

InSAR 赋能交通基础设施形变监测： 技术进展与应用实践

雷宝成¹, 张磊¹, 任维佳², 尼加提·穆合塔尔², 梁鸿俞¹,
宋鑫友¹, 陈海禄¹, 殷慧²

1. 同济大学 测绘与地理信息学院, 上海 200092;
2. 长沙天仪空间科技研究院有限公司, 长沙 410205

摘要: 合成孔径雷达干涉测量 InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) 作为重要的对地观测技术, 凭借大范围覆盖、毫米级精度和长时序监测等优势, 已在城市地表沉降、矿区开采、地质灾害等地表形变监测领域得到广泛应用, 并逐步拓展至交通基础设施监测。道路、铁路、桥梁与机场等交通设施具有分布广泛、线性狭长、动态性强及运行环境复杂等特征, 这对传统监测手段提出了更高要求, 而 InSAR 技术为其提供了新的解决途径。本研究以 InSAR 在交通基础设施监测中的应用研究为主线, 系统梳理了研究进展与发展脉络。首先, 从现有研究成果出发, 综述了 InSAR 在道路、铁路、桥梁和机场等不同类型交通基础设施监测中的典型应用, 验证了其在地表沉降监测、形变识别及结构安全评估中的潜力。其次, 结合交通基础设施场景的特殊性, 归纳了当前 InSAR 应用中存在的主要问题, 包括因弱散射目标导致的相干性不足、桥梁等设施的空间非连续形变引起的相位解缠误差, 以及大气湍流对毫米级监测精度的严重干扰等。围绕上述问题, 已于研究提出了多种改进思路, 如相位优化、局部解算与外部约束结合、大气延迟建模与多源辅助数据融合等, 这些方法在一定程度上提升了监测结果的可靠性与适用性。最后, 结合作者团队在不同类型交通基础设施监测中的典型应用案例, 展示了时序 InSAR 技术在该领域的应用潜力, 并进一步探讨了未来的发展方向。总体而言, InSAR 技术在交通基础设施监测中已展现出广阔前景, 但其方法与应用仍需不断完善, 以更好地支撑交通安全管理与风险防控。

关键词: InSAR, 交通基础设施, 形变监测, 道路沉降, 桥梁监测, 机场沉降

中图分类号: P237/P2

引用格式: 雷宝成, 张磊, 任维佳, 尼加提·穆合塔尔, 梁鸿俞, 宋鑫友, 陈海禄, 殷慧. 2026. InSAR 赋能交通基础设施形变监测: 技术进展与应用实践. 遥感学报, 30(4): 798-818

Lei B C, Zhang L, Ren W J, Nijati M, Liang H Y, Song X Y, Chen H L and Yin H. 2026. InSAR for transportation infrastructure deformation monitoring: Advances and applications. National Remote Sensing Bulletin, 30(4): 798-818 [DOI: 10.11834/jrs.20265391]

1 引言

交通基础设施是国民经济与社会发展的重要支撑, 其运营安全直接关系到人员出行与区域经济稳定。然而, 道路沉降、边坡失稳以及桥梁和隧道变形等问题在长期服役和自然灾害作用下频繁发生, 对交通运输安全构成严重威胁 (殷跃平等, 2005; Duan 等, 2016; 张永红等, 2016)。若缺乏及时有效的形变监测, 极易引发重大事故。

因此, 对交通基础设施的结构健康与稳定性进行监测, 对保障运输安全具有重要意义。

目前, 已有多种手段可用于交通设施沉降监测, 如水准测量 (Mossop 和 Segall, 1997)、加速度计 (Chen 等, 2011) 和 GNSS (Hwang 等, 2008)。这些方法虽能提供较高精度的数据, 但普遍存在覆盖范围有限、监测周期长和人工成本高等不足。随着对交通基础设施安全性要求的不断提升, 亟需发展具备大范围覆盖、连续性监测和

收稿日期: 2025-09-23; 预印本: 2025-12-07

基金项目: 国家自然科学基金(编号:42574040, 42174005)

第一作者简介: 雷宝成, 研究方向为 InSAR 数据处理与应用。E-mail: 2410270@tongji.edu.cn

通信作者简介: 张磊, 研究方向为 InSAR 数据处理算法及应用研究。E-mail: lslzhang@tongji.edu.cn

高时空分辨率的新型技术, 以实现潜在隐患的早期识别和风险预警。

合成孔径雷达干涉测量 InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) 作为一种重要的大地测量方法, 已在地表形变监测和灾害评估等领域得到广泛应用 (睦海刚等, 2016; Carlà等, 2019; Tosti等, 2020)。与传统工程监测手段相比, InSAR 在形变监测方面展现出显著优势。首先, 监测范围广, 单景影像可覆盖上万平方米, 从而实现区域尺度的整体监测; 其次, 点位密度高, 例如在使用 X 波段影像时, 每平方公里可获取数以十万计的监测点, 从而大幅提升空间采样能力; 再次, 作为一种非接触式测量方法, InSAR 无需在道路、桥梁等结构上布设传感器, 既减少了对交通运行的干扰, 也有效降低了监测成本; 最后, 随着多时相 InSAR 技术的发展, 通过时序数据处理可有效缓解时间与空间去相关及大气延迟的影响, 实现厘米至毫米级的地表形变估算 (Ferretti等, 2000, 2001; Berardino等, 2002)。凭借上述特性, InSAR 在交通基础设施沉降监测、滑坡识别及结构稳定性评估中展现出广阔的应用前景。

然而, 与在地质灾害或大范围城市沉降监测中的普遍应用相比, 交通基础设施呈线状分布、结构精细且受动态交通荷载持续作用, 形变呈短周期、小幅度、间断且非平稳的沿线特征。因此, InSAR 技术在交通基础设施检测领域面临诸多特有挑战, 例如, 道路表面后向散射能量较弱导致相干性不足; 交通廊道易受几何畸变影响, 部分区域难以实现有效覆盖; 车辆通行与施工改造等动态活动会破坏相位一致性假设; 此外, 大气湍流误差以及桥梁等结构的非连续性形变也进一步增加了监测难度。这些问题在一定程度上制约了 InSAR 在交通领域的可靠性与推广应用。尽管如此, InSAR 所获取的道路、边坡与桥梁等交通基础设施的形变信息, 仍在揭示变形演化规律、识别病害机理以及开展早期预警方面具有重要价值 (Milillo等, 2018; Gagliardi等, 2021a; Ferrante等, 2021)。经过数十年的发展, InSAR 已成为基础设施监测的重要空间测量技术, 并在路面沉降监测、交通设施稳定性评价以及桥梁变形观测中展现出广阔应用前景。

为系统梳理相关研究进展与存在问题, 本研究将从以下 4 个方面展开: 首先总结 InSAR 技术在

交通基础设施监测中的应用现状与挑战; 其次探讨针对性的处理方法与改进思路; 随后结合典型案例说明其实际应用成效; 最后对未来的发展方向进行展望。以期为 InSAR 在交通基础设施监测中的应用与挑战提供系统化的认识与理解, 进一步推动其在交通安全保障与风险防控中的推广与应用。

2 现有 InSAR 技术与应用挑战

随着 InSAR 技术的不断发展以及多源 SAR 卫星数据的持续积累, 其在交通基础设施监测中的应用潜力日益凸显。实践研究表明, InSAR 可广泛应用于道路沉降、边坡稳定性与桥梁形变的长期监测, 能够在大范围尺度上实现毫米级精度的形变识别 (Milillo等, 2019; Gagliardi等, 2023; 王茹, 2025)。然而, 由于交通基础设施具有线性分布、空间狭窄和动态性强等特征, InSAR 应用中也暴露出一系列限制与挑战。基于此, 本节将对交通基础设施监测中常用的 InSAR 方法进行简要综述, 并系统梳理其在实际应用中面临的主要问题。

2.1 InSAR 技术的发展

差分干涉合成孔径雷达 DInSAR (Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar) 是在 InSAR 技术基础上的进一步发展。该方法通过差分处理去除观测相位中的共有分量 (如平地效应和地形相位), 能够基于单对干涉图直接提取地表形变信息, 在突发沉降或快速变形的识别中发挥了重要作用。然而, 由于对大气延迟、轨道误差及相干性衰减高度敏感, DInSAR 在长时间序列监测和低相干区域中的适用性受到显著限制 (Zebker等, 1997; Hanssen, 2001)。为克服这些不足, 研究者提出了多时相 InSAR (Multi-Temporal Interferometric Synthetic Aperture Radar, MT-InSAR) 方法, 通过联合分析多轨、多时相干涉数据, 有效分离误差并提取稳定形变信号。其中, 永久散射体干涉测量 PSInSAR (Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar) 是最具代表性的方法, 能够在高相干点上实现毫米级形变监测 (Ferretti等, 2001)。在过去 20 余年间, 学界相继发展出多种改进算法, 包括小基线集 SBAS (Small Baseline Subset) (Berardino等, 2002)、干涉点目标分析 IPTA (Interferometric Point Target Analysis) (Werner等,

2003)、斯坦福永久散射体方法 StaMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers) (Hooper 等, 2004)、时域相干目标分析 (Zhang 等, 2011)、永久散射体点对法 PSP (Persistent Scatterer Pairs) (Costantini 等, 2014) 以及 SqueeSAR 方法 (Ferretti 等, 2011) 等。这些方法在基线配置、相干点选取、相位解缠策略和形变建模等方面各具特色。正是这些技术进步, 使 InSAR 由单一干涉拓展至时间序列分析, 大幅提升了长时序形变监测的稳定性与精度。

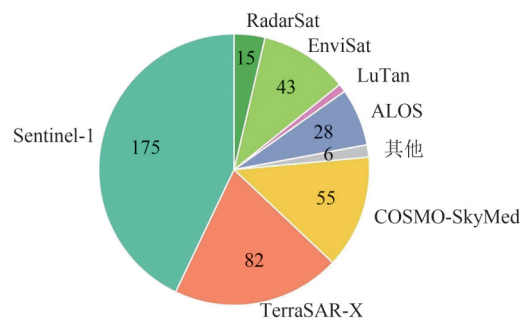
与方法创新同步发展的是 SAR 卫星观测能力的显著提升。图 1 展示了 InSAR 在交通基础设施监测领域的研究趋势, 文献统计来源于 Scopus 数据库。图 1 (a) 显示了历年相关论文数量的变化情况, 可以看出, 自 2015 年起论文数量显著增长, 这一趋势与 Sentinel-1 卫星的成功发射及其数据开放密切相关。在奠基与探索期, 为代表的 C 波段卫星为 InSAR 技术在交通基础设施的初步应用奠定了基础; 随后的高分辨率商业卫星时代, 以 TerraSAR-X 与 COSMO-SkyMed 为代表的卫星大幅

提高了空间分辨率, 使得对道路、桥梁等线性交通设施的精细监测成为可能, 直接推动该领域文献数量在 2011 年左右出现第一次显著增长; 进入业务化与全球化观测时代后, Sentinel-1 系列卫星提供的免费 C 波段数据, 使大范围、高频次的交通基础设施形变监测成为现实, 共同驱动了 2019 年左右的第二次更大幅度的文献增长, InSAR 技术在交通基础设施监测领域进入了成熟应用阶段。这些卫星的发展不仅保证了 InSAR 数据源的连续性与多样性, 也为多时相分析提供了更高的时空分辨率与多波段选择, 从而推动了 InSAR 在交通基础设施监测中的深入应用 (Intrieri 等, 2018; Hosseini Nourzad 和 Pradhan, 2016)。进一步地, 基于数据源的研究占比统计, 为上述卫星演进历程提供了直观印证, 结果见图 1 (b)。可见 Sentinel-1 与 TerraSAR 系列数据在应用中占据主导地位, 同时国产陆探系列卫星的贡献也逐步显现。总体来看, 随着算法发展与卫星数据源的持续进步, InSAR 已具备在交通基础设施监测中开展大范围、高精度、长期形变观测的潜力。



(a) InSAR 在交通设施监测领域年度论文数量

(a) Annual number of publications on InSAR applications in transportation infrastructure monitoring



(b) 按卫星类型划分的文献

(b) Publications categorized by satellite type

图 1 InSAR 在交通基础设施监测中的研究趋势

Fig. 1 Research trends of InSAR applications in transportation infrastructure monitoring

2.2 InSAR 的交通基础设施监测应用

在道路监测领域, 大量研究表明时序 InSAR 技术能够有效识别和评估路面病害, 为交通资产管理提供重要支撑。贾洪果等 (2012) 采用短基线 PSInSAR 方法, 使用 TerraSAR-X 数据提取了天津市西青区西青道的地表沉降信息, 并通过与水准数据对比, 验证了监测结果的可靠性; Orellana 等 (2020) 将 PSInSAR 与 SBAS 方法结合, 利用

Sentinel-1 与 CSK 数据对意大利罗马城区多条高速公路开展 DInSAR 分析, 成功探测出存在显著沉降的路段并进行了分类。Xing 等 (2022) 在中国的公路软土路基上, 利用 SBAS 方法与 TerraSAR-X 数据生成沉降时间序列, 并对比 4 种常用时序形变模型, 同时结合水准数据验证了毫米级监测精度。Wasowski 等 (2015) 则通过高分辨率 PSInSAR 方法 SPINUA (Stable Point Interferometry over Unurbanised

