引文格式：苏磊,裴媛媛,林鹏. 基于序贯 InSAR 技术的建筑物形变监测方法[J]. 地理空间信息, 2025, 23(7): 21-26. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.07.005

基于序贯 InSAR 技术的建筑物形变监测方法

苏　磊[1]，裴媛媛[1*]，林　鹏[1]
（1. 安徽建筑大学 土木工程学院，安徽 合肥 230601）

摘　要：为满足城市建筑物持续且准确的监测需求，结合序贯平差与多时相合成孔径雷达干涉（MT-InSAR）测量技术，提出了一种快速可靠的建筑物形变监测方法，通过二次自适应滤波，降低了噪声对干涉像对的影响。通过MT-InSAR技术获取已有影像的形变量，更新数据后则利用序贯平差进行整体解算，提高了计算效率。利用2022-11-01—2024-07-11阜阳地区50景Sentinel-1数据开展序贯InSAR与传统MT-InSAR的对比研究。结果表明，两种方法的地表形变监测结果基本一致，形变速率和累积形变量的均方根误差均在亚毫米级；序贯InSAR方法耗时较传统方法缩短了51.891 9%。利用序贯InSAR方法持续监测城市建筑物的形变，有利于城市安全风险评估。

关键词：MT-InSAR；序贯平差；建筑物监测；形变监测
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）07-0021-06

Building Deformation Monitoring Method Based on Sequential InSAR Technology

SU Lei[1], PEI Yuanyuan[1], LIN Peng[1]
(1. College of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: To meet the demands for continuous and accurate monitoring of urban buildings, we proposed a rapid and reliable building deformation monitoring method by integrating sequential adjustment with multi-temporal interferometric synthetic aperture radar (MT-InSAR) technology, which employed a two-stage adaptive filtering to mitigate the impact of noise on interferometric image pairs. We used MT-InSAR to obtain the deformation parameters of existing images, and used sequential adjustment for the overall solution, significantly enhancing computational efficiency. We used 50 Sentinel-1 images acquired over Fuyang from November 1, 2022, to July 11, 2024, to compare sequential InSAR with traditional MT-InSAR techniques. Results demonstrate that both methods yield consistent surface deformation monitoring outcomes, with root mean square errors of deformation speeds and cumulative displacements within the sub-millimeter range. Moreover, the sequential InSAR method reduces computational time by 51.891 9% compared to the traditional approach. Continuous monitoring of urban building deformation by sequential InSAR method is conducive to the urban safety risk evaluation.

Key words: MT-InSAR, sequential adjustment, building monitoring, deformation monitoring

多时相合成孔径雷达干涉（MT-InSAR）技术凭借毫米级的监测精度、公里级的覆盖范围和长时序跨度被广泛应用于地表形变监测领域[1-3]。近年来，MT-InSAR技术因其独特优势而被大量应用于建筑物结构健康监测领域[4-6]，可实现高精度的形变监测。MT-InSAR技术是基于已有SAR影像的时间序列形变分析技术[7]。为持续监测城市建筑形变，必需定期更新形变监测结果；而当引入新影像时，传统MT-InSAR方法必须重新启动整个计算流程，以获取新时间序列更新的形变信息。随着数据量的累积，计算复杂度和时间消耗将显著增加。因此，解决形变信息更新的及时性问题已成为采用MT-InSAR技术对城市建筑进行快速、连续形变监测的关键。为解决该问题，部分学者[8-11]将大地测量中的序贯平差方法引入MT-InSAR中，用以提高形变解算效率。然而，序贯估计时的大气延迟和相位模糊误差将严重影响形变反演结果的可靠性，且误差会随着循环的进行不断累加到新的结果中[12]；同时噪声影响也不容忽视[13]。为保证获取建筑物形变结果的准确性与及时性，本文提出了一种基于序贯InSAR技术的建筑物形变快速监测方法。在解算前对已有差分干涉图进行两次逐渐减少窗口与步长的自适应滤波，并以相邻两点间相位差为观

项目来源：国家自然科学基金资助项目（42274028）；安徽省科研编制计划资助项目（2022AH050259）；安徽建筑大学科研计划资助项目（JZ202237）。
第一作者简介：苏磊（2000—），在读硕士研究生，研究方向为结合序贯InSAR的建筑物监测方法，E-mail：sulei6562@stu.ahjzu.edu.cn。
通信作者：裴媛媛（1983—），博士，讲师，研究方向为雷达遥感，E-mail：peiyuanyuan@ahjzu.edu.cn。

测值进行解算[14]。本文方法既可保留传统MT-InSAR方法的高精度，又可确保建筑物上的高相干性，在避免误差累积的前提下利用序贯平差提高形变解算效率；旨在快速有效地监测城市建筑形变，从而加强对城市安全的监控。

