引文格式:肖儒雅,王迅,孙静怡,等.国产SAR卫星差分干涉测量地表形变监测比较[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(8):1517-1526.DOI:10.13203/j.whugis20240468

Citation: XIAO Ruya, WANG Xun, SUN Jingyi, et al. Comparisons of Differential Interferometry of Chinese SAR Satellites in Ground Deformation Monitoring[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(8): 1517-1526. DOI: 10.13203/j.whugis20240468

国产SAR卫星差分干涉测量地表形变监测比较

肖儒雅[1] 王 迅[1] 孙静怡[1] 李 涛[2] 田 馨[3] 何秀凤[1]

1 河海大学地球科学与工程学院,江苏 南京,211100
2 自然资源部国土卫星遥感应用中心,北京,100048
3 东南大学交通学院,江苏 南京,211189

摘 要:随着国家乃至洲际尺度的地表形变监测在全球范围内的陆续开展,合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术已从实验室研究迈向更为广阔的应用实践。中国首组民用干涉合成孔径雷达(synthetic aperture radar,SAR)卫星陆探一号开启了国产SAR数据干涉应用元年,宏图一号星座、涪城一号等商业SAR小卫星系统也呈现蓬勃发展态势。然而,与国际成熟的SAR卫星应用系统相比,中国在数据产品及业务化应用方面仍存在一定差距。为验证国产SAR卫星地表形变测量效果,利用陆探一号、涪城一号、宏图一号数据对中国江苏省徐州市沛县张双楼煤矿矿区开展形变监测。以欧洲空间局Sentinel-1卫星数据为参考,从干涉相干性、相位闭合误差以及形变速率一致性等方面对结果进行比较分析。结果表明,3组国产SAR卫星均监测到矿区内的两个漏斗状沉降区,虽然各组结果中形变区面积和形变速率极值存在差异,但整体形变速率监测结果之间具有较高的一致性;利用多几何InSAR观测获取了矿区水平和垂直方向的地表形变信息。3组国产SAR卫星均具备优秀的形变测量能力,多源卫星数据融合应用前景广阔。

关键词:国产干涉SAR卫星;陆探一号;涪城一号;宏图一号;差分InSAR;地表形变

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-12-24

DOI:10.13203/j.whugis20240468 **文章编号**:1671-8860(2025)08-1517-10

Comparisons of Differential Interferometry of Chinese SAR Satellites in Ground Deformation Monitoring

XIAO Ruya[1] *WANG Xun*[1] *SUN Jingyi*[1] *LI Tao*[2] *TIAN Xin*[3] *HE Xiufeng*[1]

1 School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China
2 Land Satellite Remote Sensing Application Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100048, China
3 School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China

Abstract: **Objectives**: With the advancement of national and intercontinental-scale ground deformation monitoring, interferometric synthetic aperture radar (InSAR) technology has transitioned from laboratory research to widespread practical applications. China's development in this field has seen significant milestones, including the launch of its first civil InSAR satellite system, Lutan-1, which marked a new era of domestic synthetic aperture radar (SAR) satellite applications. Moreover, commercial small SAR satellite systems, such as the Hongtu-1 constellation and Fucheng-1, have experienced rapid growth. Despite these advancements, a notable gap remains between the high-resolution interferometric SAR satellite data products and their operational applications in China compared to the mature systems of developed countries. **Methods**: The three Chinese SAR satellite systems, Lutan-1, Fucheng-1, and Hongtu-1, are utilized to monitor ground deformation in the Zhangshuanglou coal mine area in Peixian County, Xuzhou City, Jiangsu Province, China. The differential InSAR method is employed to assess the monitoring performance, focusing on key metrics such as

