

不同分辨率 SAR 影像 PSInSAR 技术城市形变监测对比及尺度效应讨论

赵峰, 郑启阳, 黄科胜, 孟亚杰, 卜师颖, 张雷昕, 汪云甲

1. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 徐州 221116;

2. 中国矿业大学 自然资源部国土环境与灾害监测重点实验室, 徐州 221116

摘要: 城市建构筑物变形危害居民生命财产安全及社会稳定, 定期对其进行监测至关重要。时序 InSAR 技术能以较高精度进行大范围城市建构筑物形变监测, 已有较多相关研究及工程化应用。不同分辨率 SAR 影像在城市形变监测中具有不同的优势, 而关于此的对比分析还不足; 此外, 关于不同分辨率 SAR 影像在城市形变监测时尺度效应的相关讨论还较少见。因此, 本文基于相同区域和监测时段的低、中、高 3 种分辨率 SAR 影像, 利用 PSInSAR 技术, 对不同分辨率 SAR 影像城市形变监测结果及尺度效应进行分析与讨论。结果表明, 随着 SAR 影像分辨率的降低, 受到尺度效应的影响, SAR 影像观测目标变模糊, InSAR 干涉相位形变信息精细化表征能力变差、相干性下降, PSInSAR 技术监测到的局部形变最大值下降、SAR 像元与建构筑物结构对应性变差, PSInSAR 技术城市形变精细化监测整体能力变弱。Sentinel-1 数据城市形变监测能力较中、高分辨率数据更弱, 特别是在局部形变及大形变监测方面存在不足; 但对于大尺度形变的识别及监测, 其可获得与高分辨率数据较近似的结果。

关键词: 城市形变监测, PSInSAR 技术, 尺度效应, SAR 影像分辨率, InSAR 形变监测

中图分类号: TP701/P2

引用格式: 赵峰, 郑启阳, 黄科胜, 孟亚杰, 卜师颖, 张雷昕, 汪云甲. 2026. 不同分辨率 SAR 影像 PSInSAR 技术城市形变监测对比及尺度效应讨论. 遥感学报, 30(4): 971-983

Zhao F, Zheng Q Y, Huang K S, Meng Y J, Bu S Y, Zhang L X and Wang Y J. 2026. Comparative analysis and scale effect of urban deformation monitoring using PSInSAR and SAR images with different resolutions. National Remote Sensing Bulletin, 30(4): 971-983 [DOI: 10.11834/jrs.20265386]

1 引言

城市建构筑物作为居民生活、学习、工作等活动的载体, 其安全稳定是公共安全重要的组成部分。随着中国城镇化的不断推进, 建构筑物体量不断增加。地下工程建设、地下资源开发利用、建构筑物老化等导致的相关安全事故近年来时有发生, 例如 2021 年泉州欣佳酒店坍塌事故 (卢文刚和陈洋, 2024)、2022 年长沙自建房倒塌事故 (银赛红, 2023)、2023 年天津某小区住宅楼开裂倾斜 (Jiang 等, 2023)、2025 年深圳市房屋不均匀沉降和墙体开裂 (中国快讯, 2025) 等。

为防范类似上述建构筑物安全事故的发生,

对城市建构筑物进行大范围、定期、高精度、高效的形变监测非常必要。传统的建构筑物形变监测方法有 GNSS 及全站仪测量等, 但存在效率低、成本高、难以大范围应用等问题。作为一种主动微波遥感技术, 合成孔径雷达干涉测量 InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) 技术, 特别是时序 InSAR 技术, 是目前大范围城市建构筑物形变高效、高精度监测的重要手段, 已有很多相关研究及工程化应用 (Ohenhen 等, 2025; Ma 等, 2019; Cigna 和 Tapete, 2021; 杨梦诗等, 2023)。

在监测对象方面, 时序 InSAR 技术已被应用于房屋 (Ma 等, 2015)、道路 (秦晓琼等, 2016)、

收稿日期: 2025-09-25; 预印本: 2025-12-11

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 42474018); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (编号: 2025ZDPYQB1007); 中国博士后科学基金资助 (编号: 2023T160685, 2020M671646); 第九届中国科协青年人才托举工程资助 (编号: 2023QNR001-YESS20230599)

第一作者简介: 赵峰, 研究方向为 InSAR 原理与应用、城市建构筑物形变遥感监测。E-mail: feng.zhao@cumt.edu.cn

通信作者简介: 汪云甲, 研究方向为国土环境与灾害监测。E-mail: wyj4139@cumt.edu.cn

桥梁 (Qin 等, 2018)、地铁 (纪政楠 等, 2025)、机场 (Wu 等, 2020; 冯瀚 等, 2022) 等各类城市建构物的形变监测及分析。在监测城市方面, 时序 InSAR 技术已被应用于北京 (赵峰 等, 2022)、上海 (廖明生 等, 2012; 冯瀚 等, 2022)、广州 (纪政楠 等, 2025)、南京 (Chen 等, 2017) 等国内城市以及纽约 (Ohenhen 等, 2025)、墨西哥城 (Cigna 和 Tapete, 2021)、巴塞罗那等国外城市 (Zhao 和 Mallorqui, 2019)。在方法技术方面, 多种时序 InSAR 技术在城市建构物形变监测中有相关应用, 包括 PSInSAR (Permanent Scatterers InSAR) 技术 (Ferretti 等, 2001)、SBAS-InSAR (Small baseline InSAR) 技术 (Berardino 等, 2002)、StamPS 技术 (Hooper 等, 2004)、DS-InSAR 技术 (Ferretti 等, 2011; 彭锴 等, 2023) 以及极化时序 InSAR 技术 (赵峰 等, 2022) 等。在这些时序 InSAR 技术中, PSInSAR 技术能够很好地保持 SAR 影像原始分辨率, 且对微小形变具有较好的监测效果, 是目前最多被用于城市建构物形变监测的 InSAR 技术之一, 在全世界许多城市形变监测中都有广泛的应用。

利用 PSInSAR 技术进行城市形变监测时, 可使用不同空间分辨率的 SAR 影像。低分辨率 SAR 影像采集效率高、覆盖范围广, 且免费数据源较多 (例如 Sentinel-1 及 NISAR 影像); 高分辨率 SAR 影像监测精细化程度高, 但覆盖范围相对较小且多为付费获取的商业数据。各种分辨率 SAR 影像在城市形变监测方面各有优势, 而关于其在城市形变精细化监测方面的对比分析还不足; 此外, 与其他遥感技术类似, SAR 影像空间分辨率的不同会导致其观测目标的遥感响应及反演的参量发生变化, 即“尺度效应” (张兵 等, 2025), 但关于 SAR 影像在城市建构物形变监测中的尺度效应的相关分析及讨论还较少见。

因此, 本研究基于加拿大温哥华市区相同监测时段的低分辨率 Sentinel-1 影像 (20 m×5 m, 100 m² 像元尺寸)、中等分辨率 RCM (Radarsat Constellation Mission) 条带模式影像 (3 m×3 m, 9 m² 像元尺寸, 优于 10 m²)、高分辨率 RCM 聚束模式影像 (0.5 m×1.5 m, 0.75 m² 像元尺寸, 优于 1 m²), 利用 PSInSAR 技术得到不同分辨率 SAR 影像形变监测结果, 对不同分辨率 SAR 影像城市建构物

形变监测结果及尺度效应进行对比分析与讨论。

2 研究区及数据

利用加拿大温哥华市相同覆盖范围及监测时段的 RCM 聚束模式 (Spotlight 模式数据, 此后用 SL 表示)、RCM 条带模式 (Stripmap, 此后用 SM 表示) 以及哨兵 1 号 (Sentinel-1 数据, 此后用 ST 表示) 3 种不同分辨率的时序 SAR 数据开展研究, 研究区域情况及 SAR 数据覆盖范围如图 1 (a) 所示。

