

文章编号: 1000-4750(2025)04-0025-13

基于 PS-InSAR 技术的大跨度桥梁结构 变形监测综述

周 云^{1,2}, 郝官旺¹, 危俊杰¹, 杜 宗³, 刘 畅³, 朱 茂⁴

(1. 湖南大学土木工程学院, 湖南, 长沙 410082; 2. 湖南大学工程结构损伤诊断湖南省重点实验室, 湖南, 长沙 410082;
3. 中建三局第一建设工程有限责任公司, 湖北, 武汉 430020; 4. 北京东方至远科技股份有限公司, 北京 100081)

摘 要: 面对量大面广的大跨度桥梁, 实施时空覆盖连续、高效经济的轻量化结构健康监测, 对保障桥梁运营安全、实现智慧桥梁和智慧交通具有重要现实意义。该文从永久散射体合成孔径雷达干涉 (PS-InSAR) 关键技术、桥梁结构变形监测以及影响因素 3 个方面, 全面总结了 PS-InSAR 技术监测桥梁结构变形的基本原理、技术特点、适用范围和研究进展。在关键技术方面, 系统总结了影像配准、PS 点识别、相位解缠、变形恢复 4 个方面的最新研究成果; 综述了 PS-InSAR 技术在桥梁视线向变形监测以及三维变形反演中的应用, 分析了桥梁方向和表面散射特性、相位解缠精度以及热膨胀模型对该技术测量精度的影响; 利用该技术对某钢拱桥的结构变形进行了测试, 验证了所提方法的可行性。归纳总结了 PS-InSAR 技术监测桥梁变形研究, 讨论了未来可能的发展方向。文献综述表明: 基于 PS-InSAR 技术的桥梁变形监测方法有显著的优势和广阔的应用前景, 有望为大跨度桥梁的运维和风险管理提供技术支持。

关键词: 桥梁工程; 结构健康监测; 综述; PS-InSAR; 变形监测

中图分类号: U446 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.12.1069

REVIEW OF PS-InSAR-BASED LONG-SPAN BRIDGES STRUCTURAL DEFORMATION MONITORING

ZHOU Yun^{1,2}, HAO Guan-wang¹, WEI Jun-jie¹, DU Zong³, LIU Chang³, ZHU Mao⁴

(1. College of Civil Engineering, Hu'nan University, Changsha, Hu'nan 410082, China;

2. Key Laboratory for Damage Diagnosis of Engineering Structures of Hu'nan Province, Hu'nan University, Changsha, Hu'nan 410082, China;

3. China Construction Third Bureau First Engineering CO., LTD, Wuhan, Hubei 430020, China;

4. Beijing Vastitude Technology Co., Ltd, Beijing 100081, China)

Abstract: The implementation of a lightweight structural health monitoring with continuous spatiotemporal coverage and high cost-effectiveness is of great practical significance for ensuring the bridge operation safety and realizing Intelligent Bridge and Intelligent Transportation System. The fundamental principles, technical features, application scope and research progress of the Permanent Scatterer Synthetic Aperture Radar Interferometry (PS-InSAR) technique are comprehensively summarized from three aspects: key technology, bridge structural deformation monitoring, and influencing factors. Regarding the key technology, the latest research results of image co-registration, PS points detection, phase unwrapping, and deformation recovery were systematically summarized. The application of the PS-InSAR in LOS (line of sight) deformation monitoring and three-

收稿日期: 2022-12-13; 修改日期: 2023-05-20

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52278306); 湖南省重点研发计划项目(2022SK2096); 湖南省交通运输厅科技进步与创新项目(201912)

通信作者: 郝官旺(1994—), 男, 内蒙古人, 博士生, 主要从事结构健康监测研究 (E-mail: gwh0114@hnu.edu.cn).

作者简介: 周 云(1979—), 男, 湖南人, 教授, 博士, 博导, 主要从事结构健康监测和结构测试新技术研究 (E-mail: zhouyun05@hnu.edu.cn);

危俊杰(1997—), 男, 湖南人, 硕士生, 主要从事结构健康监测研究 (E-mail: weijj@hnu.edu.cn);

杜 宗(1988—), 男, 湖北人, 工程师, 学士, 主要从事结构施工技术研究 (E-mail: carzy_2727@qq.com);

刘 畅(1988—), 男, 湖北人, 工程师, 学士, 主要从事结构施工技术研究 (E-mail: 519492718@qq.com);

朱 茂(1988—), 男, 湖南人, 副研究员, 博士, 主要从事 InSAR 和 SAR 算法相关研究 (E-mail: zhumaowork@126.com).

dimensional deformation inversion were reviewed. The influence of bridge direction, surface scattering characteristics, phase unwrapping accuracy and thermal dilation model on the measurement accuracy of this technology were analyzed. The technology was further used to monitor the structural deformation of a steel arch bridge, and the feasibility of the proposed method are verified. The research on bridge deformation monitoring by the PS-InSAR technology is summarized, and possible future directions are discussed. The literature review indicates that the PS-InSAR-based method for monitoring bridge deformation has significant advantages and vast application prospects, which is expected to provide technical support for the operation and risk management of long-span bridges.

Key words: bridge engineering; structural health monitoring; review; permanent scatterer synthetic aperture radar interferometric (PS-InSAR); deformation monitoring

大跨度桥梁是国家交通基础设施的关键节点和咽喉, 2021 年末我国公路桥梁总量达到 96.11 万座, 总里程达 7380.21 万延米, 其中特大桥梁和大桥的总量达 14.19 万座, 总里程达 5063.76 万延米^[1]。随着交通流量增加和超载、材料病害老化、运维护养不足等因素的影响, 桥梁长期带病运营将存在巨大的安全隐患^[2]。结构健康监测 (Structural Health Monitoring, SHM) 是保障桥梁安全运维的有效手段, 但是传统的桥梁健康监测系统多依赖数量庞大、种类繁多的传感器, 造成监测数据海量、监测成本高昂, 目前主要应用于投资大且起命脉作用的大跨桥梁工程^[3], 如香港青马大桥^[4]、黄河公路大桥^[5]、润扬大桥^[6]、东海大桥^[7]、西堠门大桥^[8]等。因此, 面向我国量大面广的大跨度桥梁, 开发“轻量化”、“低成本”、“可持续”的结构健康监测方法, 已成为工程界亟待研究解决的问题。

桥梁结构变形测量方法主要包括接触式和非接触式两类。接触式变形测量依赖电子类位移传感器^[9], 如百分表、连通管、挠度计等, 一般用于单点位移监测, 检测效率较低, 耗费人力物力成本高。非接触式测量方法包括机器视觉测量^[10-11]、微波雷达传感技术^[12]、摄影测量方法^[13]、三维激光扫描^[14-15]和全球定位系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS)^[16]等。其中机器视觉测量和摄影测量受到环境影响明显 (背景变化、光照条件、大气折射以及湍流等)。微波雷达根据回波信号和发射信号的相位差进行目标位移测量, 精度高可达亚毫米级别。三维激光扫描只能获取近距离的结构变形, 难以实现多点同步测量。GNSS 的测量范围受到信号强度的影响, 如山区等位置容易出现信号失锁, 造成定位误差增大甚至定位信息中断。

随着信息技术和数字信号处理技术的迅速发展, 永久散射体合成孔径雷达干涉 (Permanent Scatterer Synthetic Aperture Radar Interference, PS-InSAR) 已成为了一种极具潜力的新型地物变形测量技术。PS-InSAR 技术利用 SAR 卫星沿重复轨道对同一区域进行两次或多次成像, 通过斜距相位干涉处理技术提取出目标的变形信息, 具有“范围广 (全天时、全天候的连续面状采样, 影像幅宽 ≥ 10 km)”、“精度高 (变形测量精度为 1 mm~5 mm)”、“效率高 (扫描频率达 5 次/16 天)”^[17]、“非接触 (主动发射微波并接收包含桥梁变形信息的反射回波)”^[18]的优势, 已广泛应用于高速公路^[19]、高层建筑^[20]、铁路和地铁沿线^[21]、交通路网沿线^[22]、堤坝^[23]、边坡^[24]以及机场^[25]等基础设施的变形监测任务中, 为大跨桥梁变形监测提供了新思路^[26-27]。

