

doi: 10.6046/zrzyyg.2021334

引用格式: 罗雪玮,向喜琼,吕亚东. 龙里某塌陷时序 InSAR 变形监测的 PS 修正[J]. 自然资源遥感,2022,34(3):82-87. (Luo X W, Xiang X Q, Lyu Y D. PS correction of InSAR time series deformation monitoring for a certain collapse in Longli County[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(3): 82-87.)

龙里某塌陷时序 InSAR 变形监测的 PS 修正

罗雪玮¹, 向喜琼^{1,2}, 吕亚东¹

(1. 贵州大学喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵阳 550025;
2. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025)

摘要: 基于永久散射体的信号在很长时间范围内都能保持较高的干涉相干性的优点,为了解决小基线集合成孔径雷达干涉测量技术(small baseline subset interferometric synthetic aperture Radar, SBAS-InSAR)轨道精炼步骤时人工选择地面控制点可能会影响到监测结果这一问题,首先,该文将永久散射体与 SBAS-InSAR 结合,通过设置相干系数的阈值、振幅离差指数的阈值以及地表形变速率的阈值选出稳定的永久散射体,并将这些点作为 SBAS-InSAR 轨道精炼中的地面控制点,从而修正监测结果的准确度;然后,选用 2019 年 9 月 1 日—2021 年 4 月 11 日 20 景覆盖贵州省龙里县洗马镇的 Sentinel-1A 双极化影像为主要数据源,进行地表形变监测;最后,将该方法所得结果、人工选择地面控制点的方法所得结果与北斗位移监测数据进行对比分析,可知该文方法比人工选择地面控制点的方法更精准。

关键词: 永久散射体; 多重阈值; SBAS-InSAR; 地面控制点

中图法分类号: P 23 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2022)03-0082-06

0 引言

为克服差分合成孔径雷达干涉测量技术(differential interferometric synthetic aperture Radar, D-InSAR)时空失相干、大气效应及噪声等因素的影响,一系列的时序合成孔径雷达干涉测量技术(interferometric synthetic aperture Radar, InSAR)技术应运而生。具有代表性的有 Stacking-InSAR、永久散射体(permanent scatter, PS) PS-InSAR、小基线集(small baseline subset, SBAS) SBAS-InSAR 以及相干永久目标分析(interferometric persistent target analysis) IPTA-InSAR 等技术^[1]。Colombo 等^[2]利用 ESA ERS1/2 卫星采集的合成孔径雷达(synthetic aperture Radar, SAR)数据,采用 D-InSAR 和 PS-InSAR 进行了干涉分析,在监测的工业区内发现了不同的地面沉降模式;Wu 等^[3]采用 SBAS-InSAR 方法对延安新区 2015—2019 年的地表变形进行了调查,发现区内地基沉降主要来源于填方和城市荷载的作用,而建筑物的应力释放是造成地面隆起的主要因素;刘一霖等^[4]基于 SBAS-InSAR 技术,引

入偏移量追踪法、FFT 过采样方法、多窗口迭代自适应滤波技术对矿区进行了地表时序监测,分析了研究区开采工作面内地表的时空变化规律;葛大庆等^[5]融合了 PS-InSAR 和 SBAS-InSAR 两种方法,以短基线差分干涉生成相位图后利用点目标识别技术提取出相干目标,分析了德州地区地面沉降-回弹的动态变化过程;李金超等^[6]将基于灰色模型和支持向量回归的组合模型(gray model and support vector regression, MG-SVR)与 SBAS-InSAR 技术相结合,对淮南潘集矿区发生沉降的区域进行了监测及预警。

在使用 SBAS 方法对地表形变进行监测时,需要在轨道精炼步骤中引入稳定的地面控制点(ground control point, GCP)估算和去除残余的恒定相位和解缠后还存在的相位坡道,从而使形变监测结果更为准确。但在没有精确 GCP 的情形下,如果研究区内存在较大高差、或者影像数据噪声过大,无法进行消除,人工来选择 GCP 可能会引起较大误差。

针对此问题,本文提出了一种基于 PS 的 SBAS-InSAR 方法。该方法通过设置相干系数的阈值、振

幅离差指数的阈值以及地表形变速率的阈值选出稳定的 PS 点,并将这些点作为 SBAS - InSAR 轨道精炼中的地面控制点,以期能得到准确度更高的地表形变监测结果。最后,以位于贵州省龙里县洗马镇上石坎村的一处地面塌陷为实例验证了本文方法的有效性。