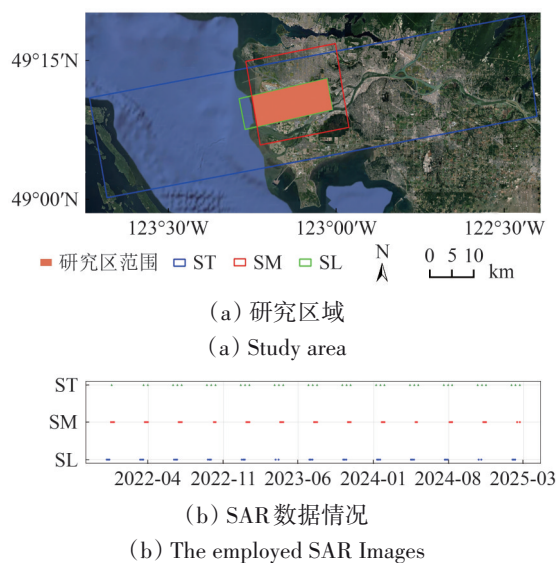


图1 研究区及数据

Fig. 1 Study area and data set

RCM 卫星星座由 RCM-1、RCM-2、RCM-3 这 3 颗卫星构成, 本研究所使用的 SL 模式 SAR 数据由 RCM-1、RCM-2、RCM-3 拍摄的数量分别为: 13 景、11 景、13 景, 所使用的 SM 模式 SAR 数据由这 3 颗卫星拍摄的数量则均为 12 景。SAR 数据主要参数如表 1 所示, 影像具体拍摄时间分布情况如图 1 (b) 所示。从表 1 及图 1 (b) 可以看出, 所使用的 3 种数据在拍摄起止时间及拍摄时刻上都有较好一致性, 且影像数量、轨道模式、成像波段及入射角也大致相同, 为后续分析提供了较好的基础。在像元尺寸方面, 3 种数据分别处于高 (SL, 0.75 m², 优于 1 m²)、中 (SM, 9 m², 优于 10 m²)、低 (ST, 100 m²) 3 种分辨率量级, 具有较好的代表性。此外, 本研究还使用了 SRTM DEM 数据来去除干涉相位中的地形相位, 光学底图来源于谷歌地球。

表 1 使用 SAR 影像的参数
Table 1 The parameters of the employed SAR image

SAR 数据类型	RCM 聚束 (SL)	RCM 条带 (SM)	Sentinel-1 (ST)
数量/景	37	36	36
拍摄时段	2021-12-04—2025-02-06	2021-12-17—2025-02-19	2021-12-19—2025-02-19
方位向分辨率/m	0.5	3	20
距离向分辨率/m	1.5	3	5
像元尺寸/m ²	0.75	9	100
轨道	降轨	降轨	降轨
入射角/(°)	23.7	35.7	38.8
波段	C	C	C

3 方 法

本研究利用经典的 PSInSAR 技术对 3 种分辨率数据分别进行处理得到研究区时序形变监测结果，随后对监测结果进行比较分析，讨论不同分辨率 SAR 影像在城市建构筑物形变监测中的尺度效应。经典的 PSInSAR 技术由 Ferretti 等 (2001) 于 2000 年前后提出，主要包括 5 个步骤：(1) SAR 影像配准及差分干涉图生成；(2) PS (Permanent Scatterers) 点选取；(3) 线性形变反演；(4) 非线性形变反演；(5) 地理编码，下面对其进行简要介绍。

(1) SAR 影像配准及差分干涉图生成。首先，依据研究区 N 景 SAR 影像的时、空基线分布等情况选取其中一景 SAR 影像为主影像、其它影像为辅影像；随后，将所有辅影像与主影像进行配准及重采样；最后，对配准后的 $N-1$ 幅主、辅影像对进行干涉处理并去除地形相位（由输入的 DEM 数据模拟得到）得到 $N-1$ 幅差分干涉图。

(2) PS 点（像元）选取。基于配准之后的 N 景 SAR 影像，利用振幅离差 D_A (Dispersion of Amplitude) 进行 PS 点选取。某 SAR 像元的振幅离差计算公式如下：

$$D_A = \frac{\sigma_A}{m_A} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (A_i - \bar{A})^2 / N}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |A_i|} \quad (1)$$

式中， σ_A 和 m_A 代表 SAR 像元幅度的标准差和均值， A_i 表示在第 i 景 SAR 影像中该像元的强度值， $\bar{A}$ 表示该像元 N 景 SAR 影像幅度的均值。对所有像元利用式 (1) 计算得到 D_A 之后，设定一个阈值并可筛选出 D_A 小于该阈值的像元作为 PS 点（像元）参与后续形变反演。

(3) 线性形变反演。对于任意的 PS 像元其某一幅差分干涉图对应的相位可以表示为 φ_{int} ：

$$\varphi_{\text{int}} = \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{def}}^{\text{lin}} + \varphi_{\text{def}}^{\text{non}} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_{\text{noise}} \quad (2)$$

式中， φ_{topo} 为由 DEM 误差引起的地形残差相位， $\varphi_{\text{def}}^{\text{lin}}$ 及 $\varphi_{\text{def}}^{\text{non}}$ 分别为线性形变相位和非线性形变相位， φ_{atm} 为大气延迟相位， φ_{noise} 为噪声相位；对于 PS 像元，其相位质量较高，可忽略 φ_{noise} 。 φ_{topo} 可进一步的表示为

$$\varphi_{\text{topo}} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp} \cdot \Delta h}{\rho \cdot \sin \theta} \quad (3)$$

式中， λ 为雷达波长， $B_{\perp}$ 为垂直基线， Δh 为 DEM 误差， ρ 为传感器到地物目标的距离， θ 为入射角。 $\varphi_{\text{def}}^{\text{lin}}$ 可表示为

$$\varphi_{\text{def}}^{\text{lin}} = \frac{4\pi \cdot t \cdot v}{\lambda} \quad (4)$$

式中， t 表示干涉图时间基线， v 表示平均形变速率大小。

基于式 (2)–(4) 的差分干涉相位模型及生成的 $N-1$ 幅差分干涉图，利用二维周期图的方法可以搜索得到各 PS 像元对应的 DEM 误差 Δh 及平均形变速率 v (线性形变)。简要来说，就是在设置的 Δh 及 v 的二维解空间里，通过设定的搜索步长来搜寻一组最优值使得式 (5) 计算的模型相干系数 γ 最大。

$$\gamma = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \exp \left(j \left(\varphi_{\text{int}} - \left(\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp} \cdot \Delta h}{\rho \cdot \sin \theta} + \frac{4\pi \cdot t \cdot v}{\lambda} \right) \right) \right) \quad (5)$$

(4) 非线性形变反演。对于 PS 像元，在步骤 (3) 的基础上得到 Δh 及平均形变速率 v ，然后将 φ_{topo} 及 $\varphi_{\text{def}}^{\text{lin}}$ 从式 (2) 的差分干涉相位中去除，得到残余相位 $\varphi_{\text{int}}^{\text{res}}$ ，主要包括非线性形变相位 $\varphi_{\text{def}}^{\text{non}}$ 和大气延迟相位 φ_{atm} 。对 $\varphi_{\text{int}}^{\text{res}}$ 进行相位解缠，然后在时

间域上进行高通滤波,空间域上进行低通滤波处理分离 $\varphi_{\text{def}}^{\text{non}}$ 和 φ_{atm} ,得到非线性形变。最后,将非线性形变与步骤(3)反演的线性形变相加得到PS像元完整的时序形变。