1 解算原理

基于序贯InSAR的建筑物形变监测方法流程见图1。在形变解算前，为了更好地克服噪声对结果的影响，采用窗口与步长逐步减小的两级自适应滤波对差分干涉图进行相位修正与相干性恢复。自适应滤波的原理为：

$$Z'(u,v)=S\{|Z(u,v)|\}^{\alpha}\times Z(u,v) \tag{1}$$

式中，u、v 为频率变量；$Z(u,v)$ 为设计区域干涉图频谱；$S\{\ \}$ 为平滑算子；α 为滤波参数；$Z'(u,v)$ 为滤波后干涉图频谱。

对 $Z'(u,v)$ 进行逆傅里叶变换可得滤波后结果。将二次滤波后的干涉图代入序贯InSAR解算流程，首先估计形变速率和DEM误差，再估计时间序列形变。

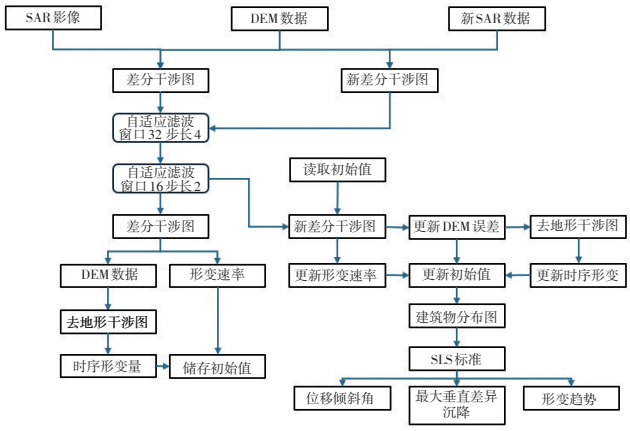


图1 算法流程图

1.1 形变速率和DEM误差估计

根据MT-InSAR原理，估算形变速率和DEM误差的函数模型为：

$$\begin{bmatrix}\phi_1^{q,p}\\ \vdots\\ \phi_M^{q,p}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\Delta t_1 & \dfrac{-4\pi B_{\perp,1}}{\lambda R\sin\theta}\\ \vdots & \vdots\\ \Delta t_M & \dfrac{-4\pi B_{\perp,M}}{\lambda R\sin\theta}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v^{q,p}\\ \Delta h^{q,p}\end{bmatrix}+W \tag{2}$$

式中，$\phi_k^{q,p}$、$v_k^{q,p}$ 和 $\Delta h^{q,p}$ 分别为差分干涉图 k（$k=1,\cdots,M$）上相邻两点 q 和 p 之间的相位差、速率差和DEM误差；λ、R 和 θ 分别为雷达波长、传感器到目标的距离和入射角；$B_{\perp,k}$、Δt_k 分别为干涉图 k 的垂直基线和时间基线；W 为误差项。

根据加权最小二乘法（WLS）可得出参数矩阵 $\boldsymbol{x}_{\text{topo}}$ 及其协方差矩阵 $\boldsymbol{Q}_x$，即

$$\boldsymbol{x}_{\text{topo}}=\left(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{A}\right)^{-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{L} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{Q}_x=\left(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{A}\right)^{-1} \tag{4}$$

式中，$\boldsymbol{L}=\begin{bmatrix}\phi_1^{q,p} & \cdots & \phi_M^{q,p}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$ 为观测值矩阵；$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}\Delta t_i & \dfrac{-4\pi B_{\perp,i}}{\lambda R\sin\theta}\end{bmatrix},i=1,\cdots,M$ 为设计矩阵；$\boldsymbol{P}$ 为权矩阵。

添加新的SAR影像并形成新的干涉图时，通过序贯平差来更新参数。其观测方程可改写为：

$$\boldsymbol{L}'=\boldsymbol{A}'\boldsymbol{x}'_{\text{topo}}+\boldsymbol{W}' \tag{5}$$

新影像的权重矩阵 $\boldsymbol{P}'$ 可通过相干性计算得到。序贯平差过程为：

$$\begin{cases}\boldsymbol{X}_{\text{topo}}=\left[\boldsymbol{Q}_x^{-1}+\left(\boldsymbol{A}'\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}'\boldsymbol{A}'\right]^{-1}\left[\boldsymbol{Q}_x^{-1}\boldsymbol{x}_{\text{topo}}+\left(\boldsymbol{A}'\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}'\boldsymbol{L}'\right]\\ \boldsymbol{Q}_{\boldsymbol{X}_{\text{topo}}}=\left[\boldsymbol{Q}_x^{-1}+\left(\boldsymbol{A}'\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}'\boldsymbol{A}'\right]^{-1}\end{cases} \tag{6}$$