1 研究方法

1.1 相干系数法

相干系数法的基本思路为：对于某一像元选定一定大小的移动窗口 (m,n) ,利用该移动窗口内的像素复数信息来估计相干系数值。计算完毕后,移动该窗口,重复计算^[7-8]。相关系数 γ 计算公式为：

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n M(i,j) S^*(i,j)}{\sqrt{\sum_{j=1}^n |M(i,j)|^2 \sum_{i=1}^m |S^*(i,j)|^2}}, \quad (1)$$

式中： M 为主影像； S 为辅影像； $*$ 为共轭相乘。
计算得到每个像元的 γ 值后,再求得每个像元时序上的平均值 $\bar{\gamma}$,公式为：

$$\bar{\gamma} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \gamma_i \quad (2)$$

一般情况下, γ 值越大,干涉相位的噪声越低,设定阈值 T_γ ,当某一像素点的 $\bar{\gamma}$ 值大于 T_γ 时,将该点判定为有效 PS 点；否则视为无效 PS 点^[7-8]。

1.2 振幅离差法

Ferretti 等^[9]提出可以采用像素中振幅信息的时间序列来度量干涉相位的稳定性。 R 和 I 分别为影像的实部和虚部,若存在标准差为 σ_n 的高斯噪声,则振幅值 A 服从 Rice 分布,公式为：

$$f(A) = \frac{A}{\sigma_n^2} I_0\left(\frac{Ag}{\sigma_n^2}\right) e^{-\frac{A^2+g^2}{2\sigma_n^2}} \quad A > 0 \quad , \quad (3)$$

式中： g 为目标反射量,且 $g > 0$ ； I_0 为 Bessel 函数^[6]。当信噪比 $\frac{g}{\sigma_n}$ 较小时,Rice 分布演化为 Rayleigh 分布；而在高信噪比目标 ($\frac{g}{\sigma_n} > 4$) 时,该分布趋于高斯分布。因此,当 $\sigma_n \ll g$ 时,相位离差指数可以用振幅离差指数来估计,公式为：

$$\sigma_v \cong \frac{\sigma_{nl}}{g} \cong \frac{\sigma_A}{m_A} \triangleq D_A \quad , \quad (4)$$

式中： v 为干涉相位； σ_v 为相位离差指数； σ_{nl} 为虚部的标准差； m_A 和 σ_A 为时序振幅的均值和标准差； D_A 为振幅离差指数。

1.3 相干性、振幅离差指数以及形变速率结合的选点方法

首先采用相干系数阈值法初步识别出具有高相干系数的像元的 PS 点目标；然后设定振幅离差值进一步筛选具有稳定强散射性的 PS 点作为目标；最后设定一个形变速率区间来进行最终的 PS 点选取。如图 1 所示。

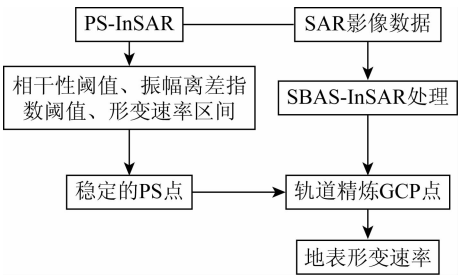


图 1 方法流程
Fig.1 Method and procedure

1.4 SBAS - InSAR 技术

SBAS - InSAR 技术可以限制时空基线失相干和大气延迟的影响^[10]。将 $N + 1$ 景覆盖同一区域的 SAR 影像序列,影像获取时间为 $(t_0, \cdots, t_N)$,根据空间基线和时间基线的条件组合干涉对得到 M 幅差分干涉图, M 的数量与影像数量满足以下关系^[11]：

$$\frac{N + 1}{2} \leq M \leq N \left(\frac{N + 1}{2} \right) \quad (5)$$

假设干涉图 j 由 t_A 和 t_B 时刻获取的影像干涉生成,在去除平地效应与地形相位影响后,干涉图 j 中距离向为 r 与方位向为 x 的某一像素的干涉相位表示为：

$$\begin{aligned} \delta \phi_j(x,r) &= \phi(t_B,x,r) - \phi(t_A,x,r) \\ &\approx \phi_{\text{def},j}(x,r) + \phi_{\text{topo},j}(x,r) \\ &\quad + \phi_{\text{atm},j}(x,r) + \phi_{\text{noise},j}(x,r) \end{aligned} \quad , \quad (6)$$