本文从 PS-InSAR 关键技术、桥梁变形测量以及影响因素三个方面总结了该方法在桥梁结构变形监测方面的研究进展。PS-InSAR 关键技术包括影像配准、PS 点识别、相位解缠以及变形恢复, 适用于桥梁视线向 (Line of sight, LOS) 变形监测和三维变形反演, 其变形测量精度受到桥梁方向和表面散射特性、相位解缠精度以及热膨胀模型的影响。通过 PS-InSAR 技术对某六跨连续钢桁梁拱桥的变形进行了测试, 实现了桥梁整体连续变形监测。最后基于各项研究工作的进展, 进一步探讨了未来可能的发展趋势。

1 PS-InSAR 关键技术

InSAR 是合成孔径雷达 (Synthetic aperture radar, SAR) 和干涉测量技术的融合。其中, SAR 卫星利用距离向的脉冲压缩技术和方位向的合成孔径技术获得高分辨率卫星图像, 记录了地面分辨率单元的幅值和相位等信息。干涉测量是通过同一区

域多幅 SAR 影像的复共轭相乘提取目标变形, 利用 InSAR 进行桥梁变形测量如图 1 所示, R_1 和 R_2 分别为不同成像时刻雷达天线到桥梁某点的视线向 (Line of sight, LOS) 距离, ΔR 是桥梁变形造成的 LOS 向斜距变化量。雷达干涉的模式分为: 沿轨道干涉法、交叉轨道干涉法和重复轨道干涉法。其中常用方式是重轨干涉, 干涉相位表达式为^[28]:

$$\varphi_{\text{int}} = \varphi_{\text{ref}} + \varphi_{\text{top}} + \varphi_{\text{def}} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_{\text{noi}} \quad (1)$$

式中: φ_{ref} 为参考椭球面相位; φ_{top} 为地形相位; φ_{def} 为变形相位; φ_{atm} 为大气相位; φ_{noi} 为噪声相位, 其中 φ_{ref} 、 φ_{top} 、 φ_{def} 占干涉相位主导地位。将 φ_{ref} 、 φ_{top} 、 φ_{atm} 、 φ_{noi} 去除后得到目标变形相位, 观测目标位移造成沿雷达 LOS 向的斜距变化量 ΔR 可表示为式 (2):

$$\Delta R = \frac{\lambda}{4\pi} \varphi_{\text{def}} \quad (2)$$

相比 InSAR 技术对影像全局进行处理的思想, PS-InSAR 技术针对影像中具有高相干性像元组成的离散点集, 在生成差分干涉相位后对选择的高相干目标进行相位建模和变形解算。PS-InSAR 的关键技术包括: 影像配准、永久散射体 (Permanent scatterer, PS) 识别、相位解缠以及变形恢复, 该技术与其他变形测量技术的对比列于表 1。

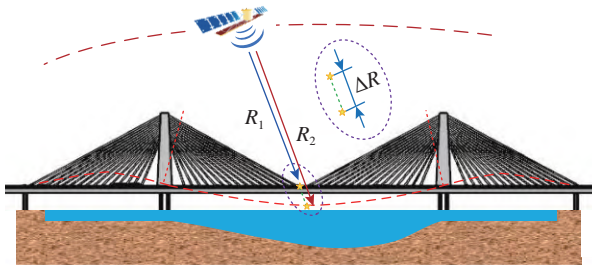


图 1 InSAR 测量原理

Fig. 1 Measurement principle of InSAR

表 1 变形监测技术对比

Table 1 Comparison of displacement monitoring technologies

测量方式	精密水准	摄影测量	GNSS	LiDAR	InSAR
目标特征	点	三维立体	点	点云	面
空间覆盖	小	较小	小	较小	大
精度	mm	cm	mm	cm	mm
周期	长	较短	短	较短	短
作业条件	天气影响	天气影响	全天候	全天候	全天候
成本	高	较高	较高	较高	低

1.1 SAR 数据可用性

SAR 数据的可用性取决于 SAR 传感器扫描模式、分辨率、SAR 卫星重访周期 (一个或多个具有相同特征的传感器对同一区域进行干涉观测的时

间间隔)、轨道、波段和极化方式等。典型的在役 SAR 成像系统包括 COSMO-SkyMed (X 波段)、TerraSAR-X 和 TanDEM-X (X 波段)、Sentinel-1 (C 波段)、Radarsat-2 (C 波段) 和 ALOS-2 (L 波段)。上述 SAR 卫星影像数据利用遥感数据平台 (NASA LAADS、EESA、USGS 等) 进行获取, 通过桥梁经、纬度选择区域影像范围, 设定卫星成像时间区间, 提交数据申请审核后获得相应卫星影像。一般而言, 中、低分辨率 SAR 成像系统的数据覆盖我国全境范围 (如 Sentinel-1A/B), 高分辨率影像的覆盖范围较小。

1.2 影像配准

卫星沿重复轨道获取同一区域 SAR 影像时, 受到时空定位以及飞行轨道的影响, 同名像点对坐标会发生偏移。影像配准是计算构成干涉对的两幅 SAR 影像同名点的坐标映射关系, 使同名点对应于同一分辨单元^[29]。影像配准的方法主要包括基于灰度的匹配方法、基于特征的匹配方法以及基于深度学习的匹配方法。

基于灰度的配准方法通过优化图像的灰度相似度来确定图像间的变换参数, 主要包括互相关法、互信息法以及基于变换域的配准方法。互相关法根据灰度相近关系判断不同图像像素格网的空间位置。FANG 等^[30] 采用 Voronoi 图分布优化算法和互相关法选择参考点, 考虑了参考点的相干性和空间分布, 提高了低相干区域或畸变严重的影像配准精度。互相关法对于灰度值的变化较为敏感, 不适用于灰度变化明显的影像配准。互信息法利用图像熵值计算变换参数, 适合异源影像配准, 具有较高的计算精度和抗噪能力, 但对影像重叠度的要求较高。基于变换域的图像配准方法是将图像从空间域变换到频率域并进行平移、旋转等处理, 该方法适用于小平移量和旋转及缩放的图像配准, 计算速度快、对噪声具有一定的抵抗力。

基于特征的匹配方法是根据图像局部显著性特征 (点或区域) 的相关性实现精确匹配。基于点特征的配准方法是针对不同影像的同名特征点, 通过尺度不变特征转换 (Scale-invariant feature transform, SIFT) 和加速鲁棒特征实现配准, 具有稳定的尺度旋转不变性以及抗噪声干扰鲁棒性, 适用于灰度差异较小的同源影像配准^[31]。基于特征区域的配准方法根据影像灰度信息构建相似性测度, 利用归一化互相关系数^[32-33]、互信息^[34]、

梯度^[35]等统计信息来完成配准,对外部环境变化具有较高的鲁棒性。然而,成像角度、尺度偏差可能导致异源影像同名点对出现误匹配。CHEN等^[36]根据 SAR 图像的几何信息消除了不同影像间的几何变换,结合信号杂波比阈值和幅值信息实现了配准点的自动检测。

深度学习方法通过多层卷积神经网络提取 SAR 图像结构、纹理以及语义等层级的深度特征,实现异源影像非线性关系的估计,具有较高的配准效率和准确性。YE 等^[37]基于卷积神经网络 (Convolutional neural networks, CNN) 特征,结合位置、尺度和方向的 SIFT 进行遥感图像配准。WANG 等^[38]采用 CNN 学习图像同名点对间的映射关系并根据匹配点计算图像配准的变换矩阵,配准精度提高了 2.4%~53.7%。KELANY 等^[39]利用尺度不变超分辨率方法生成了用于 CNN 学习的超分辨率图像,提出了基于机器学习的超分辨率算法。各类配准方法的对比列于表 2。

表 2 三种配准方法的对比
Table 2 Comparison of three registration methods

配准方法	原理	适用对象	复杂程度	不足	鲁棒性
基于灰度的匹配方法	判断灰度或者梯度等信息的相似性	同源影像	简单	计算量大,时间成本高	一般
基于特征的匹配方法	提取主辅影像点、线、面、边缘、轮廓等公共特征	异源影像	适中	算法复杂,耗时较长	较好
基于深度学习的匹配方法	学习图像块对与匹配标签的映射关系	同源影像	复杂	高分辨率 SAR 数据集成本高	较好