Areas)展示了监测道路与其他工程结构形变的潜力,相关案例包括意大利佛罗伦萨—利沃诺高速公路。王茹等(2018)采用PSInSAR方法对上海高架道路进行监测,同时结合周边地面沉降、车辆载荷情况以及道路建始时间等因子分析道路变化的驱动因素。Karimzade和Matsuoka(2020)利用SBAS-InSAR检测城市化地区65 km路段及建筑物沉降风险,并通过对比CSK数据的后向散射系数与国际平整度指数(IRI),验证了两者存在一定相关性。Ozden等(2016)从成本效益角度分析了InSAR的应用,指出基于SAR的监测方法能够降低整体费用并提升系统效率,PSInSAR结果可作为道路基础设施状态的预测指标。此外,Macchiarulo等(2022)采用全自动化的GIS与PSInSAR时序分析框架,对美国洛杉矶高速网络及意大利高速网络开展了多年数据集的监测研究,成功识别出关键的沉降点。这些研究均证明了InSAR技术在道路与公路监测中的适用性与有效性。当道路表面散射体密度不足时,时序InSAR的结果仍可作为辅助信息供交通管理部分参考。为进一步提升监测能力,安装角反射器等人工散射体被视为有效的补充手段,其成本低于传统地面监测设备,能够在散射体稀缺区域显著增强时序InSAR的监测效果(Lazeky等,2017)。

在桥梁监测方面,近年来InSAR技术被广泛用于评估结构稳定性与周边环境的影响,尤其是在历史桥梁和文化遗产类结构的监测中表现出较高价值。时序InSAR技术能够有效捕捉桥梁的线性形变趋势、结构高度效应及热胀冷缩过程(Zhao等,2017; Qin等,2019; Gagliardi等,2021a,2022),并已被应用于重建钢筋混凝土及桁架桥的热学响应。此外,学者们尝试将InSAR形变结果与三维有限元模型相结合,用于桥梁结构力学响应分析(Cusson等,2018,2021)。针对不同类型的桥梁,研究者提出了相应的数据处理和分析策略,例如对于拱桥(Qin等,2018)、斜拉桥(Jia和Liu,2016; Qin等,2021)等整体结构,以及箱梁(Cusson等,2021)、桥墩(Selvakumaran等,2020)等关键构件,均发展了具有针对性的监测与分析方法,以更好地揭示其形变特征与结构响应规律。此外,利用历史SAR影像可评估桥梁在长时段下的稳定性甚至识别潜在失效风险(Selvakumaran等,2018; Sousa和Bastos,2013)。

意大利热那亚莫兰迪大桥的坍塌事件是监测的典型案例,Milillo等(2019)基于多源SAR数据并采用PSInSAR方法,识别出坍塌前桥面存在若干加速沉降的PS点,而Lanari等(2020)在后续研究中通过SBAS与合成孔径雷达层析成像TOMOSAR(Tomographic Synthetic Aperture Radar)技术未能检测到同类异常,认为难以仅依靠时序InSAR对突发坍塌进行预测。这些研究表明InSAR在桥梁形变监测、热效应评估和长期稳定性分析中具有重要潜力,但在快速失效预警方面仍存在争议和局限。

在铁路监测方面,多时相InSAR技术近年来得到快速发展,能够以毫米级精度识别铁路沿线的沉降与不稳定特征(Zhang等,2019; Luo等,2022; 叶勇超等,2022)。Chang等(2017)提出了基于PSInSAR的InSAR时序数据后处理概率方法,并在荷兰全国铁路网进行验证,利用213景覆盖2010年—2015年间的Radarsat-2影像,分析了超过3000 km铁路区段,成为首个面向铁路系统的国家级卫星监测案例。何秀凤等(2021)利用47景Sentinel-1数据,采用改进的StaMPS方法来增加铁路沿线的相干点密度,并与同期北斗导航卫星系统的监测结果进行对比分析,结果展现出良好的一致性。Luo等(2024)则利用高分辨率TerraSAR-X数据,对中国天津京津城际铁路开展InSAR监测,并与高密度水准测量数据进行对比,结果显示二者具有高度一致性,充分证明了InSAR在高速铁路沉降监测中的可靠性与高精度。InSAR技术在铁路系统形变监测中已展现出工程应用价值,为轨道安全评估和网络级健康监测提供了新的技术手段(Ferrante等,2021)。

在机场监测方面,现有研究表明InSAR技术在跑道及其周边区域的沉降与形变识别中具有重要作用。以上海浦东国际机场为例,Jiang等(2016)通过多时相InSAR技术结合地质环境分析,揭示了多处下沉区及其与地质条件变化的关系;在香港机场,Jiang和Lin(2010)将Envisat数据与水准观测相结合,识别出长期填海沉降过程,并探讨其与土体工程特性的关联;Wu等(2020)基于ERS-2、Envisat、COSMO-SkyMed和Sentinel-1等长时间序列数据,系统分析了填海造地机场20余年的沉降演化,并通过GNSS与地质资料加以验证,为新建机场工程设计提供了参考。Gao等

(2019)在北京首都国际机场的研究进一步表明,沉降变形与地下水位变化密切相关。这些研究不仅验证了InSAR技术在填海沉降与地基稳定性分析中的有效性(Gagliardi等, 2020, 2021b),也证明了其在恢复跑道区域实际垂直位移方面的可靠性,即使在不同频段和成像几何下条件下,其结果差异保持在较低水平。

2.3 交通设施监测领域中的特征与挑战

尽管InSAR技术在交通基础设施监测中展现出独特优势,但受制于交通廊道的线性分布、地物材质特性及动态环境等因素,其应用仍存在一系列突出挑战。

2.3.1 交通基础设施道面散射特征

在交通基础设施监测中,道路表面多由沥青或混凝土材料构成,其在SAR卫星侧视成像条件

下易形成以镜面反射为主的散射机制,后向散射能量较弱。由于缺乏如建筑物与地面所形成的角反射体等结构,道路在SAR图像中的回波能量和相干性通常明显低于周边建筑物或裸露地表。这种散射条件使得道路区域能够被识别的永久散射体PS(Persistent Scatterer)数量有限,信噪比较低,从而给PSInSAR、SBAS等时序InSAR技术的稳定性与可靠性带来了挑战(Perissin等, 2012)。已有研究指出,相较于城区建筑等强散射目标,道路网络中的有效PS密度往往不足以支撑高精度监测,尤其在低分辨率卫星数据(如C波段Sentinel-1)的条件下,这一问题更为突出(Macchiarulo等, 2022)。如图2(a)所示,在机场跑道区域,SAR强度图呈现明显的暗带特征,清晰反映了道路表面的弱散射性质。

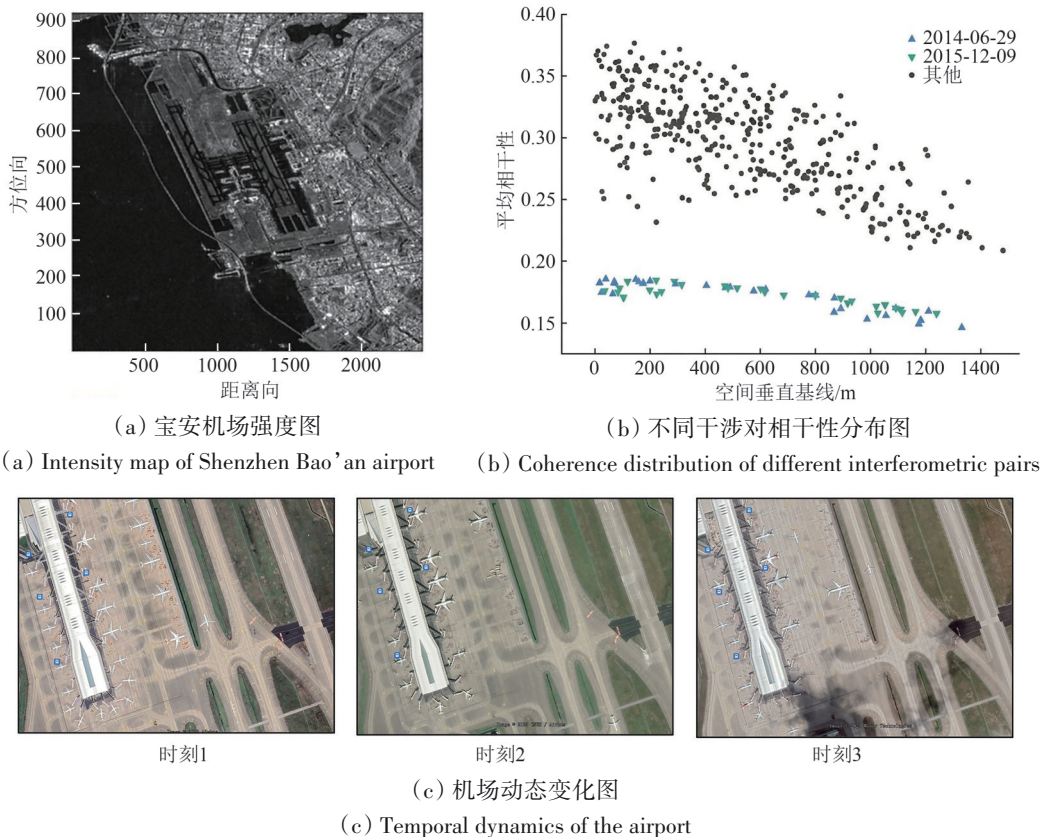


图2 道面散射特征对InSAR应用的影响

Fig. 2 The impact of runway scattering characteristics on the performance of InSAR applications

另一方面,交通基础设施对环境因素高度敏感。为分析水膜对影像成像质量的影响,对2014年6月29日和2015年12月9日获取的两景影像进行了重点检验。这两次影像获取前3h的降雨量均超

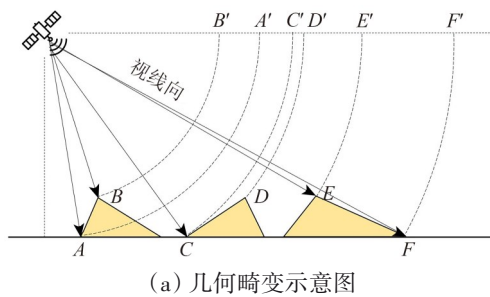
过2 mm。由所有干涉对组合的平均相干性结果(图2(b))可以看出,其相干性显著低于其他时段。为突出降雨效应,图中将涉及这两景影像的干涉图平均相干性以不同颜色单独标示。结果表

明, 水膜覆盖会显著降低道路区域的相干性, 从而对形变监测结果产生明显影响。与地质灾害区或城市建筑区相比, 道路与铁路等交通廊道所处环境更具动态性。车辆流动、施工活动、临时堆积物以及路面覆盖变化等因素均会进一步加剧时序 InSAR 相位的不稳定性 (Karimzadeh 和 Matsuoka, 2020)。例如, 图 2 (c) 展示了某机场区域在不同时期的光学影像对比, 直观揭示了因飞机调度和场地利用而产生的强烈动态变化。这类动态变化直接破坏了时序 InSAR 技术所依赖的相位一致性假设, 导致相干点选取与相位优化的有效性下降甚至失效 (Guarnieri 和 Tebaldini, 2008; Jiang 等, 2020)。在交通繁忙的高速公路和铁路干线区域, 这一问题尤为突出。动态目标不仅掩盖了道路本体的真实形变信号, 还可能引入

系统性误差, 从而使监测结果出现偏差。因此, 如何在高度动态的交通环境下有效优化干涉相位, 并提高道路与轨道等交通设施的监测密度和精度, 仍然是 InSAR 交通监测研究中的核心挑战之一。

2.3.2 数据获取与成像几何限制

交通基础设施往往沿山谷、河流或高架地段分布, 城市交通设施附近也多伴有高层建筑物, 易受到雷达侧视成像的限制。在 SAR 影像中, 这类区域常发生几何畸变, 包括前向重叠、阴影和失真等现象 (Hanssen, 2001; 刘国祥等, 2019)。如图 3 (a) 所示, 地物在雷达视线方向发生压缩、错位以及叠掩现象时, 会导致地表真实空间位置与影像几何位置不一致; 在遮挡严重时, 部分区域处于观测盲区, 无法获取有效信号。



(a) 几何畸变示意图

(a) Schematic illustration of geometric distortions



(b) 强度图中的表现

(b) Manifestation in the intensity image

图3 几何畸变对 InSAR 成像的影响((b)图中红色矩形框为建筑密集区的几何畸变显著区域)

Fig. 3 Effects of geometric distortions on InSAR imaging (The red rectangular box in (b) indicates an area with significant geometric distortions in a densely built-up region)

在城市交通场景中, 该问题尤为突出。图 3 (b) 展示了高层建筑密集区的遮挡效应: 由于雷达采用侧视成像, 面向雷达一侧的建筑墙体会形成强散射, 而背向雷达一侧的道路则可能完全处于阴影中, 导致关键交通廊道区段无法提取有效的形变信息。类似情况在山区高速公路边坡、铁路隧道口及跨谷地段亦普遍存在。

对于狭窄、线性且局部遮挡严重的交通基础设施走廊, 几何畸变仍是制约 InSAR 数据可用性与可靠性的重要因素, 其根源在于雷达侧视成像方式本身。这也解释了在山区高速、城市立交或隧道群等典型地段, InSAR 技术常出现数据缺口与监测盲区的现象。当前应对几何畸变的主要技术路径包括利用升降轨联合观测、多入射角数据的互补以及多星座协同观测 (Guo 等, 2021) 等数据获取策略, 以及发展基于 SAR 三维重建的叠掩区

信号恢复方法 (Fuhrmann 和 Garthwaite, 2019)。这意味着, 几何畸变问题无法在单一数据源的框架内得到彻底纠正, 其根本解决需要系统性的多源观测方案。因此, 本研究在后续研究中将不再针对该问题提出改进措施。

2.3.3 交通目标形变特征复杂性

交通基础设施所表现出的形变特征与传统地质灾害或城市沉降场景存在显著差异, 这种差异性对 InSAR 技术的应用提出了额外挑战。首先, 桥梁、涵洞等特殊结构的形变通常呈现高度局部化和非连续性特征。不同桥跨、桥墩与桥面之间可能出现不均匀甚至突变式位移, 这与 InSAR 方法中常假设的“空间连续和平滑形变场”明显不符 (Goldstein 等, 1988; Chen 和 Zebker, 2002; Hooper 和 Zebker, 2007)。当形变在空间上呈现大