式中，$\boldsymbol{x}_{\text{topo}}$、$\boldsymbol{X}_{\text{topo}}$ 分别为初始结果和更新结果；$\boldsymbol{Q}_{\boldsymbol{X}_{\text{topo}}}$ 为更新后的协因数矩阵。

在实际计算中，为提高计算效率，利用矩阵反演理论将 $\left[\boldsymbol{Q}_x^{-1}+\left(\boldsymbol{A}'\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}'\boldsymbol{A}'\right]$ 的求逆过程简化，即

$$\left(U_1\pm\boldsymbol{R}^{\mathrm{T}}U_2\boldsymbol{R}\right)^{-1}=U_1^{-1}\mp U_1^{-1}\boldsymbol{R}^{\mathrm{T}}\left(U_2^{-1}\pm\boldsymbol{R}^{\mathrm{T}}U_1^{-1}\boldsymbol{R}\right)^{-1}\boldsymbol{R}^{\mathrm{T}}U_1^{-1} \tag{7}$$

将式（6）重写为式（8），并记 $\boldsymbol{Q}_J=\left(\boldsymbol{P}'\right)^{-1}+\boldsymbol{A}'\boldsymbol{Q}_x\left(\boldsymbol{A}'\right)^{\mathrm{T}}$ 和 $\boldsymbol{J}_x=\boldsymbol{Q}_x\left(\boldsymbol{A}'\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}_J^{-1}$。

$$\begin{cases}\boldsymbol{X}_{\text{topo}}=\boldsymbol{x}_{\text{topo}}+\boldsymbol{J}_x\left(\boldsymbol{L}'-\boldsymbol{A}'\boldsymbol{x}_{\text{topo}}\right)\\ \boldsymbol{Q}_{\boldsymbol{X}_{\text{topo}}}=\boldsymbol{Q}_x-\boldsymbol{J}_x\boldsymbol{A}'\boldsymbol{Q}_x\end{cases} \tag{8}$$

迭代运行式（8），通过最新的SAR影像来获得新参数。

1.2 时间序列形变估计

进一步校正干涉图之间的DEM误差后，可估算得到相对于 t_0 的形变时间序列，即

$$\begin{bmatrix}\phi_{\text{defo}}^1\\ \phi_{\text{defo}}^2\\ \vdots\\ \phi_{\text{defo}}^M\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-1 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0\\ -1 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 & 0\\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots\\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -1 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\phi^1\\ \phi^2\\ \vdots\\ \phi^N\end{bmatrix}+W \tag{9}$$

式中，ϕ_{defo}^i（$i=1,\cdots,M$）为干涉图 i 中相邻两点之间的形变相位差；$\phi^i(i=1,2,\cdots,N)$ 为 i 时点SAR影像相邻两点在视线（LOS）方向上的累积形变相位差；W

为误差项。

令 $\boldsymbol{L}_d=\left[\phi_{\text{defo}}^1 \quad \cdots \quad \phi_{\text{defo}}^M\right]^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{\varphi}_d=\left[\phi^1 \quad \cdots \quad \phi^M\right]^{\mathrm{T}}$，则根据WLS方法可求得 $\boldsymbol{\varphi}_d$ 及其协方差矩阵 $\boldsymbol{Q}_d$。

在一定时空基线阈值下，加入新影像与现有影像的一部分进行差分干涉。将现有影像的系数矩阵 $\boldsymbol{B}$ 分为不参与时序更新影像构成的矩阵 $\boldsymbol{B}_1$ 和参与时序更新影像构造的矩阵 $\boldsymbol{B}_2$ 两部分。同样，新加入影像的系数矩阵 $\boldsymbol{B}'$ 也可分为与现有影像进行差分干涉的影像 $\boldsymbol{B}'_2$ 和不与现有影像进行差分干涉的影像 $\boldsymbol{B}'_3$。将 $\boldsymbol{B}_1$、$\boldsymbol{B}_2$ 和 $\boldsymbol{B}'_2$ 记为 $\bar{\boldsymbol{B}}$，其对应的累积形变量记为 $\bar{\boldsymbol{\varphi}}_d$，则有：

$$\boldsymbol{L}'_d=\begin{bmatrix}\tilde{\boldsymbol{L}}_d\\ \boldsymbol{L}'_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{B}_1 & \boldsymbol{B}_2 & 0\\ 0 & \boldsymbol{B}'_2 & \boldsymbol{B}'_3\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{\varphi}'_1\\ \boldsymbol{\varphi}'_2\\ \boldsymbol{\varphi}'_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\bar{\boldsymbol{B}} & \boldsymbol{B}'_3\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\bar{\boldsymbol{\varphi}}_d\\ \boldsymbol{\varphi}'_3\end{bmatrix} \tag{10}$$

$$\tilde{\boldsymbol{L}}_d=\boldsymbol{L}-\left(\left(\boldsymbol{A}'\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}'\boldsymbol{A}'\right)^{-1}\left(\boldsymbol{A}'\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}'\boldsymbol{h}' \tag{11}$$