1.3 PS 点识别

早期, PS 点识别是基于 SAR 成像期间目标的雷达波散射稳定性和反射强度,通过单一阈值法(相干系数阈值^[40]、相位离差阈值^[41]、振幅离差阈值^[42])选择 PS 点。单一阈值法识别 PS 点时存在全局探测的盲目性,为解决此问题,龙四春等^[43]研究了时序相关系数阈值和振幅离差阈值的并集法以及交集法,结果表明提取桥梁等硬目标分布密集的区域,交集法具有稳健的效率和准确率。基于双重阈值的 PS 点识别方法,可以有效提高 PS 点的自动探测效率和可靠性。此外,桥梁的 SAR 侧视成像会出现叠掩、阴影等几何畸变,散射体相位发生叠加。WANG 等^[44]基于主成分分析法和盲源分离技术对混合相位进行了分离,通过样本协方差矩阵主特征向量验证了分离结果的合理性。

目前,对于后向散射系数较低的目标,如桥

梁中的钢筋混凝土结构,基于信号强度或相位稳定性识别到的 PS 点数量有限,常采用 SAR 层析技术 (TomoSAR) 进行 PS 点探测,有效提高了影像单元内 PS 点的识别密度^[45-46]。ANSARI 等^[47-48]基于幅度时间序列的统计特性,利用信噪比衡量相位的相干性,测试区域内 PS 点覆盖率达 85.2%,但信噪比受邻域像元噪声影响明显,造成计算值偏大。此外,雷达成像极化模式对观测目标的回波信号强度影响明显,较单极化干涉图的 PS 点识别数量,基于全极化 SAR 干涉图的 PS 点识别数量提高了 80%~280%^[49]。

1.4 相位解缠

相位解缠是确定真实干涉相位和实际观测相位之间存在的整周期数差异 ($2k\pi$, k 为整数),从干涉图缠绕相位中恢复真实干涉相位的过程。在无噪条件下,对缠绕相位梯度进行积分可以实现真实干涉相位的解缠。然而,雷达阴影、干涉相位噪声以及相位不连续等问题,使得相位解缠具有一定的挑战性。现有的干涉图相位解缠算法,主要包括路径跟踪类方法、最小范数类方法、最优估计类方法以及深度学习方法。

路径跟踪方法通过寻找最优化的积分路径,利用相邻像元相位梯度积分实现相位解缠^[50]。该算法将噪声进行区域限制,防止局部相位误差传递至整个区域,计算速度较快。同时,该算法受解缠图像相干性的影响明显,在相干性较高的区域内路径跟踪算法会得到精确的解缠结果,在噪声严重、相干性较低的区域,会形成无法解缠的“相位孤岛”。

最小范数类方法通过无权或加权最小二乘法实现解缠相位梯度与真实相位梯度差异最小化^[51]。作为一种全局算法,该算法具有稳定性好、解缠效率高的优点,但由于此算法穿过残差点,容易造成相位误差全局传递,亦易导致干涉图解缠相位出现过平滑问题,带来较为严重的相位解缠误差。

最优估计类方法通过最小化解缠相位和缠绕相位的离散偏导数之差,限制了低质量区域相位误差的传递,主要方法包括网络流算法和卡尔曼滤波法^[52-53]。网络流算法将最小化问题转化为求解最小费用流的网络优化问题,有效降低了相位解缠算法的时空复杂度。面对复杂的桥梁结构,最小费用流法 (Minimum cost flow, MCF) 在桥塔附近的残差点会产生错误连接,区域枝切线穿过桥面,造成较大的相位解缠误差。卡尔曼滤波法利

用干涉图相邻像元相位之间的约束关系,将干涉图相位展开问题转化为贝叶斯理论框架下的状态估计问题^[54]。目前,扩展卡尔曼滤波^[55]、无迹卡尔曼滤波^[56]、平方根容积卡尔曼滤波^[57]等相继运用到相位解缠算法中,具有较强的抗相位噪声性能,提高了低信噪比干涉图相位解缠的精度,但时间耗费代价较大,难以实现实时处理。

基于深度学习的相位解缠方法利用神经网络精确描述缠绕相位和真实解缠相位的非线性映射关系,避免了相干噪声和伪信号造成的相位数据不连续、解缠相位的离散相位梯度估算值不一致问题^[58-59],平衡了相位解缠的精度和效率。SICA等^[60]基于CNN搭建图像语义分割框架,将干涉相干性作为输入特征,利用相位残差进行CNN训练,提高了相位一致性和局部精度。另外一些学者通过神经网络学习全局相位特征和相邻像素之间的相位梯度,结合传统解缠方法,从地形特征和不同程度噪声缠绕的相位图像中估算正确的相位梯度^[61-62]。相比基于语义分割的解缠方法,该方法的解缠精度较高,但是解缠步骤较为繁琐,且准确性依赖于所选传统方法的性能。

1.5 变形恢复

PS目标变形恢复包括线性变形参数求解(相位解缠)和大气与非线性变形时间序列分离。其中,非线性分量是基于差分干涉相位成分的时空特性,采用变形相位模型和滤波技术估计目标点变形信息。

基于非线性变形、大气及噪声的时空特性,PS-InSAR技术常通过滤波方法、经验模态分解(Empirical mode decomposition, EMD)分离非线性变形相位以及大气相位。COLESANTI等^[63]对PS点时序残留相位依次进行高通、低通滤波,消除失相关噪声相位,获得PS点的大气相位。基于EMD的信号分离方法是对时序残留相位中不同尺度的信号逐级分解,高频、低频信号分别对应大气相位和非线性变形相位^[64]。然而,上述方法忽略了地形因素对大气相位的影响,分离准确率有待提高。

为提高大气相位估算精度,部分学者提出了地面气象信息模型,利用地面气象观测数据(温度、湿度、气压等)估计对流层延迟,去除InSAR测量结果中的大气成分。FERRETTI等^[65]提出了大气相位与高程等因素的函数关系,剔除了30%的大气相位。ZEBKER等^[66]利用对流层折射修正模型估计大气相位。BONFORTE等^[67]利用

Saastamoinen模型和地面气象观测数据估计天顶湿延迟,计算结果与全球定位系统(Global positioning system, GPS)数据的解算结果一致。然而,气象观测站空间分布稀疏、相邻两次探测时间间隔过长、大气水汽分布信息匮乏等因素,限制了地面气象信息模型的进一步发展。

数值大气模型是利用SAR成像时刻的大气参量对干涉结果进行大气校正。随着数值大气模式的发展,UM^[68]、MANAL^[69]、MM5^[70]、WRF^[71]等模型摆脱了气象观测站有限、监测区域多云等限制,生成分辨率为公里级别的二维大气状态,能够有效满足InSAR监测的精度需求,但大气延迟计算精度依赖于初始条件和边界条件的设置,计算结果稳定性有待进一步提高。

2 PS-InSAR 桥梁结构变形监测

2.1 LOS向变形监测

大跨度桥梁结构变形是评估结构安全性能的重要指标。PS-InSAR技术通过识别桥梁各构件上散射特性相对稳定、回波信号相对较强的PS点作为观测点,获取毫米量级精度的LOS向变形。

针对反射特性较弱的桥梁,通过布置人造角反射器并根据SAR传感器的飞行姿态进行定姿,可以有效提高回波信号强度。部分学者结合PS-InSAR技术和角反射器(Corner reflector, CR)进行桥梁变形监测,并与全自动全站仪(Automated total stations, ATS)的测量结果进行对比,结果表明桥梁变形趋势与温度变化高度相关,两者测量误差约为10 mm^[72-73]。

桥梁墩台地基的稳定性受到工程地质、水文地质、土壤的物理性质等影响,通过监测桥梁周围的地表变形,可以有效追溯桥梁结构变形的原因,对于保障基础设施稳定安全运营具有重要的现实意义。SOUSA等^[74]采用PS-InSAR技术对1995年—2001年52景SAR影像进行处理,成功追溯了葡萄牙北部Hintze-Ribeiro大桥的历史沉降信息,研究表明该桥梁倒塌前的最大变形速率达到20 mm/a。PS-InSAR技术能够快速提供高精度、高空间分辨率以及大范围空间连续覆盖的桥梁变形监测结果。