梯度或断裂时, 相位解缠与插值易出现误差, 导致桥梁等关键部位的形变监测精度显著下降。

其次, 交通设施在运营环境下往往叠加多种形变过程, 如沉降、热胀冷缩、车辆荷载响应及降雨诱发的滑移等。这些多重作用使形变信号具有显著的多尺度性和非线性特征。传统的线性模型或单一时序方法在拟合和分解这些复杂过程时存在局限 (Ferretti 等, 2001; Bernardino 等, 2002; Kampes 和 Hanssen 等, 2004), 从而进一步制约了 InSAR 在交通基础设施精细化监测中的可靠性。综上所述, 交通基础设施的复杂形变特征既反映了其服役环境与结构属性的特殊性, 也暴露出 InSAR 技术在形变解释与建模环节的不足。这一问题在桥梁、涵洞等典型构造物的监测中尤为突出, 亟需结合结构力学模型或多源观测数据加以改进。

2.3.4 外部大气延迟

在交通基础设施监测中, 大气延迟仍是制约 InSAR 精度的关键因素, 也是该技术应用过程中最主要的误差来源, 既包括随高度变化的分层延迟, 也包括小尺度、随机性强的湍流延迟, 其中湍流效应尤为突出。湍流延迟源于局地水气的随机起伏, 其时间尺度可短至数分钟至数小时, 远快于星载 InSAR 的重复观测周期。由于其快速、小尺度和高度随机的特性, 湍流延迟难以通过气象再分析数据或传统的 DEM 相关模型进行有效建模与校正 (Bekaert 等, 2015; Li 等, 2019)。

道路与机场区域的环境条件进一步加剧了湍流效应的复杂性。低海拔、贴近地表的观测目标通常位于水汽最活跃的边界层中, 而人类活动与热岛效应又强化了局地热扰动, 使湍流延迟成为此类区域大气相位校正的重大挑战。常规气象模型的空间分辨率不足以捕捉跑道或公路尺度的水汽扰动, GNSS 及气象站的稀疏分布也难以实现有效约束, 加之湍流延迟缺乏可预测的宏观控制因子, 使得基于时序滤波的方法难以完全消除其影响。在毫米级至厘米级精度需求下, 湍流延迟往往掩盖甚至淹没真实信号, 成为 InSAR 应用于交通基础设施监测中最难克服的误差来源之一。

总体而言, InSAR 在交通基础设施监测中的局限性呈现多维度特征: 既受到观测与成像条件的限制, 也受制于目标本身复杂的形变特征和外部环境的不确定性。这些问题使得形变信号难以保

持足够的稳定性与精度, 从而影响对关键设施状态的有效监测。如何在不同交通场景下应对这些处理挑战, 已成为 InSAR 进一步拓展至交通基础设施监测的核心问题。

3 InSAR 在交通领域监测的优化策略

针对前文所述 InSAR 在交通基础设施监测中存在的多方面限制, 研究者团队提出了一系列改进方法与应对思路, 将基于 3 个主要方向进行阐述: 弱散射体环境下的相位优化、空间非连续形变的解算, 以及大气效应的处理与抑制。

3.1 弱散射体的相位增强

为了改善在道路和机场跑道等区域因散射能力弱而导致的相干点稀疏现象, Zhang 等 (2014) 和 Lei 等 (2023) 提出了一种新多时相 InSAR 方法。与传统的时序 InSAR 方法不同, 该模型直接在相位弧段网络上构建观测方程, 以局域相位面的拟合残差评估弧段的质量。

假定第 i 景干涉图中第 k 个点的干涉相位可以表示为多项式形式:

$$\varphi_k^i = a_k^i X + b_k^i Y + c_k^i XY, k = 1, 2, \dots, M \quad (1)$$

式中, (X, Y) 是第 k 个点的在雷达坐标系下的像素坐标, 则在该点位的局域小窗口内, 认为其邻近 M 个点位均满足改多项式, 该点位与邻近点构网得到的弧段相位差可表示如下:

$$\Delta\varphi_k^i = a_k^i \Delta X + b_k^i \Delta Y + c_k^i \Delta X \Delta Y \quad (2)$$

用矩阵形式表示, 可统一写作:

$$\Delta\varphi_k^i = \mathbf{D}_k^i \mathbf{P} \quad (3)$$

式中, $\mathbf{P} = (a_k^i \ b_k^i \ c_k^i)$, 表示局部多项式拟合系数, 对于多时相数据, 可进一步写作:

$$\Delta\varphi_k = \mathbf{D}_k \mathbf{P} \quad (4)$$

式中, $\mathbf{D}_k = \mathbf{A} \otimes \mathbf{D}_k^i$, 矩阵 \mathbf{A} 表示相位弧段网络对应的差分算子矩阵, 通过张量积与单图观测矩阵结合, 构建整个时序观测系统, 得到最终的稀疏线性方程组。基于多项式拟合残差对弧段做进一步筛选, 同时避免了相位误差在解缠中沿路径传播, 直接对实现参数的整体求解。

图 4 展示了浦东机场区域在相位优化前后的对比结果。可见优化后的干涉图质量显著提升, 局部区域的相位连续性与平滑性均得到增强。此外, 该方法同步实现点选取、相位优化与解缠, 可以有效地在弱散射区域保留更多潜在散射体, 避免

测点稀疏而丢失有效信息, 提高在交通基础设施区域的监测覆盖密度。同时, 该方法基于相位残差来识别并剔除存在模糊性的观测弧段, 从而降低弱散射体区域因噪声和相位不稳定性带来的误

差积累。这一方法不仅提升了数据利用效率, 也增强了形变结果在低相干场景下的可靠性。因此, 该方法实现了从选点到解缠的全链路优化, 为交通基础设施的高精度形变监测提供了有力支持。

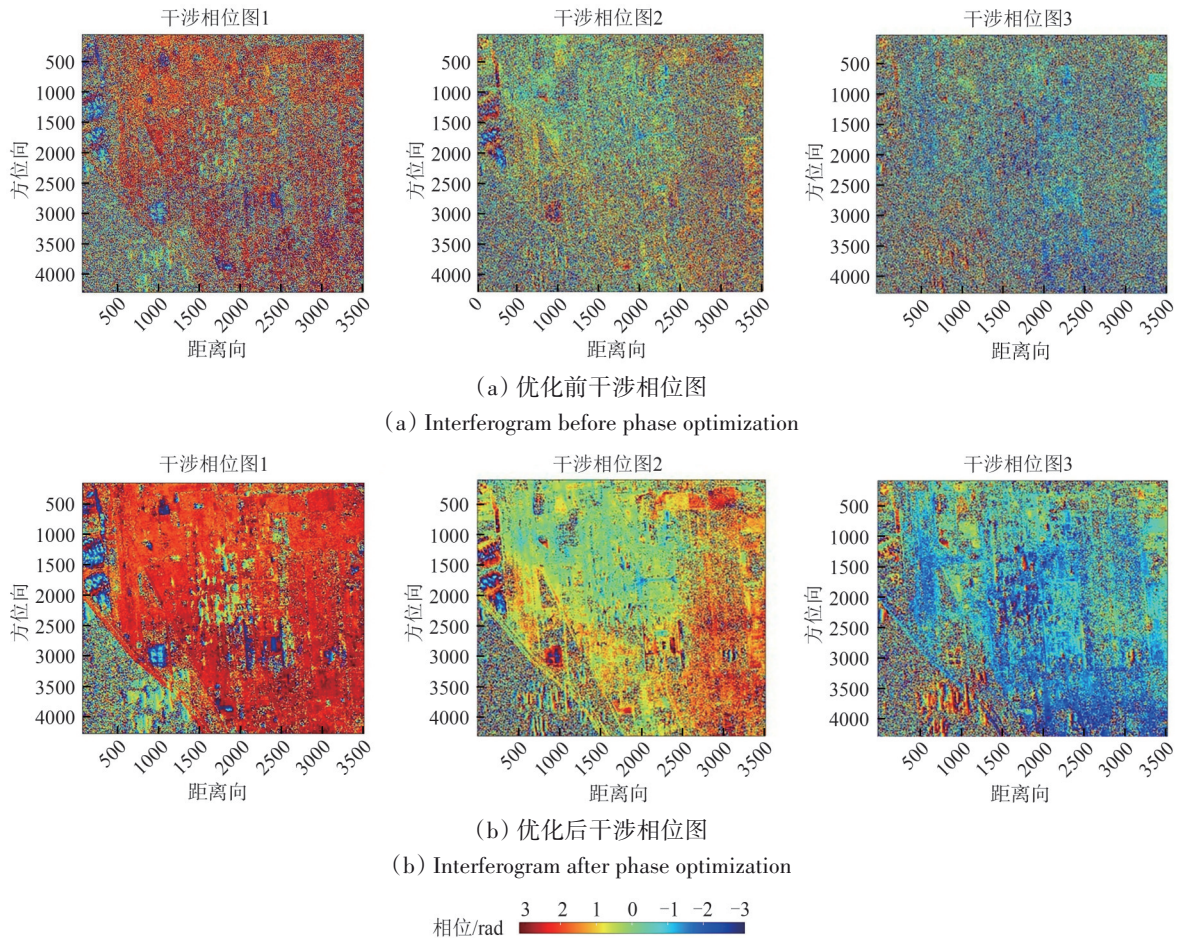


图4 本文所提方法的相位优化效果对比

Fig. 4 Comparative results of phase optimization using the proposed method in this study

3.2 空间非连续形变解算

桥梁是交通领域中最容易出现非连续形变的设施, 这主要是因为桥梁中存在大量的伸缩缝和桥梁结构中显著的热胀冷缩现象。在大型桥梁建筑中, 伸缩缝通常位于相邻梁段之间, 其主要功能是缓解温度变化引起的热应力以及车辆荷载对结构造成的破坏 (Ko 和 Ni, 2005)。在热胀冷缩作用下, 伸缩缝两侧的箱梁始终以相反方向运动 (即同向膨胀或反向收缩), 从而在伸缩缝处引起干涉相位的突变。当箱梁长度或温差超过一定阈值时, 伸缩缝两侧的相位差绝对值可能超过 π , 导致传统相位解缠所依赖的相位连续性假设失效, 进而引发解缠错误 (Song

等, 2024)。

如图5所示, 桥梁箱梁沿纵向的干涉相位在温度变化作用下表现出近似线性的整体变化, 但在伸缩缝位置存在明显的相位不连续现象, 即相位跳变。这些跳变在不同的干涉图中均有体现, 并且在温差较大的情况下 (图5 (a) 和 (b)), 相位跳变幅度甚至超过 2π , 导致传统相位解缠方法出错。针对这一问题, Song 等 (2024) 提出了一种无先验形变模型假设的自适应分段解缠时序 InSAR 算法。该方法能够自动识别伸缩缝结构处的相位跳变位置, 并实现空间网络的自适应分割, 在各自独立子网内分别进行形变反演, 恢复相干点的位移时间序列。

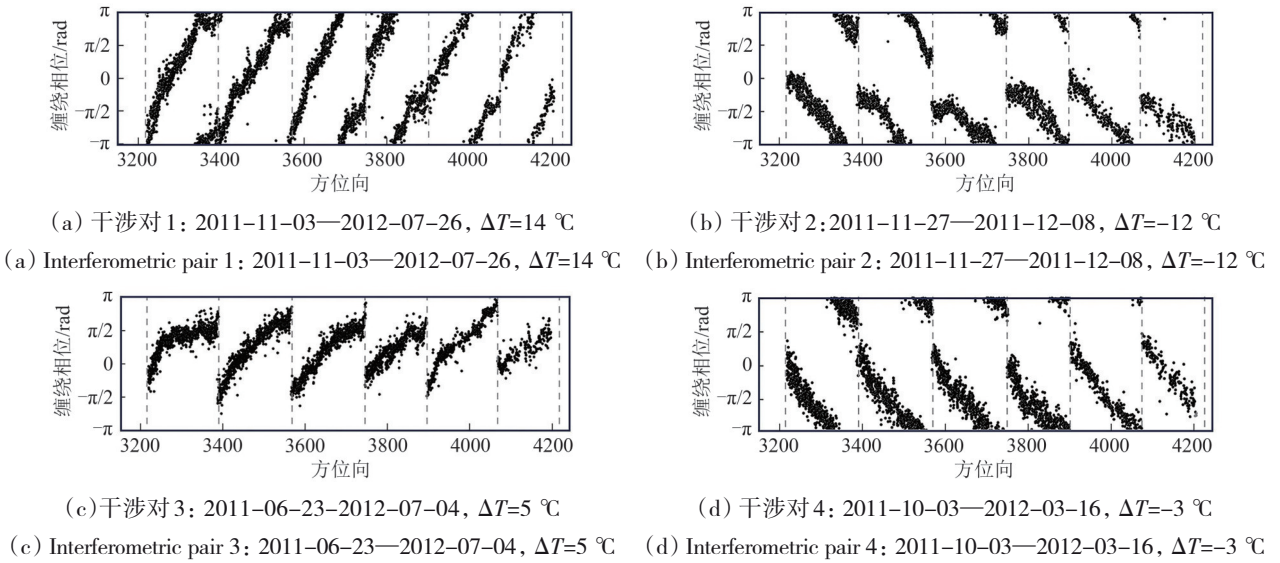


图 5 桥梁伸缩缝处的相位跳变(Song 等, 2024)(每个子图的虚线位置表示伸缩缝出现的位置, 从右至左分别为 1—7 号伸缩缝)

Fig. 5 Phase discontinuities at bridge expansion joints (Song et al., 2024) (The dashed lines in each subplot indicate the locations of the expansion joints, numbered 1—7 from right to left)

