

基于密集弧段连接的城市场景时序 InSAR方法(EP-InSAR)

郭绍琨¹, 董杰², 王茹¹, 廖明生¹

1. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079;

2. 武汉大学 遥感信息工程学院, 武汉 430079

摘要: 城市地表及基础设施形变监测对城市安全运行具有重要意义。合成孔径雷达干涉测量技术 InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) 是城市形变监测的重要手段之一。在复杂城市场景中, 传统永久散射体 InSAR 技术 PS-InSAR (Permanent Scatter InSAR) 易受大气延迟影响、高估相位噪声水平; 基于 PS 弧段的 InSAR 技术 PSP-InSAR (PS Pairs InSAR) 通过解算点对参数, 可有效提取高质量监测点, 但在算力有限时, 点对搜索覆盖不足。为此, 本文提出一种基于密集弧段连接的时序 InSAR 方法 (Exhaustive Pairs InSAR, EP-InSAR)。该方法首先采用顺次基线连接策略, 抑制时空双差相位形变分量, 允许仅开展一维弧段参数解算, 显著提高计算效率; 然后设计双阈值驱动的迭代网络扩张算法, 实现对高质量点对的近似穷举, 减弱对相位质量幅度先验的依赖, 充分发掘稳定监测点; 最后, 剔除高程与热胀冷缩项获得低频干涉图序列, 提取形变时间序列产品。依据上海地区 TerraSAR-X (TSX) 数据进行实验, 结果表明, EP-InSAR 方法有效提升了监测点覆盖率, 能够筛选出大量不符合传统幅度先验的高质量监测点, 其中 29.3% 监测点的振幅离差指数 > 0.6; 在 3000×3000 的处理窗口内, 提取由 6000 万条高质量弧段连接的 91 万监测点, 为监测点参数解算提供大量多余观测; 最终, 发现多处可与卫星历史影像印证的局部形变隐患点。综上, 本文提出算法的整体流程已初步实现并行优化, 具备工程应用可行性, 有望在城市建筑形变普查和健康监测中应用推广。

关键词: 城市形变监测, InSAR, EP-InSAR, 弧段网络扩张, 局部非线性形变, 永久散射体

中图分类号: P236/P2

引用格式: 郭绍琨, 董杰, 王茹, 廖明生. 2026. 基于密集弧段连接的城市场景时序 InSAR 方法 (EP-InSAR). 遥感学报, 30(4): 916-928

Guo S K, Dong J, Wang R and Liao M S. 2026. EP-InSAR: Exhaustive pair linking strategy for urban ground deformation mapping. National Remote Sensing Bulletin, 30(4): 916-928 [DOI: 10.11834/jrs.20265361]

1 引言

合成孔径雷达干涉测量 InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) 通过对比多幅单视复数影像 SLC (Single Look Complex) 的相位信息, 测定地表散射体在两次观测间的相对位移 (Moreira 等, 2013)。时间序列 TS-InSAR (Time-Series InSAR) 技术灵活组合干涉对, 可有效分离多源相位分量, 精确提取散射体的形变时间序列, 在地质灾害防控、城市地面沉降与建筑设施的安全监测中得到广泛应用 (郭绍琨 等, 2023; 纪政楠

等, 2025; 廖明生 等, 2020, 2021; Ma 等, 2022; Perissin 和 Wang, 2011; Soergel, 2010; Wu 等, 2023)。

在复杂城市场景中, 由于无法有效模拟高程、温度相关的空间高频分量, 干涉相位变化剧烈, 常规的差分干涉测量技术 D-InSAR (Differential InSAR) 难以直接提取形变信号 (Perissin 和 Ferretti, 2007)。永久散射体 InSAR 技术 PS-InSAR (Persistent Scatterer InSAR) 通过识别具有可靠相位观测量的永久散射体 PS (Persistent Scatterer), 利用具有不同垂直基线、温度差异的干涉图组合分离非形变分

收稿日期: 2025-09-12; 预印本: 2025-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(编号:42374013, 42504033)

第一作者简介: 郭绍琨, 研究方向为合成孔径雷达数据处理与应用。E-mail: guoshaokun@whu.edu.cn

通信作者简介: 董杰, 研究方向为雷达干涉测量(InSAR)理论基础及其形变监测应用。E-mail: dongjie@whu.edu.cn

量, 进而提取 PS 点上的高精度形变信号 (Crosetto 等, 2016)。

PS-InSAR 技术框架由 Ferretti 等 (2001) 首先提出: 假设散射信号的噪声分量服从复圆高斯分布, 进而以振幅离散指数 ADI (Amplitude Dispersion Index) 作为相位稳定性的代理指标筛选候选 PS 点集合; 随后, 通过迭代求解包含高程误差、线性形变速率、大气延迟等相位分量的观测方程, 获取整体形变场。在此基础上, 为了克服长时序处理时, 单主 (星状) 干涉对组合导致的 PS 点稀疏问题, 小基线集 SBAS-InSAR (Small Baseline Subset InSAR) 方法 (刘利敏 等, 2016; Berardino 等, 2002) 构建小 (时空) 基线干涉图子集, 减少残余地形相位, 控制时空失相干并提高 PS 点密度, 最终通过最小化整体形变速率范数, 得到连贯的长时序形变结果。同时, 面向自然地物的非线性形变现象, Hooper 等 (2007, 2012) 发展出一种假设形变场空间平滑, 以监测点的相位稳定性为依据的 PS 分析算法, 简称 StaMPS。而后, 随着基于概率模型的时序相位滤波算法的发展, Ferretti 等 (2011) 提出了 SqueeSAR 算法, 协同处理 PS 点和分布式散射体 DS (Distributed Scatterer), 成功将中低相干区域纳入 PS 处理框架, 提高了相关算法在非城市区域的适用性。此外, 当数据具有多个极化通道时, 可以通过组合多通道信息, 提高整体相位质量 (冯瀚 等, 2022; Wang 等, 2024b)。

上述算法以 PS 候选点 (预处理后的 DS 点可被当作 PS 点) 为基本单元, 在有效估计中长尺度相位分量的基础上, 筛选出残余相位分量小的 PS 点, 不利于处理局部非线性形变区域, 未能充分利用合成孔径雷达 SAR (Synthetic Aperture Radar) 影像信息。由此, Costantini 等 (2014) 提出 PS 点对 PSP-InSAR (PS Pairs InSAR) 方法: 由于大气、轨道相位项的空间频率低, 且在长影像序列中与观测时间、垂直基线相互独立, 可以通过连接相邻像素, 形成空间弧段, 从时空双差干涉相位中求解高程、线性形变速率差异, 经全局平差后, 用于剔除高程残差, 保留形变分量。该方法能够更好地处理局部非线性形变信号, 获取更为密集的 PS 点集, 但由于二维弧段参数估计计算量大, 需要根据应用目标和计算资源调整弧段连接和网络扩张策略, 避免遍历较多 PS 点对。

综上所述, 现有 PSP-InSAR 方法虽在城市场景中具有一定优势, 但其弧段参数解算依赖二维周期图谱估计, 计算复杂度较高, 大大限制了尝试连接弧段总数, 无法将所有低相位噪声点纳入观测网络。为此, 本文提出一种基于密集弧段连接的时序 InSAR 方法 (Exhaustive Pairs InSAR, EP-InSAR)。该方法首先采用顺次基线连接策略, 抑制时空双差相位形变分量, 允许仅开展一维弧段参数解算, 显著提高计算效率; 然后设计双阈值驱动的迭代网络扩张算法, 实现对高质量点对的近似穷举, 减弱对相位质量幅度先验的依赖, 充分发掘稳定监测点; 最后, 剔除高程与热胀冷缩项获得低频干涉图序列, 提取形变时间序列产品。以上海地区 TerraSAR-X (TSX) 数据为例, 验证本文提出方法在城市建筑场景下的有效性, 并探讨计算过程中的若干问题, 以期在城市 InSAR 形变监测提供新的思路。

2 基于密集弧段连接的时序 InSAR 方法 (Exhaustive Pairs InSAR, EP-InSAR)