2.2 三维变形反演

PS-InSAR技术获取的是桥梁结三维位移分量在雷达LOS向投影的一维变形信息^[75]。基于单一影像数据源的InSAR监测数据难以反映桥梁三维

变形, 利用雷达干涉数据反演 PS 点的空间变形信息是桥梁结构变形监测中亟需解决的问题, 主要方法包括 GNSS 辅助建模和多平台立体建模。

GNSS 辅助建模是将先验数据作为辅助控制点完成三维空间建模^[76]。罗海滨等^[77]以 GNSS 提供的东西和南北向变形作为约束条件, 利用几何解析关系获得监测点的竖直向变形。王霞迎等^[78]将内插 GPS 数据获得的南北向变形场信息与 InSAR 监测数据进行集成和融合, 提取目标区域的三维变形场。该方法计算简便, 有效避免了 InSAR 测量对南北向变形不敏感带来的精度问题, 但不适用于复杂地形。基于 GPS 和 InSAR 数据, 采用最小二乘法可以实现三维变形的反演。GUO 等^[79]基于 Gibbs 能量方程建立了融合 GNSS 与 InSAR 数据的三维变形场能量函数模型, 利用最小二乘法获得目标函数的反演结果。GUGLIELMINO 等^[80]利用加权最小二乘法融合 GPS 和差分干涉测量 (Differential InSAR, DInSAR) 数据, 基于弹性理论建立了三维位移分量与观测值的矩阵线性方程。GPS 和地面水准测量等方法可以有效修正三维变形反演的整体偏差, 弥补了投影关系对 PS-InSAR 变形测量精度的制约。

基于多平台 SAR 数据立体建模是借助不同卫星平台轨道和侧视角之间的差异, 构建空间立体测量关系。MILILLO 等^[81]基于 COSMO-SkyMed 和 Sentinel-1A/B 的 SAR 卫星影像, 采用 PS-InSAR 技术和马尔可夫链蒙特卡罗方法求解桥面及支座的三维变形。HU 等^[82]利用 DInSAR 技术处理低轨交叉航向的地球同步轨道合成孔径雷达数据, 通过定位精度因子最小化提高了桥梁结构三维变形计算精度。此外, 侧视角差异较大的升、降轨数据多用于三维变形解算^[83]。目前, 基于多平台、多轨道 SAR 数据的三维变形场反演仍会导致不同程度的精度与分辨率损失, 主要原因包括: 水平位移的求解精度难以达到与 LOS 向近似的精度水平; 异源 SAR 数据的获取时间和重返周期存在差异, 导致变形解算过程出现秩亏问题; 垂直向投影测量精度受到入射角的影响, 如入射角为 33.8° 时, 垂直向位移速率误差达到 67% ^[84]。

3 PS-InSAR 技术桥梁结构变形监测影响因素

采用 PS-InSAR 技术监测桥梁变形时, 测量精度会受到各种因素的影响从而导致测量误差。本

节从桥梁方向和表面散射特性、相位解缠精度、热膨胀模型三个方面进行分析并阐述其解决方案。

3.1 桥梁方向和表面散射特性

PS-InSAR 技术的变形测量精度受到目标桥梁方向以及表面散射特性的影响。该技术对不同方位测点变形的敏感性受到卫星运行轨道、航向角以及雷达侧视角的影响, 由大到小依次为: 垂直向、距离向以及方位向^[85]。因此, 桥梁方向接近卫星极轨飞行方向时, PS-InSAR 技术测量结果精度较低。通过多平台 InSAR 数据反演桥梁三维变形, 东西向和垂直向的变形恢复精度较高, 而南北向受到投影关系的影响, 其精度难以保证, 容易对桥梁变形造成误判甚至错判。

桥梁的 PS 点数量会影响迭代回归或网平差计算的精度。桥梁材料是影响 PS 点的重要因素, 如钢桥的回波反射能力明显优于钢筋混凝土桥^[86], 更容易获得密集的 PS 点。当桥梁的自然散射点不足时, 金属质地的护栏以及照明灯杆等硬目标也可以作为 PS 点。CUSSON 等^[87]将防撞护栏视作自然散射体, 获取了反映桥梁整体变形的高密度、高质量 PS 点。目前的研究中, 常通过布置人工 CR 来解决上述问题。CR 是用金属材料制成且与雷达波的入射方向保持最佳的夹角 (根据 SAR 卫星入射角以及 SAR 数据获取模式等参数确定), 其反射强度远大于周围物体, 可视为点状目标的永久散射体。此外, CR 用于 PS 点的加密, 可以有效提高桥梁的固有散射能力, 降低 PS-InSAR 技术对 SAR 图像的需求。

3.2 相位解缠精度

大跨桥梁上部结构 (桥塔、拱圈、拉索等) 对桥面产生遮挡, SAR 卫星探测到的 PS 点混叠严重且存在较大的高程相位变化, 极易出现孤立残差点, 相位缠绕问题突出。基于 Delaunay 稀疏三角网络的 MCF 算法是目前 PS-InSAR 技术中常用的相位解缠方法。该方法可以有效消除相位噪声, 计算效率较高。MCF 算法利用枝切线建立路径, 分割极性不为零的残差点, 但孤立残差点的存在会导致连接正、负残差点的枝切线穿过桥面, 容易造成局部解缠误差并扩散到全桥范围。类似地, 路径跟踪算法和最优化方法等未考虑桥梁具体结构特征, 导致残差点出现错误连接, 在处理大型桥梁时存在一定难度。段伟等^[88]提出了构建约束三角网络进行残差点分块, 利用二分图最优权匹配

方法获取最优的正负残差点匹配结果,桥梁线状区域相位解缠的精度明显优于 MCF。然而,桥面残差点分布复杂,该方法尚无法完全避免枝切线穿过桥面。同时, Delaunay 三角网格形态易包含高相位梯度的边缘,难以满足相位连续性假设。

3.3 热膨胀模型

对于季节性变形特征显著的桥梁结构, PS-InSAR 技术时序变形建模的核心问题是如何考虑模型中的结构热膨胀分量。目前,常用的热膨胀分量计算方法包括周期模型、温度模型。

周期模型是基于结构变形的先验信息(变形与季节性相关程度),考虑热效应年振幅的热膨胀计算方法。FORNARO 等^[89]通过非线性最小二乘优化算法估计周期模型(正弦函数)的幅值、周期和相位偏移,研究表明桥梁纵向变形与该模型的相关性达到 0.96。GERNHARDT 等^[90-91]研究表明周期模型的热效应振幅与结构高度线性相关,但该模型参数计算的精度依赖于 SAR 图像数量、时空基线以及成像时刻温差的相关性。

温度模型是考虑桥梁材料热膨胀系数和 SAR 成像时刻温差的线性表达式。CUSSON 等^[92]基于温度模型和欧拉-伯努利梁理论,提出了不同跨度桥梁结构垂直方向和纵向的热膨胀计算方法。黄其欢等^[93]建立了 InSAR 桥梁纵向位移和结构温度的线性相关模型,计算结果与支座位移实测结果吻合良好。LAZECKY 等^[94]利用干涉图残余相位与大气温度的相关性校正桥梁表面温度,通过温度模型获得热膨胀变形。为了提高桥梁热膨胀解算精度,部分学者根据目标桥梁变形特征对热膨胀系数进行修正。QIN 等^[95]利用热膨胀幅值修正热膨胀系数,通过温度变形代替 InSAR 时序模型中的残留相位,提高了 InSAR 桥梁时序变形的解算精度。QIN 等^[96]基于拱桥结构热膨胀特征对热膨胀系数进行了改进,通过吊杆竖向变形与温度差异的线性回归分析,实现了桥梁热膨胀的定量建模。

上述热膨胀模型可以有效提高桥梁热膨胀的拟合优度,但采用的温度值均为环境温度,忽略了桥梁温度场与大气温度的差异,如何评价各温度模型的计算精度还有待进一步研究。

4 PS-InSAR 技术桥梁结构变形监测应用实例

本文以某六跨连续钢桁梁高速铁路拱桥为研

究对象(图 2),选用 2012 年 6 月 21 日—2019 年 9 月 25 日覆盖该大桥的 107 景意大利 COSMO-SkyMed 卫星降轨影像为数据源,极化方式为 HH 极化,获得了全桥 19467 个相干目标的变形信息,实现了全桥 LOS 向变形的监测,精度达到亚毫米级。关键技术主要包括:



图 2 桥梁整体布置 /m
Fig. 2 Bridge overall layout

1) 影像配准: 计算所有雷达影像像对之间的时空基线,选择时间和空间基线居中的一景作为主影像(2018/2/14)。将其他 106 幅影像配准到主影像网格内。处理过程中分别采用了基于卫星轨道数据、像素级、亚像素级的配准方法,配准精度在 0.1 个像素之内,满足高精度变形反演的需求。

2) PS 点识别: 该桥为连续钢桁梁拱桥,金属质地的结构对雷达波保持较强且稳定的散射特性,利用目标点的幅度离差信息选择 PS 候选点。

3) 相位解缠: 在空间二维的图像域,建立 Delaunay 三角网格,采用基于范数法的 MCF 方法进行相位解缠,恢复目标点的真实相位。在时间一维域,基于干涉图生成过程中建立的网格,利用 MCF 方法实现相位解缠。

4) 变形恢复: 采用最小二乘法补偿大气和轨道误差相位,对 SAR 图像的像素点进行逐点分析,通过时间相关系数门限(0.66)筛选最终的 PS 点,反演其变形速率。

图 3 为该桥所在区域高分辨率 SAR 强度影像,可以看出桥梁相干特性良好,PS 点覆盖全桥。图 4 基于 Google earth 进行桥梁结构变形三维可视化展示,中部支座 4# 变形较小,1# 支座~2# 支座和 6# 支座~7# 支座处变形达到最大且方向相反,究其原因,7# 支座为固定铰支座,其余支座均为活动铰支座。如图 5 所示,PS 点的分布受到桥梁散射能力的影响,具有不均匀的特征。采用反距离加权插值法,针对搜索邻域内的数据点进行处理,获得各桥墩中间支座的时序变形。如图 6 所示,在桥梁温度场作用下,变形由 4# 支座分别向 1# 支座和 7# 支座逐渐增大。图 7 为大桥历年整体变形对比。温度是影响钢桁梁拱桥变形的重要因素,结合 SAR 成像时刻的日平均气温(表 3),分析历年首、末幅 SAR 影像成像温度差异,结果表明:2017 年、

2018年的桥梁 SAR 影像成像温差不明显(分别为 1℃和 0℃),桥梁整体变形较小。2012年—2016年以及 2019年的桥梁 SAR 影像成像温差较明显(温差达 5℃以上),桥梁整体变形较大。



图3 SAR 强度均值图
Fig. 3 SAR intensity mean map

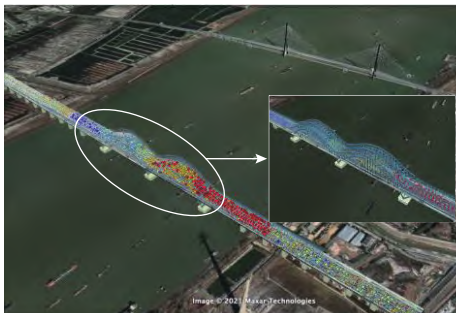


图4 桥梁变形 3D 可视化
Fig. 4 3D visualization of bridge deformation

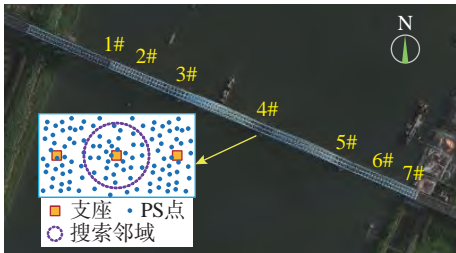


图5 支座布置
Fig. 5 Bearings layout

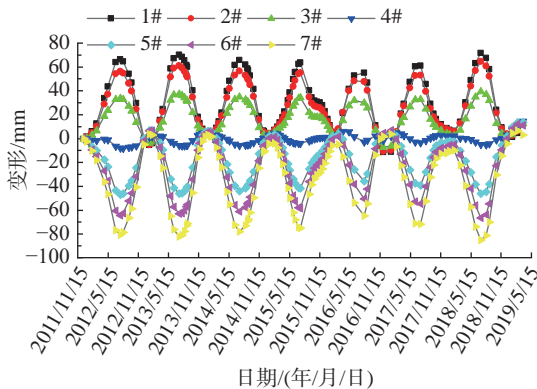


图6 支座变形时间序列
Fig. 6 Time series of bearing deformation

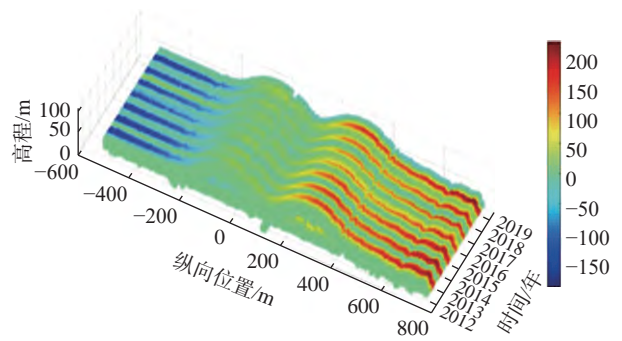


图7 2012年—2019年大桥变形 /mm
Fig. 7 Bridge deformation in 2012-2019

表3 历年 SAR 成像气温
Table 3 SAR imaging temperature over the past years

第一幅SAR影像		最后一幅SAR影像		温差/(℃)
日期/(年/月/日)	气温/(℃)	日期/(年/月/日)	气温/(℃)	
2012/6/21	27	2012/12/30	-2	29
2013/1/28	8	2013/12/21	1	7
2014/1/19	7	2014/12/21	2	5
2015/1/17	3	2015/12/19	8	-5
2016/1/8	4	2016/12/9	10	-6
2017/2/7	7	2017/12/12	6	1
2018/1/13	3	2018/12/11	3	0
2019/1/12	4	2019/9/25	25	-21

5 结论和研究展望

5.1 结论

PS-InSAR 技术为实现高精度、高空间分辨率以及时空连续覆盖的大跨度桥梁结构变形监测提供了新思路,对于保障桥梁稳定安全运营具有重要的现实意义。本文系统梳理了 PS-InSAR 技术的基本原理,阐述了各项关键技术的特点和适用范围。详细总结了该技术在桥梁 LOS 向变形监测和三维位移反演中的最新研究成果,分析了引起桥梁变形测量误差的影响因素并给出相应解决措施。最后通过某钢拱桥的 PS-InSAR 变形监测实例验证了该技术的可行性。

(1) PS-InSAR 技术是基于覆盖同一区域的 SAR 影像时间序列识别具有高信噪比相位观测量的 PS 点,有效克服了时空失相关的影响,提升了桥梁变形测量的准确性和可靠性。InSAR 数据处理过程中影像配准精度与效率、PS 点密度与识别效率、相位解缠鲁棒性与效率相互制约,限制了该技术的进一步发展。

(2) 对于不同的桥梁 SAR 影像,PS-InSAR 技术中影像配准、PS 点识别、相位解缠、变形恢复应根据各种方法的特点进行合理选择,结合桥梁

SAR 影像性质(同源、异源)、桥梁固有散射能力(永久散射点数量)、桥梁结构特征等进行综合判断。本文详细综述了各项关键技术桥梁变形监测中的应用现状和最新成果

(3) 基于多景 SAR 影像的 PS-InSAR 技术可提取两次成像期间桥梁目标点沿雷达 LOS 向的变形信息, 采用人造 CR 可以有效改善桥梁固有 PS 点的密度, 克服该技术对不同方位变形的敏感性差异, 精度可达毫米级。对于目标点空间变形的监测, 基于单一卫星平台的 GNSS 辅助建模是较准确、高效的桥梁空间变形反演方法, 但是在先验数据匮乏或数据源有限的情况下, 桥梁三维变形的恢复精度还有待提升。

(4) 温度作用是影响大跨桥梁结构长期变形的主要环境荷载, 热膨胀会严重干扰 PS-InSAR 技术提取桥梁结构变形的精度。周期模型考虑了结构变形和季节变化的强相关性, 应对比分析不同年期的相关性差异, 选择合理的监测数据量进行建模。温度模型将环境温度视为结构温度, 忽略了大气温度和桥梁温度场的差异, 计算精度难以保证, 今后的研究工作应利用结构温度场修正温度模型, 进一步提高温度模型的可靠性。

