

城市目标动态监测中的时序InSAR分析方法及应用

廖明生^{*①} 王茹^① 杨梦诗^{*①} 王楠^① 秦晓琼^② 杨天亮^③

^①(武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室 武汉 430079)

^②(深圳大学建筑与城市规划学院 深圳 518060)

^③(上海市地质调查研究院 上海 200072)

摘要: 城市地表和人工建筑的稳定性监测一直是城市安全的重要监测内容之一。星载合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术以其大范围、高精度、高空间密度的形变获取能力,被广泛用于大范围地表形变监测。近年来,随着星载SAR系统分辨率的不断提高,时序InSAR技术越来越多地应用于重要基础设施的监测。该文结合作者团队长期基于时序InSAR技术在城市地区监测研究经历,总结和回顾了团队关于时序InSAR方法在城市动态监测中的一些典型应用,包括城市机场、高架路网、桥梁、铁路和地铁沿线等,根据多年获取的高分辨率TerraSAR-X影像、Cosmo-SkyMed影像以及后续免费获取的Sentinel-1影像等多种数据以及监测研究中发现的研究问题及相应解决方法,在应用中取得了良好的效果,展现了时序InSAR技术在城区目标精细监测中的潜力。

关键词: 雷达干涉测量; 时间序列InSAR分析; 形变监测; 城市目标识别; 人工建筑物监测; 地表沉降

中图分类号: TN959.3

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2020)03-0409-16

DOI: 10.12000/JR20022

引用格式: 廖明生, 王茹, 杨梦诗, 等. 城市目标动态监测中的时序InSAR分析方法及应用[J]. 雷达学报, 2020, 9(3): 409-424. doi: 10.12000/JR20022.

Reference format: LIAO Mingsheng, WANG Ru, YANG Mengshi, *et al.* Techniques and applications of spaceborne time-series InSAR in urban dynamic monitoring[J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(3): 409-424. doi: 10.12000/JR20022.

Techniques and Applications of Spaceborne Time-series InSAR in Urban Dynamic Monitoring

LIAO Mingsheng^{*①} WANG Ru^① YANG Mengshi^{*①} WANG Nan^①
QIN Xiaoqiong^② YANG Tianliang^③

^①(State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

^②(School of Architecture & Urban Planning, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

^③(Shanghai Institute of Geological Survey, Shanghai 200072, China)

Abstract: The dynamic monitoring of the geological environment in urban areas, including the monitoring of the urban surface stability and detailed monitoring of man-made objects on the surface, is very important for ensuring effective and safe urban development. Spaceborne time-series InSAR technology is widely used to monitor urban deformation due to its large scale, high accuracy, and ability to acquire high-density spatial deformations. In recent years, with the operation of high-resolution satellite missions, time-series InSAR has also been widely used to monitor infrastructures. In this paper based on our long-term monitoring research

收稿日期: 2020-03-21; 改回日期: 2020-06-04; 网络出版: 2020-06-22

*通信作者: 廖明生 liao@whu.edu.cn; 杨梦诗 yangms@whu.edu.cn

*Corresponding Author: LIAO Mingsheng, liao@whu.edu.cn; YANG Mengshi, yangms@whu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划课题(2019YFC1509200), 国家自然科学基金(41571435), 中国博士后科学基金(2019M660210)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (2019YFC1509200), The National Natural Science Foundation of China (41571435), The National Science Foundation for Post-doctoral Scientists of China (2019M660210)

责任编辑: 张红 Corresponding Editor: ZHANG Hong

experience in urban areas using the time-series InSAR technique, we review the application of some typical time-series-InSAR cases to the urban environment, including the monitoring of urban surface displacement and typical large infrastructures, including the airports, elevated road networks, bridges, railways, and subways. Based on various datasets including high-resolution TerraSAR-X images, Cosmo-SkyMed images, and recent Sentinel-1 images obtained at no cost, and the research problems and corresponding solutions identified in published monitoring research, we found good results to have been achieved using this application. With the implementation of more and more satellite missions, this technology will provide more possibilities for urban monitoring.

Key words: SAR interferometry; Time series InSAR technique; Deformation monitoring; Urban target recognition; Infrastructures monitoring; Land subsidence

1 引言

联合国人口司(United Nations Population Division, UNPD)公布的世界城市化趋势报告显示,到2050年全球将有68%的人口居住在城市区域^[1]。持续增长的城市人口不断增加城市基础设施的负荷,给城市的安全运行带来挑战。一方面,城市地质环境的变化容易引发地表不均匀沉降,威胁现有的轨道交通、高架路网以及地表建筑的安全,早期建筑本身也容易受设计年限以及不规范使用等因素影响存在潜在危险。另一方面,在城市的快速发展中,集中建设的大型基础设施项目也会给周边建筑带来威胁。因此,需要及时高效地对城市建筑进行稳定性监测,及时捕捉异常的形变信号保障城市安全,同时也为城市规划及可持续发展提供重要参考和有力保障。

星载合成孔径雷达干涉测量(Interferometry Synthetic Aperture Radar, InSAR)技术以其大范围、高精度、不受云雨天气影响的优势,是重复进行地表观测的有力手段^[2,3]。时间序列InSAR技术针对传统InSAR技术中受时空去相干和大气相位屏障影响的问题,通过提取在时间序列上具有稳定散射特性的高相干点^[4],依据不同相位源的时空特性实现分离,获得在观测时间段内,经过地形、轨道以及大气误差改正的形变速率场^[5-8]。时序InSAR分析被认为是极具潜力的地表观测手段^[9],近年来被广泛应用于城区的动态监测^[10]。

早期的研究关注于大范围的城市地表沉降,主要依赖于ESA的ERS-1/2和ENVISAT ASAR、JAXA的JERS-1和CSA的RADARSAT-1等雷达卫星数据。这些星载系统为雷达遥感在城市区域应用的初期研究提供了大量的数据,促进了相关理论方法和应用技术的迅速发展。时间序列InSAR技术以其大范围、高空间采样、精确的地表形变结果,在城市地区大范围地表沉降监测表现出很大的优势。国内由武汉大学的课题组率先对时间序列InSAR技术开展实验性研究^[9]。目前该技术已经陆续地应用于唐山^[11],苏州^[12],上海^[13-18],天津^[19,20],西安^[21],北

京^[22,23],湖南^[24],南通^[25],西藏^[26],广州^[27-29],武汉^[30],太原^[31],南京^[32]等地区的实验研究。

随着城市的快速发展,对城市环境的监测从大范围区域性沉降监测扩展到大型人工地物的精细监测。这些人工地物包含居民区住宅楼、商业区大厦、大型民用基础设施(如机场、高速公路、高铁和桥梁)等^[33]。而精密水准观测、GNSS观测以及现场传感器观测等存在测点密度稀疏,观测周期长,劳动强度大等问题。随着高分辨率星载SAR系统的发射,雷达卫星影像的分辨率由十余米提高到了米级(条带模式)甚至亚米级(凝视聚束模式),使得雷达遥感技术真正进入了高分辨率时代,在地表形变的精细化监测方面展现出了巨大的潜力^[34]。因此,如何利用高分辨率SAR卫星数据实现成像和识别一体化^[35],开展城市人工地物的精细监测成为近十年的热点之一。在国内的研究中,时序InSAR技术成功地应用于堤坝监测^[36],交通路网沿线、铁路沿线监测和地铁沿线稳定分析^[28,37-42]、居民楼动迁房监测^[43]、机场稳定性评估和桥梁监测^[44-46]等方面,图1简要列出了目前星载InSAR技术在城市目标动态监测中的应用进展。

本文将展示时间序列InSAR技术在城市动态监

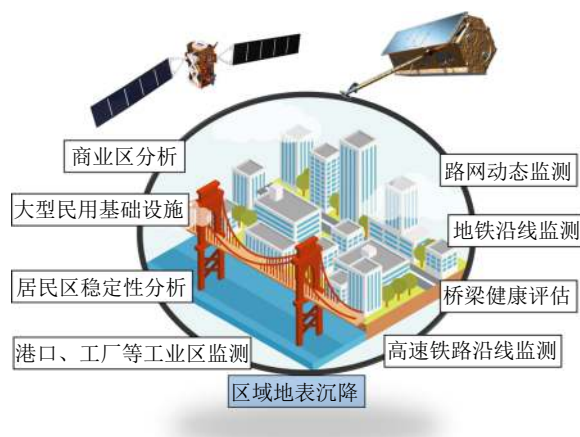


图 1 星载雷达遥感与城市动态监测应用的研究进展

Fig. 1 Research progress of spaceborne time-series InSAR technique in urban dynamic monitoring

测中的一些典型应用。第2节简要概述时间序列InSAR方法。第3节总结作者团队在上海和武汉两座城市中分别采用高分辨率TerraSAR-X数据和Sentinel-1数据进行区域沉降监测的应用。其中的算法技术细节可以参考^[4-8,10]。第4节回顾了几个典型的大型基础设施监测的实例, 包含机场、高架路网、桥梁、铁路和地铁沿线监测等, 为今后进一步的深化应用提供参考。

2 时间序列InSAR技术方法概述

差分InSAR(Differential InSAR, D-InSAR)技术通过计算两次雷达干涉成像结果来量测地表沉降量, 其受到时间去相干、空间去相干影响较大。因此, 基于相干雷达目标的时间序列InSAR方法应运而生, 典型方法包括永久散射体方法(Persistent Scatterer InSAR, PS-InSAR)和小基线集方法(Small BAseline Subset, SBAS)^[4-8,10]。PS-InSAR利用一组覆盖同一地区的时间序列SAR影像, 通过统计分析返回的相位和幅度信息, 选择不受时间、空间基线去相干和大气影响的稳定点目标(永久散射体), 分析其相位变化信息进而提取形变信息, 有效解决了D-InSAR技术中时间、空间去相干和大气效应等限制测量精度的问题, 表现出毫米级地表形变信息获取能力, 极大地推动了D-InSAR技术的发展和应用^[6]。PS-InSAR是采用单一主影像的方法, 而SBAS方法与之不同的是, 为尽量保持干涉图的相干性, 采用多主影像的方式组合出短时间、空间基线的干涉图, 该方法在地球物理学领域应用较多。目前时间序列InSAR技术已经被广泛应用于地表形变监测的多个领域。

时间序列InSAR方法的数据处理步骤: 首先是高分辨率SAR影像的配准和定标, 在此基础上, 根据时间、空间基线和多普勒频率选择最优的干涉组合, 将主影像与配准后的时间序列SAR影像进行干涉处理, 生成干涉图集和相干图集。进而利用外部DEM数据去除地形相位, 生成时间序列差分干涉图集。之后根据不同的数据和研究对象条件, 采用不同的相干点目标提取方法。例如, 本文在上海研究区域, 采用时空双重阈值的方法提取相干点目标, 有效地提高了点目标的估算精度。