针对 PS-InSAR 方法或常规 PSP 方法中数据利用不足、忽略局部形变等问题, 本文提出基于密集弧段连接的时序 InSAR 方法 (Exhaustive Pairs InSAR, EP-InSAR)。本文方法流程主要包括 3 部分: 使用其他软件完成配准; 然后, 采用顺次基线连接策略, 开展基于一维弧段参数搜索的网络扩张, 经全局鲁棒平差, 获取高质量的高程与热胀冷缩参数; 最后, 提取干涉图形变分量, 结合时空滤波与迭代优化, 反演形变时间序列产品。总体流程如图 1 所示。

2.1 时空双差弧段相位组成

设共有 N 幅 SAR 影像, 获取时刻为 $\{t_k\}_{k=1}^N$ 。像素集合记为 \mathcal{P} , 任意 $(i, j) \in \mathcal{P}$ 构成一条空间弧段。假设目标区域具有线性形变模式, 经时序配准后, 在主影像与第 k 景影像构成的干涉图上, 该弧段的时空双差 $\Delta\phi_{ij}^{(k, k+1)}$ 相位为

$$\Delta\phi_{ij}^{(k)} = \frac{4\pi}{\lambda} \left(\Delta s_{ij} \frac{B_{\perp}^{(k)}}{r} + \Delta v_{ij} t^{(k)} \right) + \Delta\phi_{\text{atm}, ij}^{(k)} + \Delta\phi_{\text{orb}, ij}^{(k)} + \varepsilon_{ij}^{(k)} \quad (1)$$

式中, λ 为波长, r 为斜距, $B_{\perp}^{(k)}$ 为第 k 景影像相对于主影像的垂直基线; Δs_{ij} 表示 i, j 这两点对应的空间散射中心连线在垂直基线方向上的投影长度,

$t^{(k)}$ 为时间基线, Δv_{ij} 为 i, j 这两点间的线性形变速率差, $\Delta\phi_{\text{atm}, ij}^{(k)}$ 为该干涉图上 i, j 这两点间的大气延迟相位差, $\Delta\phi_{\text{orb}, ij}^{(k)}$ 为 i, j 这两点间的轨道误差相位

差, $\varepsilon_{ij}^{(k)}$ 为随机噪声。以上分量中, 大气延迟相位与轨道误差相位经过近邻点对空间差分后量级较小, 可忽略。

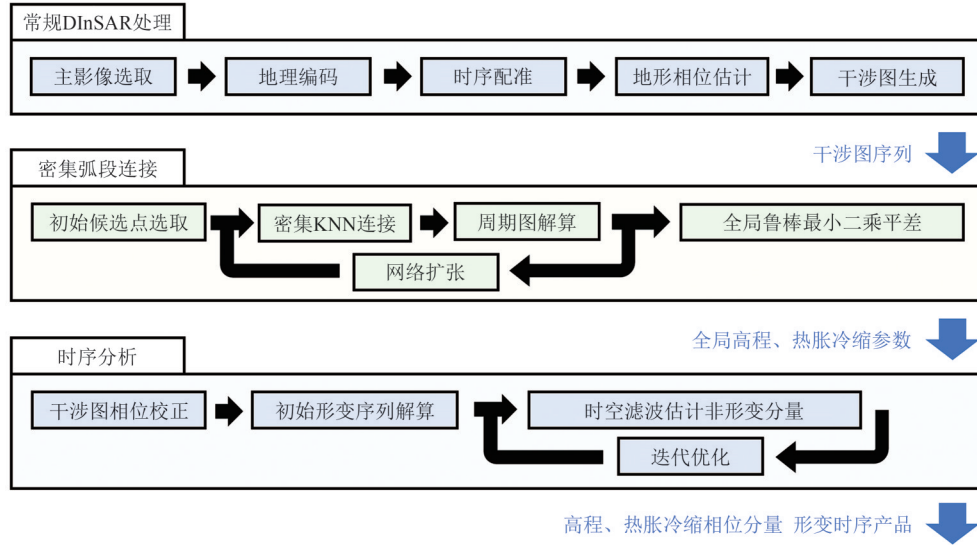


图1 基于密集弧段连接的时序InSAR方法(EP-InSAR)流程图

Fig. 1 Flowchart of the Exhaustive-Pairs-based time-series InSAR method (EP-InSAR)

因此, 通过从时空双差相位序列 $\{\Delta\phi_{ij}^{(k)}\}_{k=1}^N$ 中估计 Δs_{ij} 与 Δv_{ij} , 可以提前补偿干涉相位中的高程差异相关分量和长期线性形变差异分量, 降低干涉图的空间频率, 提高(尤其是城市地区的)相位解缠可靠性。

传统时序InSAR技术中的弧段参数估计方法在 Δs_{ij} 与 Δv_{ij} 的二维参数平面内搜索最小化相位残差的一组参数, 常用方法包括周期图网格搜索(Wang等, 2024a)、最大似然迭代优化(De Jonge等, 1996)等, 它们稳定可靠, 但面对二维联合搜索时计算复杂度较高, 制约了弧段连接方法的大规模应用。

2.2 基于顺次基线连接的弧段参数快速解算

多数SAR卫星具有稳定的重访周期, 连续采集时, 相邻影像对的时间基线为常数。这种情况下, 按影像获取顺序依次进行干涉, 构成时间基线集 $\{(k, k+1)\}_{k=1}^{N-1}$ 。此时, 某干涉图上的双差相位为

$$\Delta\phi_{ij}^{(k,k+1)} = \frac{4\pi}{\lambda} \left(\Delta s_{ij} \frac{B_{\perp}^{(k,k+1)}}{r} + \Delta v_{ij} (t_{k+1} - t_k) \right) + \eta_{ij}^{(k,k+1)} \quad (2)$$

式中, $\eta_{ij}^{(k,k+1)}$ 包括轨道误差、大气延迟和随机误

差, 当 $(t_{k+1} - t_k)$ 为常数 Δt 时, $\Delta v_{ij}(t_{k+1} - t_k)$ 项在任一弧段上退化为常量, 忽略 $\eta_{ij}^{(k,k+1)}$, 此时有:

$$\Delta\phi_{ij}^{(k,k+1)} \approx \kappa \Delta s_{ij} B_{\perp}^{(k,k+1)} + c_{ij}, \kappa = \frac{4\pi}{\lambda r} \quad (3)$$

式中, c_{ij} 为线性形变差异相位分量。定义(复)时间相干性 Γ_{ij} 。具体计算公式如下:

$$\Gamma_{ij}(\Delta s) = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^{N-1} \exp(-j[\Delta\phi_{ij}^{(k,k+1)} - \kappa \Delta s B_{\perp}^{(k,k+1)}]) \quad (4)$$

当 $\Delta s = \Delta s_{ij}$ 时, 有 $\Gamma_{ij} = \exp(-j c_{ij})$, 其相位部分即为常数 $-c_{ij}$, 模长 $|\Gamma_{ij}|$ 为1。实际情况下, 由于存在各项误差, $|\Gamma_{ij}|$ 取值介于0和1之间, 它可作为弧段质量的指标。

通过遍历 Δs , 最大化 $|\Gamma_{ij}|$, 可获得 Δs 最优估计, 评估弧段质量, 同时避免对 Δv_{ij} 项的显式搜索, 由此将二维弧段参数搜索问题降维, 显著降低计算成本。此外, 在该连接模式下, 形变相位仅在短时间间隔上积累, 整体量级很小, 对弧段参数估计影响不大。

去除上述分量后, 本文建立温度差异与干涉相位之间的线性关系模型, 借助附近气象站记录的温度序列, 剔除与温度相关的相位分量。假设在常温范围内材料热胀冷缩效应近似线性, 且散

射体结构在观测期内基本稳定, 则任意点对之间的热胀冷缩相位差主要由材料与位置差异以及温度变化共同决定。基于这一假设, 本文对双差相位序列进行一维周期图谱搜索, 估计点对的热胀冷缩系数差, 以进一步纯化形变信号并提升解算精度。

2.3 高质量弧段密集搜索

常规时序 InSAR 方法建议使用者根据应用目标和计算资源, 调整高质量弧段搜索力度, 但由于弧段二维参数搜索计算量大, 实际情况下无法充分遍历潜在可用弧段集。针对上述问题, 基于 2.2 节给出的一维参数搜索方法, 本节给出一种不依靠高质量弧段分布先验, 尝试穷尽所有潜在弧段的密集搜索方法, 其基本思想如图 2 所示。