对于第 i 幅干涉图, 同样构弧段得到相位差, 其主要成分可表示为

$$\Delta\phi_{x,y}^i = \Delta\phi_{x,y, \text{topo}}^i + \Delta\phi_{x,y, \text{defo}}^i + \Delta\phi_{x,y, \text{noise}}^i - 2\pi k_{x,y}^i \quad (5)$$

其中的地形相位可表示为

$$\Delta\phi_{x,y, \text{topo}}^i = \frac{-4\pi B_{\perp}^i}{\lambda R_x^i \sin \theta_x^i} \cdot \Delta h_{x,y} = B_k^i \cdot \Delta h_{x,y} \quad (6)$$

式中, B_{\perp}^i 为第 i 幅干涉图的空间垂直基线, λ 为雷达波长, R_x^i 为观测斜距, θ_x^i 为雷达入射角, $\Delta h_{x,y}$ 为相对地形误差, B_k^i 表示与垂直基线相关的变量。形变相位可写为

$$\Delta\phi_{x,y, \text{defo}}^i = \frac{-4\pi}{\lambda} \cdot \Delta T^i \cdot \Delta v_{x,y} \quad (7)$$

式中, ΔT^i 为第 i 幅干涉图的时间基线, $\Delta v_{x,y}$ 为 x 、 y 在这两点的相对形变速率, 则式 (5) 可表示为

$$\text{wrap}(\Delta\phi_{x,y}^i) = B_k^i \cdot \Delta h_{x,y} + \frac{-4\pi}{\lambda} \cdot \Delta T^i \cdot \Delta v_{x,y} + \Delta\phi_{x,y, \text{noise}}^i \quad (8)$$

在桥梁结构中, 对于跨越伸缩缝的弧段, 由于其相位跳变引起的观测值粗差将导致上式中的弧段解算中误差明显增大, 因此可以通过设定中误差阈值, 自动剔除该类型的弧段, 从而实现弧段网络的自适应分割。根据材料的线性膨胀特性, 箱梁的累计位移在箱梁的两端最大, 中点最小。因此, 对于每个子网络, 可选择位于该段中间的像素作为参考点。比如对于第 i 个干涉图, 网络分割后的观测方程构成如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{V} &= \mathbf{B} \hat{\mathbf{X}} - \mathbf{L} \\ \mathbf{C} \hat{\mathbf{X}} - \mathbf{W} &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

式中, m 为总的弧段数量, n 为相干点数量, s 为独立子网数量; $\mathbf{L} = (\Delta d_1^i, \Delta d_2^i, \dots, \Delta d_m^i)^T$ 为第 i 个时段中弧段端点的相对位移值, $\hat{\mathbf{X}} = (d_{p_1}^i, d_{p_2}^i, \dots, d_{p_n}^i)^T$ 为待估量, 表示相干点点的位移值, \mathbf{V} 为残差矩阵, \mathbf{W} 为参考点的形变值; \mathbf{B} 和 \mathbf{C} 都为设计矩阵。随后, 在每个子集中分别完成空间解缠 (Song 等, 2024), 从而有效恢复桥梁存在非连续性变形条件下的时序形变。

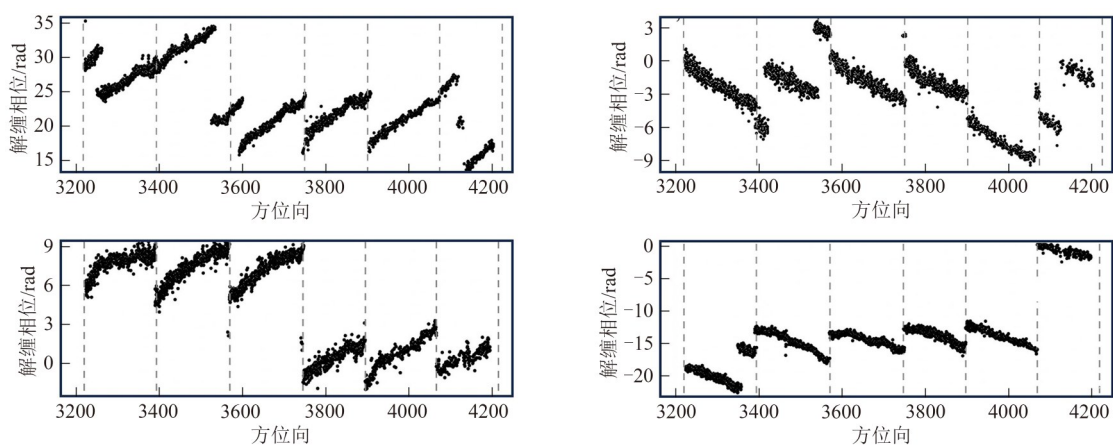
对图 5 中的干涉相位进行解缠, 得到的结果如图 6 所示。对比 MCF 方法与所介绍方法的结果, 可以明显发现 MCF 方法在存在显著相位跳变时产生了大量不合理的解缠错误 (图 6 (a)), 与实际情况存在较大偏差。而新方法能够有效识别伸缩缝处的相位不连续性, 使得解缠结果与真实物理过程更加吻合, 避免了由相位跳变引起的伪影。这一对比不仅验证了相位跳变现象的客观存在, 更突出了本研究方法在处理具有结构不连续性的大型桥梁设施时的独特优势与可靠性。

3.3 大气效应去除

大气延迟是 InSAR 应用于交通基础设施监测时最主要的误差来源, 可分为分层延迟和湍流延

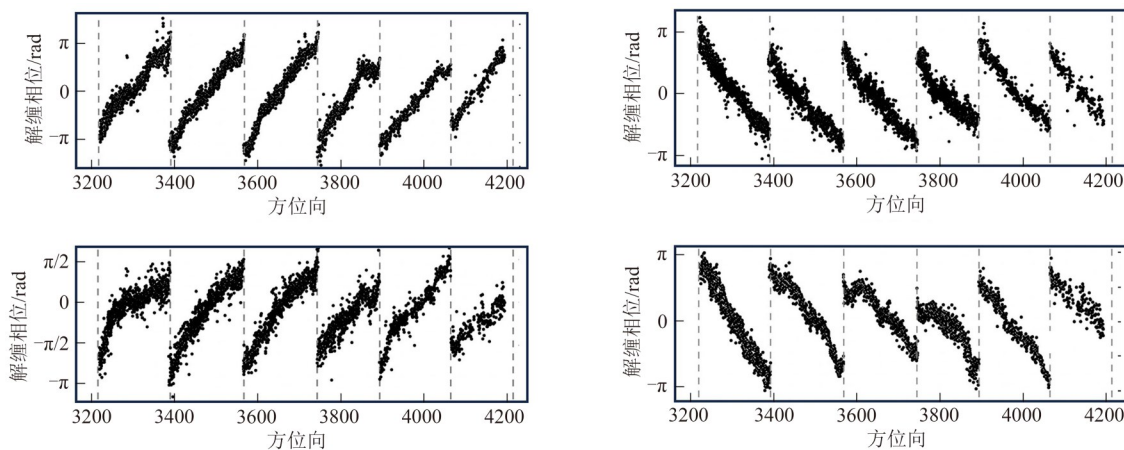
迟。在当前研究中, 基于外部数据的校正策略已成为应对大气延迟的常用技术路径之一。利用全球大气模型或 GNSS 数据构建的高分辨率大气产品 GACOS (如 Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR), 为区域性 InSAR 监测提供了一种高效的操作化校正方案, 能够有效估计并扣除与高程相关和湍流引起的大气延迟 (Yu 等, 2018; Xiao 等, 2021)。同时, 针对大气延迟也在模型驱

动方法上发展出多种有效方案。针对分层延迟, Liang 等 (2019) 提出了基于二叉树分割的联合模型方法, 将研究区域按地形起伏自适应划分为若干局部窗口, 并在每个窗口内联合估计形变、地形误差与分层延迟。这一方法克服了传统线性回归在大范围场景下难以处理空间非均一性的不足, 有效降低了高程相关残差, 提高了形变反演精度。



(a) MCF 解缠结果图

(a) Phase unwrapping result using the MCF method



(b) 自适应分段解缠结果图

(b) Phase unwrapping result using the adaptive segmentation method

图6 自适应分段解缠方法和MCF方法解缠结果比较(Song等, 2024) ((a)和(b)图从左到右、从上到下的4个图依次对应图5的4个子图;各图中的虚线位置表示伸缩缝出现的位置,从右至左分别为1—7号伸缩缝)

Fig. 6 Comparison of phase unwrapping results between the adaptive segmentation method and the MCF method (Song et al., 2024) (The four subplots in (a) and (b), arranged from left to right and top to bottom, correspond to the four subplots in Figure 5. The dashed lines in each subplot indicate the locations of expansion joints, numbered 1—7 from right to left)

较之下, 湍流延迟因其小尺度和时间快速变化特性更难处理。Chen 等 (2025) 提出将湍流建模为空间相关但时间非相关的随机过程, 并结合最小二乘配置 (LSC-InSAR) 方法, 从时空域上实现湍流信号与真实形变的分离。

该方法将去平去地形后第 i 景干涉图的干涉相位表示为

$$\varphi^i = \frac{4\pi}{\lambda} d^i + \varphi_{aps}^i + \varphi_{noi}^i \quad (10)$$

对于 p 个观测像素, 选择时间窗口长度为

k 组成观测数据向量 $\mathbf{y} = [\varphi(t_{i+1})^1, \varphi(t_{i+1})^2, \dots, \varphi(t_{i+1})^p, \varphi(t_{i+2})^1, \varphi(t_{i+2})^2, \dots, \varphi(t_{i+2})^p, \dots, \varphi(t_{i+k})^1, \varphi(t_{i+k})^2, \dots, \varphi(t_{i+k})^p]^T$ 。采用三次多项式描述形变相位时, 观测方程构建如下:

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{s} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (11)$$

式中, $\mathbf{A} = \mathbf{I}_{p \times p} \otimes \begin{bmatrix} 1 & t_{i+1} & t_{i+1}^2 & t_{i+1}^3 \\ 1 & t_{i+2} & t_{i+2}^2 & t_{i+2}^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & t_{i+k} & t_{i+k}^2 & t_{i+k}^3 \end{bmatrix}$, \mathbf{x} 是形

变模型参数向量, 其维数为 $4p \times 1$; $\mathbf{s} = [s(t_{i+1})^1, s(t_{i+1})^2, \dots, s(t_{i+1})^p, s(t_{i+2})^1, s(t_{i+2})^2, \dots, s(t_{i+2})^p, \dots, s(t_{i+k})^1, s(t_{i+k})^2, \dots, s(t_{i+k})^p]^T$ 表示每个像素的湍流分量; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为非模型化形变和失相干噪声部分。

其中湍流延迟基于经验协方差函数进行建模:

$$f_{\varphi\varphi}(d) = c(0)e^{-dd_0} \quad (12)$$

式中, 模型参数 $c(0)$ 和 d_0 是经验参数, 由最小二乘拟合得到, 同时构成湍流第 i 时刻的协方差矩阵, 用于描述像元间随距离衰减的相关性, 可表示为

$$\boldsymbol{\Sigma}_{ss}^i = \begin{bmatrix} f_{\varphi\varphi}(d_{1,1}) & f_{\varphi\varphi}(d_{1,2}) & \cdots & f_{\varphi\varphi}(d_{1,p}) \\ f_{\varphi\varphi}(d_{2,1}) & f_{\varphi\varphi}(d_{2,2}) & \cdots & f_{\varphi\varphi}(d_{2,p}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{\varphi\varphi}(d_{p,1}) & f_{\varphi\varphi}(d_{p,2}) & \cdots & f_{\varphi\varphi}(d_{p,p}) \end{bmatrix} \quad (13)$$

最后组建表示湍流信息的时空域方差—协方差矩阵:

$$\boldsymbol{\Sigma}_{ss} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Sigma}_{ss}^1 & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \boldsymbol{\Sigma}_{ss}^2 & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \boldsymbol{\Sigma}_{ss}^k \end{bmatrix} \quad (14)$$

确定 $\boldsymbol{\Sigma}_{ss}$ 后, 考虑湍流影响的形变模型参数可通过下式加权最小二乘估计:

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \boldsymbol{\Sigma}_{yy}^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \boldsymbol{\Sigma}_{yy}^{-1} \mathbf{y} \quad (15)$$

式中, $\boldsymbol{\Sigma}_{yy} = \boldsymbol{\Sigma}_{ss} + \boldsymbol{\Sigma}_{\varepsilon\varepsilon} = \sigma_s^2 \mathbf{Q}_{ss} + \sigma_\varepsilon^2 \mathbf{Q}_{\varepsilon\varepsilon}$ 。 $\boldsymbol{\Sigma}_{\varepsilon\varepsilon}$ 为表征失相干噪声的单位阵。由于 $\boldsymbol{\Sigma}_{ss}$ 的先验方差 σ_s^2 未知, 可通过方差分量估计确定 (Teunissen 等, 2008)。相应的湍流信号 $\hat{\mathbf{s}}$ 计算如下:

$$\hat{\mathbf{s}} = \boldsymbol{\Sigma}_{ss} \boldsymbol{\Sigma}_{yy}^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}) \quad (16)$$

通过形变建模、湍流协方差建模以及 LSC 加权解算, 该方法能够将空间相关的湍流延迟从时

序观测中分离出来, 并在机场等低海拔、热扰动强的区域显著降低均方误差。图7展示了所提方法在香港机场区域的应用效果。图7 (a) 为线性速率场及选取的3个特征点位置; 图7 (b)–(d) 分别为 P1、P2 和 P3 点的视线向 (LOS) 位移时间序列对比。可以看到, 去大气改正前 (红色) 结果受大气扰动影响较大, 时间序列波动明显, 而新方法改正后 (蓝色) 形变时间序列更加平滑, 点位的形变趋势与物理背景更加一致。其中, P1 点位于沉降区, 改正后沉降过程表现为先缓慢后加速, 随后逐渐放缓, 能够清晰揭示施工导致的沉降演化特征; 而在 P2 和 P3 等稳定区域, 改正后时间序列波动显著减小, 更接近稳定状态。这表明该方法能够有效分离大气湍流相位, 提升形变监测精度与时序稳定性。