进一步地, 根据实验区内收集的数据情况、大气状况、形变场的形变特征和干涉对组合策略, 构建函数模型和随机模型, 对选取的候选点构建稀疏格网, 相邻点的相位梯度可表示为

$$\Delta\varphi = W \{ \Delta\varphi_{\text{topo}} + \Delta\varphi_{\text{def}} + \Delta\varphi_{\text{atm}} + \Delta\varphi_{\text{scatt}} + \Delta\varphi_{\text{noise}} \} \quad (1)$$

式中, $W \{ \cdot \}$ 为相位缠绕操作, $\Delta\varphi_{\text{topo}}$ 为地形误差相

位, $\Delta\varphi_{\text{def}}$ 为形变相位, $\Delta\varphi_{\text{atm}}$ 为大气扰动相位, $\Delta\varphi_{\text{scatt}}$ 为散射相位, $\Delta\varphi_{\text{noise}}$ 为噪声相位。然后, 使用带权的最小二乘方法进行相位解缠, 从已知参考点解算出稀疏格网上每点的线性形变速率和DEM误差的绝对值。最后, 为了获得更精确的反演结果, 根据大气扰动项、轨道误差项、地形误差项等不同误差项的特性, 可采用时空滤波的方法对其进行估计和消除, 进而提取出相关的实验结果, 包括时间序列上稳定点目标的提取结果、点目标的沉降速率场、DEM误差分布图、大气误差分布图和轨道误差估计图等。值得一提的是, 在针对一些对温度变化敏感的基础设施的监测研究中, 对温度形变项的提取和分析也是保证监测结果的重要研究问题, 具体的步骤可参考文献^[39,44,45]。最后, 对提取的形变速率和时间序列结果进行分析和质量控制, 并与地面测量数据进行对比分析。

3 时间序列InSAR技术在城区沉降监测研究

时间序列InSAR技术监测城市地区沉降现象主要包括因地下水开采引起的地表沉降以及大量工程建设活动等导致的地表形变。城市区域内人工建筑物分布较多, 金属、玻璃、水泥表面等材料容易产生稳定点目标, 可以很大程度地减少InSAR技术中的时间失相干, 从而得到较为可靠的形变信号。在实践中尽可能选择高分辨率SAR影像, 有助于精细化监测城区地表稳定性。另外, 高分辨率影像一般受幅宽限制, 需要进行合理的数据融合才可实现较大范围的监测研究。

3.1 时序TerraSAR-X影像在上海地区监测研究

上海市位于我国东部, 地处长江和黄浦江流入东海的入海口, 是长江三角洲冲积平原的一部分。地表沉降是上海主要的地质灾害之一, 近年来上海地表沉降的分布范围不断扩大, 已经从中心城区为主发展成区域性的地表沉降。上海不断推进城市化进程, 近远郊地区特别是新兴城镇的地表沉降有所发展。同时, 东部沿海地区由冲填土填海造陆形成, 冲填土属于欠固结土, 初期不但具有含水率高、孔隙比大、强度低等不良特性, 而且其厚度变化大, 土质极不均匀。这种欠固结土壤的结构需要一定时间进行再组合, 土体的有效应力要在排水固结条件下才能提高, 因此压实过程会导致地表沉降。由此, 笔者从2004年以来致力于利用时间序列SAR影像对上海地区进行地表沉降监测研究^[10,13,16-18]。

课题组收集了2013年4月—2019年3月, 6年期间的120景TerraSAR-X降轨影像(2个覆盖区, 左右覆盖区各60景), 数据处理和解译后得到的上海地

区沉降速率分布图如图2所示，右图为对应的上海浦东国际机场的沉降解译结果。长时间序列SAR影像提取的相干点目标空间分布上主要集中在地表的人工地物上，尤其在城区点密度较大，郊区的点密度较小。东部沿海地区由于地表变化较大，提取的相干点也较少。可以看出近年来上海市的地表沉降情况得到了较好的控制，整体上保持相对稳定的情况，沉降速率集中分布在-5~5 mm/yr之间，沉降发生在少数区域。比较明显的沉降发生在以下区域：

- (1) 闵行区梅馨隄韵居民区以及上海金领谷科技产业园周边，出现沉降现象，沉降速率分布在-8~-2 mm/yr之间；
- (2) 奉贤区大治河以南，金汇港以东包括青村镇、钱桥镇、头桥镇、朱新镇、邵家镇、大团镇等，存在着以小片分布的沉降区域，沉降速率大多分布在-5 mm/yr左右；
- (3) 宝山区黄浦江入海口地区沿江地带存在轻微沉降，相干点沉降速率不超过-2.5 mm/yr；
- (4) 浦东新区外环高速罗山路立交桥至杨高南路立交桥路段沿线地带出现轻微沉降，沉降速率不超过-5 mm/yr；
- (5) 浦东新区迎宾高速华东路立交桥北部川沙地区出现小范围地表沉降，沉降速率分布在-5~0 mm/yr之间；

(6) 东部沿海沿线及浦东国际机场后期建成的跑道，图3为机场第4跑道沉降相干点的累积沉降序列。沿海陆域形成年限较短，土体属于欠固结土，地基会发生缓慢形变，形成沉降。加之机场跑道在地面荷载的作用下，会发生沉降形变。

结合每月测量1次的地面二等水准测量数据对长时间序列InSAR技术解译的结果进行精度评估及验证，分别将2013年4月—2019年3月期间的水准测量数据和InSAR监测结果的时间序列进行线性拟合，得到年平均沉降速率值，其对比图如图4所示。统计得出，二者的绝对误差的均值为1.59 mm/yr，绝对误差的标准差为2.09 mm/yr，显示两种测量手段的结果吻合得很好。

3.2 时序Sentinel-1影像在武汉地区监测研究

武汉市作为中国中部地区最大的城市之一，近年来发展十分迅速，快速的城市化以及地下广布的碳酸盐岩条带和软弱土层使武汉正面临着严峻的地面沉降问题。本文利用2015年4月—2017年7月的Sentinel-1卫星存档数据，以建成区和基础设施安全监测为例，对武汉地区进行了监测研究，并对5 m×20 m分辨率的Sentinel-1 IW模式数据在城市建成区形变普查和精细监测方面的应用潜力进行了探讨。

实验在武汉市建成区获得了大量的高质量相干点，如图5所示，通过解译这些相干点，可以看到沉降区的分布与武汉市碳酸盐岩带、软土层和填湖

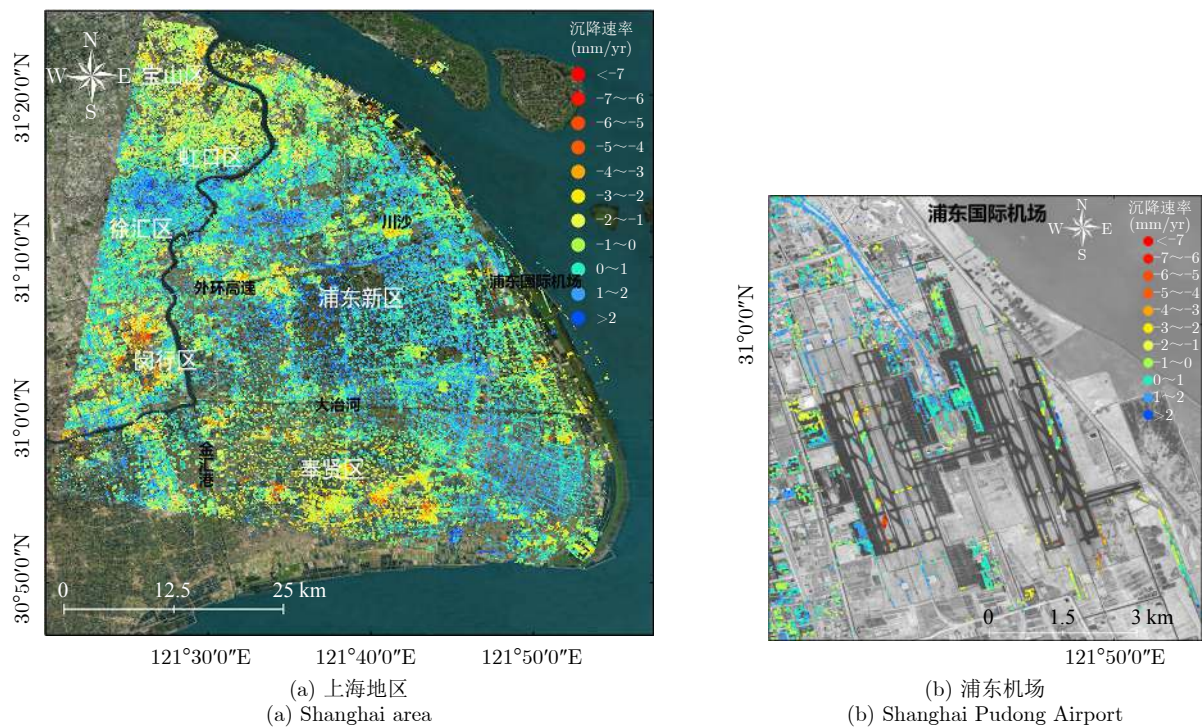


图 2 上海地区及浦东机场2013.4—2019.3沉降速率分布图

Fig. 2 Deformation velocity map in Shanghai and Pudong Airport from April 2013 to March 2019

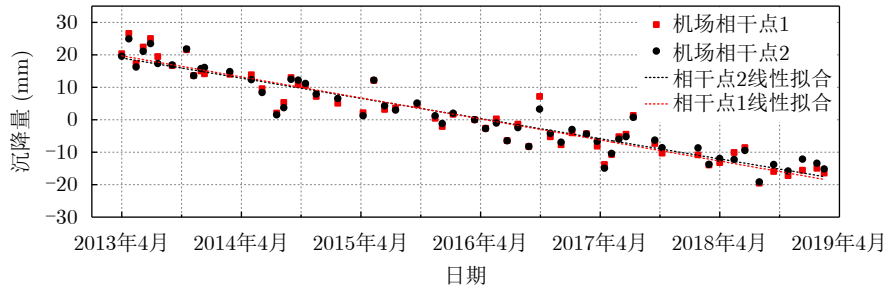


图3 相干点沉降时间序列图

Fig. 3 Deformation time-series of coherent points by time series InSAR

区分布情况吻合，例如百步亭附近建成区就处于天兴洲碳酸盐岩带所经区域；新华下路的小区所处地基为软土天然地基；江汉区万松园小区附近地层原本为湖积层。本研究通过实地考察对实验结果加以佐证。以硃口区常码头地铁站附近沉降漏斗为例，

