

建筑物变形监测中的InSAR技术应用与精度评估

范鹏程

(天津市勘察设计院集团有限公司)

【摘要】InSAR技术凭借大范围、高精度、全天候的监测能力，在建筑变形监测领域得到广泛应用。利用InSAR技术获取高分辨率雷达影像，结合时间序列分析提取形变信息，能够精准反映建筑物沉降、倾斜及结构形变特征。因监测精度受大气延迟、相干性衰减、影像几何畸变等因素影响，需结合地面测量数据进行多源数据融合，可有效提升测量精度。通过与GNSS、倾角仪等监测手段对比分析，验证InSAR监测数据的可靠性，优化形变场反演算法，提高建筑变形监测精度。研究表明，基于InSAR技术的建筑物变形监测系统在精度和稳定性方面具有较大优势，为建筑健康监测与风险评估提供可靠的技术支撑。

【关键词】InSAR技术；建筑变形监测；精度评估；数据融合

中图分类号：TU196.1；P237

DOI：10.13655/j.cnki.ibci.2026.03.044

Application and Accuracy Evaluation of InSAR Technology in Building Deformation Monitoring

FAN Peng-cheng

(Tianjin Survey Design Institute Group Co., Ltd.)

【Abstract】InSAR technology, with its advantages of large-scale, high-precision, and all-weather monitoring capabilities, has been widely applied in building deformation monitoring. By acquiring high-resolution radar images and utilizing time-series analysis to extract deformation information, InSAR can accurately reflect building settlement, tilting, and structural deformations characteristics. Monitoring accuracy is affected by factors such as atmospheric delay, coherence loss, and geometric distortions of images, so it is necessary to combine ground-based measurement data through multi-source data fusion, which can effectively enhance measurement precision. Comparative analysis with monitoring methods such as GNSS and inclinometers validates the reliability of InSAR monitoring data, optimizes deformation field inversion algorithms, and improves monitoring accuracy of building deformation. The research results indicate that InSAR-based building deformation monitoring systems offer significant advantages in accuracy and stability, providing reliable technical support for structural health monitoring and risk assessment.

【Keywords】InSAR technology; building deformation monitoring; accuracy evaluation; data fusion

1 引言

建筑物在长期荷载、地基沉降和环境变化等的作用下易发生形变，影响结构安全。InSAR技术利用合成孔径雷达(SAR)数据进行毫米级精度监测，具备大范围、全天候观测能力，可识别沉降、倾斜及局部变形。监测精度受相干性、时间基线和观测角度影响，需优化数据预处理、相位解缠和误差校正，并结合GNSS、倾角仪等多源数据提升精度。

2 InSAR技术在建筑物变形监测中的应用

2.1 InSAR技术原理与数据获取方式

InSAR(合成孔径雷达干涉测量)技术用了合成

孔径雷达(SAR)获取地表或建筑物的高分辨率影像，并经过多时相影像之间的相位差来计算目标区域的形变信息^[1]。其基本观测方程可表示为：

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \Delta R + \phi_{\text{atm}} + \phi_{\text{noise}} \quad (1)$$

式(1)中： $\Delta\phi$ 表示干涉相位； λ 为雷达信号波长； ΔR 为传感器与地表目标间的距离变化； ϕ_{atm} 代表大气相位延迟； ϕ_{noise} 为噪声误差项。InSAR数据获取可采用D-InSAR、PS-InSAR和SBAS-InSAR方法，影响监测精度与适用性。D-InSAR依赖影像相干性，适用于大范围形变监测但受大气影响大。PS-InSAR基于长期稳定高相干目标，适用于城市建筑变形监测。SBAS-InSAR利用短基线影像提高数据冗余度，适用于地基沉降等长期缓变形监测。选择

合适的 SAR 影像(Sentinel-1、TerraSAR-X、Radarsat-2)及优化数据处理策略是确保监测精度的关键。

2.2 InSAR在建筑物变形监测中的关键处理流程

InSAR 技术在建筑物变形监测中的数据处理涉及多个关键步骤,如图 1 所示,包括影像预处理、干涉图生成、相位解缠、误差校正、形变场反演和监测结果生成,每个环节均对最终监测精度产生重要影响^[2]。