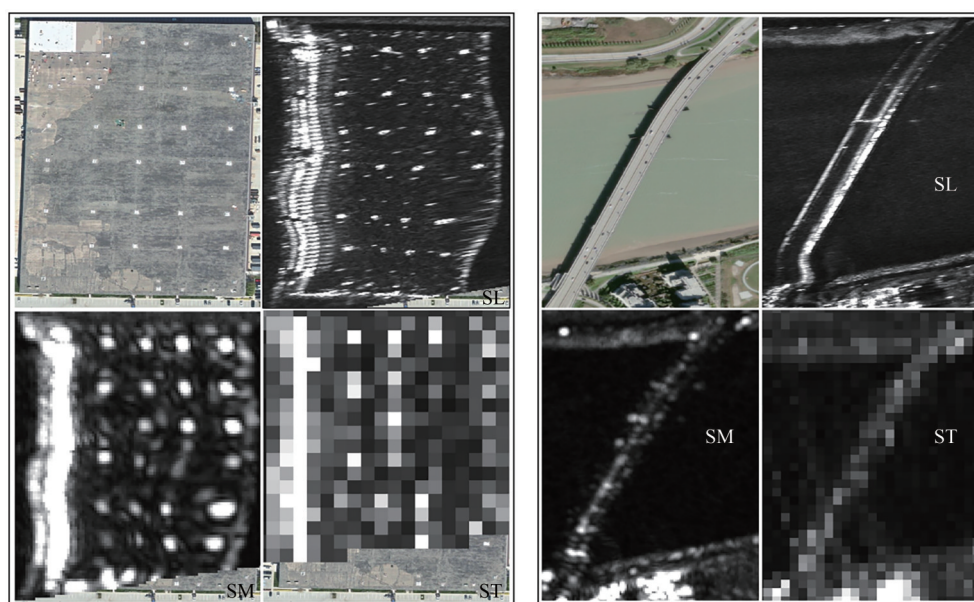
(5) 地理编码。利用式(5)计算的模型相干系数 γ 对利用DA筛选的PS像元进行二次选择,将大于设定的模型相干系数阈值的PS像元保留。最后基于卫星轨道参数等将PS像元进行地理编码,得到地理坐标系(例如WGS84坐标系)下的PS测点及对应时序形变监测结果。

4 结果及讨论

4.1 SAR影像幅度分析

选择研究区两个典型的局部区域,绘制3种数

据平均强度如图2所示。图2(a)是一个仓库屋顶对应的观测结果,总体为面散射机制,SAR影像强度较弱。仓库屋顶装有许多金属材质的通风设备,对应SAR影像上较强的散射体,从3种不同分辨率强度图上均能观测到,但随着分辨率的降低这种强散射体空间范围逐渐变大及扩散、越来越难以与地物一一对应。图2(b)为一座桥梁的观测结果,与图2(a)类似,随着分辨率的降低,桥梁的结构及细节信息逐渐丢失及模糊,SAR像元与具体建构物结构的对应关系变弱。通过上述结果可以看出,不同空间分辨率的SAR影像在监测城市目标时存在尺度效应;此外,SAR影像信息为传感器观测到的地物目标的后向散射信号,使得这种尺度效应较光学遥感影像表现得更为显著。



(a) 仓库屋顶SAR平均幅度
(a) Mean SAR amplitude over the warehouse roof
(b) 桥梁区域SAR平均幅度
(b) Mean SAR amplitude over the bridge

图2 不同分辨率SAR影像平均强度局部对比

Fig. 2 Comparison of average amplitude over local area of SAR images with different resolutions

4.2 干涉图分析

为分析不同分辨率SAR数据在城市区域的干涉能力,分别利用3种数据起、止时间(表1)的两景影像进行差分干涉得到3幅差分干涉图,然后对其进行地理编码,结果如图3所示。高分辨率SL干涉图中建构物轮廓非常清晰、可观测到丰富的局部细节,例如图3(d)SL结果中,左部的

桥梁可以很清楚地看到其两侧强散射体对应干涉相位、周边的房屋也棱角分明;在中等分辨率SM干涉图中建构物轮廓相对模糊、细节部分信息基本丢失,图3(d)SM结果中,桥梁两侧相位已无法分清、房屋棱角模糊;而在低分辨率图3(d)ST结果中,基本看不清建构物轮廓信息,难以识别出房屋棱角位置。

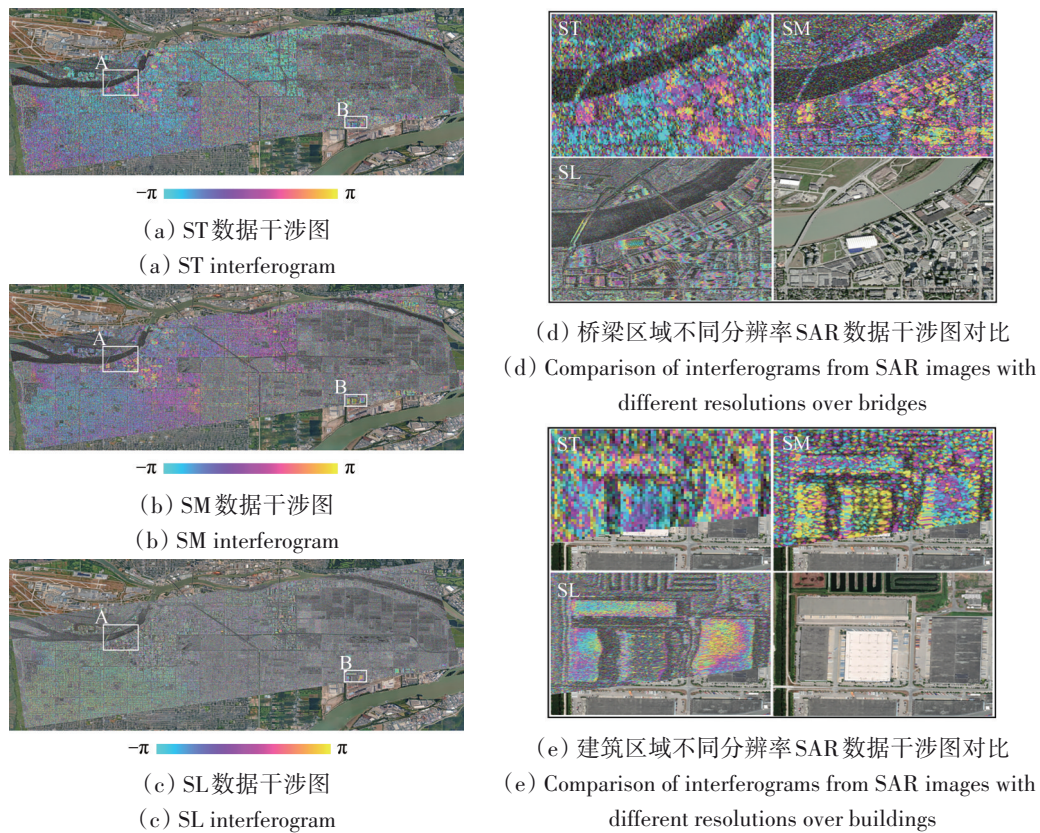


图3 不同分辨率SAR影像干涉图对比

Fig. 3 Comparison of interferograms of SAR images with different resolutions

图3(e)展示了一处局部形变区域的干涉相位, 该区域建筑为高度较低的厂房, 因此干涉条纹主要为形变相位(后续形变监测结果也表明此处存在较大形变)。从3种分辨率干涉相位中均能观察到形变信号, 但随着分辨率的提升形变信号的细节信息变得更加清晰及丰富。上述结果表明, 受到SAR影像尺度效应的影响, 城市区域建筑物对应的干涉相位随着分辨率的降低越来越模糊、结构及形变细节信息逐渐丢失。

计算图2(b)中桥梁区域3种分辨率干涉图对应的时序相位相干性TPC(Temporal Phase Coherence)(Zhao和Mallorqui, 2019), 结果如图4所示。与图3观察到的现象相同, 随着分辨率的提高, 建筑物更多的结构信息能被观测到。此外, 如图4(c)所示, 高分辨率SAR影像对应干涉图中高相干(TPC大于0.7)像元更多, 这主要是由于随着SAR像元分辨率的降低, 每个像元内部散射机制更复杂、可能包含的散射机制类型更多样, 导致更容易受到失相干的影响。

