

面向铁路基础设施健康监测的 InSAR 技术研究进展

Ramon Hanssen¹, Mengshi Yang², Lina Hagenah¹, Yuqing Wang¹, Isabel Slingerland¹

¹Delft University of Technology, The Netherlands;

²Yunnan University, Kunming, China,

本项工作主要围绕基础设施，特别是铁路结构健康监测需求，从算法研发层面，开展了两个方面的研究进展。

第一，我们发展了一套面向城市形变监测的多轨道 InSAR 点云融合后处理框架。该框架主要针对不同卫星、不同观测几何条件下 SAR 数据融合过程中存在的两类关键问题：一是几何高程基准不一致，二是形变位移基准不统一。

该框架提出了“双重校正”策略。首先，在几何层面，通过迭代同名点识别与最小二乘平差实现几何基准校正。在坐标标准化和建筑立面点筛选的基础上，识别不同轨道之间的对应永久散射体 (PS) 点，进而估计并迭代优化轨道间高程偏差，使多源 InSAR 点云统一到一致的三维空间参考框架中。其次，在形变层面，提出 GeoDisFusion 方法，对不同轨道之间的形变速率和时间序列参考基准进行校正，保证多源观测结果在位移表达上一致性。

该框架在中国昆明地区进行了验证，所采用的数据包括 Sentinel-1 升轨与降轨数据、TerraSAR-X 降轨数据以及 ALOS-2 PALSAR-2 升轨数据，涵盖了不同传感器和不同成像

几何条件。结果表明，该方法显著提升了多源点云在空间和时间维度上的一致性。与机载 LiDAR 参考数据对比发现，几何校正后，不同轨道点云的中位高程差由约 15 m 降低至约 5 m。在云南艺术家园、长水机场等典型城市区域，校正后的 PS 点与建筑轮廓和基础设施目标的空间匹配关系明显改善。

在形变分析方面，该方法可将不同轨道间的形变速率差异降低最高约 1.6 mm/yr，显著提高多源数据之间的形变一致性。同时，融合后的点云有效 PS 密度高于任一单一数据源，增强了城市区域形变监测的空间覆盖能力和异常识别能力。总体而言，GeoDisFusion 提供了一种稳健、具有大地测量一致性的异构多轨道 InSAR 观测融合框架，可在不依赖外部大地测量参考数据的条件下，实现更加可靠的的城市形变监测。

第二，我们提出了瞬时状态 InSAR (Instantaneous State InSAR, ISI) 方法，用于基于连续 InSAR 观测的近实时位移监测。不同于传统 InSAR 时间序列方法通常依赖批处理模式，并在整个观测周期内估计静态参数，ISI 方法将散射体的运动状态建模为瞬时运动学状态，使其能够随着新 SAR 影像的获取而持续更新。

该方法将递推最小二乘估计与 Kalman 滤波框架相结合。与假设形变行为恒定的传统方法不同，ISI 同时估计目标点的瞬时位置状态和速度状态，并在每一次新观测到来时进行递推更新。其核心创新之一是将速度建模为具有时间相关性的 Ornstein-Uhlenbeck 随机过程，从而在形变信号中引入具有物理意义的平滑约束。该约束由速度标准差和去相关时间两个参数控制，用于调节估计运动的变化幅度和平滑程度。

该方法首先通过静态初始化阶段完成整数最小二乘模糊度解算和传统批处理估计；随后，在每一次新的 SAR 影像获取后，依次进行状态预测和观测更新。该框架还引入振幅归一化中位绝对偏差 (NMAD) 作为相位质量的代理指标，从而实现观测随机模型的自适应调整。值得注意的是，平滑约束还使该方法能够实现隐式相位解缠，即通过约束预测相位残差始终保持在半个波长周期以内，从而降低周跳和解缠误差的影响。

该方法采用九年的 Sentinel-1 数据进行了验证。结果表明，在稳定形变条件下，ISI 能够达到与完整批处理方法相当的估计精度；而在动态形变场景下，ISI 表现出明显优势，能够更好地捕捉突变、异常和持续演化的位移行为。相比之下，传统批处理方法往往会对这些动态变化产生平滑效应，甚至可能遗漏短时异常事件。实验结果显示，ISI 在适应形变变化、降低周跳影响以及刻画真实时间动态方面均具有更好的表现。

总体来看，ISI 为基础设施和城市稳定性近实时监测提供了一种计算高效、灵活可靠的新框架。通过结合递推更新、动态状态估计和具有物理意义的平滑约束，该方法在保持稳健估计精度的同时，显著提升了对地表运动变化的响应能力。