式中，$\boldsymbol{\varphi}'_1$、$\boldsymbol{\varphi}'_2$ 和 $\boldsymbol{\varphi}'_3$ 分别为未与、与新数据差分的形变相位以及新时刻的形变相位的估计值；$\tilde{\boldsymbol{L}}_d$ 为已有形变相位的修正值；$\boldsymbol{L}'_3$ 为新时刻的观测值。

序贯更新的过程为：

$$\begin{cases}\begin{bmatrix}\bar{\boldsymbol{\varphi}}_d\\ \boldsymbol{\varphi}'_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{Q}_d^{-1}+\bar{\boldsymbol{B}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}'\bar{\boldsymbol{B}} & \bar{\boldsymbol{B}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}'\boldsymbol{B}'_3\\ \left(\boldsymbol{B}'_3\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}'\bar{\boldsymbol{B}} & \left(\boldsymbol{B}'_3\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}'\boldsymbol{B}'_3\end{bmatrix}^{-1}\times\\ \begin{bmatrix}\boldsymbol{Q}_d^{-1}\boldsymbol{\varphi}_d+\bar{\boldsymbol{B}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}'\boldsymbol{L}'_d\\ \left(\boldsymbol{B}'_3\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}'\boldsymbol{L}'_d\end{bmatrix}\\ =\begin{bmatrix}\boldsymbol{\varphi}_d+\boldsymbol{J}_d\left(\boldsymbol{L}'_d-\bar{\boldsymbol{B}}\boldsymbol{\varphi}_d-\boldsymbol{B}'_3\boldsymbol{\varphi}'_3\right)\\ \left[\left(\boldsymbol{B}'_3\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}_{J_d}^{-1}\boldsymbol{B}'_3\right]^{-1}\left(\boldsymbol{B}'_3\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}_{J_d}^{-1}\left(\boldsymbol{L}'_d-\bar{\boldsymbol{B}}\boldsymbol{\varphi}_d\right)\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{Q}_{[\bar{\varphi}_d;\varphi'_3]}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{Q}_d^{-1}+\bar{\boldsymbol{B}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}'\bar{\boldsymbol{B}} & \bar{\boldsymbol{B}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}'\boldsymbol{B}'_3\\ \left(\boldsymbol{B}'_3\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}'\bar{\boldsymbol{B}} & \left(\boldsymbol{B}'_3\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}'\boldsymbol{B}'_3\end{bmatrix}^{-1}\\ =\begin{bmatrix}\boldsymbol{Q}_d-\boldsymbol{J}_d\bar{\boldsymbol{B}}\boldsymbol{Q}_d+\boldsymbol{J}_d\boldsymbol{B}'_3\boldsymbol{Q}_{\varphi'_3}\left(\boldsymbol{B}'_3\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{J}_d^{\mathrm{T}} & -\boldsymbol{J}_d\boldsymbol{B}'_3\boldsymbol{Q}_{\varphi'_3}\\ \boldsymbol{J}_d\boldsymbol{B}'_3\boldsymbol{Q}_{\varphi'_3} & \boldsymbol{Q}_{\varphi'_3}\end{bmatrix}\end{cases} \tag{12}$$

式中，$\boldsymbol{Q}_{[\bar{\varphi}_d;\varphi'_3]}$ 为 $\left[\bar{\boldsymbol{\varphi}}_d \quad \boldsymbol{\varphi}'_3\right]^{\mathrm{T}}$ 的协因数矩阵。

为进一步提高求逆效率，令 $\boldsymbol{Q}_{J_d}=\left(\boldsymbol{P}'\right)^{-1}+\bar{\boldsymbol{B}}\boldsymbol{Q}_d\bar{\boldsymbol{B}}^{\mathrm{T}}$、$\boldsymbol{J}_d=\boldsymbol{Q}_d\bar{\boldsymbol{B}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}_{J_d}^{-1}$ 和 $\boldsymbol{Q}_{\varphi'_3}=\left[\left(\boldsymbol{B}'_3\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}_{J_d}\boldsymbol{B}'_3\right]^{-1}$，可进一步优化式（12），更新后的形变相位 φ'_d 可写为：

$$\boldsymbol{\varphi}'_d=\left[\bar{\boldsymbol{\varphi}}_d \quad \boldsymbol{\varphi}'_3\right]^{\mathrm{T}}=\left[\boldsymbol{\varphi}'_1 \quad \boldsymbol{\varphi}'_2 \quad \boldsymbol{\varphi}'_3\right]^{\mathrm{T}} \tag{13}$$