式中： $\phi(t_B,x,r)$ 和 $\phi(t_A,x,r)$ 分别为 t_B 和 t_A 时刻 SAR 影像上的相位值； $\phi_{\text{def},j}(x,r)$ 为 $t_A \sim t_B$ 时刻内卫星视线向 (los) 的形变相位； $\phi_{\text{topo},j}(x,r)$ 为地形相位误差； $\phi_{\text{atm},j}(x,r)$ 为大气相位误差； $\phi_{\text{noise},j}(x,r)$ 为噪声相位。

对所有干涉图构建差分干涉相位与影像获取时刻形变量之间的线性方程组,其矩阵形式为：

$$A\phi = \delta\phi \quad , \quad (7)$$

式中: $\mathbf{A}$ 为 $M \times N$ 的系数矩阵; $\boldsymbol{\phi}$ 为参数矩阵, 由未知像元 (x, y) 在 N 个时刻对应的未知形变相位值构成; $\delta\boldsymbol{\phi}$ 为由 M 个式(6)所示的 $\delta\phi_j$ 组成的观测方程组; M 为差分干涉图的数量。

为求解研究区域各高相干点的形变速率, 可用两景影像间的平均相位速率代替相位值, 则式(7)变为:

$$\mathbf{B}\mathbf{v} = \delta\boldsymbol{\phi} \quad , \quad (8)$$

式中: $\mathbf{B}$ 为 $M \times N$ 的系数矩阵; $\mathbf{v}$ 为形变速率向量, $\mathbf{v}^T$ 可表示为:

$$\mathbf{v}^T = \left[\begin{array}{c} v_1 = \frac{\varphi_1}{t_1 - t_0}, \\ \cdots, v_N = \frac{\varphi_N - \varphi_{N-1}}{t_N - t_{N-1}} \end{array} \right] \quad . \quad (9)$$

当系数矩阵 $\mathbf{B}$ 为满秩 (即 $M \geq N$) 时, 可用最小二乘法求解形变速率; 当 $M < N$ 时, 矩阵 $\mathbf{B}$ 出现秩亏, 可用奇异值分解法获取研究区域的形变速率。获取形变速率后, 依据研究区 SAR 影像间的时间区间可以求得相应时间段内的形变量。

2 实验数据和处理

2.1 数据

本文以龙里县洗马镇的一处地面塌陷为实例 (图 2), 选取 20 景由欧洲航天局提供的 C 波段 Sentinel-1A SAR 影像数据, 时间范围为 2019 年 9 月 1 日—2021 年 4 月 11 日。选用 POD 精密定轨星历数据去除轨道相位, 采用 SRTM-DEM 去除地形相位并进行坐标系转换。表 1 列举了 Sentinel-1A 影像数据的基本参数。



图 2 Sentinel-1A 影像位置

Fig.2 Sentinel-1A image position

表 1 Sentinel-1A 数据参数
Tab.1 Sentinel-1A parameter

参数	值
数据类型	SLC
成像模式	IW
重访周期/d	12
极化方式	VV
距离分辨率/m	5
方位分辨率/m	20
入射角/(°)	44
轨道方向	升轨

2.2 PS 点的选取

首先对 20 景 SAR 数据进行配准、干涉、去平处理并计算出数据的时序振幅标准差与平均值。先采用相干系数法识别出具有高相干系数的像元作为 PS 点选取目标, 考虑到研究区为城镇, 建筑物较多, 故设置相干性阈值为 0.75; 然后使用振幅离差指数进一步筛选出具有稳定相位的 PS 点, 根据 Ferretti 等^[9]的研究, 通常振幅离差指数只考虑小于 0.25 的像素点, 故设置振幅离差指数阈值为 0.25; 最后基于形变速率来确定 PS 点, 因为本文选取的 PS 点需要作为 SBAS-InSAR 轨道精炼时的 GCP 点, 而 GCP 点的基本选取原则为远离形变区域, 故本文将形变速率区间设置为 $[-0.1, 0.1]$ mm/a。基于以上 3 个限制条件, 共选出相位稳定的 PS 点 36 个, 如图 3 所示, 且将 PS 点导入地图对比查看后发现大部分 PS 点都位于稳定的建筑物 (道路、屋顶等) 上。