基金项目:国家重点研发计划(2021YFC3200500),国家自然科学基金(42174018)。

第一作者:肖儒雅,博士,教授,主要从事影像大地测量理论方法与应用研究。ruya.xiao@hhu.edu.cn

通信作者:何秀凤,博士,教授。xfhe@hhu.edu.cn

interferometric coherence, phase closure error, and deformation results, using data from the European Space Agency's Sentinel-1 satellite as a reference. Additionally, a multi-geometry InSAR observation model is applied to derive both horizontal and vertical deformations of the mining area, providing valuable insights for the advancement of InSAR applications. **Result:** All three Chinese SAR satellite systems detected two funnel-shaped subsidence areas in the study area. Although the subsidence area and regional deformation rate peaks vary from each satellite, the consistencies among the monitoring results are high. **Conclusion:** The three Chinese interferometric SAR satellites have good deformation measurement capabilities, and the integration of multi-source satellite data is feasible and has great application prospects.

Key words: Chinese interferometric SAR satellites; Lutan-1; Fucheng-1; Hongtu-1; differential interferometry; ground deformation

过去十年间,以欧洲空间局Sentinel-1为代表的雷达卫星任务极大变革了地表形变测量的能力[1-2],监测的时间、空间分辨率也提升到了前所未有的水平,合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar,InSAR)技术已由机会科学发展成为常规监测手段[3-5]。中国合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)卫星,特别是干涉SAR卫星任务起步较晚,长期以来理论方法研究与对地观测应用都只能依赖国外卫星数据[6]。2022年1月26日和2月27日成功发射并在轨运行至今的陆探一号01组A、B星是中国第一个以差分InSAR为应用目标、具备双星"绕飞"地形测量[7]、双星"跟飞"干涉测量[8]能力的L波段编队SAR星座,开启了国产SAR卫星干涉应用元年。与此同时,商业干涉SAR小卫星发展迅速,2023年3月30日和6月7日,宏图一号星座、涪城一号两组高分辨率SAR卫星相继入轨。大、小干涉SAR卫星系统的蓬勃发展标志着中国天基地表形变监测进入了数据自主可控的新时代,InSAR技术应用迎来了高质量发展的新机遇。

当前,国产高分辨率干涉SAR卫星系统多处于验证、测试阶段,数据产品及业务化应用与发达国家成熟系统相比仍有差距。利用国产干涉SAR卫星数据进行InSAR形变监测的报道较少。文献[9]阐述了中国天绘二号SAR卫星的技术体制,对卫星编队、双星协同工作、高保相成像等关键技术进行了分析,卫星在轨测试结果表明,系统主要性能指标优于设计指标。文献[10]介绍了利用北斗卫星导航系统数据提高陆探一号卫星基线解算精度的方法。文献[11]基于中国形变监测需求以及卫星观测能力,设计了陆探一号卫星的产品体系,并对基础形变产品的内容及特性进行了展示与分析。文献[12]介绍了全球首个"1+3"车轮编队构型的宏图一号SAR卫星系统情况,并通过实验验证了宏图一号多基线InSAR最高可实现平地优于2 m、山区优于5 m的测图精度。随着卫星数据的积累和有限开放测试,中国学者利用国产干涉SAR卫星数据开展了InSAR形变监测应用研究。文献[13]利用差分InSAR和Stacking方法处理Sentinel-1和涪城一号卫星数据,分析了中国新疆克拉玛依市采矿引起的地面沉降情况,研究结果表明,涪城一号监测结果与Sentinel-1在沉陷范围上具有较高的一致性。文献[14]以土耳其地震、中国四川泸定地震和甘肃积石山地震等为应用案例,通过与其他SAR卫星及地面全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)数据结果进行对比,验证了陆探一号卫星地震同震形变结果的精度,阐述了陆探一号卫星在地震次生灾害应急评估、活动断裂探查等领域的优势和应用潜力。文献[15]以中国甘肃舟曲泄流坡滑坡为研究对象,利用差分InSAR和时序InSAR方法获取滑坡形变信息,以地面观测为参考验证了陆探一号卫星探测地表大变形的能力和形变时间序列的测量精度,结果表明,陆探一号卫星综合效能达到设计指标。文献[16]利用永久散射体和小基线集技术对陆探一号获取的25景山西大同矿区条带模式SAR影像进行处理,并利用地面GPS测站数据进行验证,结果表明,陆探一号时序InSAR监测结果的均方根误差小于5 mm,具备高精度形变监测能力。