近年来, 随着人工智能的快速发展, 深度学习方法逐渐被引入 InSAR 大气延迟改正研究, 并展现出良好的应用潜力。相关工作表明, 基于神经网络的模型能够通过特征学习有效区分大气延迟与真实形变分量, 在降低随机误差和季节性延迟的同时保持变形信号完整性。例如, 双向门控循环单元模型已被用于时序 InSAR 大气改正, 在典型城市设施应用中显著提升了大气延迟抑制效果与监测精度 (Ma 等, 2024)。总体来看, 随着深度学习模型架构的不断优化和训练样本的持续积累, 该类方法有望成为未来 InSAR 大气延迟建模与去除的重要发展方向, 为时序形变监测的高精度化与常态化应用提供新的技术支撑。

4 交通基础设施监测案例

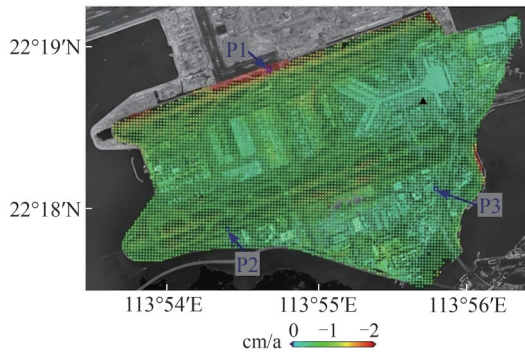
前文总结了 InSAR 在交通基础设施监测中面临的挑战及相应的处理策略, 为进一步展示 InSAR 技术在交通领域的应用潜力, 下面将结合机场、高架路、桥梁、铁路及地铁沿线等典型案例, 对其形变监测结果进行介绍与分析, 为后续研究与应用推广提供参考。

4.1 京港澳高速安阳段

京港澳高速 (G40) 作为中国重要的南北向交通大动脉, 在区域联通与经济发展中发挥着关键作用。其中, 安阳段与新乡段位于华北平原, 地质条件复杂且交通荷载密集, 是开展道路形变监测的典型区段。为评估该路段廊道的沉降特征

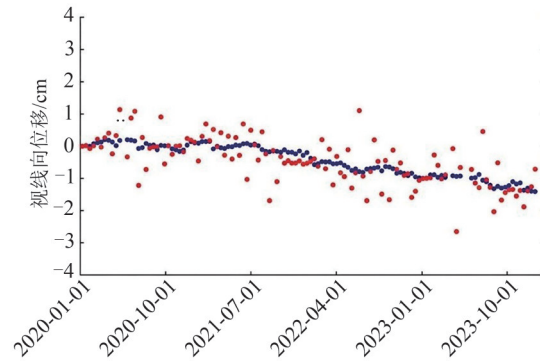
及其空间分布规律, 本研究采用涪城一号卫星在 2024 年 1 月—2024 年 8 月期间获取的 20 景降轨影

像开展了时序 InSAR 分析。



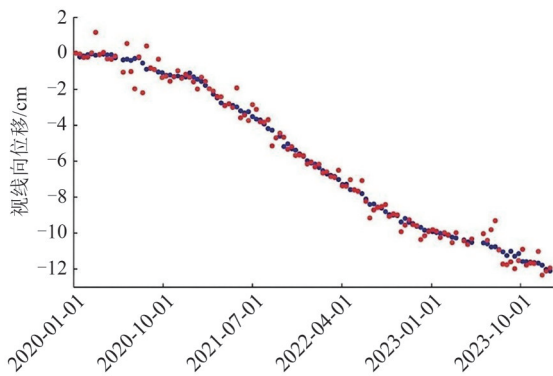
(a) 香港机场形变速率图

(a) Deformation velocity map of Hong Kong airport



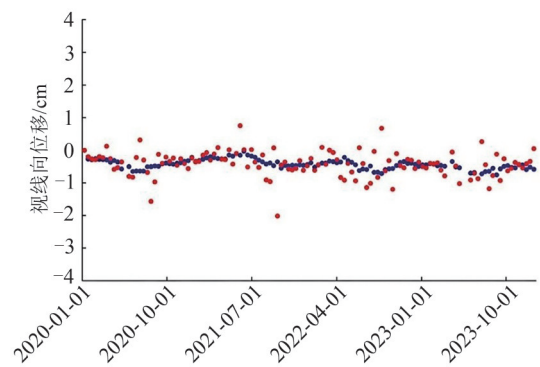
(b) P1 改正前后形变时序图

(b) Deformation time series at point P1 before and after correction



(c) P2 改正前后形变时序图

(c) Deformation time series at point P2 before and after correction



(d) P3 改正前后形变时序图

(d) Deformation time series at point P3 before and after correction

●新方法改正后 ●新方法改正前

图7 去除大气湍流效应的结果对比(Chen等,2025)

Fig. 7 Comparative results of atmospheric turbulence mitigation (Chen et al., 2025)

经处理后得到的整体形变速率如图 8 (a) 所示, 结果表明高速公路沿线形变分布存在显著的空间差异。在 G40 京港澳高速安阳段, 部分路段出现了沉降速率超过 -60 mm/a 的高风险区。对该区域放大分析(图 8 (b))可见, 沉降区呈带状分布, 并与高速公路走向高度一致, 表明该路段沉降受到周边地表沉降的显著影响。相比之下, 其余大部分区段沉降速率较小, 整体保持在 $-10 \sim -10 \text{ mm/a}$, 显示路基整体处于稳定状态。该案例验证了 InSAR 技术在高速公路形变监测中的显著优势: 一方面, 可在长距离廊道尺度上全面掌握整体沉降格局; 另一方面, 又能在局部区域实现毫米级的精细识别, 从而为道路安全运行与科学养护决策提供关键的空间信息支持。该结果验证了本研究所提相位优化方法在应对弱散射线性目标监测挑战方面的有效性, 成功实现在低相干道路

表面提取高空间密度的可靠形变点。在此基础上, 若进一步结合高架道路沿线沉降与周边地表沉降特征、道路建成通车时间及运行荷载条件, 并引入统计建模方法开展归因分析, 将有望更深入揭示高架道路沉降的影响机制, 拓展时序 InSAR 技术在交通基础设施监测中的应用深度与研究价值。

4.2 上海长江大桥

上海长江大桥是崇明越江通道南隧北桥的重要组成部分, 是中国国内第一条公路与轻轨交通一体化的跨江大桥。全长 16.63 km , 其中跨江主桥约 10 km , 沿线共设有 18 处伸缩缝(图 9 (a))。伸缩缝的存在使得桥梁形变呈现出明显的非连续特征, 如图 9 (b) 所示, 不同位置的伸缩缝在运行过程中会产生相对位移, 传统 InSAR 全局解缠方法难以直接恢复其真实形变。

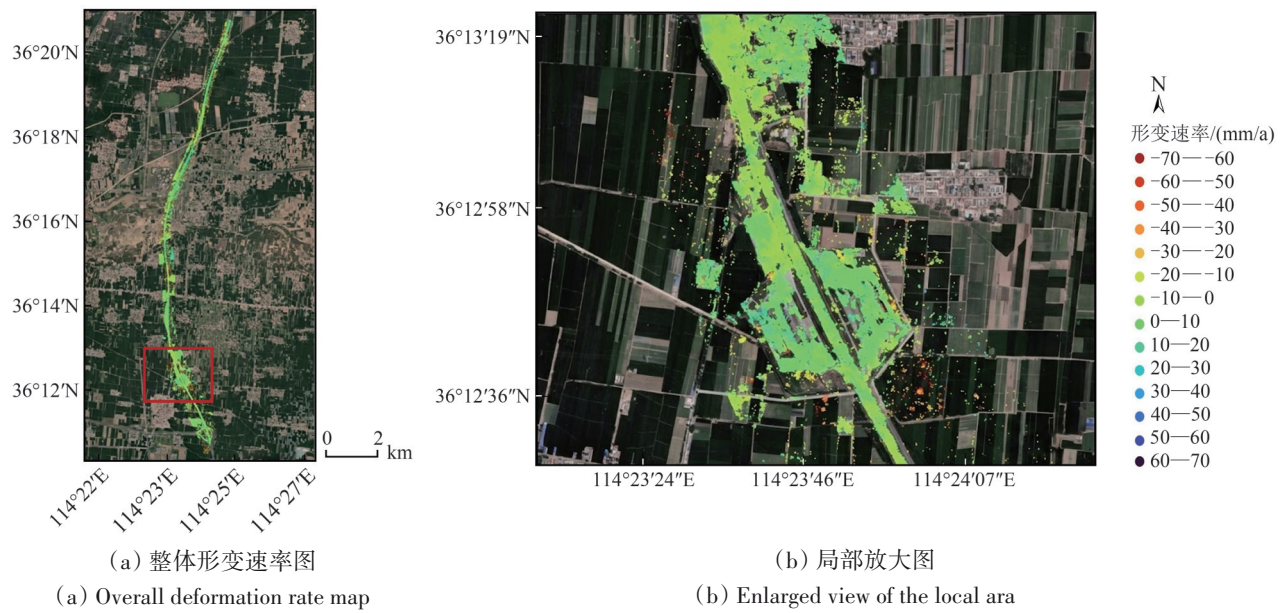


图8 G40 安阳段形变速率图

Fig. 8 Deformation rate map of the G40 expressway Anyang section

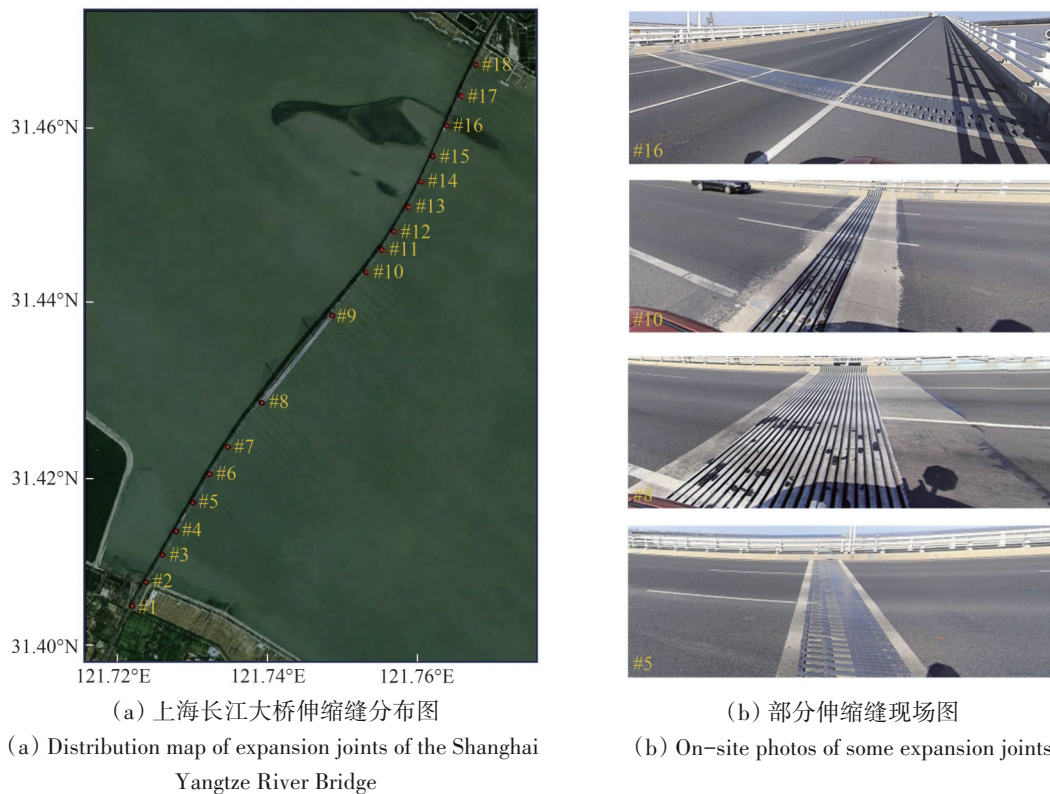


图9 上海长江大桥伸缩缝及示意图(Song 等, 2024) ((a)图中数字代表了所识别的伸缩缝位置及相应编号)

Fig. 9 Expansion joints of the Shanghai Yangtze River Bridge with a schematic illustration (Song et al., 2024) (The numbers in (a) indicate the identified locations and corresponding labels of the expansion joints)

为实现对大桥的有效监测, 本研究选取了2011年10月—2012年7月共23景TerraSAR-X影像数据, 采用3.2节介绍的自适应分段解缠方法对长江大桥开展监测。结果表明, 该方法能够准确

识别伸缩缝位置并实现子网划分, 成功检测到全部18处伸缩缝, 保证了形变结果的可靠性。在此基础上, 形变与环境温度的相关性分析表明(图10(a)), 桥梁位移与温度变化高度相关, 说