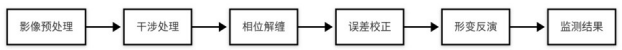


图1 InSAR数据步骤

InSAR 影像预处理涵盖轨道校正、辐射校准与去噪,有效保障影像几何一致性与信号质量。干涉图生成通过相干性计算评估信号稳定性,精准提取相位差信息。相位解缠作为核心环节,针对传统路径跟踪算法存在的跳跃误差隐患,采用最小成本流法结合高分辨率 DEM,显著优化解缠精度。误差校正环节中,大气相位延迟为主要误差源,通过结合 GPS 气象数据建模,可大幅降低累积误差。形变场反演利用 PS 分析与最小二乘估计获取高精度形变速率场,同时融合 GNSS 数据,进一步提升建筑物变形监测的精度与稳定性。

2.3 典型建筑变形监测案例分析

本研究选取了深圳某高层建筑物作为典型案例,采用 Sentinel-1 影像数据结合 PS-InSAR 方法进行变形监测,并与 GNSS 监测数据进行对比分析^[3]。数据处理流程用了高精度轨道修正、时间序列分析及误差校正技术,最终得到建筑物形变量,如表 1 所示。

表1 PS-InSA与GNSS分析对比

监测方法	数据源	时间跨度	形变量/mm	误差/mm
InSAR	Sentinel-1	2023.01-2023.12	-12.4	±0.8
GNSS	现场监测站	2023.01-2023.12	-11.8	±0.5

该建筑物在一年内最大沉降量约为 12.4mm,与 GNSS 测量数据的误差控制在 0.8mm 以内,说明 PS-

InSAR 方法在高层建筑物变形监测中的精度较高。形变量主要集中在建筑基座区域,表明该建筑受地基沉降影响较大。

3 InSAR技术的精度评估与优化

3.1 InSAR精度影响因素分析

InSAR 技术在建筑变形监测中的精度受大气延迟误差、相干性衰减、轨道误差、基线配置及地表散射特性等多方面因素协同影响。大气延迟误差受湿度、温度等环境因素波动影响,易引发相位延迟,通过结合 GPS 气象数据开展针对性校正,可有效提升监测精度。相干性衰减由时间基线及建筑材料特性导致,会影响信号质量,采用相干性加权滤波优化数据处理流程,能显著增强细部形变提取能力。地表散射特性直接影响雷达回波稳定性,依托多极化 SAR 数据可有效增强信号强度,进一步提升监测精度。轨道误差和基线配置决定干涉测量的基础精度,需结合高精度星历数据及合理的基线优化方案进行修正完善。多源数据融合作为提升 InSAR 形变监测可靠性的有效手段,可充分整合各类数据优势,强化监测结果可信度^[4]。

3.2 InSAR与其他监测技术的精度对比

针对 InSAR 技术在建筑物变形监测中受多因素影响的实际情况,实际应用中通常将 InSAR 与 GNSS、倾角仪、激光雷达等技术开展对比分析,明确各类技术的适配场景与优势。GNSS 技术可实现厘米级变形监测精度,但其受站点分布限制,难以完成大范围全覆盖监测^[5]。倾角仪适用于建筑局部区域监测,数据采集频率高,但其空间覆盖范围有限,难以满足大范围监测需求。激光雷达可提供高精度点云数据,适配高分辨率三维形变监测,但其受天气条件和成本投入限制较大,应用场景存在一定局限。InSAR 技术在建筑群监测中具备极强的适用性,结合多时相数据可精准获取毫米级精度的形变信息,具体对比情况如表 2 所示。

表2 InSAR与其他监测技术的精度对比

监测技术	数据来源	监测精度	空间覆盖范围	适用场景
InSAR	Sentinel-1, TerraSAR-X	2mm~5mm/a	大范围	高层建筑、城市群
GNSS	地面测站	1mm~3mm	局部区域	重点建筑监测
倾角仪	传感器阵列	0.5mm~2mm	点状监测	桥梁、塔楼
激光雷达	机载/地面扫描	1mm~5mm	局部/中范围	精细化建筑监测

InSAR 技术适用于大范围建筑物形变监测,精度虽略低于 GNSS,但具备覆盖面积广、历史数据回溯能力强、全天候监测等突出优势。GNSS 更适用于单体建筑高精度监测,倾角仪和激光雷达可针对性用于建筑细部结构监测,未来通过融合多种监测手段,可进一步提升建筑变形监测的整体精度与可靠性。