高分辨率干涉图中清晰的结构信息、更加丰富的细节、更多的高相干像元更有利于城市建筑物

物形变精细化监测, 也更有助于InSAR形变监测结果的解译。对此, 在后文中将进一步展开论述。

4.3 形变监测结果分析

查询研究区周边公开的GNSS数据可知该区域水平形变非常微小(<https://geodesy.unr.edu/>[2025-09-25]), 为更好地比较3种数据PSInSAR监测结果, 忽略水平形变将雷达视线方向LOS(Line-Of-Sight)形变都投影到垂直方向之后进行后续的分析。因此, 本文若无特别说明, 给出的形变均为经过上述投影后垂直方向形变结果。忽略水平形变将LOS方向形变转化为垂直形变的具体公式如下:

$$D^{\text{Ver}} = D^{\text{LOS}} / \cos \theta \quad (6)$$

式中, D^{Ver} 为垂直向形变, D^{LOS} 为PSInSAR反演的LOS方向形变, θ 为表1中给出雷达入射角。

基于3种数据利用PSInSAR技术在模型相干系数(式(5))为0.8时的形变监测结果如图5所示, 3种数据形变监测结果一致性较好, 研究区大部分区域稳定, 多处局部区域存在明显形变, 最大形变达20 mm/a左右。3种数据分别得到84833(ST)、397928(SM)以及2448626(SL)个有效的PS监测点, SL结果PS点密度较ST及SM数据分

别提高了29及6倍。从图5中可以明显看出,随着分辨率的提升,PS点密度有了非常显著的提高,使得SL结果中研究区沉降细节最为丰富。此外,

如图5中A、B两处的放大图所示,在ST结果中未被探测到的微小的沉降区域,在SL结果中可以被很好地探测到。

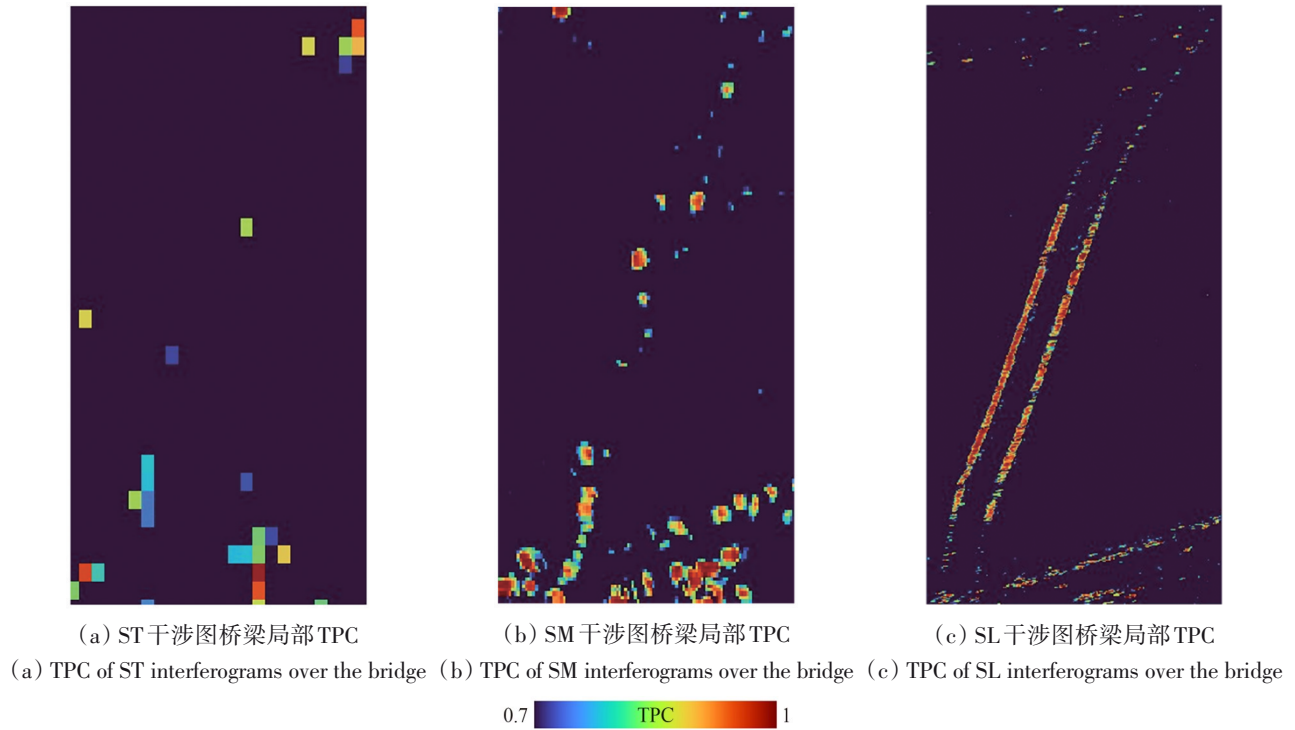
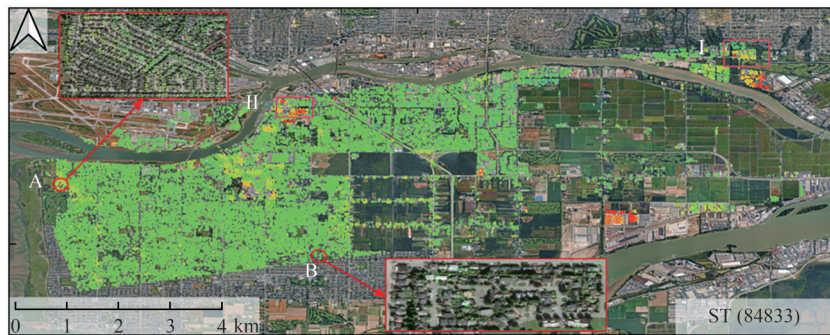


图4 桥梁局部干涉图时序相位相干性

Fig. 4 The temporal phase coherence over the bridge



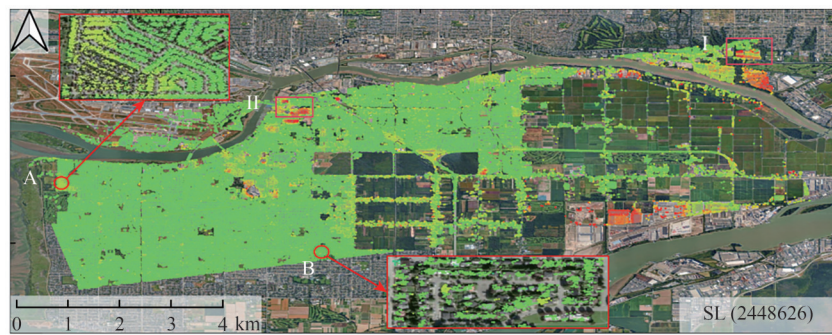
(a) ST影像PSInSAR反演的平均形变速率

(a) PSInSAR derived deformation velocity with ST SAR



(b) SM影像PSInSAR反演的平均形变速率

(b) PSInSAR derived deformation velocity with SM SAR images



(c) SL影像PSInSAR反演的平均形变速率

(c) PSInSAR derived deformation velocity with SL images

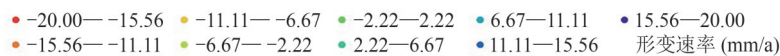


图5 不同分辨率SAR影像PSInSAR反演平均形变速率

Fig. 5 The deformation velocity obtained by PSInSAR with different resolution SAR images