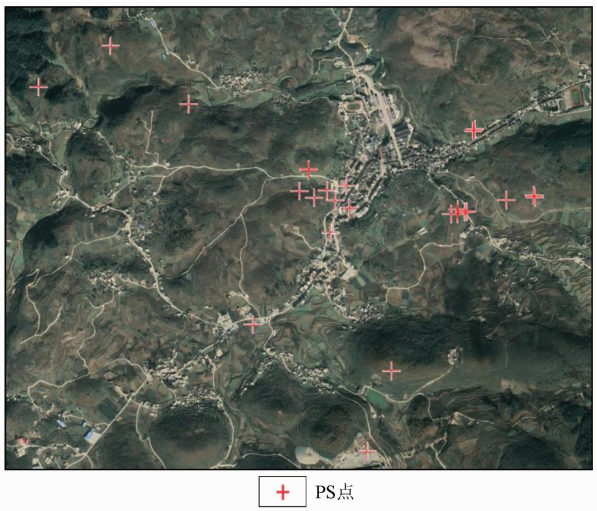


图 3 基于 3 个阈值得到的 PS 点

Fig.3 PS points based on the three thresholds

2.3 SBAS-InSAR 处理

将得到的 PS 点由地理坐标转为雷达斜距坐标, 然后将其作为 GCP 点与干涉处理后的像对进行轨道精炼, 估算和去除残余的恒定相位和解缠后还存在的相位坡道; 接着通过 2 次反演估算形变速率和

残余地形,并去除大气相位;最后获取了研究区地表形变速率(图4)和时序形变结果(图5)。可以看出:区内平均地表形变速率在 $-6.5\sim5.7\text{ mm/a}$ 之间,年平均最大沉降速率为 -6.52 mm ,说明该地变形程度轻微,且监测到的形变主要集中在塌陷区边界及道路周围,与实地地质调查的结果相符合。除

开植被覆盖区域出现失相干外,塌陷区内大部分农田没有监测到相关形变是由于春耕时节居民对农田进行翻土种地等操作,农田里长出了新作物,所以也导致了该区域的部分失相干情况。以2019年9月1日为第一时相,其余各期影像相对于第一时相的形变如图5所示。