累计形变量 d 可通过形变相位值转换，即

$$\boldsymbol{d}=-\frac{\lambda}{4\pi}\boldsymbol{\varphi}'_d \tag{14}$$

迭代运行式（12），并参考最新的SAR采集结果获取新参数。需要注意的是，上述观测方程得到的结果是影像上相邻点之间的差异，需要选择一个稳定点作为参考点获取形变时间序列，再求解空间积分[15]。

1.3　建筑评估指标

为检测建筑物的预期损坏情况，根据适用性极限状态（SLS）标准计算建筑物的差异形变。SLS是指使结构不适合其预期用途的条件。在不考虑东西向形变的前提下，本文选择SLS标准中的最大垂直形变差 δ 以及最大与最小累积位移之间的倾斜角 β 作为判断标准。δ 被定义为建筑物的不均匀形变，计算公式为：

$$\delta=\frac{\left|D_{\min_\mathrm{LOS}}-D_{\max_\mathrm{LOS}}\right|}{\cos\theta}=\frac{\left|\delta_{\mathrm{LOS}}\right|}{\cos\theta} \tag{15}$$

式中，$D_{\min_\mathrm{LOS}}$、$D_{\max_\mathrm{LOS}}$ 分别为监测期间沿LOS测得的建筑物最小、最大位移；δ_{LOS} 为在两个测量点沿卫星视线测得的最大差异形变。

β 的计算公式为：

$$\beta=\frac{\delta}{L} \tag{16}$$

式中，L 为 $D_{\min_\mathrm{LOS}}$ 与 $D_{\max_\mathrm{LOS}}$ 之间的水平距离；安全建筑物的 β 不应超过2‰[16]。

2　实验测试

本文选取安徽省阜阳市作为研究区。阜阳市地处皖北地区，地形平坦，地貌以平原为主，东北部有少量丘陵。近年来阜阳市城市化进程加快，极易加剧地表沉降，并影响区域内建筑物安全，因此对该地区建筑物进行持续形变监测尤为重要。本文选取2022-11-07—2024-07-11共50景覆盖研究区的Sentinel-1 SAR影像，分为2022-11-07—2024-03-13的40景原始影像集和2024-03-25—2024-07-11的10景新增影像集；采用序贯InSAR方法实现形变的更新，并作为对照组，将对同一数据集采用传统MT-InSAR方法进行解算，比较二者的结果与耗时。

为减少噪声影响，解算前对差分干涉图进行了两轮自适应滤波。滤波过程中逐步减小窗口大小和步长（窗口大小分别为32和16，步长分别为4和2），从而保证建筑物形变点的相干性与解算结果的准确性。按照与已有影像时间基线阈值为60 d，空间基线阈值为250 m的时空基线阈值处理新增影像，得到时空基线图（图2），可以看出，原始影像集中的3景与新增影

像集中的2景也进行了差分干涉，产生了6景干涉图。为更好地比较两种方法得到的结果，分别绘制累积形变量结果（图3），可以看出，阜阳市的地表形变空间分布并不规则，累计形变量较大的地区主要分布在颍东区和颍州区方向，且有向颍上县方向延伸的趋势；两种方法得到的结果差异极小，且形变区域的分布趋势几乎一致。

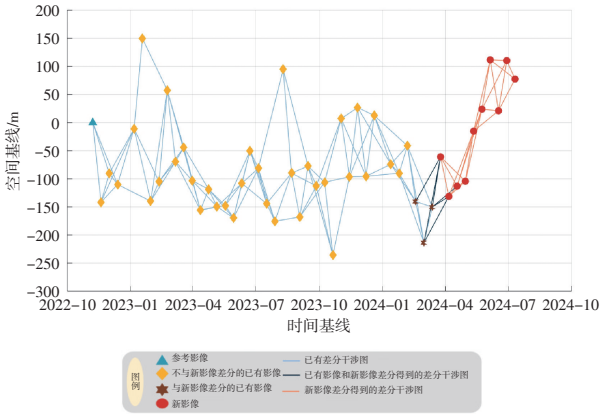
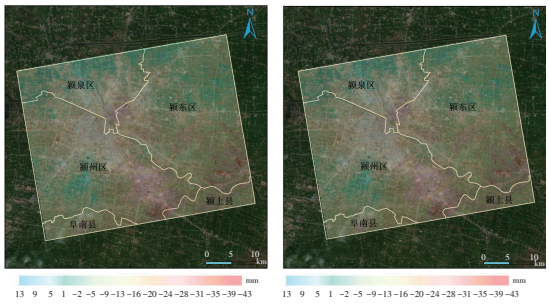