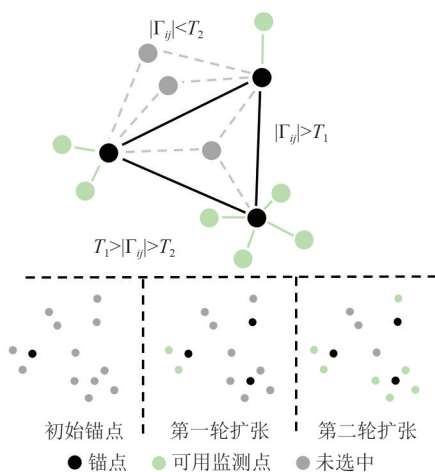


图 2 分级弧段扩张过程

Fig. 2 Tier-based arc network expansion

本方法分别针对“锚点”和“可用(监测)点”设置两类经验阈值, 经过多次迭代扩张, 穷尽所有可用监测点: 记以某类先验(如振幅离差指数)提取的初始候选点集为 $P^{(0)}$ 。首次迭代前, 从 $P^{(0)}$ 中的每个点出发, 对 $P^{(0)}$ 自身进行一次近邻搜索, 连接产生大量潜在弧段, 评估各弧段质量 $|\Gamma_{ij}|$ 后, 以各点所在的所有弧段中, 质量最高的一条弧段的时间相干性, 作为该点的可靠性指标。基于 $P^{(0)}$ 中各点的可靠性指标, 将可靠性指标大于 T_1 的点集作为锚点, 记为 $P_a^{(0)}$; 将可靠性指标大于 T_2 小于 T_1 的点集作为可用点, 记为 $P_u^{(0)}$ 。此后, 在第 m 次迭代中, 从每个像素出发, 对 $P_a^{(m-1)}$ 进行 KNN (K-Nearest Neighbors) 搜索, 生成新的潜在弧段集合, 用相同的方法更新得到 $P_a^{(m)}$ 和 $P_u^{(m)}$

(即经过 m 轮迭代后得到的所有锚点/可用点)。反复迭代, 直到 $P_u^{(m)}$ 包含的点数收敛, 记录至此为止搜索得到的所有高质量弧段及其参数, 用于后续步骤。

该过程通过迭代搜索, 逐步提高网络密度与空间覆盖, 为后续平差提供充足而稳健的观测; 同时也允许观测系统从稳定点集出发, 逐步向具有较强非线性形变的区域延伸, 扩大空间覆盖。

2.4 形变时间序列解算

为实现全局一致的高程相位校正, 需要求解统一基准下各点的高程差异 δs 。对于弧段 (i, j) , 计算公式如下:

$$\Delta s_{ij} = \delta s_i - \delta s_j \quad (5)$$

利用各弧段上定义的该类关系, 可在网络内进行整体最小二乘求解。为减少粗差影响, 采用 Huber 方法迭代定权; 在第一轮迭代前依据 $|\Gamma_{ij}|$, 通过二次映射, 得到各弧段的初始权重, 而后在迭代过程中逐步重估权重。具体计算公式如下:

$$w_{ij} = \left(\frac{|\Gamma_{ij}| - \Gamma_{\min}}{\Gamma_{\max} - \Gamma_{\min}} \right)^2 \times 99 + 1 \quad (6)$$

得到各点的 δs_i 后, 可用于校正各干涉图的高程相关相位; 此外, 在温度变化显著或材料属性敏感的区域, 也可用相似的方式抑制热胀冷缩量。最终, 校正后的干涉图相位空间频率显著降低, 可直接用于提取形变时序。

此后, 借鉴 StaMPS 频域处理思想, 认为大气延迟、轨道误差具有空间低频、时间高频的统计性质, 对干涉图序列进行后处理: 简单累加顺次连接干涉图的解缠结果, 即可粗略得到各点的形变时间序列。然后开展时空滤波, 首先通过时序高斯滤波, 提取时间低频分量, 与滤波前时序作差, 可得时间高频分量; 针对这些分量, 进行空间低通滤波, 得到时间高频—空间低频的相位场, 认为它包括了大气湍流与轨道残差。迭代进行上述处理, 得到最终时序形变结果。

3 结果与分析

3.1 研究区域

本文选取上海市浦东新区作为试验区域。浦东地势低平, 软土广布, 城市建设强度大, 具备

典型的复杂城市场景特征。试验区位于浦东运河与S1公路交叉地带，周边分布有道路、桥梁、河道及居民建筑，适合用于检验本文方法在复杂地物组合下对局部形变的探测能力。

3.2 时序SAR数据处理

本研究采用2020年1月25日至2024年12月22日的54景降轨TerraSAR-X SLC影像，以2022年11月13日采集的影像为参考影像，进行时序配准，详见图3。此后，顺次连接时间相邻的配准SLC影像，形成53个干涉对，并基于30 m哥白尼数字地形模型DEM (Digital Elevation Model) 改正地形相位，完成干涉处理。这些干涉对的时间基线基本一致，使线性形变在双差干涉相位中退化为常量，简化了周期图参数搜索；同时，垂直基线的分布区间达760 m，地形相关相位分量显著，有助于准确估计高程残差。

在密集弧段搜索环节，首先控制0.4的幅度离差阈值，获得大量传统候选PS点，在这些点上开展500 m半径的空间邻域搜索，产生大量弧段，设置锚点阈值 T_1 为0.75，获得初始候选点集 $P^{(0)}$ 。然后，设置可用点阈值 T_2 为0.60，开展后续迭代，至锚点与可用点集逐渐收敛，形成包括91万监测点、6000万弧段的密集网络。在一般城市场景下，初始点集的选取对弧段扩张结果影响不大，在研究区域的中心分块开展了对比试验。将上述空间搜索邻域分别设置为150 m和750 m，其他参数一

致时，最终得到的网络规模分别为66718点66819点，差异仅为0.1%。

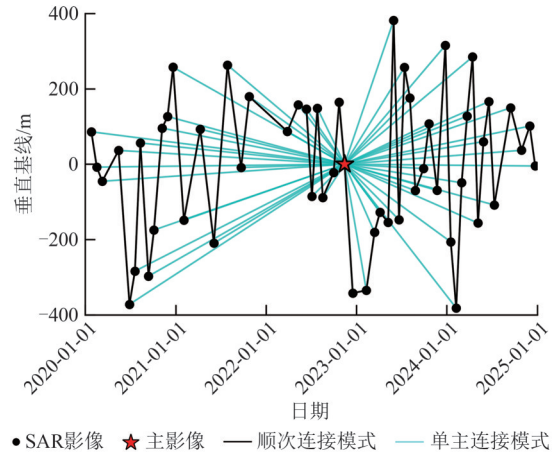


图3 干涉时空基线组合图

Fig.3 Interferometric baseline combination graph

网络构建完成后，对各弧段上的残余高程差异进行全局平差。为控制计算量，采用基于Huber函数定权的鲁棒最小二乘方法开展5轮优化，期间通过不断重估权重、剔除粗差，得到统一基准的高程残差场。从全部干涉序列中扣除高程相关分量后，结合数据采集时刻邻近气象站的温度记录，估计并剔除温度相关的双差相位分量。高程残差与热胀冷缩系数的估计结果如图4所示，由于热胀冷缩系数与膨胀材料的体积有关，因此其与高程残差场具有一定的相关性。最后采用2.4节的时空滤波方法，得到形变时间序列产品。