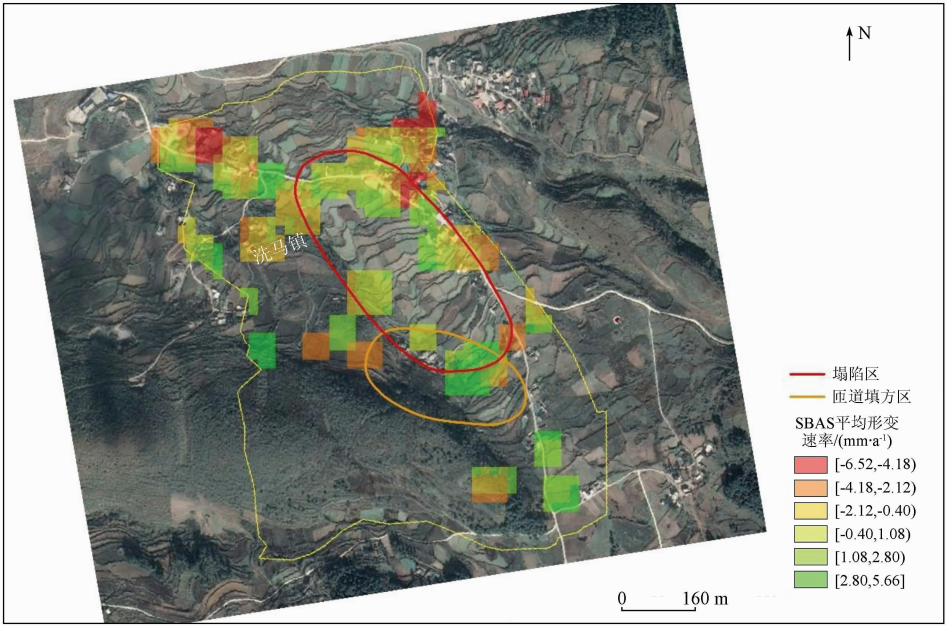


图4 SBAS-InSAR 形变速率图

Fig. 4 Deformation rate diagram of SBAS-InSAR

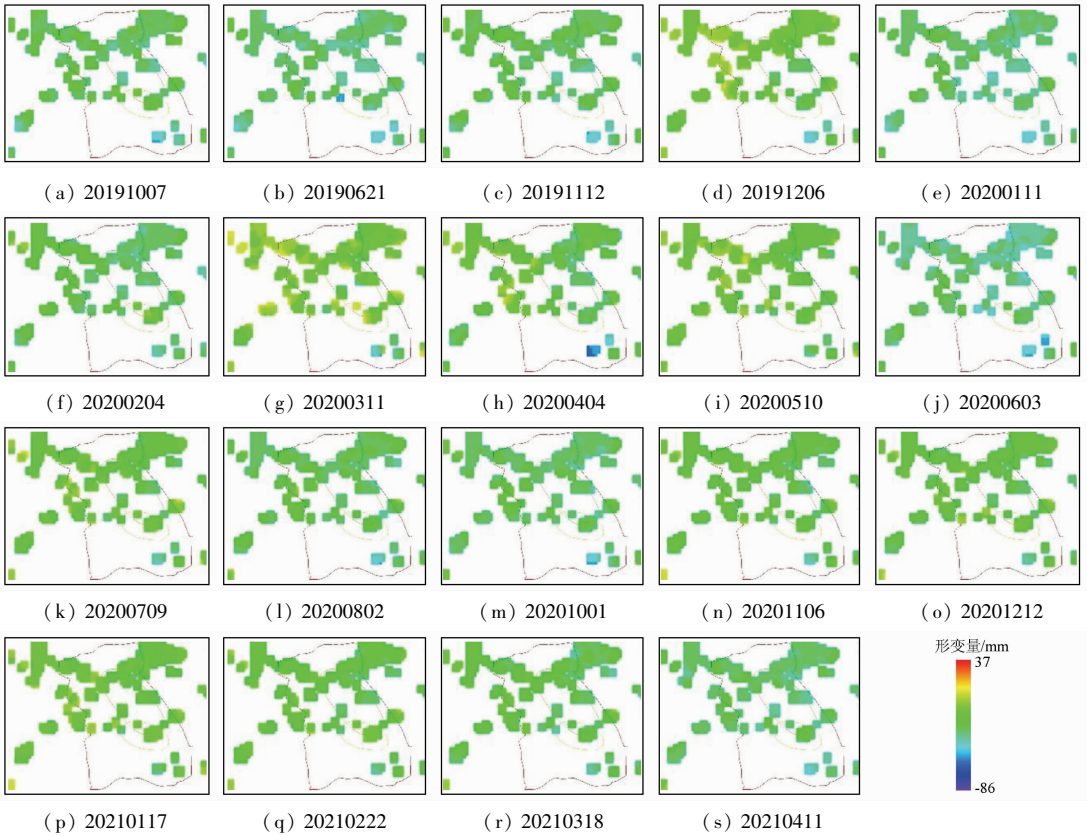


图5 研究区地表形变时间序列

Fig. 5 Time series of surface deformation in the study area

3 结果评述

为了验证该方法的优越性,本文使用相同时间段的 SAR 影像数据,基于选择 GCP 点的重要标准^[12]: ①没有残余地形条纹; ②没有形变条纹,远离形变区域; ③没有相位跃变; ④至少 20 ~ 30 个点。通过对比滤波后的干涉图和解缠后的干涉图,在没有相位跃变和残余地形相位的区域,人工手动选择了 30 个控制点,得到研究区的形变速率。并收集了研究区内设置的 3 处北斗位移监测站点的监测结果(选取时间分别为 2020 年 11 月 6 日,2020 年 12 月 12 日,2021 年 1 月 17 日,北斗监测结果的时间跨度为 2020 年 10 月 28 日—2021 年 11 月 25 日,与本文 InSAR 时间序列相对一致),然后在 2 种 SBAS 形变结果中选取了监测站点周围不超过 50 m 的 3 个变形点,计算这 3 个变形点在同一位移监测时间内的相对垂直向形变量,并与位移监测数据进行比较,比较结果如表 2,图中点号为北斗监测的站点名。