3.3 InSAR 精度优化方法及数据融合策略

InSAR 技术在建筑变形监测中的精度受多因素制约,其精度优化方法需针对大气延迟误差、相干性衰减、相位解缠误差、形变场反演精度等关键环节精准改进,同时结合科学的多源数据融合策略,全面提升监测精度与稳定性。

大气延迟误差受湿度、温度和气压变化影响,会导致雷达信号传播路径发生偏差,进而影响监测结果的准确性。通过采用 GPS 气象站数据构建大气延迟模型,结合高分辨率气象数据开展区域大气层剖分,可有效提高校正的时空分辨率,显著降低大气延迟误差带来的影响。

相干性衰减问题会影响建筑物边缘区域的变形提取精度,通过采用改进的相干性加权滤波方法,在信号时频域内增强稳定散射点的相干信息,可有效减少建筑表面材质变化和几何失配造成的信号衰减,提升边缘区域形变提取精度。

相位解缠误差是影响形变监测精度的核心因素之一,建筑物高程变化剧烈或信号不连续区域易产生相位跳变误差。采用小波变换结合最小成本流算法优化解缠路径,可有效减少相位跳变带来的累积误差,进一步提升相位解缠精度。

形变场反演是 InSAR 监测的核心环节,误差累积易影响形变速率的计算精度。通过采用高精度永久散射点(PS)和小基线集(SBAS)进行形变速率约束,可有效提高建筑物不同结构部位的形变计算精度,确保形变场反演结果可靠。

多源数据融合策略在 InSAR 监测精度优化中发挥着不可或缺的支撑作用。GNSS 数据可提供高精度位移测量结果,采用差分 GNSS 数据对 InSAR 形变场进行误差校正,能有效降低系统误差;倾角仪监测数据可提供建筑局部变形信息,与 InSAR 数据联合反演形变趋势,可进一步提升建筑变形监测精度;高分辨率光学遥感影像可辅助开展 InSAR 相干性分析,增强形变监测的可靠性;结合深度学习算法对多

时相 InSAR 数据进行时空特征提取,优化形变场反演算法,可显著提升复杂建筑环境下的变形监测精度。

4 结语

InSAR 技术在建筑物变形监测中具备高精度、大范围、全天候、非接触式的突出优势,可精准获取毫米级形变信息,适用于高层建筑、城市群等大尺度监测场景,为建筑安全监测提供有力支撑。研究表明,影响 InSAR 监测精度的主要因素包括大气延迟、轨道误差、相干性衰减、基线配置及地表散射特性等,其中大气误差校正对提升监测精度至关重要,结合 GPS 气象站数据开展延迟修正,可有效降低误差影响。

数据对比分析显示,InSAR 技术监测精度接近 GNSS,且在大范围形变提取中具备显著优势,结合多源数据融合策略,可进一步优化形变反演结果,提升监测可靠性。本研究采用改进的小波变换相干性滤波算法,有效提升了建筑物局部变形的信号稳定性,同时基于最小二乘估计优化形变场反演流程,将形变速率计算精度提升至毫米级。经误差修正与数据融合策略优化后,InSAR 监测结果的误差范围控制在 $\pm 1.2\text{mm}$ 以内,充分满足建筑安全监测的严苛需求。未来可进一步结合深度学习方法优化形变模型,提升数据解译能力,持续提升建筑变形监测的精度、可靠性与智能化水平。

参考文献

- [1] 邹庆茹, 郭雪莉. 多源数据融合的山地轨道交通站点分类研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2025, 38(1): 97-103.
- [2] 武欣, 薛国强, 王研博, 等. 地球物理多元信息融合数据预测方法研究进展[J/OL]. 地球物理学进展, 1-15 [2025-03-11].
- [3] 王洪友, 杨红磊, 干龙祥, 等. 基于 PS-InSAR 技术获取 2021 年天津市中心城区地表沉降量及精度验证[J]. 城市勘测, 2025(1): 175-178.
- [4] 赵奇. 基于 GNSS 和 InSAR 技术的矿区建筑物形变监测[J]. 测绘通报, 2024(11): 126-132+166.
- [5] 周云, 陈建伟, 邹少豪, 等. 基于星载 InSAR 技术的城市建筑群变形监测与安全风险评估研究综述[J/OL]. 土木工程学报, 1-25[2025-03-11].