其形变速率超过了 -27 mm/yr ，最大累积形变量甚至达 -38 mm 。经实地考察发现，实验期间其周围有较长时间的城中村改造还建项目施工和地铁12号线、7号线在建。而该区域社区的多处住宅也出现墙面开裂，门前台阶与地面严重分离的现象，且开裂程度与实验结果相符。实验结果表明，随着地下空间的不断开发，相应的动态监测十分必要。

上述的实验结果-沉降原因-实地考察三者之间互相印证，表明了Sentinel-1数据在城市建成区形变普查和精细化监测中有着巨大的应用潜力，Sentinel-1数据的高重访周期和开放获取等优点大大增加了利用卫星SAR数据对城市建成区进行动态形变监测和隐患普查的可能，这将对未来现代化城市的健康发展十分重要。

4 基于时间序列InSAR技术的大型基础设施形变监测

随着星载SAR系统分辨率的不断提高，最高达到 0.25 m ，时序InSAR技术越来越多地应用于重要基础设施的监测，在地表形变的精细化监测方面展

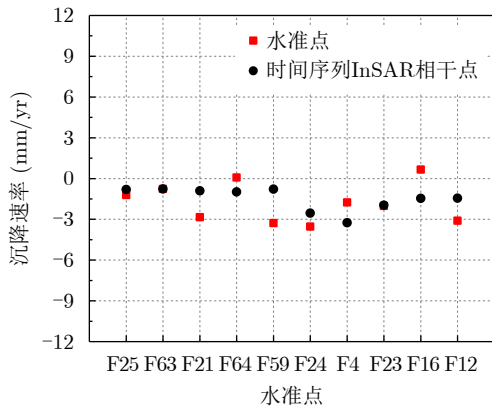


图4 水准点和时间序列InSAR相干点沉降速率对比图

Fig. 4 Comparison of deformation velocity between leveling points and coherent points by time series InSAR

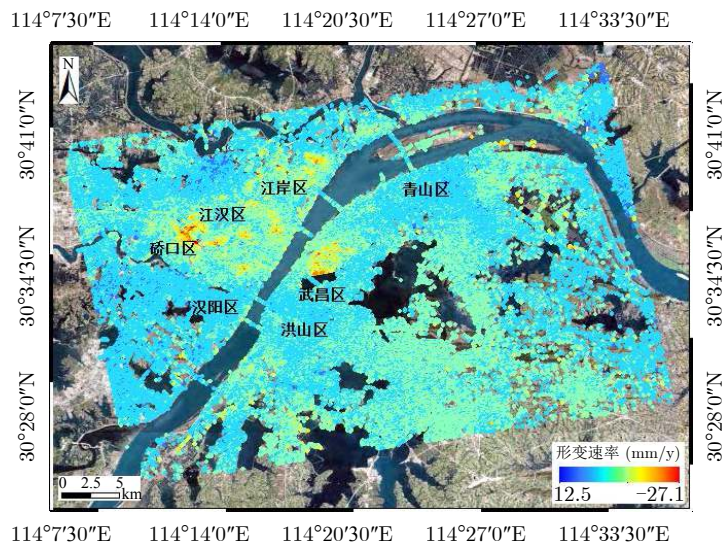


图5 武汉市2015.4—2017.7地表形变速率场

Fig. 5 Deformation velocity map in Wuhan from April 2015 to July 2017

现出了巨大的潜力。实际应用中,深入探究雷达相干散射体信号特征以及精确识别不同地物是研究基础,在针对一些对温度变化敏感的基础设施,对温度形变项的提取和分析也是保证监测结果正确性的重要研究问题。对不同的基础设施的形变监测,要考虑到其特有的属性以及地质环境等,保证监测结果的可靠性和说服力。

4.1 雷达相干散射体信号特征和人工地物识别

高分辨率数据的出现以及城市化进程下对于人工地物精细监测的需求日益凸显,使得InSAR技术在城市地区的监测从区域性沉降探测逐渐扩展到人工地物的精细监测。InSAR技术应用于城市地区人工地物的监测,其关键在于对雷达散射信号的准确解译和对地物的识别。高分辨率SAR数据可以更好地描述地物的细节特征,实现地物识别和精细监测。对于孤立的地物而言,高分辨率SAR数据可以记录更为丰富的雷达信号分布,有利于单体目标局部的不均匀变化的分析。但是,在建筑物密集的城市地区,雷达影像上综合表现出非常复杂的散射信号^[47]。雷达散射信号是微波与地面目标物体的几何形状、尺寸、材质以及电介参数等共同作用的结果。复杂的城市环境下,建筑物自身的细节结构以及密集建筑区信号之间的交互重叠,增加了地物散射信号分析与解译的难度。

在城市场景中,微波信号与地物相互作用,可能会形成单次或者多次散射,如图6所给出的示例。单次散射信号,指“传感器-地物-传感器”相互作用过程形成的信号,是开展地物识别和形变分析的重要信号来源。这类信号由于其几何相位中心和信号源重合,可以直接通过地物特征来提取和识

别。多次散射信号,指从传感器出发,在单一地物结构上多次散射或经过两种以上的地物散射回到传感器的信号,这类信号在应用中需要额外分析讨论。单个地物自身复杂结构形成的多次散射,如窗户边框的角点形成的三次散射信号,能给出稳定、可靠的雷达回波信号,且计算的几何相位中心与其信号来源位置一致^[48],是地物识别与形变观测可用的信号。在实际应用中,这种散射信号也往往作为PS点被提取。另一类多次散射信号,在两种以上的地物之间相互作用,如“地面-建筑物”或“地面-建筑物-地面-建筑物”之间的散射信号,能给出有效观测且提供了关于地物尺寸的信息,但在地物识别和形变结果分析时,需要进一步讨论其位置与信息源以及观测形变信号和实际形变的关系^[48]。关于多次散射信号的几何相位中心与其信号源之间关系的研究,可以参考文献^[48]。目前,在城市地物的识别和形变监测应用中,主要利用的是单次散射信号和在单一地物上多次散射的信号,这类信号可以依据信号强度和地物特征来识别提取。我们会给出几个应用实例,包含机场、高架路、桥梁、铁路以及地铁沿线的监测。

4.2 浦东机场

上海浦东国际机场位于上海浦东新区的东部海滨,是亚洲重要的航空枢纽,目前机场有两座航站楼、3个货运区以及4条跑道。第1跑道于1999年建成使用,经过十几年的固结沉降,近几年该跑道表现出较为稳定的趋势。第2、第3、第4跑道分别于2005年、2008年、2015年投入使用。由于机场建设在软土地基上,地质情况较差。其中第1跑道建在典型的软土地基上,第2跑道所处地基缺少硬壳

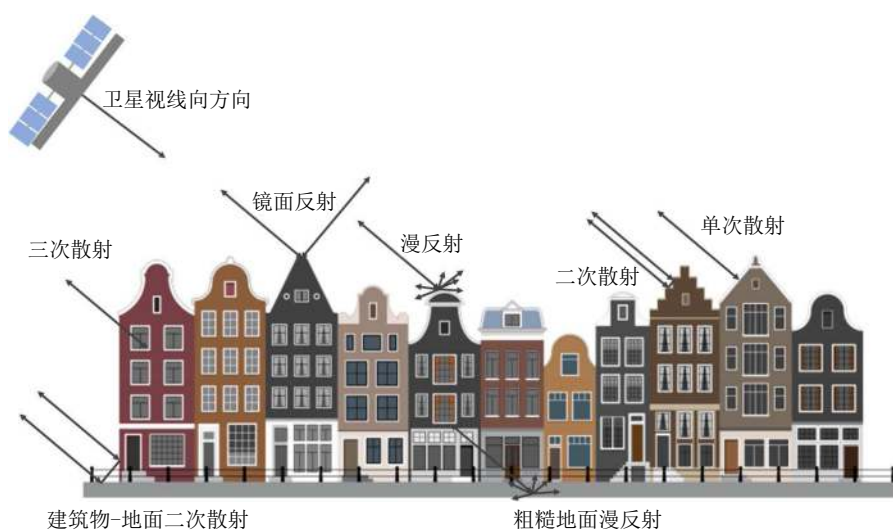


图 6 城市环境下人工地物与微波信号之间的几种交互作用类型示意图

Fig. 6 Sketch of several types of interaction between man-made objects and microwave signals in urban areas

层，第3跑道则建在浅埋粉质粘土层之上，即第2、第3跑道的地质条件相对更差。基于地质条件的变形分析对于理解沉降机制至关重要，可及时发现并预防公共基础设施中潜在的安全问题。考虑不同的地质情况以及竣工年限，不同的跑道表现的沉降情况也不一样^[46,49]。

采用2011年9月—2012年10月共15景TerraSAR-X影像以及2014年9月—2019年9月期间平均每年度约12景TerraSAR-X影像动态监测上海浦东国际机场，数据获取期间历年年度沉降速率分布图如图7所示。该应用案例中主要利用了单次、二次和三次散射体。第1跑道在2011—2012年表现出-10 mm/yr左右的沉降现象，而后经过固结沉降，历年表现较为稳定。但浦东机场整体上仍存在不均匀的沉降，以迎宾高速-申嘉湖高速为分界线，其西部继续保持基本稳定，东部则存在较为明显的沉降。T2航站楼相比T1航站楼而言，部分区域存在着-10 mm/yr左右的沉降，但是其沉降情况与往年相比有所减轻。机场第4跑道，由于竣工时间最晚，继续存在一定程度的下沉，沉降速率分布在-20~-5 mm/yr之间。而自2017年以来，第4跑道东边两条明显的

线状沉降区域则与新建的跑道有关。此外，机场周边沿海堤坝的沉降情况较为严重，沉降速率在-20~-10 mm/yr之间。滩涂圈围造地工程中，地基形成过程和土体受力较为复杂，不同年份沉降情况存在一定的波动，但整体上其安全性值得重视。

4.3 上海高架路网

上海市高架道路分布密集，总长度超过130 km。高架道路属于城市快速路，难以用现场监测手段获取高密度监测结果。而时间序列InSAR技术则可以提供大范围、高精度、高密度的监测手段。本文利用2013年9月—2018年9月平均每年约12景TerraSAR-X影像提取了数据获取期间上海高架道路沿线历年的年度沉降速率分布，如图8所示，并对历年沉降情况进行分析以动态监测其变化，如表1所示。在本案例中，仅保留高架路网上形成的散射体，移除了由于高架路网和地面相互作用的散射体信号。通过对比历年速率分布范围及沉降点、回弹点平均速率可知，上海高架道路总体的沉降情况呈现出逐年减小的变化趋势，整体上呈现稳定状态，但由于高架路网覆盖范围广且分布不规则，路网比较密集或工程建设活动比较频繁的路段，发生沉降的现象仍然