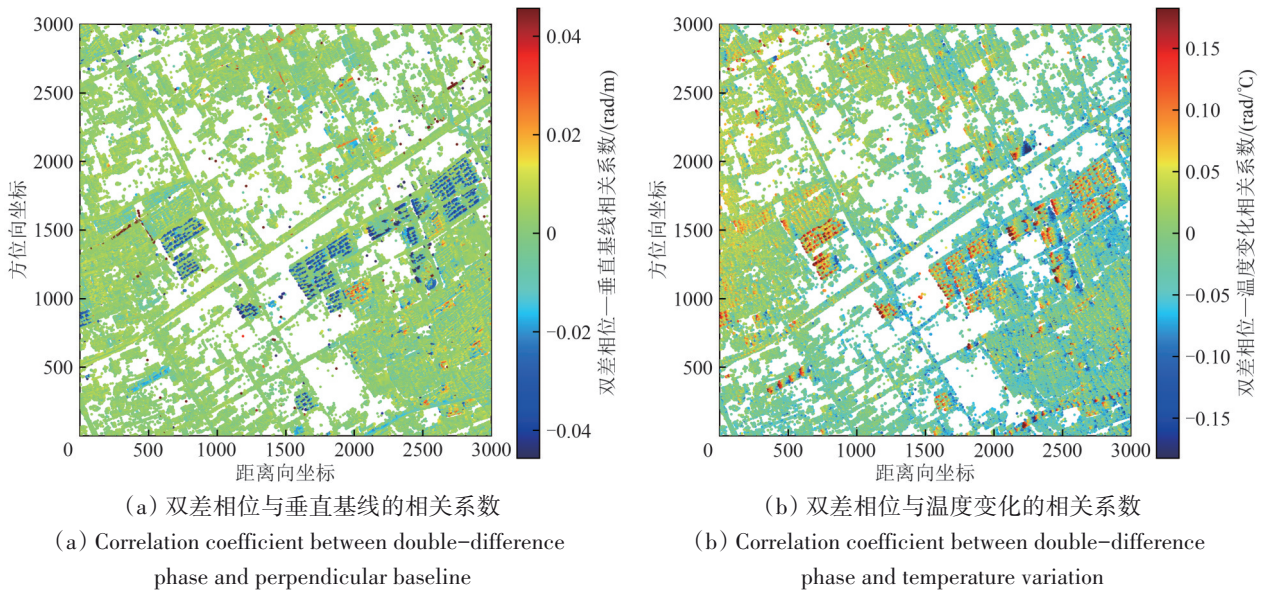


图4 基于密集弧段估计的双差相位与垂直基线及温度变化间的相关系数

Fig.4 Topographic residual and thermal expansion coefficient from dense arc expansion

3.3 形变时间序列结果

图 5 (a) 展示了本方法所得浦东运河—S1 公路交叉区域的视线向年平均形变速率分布, 并与 StaMPS 方法结果 (图 5 (b)) 进行对比, 其中, A—D 处的形变模式具有一定代表性。研究区整体

保持相对稳定, 形变速率集中在 $-10\sim-10\text{ mm/a}$, 但仍可见若干局部沉降区域。中部长条状连续高相干区域为 S1 公路, 它自西向东横贯研究区, 将其划分为南北两部分, 并在中心偏西处与凌空路交汇 (大致走向可由 A、C、D 连线表示)。

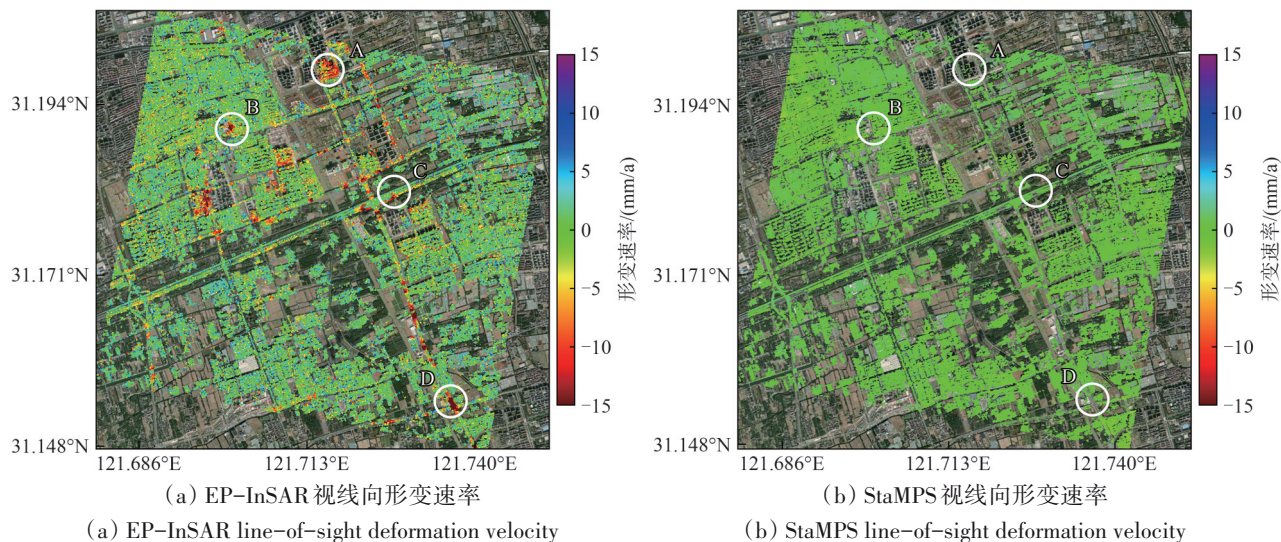
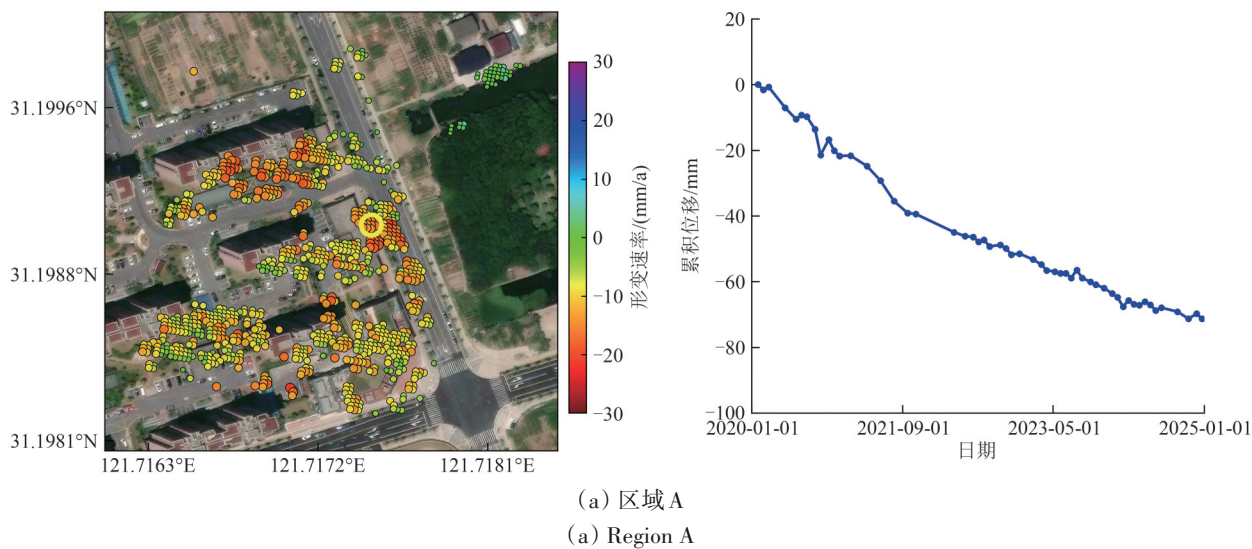


图 5 浦东运河—S1 公路交叉区视线向年平均形变速率结果对比
Fig.5 Comparison of yearly LOS deformation rate over the Pudong Canal-S1 corridor

StaMPS 处理过程中, 初始空间滤波网格 (filter_grid_size) 大小设置为 100 m, 邻域差分弧段时序标准差阈值 (weed_standard_dev) 为 1.0 弧度, 选点过程的时间滤波尺度 (weed_time_win) 为 730 天, 保留 70 万监测点。在时空滤波过程中, 以 60 天的频率下限 (scn_time_win) 提取时间高频信号, 从中以 750 m 的频率上限 (scn_wavelength) 提取局部噪声, 从而保留局部形变信号。在空间分布方面, 相较于本方法, StaMPS 在本文方法提

取的关键局部形变区域, 基本无监测点覆盖; 这可能与 StaMPS 对局部高程残差的分布模式假设过强, 不适用于复杂城市场景, 导致选点过程严重低估监测点质量有关。在最终形变结果方面, StaMPS 的整体年平均形变速率显著偏小, 仅在个别位置存在 5 mm/a 以内的小量级未知信号。

在本算法所得结果中, A、B、C、D 区域的时序形变模式具有代表性, 其地物分布与沉降模式如图 6 所示。主要结果如下:



(a) 区域 A
(a) Region A

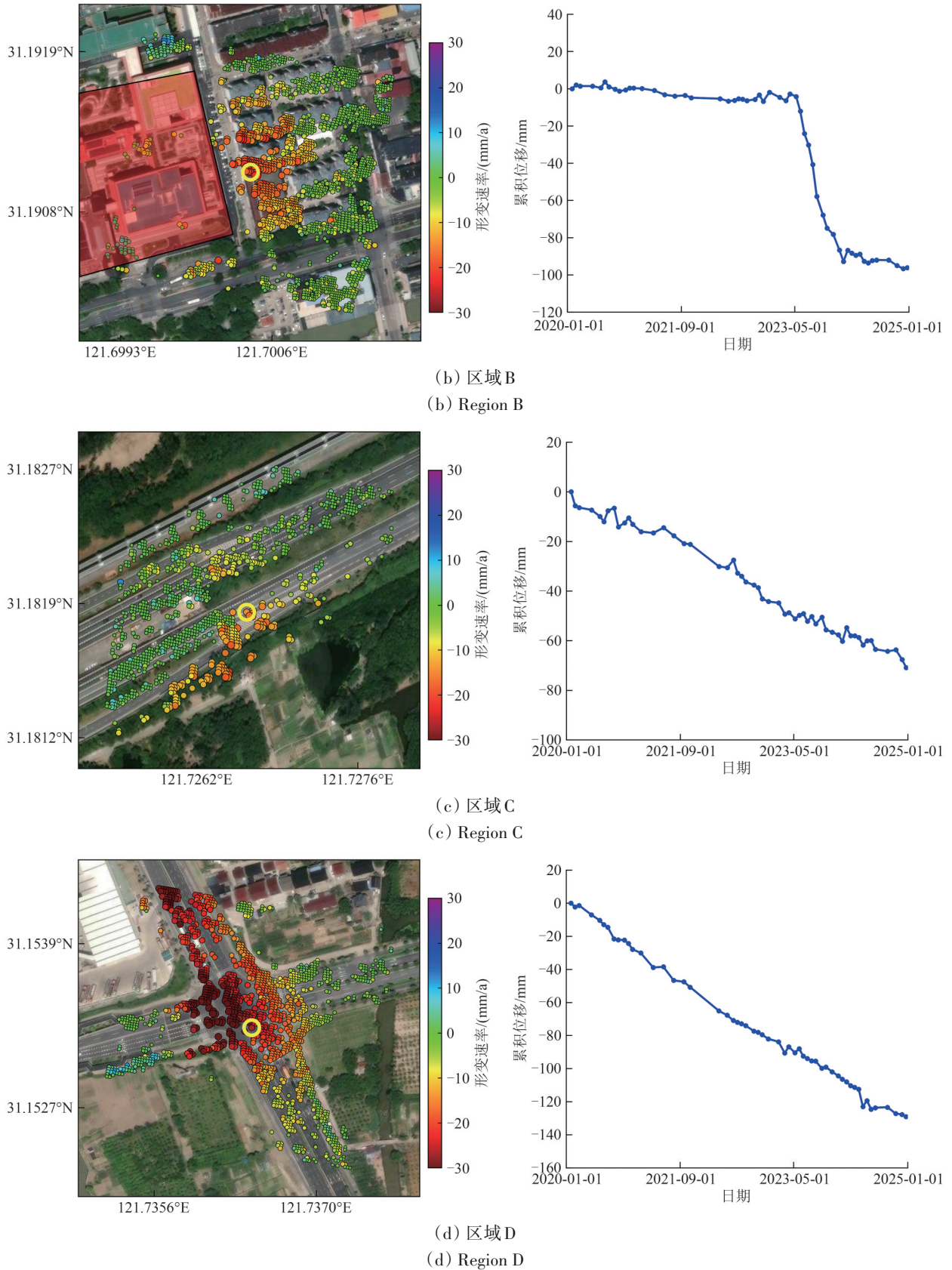


图6 典型区域A—D的形变速率与代表点时间序列(各行右侧子图为左侧子图中黄色圆圈圈出点的多期形变曲线)
Fig.6 Time series and satellite overviews over sites A—D (The subplots on the right show the multi-temporal deformation curves of the points highlighted by the yellow circles in the subplots on the left)

A 区在 2020 年—2021 年完成住宅小区建设, 快速形变趋势得到减缓, 但至今仍持续发生沉降, 总量约 100 mm, 推测与竣工初期地基及场地回填的固结过程有关(图 6(a))。图 7 展示了 A 处基于高程残差的精地理编码结果。其中图 7(a) 显示沿垂直方向分布的监测点群; 图 7(b) 为平面投影结果。可见来自同一幢建筑的监测点在水平面上呈紧密聚集分布, 构成建筑的平面轮廓。本文

方法并不要求散射体在整个观测期间持续稳定, 只需其相位中心位置在若干米范围内保持基本一致, 并且仅发生有限次数的散射模式突变。由于此条件可由多数城市建筑在竣工后满足, 因此尽管该建筑群在至迟 2021 年中定型, 密集弧段参数估计过程仍具有较高的稳健性, 能够有效抑制空间高频相位并实现可靠的高程残差解算。

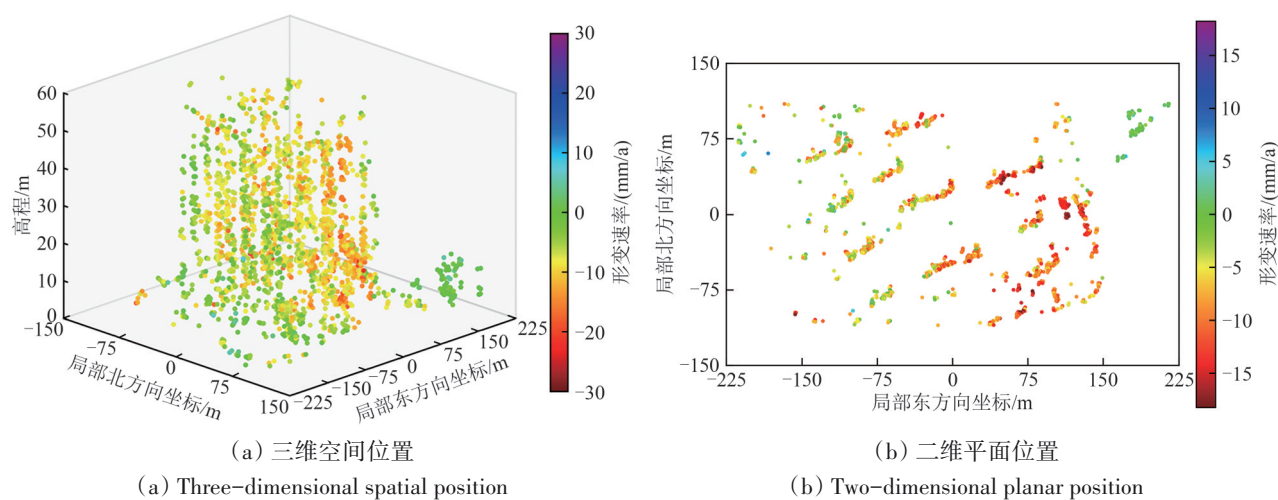


图 7 A 区监测点定位结果

Fig.7 Positioning results of monitoring points in Area A

B 区的主体建筑在观测期内无明显变化, 但其西侧地块在 2023 年—2024 年经历了拆除与重建, 扰动 B 处建筑的地基条件, 使其于半年内发生 90 mm 左右的快速局部沉降, 如图 8 所示。C 区位于公路一侧, 历史资料显示该路段曾在 2016 年—2017 年

扩建(沉降监测开始之前), 并在检测期间持续沉降, 或与路基的长期固结有关。D 区位于道路平交节点, 于 2019 年末通车(沉降监测开始之前), 该处曲线显示持续快速沉降, 可能与交通荷载、地下管线等因素的共同作用有关。