图2　新增数据后的时空基线图

为进一步突出两种方法之间的差异，将两种方法得到的形变速率与累积形变量相减，并统计差值的频率分布，得到相应的差值频数分布曲线（图4），可以看出，两条曲线区间范围极小，且近似于均值为零的正态分布，说明两种方法得到的结果差异非常小，最大差异也在亚毫米级。本文在搭载64位Windows 10操作系统，采用Intel Core i9-12900KF中央处理器，配备NVIDIA GeForce RTX 3080图形处理器，系统内存为64 GB的平台进一步比较两种方法的时效性，结果表明序贯InSAR方法能大幅提高解算效率，较传统方法提升了51.891 9%。综上所述，序贯InSAR方法不仅保持了监测结果的准确性，而且大幅提高了解算效率，能满足当下建筑物监测需求。



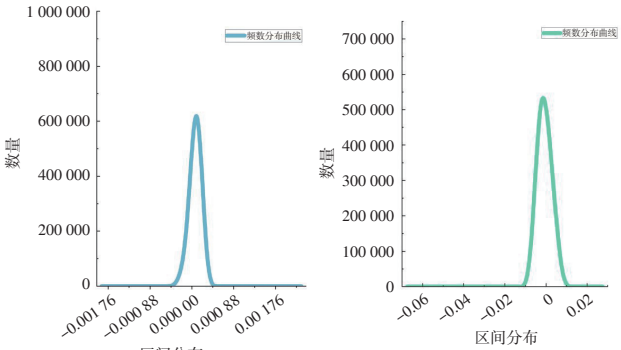
a 传统MT-InSAR方法　　b 序贯MT-InSAR方法

图3　两种方法得到的累积形变量

审图号：GS(2024)0650

3　建筑物监测

根据实验测试结果，在建筑物监测中本文采用序贯InSAR方法得到的累积形变量作为监测依据。由于SAR影像的空间分辨率有限，且建筑物周围形变点对其安全存在潜在影响，实验采取扩展缓冲区提取形变点，即在现有建筑物边界的基础上向外扩12 m的缓冲区[6]。该方法既能有效减少定位精度的影响，又能兼顾监测建筑物周围的形变点。阜阳市包含建筑物的累积形变量较大的区域主要集中在颍东区东与颍泉区的交界处以及颍州区西南方向，且向颍上县方向延伸。实验分别选取位于两个严重形变区的1栋代表性建筑进行分析（图5）。每栋建筑的矢量边界内均有超过4个形变点（建筑1有6个、建筑2有10个）；扩展缓冲区后，每栋建筑都增加了新的形变点（建筑1新增1个、建筑2新增4个）。



a 形变速率　　b 累积形变量

图4　两种方法形变速率与累积形变量的差异

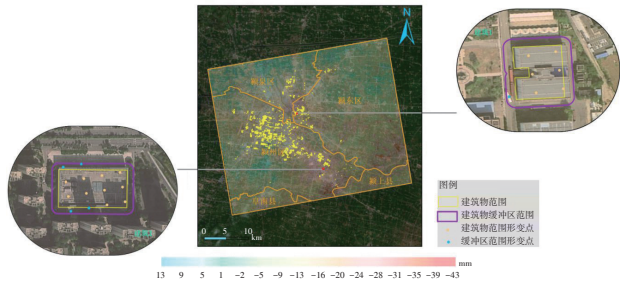


图5　建筑物选取

审图号：GS(2024)0650

对提取的隶属于建筑物的形变点进行编号，分别找出两栋建筑物上的最大和最小形变点（图6）。根据选取的SLS标准，计算得到两点间的直线距离以及对应的评价指标（表1），可以看出，两栋建筑受差异形变的影响并不严重。为更好地证明序贯InSAR方法结果的正确性，将传统MT-InSAR方法结果代入建筑物形变监测体系，两种方法得到的结果见表2，二者几乎没有差异。