将图5中I和II两处形变较大的局部区域的结果进行详细展示如图6所示。从图6中可以看出在这两个沉降区域，更大的沉降范围能够被较高分辨率的影像监测到；此外，对比图6中白色椭圆所示多处区域，SL数据监测到的沉降比SM及ST数据结果更大，此现象在SL与ST结果对比时更明显。分析研究区域及数据情况，上述随着SAR影像空间分辨率的提升，相同区域监测到更大形变的现象是遥感影像尺度效应的结果。具体分析，高分辨率SAR影像中监测到的局部大形变在中、低分辨率影像中随着像元尺寸的增大被“平均”及“模糊”，导致形变监测结果相对变小。

上述这种InSAR形变观测的尺度效应是由于城市区域建筑物形变多数是局部或结构尺度的形变；在单个低分辨率像元内部，局部“大形变”和其周围“小形变”进行“平均”，使得整个像元的形变表现为“小形变”。值得注意的是，以上讨论的像元内部的形变“平均”（尺度效应）并非像元各部分形变的简单平均，而是与各部分散射体强度等因素相关的一种加权平均或综合，与SAR像元内部各散射体强度、结构、位置关系等有关。

图6中的P1及P2沉降特征点3种数据PSInSAR时序形变结果如图7所示。从图7可以看出，监测期间P1及P2点呈现显著的沉降趋势，两PS测点SL获取的累积沉降均大于SM及ST数据结果。具体来看，对于P1点3种数据最大累积形变分别为-30 mm (ST)、-35 mm (SM) 及-45 mm (SL)，P2点3种数据最大累积形变分别为-42 mm (ST)、-50 mm (SM) 及-55 mm (SL)。产生上述差异的原因与上小节分析类似，主要是由于SAR影像分辨率变化带来的尺度效应导致的。

将图6中区域I和II中白色箭头所指示的两栋建筑（建筑1和建筑2）对应PS测点形变进行三维展示，如图8所示。从图8可以看出，对于选取的两栋建筑，总体上来看PS测点沉降值SL>SM>ST；与谷歌三维图对比发现，高分辨率SAR影像结果PS测点能够更好的和建构物的局部结构对应，例如第一行红色矩形所示的厂房区域的突出结构，在SL结果中能很好的找到对应的PS测点，而在ST及SM结果中则较难对应。此外，随着影像分辨率的提升，对同一栋建筑PSInSAR技术能够更好地监测到该建筑不同结构部分对应的不均匀沉降。



(a) 局部I处ST影像平均形变速率结果

(a) The deformation velocity of ST results over subarea I



(d) 局部II处ST影像平均形变速率结果

(d) The deformation velocity of ST results over subarea II



(b) 局部I处SM影像平均形变速率结果

(b) The deformation velocity of ST results over subarea I



(c) 局部I处SL影像平均形变速率结果

(c) The deformation velocity of ST results over subarea I



(e) 局部II处SM影像平均形变速率结果

(e) The deformation velocity of ST results over subarea II



(f) 局部II处SL影像平均形变速率结果

(f) The deformation velocity of ST results over subarea II

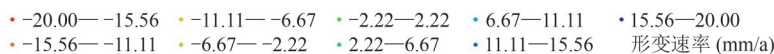
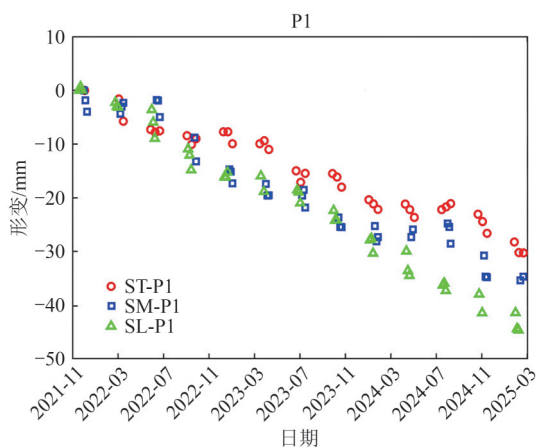


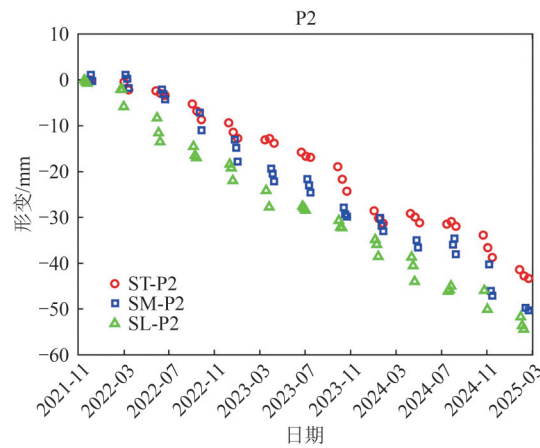
图6 不同分辨率SAR影像建筑物平均形变速率监测结果局部对比

Fig. 6 Comparisons of the deformation velocity for buildings and structures over two subareas



(a) 特征点P1时序形变

(a) Time-series deformation over P1



(b) 特征点P2时序形变

(b) Time-series deformation over P2

图7 特征点P1及P2时序形变

Fig. 7 Time-series deformation over P1 and P2

4.4 PS测点与建筑物结构对应性分析

除了前述分析的在PS点监测密度及反演形变量级存在差异外,不同分辨率SAR数据结果在与建筑物结构对应性方面也存在明显不同。图9给出了研究区两个建筑区对应的3种数据的形变监测结果级干涉图(与图3相同的干涉图)或平均幅度图。如图9(a)白色虚线所示,该建筑南部结构在3种数据干涉图中均呈现出较高的信噪比、可

观察到明显的东西向干涉相位条纹;但随着分辨率的降低,此结构对应的东西向干涉相位条纹逐渐变粗,与此结构的对应关系也逐渐变弱(如图9(a)中白色箭头所示)。该区域最终的形变监测结果也呈现类似现象,如图9(b),地理编码后PS测点从SL到ST结果呈现出不断“扩散”的趋势(如图9(b)中红色箭头所示),且此种趋势在图6中也能观察到。图9(c)—(d)给出了研究区另一

