

题目：面向基础设施形变监测的高效时序 InSAR 分析

摘要：

龙计划 6 期项目第二年，本项目取得的研究进展主要包括以下方面。

● SAR2LiDAR：一种基于深度学习的 SAR 图像与 LiDAR 点云跨模态匹配框架

作为两种主要的主动遥感技术，合成孔径雷达（SAR）和激光雷达（LiDAR）二者之间的协同应用能够显著提升遥感任务中的信息提取能力。然而，现有研究主要集中于产品级集成，受跨模态差异的影响，SAR 和 LiDAR 之间的直接匹配仍面临较大挑战。为此，提出了一种基于深度学习的 SAR-LiDAR（SAR2LiDAR）匹配框架，以实现 SAR 图像和 LiDAR 点云之间的直接匹配。该框架由数据集生成方法和基于自编码器的深度学习模型两部分组成。其中，所提出的数据集生成方法精确建立了 SAR 图像与 LiDAR 点云之间的二维—三维对应关系；在此基础上，所提出的深度学习模型显式建模了 SAR 图像的成像几何和散射特性，并具备全局特征表示能力和跨模态特征对齐能力。本文采用了来自西班牙三个城市地区（Barcelona、Tarragona 和 Girona）的机载 LiDAR 数据集对所提出的模型进行了训练和评估。大量定性与定量实验结果表明，所提出的 SAR2LiDAR 框架在多种城市场景下均能实现准确且稳健的匹配性能，具有较强的泛化能力以及在大规模遥感应用中的潜力。

● 基于 InSAR 相位梯度堆叠结合 YOLO 网络模型的广域范围活动滑坡隐患高效识别

近年来，现代 InSAR 技术因具有测量地表微小形变的能力，已在潜在滑坡灾害探测方面展现出独特优势。然而，其在广域滑坡探测中的应用通常受到诸多因素的限制，如 InSAR 测量的敏感性与可靠性、海量数据带来的巨大计算负担，以及后续高强度的人工解译。为此，本研究开发了一种多通道 YOLO 网络模型，该模型将改进的 InSAR 相位梯度堆叠（IPGS）结果与地形坡度数据相结合，用于开展广域范围活动滑坡的自动探测。实验研究共处理了 2018 年至 2022 年间覆盖中国西南山区的 5032 景升轨和 4222 景降轨 Sentinel-1 影像。基于 5000 余个标记训练样本，该模型取得了良好的性能，召回率、精确率和平均精度分别达到 0.84、0.93 和 0.95。通过与贵州省及金沙江上游地区基于 InSAR 和光学影像的既有研究成果进行对比验证，所提方法的有效性和可靠性得到了证实。

● 基于 RCM 与 PAZ 星载 SAR 数据的城市地表形变监测

在 RCM 数据应用方面，首次将时序极化 InSAR 技术应用于全极化 RCM 数据，以加拿大温哥华为研究区开展探索。通过与 Sentinel-1 时序监测结果交叉验证，证明了时序 RCM 监测结果精度可靠，验证了该技术用于城市地表形变监测的可行性。此外，对比实验表明：经全极化优化处理后的 RCM 数据相较于 HH 单极化数据，可显著提升干涉相位质量并增加有效监测像素密度。在 PAZ 数据应用方面，本团队开展了基于极化相位优化的差分层析 SAR 技术研究，实现了对建筑物高度参数及形变速率的估计。与单极化对比评估结果表明，本方法所生成的三维点云成像质量显著提升，能够更完整地保留建筑物细节结构，并在低散射强度区域保持良好的信息完整性，验证了该方法在提升重建质量方面的优越性。

● 基于 InSAR 和深度学习的卢浦大桥形变监测及预测

在本研究中，我们探索了联合 InSAR 分析与 LSTM 网络模型的方法，用于大型城市桥梁的形变监测与预测。首先，利用覆盖上海卢浦大桥的 18 景升轨和 18 景降轨 COSMO-SkyMed 影像，通过 PSI 技术处理，获取毫米级地表形变场。其次，通过互相关分析结合动态滞后特性，有效识别了形变随温度变化的响应规律，构建了温度-变形耦合模型，量化了全桥的热膨胀系数。同时，建立三维有限元模型，验证了温度荷载作用下的结构位移响应。结果表明：拱顶和桥面跨中区域位移最大，而拱脚区域位移相对较小。此外，采用 LSTM、KCC-LSTM、LSTM-Attention 和 KCC-BiLSTM-Attention 四种深度学习模型对卢浦大桥进行变形预测。对比实验结果表明，KCC-BiLSTM-Attention 模型在四种模型中表现最优，能够准确捕捉拱桥

拱脚和边跨的结构变形特征，尤其对桥梁关键受力构件的预测效果尤为突出。

● 基于 InSAR 观测与地下水位监测数据的北京平原地下水流动与地面沉降耦合模型

以北京市为研究区，基于 2005-2024 年潜层及承压水位监测数据与 2015-2024 年 InSAR 地面沉降观测数据，采用地下水流动与地面沉降耦合模型，实现数值模拟与参数寻优。利用网格搜索法对延迟时间常数和总非弹性释水系数进行率定，使得模型输出沉降量与 InSAR 观测值高度吻合，RMSE 小于 2 cm， R^2 接近 1，验证了模型的可靠性。目前已完成北京市最优参数率定及沉降模拟，结合基础设施空间分布，初步建立了损害风险评估模型。下一步拟拓展至天津市，基于该市水位与沉降数据率定最优参数，结合预测水位模拟未来地面沉降，并开展沉降对建筑物、高铁等基础设施的损害风险评估，为京津冀区域地面沉降防控提供科学技术支撑。