进一步对属于建筑1和建筑2的形变点进行形变时序分析（图7），不难看出，各栋建筑物提取的形变点的形变趋势高度重合，说明两栋建筑物受不均匀形

变影响较小，这与建筑物安全评估指标得出的结论一致。由此可见，序贯 InSAR 技术在建筑物形变监测领域具有较高的应用价值。

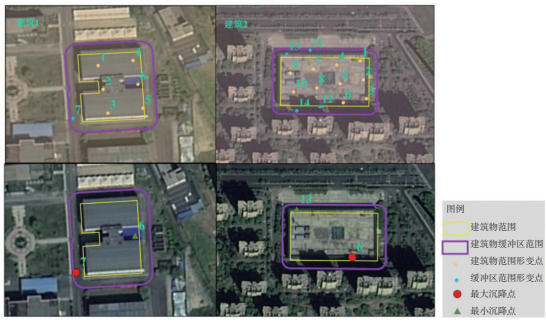


图 6　建筑物形变点分析

表 1　SLS 标准计算

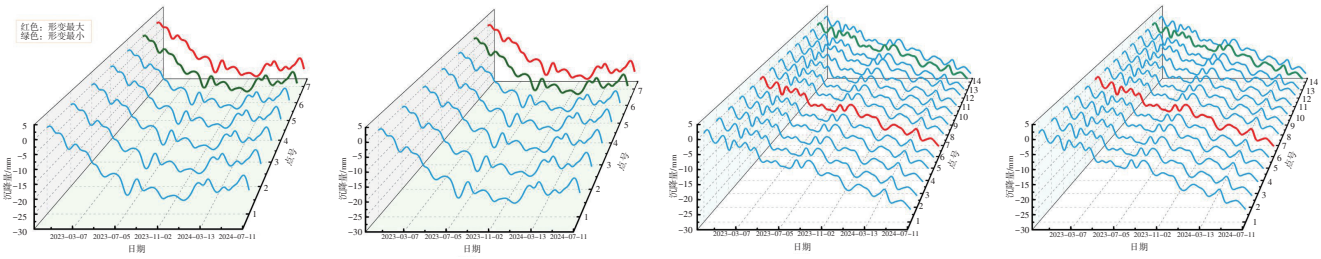
建筑	D_{max} /mm	D_{min} /mm	L /m	δ /mm	β
1	−21.78	−21.26	74.42	0.52	6.99×10^{-6}
2	−26.03	−24.91	129.24	1.12	8.67×10^{-6}

注：阈值为 $\beta\leqslant 2/1\,000$ 。

表 2　序贯 InSAR 与传统方法监测结果的差异

建筑	D_{max} 差异/mm	D_{min} 差异/mm	δ 差异/mm	β 差异
1	0.000 197 88	0.000 194 37	3.51×10^{-6}	$4.716\,47\times10^{-11}$
2	0.000 141 99	0.000 144 49	2.50×10^{-6}	$1.934\,39\times10^{-11}$

对形变趋势进行反演发现，两种方法也具有高度一致性。建筑 1 的形变波动明显大于建筑 2，在形变趋势上表现为骤降，骤降后逐步趋于平稳；建筑 2 存在短时间的下降趋势，随后有较明显的上升，但整体趋势为下降且各形变点趋势大致相同。结合时序分析与量化指标，两栋建筑受不均匀形变的影响较小，较为安全。综上所述，两栋建筑提取的形变点的形变趋势较吻合，不均匀形变较小，且经过实地调查，两栋建筑均在使用中，说明其状态较安全。实验结果表明，序贯 InSAR 方法在城市建筑物监测方面具有快速且准确的优势。



a 建筑 1 序贯 InSAR　　b 建筑 1 传统 MT-InSAR　　c 建筑 2 序贯 InSAR　　d 建筑 2 传统 MT-InSAR

图 7　两栋建筑的形变趋势

4　结　论

本文首先通过两次窗口与步长逐渐减少的自适应滤波保证了建筑物上形变点的可靠性；然后在建筑物监测领域引入了序贯 InSAR 技术，保证了毫米级的监测精度，且解算效率较传统 MT-InSAR 方法提高了 51.891 9%；最后结合建筑物分布矢量图，对沉降严重区域两栋建筑物上的形变点进行了 SLS 指标计算与时序分析，证明了该方法监测建筑物形变的有效性。综上所述，本文提出的方法较适用于城市建筑的形变监测，更适应于大数据时代的数据处理要求。

参考文献

[1] 杨馨，李益敏，冯玥雯，等. 基于 PS-InSAR 技术的昆明地铁 4 号线沿线地面沉降监测研究[J]. 地理空间信息，2024，22(8):107-110

[2] 朱同同，史绪国，周超，等. 利用 2016—2020 年 Sentinel-1 数据监测与分析三峡库区树坪滑坡稳定性[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2021，46(10):1 560-1 568

[3] 周小龙，石鹏卿，张娟，等. 基于 SBAS-InSAR 技术的平川矿区形变监测与分析[J]. 地理空间信息，2024，22(6):53-56

[4] Chini M，Pelich R，Hostache R，et al. Towards a 20 m Global Building Map from Sentinel-1 SAR Data[J]. Remote Sensing，2018，10(11):1 833

[5] Yang K，Yan L，Huang G，et al. Monitoring Building Deformation with InSAR: Experiments and Validation[J]. Sensors，2016，16(12):2 182

[6] Bianchini S，Pratesi F，Nolesini T，et al. Building Deformation Assessment by Means of Persistent Scatterer Interferometry Analysis on a Landslide-affected Area: the Volterra (Italy) Case Study[J]. Remote Sensing，2015，7(4):4 678-4 701

[7] Tang P，Chen F，Zhu X，et al. Monitoring Cultural Heritage Sites with Advanced Multi-temporal InSAR Technique: The Case Study of the Summer Palace[J]. Remote Sensing，2016，8(5):432