明桥梁形变主要由温度驱动的热胀冷缩效应所主导。剔除温度项后得到总体形变速率图如图10(b)所示,桥梁残余沉降速率总体 $<2\text{ mm/a}$,表明结

构整体处于稳定状态,仅在局部点位检测到约 -10 mm 的微小沉降。

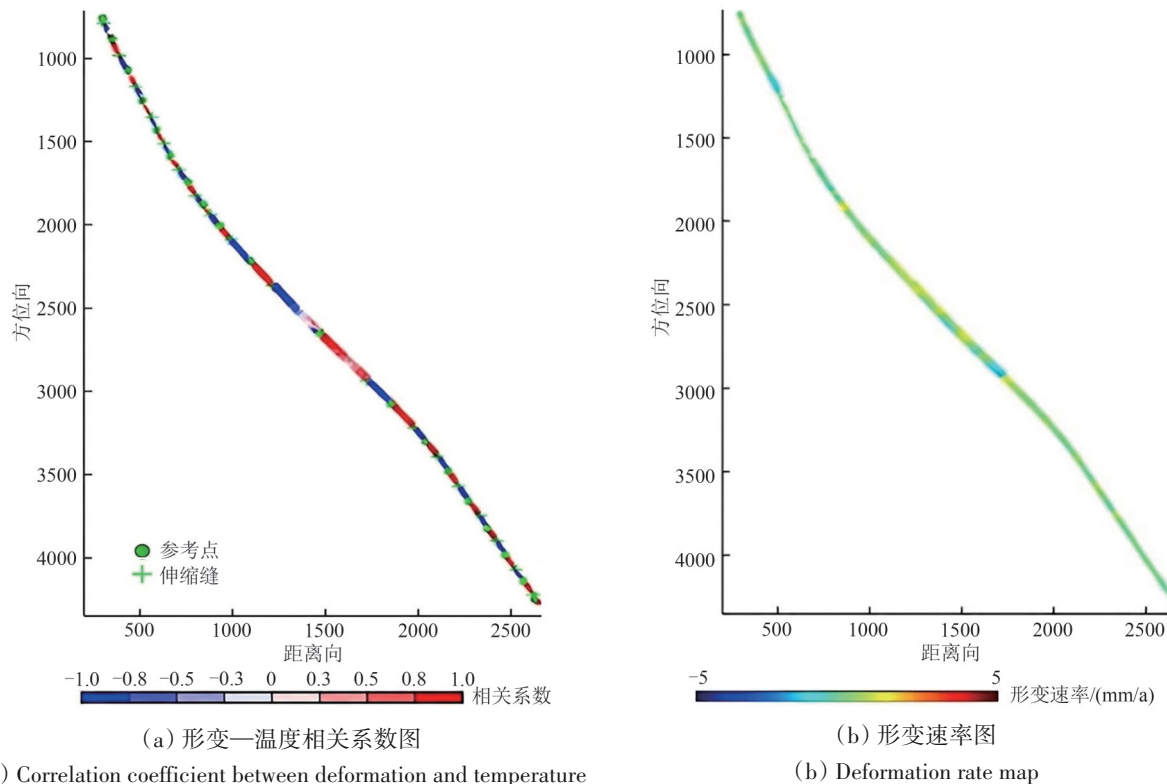


图10 大桥形变特征分析(Song等,2024)

Fig. 10 Analysis of bridge deformation characteristics (Song et al., 2024)

该案例表明时序InSAR技术结合自适应分段解缠策略,能够有效应对桥梁伸缩缝导致的非连续性形变问题,准确恢复大跨度桥梁的热胀冷缩规律与残余沉降特征。同时验证了时序InSAR在复杂桥梁结构监测中的适用性,为超大跨桥梁的长期安全运行与结构健康评估提供了重要的技术支持,显示出良好的工程应用潜力。

4.3 浦东机场

上海浦东机场位于上海市浦东新区的东部海岸处,是中国重要的国际航空枢纽之一,其跑道及周边设施的安全稳定运行至关重要。本研究选取了2019年6月—2022年12月的TerraSAR-X卫星数据,共16景影像进行时序InSAR形变监测分析。处理采用改进方法与时序InSAR处理流程,获得了年平均沉降速率分布(图11)和多时相累积形变量演化图(图12)。

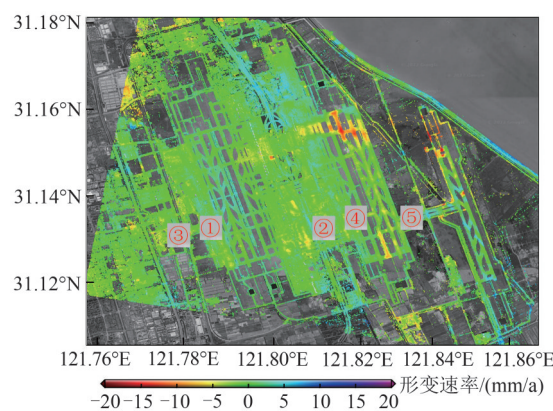


图11 浦东机场形变速率图(图中数字表示了浦东机场5条跑道的所在位置及对应跑道编号)

Fig. 11 Surface deformation velocity map of Pudong international airport (The numbers in the figure indicate the locations and corresponding designations of the five runways at Pudong International airport)

图11中红色序号标示了浦东机场5条跑道的空间位置。其中,第1跑道于1999年建成使用,

经历十余年的固结沉降后，整体已趋于稳定，仅在北侧靠近1号航站楼附近出现局部沉降漏斗，且沉降速率较缓。结合累计形变速率图（图12），第2、3、4跑道分别于2005年、2008年和2015年投入使用，均位于软土地基之上，地质条件较差。其中，第2跑道地基缺乏硬壳层，第3跑道建在浅埋粉质黏土层上，因此两者沉降特征更为显著。第4跑道沉降最为突出，其北端累计沉降超过

40 mm，这与其建成时间较晚、地基固结尚未完成密切相关。最右侧的第5跑道为中国商用飞机试飞专用跑道，在北端和中段均出现显著沉降，最大幅度超过35 mm。总体来看，浦东国际机场五条跑道的沉降特征存在明显差异，这一差异与其竣工年限及地质条件密切相关：地基条件较差且投入使用时间较短的跑道普遍表现出更大的沉降幅度，而早期建成的跑道则在长期固结后逐渐趋于稳定。

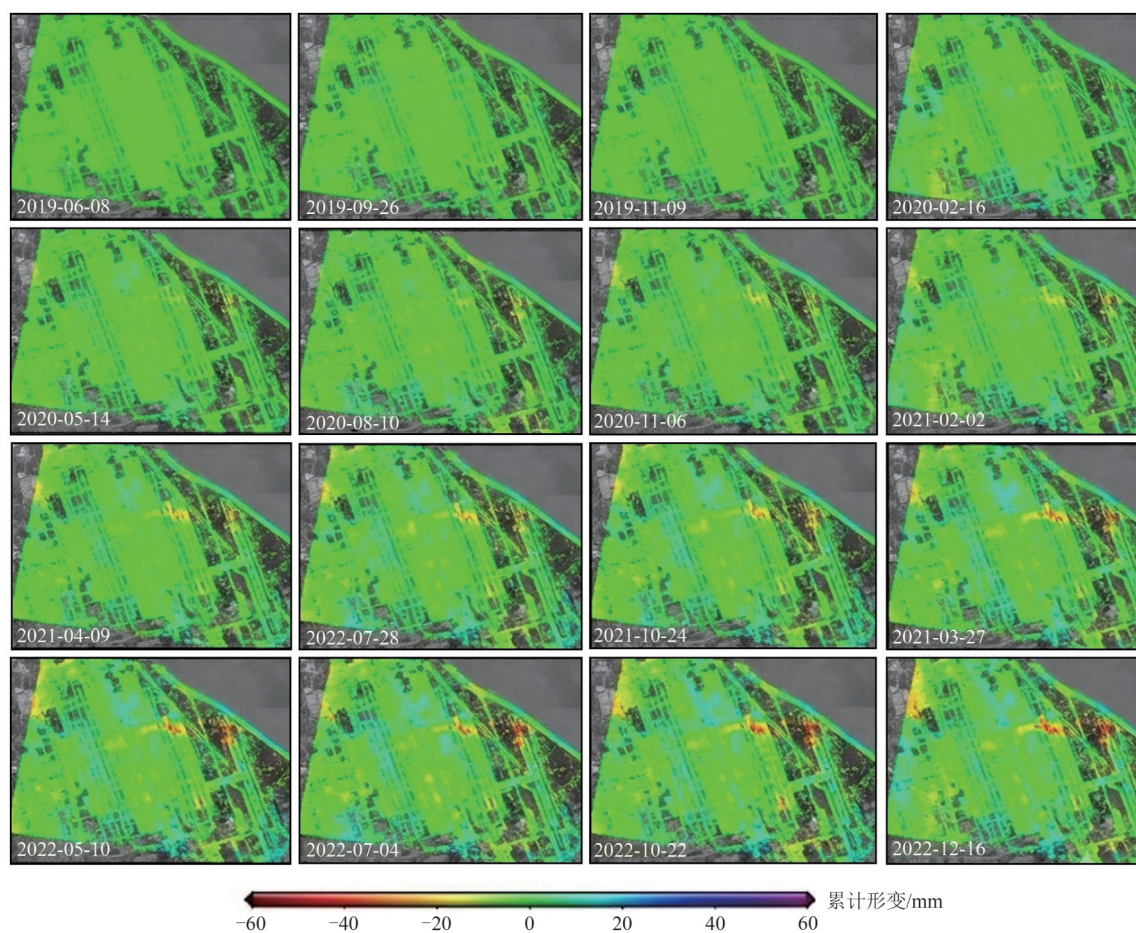


图12 浦东机场多时相累计形变图

Fig. 12 Cumulative multi-temporal deformation map of the Pudong international airport

基于地质条件的形变分析不仅有助于理解沉降机制，也为及时发现和预防公共基础设施潜在的安全隐患提供了科学依据。考虑到截至2022年底，部分沉降与抬升过程仍在持续，为保障航空运行安全，对机场关键区段开展长期连续监测与专项风险评估是不可或缺的。

4.4 河南三门峡城区段铁路

为验证InSAR技术在铁路监测中的适用性，本研究选取河南省三门峡市城区段铁路作为典型

研究对象。该区域位于城镇密集区，铁路长距离穿越居民区与工业区，其轨道基础设施的稳定性直接关系到列车运行安全与城市交通秩序。本研究采用涪城一号卫星数据，时间跨度为2024年5月—2024年12月，共获取19景降轨影像。经时序InSAR处理后，获得了铁路沿线的高分辨率形变速率分布图（图13（a））。结果表明，依托涪城一号3 m空间分辨率及高相干点密度的优势，铁路沿线沉降特征得以清晰呈现，相干点分布连续且密集，从而有效保证了监测结果的空间覆盖质量。

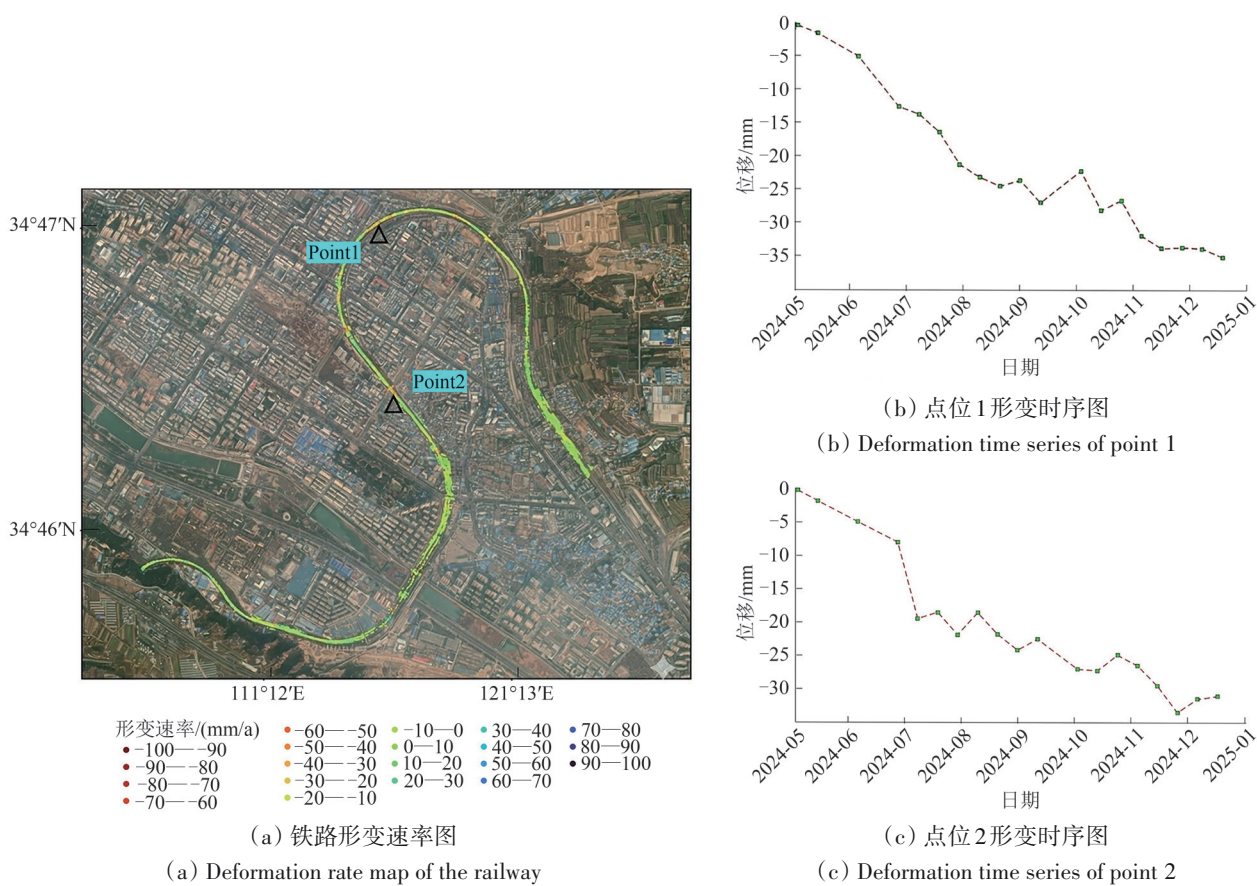


图13 三门峡城区铁路形变速率分析

Fig. 13 Analysis of railway deformation rates in Sanmenxia urban area

整体结果表明, 铁路多数区段保持稳定, 但局部区域存在显著沉降。对典型点位进一步分析后获得其时序位移序列 (图13 (b)、(c)), 结果显示部分区段近半年累计沉降超过30 mm, 且沉降过程呈持续渐进而非突发特征, 可能与区域地下水位变化及地基差异性密切相关。该时序位移序列的稳定获取也验证了本研究方法在抑制噪声、提升时序结果可靠性方面的有效性。总体而言, 该案例充分体现了时序InSAR技术在铁路监测中的优势: 一方面, 可在铁路路段实现大范围、连续的形变场获取; 另一方面, 又能针对局部异常点提取高精度时序位移信息, 从而揭示细微的沉降演化规律。二者结合不仅为铁路路基沉降机理分析提供了空间与时间双尺度依据, 也为铁路运营安全与早期养护干预提供了科学支撑。随着空间分辨率的不断提升和可用影像数量的持续增加, 时序InSAR技术将在更广泛的铁路监测场景中展现出更大的应用潜力。