个建筑物区域的平均幅度及PS测点图，可以观测到和图9（a）—（b）相同的现象及规律，在此不再赘述。

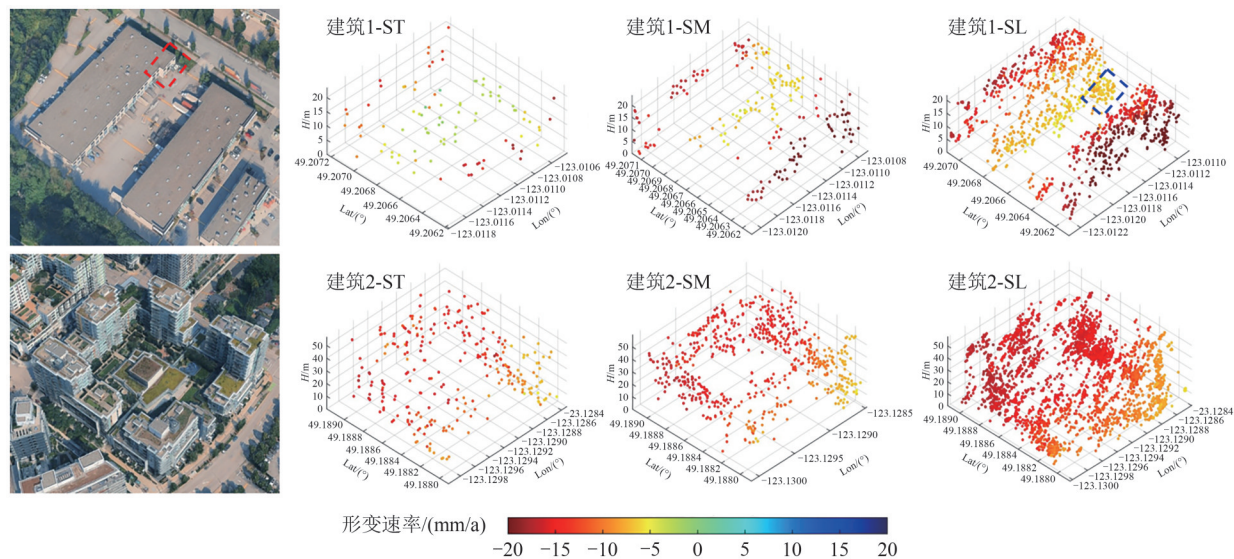


图8 典型建筑PS测点形变结果三维展示

Fig. 8 Three-dimensional display of the deformation over two typical building

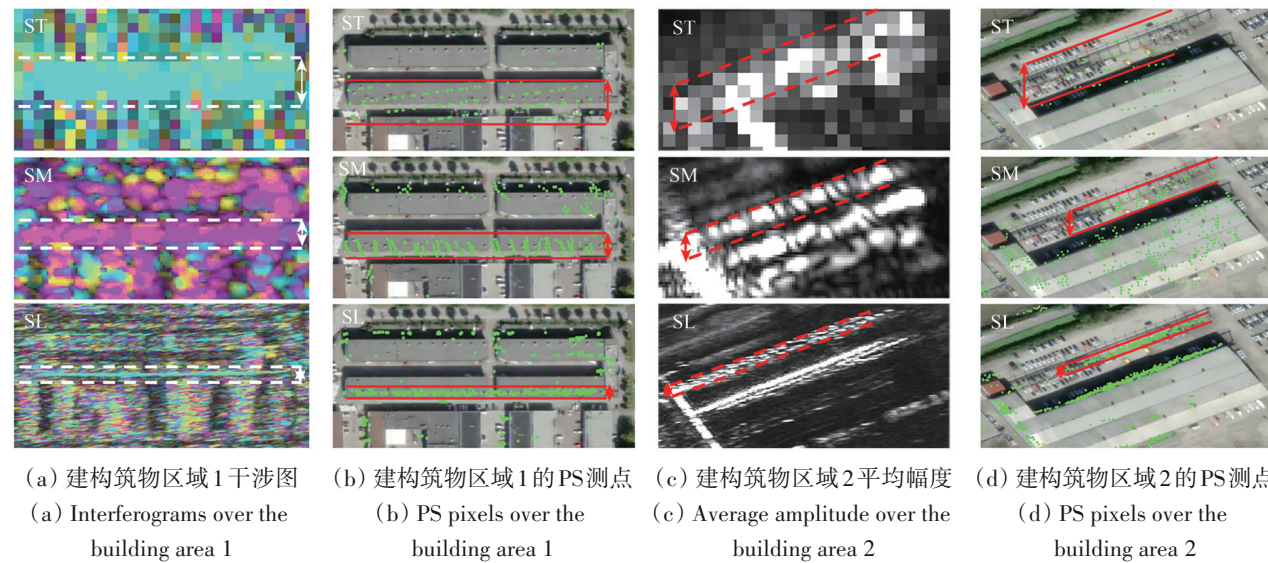


图9 PS测点与建筑物结构的对应性

Fig. 9 Correspondence between PS pixels and the local building structure

这种随着SAR影像分辨率的降低，PS测点在空间上的“扩散”也是由于遥感尺度效应导致。在城市区域存在较多的强散射体，随着分辨率的降低，单个SAR像元包含的强散射体变多，SAR像元对应的信号也从与单个或少数强散射体（局部结构）对应变为由多个强散射体（建筑某部分）综合决定，导致SAR像元监测对象的“模糊”。对于城市建筑物形变精细化监测及解译，准确地

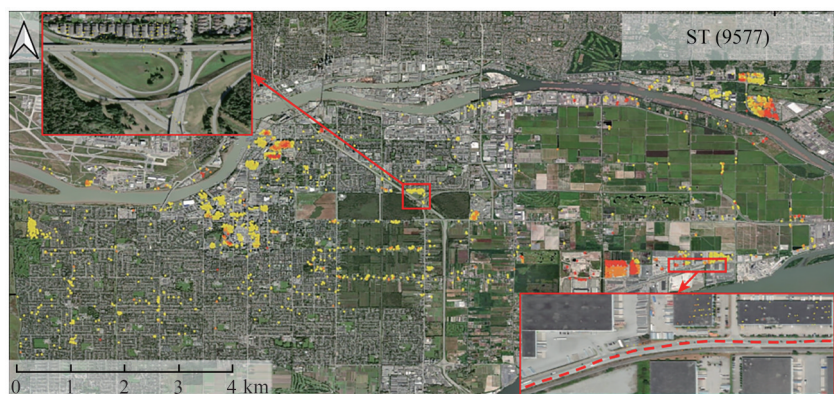
将PS测点形变与建筑物具体结构对应及关联至关重要，从这点来说这种PS测点与监测对象的尺度效应也会影响PSInSAR技术形变监测的效果。

4.5 Sentinel-1数据监测能力的讨论

Sentinel-1卫星是目前唯一定期拍摄全球SAR影像并开放获取数据的卫星（NISAR卫星还处于在轨测试阶段），但其空间分辨率相对较低；因此，与高分辨率SAR卫星影像比较分析其监测城

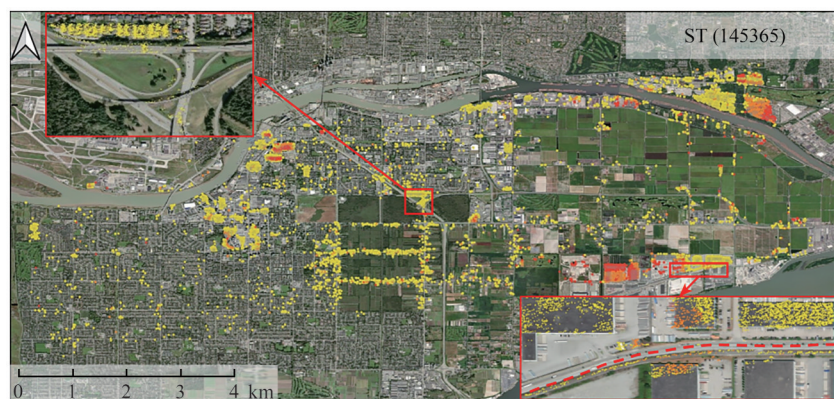
市建构筑物形变的能力非常必要。在此,比较研究区ST和SL得到的形变监测结果。为保证ST数据监测结果PS点密度及可靠性,选择其模型相干系数阈值为0.7的结果与SL数据模型相干系数阈

为0.8的结果进行比较;提取上述两个结果中(垂直)形变速率小于 -5 mm/a 的PS点作为监测到的形变区域,结果如图10所示。



(a) ST数据沉降区域探测结果

(a) The detected subsidence areas by ST data



(b) SL数据沉降区域探测结果

(b) The detected subsidence areas by SL data

● $-20.00 \sim -15.00$ ● $-15.00 \sim -10.00$ ● $-10.00 \sim -5.00$ 形变速率/(mm/a)

图10 ST及SL数据沉降区域探测结果对比

Fig. 10 Comparison of the detected subsidence areas by ST and SL data

从图10中可以看出,对于大部分SL监测到的形变区域ST也可以监测到,但受到尺度效应的影响在部分区域ST监测到的沉降量级相对偏小;各沉降量级像元数量的统计结果如图11所示,年均沉降大于 14 mm/a 的像元在SL及ST提取的形变像元中占比分别为18.2%及16.2%。另外,在一些形变空间范围较小、建构筑物分布较复杂的区域,例如图10中红色矩形所示的高架桥区域及红色虚线所示铁路沿线区域,SL结果有PS测点监测到形变,而ST数据则几乎没有监测点。此外,在两种数据监测到的形变区域,SL结果PS测点密度更高。