5.2 研究展望

(1) PS-InSAR 技术是基于干涉原理进行桥梁结构的变形观测, 目前多应用于刚度较大的大跨度桥梁。采用该技术对大跨度柔性桥梁的变形进行监测, 除温度变形外还应考虑风荷载以及水文地质条件等因素。因此, 如何实现复杂环境下大跨度桥梁变形的高精度测量, 拓宽 PS-InSAR 技术的应用范围, 是未来重要的发展方向。

(2) 目前桥梁结构三维变形多通过 GNSS 辅助建模或多平台立体建模进行解算, 获取较为准确的变形信息。但面对 GPS 布置数量较少、SAR 数据源不足的研究区域, 上述方法难以得到高精度的三维变形结果。因此, 如何借助 SAR 卫星侧视成像几何关系实现桥梁结构纵向、横向以及垂直向的变形反演, 是目前面临的主要挑战之一。

(3) PS-InSAR 桥梁结构变形测量主要以高分辨 SAR 影像为基础(最大分辨率达 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$), 获取较精确的结构变形。但是 TerraSAR-X、TanDEM-X 以及 COSMO-SkyMed 等高分辨率 SAR 影像数据有限, 价格高昂, 覆盖范围多为城市区域, 郊区等偏僻地区影像资源匮乏, 如何摆脱高分辨率数

据的限制是 PS-InSAR 技术未来重要研究方向。

(4) 目前干涉相位中桥梁结构温度变形的计算仅考虑了均匀温度作用。实际工程中, 桥梁温度场的分布受到太阳辐射、气温以及风速等影响, 包括均匀温度和温度梯度。未来的研究需要根据温度梯度模型以及温差等关键参数进一步确定桥梁温度作用, 提高桥梁结构热膨胀的计算精度。

参考文献:

- [1] 交通运输部. 2021年交通运输行业发展统计公报 [EB/OL]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202205/t20220524_3656659.html, 2020-05-25. Ministry of Transport of the People's Republic of China. 2021 Annual statistical report on the development of the transportation industry [EB/OL]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202205/t20220524_3656659.html, 2020-05-25. (in Chinese)
- [2] 茹继平, 李杰. 结构工程基础研究20年——来自国家自然科学基金委员会的报告[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(2): 1—9. RU Jiping, LI Jie. Twenty years for fundamental researches of structural engineering: A report from national natural science foundation of China [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(2): 1—9. (in Chinese)
- [3] 杨永斌, 王志鲁, 史康, 等. 基于车辆响应的桥梁间接测量与监测研究综述[J]. 中国公路学报, 2021, 34(4): 1—12. YANG Yongbin, WANG Zhilu, SHI Kang, et al. Research progress on bridge indirect measurement and monitoring from moving vehicle response [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(4): 1—12. (in Chinese)
- [4] WONG K Y, CHAN W Y K, MAN K L. Monitoring of Wind Load and Response for Cable-Supported Bridges in Hong Kong [C]// Proceedings of SPIE 4337, Health Monitoring and Management of Civil Infrastructure Systems. Newport Beach: SPIE, 2001: 292—303.
- [5] 李惠, 欧进萍. 斜拉桥结构健康监测系统的设计与实现(I): 系统设计[J]. 土木工程学报, 2006, 39(4): 39—44. LI Hui, OU Jinping. Design and implementation of health monitoring systems for cable-stayed bridges (I): Design methods [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(4): 39—44. (in Chinese)
- [6] 李爱群, 缪长青, 李兆霞, 等. 润扬长江大桥结构健康监测系统研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2003, 33(5): 544—548. LI Aiqun, MIAO Changqing, FENG Zhaoxia, et al. Health monitoring system for the Runyang Yangtse River Bridge [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2003, 33(5): 544—548. (in Chinese)
- [7] SUN L M, DAN D H, SUN Z. Health monitoring system for Donghai bridge in shanghai [C]// Proceedings of Asia-Pacific Workshop on Structural Health Monitoring. Yokohama: Keio University, 2006: 280—287.
- [8] 刘志强, 李娜, 郭健, 等. 西堠门大桥结构健康监测系统的设

- 计与实现(II): 系统实现[J]. 中国工程科学, 2010, 12(7): 101 — 106.
- LIU Zhiqiang, LI Na, GUO Jian, et al. Design and implementation of structural monitoring systems for Xihoumen Bridge (II): Implementations [J]. Strategic Study of CAE, 2010, 12(7): 101 — 106. (in Chinese)
- [9] 雷雨恒, 任亮, 李宏男, 等. 基于逆有限元法的形状还原传感阵列及桥梁挠度监测试验[J]. 工程力学, 2022, 39(11): 89 — 96.
- LEI Yuheng, REN Liang, LI Hongnan, et al. Shape-sensing array based on inverse finite element method and experiment of bridge deflection monitoring [J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(11): 89 — 96. (in Chinese)
- [10] YE X W, YI T H, DONG C Z, et al. Vision-based structural displacement measurement: System performance evaluation and influence factor analysis [J]. Measurement, 2016, 88: 372 — 384.
- [11] 朱前坤, 崔德鹏, 杜永峰. 基于网络摄像机的桥梁挠度非接触识别[J]. 工程力学, 2022, 39(6): 146 — 155.
- ZHU Qiankun, CUI Depeng, DU Yongfeng. Non-contact identification of bridge deflection based on network camera [J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(6): 146 — 155. (in Chinese)
- [12] 陈伟民, 李存龙. 基于微波雷达的位移/距离测量技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(9): 1251 — 1265.
- CHEN Weimin, LI Cunlong. Radar-Based displacement/distance measuring techniques [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(9): 1251 — 1265. (in Chinese)
- [13] VARBLA S, ELLMANN A, PUUST R. Centimetre-range deformations of built environment revealed by drone-based photogrammetry [J]. Automation in Construction, 2021, 128: 103787.
- [14] JIANG Q, ZHONG S, PAN P Z, et al. Observe the temporal evolution of deep tunnel's 3D deformation by 3D laser scanning in the Jinchuan No. 2 mine [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 97: 103237.
- [15] 熊琛, 岑成昱, 周海俊, 等. 基于激光-位置传感器的简支梁桥挠度测量方法研究[J]. 工程力学, 2025, 42(1): 223 — 232.
- XIONG Chen, CEN Chengyu, ZHOU Haijun, et al. Study on deflection measurement of simply supported girder bridges based on laser-position sensitive detectors [J]. Engineering Mechanics, 2025, 42(1): 223 — 232. (in Chinese)
- [16] YI T H, LI H N, GU M. Recent research and applications of GPS-based monitoring technology for high-rise structures [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2013, 20(5): 649 — 670.
- [17] HANSEN R F. Satellite radar interferometry for deformation monitoring: A priori assessment of feasibility and accuracy [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2005, 6(3/4): 253 — 260.
- [18] YANG K, YAN L, HUANG G M, et al. Monitoring building deformation with InSAR: Experiments and validation [J]. Sensors, 2016, 16(12): 16122182.
- [19] DAI K R, LIU G X, LI Z H, et al. Monitoring highway stability in permafrost regions with X-band temporary scatterers stacking InSAR [J]. Sensors, 2018, 18(6): 18061876.
- [20] YANG Q, KE Y H, ZHANG D Y, et al. Multi-scale analysis of the relationship between land subsidence and buildings: A case study in an eastern Beijing urban area using the PS-InSAR technique [J]. Remote Sensing, 2018, 10(7): 10071006.
- [21] CHANG L, DOLLEVOET R B J, HANSEN R F. Nationwide railway monitoring using satellite SAR interferometry [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017, 10(2): 596 — 604.
- [22] MACCHIARULO V, MILILLO P, BLENKINSOPP C, et al. Monitoring deformations of infrastructure networks: A fully automated GIS integration and analysis of inSAR time-series [J]. Structural Health Monitoring, 2022, 21(4): 1849 — 1878.
- [23] 裴媛媛, 廖明生, 王寒梅. 时间序列SAR影像监测堤坝形变研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, 38(3): 266 — 269.
- PEI Yuanyuan, LIAO Mingsheng, WANG Hanmei. Monitoring levee deformation with repeat-track spaceborne SAR images [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2013, 38(3): 266 — 269. (in Chinese)
- [24] NECULA N, NICULIȚĂ M, FIASCHI S, et al. Assessing urban landslide dynamics through multi-temporal InSAR techniques and slope numerical modeling [J]. Remote Sensing, 2021, 13(19): 13193862.
- [25] WU S B, YANG Z F, DING X L, et al. Two decades of settlement of Hong Kong International Airport measured with multi-temporal InSAR [J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 248: 111976.
- [26] REINDERS K J, GIARDINA G, ZURFLUH F, et al. Proving compliance of satellite InSAR technology with geotechnical design codes [J]. Transportation Geotechnics, 2022, 33(6): 100722.
- [27] XU C J, XU B, WEN Y M, et al. Heterogeneous fault mechanisms of the 6 October 2008 M_w 6.3 Dangxiong (Tibet) earthquake using interferometric synthetic aperture radar observations [J]. Remote Sensing, 2016, 8(3): 8030228.
- [28] GABRIEL A K, GOLDSTEIN R M, ZEBKER H A. Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry [J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94(7): 9183 — 9191.
- [29] SCHEIBER R, MOREIRA A. Coregistration of interferometric SAR images using spectral diversity [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(5): 2179 — 2191.
- [30] FANG D S, LV X L, YUN Y, et al. An InSAR fine registration algorithm using uniform tie points based on voronoi diagram [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017, 14(8): 1403 — 1407.
- [31] SCHWIND R SURI S, REINARTZ P, et al. Applicability