5 结论

为厘清InSAR在交通基础设施监测中的应用

进展、关键瓶颈与可推广技术路径, 从而支撑其在交通安全管理中的常态化应用, 本研究以道路、铁路、桥梁与机场等典型交通基础设施为研究对象, 采用系统文献综述与技术脉络梳理相结合的方法, 围绕典型应用场景总结、关键挑战提炼、改进方法体系化归纳以及案例展示与未来方向讨论开展研究。主要结论如下: (1) 应用价值方面, InSAR凭借大范围覆盖、毫米级形变敏感性与长时序能力, 在交通基础设施沉降监测、形变识别与结构安全评估中展现出显著潜力, 具备形成区域化、连续化监测能力的优势; (2) 关键挑战方面, 弱散射目标导致的相干性不足、桥梁等复杂结构的非连续形变引发的相位解缠不稳定, 以及大气延迟对毫米级监测精度的显著干扰, 是制约其工程化可靠性与可重复性的核心问题; (3) 技术演进与展望方面, 现有相位优化与点目标增强、局部分段解算与外部约束结合、大气延迟建模与多源数据融合等策略可在一定程度上提升监测结果的可靠性与适用性, 但总体仍存在适用范围有

限、外部数据依赖偏强与计算效率不足等短板，未来需面向复杂场景进一步发展强鲁棒性、高效率的一体化时序 InSAR 技术体系，以构建交通基础设施监测的长效化机制。

面向未来，时序 InSAR 在交通基础设施监测中的演进将呈现多层次、跨学科融合的趋势。数据层面，结合光学遥感、GNSS、地基传感器与无人机观测，建立空天地多平台协同观测体系，实现高空间分辨率同高时间分辨率优势互补；算法层面，需突破传统时序分析的局限，发展物理机理与深度学习相融合的智能解译模型，通过引入结构力学等先验知识，实现从形变监测到结构健康诊断的转变；工程应用层面，要推动建立标准化评估体系，明确不同等级设施的形变预警阈值，最终形成可业务化运行的基础设施安全监测平台。通过上述持续的技术创新与跨学科融合，InSAR 有望实现从潜在可用向工程常态化应用的转变，为交通安全运行和风险控制提供更加坚实的技术支撑。

志 谢 本研究所使用的 TerraSAR-X 卫星数据由德国航空航天中心 (DLR) 通过项目 MTH3949 提供，特此表示感谢。

参考文献 (References)

- Bekaert D P S, Walters R J, Wright T J, Hooper A J and Parker D J. 2015. Statistical comparison of InSAR tropospheric correction techniques. *Remote Sensing of Environment*, 170: 40-47 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.08.035]
- Berardino P, Fornaro G, Lanari R and Sansosti E. 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11): 2375-2383 [DOI: 10.1109/TGRS.2002.803792]
- Carlà T, Intrieri E, Raspini F, Bardi F, Farina P, Ferretti A, Colombo D, Novali F and Casagli N. 2019. Perspectives on the prediction of catastrophic slope failures from satellite InSAR. *Scientific Reports*, 9(1):14137 [DOI: 10.1038/s41598-019-50792-y]
- Chang L, Dollevoet R P B J and Hanssen R F. 2017. Nationwide railway monitoring using satellite SAR interferometry. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(2): 596-604 [DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2584783]
- Chen C W and Zebker H A. 2002. Phase unwrapping for large SAR interferograms: statistical segmentation and generalized network models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(8): 1709-1719 [DOI: 10.1109/TGRS.2002.802453]
- Chen H L, Shen Y Z, Zhang L, Liang H Y, Feng T F and Song X Y. 2025. Mitigation of tropospheric turbulent delays in InSAR time series by incorporating a stochastic process. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 222: 186-203 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2025.02.028]
- Chen K Y, Lu M M, Fan X P, Wei M M and Wu J W. 2011. Road condition monitoring using on-board three-axis accelerometer and GPS sensor//2011 6th International ICST Conference on Communications and Networking in China (CHINACOM). Harbin: IEEE: 1032-1037 [DOI: 10.1109/ChinaCom.2011.6158308]
- Costantini M, Falco S, Malvarosa F, Minati F, Trillo F and Vecchioli F. 2014. Persistent scatterer pair interferometry: approach and application to COSMO-SkyMed SAR data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(7): 2869-2879 [DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2343915]
- Cusson D, Rossi C and Ozkan I F. 2021. Early warning system for the detection of unexpected bridge displacements from radar satellite data. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 11(1): 189-204 [DOI: 10.1007/s13349-020-00446-9]
- Cusson D, Trischuk K, Hébert D, Hewus G, Gara M and Ghuman P. 2018. Satellite-based InSAR monitoring of highway bridges: validation case study on the North Channel Bridge in Ontario, Canada. *Transportation Research Record*, 2672(45): 76-86 [DOI: 10.1177/0361198118758469]
- Duan G Y, Gong H L, Liu H H, Zhang Y Q, Chen B B and Lei K C. 2016. Monitoring and analysis of land subsidence along Beijing-Tianjin inter-city railway. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 44(6): 915-931 [DOI: 10.1007/s12524-016-0556-7]
- Ferrante C, Bianchini Ciampoli L, Benedetto A, Alani M and Tosti F. 2021. Non-destructive technologies for sustainable assessment and monitoring of railway infrastructure: a focus on GPR and InSAR methods. *Environmental Earth Sciences*, 80(24): 806 [DOI: 10.1007/s12665-021-10068-z]
- Ferretti A, Fumagalli A, Novali F, Prati C, Rocca F and Rucci A. 2011. A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(9): 3460-3470 [DOI: 10.1109/TGRS.2011.2124465]
- Ferretti A, Prati C and Rocca F. 2000. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5): 2202-2212 [DOI: 10.1109/36.868878]
- Ferretti A, Prati C and Rocca F. 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1): 8-20 [DOI: 10.1109/36.898661]
- Fuhrmann T and Garthwaite M C. 2019. Resolving three-dimensional surface motion with InSAR: constraints from multi-geometry data fusion. *Remote Sensing*, 11(3): 241 [DOI: 10.3390/rs11030241]
- Gagliardi V, Ciampoli L B, D'Amico F, Alani A M, Tosti F and Benedetto A. 2022. Remote sensing measurements for the structural

- monitoring of historical masonry bridges//Proceedings of the 1st Conference of the European Association on Quality Control of Bridges and Structures. Padua: Springer: 632-641 [DOI: 10.1007/978-3-030-91877-4_72]
- Gagliardi V, Ciampoli L B, D'Amico F, Tosti F, Alani A M and Benedetto A. 2020. A novel geo-statistical approach for transport infrastructure network monitoring by persistent scatterer interferometry (PSI)//Proceedings of the 2020 IEEE Radar Conference (RadarConf20). Florence: IEEE: 1-6 [DOI: 10.1109/RadarConf2043947.2020.9266336]
- Gagliardi V, Ciampoli L B, Trevisani S, D'Amico F, Alani A M, Benedetto A and Tosti F. 2021a. Testing Sentinel-1 SAR interferometry data for airport runway monitoring: a geostatistical analysis. *Sensors*, 21(17): 5769 [DOI: 10.3390/s21175769]
- Gagliardi V, Tosti F, Ciampoli L B, Battagliere M L, D'Amato L, Alani A M and Benedetto A. 2023. Satellite remote sensing and non-destructive testing methods for transport infrastructure monitoring: advances, challenges and perspectives. *Remote Sensing*, 15(2): 418 [DOI: 10.3390/rs15020418]
- Gagliardi V, Tosti F, Ciampoli L B, D'Amico F, Alani A M, Battagliere M L and Benedetto A. 2021b. Monitoring of bridges by MT-InSAR and unsupervised machine learning clustering techniques//Proceedings of SPIE 11863, Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications XII. [s. n.]: SPIE: 1186301 [DOI: 10.1117/12.2597509]
- Gao M L, Gong H L, Li X J, Chen B B, Zhou C F, Shi M, Guo L, Chen Z, Ni Z Y and Duan G Y. 2019. Land subsidence and ground fissures in Beijing capital international airport (BCIA): evidence from quasi-PS InSAR analysis. *Remote Sensing*, 11(12): 1466 [DOI: 10.3390/rs11121466]
- Goldstein R M, Zebker H A and Werner C L. 1988. Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping. *Radio Science*, 23(4): 713-720 [DOI: 10.1029/RS023i004p00713]
- Guarnieri A M and Tebaldini S. 2008. On the exploitation of target statistics for SAR interferometry applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(11): 3436-3443 [DOI: 10.1109/TGRS.2008.2000960]
- Guo R, Li S M, Chen Y N, Li X X and Yuan L W. 2021. Identification and monitoring landslides in longitudinal range-gorge region with InSAR fusion integrated visibility analysis. *Landslides*, 18(2): 551-568 [DOI: 10.1007/s10346-020-01475-7]
- Hanssen R F. 2001. *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Dordrecht: Springer [DOI: 10.1007/0-306-47633-9]
- He X F, Gao Z, Xiao R Y, Luo H B and Feng C. 2021. Monitoring and analysis of subsidence along Lian-Yan railway using multi-temporal Sentinel-1A InSAR. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 50(5): 600-611 (何秀凤, 高壮, 肖儒雅, 罗海滨, 冯灿. 2021. 多时相 Sentinel-1A InSAR 的连盐高铁沉降监测分析. *测绘学报*, 50(5): 600-611) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2021.20200226]
- Hooper A and Zebker H A. 2007. Phase unwrapping in three dimensions with application to InSAR time series. *Journal of the Optical Society of America A*, 24(9): 2737-2747 [DOI: 10.1364/JOSA.24.002737]
- Hooper A, Zebker H, Segall P and Kampes B. 2004. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters*, 31(23): L23611 [DOI: 10.1029/2004GL021737]
- Hosseini Nourzad S H and Pradhan A. 2016. Vulnerability of infrastructure systems: macroscopic analysis of critical disruptions on road networks. *Journal of Infrastructure Systems*, 22(1): 04015014 [DOI: 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000266]
- Hwang C, Hung W C and LIU C H. 2008. Results of geodetic and geotechnical monitoring of subsidence for Taiwan high speed rail operation. *Natural Hazards*, 47(1): 1-16 [DOI: 10.1007/s11069-007-9211-5]
- Intrieri E, Raspini F, Fumagalli A, Lu P, Del Conte S, Farina P, Allievi J, Ferretti A and Casagli N. 2018. The Maoxian landslide as seen from space: detecting precursors of failure with Sentinel-1 data. *Landslides*, 15(1): 123-133 [DOI: 10.1007/s10346-017-0915-7]
- Jia H G, Liu G X and Yu B. 2012. Monitoring subsidence along road network by ultrashort baseline PSInSAR. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (5):24-28 (贾洪果, 刘国祥, 于冰. 2012. 基于超短基线 PSInSAR 的道路网沉降监测. *测绘通报*, (5): 24-28)
- Jia H G and Liu L Y. 2016. A method for the extraction of long-term deformation characteristics of long-span high-speed railway bridges using high-resolution SAR images. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B7: 35-38 [DOI: 10.5194/isprsarchives-XLI-B7-35-2016]
- Jiang M and Guarnieri A M. 2020. Distributed scatterer interferometry with the refinement of spatiotemporal coherence. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(6): 3977-3987 [DOI: 10.1109/TGRS.2020.2965022]
- Jiang L M and Lin H. 2010. Integrated analysis of SAR interferometric and geological data for investigating long-term reclamation settlement of Chek Lap Kok Airport, Hong Kong. *Engineering Geology*, 110(3/4): 77-92 [DOI: 10.1016/j.enggeo.2009.11.005]
- Jiang Y N, Liao M S, Wang H M, Zhang L and Balz T. 2016. Deformation monitoring and analysis of the geological environment of Pudong international airport with persistent scatterer SAR interferometry. *Remote Sensing*, 8(12): 1021 [DOI: 10.3390/rs8121021]
- Kampes B M and Hanssen R F. 2004. Ambiguity resolution for permanent scatterer interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(11): 2446-2453 [DOI: 10.1109/TGRS.2004.835222]
- Karimzadeh S and Matsuoka M. 2020. Remote sensing X-band SAR data for land subsidence and pavement monitoring. *Sensors*, 20(17): 4751 [DOI: 10.3390/s20174751]
- Ko J M and Ni Y Q. 2005. Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges. *Engineering Structures*,

