卫星数据日益丰富, 但高质量、长时间序列的多源数据在某些地区仍然难以获取。不同传感器间的数据格式、空间分辨率和时间采样频率差异也给数据融合处理带来了技术难度。此外, SAR 数据获取受到天气条件、卫星轨道和传感器工作状态的限制, 难以保证连续稳定的数据供应。

复杂地形与地表覆盖条件下的监测精度仍需进一步提升。在山区、茂密植被覆盖区以及地表变化剧烈的区域, 雷达信号的相干性往往迅速衰减, 导致有效监测点密度降低, 形变信息提取困难。虽然 DS-InSAR 等新技术通过利用分布式散射体部分解决了这一问题, 但在极端复杂环境下, 监测精度和可靠性仍有待提高。

大气误差的精确校正依然是时序 InSAR 技术面临的核心难题。特别是对于大范围、长时间序列的形变监测, 大气延迟相位的时空变异性使得校正变得异常复杂。虽然已有多种大气校正方法被提出, 但在缺乏高时空分辨率大气数据的地区, 校正效果仍然有限。

多维形变反演的理论与方法需要进一步完善。目前大多数时序 InSAR 研究仍主要关注一维 (LOS 方向) 形变监测, 二维和三维形变反演方法虽然有所发展, 但仍存在模型假设较强、解算不稳定等问题。如何充分利用多源数据实现稳健的高维形变反演, 是需要持续研究的科学问题。

3.2 技术发展趋势与前沿方向

为应对上述挑战, 技术正朝着智能化、集成化、机理化的方向演进, 呈现以下前沿趋势:

(1) 多源数据深度协同与空天地一体化: 未来将深度融合多平台 SAR (如高分三号、陆地探测一号)、光学遥感、激光雷达 (LiDAR)、GNSS 及地面传感数据, 构建立体监测网络。例如, “SAR 卫星+无人机”

协同可将应急响应时效提升至小时级,实现广域普查与重点目标详查的结合。

(2) 人工智能深度赋能全流程处理:机器学习与深度学习将深度集成于相位解缠、大气校正、形变信号提取及异常自动识别等环节。数据驱动的智能算法有望解决复杂场景下的核心难题,提升处理自动化水平与精度,甚至实现端到端的智能处理框架。

(3) 业务化应用与标准化推广

随着国家标准的出台(GB/T 44146-2024)和自主处理软件(如 GDEMSI)的成熟,时序 InSAR 技术正加速从实验室走向规模化业务应用。构建国家级或区域级的 InSAR 形变监测云平台与数据共享体系,实现 TB 级数据的实时处理与分析,将为国土调查、防灾减灾、重大工程安全等领域提供常态化、业务化的技术支撑。

4 结论

融合时序 InSAR 技术通过集成多源 SAR 数据,克服了传统 D-InSAR 技术在时间连续性、空间覆盖和监测维度上的局限性,实现了地表形变监测从短时到连续,从一维到多维,从现象到机理的跨越式发展。以 PS-InSAR 和 SBAS-InSAR 为代表的时序分析方法,结合多平台数据融合技术,已经在地面沉降、滑坡监测和基础设施安全评估等领域展现出强大的应用潜力。

本文系统梳理了融合时序 InSAR 技术的方法体系,通过分析不同领域的应用案例,展示了该技术在城市沉降长期监测、地质灾害机理研究、交通基础设施形变隐患筛查与评估等方面的实际效果。同时,本文也客观指出了当前面临的数据质量、复杂环境监测、大气校正和多维反演等方面的技术挑战。

展望未来,融合时序 InSAR 技术将朝着多源数据深度融合、人工智能深度集成等方向发展。随着更多先进 SAR 卫星的发射、数据处理算法的创新以及与其他对地观测技术的协同,融合时序 InSAR 必将在全球变化研究、地质灾害防治、城市安全监控和重大工程运维等领域发挥更加重要的作用。

参考文献

- [1] 文艺,张玲,孔含泉,等.利用 C-LSTM 的时序 InSAR 地表形变趋势分析及预测方法[J].自然资源遥感,2025,37(05):141-151.
- [2] 基于 InSAR 技术的地壳形变监测规范:GB/T 44146-2024[S].北京:中国标准出版社,2024.
- [3] 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

[4] 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.

[5] 马超,单新建.星载合成孔径雷达差分干涉测量(D-InSAR)技术在形变监测中的应用概述[J].中国地震,2004,(04):88-96.

[8] 于海滨,王明常,王凤艳,等.基于统计方法和机器学习耦合模型的吉林磐石地质灾害易发性评价[J].世界地质,2025,44(3):433-445

[9] He L, Wu X, Zheng W, et al. Landslide identification and deformation monitoring analysis in Xining City based on the time series InSAR of Sentinel-1a with ascending and descending orbits[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2024, 83(6):255

[10] 陶昶旭,张永双,任三绍. InSAR 技术在滑坡识别与监测中的应用研究进展[J].中国地质,2025,52(2):513-526

[11] 朱世超,柳尚,张建亮,等.基于 SBAS-InSAR 的路域形变隐患点筛查技术研究与应用[J].价值工程,2025,44(30):97-100.

[12] 桓鹏.基于时序 InSAR 技术的城市高铁沉降监测研究[J].城市勘测,2025,(05):48-54.

[13] 赵长军,田坤,周云,等.重庆市三峡库区藕塘滑坡复活——变形机制研究[J/OL].世界地质,1-18[2025-12-03].<https://link.cnki.net/urlid/22.1111.P.20250730.0958.002>.

[14] Zhang, X., Sun, Q., Gui, R., Hu, J., Yang, Q., & Su, G. Long-time surface deformation in Beijing, China for three decades by multi-sensor, multi-track and multi-temporal InSAR seamless connection[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2025,16(1).

作者信息:夏乙溧,女(1991.11-),汉,浙江省舟山市,硕士,讲师,研究方向:智能测绘。

课题:2024 年度高校访问工程师“校企合作项目”——《融合时序 INSAR 的地表形变监测及滑坡易发性评价研究》-项目编号-FG2024239