- of the SIFT operator to geometric SAR image registration [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(8): 1959 – 1980.
- [32] 朱明, 姚强, 唐俊, 等. 超图约束和改进归一化互相关方法相结合的图像配准算法[J]. *国防科技大学学报*, 2019, 41(3): 50 – 55.
ZHU Ming, YAO Qiang, TANG Jun, et al. Image registration algorithm with hypergraph constraint and improved normalized cross correlation method [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2019, 41(3): 50 – 55. (in Chinese)
- [33] LAN S, GUO Z H, YOU J. Pre-registration of translated/distorted fingerprints based on correlation and the orientation field [J]. *Information Sciences*, 2020, 520: 292 – 304.
- [34] 王丽, 孙丰荣, 王奕琨, 等. 基于互信息的颅脑MR影像序列的三维配准[J]. *计算机工程与应用*, 2011, 47(31): 160 – 163.
WANG Li, SUN Fengrong, WANG Yikun, et al. 3D registration of MR image sequence of human brain based on normalized mutual information [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2011, 47(31): 160 – 163. (in Chinese)
- [35] GARCÍA E, DIEZ Y, DIAZ O, et al. Breast MRI and X-ray mammography registration using gradient values [J]. *Medical Image Analysis*, 2019, 54: 76 – 87.
- [36] CHEN Z W, ZHANG L, ZHANG G. An improved InSAR image co-registration method for pairs with relatively big distortions or large incoherent areas [J]. *Sensors*, 2016, 16(9): 16091519.
- [37] YE F M, SU Y F, XIAO H, et al. Remote sensing image registration using convolutional neural network features [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2018, 15(2): 232 – 236.
- [38] WANG S, QUAN D, LIANG X F, et al. A deep learning framework for remote sensing image registration [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, 145: 148 – 164.
- [39] KELANY K A H, BANIASADI A, DIMOPOULOS N, et al. Improving InSAR image quality and co-registration through CNN-based super-resolution [C]// *Proceedings of 2020 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*. Seville: IEEE, 2020: 1 – 5.
- [40] COSTANTINI M, FALCO S, MALVAROSA F, et al. Persistent scatterer pair interferometry: Approach and application to COSMO-SkyMed SAR data [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(7): 2869 – 2879.
- [41] 王彦兵, 王聪, 赵亚丽, 等. 基于ROC曲线的永久散射体识别最佳阈值定量筛选[J]. *遥感学报*, 2021, 25(10): 2083 – 2094.
WANG Yanbing, WANG Cong, ZHAO Yali, et al. Quantitative determination of the optimal threshold of permanent scatterer based on ROC curve [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(10): 2083 – 2094. (in Chinese)
- [42] 罗小军, 黄丁发, 刘国祥. 时序差分雷达干涉中永久散射体的自动探测[J]. *西南交通大学学报*, 2007, 42(4): 414 – 418.
LUO Xiaojun, HUANG Dingfa, LIU Guoxiang. Automated detection of permanent scatterers in time serial differential radar interferometry [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2007, 42(4): 414 – 418. (in Chinese)
- [43] 龙四春, 李陶, 冯涛. 永久散射体点目标提取方法研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2011, 31(4): 144 – 148.
LONG Sichun, LI Tao, FENG Tao. Study on selection of PS point targets [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2011, 31(4): 144 – 148. (in Chinese)
- [44] WANG Y Y, ZHU X X. Robust blind scatterer separation in multibaseline InSAR [C]// *Proceedings of 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Fort Worth: IEEE, 2017: 3810 – 3813.
- [45] DĂNIȘOR C, FORNARO G, DATCU M. Applications of SAR tomography on persistent scatterers detection, based on beam-forming filtering [C]// *Proceedings of 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Beijing: IEEE, 2016: 1428 – 1431.
- [46] FORNARO G, VERDE S, REALE D, et al. CAESAR: An approach based on covariance matrix decomposition to improve multibaseline-multitemporal interferometric SAR processing [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(4): 2050 – 2065.
- [47] ANSARI H, ADAM N, BRCIC R. Amplitude time series analysis in detection of persistent and temporal coherent scatterers [C]// *Proceedings of 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Quebec City: IEEE, 2014: 2213 – 2216.
- [48] SHALEV A, YAGEV A, AUGUST Y, et al. Persistent scatterers detection in open area in high resolution SAR imagery—case study: Sendai, Japan [C]// *Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems*. Tel Aviv: IEEE, 2013: 1 – 5.
- [49] ISHITSUKA K, MATSUOKA T, TAMURA M. Persistent scatterer selection incorporating polarimetric SAR interferograms based on maximum likelihood theory [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(1): 38 – 50.
- [50] LI F F, DING C B, ZHANG Y T, et al. Airborne InSAR interferometric phase analysis, unwrapping method, and fast implementation in low coherence areas [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 13: 5241 – 5250.
- [51] 廖明生, 林琿. 雷达干涉测量——原理与信号处理基础[M]. 北京: 测绘出版社, 2003: 96 – 106.
LIAO Mingsheng, LIN Hui. *Synthetic aperture radar interferometry—principle and signal processing* [M]. Beijing: Surveying and Mapping Publishing House, 2003: 96 – 106. (in Chinese)
- [52] CHEN C W, ZEBKER H A. Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: Intractability and two new algorithms [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2000, 17(3): 401 – 414.
- [53] 于勇, 王超, 张红, 等. 基于不规则网络下网络流算法的相位解缠方法[J]. *遥感学报*, 2003, 7(6): 472 – 477.