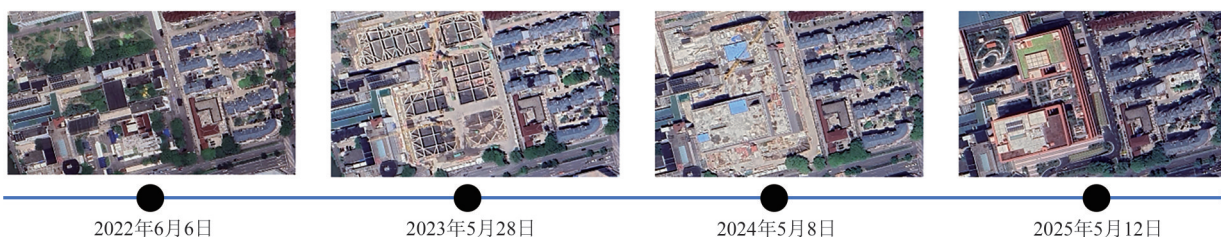


图 8 B 处 2022 年 6 月 6 日—2025 年 5 月 12 日的历史卫星影像

Fig.8 Historical satellite imagery of Site B from June 6, 2022 to May 12, 2025

总体来看, A—D 共 4 处形变特征与历史影像所揭示的建设与使用过程在时间上具有一定对应性, 说明本文方法在识别局部建设活动引发的细微地表变形方面具有表现较好。但这些解释仍停留在可能层面, 具体成因尚需结合现场工程与地质资料进一步验证。

图 9 展示了传统幅度先验与本文方法在点选结

果上的差异: 其中红色为高时序相干性的监测点, 绿色为通过振幅离差指标筛选的候选点。由于红点先绘、绿点后绘, 因此图中仍可见的红色像元即为被传统方法舍弃、但实际相干性很高的部分。一般 PS-InSAR 方法常采用 0.4 作为振幅离差指数阈值, 然而, 即使将该阈值放宽至 0.7, 仍有约 4% 的高时序相干性点被舍弃, 且在个别位置成片分

布,如图9红圈所示。经查询历史卫星影像,左侧低矮居民区于2023年后半年后被拆除;而右侧高层建筑在2020年初完成结构施工,2021年间完成

外部装饰。上述现象说明,本方法通过改变基线连接方式,能够系统性地扩大覆盖范围,但需对探测到的形变信号进行更细致的解译。

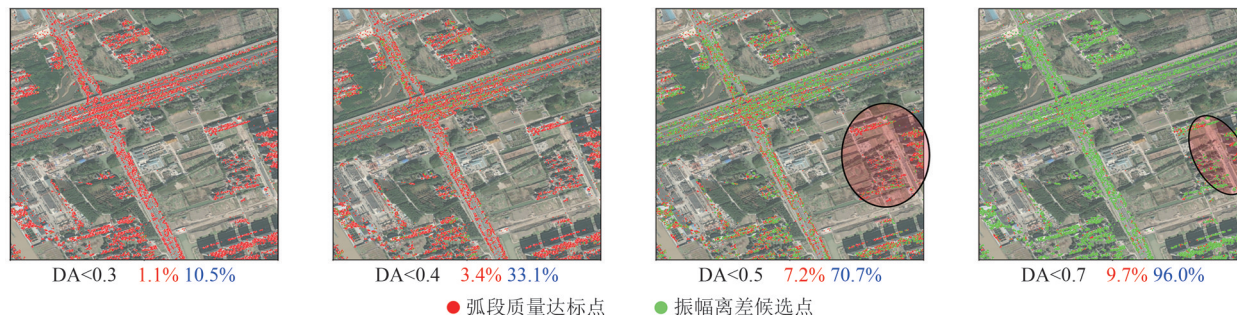


图9 振幅离差先验及时序相干性后验监测点选择策略对比(各子图左下角为选取振幅离差候选点时采用的阈值,红色数字为振幅离差候选点整体占比,蓝色数字为弧段质量达标点中满足振幅离差比例)

Fig.9 Point-selection comparison (Red: high temporal-coherence points; green: DA-passed candidates) (The lower-left corner of each subplot indicates the threshold used to select amplitude dispersion candidate points. The red number denotes the overall proportion of amplitude dispersion candidate points, while the blue number denotes the proportion of arc quality-qualified points that also satisfy the amplitude dispersion criterion)

4 讨论

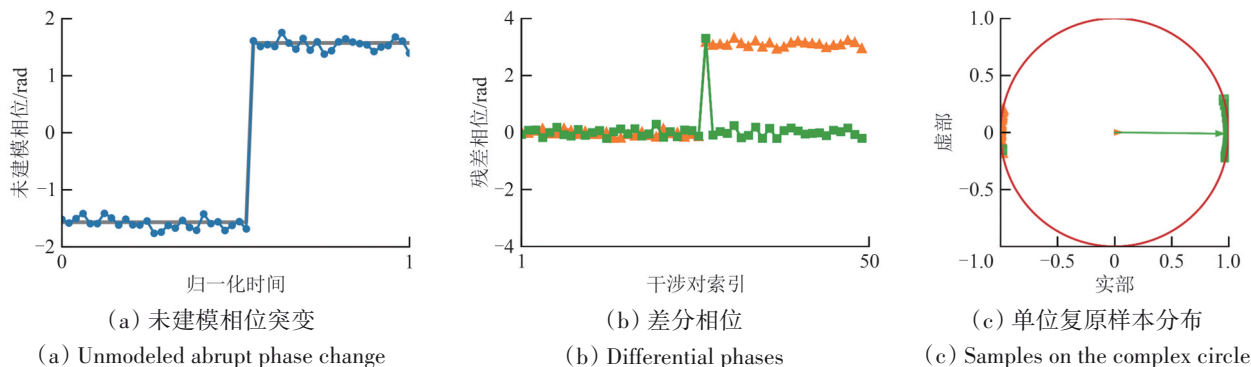
4.1 顺次基线连接的物理意义

本文使用的顺次基线连接策略,除了能够降低弧段参数估计维数,在城市场景下,还具有一定的物理意义。在传统的单主连接基线模式中,通常假设各SLC中的相位噪声分量服从高斯分布,此时干涉相位中的随机分量应围绕零均值在一定标准差范围内波动;经干涉后,对应式(1)中的 $\varepsilon_{ij}^{(k)}$ 项。然而,在实际应用中,它包括所有的未建模相位分量。其中存在两类典型的未建模模式:地物复散射率突变和非线性地表形变,此时未建模相位分量的统计分布长期“漂移”,显著降低了时间相干性。

顺次基线连接方法则放宽了这一假设,允许未建模相位发生突变,或包含非线性形变信号。发生相位突变的干涉对具有较大的理想相位模型

拟合残差,而非线性形变信号将使大量干涉对具有较小的模型拟合残差,两种情况导致的时间相干性损失均相对有限。由此,顺次连接在面对复杂散射环境时表现出更高的适应性和鲁棒性。这些特性在仿真试验中亦得以体现,如图10所示,当存在突发相位跳变或缓慢漂移时,顺次连接的残差主要局限在局部,对应复平面点云高度集中,时序相干性显著优于单主模式,在复杂散射环境下具有更强的稳健性。

这种“放宽”在城市形变监测中具有实际意义。例如,在长时序观测中,由于人为因素,建筑的部分楼面构造产生变化,体现为SLC中复散射相位的突变。此时若散射中心在改变前后高程基本不变,则除包含了突变时刻的特定干涉相位外,剩余相位序列仍能有效反映该建筑的整体形变情况。由此,顺次基线连接模式成功将该点保留在监测网络中。



(a) Unmodeled abrupt phase change

(b) Differential phases

(c) Samples on the complex circle

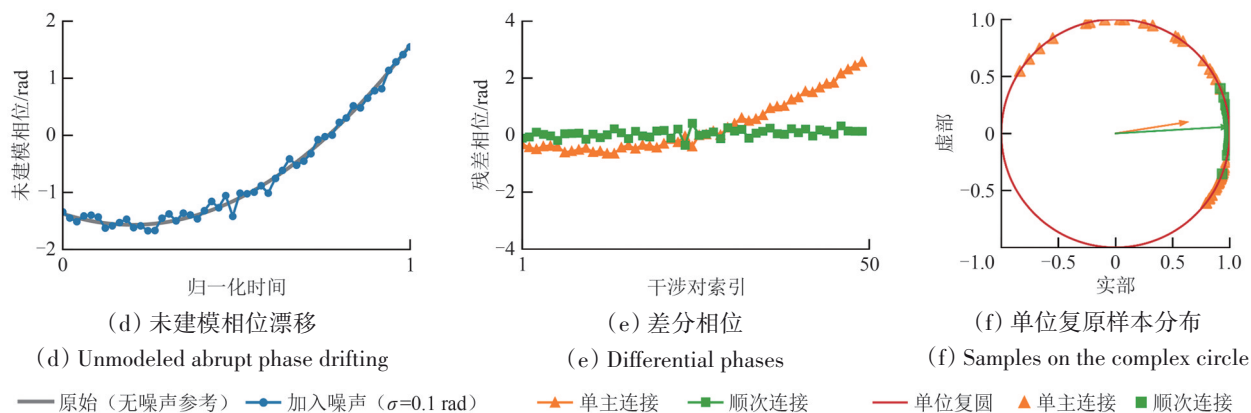


图10 未建模时序相位变化与基线组合策略对时间相干性估计的影响(在相位突变模拟情境下,加入标准差为0.1的相位噪声后,单主连接估计得到的时序相干性仅为0.08,顺次链接得到的时间相干性为0.94;在相位漂移模拟情景下,单主连接估计得到的时序相干性为0.62,顺次链接得到的时间相干性为0.99)