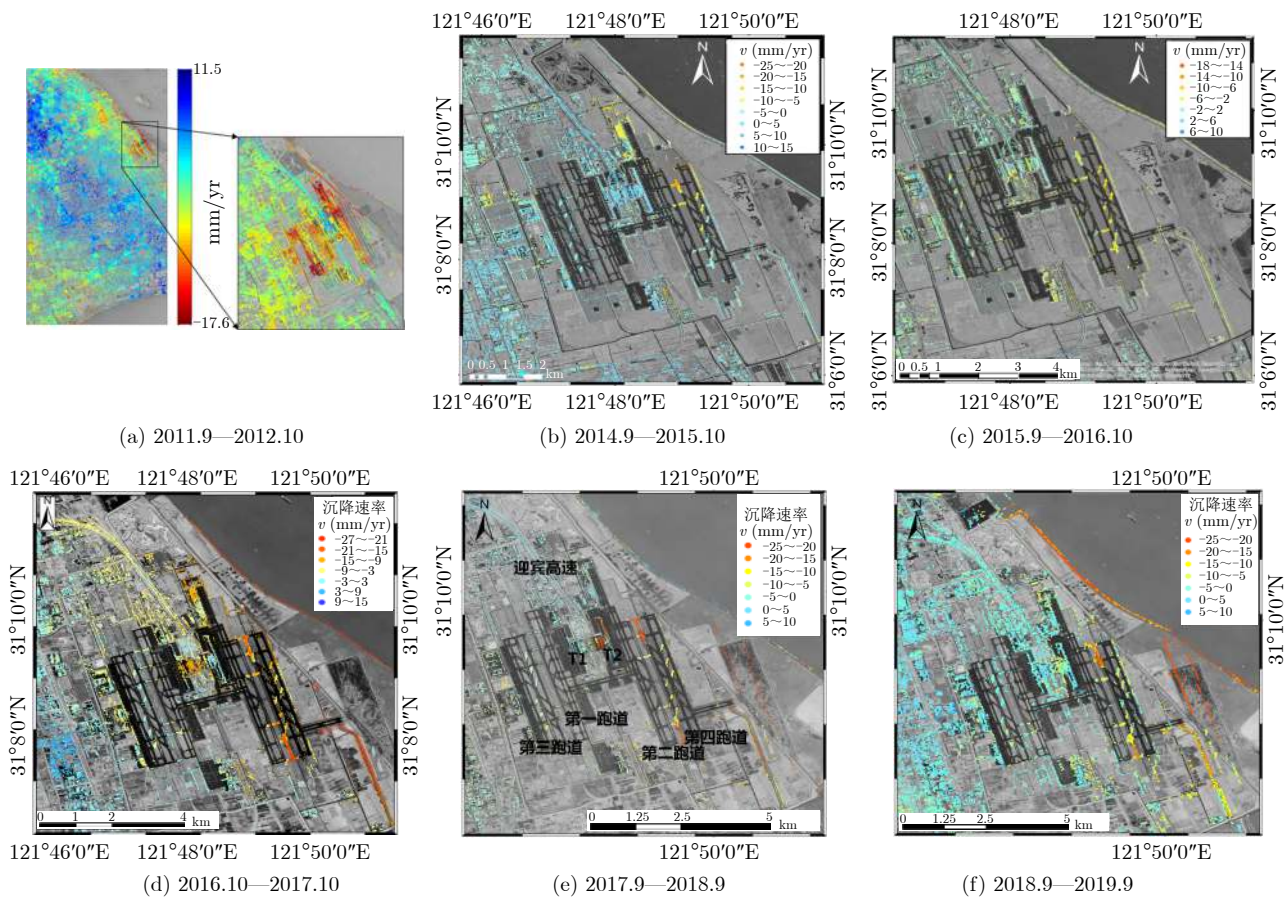


图7 上海浦东国际机场历年年度沉降速率分布图

Fig. 7 Annual settlement rate of Shanghai Pudong International Airport

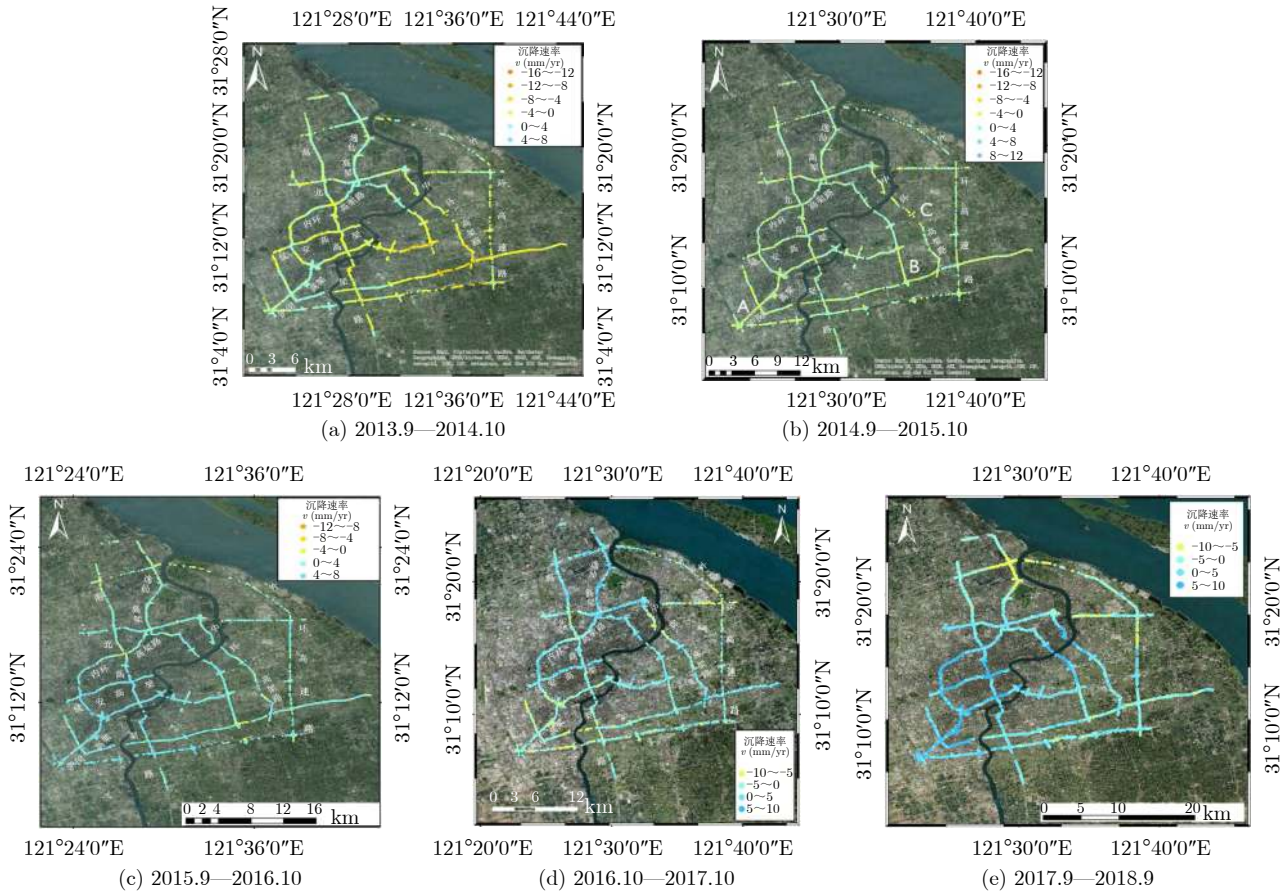


图8 上海高架路历年年度沉降速率分布图

Fig. 8 Annual settlement rate of elevated roads in Shanghai

表1 2013.9—2018.9高架道路沉降情况对比

Tab. 1 Comparison of the deformation of elevated roads during from September 2013 to September 2018

年份	沉降速率范围(mm/yr)	沉降相干点百分比(%)	沉降点平均速率(mm/yr)	回弹点平均速率(mm/yr)
2013.9—2014.10	-14~8	55.46	-2.651	1.028
2014.9—2015.10	-15~11	46.31	-2.433	0.928
2015.9—2016.10	-14~10	39.54	-1.953	1.039
2016.10—2017.10	-10~10	49.97	-2.932	2.602
2017.9—2018.9	-10~10	29.00	-2.164	2.548

存在，沉降速率较大，可针对具体的沉降路段进行进一步现场监测与研究。

将高架道路沿线的沉降情况与周边地表区域沉降情况、高架路段建成通车时间以及高架道路动荷载情况关联分析，可探索高架道路的沉降影响因素。结合统计分析方法进行沉降因素的归因分析，可进一步拓展时间序列InSAR方法在高架道路监测方面的应用研究^[38,41]。

4.4 上海卢浦大桥桥梁

上海卢浦大桥建于2000年—2003年，是全球第2长的单跨拱桥，以550 m跨度横跨黄浦江。本文

选取了时间跨度同为2009年—2010年的3个X波段SAR数据集，包括18景2009年3月—2010年1月降轨 TerraSAR-X数据和2009年1月—2010年2月升、降轨 Cosmo-SkyMed影像各19景，对卢浦大桥的结构形变进行精细测量^[44,45]。

3个数据集经过处理后获得的卢浦大桥的形变速率分布分别如图9(a)—图9(c)所示，其中剔除了二次散射信号以及三次散射信号，主要研究单次散射信号。桥梁上的点目标主要分布在桥墩附近，而桥跨上识别的点目标比较稀疏，沉降速率范围在-13~9 mm/yr之间。3个形变结果都表现出相似的

对称渐进式表面形变模式, 即在两端的桥墩位置比较稳定, 形变量从两边向跨中方向逐渐增加, 并在跨中位置达到峰值。

通过分析卢浦大桥的时间序列差分干涉图和解缠相位图, 发现桥梁的跨中位置受到温度形变的影响比较明显。通过计算桥梁拱顶位置和跨中位置的点目标时间序列形变与温度差异的相关关系, 进一步对桥梁的温度形变进行了定量建模与分析, 得到卢浦大桥的趋势形变和温度形变如图10所示。可以看出, 在观测期间内卢浦大桥的趋势形变较小, 主要发生在桥跨上, 且幅度小于5 mm/yr。观测到的时间序列上的周期性变化主要是由卢浦大桥的温度形变引起, 且温度形变参数从桥墩处向跨中方向逐渐增大, 并在跨中位置达到最大。