[8] Ansari H，De Zan F，Bamler R. Sequential Estimator: Toward Efficient InSAR Time Series Analysis[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing，2017，55(10):5 637-5 652

[9] 王辉，曾琪明，焦健，等. 结合序贯平差方法监测地表形变的

InSAR时序分析技术[J]. 北京大学学报(自然科学版),2021,57(2):241-249

[10] Wang Y, Luo J, Dong J, et al. Sequential Polarimetric Phase Optimization Algorithm for Dynamic Deformation Monitoring of Landslides[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2024,218:84-100

[11] Liu J, Hu J, Li Z, et al. Dynamically Estimating Deformations with Wrapped InSAR Based on Sequential Adjustment[J]. Journal of Geodesy,2023,97(5):49

[12] Guo S, Zuo X, Wu W, et al. Mitigation of Tropospheric Delay Induced Errors in TS-InSAR Ground Deformation Monitoring[J]. International Journal of Digital Earth,2024,17(1):2 316 107

[13] 廖明生,林珲,张祖勋,等. InSAR干涉条纹图的复数空间自适应滤波[J]. 遥感学报2003,7(2):98-105

[14] Zhang L, Ding X, Lu Z. Modeling PS-InSAR Time Series Without Phase Unwrapping[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2010,49(1):547-556

[15] Liu J, Hu J, Bürgmann R, et al. A Strain-model Based InSAR Time Series Method and Its Application to the Geysers Geothermal Field, California[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth,2021,126(8):e2021JB021939

[16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基坑工程监测技术规范:GB50497-2009[S].

(上接第5页)

[10] 阎跃观,戴华阳,王忠武,等. 急倾斜煤层开采垮落带破坏特征与法向高度研究[J]. 煤炭科学技术,2015,43(4):23-26

[11] Hooper A, Zebker H, Segall P, et al. A New Method for Measuring Deformation on Volcanoes and Other Natural Terrains Using InSAR Persistent Scatterers[J]. Geophysical Research Letters,2004,31(23):235-241

[12] Sandwell D, Mellors R, Tong X, et al. Open Radar Interferometry Software for Mapping Surface Deformation[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 2011, 92(28):234

[13] Fuhrmann T, Garthwaite C M. Resolving 3D Surface Motion with InSAR: Constraints from Multi-geometry Data Fusion[J]. Remote Sensing,2019,11(3):241

[14] 潘光永,陶秋香,陈洋,等. 基于SBAS-InSAR的山东济阳矿区沉降监测与分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2020,31(4):100-106

[15] 李小涛,张孝荣,黄景偲,等. 基于SBAS-InSAR的榆神矿区地表动态沉陷特征研究[J]. 地理空间信息,2021,19(8):35-38

[16] 任文静,贾洪果,闫斌. SBAS-InSAR方法支持下的矿区地表沉降监测及参数反演[J]. 测绘通报,2021(3):113-117

[17] 李欢,张沁瑞,张博,等. 京西"一线四矿"矿山环境变化的遥感监测分析[J]. 城市地质,2023,18(2):178-185

[18] 李达,邓喀中,高晓雄,等. 基于SBAS-InSAR的矿区地表沉降监测与分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2018,43(10):1 531-1 537

[19] 阎跃观,戴华阳,马植胜,等. 京西大台井急倾斜煤层开采地表移动与变形规律分析[C]//国际矿山测量协会主席秘书处,国际矿山测量协会第六专业委员会. 国际矿山测量协会(ISM)工作会议暨"数字矿业城市、数字矿山"建设信息技术学术研讨会论文集,2006:178-183

[20] 阎跃观,戴华阳,王忠武,等. 急倾斜多煤层开采地表沉陷分区与围岩破坏机理:以木城涧煤矿大台井为例[J]. 中国矿业大学学报,2013,42(4):547-553

[21] 沙永莲,王晓文,刘国祥,等. 基于SBAS InSAR的新疆哈密砂墩子煤田开采沉陷监测与反演[J]. 自然资源遥感,2021,33(3):194-201

[22] 刘志敏,李永生,张景发,等. 基于SBAS-InSAR的长治矿区地表形变监测[J]. 国土资源遥感,2014,26(3):37-42

[23] 王路遥,潘光永,陶秋香,等. 基于SBAS-InSAR时序分析技术的兖州矿区沉降监测与分析[J]. 煤炭技术,2019,38(10):83-87

[24] 付翔. 基于时序InSAR的矿区沉降监测及沉陷预计研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2023

[25] Lanari R, Lundgren P, Manzo M, et al. Satellite Radar Interferometry Time Series Analysis of Surface Deformation for Los Angeles, California[J]. Geophysical Research Letters,2004,31(23):264-272

[26] Ge L, Chang H C, Rizos C. Mine Subsidence Monitoring Using Multi-source Satellite SAR Images[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2007, 73(3):259-266