本文选取同时期覆盖中国江苏省徐州市沛县张双楼煤矿矿区的陆探一号、涪城一号、宏图一号3组国产SAR卫星数据,利用差分InSAR方法获取矿区及其周边地区地表形变情况;以Sentinel-1卫星数据处理结果为参考,从干涉相干性、相位闭合误差以及形变速率结果等方面对监测效果进行比较分析;利用多几何InSAR观测分解模型获取了张双楼矿区水平和垂直方向地表形变情况,探究多源干涉SAR卫星组合在矿区形变监测中的应用前景。

1　SAR卫星数据与处理方法

1.1　干涉SAR卫星参数

本文处理的3组国产干涉SAR卫星与欧洲空间局Sentinel-1卫星参数对比如表1所示。Sentinel-1卫星主要采用大幅宽的逐行扫描(terrain observation with progressive scan,TOPS)模式成像,3组国产SAR卫星均采用较小幅宽的条带模式成像,具有更高的成像分辨率,满足精细化形变监测的需求。

表1　干涉SAR卫星参数对比

Table 1　Comparison of Interferometric SAR Satellite Parameters

卫星	卫星重量/kg	中心频率/GHz(波段)	编队方式	最短干涉重访周期/d(单星/星座)	主要成像模式	成像幅宽/km	方位向格网尺寸/m	距离向格网尺寸/m	发射日期(A/B/C)	数据情况
Sentinel-1	2 280	5.41(C)	双星绕飞*	12/6	TOPS	250	13.94	9.32	2014-04-03(A) 2016-04-25(B) 2024-12-05(C)	全球免费
陆探一号	3 600	1.26(L)	双星绕飞	8/4	条带	50	1.73	1.66	2022-01-26(A) 2022-02-27(B)	业务单位共享
涪城一号	300	5.41(C)	单星	11	条带	25	1.67	1.25	2023-06-07	商业
宏图一号	320	9.60(X)	1+3“车轮”式	15	条带	20～30	1.69	0.75	2023-03-30	商业

注:*表示Sentinel-1B卫星已于2021年12月失效。

Sentinel-1卫星自发射以来在全球范围内积累了海量SAR数据,欧洲空间局的数据开放获取政策使其成为当前影像大地测量领域应用最为广泛的数据源。国产干涉SAR卫星采用不同的数据共享模式:陆探一号卫星的3个主用户自然资源部、应急管理部、国家林业和草原局均可获取全部数据,并向各自业务单位进行分发;涪城一号与宏图一号主要采用商业模式开展数据服务。目前,陆探一号已经进入业务化服务阶段,涪城一号和宏图一号也已相继完成在轨测试。3组国产SAR卫星均开放部分示例数据供用户试用,并提供科研项目支持。

本文所采用的Sentinel-1与国产SAR卫星影像覆盖范围及研究区地形概况如图1所示,江苏沛县张双楼煤矿矿区位于影像重叠区域内。Sentinel-1卫星的TOPS成像模式以中等空间分辨率获得了较大的幅宽,陆探一号业务化运行的条带模式1能够兼顾对地观测的空间分辨率和影像覆盖范围。

图2展示了4组SAR卫星在同一区域、相近时期的后向散射强度影像对比结果。相较于Sentinel-1,3组国产SAR卫星数据因其高空间分辨率具有更优的细节解析能力,且工作在不同的微波波段,因而后向散射特征各异,可互为补充。