通过以上分析可以看出,对于大尺度的城市建构筑物形变监测,ST具有较好的监测效果,甚至能监测到大部分SL影像(亚米级SAR影像)监测到的形变区域。因此,对于大范围的城市建构筑物形变监测,利用ST数据可以得到较好的结果;但对于精细化程度要求更高的、单体建筑级别尺度的监测来说,ST数据分辨率不够,需要使用更高分辨率的SAR影像进行监测。综合考虑数据成本及监测效果,建议在实际工程应用时,可先利用免费的ST数据大范围监测、识别靶区,在此基础上对重点区域再利用高分辨率SAR数据进行精细化监测及解译。

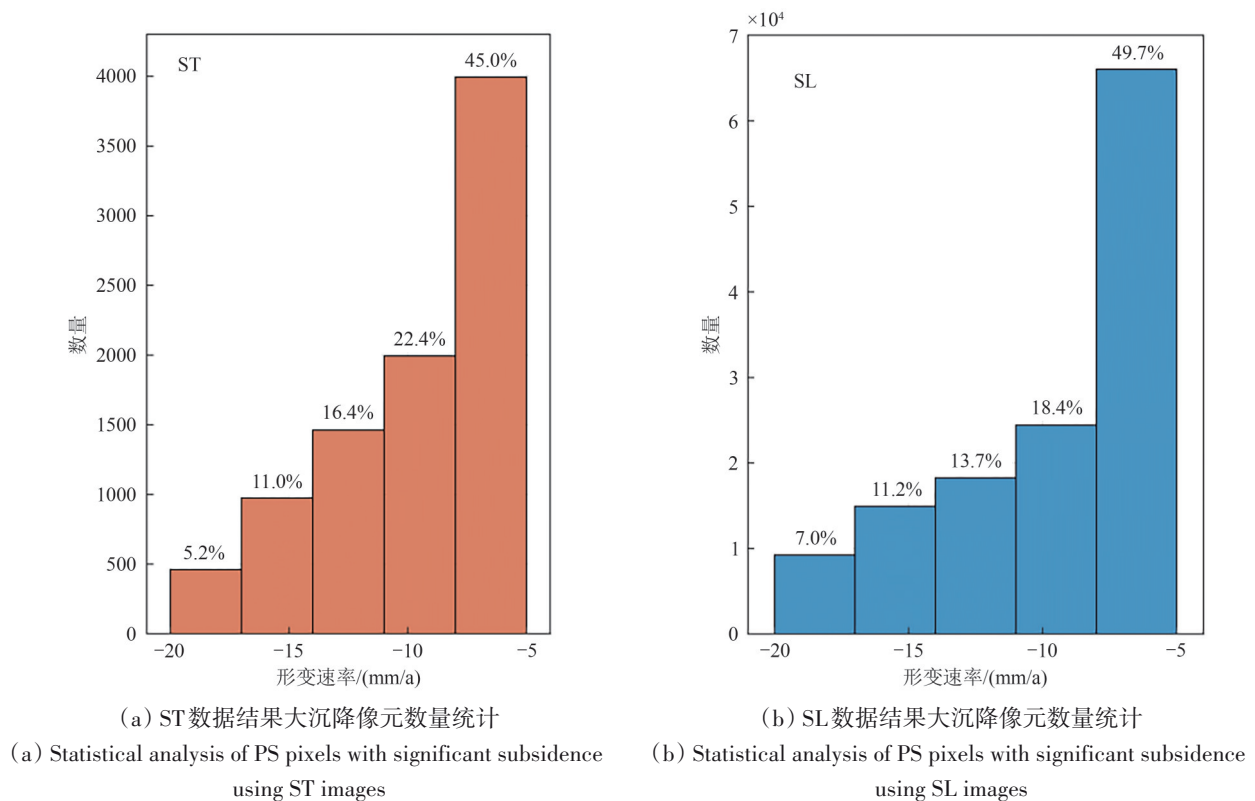


图 11 研究区大沉降像元数量统计

Fig. 11 Statistical analysis of PS pixels with significant subsidence

5 结 论

本研究利用加拿大温哥华市区的高、中、低3种分辨率SAR影像，对比了基于不同空间分辨率SAR影像的PSInSAR技术城市建构筑物形变监测结果，分析及讨论了SAR影像不同空间分辨率对于城市建构筑物形变监测的尺度效应，主要工作及研究结论如下：

(1) 从SAR影像幅度、干涉相位、相干性、形变监测结果、PS测点与建构筑物结构对应性5个方面，对比分析了不同分辨率SAR影像形变监测结果的差异及受到尺度效应的影响；此外，讨论了Sentinel-1数据城市建构筑物形变监测能力。

(2) 在利用SAR数据进行城市建构筑物形变监测时，随着影像分辨率的降低，受到尺度效应的影响，观测目标变模糊、干涉相位对形变信息的精细化表征能力变弱、相干性下降、局部形变监测最值减小、SAR像元与建构筑物结构对应性变差，利用PSInSAR对城市建构筑物进行精细化监测的整体能力变弱。

(3) Sentinel-1数据的城市建构筑物形变监测能力较中、高分辨率数据更弱，特别是在局部及

大形变监测方面存在不足。但对于大范围的大尺度形变区域的识别及监测，Sentinel-1数据能获得与高分辨率SAR影像近似的结果。因此，建议结合具体监测区域及目标，采取适当策略，协同使用各种分辨率SAR影像进行城市建构筑物形变监测，以达到经济、高效的监测效果。

志 谢 本研究使用的RCM数据源于加拿大航天局(CSA)、Sentinel-1数据来源于欧洲航天局(ESA)、光学影像来源于谷歌地球、DEM数据来源于SRTM任务，在此表示衷心的感谢！

参考文献(References)

- 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]
- Chen F L, Wu Y H, Zhang Y M, Parcharidis I, Ma P F, Xiao R Y, Xu J, Zhou W, Tang P P and Fomelis M. 2017. Surface motion and structural instability monitoring of Ming Dynasty City walls by two-step tomo-PSInSAR approach in Nanjing City, China. *Remote Sensing*, 9(4): 371 [DOI: 10.3390/rs9040371]