表 2 2 种方法与北斗监测点比较情况
Tab. 2 Comparison between the two methods and the Beidou monitoring station (mm)

点号	位移监测数据	本文方法		传统 SBAS 方法	
		形变量	误差	形变量	误差
SC-07	-2.41	1.07	3.48	4.53	6.94
SC-06	-0.94	-0.63	0.31	-0.11	0.83
SC-05	-2.90	-5.79	-2.89	-9.28	-6.99

由表 2 看出,2 种方法中,结合了 PS 点的 SBAS-InSAR 方法的监测结果比人工选取 GCP 点的传统 SBAS-InSAR 方法更接近位移监测数据,且 2 种监测结果与位移监测数据均有一定的误差。通过查阅文献再结合实地考察,分析造成误差的原因主要有以下 3 点: ①由于客观条件的限制,研究区内北斗位移监测站点的设置与所选择的 InSAR 形变点的位置并不是完全重合的,故选择了在监测站点 50 m 以内的 3 个邻近 InSAR 形变点来进行对比分析; ② InSAR 形变结果的分析处理过程是通过像元而不是单个点来处理的,像元覆盖了一定的范围,所以得到的结果可能会受到周围临近像元及整体区域上的影响而造成误差; ③除了 InSAR 技术本身存在的误差源,在时序 InSAR 中还存在雷达影像对精度的影响、干涉相位对函数模型观测量与未知量之间函数关系的影响^[13]。InSAR 的相位组成可通过函数表现为以下形式:

$$\varphi = \varphi_{\text{defo}} + \varphi_{\text{atmo}} + \varphi_{\text{orbit}} + \varphi_{\text{dem}} + \varepsilon = Ax + \varepsilon,$$

(10)

式中: ε 为失相干随机噪声, $E\{\varphi\} = 0$ 。基于时序 InSAR 技术,可以将多幅干涉图组成其函数模型观测量,增加多余观测,从而进行误差的解算与分离。

4 结论

1)在进行 SBAS-InSAR 处理时,为了使选择的 GCP 点不引起较大误差从而影响到形变结果,本文通过设置相干系数的阈值、振幅离差指数的阈值以及地表形变速率的阈值选取了稳定的 PS 点,然后将其作为 GCP 点进行轨道精炼及后续的反演处理得到地表形变信息。并将本文方法与采用人工选取 GCP 点的方法所得结果和北斗位移监测结果进行对比。由本文方法得到的形变结果比通过人工选择 GCP 的 SBAS 方法得到的形变结果更为精准,能更加有效地分析研究区地表时序形变。在实例研究中,研究区内平均地表形变速率在 -6.52 ~ 5.66 mm/a 之间,年平均最大形变速率为 -6.52 mm,该地整体变形程度轻微,变形主要集中在塌陷区边界及道路周围。

2)由于本文方法所选取的 PS 点大部分都位于建筑物上,当建筑物没有发生竖直方向上的变形时,也会被判定为 PS 点。那么基于这样的 PS 点得到的时序形变结果也可能会出现较大误差。因此,后续的研究可以通过将升降轨数据进行融合得到三维的形变量,再进一步解算水平与竖直方向的形变,通过共同判断 x 和 y 方向上的位移,这样得到的永久散射体就会更为可靠。

参考文献 (References):

[1] 曹翠华. InSAR 技术监测西南喀斯特地表形变应用研究[D]. 西安:西安科技大学,2020.
Cao C H. Application of InSAR technology in monitoring southwest surface deformation[D]. Xi'an:Xi'an University of Science and Technology,2020.

[2] Colombo D, Farina P, Moretti S, et al. Land subsidence in the Firenze - Prato - Pistoia basin measured by means of spaceborne SAR interferometry[C]//IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing (IGARSS), 2003, 4 (3): 2927 - 2929.

[3] Wu Q, Jia C T, Chen S B, et al. SBAS-InSAR based deformation detection of urban land, created from mega-scale mountain excavating and valley filling in the loess plateau: The case study of Yan'an City[J]. Remote Sensing, 2019, 11 (14): 1673.

[4] 刘一霖, 张勤, 黄海军, 等. 矿区地表大量级沉陷形变短基线集 InSAR 监测分析[J]. 国土资源遥感, 2017, 29 (2): 144 - 151. doi:10.6046/gtzyyg. 2017. 02. 21.