- 27(12): 1715-1725 [DOI: 10.1016/j.engstruct.2005.02.021]
- Lanari R, Reale D, Bonano M, Verde S, Muhammad Y, Fornaro G, Casu F and Manunta M. 2020. Comment on “pre-collapse space geodetic observations of critical infrastructure: the Morandi Bridge, Genoa, Italy” by Milillo et al. (2019). *Remote Sensing*, 12(24): 4011 [DOI: 10.3390/rs12244011]
- Lazecky M, Hlavacova I, Bakon M, Sousa J J, Perissin D and Patricio G. 2017. Bridge displacements monitoring using space-borne X-band SAR interferometry. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(1): 205-210 [DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2587778]
- Lei B C, Zhang L, Wu J C, Lu Z and Liang H Y. 2023. Enhancing InSAR coherence estimation through local phase surface modeling. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 20: 4014705 [DOI: 10.1109/LGRS.2023.3330728]
- Li Z W, Cao Y M, Wei J C, Duan M, Wu L X, Hou J X and Zhu J J. 2019. Time-series InSAR ground deformation monitoring: atmospheric delay modeling and estimating. *Earth-Science Reviews*, 192: 258-284 [DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.03.008]
- Liang H Y, Zhang L, Ding X L, Lu Z and Li X. 2019. Toward mitigating stratified tropospheric delays in multitemporal InSAR: a quadtree aided joint model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(1): 291-303 [DOI: 10.1109/TGRS.2018.2853706]
- Liu G X, Chen Q, Luo X J and Cai G L. 2019. *InSAR Principles and Applications*. Beijing: Science Press (刘国祥, 陈强, 罗小军, 蔡国林. 2019. *InSAR原理与应用*. 北京: 科学出版社)
- Luo Q L, Li J and Zhang Y Z. 2022. Monitoring subsidence over the planned Jakarta - Bandung (Indonesia) high-speed railway using Sentinel-1 multi-temporal InSAR data. *Remote Sensing*, 14(17): 4138 [DOI: 10.3390/rs14174138]
- Luo Q L, Li M L, Yin Z Y, Ma P F, Perissin D and Zhang Y Z. 2024. Land subsidence velocity and high-speed railway risks in the coastal cities of Beijing - Tianjin - Hebei, China, with 2015 - 2021 ALOS PALSAR-2 multi-temporal InSAR analysis. *Remote Sensing*, 16(24): 4774 [DOI: 10.3390/rs16244774]
- Ma P F, Yu C, Jiao Z Y, Zheng Y, Wu Z R, Mao W F and Lin H. 2024. Improving time-series InSAR deformation estimation for city clusters by deep learning-based atmospheric delay correction. *Remote Sensing of Environment*, 304: 114004 [DOI: 10.1016/j.rse.2024.114004]
- Macchiarulo V, Milillo P, Blenkinsopp C and Giardina G. 2022. Monitoring deformations of infrastructure networks: a fully automated GIS integration and analysis of InSAR time-series. *Structural Health Monitoring*, 21(4): 1849-1878 [DOI: 10.1177/14759217211045912]
- Milillo P, Giardina G, DeJong M J, Perissin D and Milillo G. 2018. Multi-temporal InSAR structural damage assessment: the London crossrail case study. *Remote Sensing*, 10(2): 287 [DOI: 10.3390/rs10020287]
- Milillo P, Giardina G, Perissin D, Milillo G, Coletta A and Terranova C. 2019. Pre-collapse space geodetic observations of critical infrastructure: the Morandi Bridge, Genoa, Italy. *Remote Sensing*, 11(12): 1403 [DOI: 10.3390/rs11121403]
- Mossop A and Segall P. 1997. Subsidence at the geysers geothermal field, N. California from a comparison of GPS and leveling surveys. *Geophysical Research Letters*, 24(14): 1839-1842 [DOI: 10.1029/97GL51792]
- Orellana F, Blasco J M D, Fomelis M, D'Aranno P J V, Marsella M A and Di Mascio P. 2020. DInSAR for road infrastructure monitoring: case study highway network of Rome metropolitan (Italy). *Remote Sensing*, 12(22): 3697 [DOI: 10.3390/rs12223697]
- Ozden A, Faghri A, Li M X and Tabrizi K. 2016. Evaluation of synthetic aperture radar satellite remote sensing for pavement and infrastructure monitoring. *Procedia Engineering*, 145: 752-759 [DOI: 10.1016/j.proeng.2016.04.098]
- Perissin D, Wang Z and Lin H. 2012. Shanghai subway tunnels and highways monitoring through Cosmo-SkyMed Persistent Scatterers. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 73: 58-67 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2012.07.002]
- Qin X Q, Ding X L, Liao M S, Zhang L and Wang C S. 2019. A bridge-tailored multi-temporal DInSAR approach for remote exploration of deformation characteristics and mechanisms of complexly structured bridges. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 156: 27-50 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.08.003]
- Qin X Q, Li Q Q, Ding X L, Xie L F, Wang C S, Liao M S, Zhang L, Zhang B C and Xiong S T. 2021. A structure knowledge-synthetic aperture radar interferometry integration method for high-precision deformation monitoring and risk identification of sea-crossing bridges. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 103: 102476 [DOI: 10.1016/j.jag.2021.102476]
- Qin X Q, Zhang L, Yang M S, Luo H, Liao M S and Ding X L. 2018. Mapping surface deformation and thermal dilation of arch bridges by structure-driven multi-temporal DInSAR analysis. *Remote Sensing of Environment*, 216: 71-90 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.06.032]
- Selvakumaran S, Plank S, Geiß C, Rossi C and Middleton C. 2018. Remote monitoring to predict bridge scour failure using interferometric synthetic aperture radar (InSAR) stacking techniques. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73: 463-470 [DOI: 10.1016/j.jag.2018.07.004]
- Selvakumaran S, Rossi C, Marinoni A, Webb G, Bennetts J, Barton E, Plank S and Middleton C. 2020. Combined InSAR and terrestrial structural monitoring of bridges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(10): 7141-7153 [DOI: 10.1109/Tgrs.2020.2979961]
- Song X Y, Zhang L, Lu Z, Wu J C, Song R Q, Liang H Y and Bian W W. 2024. Toward retrieving discontinuous deformation of bridges by MTInSAR with adaptive segmentation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62: 5202215 [DOI: 10.1109/TGRS.2023.3347478]
- Sousa J J and Bastos L. 2013. Multi-temporal SAR interferometry reveals acceleration of bridge sinking before collapse. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(3): 659-667 [DOI: 10.5194/

- nhess-13-659-2013]
- Sui H G, Hua F, Fan Y D and Liu J Y. 2016. Road damage extraction from high-resolution SAR image based on GIS data and Bayes network. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 41(5): 578-583 (眭海刚, 华凤, 范一大, 刘俊怡). 2016. 利用 GIS 与贝叶斯网络进行高分辨率 SAR 影像道路损毁信息提取. *武汉大学学报(信息科学版)*, 41(5): 578-583 [DOI: 10.13203/j.whugis20140323]
- Teunissen P J G and Amiri-Simkooei A R. 2008. Least-squares variance component estimation. *Journal of Geodesy*, 82(2): 65-82 [DOI: 10.1007/s00190-007-0157-x]
- Tosti F, Gagliardi V, D'Amico F and Alani A M. 2020. Transport infrastructure monitoring by data fusion of GPR and SAR imagery information. *Transportation Research Procedia*, 45: 771-778 [DOI: 10.1016/j.trpro.2020.02.097]
- Wang R. 2025. Time series InSAR for linear infrastructure deformation monitoring and evolution pattern interpretation. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 50(7): 1455 (王茹). 2025. 时间序列 InSAR 线状基础设施形变测量与模式解译. *武汉大学学报(信息科学版)*, 50(7): 1455 [DOI: 10.13203/j.whugis20250077]
- Wang R, Yang T L, Yang M S, Liao M S, Lin J X and Zhang L. 2018. Attribution analysis on deformation feature of the Shanghai elevated highway by persistent scatterer SAR interferometry. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 43(12): 2050-2057 (王茹, 杨天亮, 杨梦诗, 廖明生, 林金鑫, 张路). 2018. PS-InSAR 技术对上海高架路的沉降监测与归因分析. *武汉大学学报(信息科学版)*, 43(12): 2050-2057 [DOI: 10.13203/j.whugis20180150]
- Wasowski J, Bovenga F, Refice A, Nitti D and Nutricato R. 2015. High resolution PSI for mapping ground deformations and infrastructure instability//*Engineering Geology for Society and Territory - Volume 2*. Torino: Springer: 399-403 [DOI: 10.1007/978-3-319-09057-3_63]
- Werner C, Wegmuller U, Strozzi T and Wiesmann A. 2003. Interferometric point target analysis for deformation mapping//2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE cat. No.03CH37477). Toulouse: IEEE: 4362-4364 [DOI: 10.1109/IGARSS.2003.1295516]
- Wu S B, Yang Z F, Ding X L, Zhang B C, Zhang L and Lu Z. 2020. Two decades of settlement of Hong Kong international airport measured with multi-temporal InSAR. *Remote Sensing of Environment*, 248: 111976 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111976]
- Xiao R Y, Yu C, Li Z H and He X F. 2021. Statistical assessment metrics for InSAR atmospheric correction: applications to generic atmospheric correction online service for InSAR (GACOS) in Eastern China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 96: 102289 [DOI: 10.1016/j.jag.2020.102289]
- Xing X M, Zhu Y K, Xu W B, Peng W and Yuan Z H. 2022. Measuring subsidence over soft clay highways using a novel time-series InSAR deformation model with an emphasis on rheological properties and environmental factors (NREM). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 4601319 [DOI: 10.1109/TGRS.2022.3154430]
- Ye Y C, Yan C D, Luo X X, Zhang R F and Yuan G J. 2022. Analysis of ground subsidence along Zhengzhou metro based on time series InSAR. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(7): 1342-1353 (叶勇超, 闫超德, 罗先学, 张瑞峰, 袁观杰). 2022. 时序 InSAR 郑州地铁沿线地面沉降分析. *遥感学报*, 26(7): 1342-1353 [DOI: 10.11834/jrs.20211246]
- Yin Y P, Zhang Z C and Zhang K J. 2005. Land subsidence and countermeasures for its prevention in China. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 16(2):1-8 (殷跃平, 张作辰, 张开军). 2005. 我国地面沉降现状及防治对策研究. *中国地质灾害与防治学报*, 16(2): 1-8 [DOI: 10.3969/j.issn.1003-8035.2005.02.001]
- Yu C, Li Z H, Penna N T and Crippa P. 2018. Generic atmospheric correction model for interferometric synthetic aperture radar observations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(10): 9202-9222 [DOI: 10.1029/2017JB015305]
- Zebker H A, Rosen P A and Hensley S. 1997. Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B4): 7547-7563 [DOI: 10.1029/96JB03804]
- Zhang L, Ding X L and Lu Z. 2011. Modeling PSInSAR time series without phase unwrapping. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(1): 547-556 [DOI: 10.1109/TGRS.2010.2052625]
- Zhang L, Ding X L, Lu Z, Jung H S, Hu J and Feng G C. 2014. A novel multitemporal InSAR model for joint estimation of deformation rates and orbital errors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(6): 3529-3540 [DOI: 10.1109/TGRS.2013.2273374]
- Zhang Q Y, Li Y S, Zhang J F and Luo Y. 2019. InSAR technique applied to the monitoring of the Qinghai - Tibet railway. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(10): 2229-2240 [DOI: 10.5194/nhess-19-2229-2019]
- Zhang Y H, Wu H A and Kang Y H. 2016. Ground subsidence over Beijing-Tianjin-Hebei region during three periods of 1992 to 2014 monitored by interferometric SAR. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 45(9): 1050-1058 (张永红, 吴宏安, 康永辉). 2016. 京津冀地区 1992—2014 年三阶段地面沉降 InSAR 监测. *测绘学报*, 45(9): 1050-1058 [DOI: 10.11947/j.AGCS.2016.20160072]
- Zhao J W, Wu J C, Ding X L and Wang M Z. 2017. Elevation extraction and deformation monitoring by multitemporal InSAR of Lupu Bridge in Shanghai. *Remote Sensing*, 9(9): 897 [DOI: 10.3390/rs9090897]

InSAR for transportation infrastructure deformation monitoring: Advances and applications

LEI Baocheng¹, ZHANG Lei¹, REN Weijia², NIJIATI Muhetaer², LIANG Hongyu¹,
SONG Xinyou¹, CHEN Hailu¹, YIN Hui²

1. College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Spacety Co., Ltd. (Changsha), Changsha 410205, China

Abstract: As an important Earth observation technology, Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) has been widely applied in surface deformation monitoring, such as urban subsidence, mining activities, and geological hazards, owing to its advantages of wide spatial coverage, millimeter-level precision, and long-term temporal observations. In recent years, its applications have extended to the safety monitoring of transportation infrastructure. Roads, railways, bridges, and airports are characterized by wide spatial distribution, linear and elongated structures, dynamic operation, and complex service environments, which pose high demands on conventional monitoring methods. InSAR provides a promising alternative solution. This study focuses on the applications of InSAR in transportation infrastructure monitoring by systematically reviewing research progress and development trends. First, based on current studies, typical applications of InSAR for different types of infrastructure, including roads, railways, bridges, and airports, are summarized to demonstrate its potential in subsidence monitoring, deformation identification, and structural safety assessment. Second, the major challenges of current InSAR applications are outlined by considering the particularities of transportation scenarios. These challenges include insufficient coherence due to weak scattering targets, discontinuous deformation of bridges and similar facilities that violate conventional models, and severe interference of atmospheric turbulence with millimeter-level monitoring precision. Several methodological improvements are discussed to address these challenges. These improvements include phase optimization, localized inversion with external constraints, atmospheric delay modeling, and integration with auxiliary datasets, which collectively enhance the reliability and applicability of InSAR results. Finally, the study incorporates representative application cases from the authors' team on various types of infrastructure, thereby highlighting the potential of time-series InSAR technology in this field and further outlining future research directions. The application of InSAR technology in transportation infrastructure monitoring has already demonstrated broad prospects; however, continuous methodological and application-oriented improvements are still required to support transportation safety management and risk mitigation adequately.

Key words: InSAR, transportation infrastructure, deformation monitoring, road subsidence, bridge monitoring, airport subsidence

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42574040, 42174005)