去除温度形变影响后, 将3个数据集监测所得的卢浦大桥沿线的垂直沉降剖面进行交叉验证(如图11所示), 其中蓝色三角形和绿色虚线表示升轨和降轨Cosmo-SkyMed数据的监测结果, 粉红色曲线表示TerraSAR-X数据的监测结果, 红色粗线是拟合的形变曲线。结果表明, 这3个监测结果在形变分布和量级上都保持了较好的一致性, 证实了本次形变监测结果的可靠性。

4.5 京津城际高铁沿线

京津城际高铁是中国最早建设的高速铁路, 位于中国东部沿海地区脆弱的可压缩冲积平原上, 其安全运营受到地面沉降等地质灾害的威胁, 因此, 定期对其进行稳定性监测对于确保该高速铁路的运营安全至关重要^[39,42]。

本次研究选取了天津市2008.2—2009.12的17景ENVISAT ASAR升轨影像, 计算得到京津城际高铁

沿线的趋势形变和温度形变分布如图12(a)和图12(b)所示。图12(a)中, 高铁沿线表现出不均匀的形变, 沉降速率约为-16 ~ 4 mm/yr, 且在双街镇附近探测到一个明显的沉降段, 这是由于双街镇经济的快速发展和工业的现代化进程都需要大量抽取地下水, 导致地下水水位下降, 含水层压缩, 引起地面沉降现象^[39]。图12(b)中, 温度形变参数在空间上变化很大, 大部分路段可忽略不计, 而双街镇附近的路段表现出轻微的温度形变, 达到-0.5 mm/°C, 这是由于温度升高和蒸发效应会导致沥青路基软化和地下水下降, 因此, 在相同荷载情况下, 轨道随地面的沉降量增加。反之, 较冷情况下, 沥青路基会固结硬化, 使得沿线保持更高的稳定性。

由ENVISAT ASAR数据提取的京沪高铁沿线5 km缓冲区内的沉降速率分布如图13所示, 可以看到与图12(a)中对应的双街镇沉降路段(由白色虚线圈标记), 说明该路段的沉降是受到其周围地表沉降的影响。此外, 铁路沿线的差异沉降也会改变路面坡度从而影响线路的平顺性和运营安全。

铁路变形主要受到不均匀沉降、地面沉降增长和温度形变效应的影响, 因此, 可以将沉降梯度、沉降速率和温度形变参数作为沿线风险等级评估的主要评价指标。为了进行比较, 可以把每一个指标划分成1~10的风险系数, 从而根据每个路段上3个指标的综合得分, 将京津城际高铁沿线划分为9个风险等级, 如图14所示。颜色从蓝到红表示风险等级逐渐由轻微变严重, 京津城际高铁沿线双街镇路段(红色路段)的沉降风险等级最高, 其次是武清火车站附近的路段(橙色路段)。

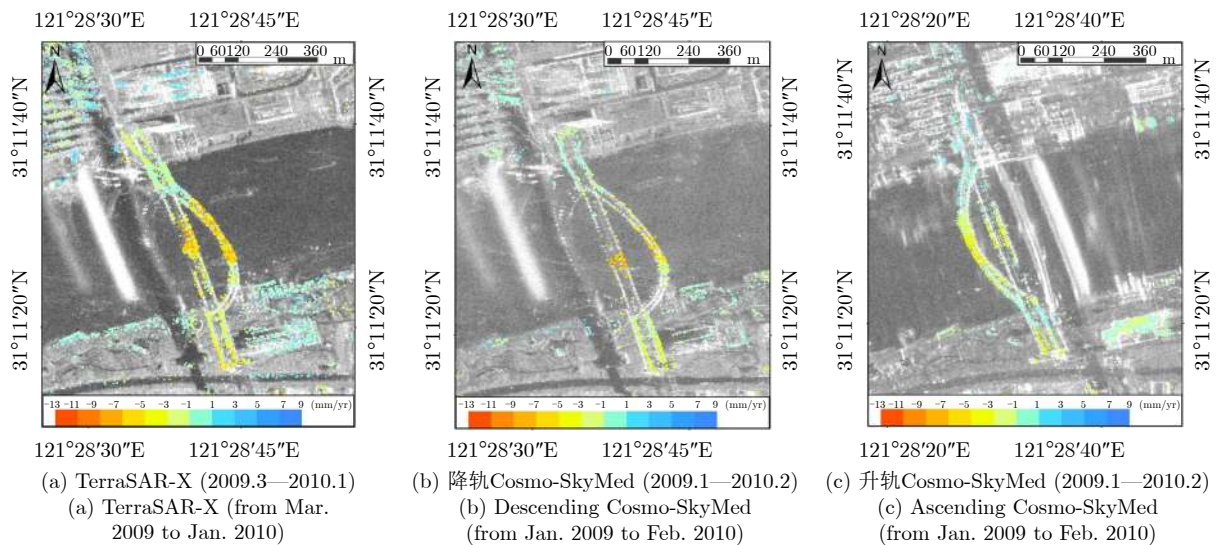
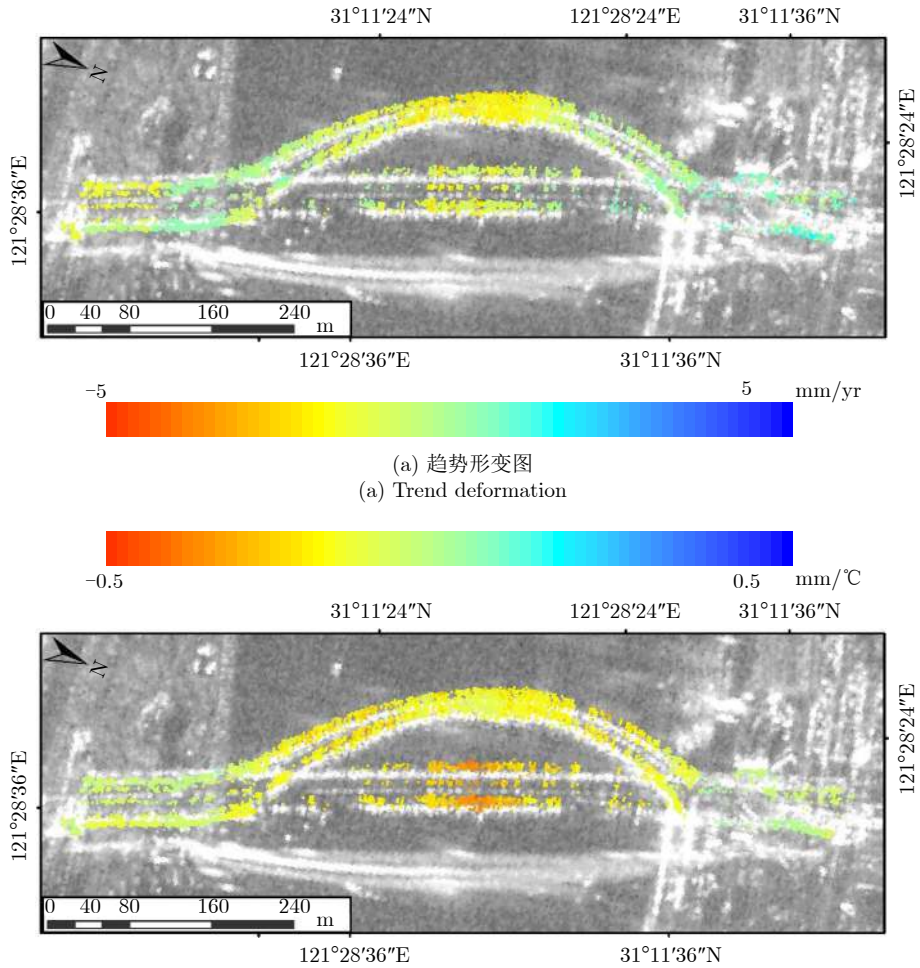


图9 卢浦大桥形变速率分布图

Fig. 9 Deformation velocity of Lupu bridge



(a) 趋势变形图
(a) Trend deformation

(b) 温度变形图
(b) Thermal dilation

图 10 卢浦大桥
Fig. 10 Lupu Bridge

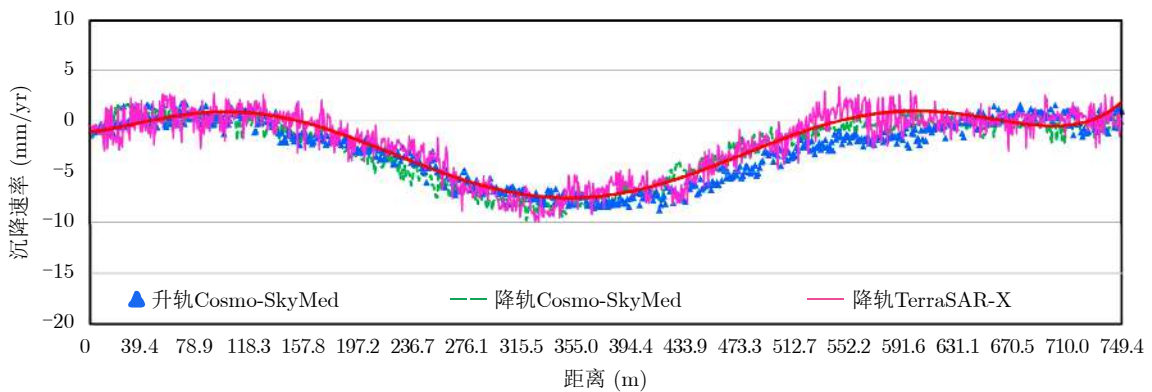


图 11 不同数据集卢浦大桥沉降剖面的交叉验证

Fig. 11 Cross-validation of the settlement profile of Lupu Bridge from different datasets

4.6 武汉地铁网

武汉地铁自2004年7月开通运营第1条线路以来，目前线路已分布密集，且尚有多条地铁线路处于在建状态。地铁建设过程中的地下浅层空间大量开挖以及工程降水措施，导致地下水位变化，均会

改变原有地层的应力状态，带来地面沉降。而地表开挖后，武汉市丰富的降雨形成的一些地表径流也会由此进入地层，进一步加剧地下的碳酸盐溶现象，促进地表下沉^[50]，因此对武汉地铁网进行沉降监测十分必要。本文利用2015年4月—2017年7月的