Fig.10 Impact of unmodeled temporal phase variations and baseline combination strategy on temporal coherence estimation (The two rows illustrate, respectively, the unmodeled phases under two different patterns ((a), (d)), the differential phases extracted using different baseline combination strategies ((b), (e)), and the resulting impacts on temporal coherence estimation ((c), (f)). Under the simulated phase-jump scenario, after phase noise with a standard deviation of 0.1 was added, the temporal coherence estimated using the single-master linking strategy was only 0.08, whereas that estimated using the sequential linking strategy reached 0.94. Under the simulated phase-drift scenario, the temporal coherence estimated using the single-master linking strategy was 0.62, while that estimated using the sequential linking strategy was 0.99)

图 11 对比了实测案例中两种连接方式的弧段参数解算情况。由图 11 (a) 可见两者解算的高程残差总体一致;由图 11 (b) 可见仍分布着一定数量的样本, 对应在顺次基线连接下具有较高的时间相干性, 但在单主基线连接模式下严重失相干的弧段, 这些位置可能存在显著的非线性形变或相位跳变。而在其对称位置则不存在该现象, 说

明在单主连接模式下具有较高相干性的弧段, 在顺次连接模式下仍具有一定的相干性。同时, 样本并非集中分布于对角线, 这是因为单主连接模式下, 主影像的噪声相位存在于所有干涉对中, 构成时间相干性的相位部分, 降低了各干涉对的噪声波动幅度, 该效应在一般的信噪比要求下不会显著增大顺次基线连接的参数估计标准差。

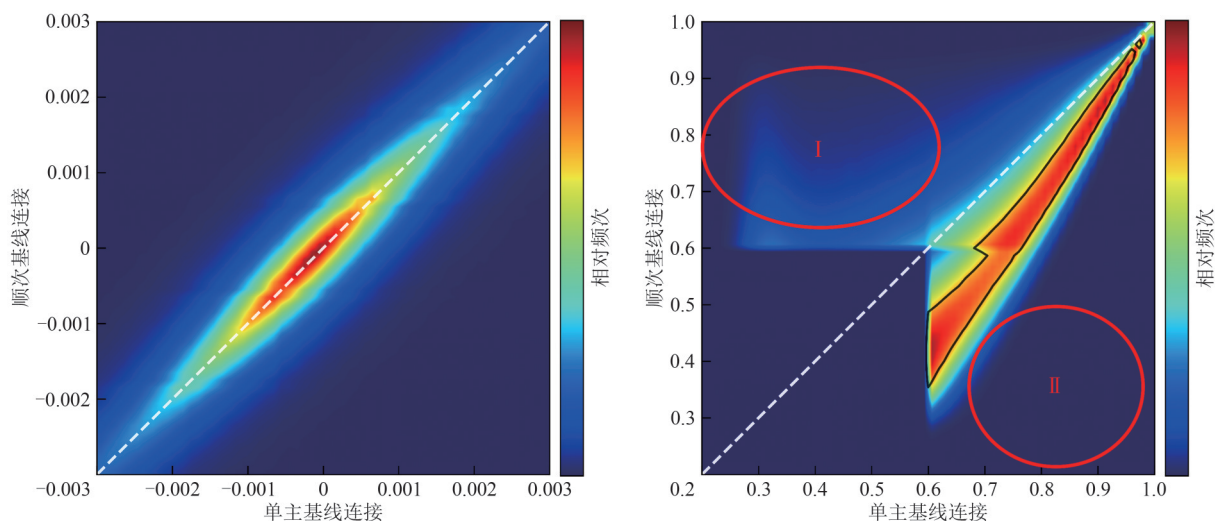


Fig.11 Comparison of arc-segment parameter estimation: sequential with single-master linkage

在影像分辨率逐渐提高, 单个像素对应的散射结构逐渐细化的领域整体发展过程中, 放宽单

主基线连接模式隐含的物理约束, 使模型更为贴合实际情况, 具有一定现实意义。

4.2 算法计算效率分析

本文提出的处理流程包含多个步骤,其中配准、地形相位改正、干涉图生成等操作耗时较短,对整体效率影响有限。实际计算中,主要耗时集中于3个环节:候选点的KNN搜索、弧段参数解算和基于弧段高程差异的全局最小二乘平差。下面分析这3个环节的计算效率。实验在双路AMD Ryzen 9474F平台上完成,具有96个CPU计算核心,工作站配备1TB内存;所有实验代码采用Python编写,调用NumPy、SciPy等数值计算库避免严重损失效率。

在迭代网络扩张过程中,KNN搜索与弧段解算交替进行。KNN搜索部分实现了完全并行化,同时在多轮迭代中,对候选PS点对进行一维编码和记录,避免重复解算弧段。该策略保证经过若干轮迭代后,其余轮次中待处理的弧段数量骤降,有效减轻了解算压力。弧段解算部分同样实现了并行优化。同时,通过对周期图谱峰值附近进行二次函数拟合,允许以向量的方式批量处理,显著提升了解算效率。在影像序列数量为50景左右时,单线程每秒可完成约一万条弧段的解算任务,性能能够满足密集搜索的计算需求。然而,全局平差阶段的计算复杂度随像元数量和连接边数快速增长,可能降低整体效率。为降低负担,在进入最终平差前,仅保留连接每个像素质量最优的少量弧段,压缩问题规模。同时,将整景影像划分为固定大小的子块,分别进行求解,进一步控制了计算耗时。

为定量评估方法的扩展性,本文对主要计算步骤进行复杂度分析。设时间期数为 N ,监测点数量为 P ,一维周期图谱的网格粒度为 G ,每点连边数上限为 k ,则弧段总数近似为 $E \approx kP$ 。在网络扩张过程中,KNN搜索采用KD树结构构建索引,单轮复杂度为 $O(P \log P + kP)$ 。由于每轮搜索针对当前点集重建索引,无法跨轮次复用。弧段参数解算采用固定分辨率的一维周期图谱搜索与局部二分细化,复杂度为 $O(GNE)$,或 $O(G \cdot N \cdot kP)$ 。全局平差阶段需解稀疏最小二乘系统,变量规模为 P ,非零元素数量约为 E 。本文采用共轭梯度法(CG),每轮迭代代价为 $O(E + P)$,总复杂度为 $O(K_{cg} \cdot (E + P))$,其中 K_{cg} 为迭代次数,依赖系统结构与误差容限,实际可能较大。综上,EP-

InSAR在连边规模受控、结构稀疏的前提下,主计算量随点数线性增长,具备良好的理论扩展性,适用于百万级监测点的高密度场景。

实际数据处理中,以TSX数据为例,在前述硬件配置下,对于 3000×3000 影像块,整个时序处理流程耗时约1h,其中KNN搜索、弧段解算与平差所占时间比例约为1:10:1,已具备较高的并行效率。后续研究中可考虑从算法设计与程序实现两方面综合优化,提升整体运行效率和处理规模的可扩展性。

5 结论

本文针对传统PSP等方法在实际应用中存在的弧段参数估计计算复杂度高、搜索空间受限、网络覆盖不足等问题,提出了一种面向城市场景的密集弧段连接时序InSAR方法(EP-InSAR)。EP-InSAR方法核心在于通过简化二维参数估计问题,在常规计算条件下,实现高质量弧段的近似穷举,从而显著降低对监测点相位质量先验的依赖。上海典型城市场景试验结果表明,在散射性质和形变模式变化时,所提方法仍能保持较高的时间相干性,捕捉局部形变信号。