1.2　国产SAR差分干涉测量数据处理

本文所使用的SAR卫星影像获取时间如表2所示。对SAR数据进行差分干涉处理:以公共主影

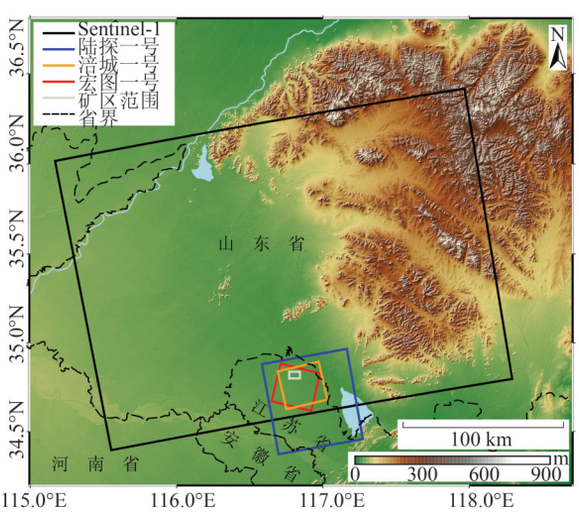


图1　卫星影像覆盖范围及研究区地形概况(省界数据来源于国家基础地理信息中心)

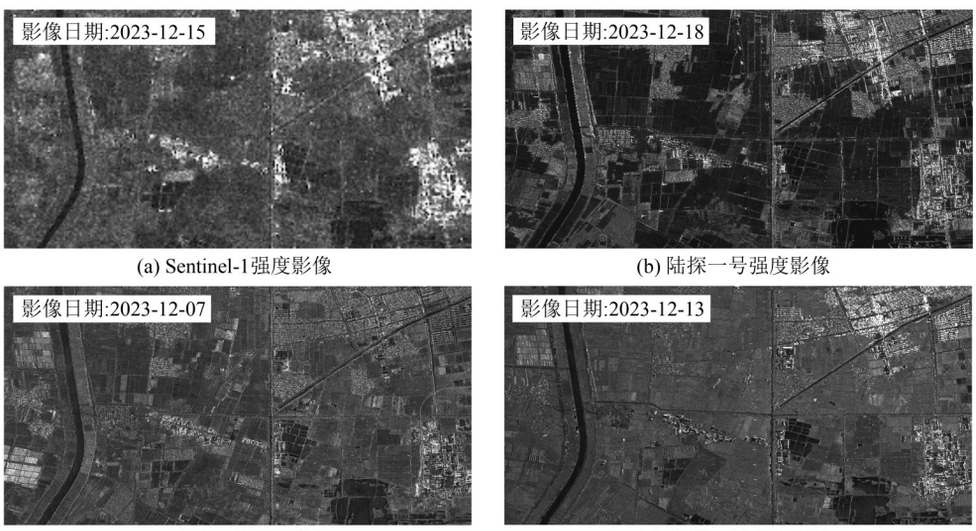
Fig. 1　Satellite Image Coverage and Topographic Profile of the Study Area (The Provincial Boundary Data Comes from the National Geomatics Center of China)

表2　4组SAR卫星影像成像时间

Table 2　Imaging Time of Four SAR Satellites Images

卫星	飞行轨道	影像日期
Sentinel-1	升轨	2023-12-15、2023-12-27、2024-01-20、2024-02-01、2024-02-13
陆探一号	升轨	2023-12-18、2024-01-15、2024-02-12
涪城一号	降轨	2023-12-07、2023-12-29、2024-01-09、2024-01-31
宏图一号	升轨	2023-12-13、2023-12-28、2024-01-27、2024-02-11

像为基准,将同一卫星获取的雷达单视复数数据配准到同一影像空间;将配准后的影像两两组合进行干涉处理,利用哥白尼数字高程模型去除参考相位;再进行相位解缠和地理编码,最终得到地理坐标系下解缠后的干涉测量结果,表征地表在卫星视线方向(line of sight,LOS)上的相对形变。选取与国产卫星影像获取时间接近的Sentinel-1卫星数据作为对照,分别从干涉相干性、相位闭合误差以及矿区地表形变监测结果3个方面进行对比分析。