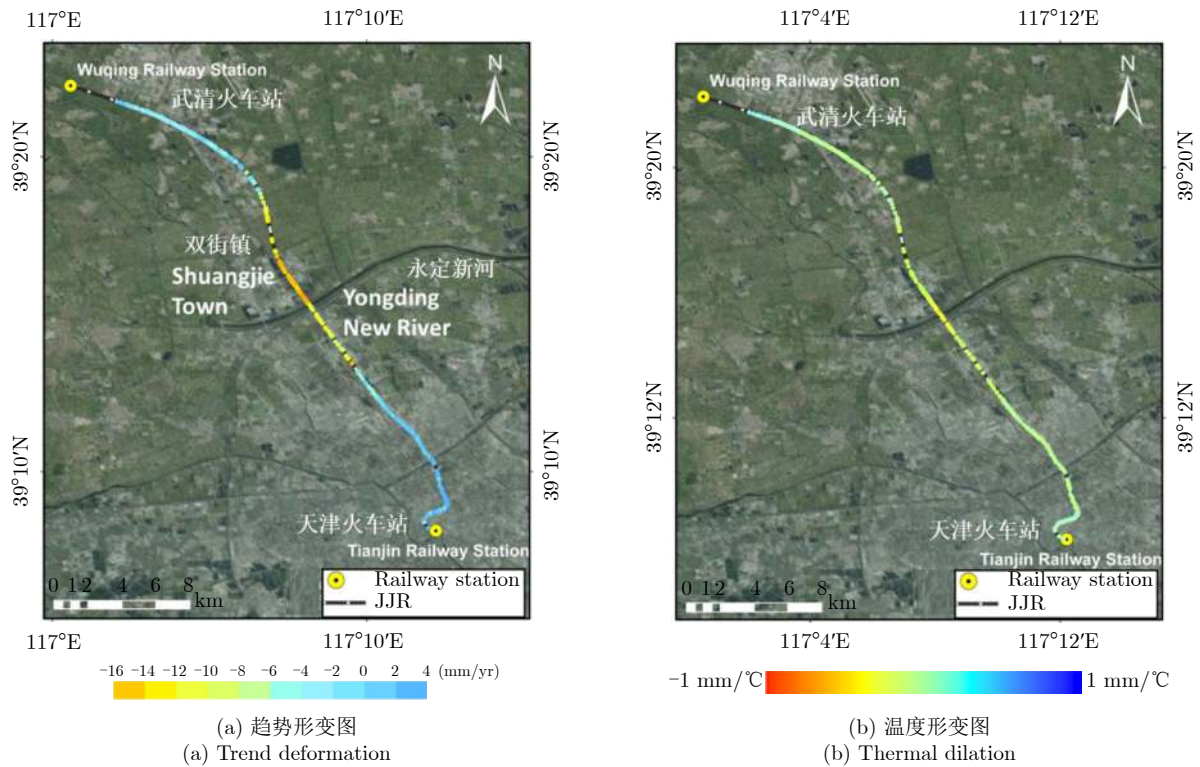


图 12 京津城际高铁2008.2–2009.12期间形变图

Fig. 12 Deformation of the Beijing-Tianjin railway from February 2008 to December 2009

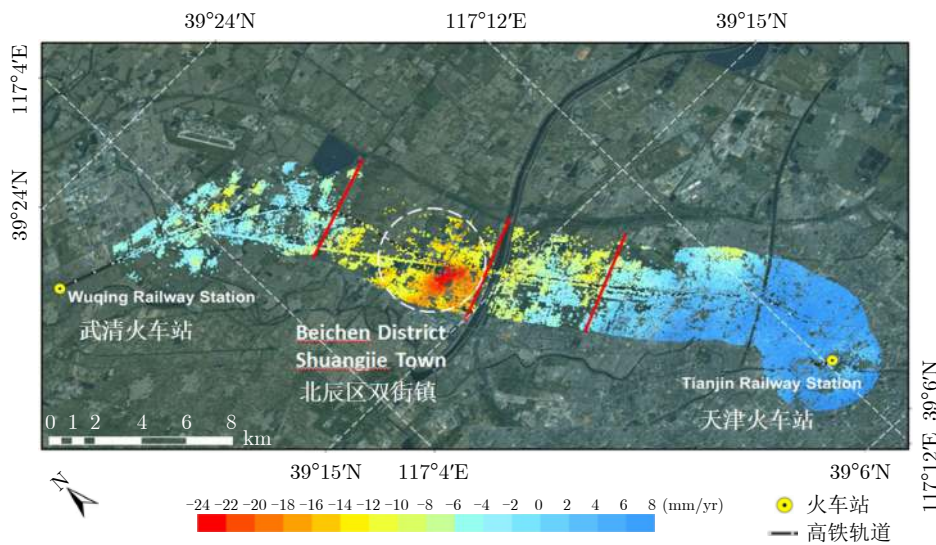


图 13 京津城际高铁沿线缓冲区200.2–2009.12期间形变图

Fig. 13 Subsidence rate of the buffer zone along the Beijing-Tianjin railway from February 2008 to December 2009

Sentinel-1数据(与3.2节中提及的数据集相同)对武汉市的8条轨道交通线路沿线进行了形变监测和分析,该案例中主要利用的是地面散射体点。

从实验结果可以看出,沉降区域在地铁沿线分布广泛,多个有不同地铁线路交接的枢纽站沉降最为显著(如图15中白线所示区域),例如在2号线和7号线交汇的王家墩东地铁站、3号线与8号线交汇的赵家条地铁站、地铁3号线与1号线交汇的宗关

站、5号线与8号线交汇的徐家棚地铁站、1号线与7号线交汇的三阳路地铁站发生的沉降比其周围区域要严重得多。此外,7号线在硚口区和江汉区的路段,几乎全程处于十分严重的沉降,而该段线路投入使用未久,还需要经过较长时间才会趋于稳定,这期间仍具有较大的不确定性。

地铁这一线状地物可以通过沉降速率梯度来描述其发生的不均匀沉降。沉降速率梯度 G 表示沉降

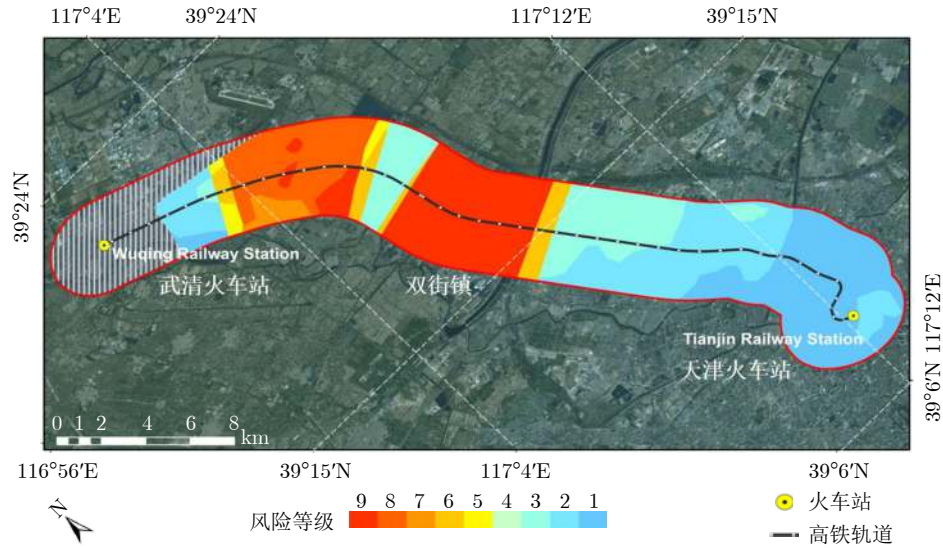


图 14 京津城际高铁沿线灾害风险等级评估
Fig. 14 Hazardous grading of Beijing-Tianjin railway

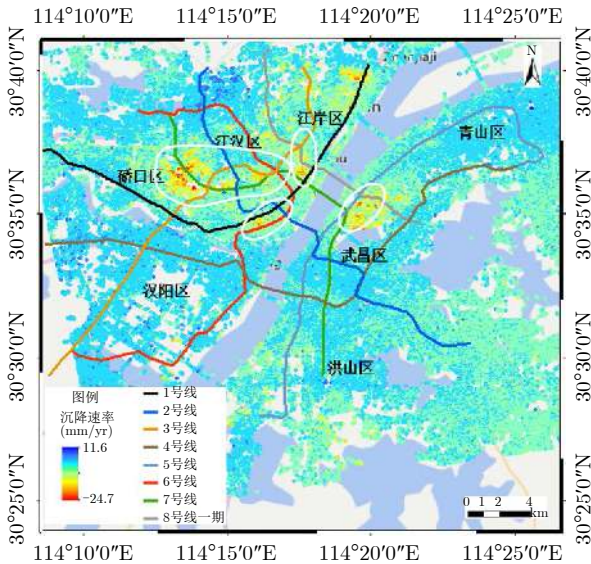


图 15 2015.4–2017.7武汉市地铁线路和区域沉降对比示意图
Fig. 15 Comparison of subway lines and regional deformation in Wuhan from April 2015 to July 2017

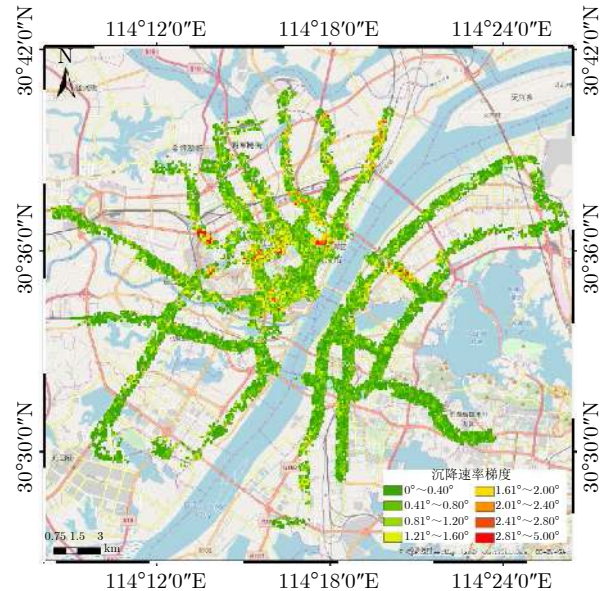


图 16 武汉市地铁沿线2015.4–2017.7沉降速率梯度图
Fig. 16 Deformation velocity gradient along the subway in Wuhan from April 2015 to July 2017

速率在垂直方向和水平方向的变化,用中心像素的差异沉降速率与该像素到邻近像素距离的比值来确定,可表示为

$$G = \arctan \left(\sqrt{(d_z/d_x)^2 + (d_z/d_y)^2} \right) \quad (2)$$

其中, d_x 为中心像素与临近像素在 x 方向上的距离, d_y 则是中心像素与临近像素在 y 方向上的距离, d_z 是相邻像素的沉降速率差。

实验得到的武汉市地铁沿线沉降速率梯度分布如图16所示。从图中可知,沉降梯度最大的地方分布情况与沉降漏斗分布基本一致,尤其在2号线、3号线、6号线和8号线一期工程沿线的部分区域沉