- China Newsflash. 2025. In a residential area in Shenzhen, the building foundations have sunk. Officials: 783 people have been evacuated [EB/OL]. <https://www.jiemian.com/article/12913554.html> (中国快讯). 2025. 深圳一小区房屋沉降, 官方: 已疏散783人[EB/OL]. <https://www.jiemian.com/article/12913554.html>
- Cigna F and Tapete D. 2021. Present-day land subsidence rates, surface faulting hazard and risk in Mexico City with 2014-2020 Sentinel-1 IW InSAR. *Remote Sensing of Environment*, 253: 112161 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.112161]
- Feng H, Zhao F, Wang Y J, Yan S Y, Peng K, Wang T, Zhang N B and Xu D B. 2022. Dual-polarization Sentinel-1 data polarization time series InSAR technology surface deformation monitoring——Taking shanghai Pudong airport as an example. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(12): 2531-2541 (冯瀚, 赵峰, 汪云甲, 闫世勇, 彭锴, 王腾, 张念斌, 徐东彪). 2022. 双极化 Sentinel-1 数据极化时序 InSAR 技术地表形变监测——以上海市浦东机场为例. *遥感学报*, 26(12): 2531-2541 [DOI: 10.11834/jrs.20210423]
- 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. 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1): 8-20 [DOI: 10.1109/36.898661]
- 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]
- Ji Z N, Du Y N, Shi Y Z, Liao C H, Feng G C, Yu W X and Li X S. 2025. Spatiotemporal monitoring and attribution analysis of surface deformation along Guangzhou metro lines based on MTInSAR. *National Remote Sensing Bulletin*, 29(7): 2429-2441. (纪政楠, 杜亚男, 师延泽, 廖春华, 冯光财, 俞文熙, 李晓诗). 2025. 基于时序 InSAR 的广州市地铁沿线地表形变时空监测与归因分析. *遥感学报*, 29(7): 2429-2441 [DOI: 10.11834/jrs.20244163]
- Jiang H N, Balz T, Li J N and Mishra V. 2023. Preliminary investigation of sudden ground subsidence and building tilt in Balitai Town, Tianjin City, on 31 May 2023. *Remote Sensing*, 15(19): 4891 [DOI: 10.3390/rs15194891]
- Liao M S, Pei Y Y, Wang H M, Fang Z L and Wei L H. 2012. Subsidence monitoring in Shanghai using the PSInSAR technique. *Shanghai Land and Resources*, 33(3): 5-10 (廖明生, 裴媛媛, 王寒梅, 方志雷, 魏恋欢). 2012. 永久散射体雷达干涉技术监测上海地面沉降. *上海国土资源*, 33(3): 5-10 [DOI: 10.3969/j.issn.2095-1329.2012.03.004]
- Lu W G and Chen Y. 2024. Research on emergency management of urban building collapse based on three-dimensions analysis model——Taking March 7th collapse accident of Xinjia Hotel in Quanzhou as an example. *China Emergency Rescue*, (2): 18-25 (卢文刚, 陈洋). 2024. 基于“三维”模型的城市房屋坍塌重大安全事故应急治理研究——以泉州欣佳酒店“3·7”坍塌事故为例. *中国应急救援*, (2): 18-25 [DOI: 10.19384/j.cnki.cn11-5524/p.2024.02.012]
- Ma P F, Lin H, Lan H X and Chen F L. 2015. Multi-dimensional SAR tomography for monitoring the deformation of newly built concrete buildings. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 106: 118-128 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.04.012]
- Ma P F, Wang W X, Zhang B W, Wang J L, Shi G Q, Huang G Q, Chen F L, Jiang L M and Lin H. 2019. Remotely sensing large-and small-scale ground subsidence: a case study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area of China. *Remote Sensing of Environment*, 232: 111282 [DOI: 10.1016/J.RSE.2019.111282]
- Ohenhen L O, Zhai G, Lucy J, Werth S, Carlson G, Khorrami M, Onyike F, Sadhasivam N, Tiwari A, Ghobadi-Far K, Sherpa S F, Lee J C, Zehsaz S and Shirzaei M. 2025. Land subsidence risk to infrastructure in US metropolises. *Nature Cities*, 2(6): 543-554 [DOI: 10.1038/s44284-025-00240-y]
- Peng K, Zhao F, Wang Y J, Yan S Y and Feng H. 2023. DS-InSAR phase optimization based on singular value decomposition. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(2): 533-542 (彭锴, 赵峰, 汪云甲, 闫世勇, 冯瀚). 2023. 基于奇异值分解的 DS-InSAR 相位优化. *遥感学报*, 27(2): 533-542 [DOI: 10.11834/jrs.20210454]
- Qin X Q, Yang M S, Wang H M, Yang T L, Lin J X and Liao M S. 2016. Application of high-resolution PS-InSAR in deformation characteristics probe of urban rail transit. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 45(6): 713-721 (秦晓琼, 杨梦诗, 王寒梅, 杨天亮, 林金鑫, 廖明生). 2016. 高分辨率 PS-InSAR 在轨道交通形变特征探测中的应用. *测绘学报*, 45(6): 713-721 [DOI: 10.11947/j.AGCS.2016.20150440]
- 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]
- 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]
- Yang M S, Liao M S, Chang L and Hanssen R F. 2023. Interpretation of multi-epoch InSAR deformation for urban scenes: a problem analysis and literature review. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 48(10): 1643-1660 (杨梦诗, 廖明生, 常玲, Hanssen R F). 2023. 城市市场景时序 InSAR 形变解译: 问题分析与研究进展. *武汉大学学报(信息科学版)*, 48(10): 1643-1660 [DOI: 10.13203/j.whugis.20230289]
- Yin S H. 2023. Study on rescue measures for trapped people in building collapse accidents——Taking rescue action for “4.29” self-built houses collapse accident in Changsha, Hunan Province as an example. *China Emergency Rescue*, (2): 15-20 (银赛红). 2023. 建筑倒塌事故被困人员救援对策研究——以湖南长沙“4·29”居民自建房倒塌事故救援为例. *中国应急救援*, (2): 15-20 [DOI: 10.19384/j.cnki.cn11-5524/p.2023.02.001]
- Zhang B, Liu Q H, Li X M, Liu L Y, Yang B S, Husi L T, Gao L R, Zhang W J, Zhang H, Bian Z J, Qi M J, Chen C and Shang H Z. 2025. The core concepts and fundamental issues of remote sens-

ing science. National Remote Sensing Bulletin, 29(1): 1-48 (张兵, 柳钦火, 李晓明, 刘良云, 杨必胜, 胡斯勒图, 高连如, 张文娟, 张浩, 卞尊健, 齐梦佳, 陈驰, 尚华哲. 2025. 遥感科学的内涵与基础性问题. 遥感学报, 29(1): 1-48) [DOI: 10.11834/jrs.20244503]

Zhao F and Mallorqui J J. 2019. A temporal phase coherence estimation algorithm and its application on DInSAR pixel selection. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 57(11): 8350-8361 [DOI: 10.1109/TGRS.2019.2920536]

Zhao F, Zhang L X, Wang T, Wang Y J, Yan S Y and Fan H D. 2022. Polarimetric persistent scatterer interferometry for urban ground deformation monitoring with Sentinel-1 dual polarimetric data. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 47(9): 1507-1514 (赵峰, 张雷昕, 王腾, 汪云甲, 闫世勇, 范洪冬. 2022. 城市地表形变的双极化 Sentinel-1 数据极化时序 InSAR 技术监测. 武汉大学学报(信息科学版), 47(9): 1507-1514) [DOI: 10.13203/j.whugis.20210496]

Comparative analysis and scale effect of urban deformation monitoring using PSInSAR and SAR images with different resolutions

ZHAO Feng, ZHENG Qiyang, HUANG Kesheng, MENG Yajie, BU Shiyong, ZHANG Leixin, WANG Yunjia

1. School of Environmental Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;
2. Key Laboratory of Land Environment and Disaster Monitoring, Ministry of Natural Resources, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

Abstract: Urban deformation poses considerable threats to residents' lives, property safety, and social stability, making its regular monitoring critical. Time-series Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) enables large-scale urban deformation monitoring with high precision and has been employed in numerous studies and engineering applications. Synthetic Aperture Radar (SAR) images with different resolutions exhibit distinct advantages in urban deformation monitoring. However, comparative analyses on this topic remain insufficient. Additionally, discussions on the scale effects of SAR images with different resolutions on urban deformation monitoring are scarce.

Deformation monitoring results and scale effects across SAR images with different resolutions are compared and analyzed by using low-, medium-, and high-resolution SAR images covering the same area and monitoring period and Persistent Scatterer InSAR (PSInSAR).

Findings indicate that as SAR image resolution decreases, the observed targets become increasingly blurry because of scale effects. This degradation leads to the reduced capability for precisely characterizing deformation information from the InSAR interferometric phase, a decline in coherence, a decrease in the maximum deformation detected by PSInSAR, and a weakened correspondence between SAR pixels and building structures, overall diminishing the capability of PSInSAR in fine-scale urban deformation monitoring. Compared with medium- and high-resolution SAR images, Sentinel-1 data demonstrate weaker deformation monitoring performance for urban buildings, particularly in detecting localized and large deformations. However, in large-scale deformation identification and monitoring, Sentinel-1 images yield results comparable to those provided by high-resolution SAR images.

Key words: urban deformation monitoring, PSInSAR technology, scale effects, SAR image resolution, InSAR deformation monitoring

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42474018); Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2025ZDPYQB1007); China Postdoctoral Science Foundation (No. 2023T160685, 2020M671646); Young Elite Scientists Sponsorship Program by CAST (No. 2023QNR001-YESS20230599)