(a) Sentinel-1强度影像 (b) 陆探一号强度影像

(c) 涪城一号强度影像 (d) 宏图一号强度影像

图2 4组卫星张双楼矿区SAR强度影像对比

Fig. 2 Comparison of SAR Intensity Images of Zhangshuanglou Mining Area from Four Satellites

1)干涉相干性

干涉相干性被用于衡量卫星多次观测时雷达回波信号的相似程度,是评估干涉质量、相位测量不确定性的关键指标[17-18]。影响干涉相干性的因素包括卫星空间基线、重复观测时地表覆盖变化情况等。本文选取同一区域、相近成像时间和时间基线的干涉对,采用同样的参数计算4组卫星InSAR干涉图的相干性,并进行统计分析。

2)相位闭合误差

InSAR干涉相位应符合闭合相位一致性原则[19-20]。闭合相位的计算公式如下:

$$\varphi_{ijk}=\varphi_{i,j}+\varphi_{j,k}-\varphi_{i,k} \tag{1}$$

式中,φ_{ijk}为闭合相位,i、j和k表示卫星影像的不同成像时刻;$\varphi_{i,j}$代表单个像素在卫星i、j成像时刻的干涉相位。时间上形成环路的3幅干涉图的闭合相位理论上应为0,当其不为0时,表明存在相位闭合误差[21]。本文将同一区域内所有像素相位闭合误差的标准差作为干涉质量的评价指标之一。

3)形变监测结果

通过对4组SAR卫星地表形变监测得到的形变区域面积、速率极值等进行比较,反映不同卫星的形变探测能力。本文将同一区域的监测结果重采样至相同的空间分辨率,并利用成像几何参数将卫星LOS向形变投影至垂直方向,计算两两组合之间的皮尔逊相关系数,分析监测结果之间的相关性情况。