降梯度较大,不均匀沉降现象显著。随着时间的推移,这些线路经历的差异形变更大,将可能对下部地铁空间形成压力和安全风险,应该受到密切关注。

5 结论

本文主要回顾了作者团队关于时间序列InSAR技术在城市目标动态监测的研究工作及进展。最初的研究应用中低分辨率SAR数据大范围地探测形变异常区域,之后随着高分辨率数据的涌现以及城市基础设施精细化监测的需求,更多的研究着重于大型人工地物的安全监测,比如机场、高架路网、桥

梁、铁路以及轨道交通。文中通过多个应用实例, 展现了时序InSAR技术在几种典型的城区目标监测中的应用能力以及针对不同类型地物的相应解决方案。随着越来越多高分辨率星载SAR计划的实施, 地物识别更为精细, 同时结合其他测量手段及资料, 该技术将为城市目标动态监测提供更多的应用空间。

参考文献

- [1] MONTGOMERY M R. The urban transformation of the developing world[J]. *Science*, 2008, 319(5864): 761–764. doi: [10.1126/science.1153012](https://doi.org/10.1126/science.1153012).
- [2] 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. doi: [10.1016/j.jag.2004.10.004](https://doi.org/10.1016/j.jag.2004.10.004).
- [3] 廖明生, 林瑛. 雷达干涉测量: 原理与信号处理基础[M]. 北京: 测绘出版社, 2003: 1–12.
LIAO Mingsheng and LIN Hui. Synthetic Aperture Radar Interferometry: Principle and Signal Processing[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2003: 1–12.
- [4] FERRETTI A, PRATI C, and ROCCA F. Permanent scatterers in SAR interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(1): 8–20. doi: [10.1109/36.898661](https://doi.org/10.1109/36.898661).
- [5] BERARDINO P, FORNARO G, LANARI R, et al. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(11): 2375–2383. doi: [10.1109/tgrs.2002.803792](https://doi.org/10.1109/tgrs.2002.803792).
- [6] FERRETTI A, SAVIO G, BARZAGHI R, et al. Submillimeter accuracy of InSAR time series: Experimental validation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(5): 1142–1153. doi: [10.1109/tgrs.2007.894440](https://doi.org/10.1109/tgrs.2007.894440).
- [7] HOOPER A. A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(16): L16302. doi: [10.1029/2008gl034654](https://doi.org/10.1029/2008gl034654).
- [8] KAMPES B M. Radar Interferometry: Persistent Scatterer Technique[M]. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2006: 21–60. doi: [10.1007/978-1-4020-4723-7](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4723-7).
- [9] 云焱, 吕孝雷, 付希凯, 等. 星载InSAR技术在地质灾害监测领域的应用[J]. 雷达学报, 2020, 9(1): 73–85. doi: [10.12000/JR20007](https://doi.org/10.12000/JR20007).
YUN Ye, LÜ Xiaolei, FU Xikai, et al. Application of spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radar to geohazard monitoring[J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(1): 73–85. doi: [10.12000/JR20007](https://doi.org/10.12000/JR20007).
- [10] 廖明生, 王腾. 时间序列InSAR技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 5–26.
LIAO Mingsheng and WANG Teng. Time Series InSAR Technology and Application[M]. Beijing: Science Press, 2014: 5–26.
- [11] 吴立新, 高均海, 葛大庆, 等. 工矿区地表沉降D-InSAR监测试验研究[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2005, 26(8): 778–782. doi: [10.3321/j.issn:1005-3026.2005.08.018](https://doi.org/10.3321/j.issn:1005-3026.2005.08.018).
WU Lixin, GAO Junhai, GE Daqing, et al. Experimental study on surface subsidence monitoring with D-InSAR in mining area[J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2005, 26(8): 778–782. doi: [10.3321/j.issn:1005-3026.2005.08.018](https://doi.org/10.3321/j.issn:1005-3026.2005.08.018).
- [12] 汤益先, 张红, 王超. 基于永久散射体雷达干涉测量的苏州地区沉降研究[J]. 自然科学进展, 2006, 16(8): 1015–1020. doi: [10.3321/j.issn:1002-008x.2006.08.015](https://doi.org/10.3321/j.issn:1002-008x.2006.08.015).
TANG Yixian, ZHANG Hong, and WANG Chao. Research on Suzhou subsidence based on permanent scatterer radar interferometry[J]. *Progress in Natural Science*, 2006, 16(8): 1015–1020. doi: [10.3321/j.issn:1002-008x.2006.08.015](https://doi.org/10.3321/j.issn:1002-008x.2006.08.015).
- [13] 王艳, 廖明生, 李德仁, 等. 利用长时间序列相干目标获取地面沉降场[J]. 地球物理学报, 2007, 50(2): 598–604. doi: [10.3321/j.issn:0001-5733.2007.02.034](https://doi.org/10.3321/j.issn:0001-5733.2007.02.034).
WANG Yan, LIAO Mingsheng, LI Deren, et al. Subsidence velocity retrieval from long-term coherent targets in radar interferometric stacks[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2007, 50(2): 598–604. doi: [10.3321/j.issn:0001-5733.2007.02.034](https://doi.org/10.3321/j.issn:0001-5733.2007.02.034).
- [14] 罗小军, 黄丁发, 刘国祥. 基于永久散射体雷达差分干涉测量的城市地面沉降研究——以上海地面沉降监测为例[J]. 测绘通报, 2009, (4): 4–8.
LUO Xiaojun, HUANG Dingfa, and LIU Guoxiang. On urban ground subsidence detection based on PS-DInSAR—A case study for Shanghai[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2009(4): 4–8.
- [15] PERISSIN D and WANG Teng. Time-Series InSAR applications over urban areas in China[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2011, 4(1): 92–100. doi: [10.1109/jstars.2010.2046883](https://doi.org/10.1109/jstars.2010.2046883).
- [16] 廖明生, 裴媛媛, 王寒梅, 等. 永久散射体雷达干涉技术监测上海地面沉降[J]. 上海国土资源, 2012, 33(3): 5–10. doi: [10.3969/j.issn.2095-1329.2012.03.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-1329.2012.03.006).
LIAO Mingsheng, PEI Yuanyuan, WANG Hanmei, et al. Subsidence monitoring in Shanghai using the PSInSAR technique[J]. *Shanghai Land & Resources*, 2012, 33(3): 5–10. doi: [10.3969/j.issn.2095-1329.2012.03.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-1329.2012.03.006).
- [17] 裴媛媛, 廖明生, 王寒梅. 利用时序DInSAR监测填海造陆地区地表沉降[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2012, 37(9):

- 1092–1095.
- PEI Yuanyuan, LIAO Mingsheng, and WANG Hanmei. Monitoring subsidence in reclamation area with time series DInSAR images[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(9): 1092–1095.
- [18] 杨梦诗, 廖明生, 史绪国, 等. 联合多平台InSAR数据集精确估计地表沉降速率场[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2017, 42(6): 797–802. doi: [10.13203/j.whugis20140924](https://doi.org/10.13203/j.whugis20140924).
- YANG Mengshi, LIAO Mingsheng, SHI Xuguo, *et al.* Land subsidence monitoring by joint estimation of multi-platform time series InSAR observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(6): 797–802. doi: [10.13203/j.whugis20140924](https://doi.org/10.13203/j.whugis20140924).
- [19] 范景辉, 李梅, 郭小方, 等. 基于PSInSAR方法和ASAR数据监测天津地面沉降的试验研究[J]. 国土资源遥感, 2007, 19(4): 23–27. doi: [10.3969/j.issn.1001-070x.2007.04.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-070x.2007.04.005).
- FAN Jinghui, LI Mei, GUO Xiaofang, *et al.* A preliminary study of the subsidence in Tianjin area using ASAR images based on PSInSAR technique[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2007, 19(4): 23–27. doi: [10.3969/j.issn.1001-070x.2007.04.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-070x.2007.04.005).
- [20] LUO Qingli, PERISSIN D, ZHANG Yuanzhi, *et al.* L- and X-band multi-temporal InSAR analysis of tianjin subsidence[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(9): 7933–7951. doi: [10.3390/rs6097933](https://doi.org/10.3390/rs6097933).
- [21] 张勤, 赵超英, 丁晓利, 等. 利用GPS与InSAR研究西安现今地面沉降与地裂缝时空演化特征[J]. 地球物理学报, 2009, 52(5): 1214–1222. doi: [10.3969/j.issn.0001-5733.2009.05.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.0001-5733.2009.05.010).
- ZHANG Qin, ZHAO Chaoying, DING Xiaoli, *et al.* Research on recent characteristics of spatio-temporal evolution and mechanism of Xi'an land subsidence and ground fissure by using GPS and InSAR techniques[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(5): 1214–1222. doi: [10.3969/j.issn.0001-5733.2009.05.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.0001-5733.2009.05.010).
- [22] 陈国泮, 刘云华, 单新建. PS-InSAR技术在北京采空塌陷区地表形变测量中的应用探析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(2): 59–63. doi: [10.3969/j.issn.1003-8035.2010.02.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-8035.2010.02.012).
- CHEN Guohu, LIU Yunhua, and SHAN Xinjian. Application of PS-InSAR technique in the deformation monitoring in mining collapse areas in Beijing[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2010, 21(2): 59–63. doi: [10.3969/j.issn.1003-8035.2010.02.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-8035.2010.02.012).
- [23] CHEN Mi, TOMÁS R, LI Zhenhong, *et al.* Imaging land subsidence induced by groundwater extraction in Beijing (China) using satellite radar interferometry[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(6): 468. doi: [10.3390/rs8060468](https://doi.org/10.3390/rs8060468).
- [24] 尹宏杰, 朱建军, 李志伟, 等. 基于SBAS的矿区形变监测研究[J]. 测绘学报, 2011, 40(1): 52–58.
- YIN Hongjie, ZHU Jianjun, LI Zhiwei, *et al.* Ground subsidence monitoring in mining area using DInSAR SBAS algorithm[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2011, 40(1): 52–58.
- [25] 何秀凤, 仲海蓓, 何敏. 基于PS-InSAR和GIS空间分析的南通市地面沉降监测[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2011, 39(1): 129–134. doi: [10.3969/j.issn.0253-374x.2011.01.025](https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-374x.2011.01.025).
- HE Xiufeng, ZHONG Haibei, and HE Min. Ground subsidence detection of Nantong city based on PS-InSAR and GIS spatial analysis[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2011, 39(1): 129–134. doi: [10.3969/j.issn.0253-374x.2011.01.025](https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-374x.2011.01.025).
- [26] 李永生, 张景发, 罗毅, 等. 利用高分辨率聚束模式TerraSAR-X影像的PSInSAR监测地表变形[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2012, 37(12): 1452–1455.
- LI Yongsheng, ZHANG Jingfa, LUO Yi, *et al.* Monitoring land deformation using PSInSAR with TerraSAR-X high resolution spotlight SAR images[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(12): 1452–1455.
- [27] NG A H M, GE Linlin, LI Xiaojing, *et al.* Monitoring ground deformation in Beijing, China with persistent scatterer SAR interferometry[J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(6): 375–392. doi: [10.1007/s00190-011-0525-4](https://doi.org/10.1007/s00190-011-0525-4).
- [28] WANG Huiqiang, FENG Guangcai, XU Bing, *et al.* Deriving spatio-temporal development of ground subsidence due to subway construction and operation in delta regions with PS-InSAR data: A case study in Guangzhou, China[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(10): 1004. doi: [10.3390/rs9101004](https://doi.org/10.3390/rs9101004).
- [29] WANG Ziyun, BALZ T, ZHANG Lu, *et al.* Using TSX/TDX pursuit monostatic SAR stacks for PS-InSAR analysis in urban areas[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(1): 26. doi: [10.3390/rs11010026](https://doi.org/10.3390/rs11010026).
- [30] BAI Lin, JIANG Liming, WANG Hansheng, *et al.* Spatiotemporal characterization of land subsidence and uplift (2009–2010) over Wuhan in Central China revealed by TerraSAR-X InSAR analysis[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(4): 350. doi: [10.3390/rs8040350](https://doi.org/10.3390/rs8040350).
- [31] TANG Wei and LIAO Mingsheng. Taiyuan city subsidence observed with Persistent Scatterer InSAR[J]. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 2014, 19(6): 526–534. doi: [10.1007/s11859-014-1048-7](https://doi.org/10.1007/s11859-014-1048-7).
- [32] CHEN Fulong, WU Yuhua, ZHANG Yimeng, *et al.* Surface motion and structural instability monitoring of ming Dynasty City walls by two-step tomo-PSInSAR approach in Nanjing City, China[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(4): 371. doi: [10.3390/rs9040371](https://doi.org/10.3390/rs9040371).
- [33] 林琿, 陈富龙, 江利明, 等. 多基线差分雷达干涉测量的大型人工线状地物形变监测[J]. 地球信息科学学报, 2010, 12(5): 718–725.