Liu Y L, Zhang Q, Huang H J, et al. Monitoring and analyzing large scale land subsidence over the mining area using small baseline

subset InSAR[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2017, 29(2):144-151. doi:10.6046/gtzyyg.2017.02.21.

[5] 葛大庆,殷跃平,王 艳,等. 地面沉降-回弹及地下水位波动的 InSAR 长时序监测——以德州市为例[J]. 国土资源遥感, 2014,26(1):103-109. doi:10.6046/gtzyyg.2014.01.18.

Ge D Q, Yin Y P, Wang Y, et al. Seasonal subsidence - rebound and ground water level changes monitoring by using coherent target InSAR technique: A case study of Dezhou, Shandong[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2014,26(1):103-109. doi:10.6046/gtzyyg.2014.01.18.

[6] 李金超,高 飞,鲁加国,等. 基于 SBAS-InSAR 和 GM-SVR 的居民区形变监测与预测[J]. 大地测量与地球动力学,2019, 39(8):837-842.

Li J C, Gao F, Lu J G, et al. Deformation monitoring and prediction of residential area based on SBAS-InSAR and GM-SVR[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics,2019,39(8):837-842.

[7] 王道飘. 基于 PS 点大气延迟校正的时序 InSAR 在城市地面沉降监测中的研究及应用[D]. 武汉:武汉理工大学,2019.

Wang D P. Research and application of time series InSAR based on atmospheric delay correction by PS points in urban land settlement monitoring[D]. Wuhan:Wuhan University of Technology,2019.

[8] Li N, Wu J. Research on methods of high coherent target extraction in urban area based on PSINSAR technology[J]. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences,2018,XLII-3:901-908.

[9] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Analysis of permanent scatterers in SAR interferometry[C]//Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Honolulu, HI,2000.

[10] 李婉秋. 基于 Sentinel-1 数据的 SBAS-InSAR 技术在地表形变监测中的研究[D]. 成都:成都理工大学,2018.

Li W Q. A research of SBAS-InSAR technology based on sentinel-1 data in surface deformation monitoring[D]. Chengdu:Chengdu University of Technology,2018.

[11] 周 吕,郭际明,李 昕,等. 基于 SBAS-InSAR 的北京地区地表沉降监测与分析[J]. 大地测量与地球动力学,2016,36(9): 793-797.

Zhou L, Guo J M, Li X, et al. Monitoring and analyzing on ground settlement in Beijing area based on SBAS-InSAR[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics,2016,36(9):793-797.

[12] Esri 中国信息技术有限公司. SARscape 培训教程[Z]. 北京: [s. n.],2018.

Esri China Information Technology Co., LTD. SARscape training tutorial[Z]. Beijing:[s. n.],2018.

[13] 何 平. 时序 InSAR 的误差分析及应用研究[D]. 武汉:武汉大学,2014.

He P. Error analysis and surface deformation application of time series InSAR[D]. Wuhan:Wuhan University,2014.

PS correction of InSAR time series deformation monitoring for a certain collapse in Longli County

LUO Xuewei¹, XIANG Xiqiong^{1,2}, LYU Yadong¹

(1. Key Laboratory of Karst Georesources and Environment, Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang 550025, China;
2. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: The signals of permanent scatterers can maintain high interferometric coherence for a long time. To solve the problem that manually selecting ground control points may affect the monitoring results during the orbit refinement of the SBAS-InSAR, this study combined permanent scatterers with SBAS-InSAR. Firstly, by setting the thresholds of the coherence coefficient, the amplitude dispersion index, and the surface deformation rate, this study selected robust permanent scatterers as the ground control points in the orbit refinement of the SBAS-InSAR in order to correct the accuracy of the monitoring results. Then, this study selected 20 scenes of Sentinel-1A dual-polarization images that covered Xima Town, Longli County, Guizhou Province from September 1, 2019 to April 11, 2021 as the main data source for surface deformation monitoring. Finally, this study compared the results obtained using the proposed method and those obtained through manually selecting ground control points with the displacement monitoring data of the Beidou satellite, concluding that the data obtained using the method proposed in this study were more accurate.

Keywords: permanent scatterer; multi-threshold; SBAS-InSAR; ground control points

(责任编辑: 李 瑜)