- YU Yong, WANG Chao, ZHANG Hong, et al. A phase unwrapping method based on network flow algorithm in irregular network [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2003, 7(6): 472 – 477. (in Chinese)
- [54] LOFFELD O, NIES H, KNEDLIK S, et al. Phase unwrapping for SAR interferometry —A data fusion approach by Kalman filtering [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 47 – 58.
- [55] XIE X M, ZENG Q N. Efficient and robust phase unwrapping algorithm based on unscented Kalman filter, the strategy of quantizing paths-guided map, and pixel classification strategy [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(31): 9294 – 9307.
- [56] XIE X M, LI Y H. Enhanced phase unwrapping algorithm based on unscented Kalman filter, enhanced phase gradient estimator, and path-following strategy [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(18): 4049 – 4060.
- [57] LUO X M, LI H T, DONG Z L, et al. InSAR phase unwrapping based on square-root cubature Kalman filter [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 13: 4627 – 4641.
- [58] 吴文豪, 李陶, 陈志国, 等. 基于子带干涉技术监测大型桥梁形变[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2017, 42(3): 334 – 340, 420.
WU Wenhao, LI Tao, CHEN Zhiguo, et al. The application of split band interferometry in large-scale bridge monitoring [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(3): 334 – 340, 420. (in Chinese)
- [59] 程璞, 许才军, 王华. InSAR相位解缠算法研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2007, 27(3): 50 – 55.
CHENG Pu, XU Caijun, WANG Hua. Analysis of phase unwrapping algorithm [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2007, 27(3): 50 – 55. (in Chinese)
- [60] SICA F, CALVANESE F, SCARPA G, et al. A CNN-based coherence-driven approach for InSAR phase unwrapping [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020, 19: 4003705.
- [61] ZHOU L F, YU H W, LAN Y, et al. Deep convolutional neural network-based robust phase gradient estimation for two-dimensional Phase Unwrapping Using SAR Interferograms [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(7): 4653 – 4665.
- [62] LI L T, ZHANG H, TANG Y X, et al. InSAR phase unwrapping by deep learning based on gradient information fusion [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19: 4502305.
- [63] COLESANTI C, FERRETTI A, NOVALI F, et al. SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the permanent scatterers technique [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(7): 1685 – 1701.
- [64] LIU G X, BUCKLEY S M, DING X L, et al. Estimating spatiotemporal ground deformation with improved persistent-scatterer radar interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(9): 3209 – 3219.
- [65] FERRETTI A, NOVALI F, PASSERA E. Statistical analysis of atmospheric components in ERS SAR data [C]// *Proceedings of Fringe 2005 Workshop*. Frascati: Springer, 2005.
- [66] ZEBKER H A, ROSEN P A, HENSLEY S. Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(B4): 7547 – 7563.
- [67] BONFORTE A, FERRETTI A, PRATI C, et al. Calibration of atmospheric effects on SAR interferograms by GPS and local atmosphere models: First results [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2001, 63(12): 1343 – 1357.
- [68] WADGE G, ZHU M, HOLLEY R J, et al. Correction of atmospheric delay effects in radar interferometry using a nested mesoscale atmospheric model [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2010, 72(2): 141 – 149.
- [69] HOBIGER T, SHIMADA S, SHIMIZU S, et al. Improving GPS positioning estimates during extreme weather situations by the help of fine-mesh numerical weather models [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2010, 72(2/3): 262 – 270.
- [70] FOSTER J, BROOKS B, CHERUBINI T, et al. Mitigating atmospheric noise for InSAR using a high resolution weather model [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(16): L16304.
- [71] WEBB T L, WADGE G, PASCAL K. Mapping water vapour variability over a mountainous tropical island using InSAR and an atmospheric model for geodetic observations [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 237: 111560.
- [72] SELVAKUMARAN S, WEBB G, BENNETTS J, et al. Understanding InSAR measurement through comparison with traditional structural monitoring-waterloo bridge, London [C]// *Proceedings of 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing*. Yokohama: IEEE, 2019: 6368 – 6371.
- [73] SELVAKUMARAN S, ROSSI C, MARINONI A, et al. Combined InSAR and terrestrial structural monitoring of bridges [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(10): 7141 – 7153.
- [74] SOUSA J J, BASTOS L. Multi-temporal SAR interferometry reveals acceleration of bridge sinking before collapse [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2013, 13(3): 659 – 667.
- [75] MANZO M, RICCIARDI G P, CASU F, et al. Surface deformation analysis in the Ischia Island (Italy) based on spaceborne radar interferometry [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2006, 151(4): 399 – 416.
- [76] 曹海坤, 赵丽华, 毕研磊. 利用附加系统参数的GPS-InSAR综合形变模型建立三维形变场[J]. *大地测量与地球动力学*, 2017, 37(4): 344 – 348.
CAO Haikun, ZHAO Lihua, BI Yanlei. GPS-InSAR integrated deformation model with additional systematic parameters for three-dimensional deformation fields [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2017, 37(4): 344 – 348. (in Chinese)

- [77] 罗海滨, 何秀风, 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)
- [78] 王霞迎, 张菊清, 张勤, 等. 升降轨InSAR与GPS数据集成反演西安形变场[J]. 测绘学报, 2016, 45(7): 810 — 817.
WANG Xiaying, ZHANG Juqing, ZHANG Qin, et al. Inferring multi-dimensional deformation field in Xi'an by combining InSAR of ascending and descending orbits with GPS data [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(7): 810 — 817. (in Chinese)
- [79] GUO N N, ZHAN W. Influence of different data fusion methods on the accuracy of three-dimensional displacements field [J]. Advances in Space Research, 2020, 65(6): 1580 — 1590.
- [80] GUGLIELMINO F, NUNNARI G, PUGLISI G, et al. Simultaneous and integrated strain tensor estimation from geodetic and satellite deformation measurements to obtain three-dimensional displacement maps [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(6): 1815 — 1826.
- [81] MILILLO P, GIARDINA G, PERISSIN D, et al. Pre-collapse space geodetic observations of critical infrastructure: The Morandi Bridge, Genoa, Italy [J]. Remote Sensing, 2019, 11(12): 11121403.
- [82] HU C, LI Y H, DONG X C, et al. Optimal 3D deformation measuring in inclined geosynchronous orbit SAR differential interferometry [J]. Science China Information Sciences, 2017, 60(6): 29 — 43.
- [83] QIN X Q, DING X L, LIAO M S, et al. A bridge-tailored multi-temporal DInSAR approach for remote exploration of deformation characteristics and mechanisms of complexly structured bridges [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2019, 156: 27 — 50.
- [84] FUHRMANN T, GARTHWAITE M C. Resolving three-dimensional surface motion with InSAR: Constraints from multi-geometry data fusion [J]. Remote Sensing, 2019, 11(3): 11030241.
- [85] 查显杰, 傅容珊, 戴志阳. DInSAR技术对不同方位形变的敏感性研究[J]. 测绘学报, 2006, 35(2): 133 — 137.
ZHA Xianjie, FU Rongshan, DAI Zhiyang. The sensitivity of DInSAR to surface deformation in different direction [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2006, 35(2): 133 — 137. (in Chinese)
- [86] 林琿, 马培峰, 王伟玺. 监测城市基础设施健康的星载MT-InSAR方法介绍[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1421 — 1433.
LIN Hui, MA Peifeng, WANG Weixi. Urban infrastructure health monitoring with spaceborne multi-temporal synthetic aperture radar interferometry [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1421 — 1433. (in Chinese)
- [87] CUSSON D, TRISCHUK K, HÉBERT D, et al. Satellite-based InSAR monitoring of highway bridges: Validation case study on the North Channel Bridge in Ontario, Canada [J]. Transportation Research Record:Journal of the Transportation Research Board, 2018, 2672(45): 76 — 86.
- [88] 段伟, 吕孝雷. 一种新的桥梁区域时序InSAR相位解缠方法[J]. 中国科学院大学学报, 2019, 36(2): 251 — 258.
DUAN Wei, LYU Xiaolei. A new phase unwrapping algorithm of time series InSAR for large bridges [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2019, 36(2): 251 — 258. (in Chinese)
- [89] FORNARO G, REALE D, VERDE S. Bridge thermal dilation monitoring with millimeter sensitivity via multidimensional SAR imaging [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2013, 10(4): 677 — 681.
- [90] GERNHARDT S, ADAM N, EINEDER M, et al. Potential of very high resolution SAR for persistent scatterer interferometry in urban areas [J]. Annals of GIS, 2010, 16(2): 103 — 111.
- [91] DURO J, MORA O, AGUDO M, et al. First results of stable point network software using TerraSAR-X data [C]// Proceedings of the 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Aachen: VDE, 2010: 1 — 4.
- [92] CUSSON D, ROSSI C, OZKAN I F. Early warning system for the detection of unexpected bridge displacements from radar satellite data [J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2021, 11(1): 189 — 204.
- [93] 黄其欢, 丁幼亮, 王一安, 等. 基于InSAR的南京大胜关大桥纵向位移监测与分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(3): 584 — 589.
HUANG Qihuan, DING Youliang, WANG Yi'an. InSAR-based longitudinal displacement monitoring and analysis on Nanjing Dashengguan bridge [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2017, 47(3): 584 — 589. (in Chinese)
- [94] LAZECKY M, HLAVACOVA I, BAKON M, et al. Bridge displacements monitoring using space-borne X-Band SAR interferometry [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017, 10(1): 205 — 210.
- [95] QIN X Q, LIAO M S, ZHANG L, et al. Structural health and stability assessment of high-speed railways via thermal dilation mapping with time-series InSAR analysis [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017, 10(6): 2999 — 3010.
- [96] QIN X Q, ZHANG L, YANG M S, et al. Mapping surface deformation and thermal dilation of arch bridges by structure-driven multi-temporal DInSAR analysis [J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 216: 71 — 90.