- LIN Hui, CHEN Fulong, JIANG Liming, *et al.* Preliminary research on large-scale man-made linear features deformation monitoring using multi-baseline Differential SAR Interferometry[J]. *Geo-Information Science*, 2010, 12(5): 718–725.
- [34] 廖明生, 田馨, 赵卿. TerraSAR-X/TanDEM-X雷达遥感计划及其应用[J]. *测绘信息与工程*, 2007, 32(2): 44–46. doi: [10.3969/j.issn.1007-3817.2007.02.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-3817.2007.02.019).
- LIAO Mingsheng, TIAN Xin, and ZHAO Qing. Missions and applications of TerraSAR-X/TanDEM-X[J]. *Journal of Geomatics*, 2007, 32(2): 44–46. doi: [10.3969/j.issn.1007-3817.2007.02.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-3817.2007.02.019).
- [35] 邢孟道, 林浩, 陈溅来, 等. 多平台合成孔径雷达成像算法综述[J]. *雷达学报*, 2019, 8(6): 732–757. doi: [10.12000/JR19102](https://doi.org/10.12000/JR19102).
- XING Mengdao, LIN Hao, CHEN Jianlai, *et al.* A review of imaging algorithms in multi-platform-borne synthetic aperture radar[J]. *Journal of Radars*, 2019, 8(6): 732–757. doi: [10.12000/JR19102](https://doi.org/10.12000/JR19102).
- [36] 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, and WANG Hanmei. Monitoring levee deformation with repeat-track space-borne SAR images[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(3): 266–269.
- [37] PERISSIN D, WANG Zhiying, and LIN Hui. Shanghai subway tunnels and highways monitoring through Cosmo-SkyMed Persistent Scatterers[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, 73: 58–67. doi: [10.1016/j.isprsjprs.2012.07.002](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.07.002).
- [38] 秦晓琼, 杨梦诗, 王寒梅, 等. 高分辨率PS-InSAR在轨道交通形变特征探测中的应用[J]. *测绘学报*, 2016, 45(6): 713–721. doi: [10.11947/j.agcs.2016.20150440](https://doi.org/10.11947/j.agcs.2016.20150440).
- QIN Xiaoqiong, YANG Mengshi, WANG Hanmei, *et al.* Application of high-resolution PS-InSAR in deformation characteristics probe of urban rail transit[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(6): 713–721. doi: [10.11947/j.agcs.2016.20150440](https://doi.org/10.11947/j.agcs.2016.20150440).
- [39] QIN Xiaoqiong, LIAO Mingsheng, ZHANG Lu, *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. doi: [10.1109/JSTARS.2017.2719025](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2719025).
- [40] QIN Xiaoqiong, YANG Mengshi, ZHANG Lu, *et al.* Health diagnosis of major transportation infrastructures in Shanghai metropolis using high-resolution Persistent Scatterer Interferometry[J]. *Sensors*, 2017, 17(12): 2770. doi: [10.3390/s17122770](https://doi.org/10.3390/s17122770).
- [41] WANG Ru, YANG Tianliang, YANG Mengshi, *et al.* A safety analysis of elevated highways in Shanghai linked to dynamic load using long-term time-series of InSAR stacks[J]. *Remote Sensing Letters*, 2019, 10(12): 1133–1142. doi: [10.1080/2150704x.2019.1648903](https://doi.org/10.1080/2150704x.2019.1648903).
- [42] CHANG Ling, DOLLEVOET R P B J, and HANSSEN 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. doi: [10.1109/jstars.2016.2584783](https://doi.org/10.1109/jstars.2016.2584783).
- [43] 秦晓琼, 廖明生, 杨梦诗, 等. 应用高分辨率PS-InSAR技术监测上海动迁房屋斜形变[J]. *测绘通报*, 2016, (6): 18–21, 86. doi: [10.13474/j.cnki.11-2246.2016.0181](https://doi.org/10.13474/j.cnki.11-2246.2016.0181).
- QIN Xiaoqiong, LIAO Mingsheng, YANG Mengshi, *et al.* Monitoring Shanghai relocation housing skew deformation using high resolution PS-InSAR technology[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2016(6): 18–21, 86. doi: [10.13474/j.cnki.11-2246.2016.0181](https://doi.org/10.13474/j.cnki.11-2246.2016.0181).
- [44] QIN Xiaoqiong, ZHANG Lu, DING Xiaoli, *et al.* Mapping and characterizing thermal dilation of civil infrastructures with multi-temporal X-band Synthetic Aperture Radar Interferometry[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(6): 941. doi: [10.3390/rs10060941](https://doi.org/10.3390/rs10060941).
- [45] QIN Xiaoqiong, ZHANG Lu, YANG Mengshi, *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. doi: [10.1016/j.rse.2018.06.032](https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.06.032).
- [46] JIANG Yanan, LIAO Mingsheng, WANG Hanmei, *et al.* Deformation monitoring and analysis of the geological environment of Pudong International Airport with persistent scatterer SAR interferometry[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(12): 1021. doi: [10.3390/rs8121021](https://doi.org/10.3390/rs8121021).
- [47] 廖明生, 魏恋欢, 汪紫芸, 等. 压缩感知在城区高分辨率SAR层析成像中的应用[J]. *雷达学报*, 2015, 4(2): 123–129. doi: [10.12000/JR15031](https://doi.org/10.12000/JR15031).
- LIAO Mingsheng, WEI Lianhuan, WANG Ziyun, *et al.* Compressive sensing in high-resolution 3D SAR tomography of urban scenarios[J]. *Journal of Radars*, 2015, 4(2): 123–129. doi: [10.12000/JR15031](https://doi.org/10.12000/JR15031).
- [48] YANG Mengshi, LÓPEZ-DEKKER P, DHEENATHAYALAN P, *et al.* Linking persistent scatterers to the built environment using Ray tracing on urban models[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(8): 5764–5776. doi: [10.1109/TGRS.2019.2901904](https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2901904).
- [49] YANG Mengshi, YANG Tianliang, ZHANG Lu, *et al.* Spatio-temporal characterization of a reclamation settlement in the Shanghai coastal area with time series analyses of X-, C-, and L-Band SAR datasets[J]. *Remote*

Sensing, 2018, 10(2): 329. doi: [10.3390/rs10020329](https://doi.org/10.3390/rs10020329).

- [50] 王飞, 柴波, 徐贵来, 等. 武汉市岩溶塌陷的演化机理研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(3): 824–832. doi: [10.13544/j.cnki.jeg.2017.03.030](https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2017.03.030).

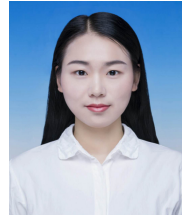
WANG Fei, CHAI Bo, XU Guilai, *et al.* Evolution mechanism of karst sinkholes in Wuhan city[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(3): 824–832. doi: [10.13544/j.cnki.jeg.2017.03.030](https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2017.03.030).

作者简介



廖明生(1962–), 男, 武汉大学教授, 博士生导师, 珞珈杰出学者。主要从事航空航天遥感影像信息处理的理论与方法的研究。

E-mail: liao@whu.edu.cn



王楠(1993–), 女, 山西忻州人, 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室博士生。主要研究方向为时间序列InSAR分析及变形监测。

E-mail: wangnannan@whu.edu.cn



王茜(1994–), 女, 武汉大学博士生。主要研究方向为时间序列合成孔径雷达干涉测量技术及其应用分析。

E-mail: wangr2017@whu.edu.cn



秦晓琼(1991–), 女, 博士, 深圳大学助理研究员。主要研究方向为雷达干涉测量地表形变监测与反演。

E-mail: xqqin@szu.edu.cn



杨梦诗(1990–), 女, 武汉大学博士生。主要研究方向为合成孔径雷达干涉测量技术与应用。

E-mail: yangms@whu.edu.cn



杨天亮(1979–), 男, 工学博士, 正高级工程师, 现任上海市地质调查研究院地面沉降研究所所长, 兼任自然资源部地面沉降监测与防治重点实验室副主任。主要从事城市地质及地面沉降防治应用研究。