在计算实现方面,多数步骤已实现并行优化,能够充分利用高性能计算平台性能,但在程序实现方面可进一步优化,提高解算规模与效率。在算法设计方面,相干性阈值设定与周期图谱网格密度仍依赖经验,顺次基线连接具有一定的物理意义。

综上所述,本文提出的方法在提升城市场景InSAR监测的覆盖程度与解算稳定性的同时,兼顾了效率与可实现性,为后续大范围InSAR城市形变提取提供了具有推广价值的技术路径。

志 谢 本文所使用的哥白尼DEM由欧洲航天局通过Copernicus开放获取平台提供。

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]
- Costantini M, Falco S, Malvarosa F, Minati F, Trillo F and Vecchioli F. 2014. Persistent scatterer pair interferometry: approach and appli-

- cation 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]
- Crosetto M, Monserrat O, Cuevas-González M, Devanthery N and Crippa B. 2016. Persistent scatterer interferometry: a review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115: 78-89 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011]
- De Jonge P and Tiberius C. 1996. The LAMBDA method for integer ambiguity estimation: implementation aspects. No. 12. Publications of the Delft Geodetic Computing Centre, LGR-Series: 1-47.
- 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, 彭轲, 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]
- Guo S K, Dong J, Zhang L and Liao M S. 2023. Web-based visualization and interpretation platform for massive InSAR point clouds. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(7): 1744-1753 (郭绍琨, 董杰, 张路, 廖明生). 2023. 海量 InSAR 点云在线可视化与解译平台. *遥感学报*, 27(7): 1744-1753 [DOI: 10.11834/jrs.20232131]
- Hooper A, Bekaert D, Spaans K and Ankan M. 2012. Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*, 514-517: 1-13 [DOI: 10.1016/j.tecto.2011.10.013]
- Hooper A, Segall P and Zebker H. 2007. Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B7): B07407 [DOI: 10.1029/2006JB004763]
- 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 L M, Liao M S, Lin H, Yang L M and Wang C C. 2008. Estimating urban impervious surface percentage with ERS-1/2 InSAR data. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 12(1): 176-185 (江利明, 廖明生, 林琚, 杨立民, 汪长城). 2008. 利用雷达干涉数据进行城市不透水层百分比估算. *遥感学报*, 12(1): 176-185 [DOI: 10.11834/jrs.20080123]
- Liao M S, Wang R, Yang M S, Wang N, Qin X Q and Yang T L. 2020. Techniques and applications of spaceborne time-series InSAR in urban dynamic monitoring. *Journal of Radars*, 9(3): 409-424 (廖明生, 王茹, 杨梦诗, 王楠, 秦晓琼, 杨天亮). 2020. 城市目标动态监测中的时序 InSAR 分析方法及应用. *雷达学报*, 9(3): 409-424 [DOI: 10.12000/JR20022]
- Liao M S, Dong J, Li M H, Ao M, Zhang L and Shi X G. 2021. Radar remote sensing for potential landslides detection and deformation monitoring. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(1): 332-341 (廖明生, 董杰, 李梦华, 敖萌, 张路, 史绪国). 2021. 雷达遥感滑坡隐患识别与形变监测. *遥感学报*, 25(1): 332-341 [DOI: 10.11834/jrs.20210162]
- Liu L M, Gong H L, Yu J, Li X J and Ke Y H. 2016. Stable pointwise target detection method and small baseline subset INSAR used in Beijing subsidence monitoring. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 20(4): 643-652 (刘利敏, 宫辉力, 余洁, 李小娟, 柯樱海). 2016. 短基线 INSAR 相干点探测及应用. *遥感学报*, 20(4): 643-652 [DOI: 10.11834/jrs.20165134]
- Ma P F, Zheng Y, Zhang Z J, Wu Z R and Yu C. 2022. Building risk monitoring and prediction using integrated multi-temporal InSAR and numerical modeling techniques. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 114: 103076 [DOI: 10.1016/j.jag.2022.103076]
- Moreira A, Prats-Iraola P, Younis M, Krieger G, Hajnsek I and Pathanassiou K P. 2013. A tutorial on synthetic aperture radar. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 1(1): 6-43 [DOI: 10.1109/MGRS.2013.2248301]
- Perissin D and Ferretti A. 2007. Urban-target recognition by means of repeated spaceborne SAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(12): 4043-4058 [DOI: 10.1109/TGRS.2007.906092]
- Perissin D and Wang T. 2011. Time-series InSAR applications over urban areas in China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 4(1): 92-100 [DOI: 10.1109/JSTARS.2010.2046883]
- Soergel U. 2010. Review of radar remote sensing on urban areas//Soergel U, ed. *Radar Remote Sensing of Urban Areas*. Dordrecht: Springer: 1-47 [DOI: 10.1007/978-90-481-3751-0_1]
- Wang C S, Chang L, Wang X S, Zhang B C and Stein A. 2024a. Interferometric synthetic aperture radar statistical inference in deformation measurement and geophysical inversion: a review. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 12(1): 8-35 [DOI: 10.1109/MGRS.2023.3344159]
- Wang Y N, Luo J Y, Dong J, Mallorqui J J, Liao M S, Zhang L and Gong J Y. 2024b. Sequential polarimetric phase optimization algorithm for dynamic deformation monitoring of landslides. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 218: 84-100 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2024.08.013]
- Wu S B, Zhang B C, Ding X L, Zhang L, Zhang Z J and Zhang Z Y. 2023. Radar interferometry for urban infrastructure stability monitoring: from techniques to applications. *Sustainability*, 15(19): 14654 [DOI: 10.3390/su151914654]

EP-InSAR: Exhaustive pair linking strategy for urban ground deformation mapping

GUO Shaokun¹, DONG Jie², WANG Ru¹, LIAO Mingsheng¹

1. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Monitoring urban ground and infrastructure deformation is essential for the safe operation of cities. Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) has become a key technology for this purpose. However, in complex urban environments, conventional persistent scatterer InSAR heavily relies on prior constraints, and advanced variants are often limited by high computational demands. These limitations lead to insufficient arc coverage and reduced robustness in time series analysis, especially when deformation is localized and nonlinear.

To address these challenges, we propose exhaustive pairs InSAR (EP-InSAR), a time series InSAR method that is based on dense arc linking. By sequentially connecting baseline pairs, the linear deformation term is embedded into the phase component of the temporal coherence to reduce the dimensionality of arc parameter estimation. A dual-threshold iterative network expansion strategy is introduced to identify high-quality point pairs in an approximately exhaustive manner, mitigating the reliance on amplitude-based priors. In the implementation, conventional InSAR preprocessing is followed by sequential interferogram formation, 1D spectral search for arc parameters, and robust global least-squares adjustment of height residuals and thermal dilation coefficients. Deformation time series are retrieved from a rectified low-frequency interferogram stack, and elevation and thermal components are removed.

Experiments using TerraSAR-X data over Shanghai demonstrate that EP-InSAR increases point coverage, improves arc network connectivity, and reduces global adjustment errors. In a 3000×3000 pixel processing window, the method extracts ~910,000 measurement points connected by ~60,000,000 high-quality arcs, providing substantial redundancy for parameter estimation. Among all the accepted points, 29.3% have an amplitude dispersion index larger than 0.6, indicating that many structurally reliable scatterers are discarded under amplitude-based screening alone. The estimated height residual and thermal dilation fields form coherent spatial patterns that match building footprints and material distributions, and the derived time series reveal localized nonlinear deformation that is consistent with construction histories visible in optical satellite imagery.

The EP-InSAR workflow is parallelized and optimized for large-scale processing, showing strong potential for applications in urban structural health monitoring. EP-InSAR provides a practical strategy to approximate exhaustive arc exploration without a prohibitive computational cost, relaxes the dependence on strict amplitude-based screening, and increases sensitivity to local nonlinear deformation under complex scattering conditions. These properties indicate that EP-InSAR can support future large-area urban deformation surveys and routine monitoring of critical infrastructure and building stability.

Key words: urban deformation monitoring, Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR), Exhaustive Pairs InSAR (EP-InSAR), arc network expansion, local nonlinear deformation, persistent scatterer

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42374013, 42504033)