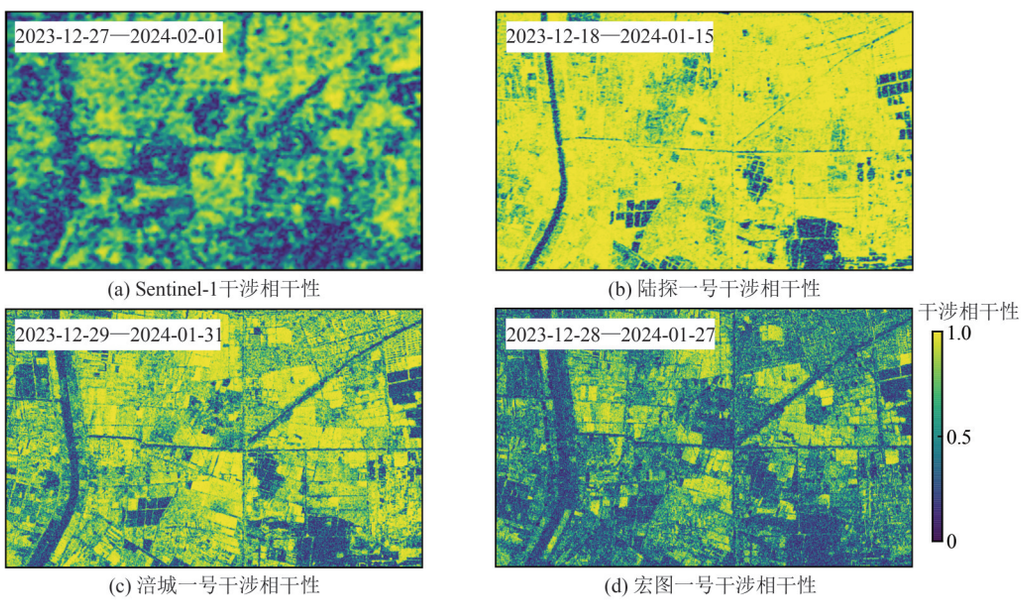
2 国产SAR干涉测量地表形变监测结果

2.1 干涉相干性比较

选取同一季节(冬季)沛县张双楼煤矿矿区的InSAR干涉相干性结果进行比较,结果见图3。4幅干涉图的时间基线分别为36 d(Sentinel-1)、28 d(陆探一号)、33 d(涪城一号)和30 d(宏图一号),进行相干性计算时,选用同样大小的计算窗口(7×7)。陆探一号因其雷达波长更长(L波段),显示出最佳的相干性;X波段的宏图一号受去相干噪声影响最为显著;处于C波段的Sentinel-1和涪城一号相干性表现居中。

统计4组卫星干涉相干性区间分布情况,如图4(a)所示。陆探一号和涪城一号的相干性峰值位于(0.9,1]区间内,Sentinel-1相干性峰值位于(0.8,0.9]区间,而宏图一号在(0.2,0.9]区间内分布均匀,峰值出现在(0.3,0.4]区间内。以0.4为相干性阈值进行统计,陆探一号干涉图上超过95%的像素具有较好的相干性,而宏图一号卫星占比最低,约为64%。4组卫星得到的干涉图相干性

的箱线图如图4(b)所示,箱体中部的横线表征4组卫星相干性结果的中位数,分别为0.53(宏图一号)、0.63(Sentinel-1)、0.82(涪城一号)和0.96(陆探一号),陆探一号卫星干涉结果的相干性整体上高于其他卫星。矩形箱体的上下缘分别代表上下四分位数,二者围成的箱体涵盖了相干性统计分布在25%~75%范围内的像素,陆探一号卫星结果箱体上下缘间距最小,分布最集中;箱线结构两端的短横线分别表示剔除异常值之后的最大、最小值,统计结果显示,陆探一号卫星的相干性最小值结果也高于其他各组卫星。相较于Sentinel-1卫星,拥有更高空间分辨率的涪城一号卫星影像的相干性结果的中位数更高,整体分布也更加集中。

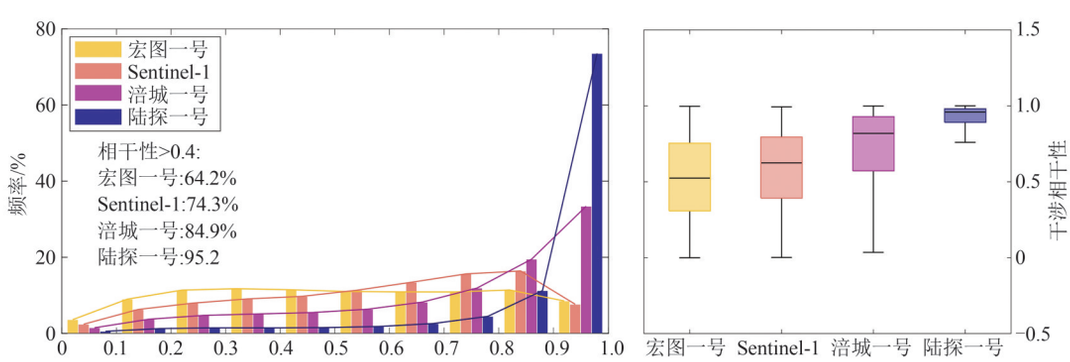


(a) Sentinel-1干涉相干性　(b) 陆探一号干涉相干性

(c) 涪城一号干涉相干性　(d) 宏图一号干涉相干性

图3　4组SAR卫星张双楼矿区干涉相干性结果

Fig. 3　Interferometric Coherence Results of Four SAR Satellites in Zhangshuanglou Mining Area



(a) 干涉相干性区间分布直方图　(b) 干涉相干性箱线图

图4　4组SAR卫星张双楼矿区干涉相干性分布情况

Fig. 4　Coherence Coefficient Distribution of Four SAR Satellites in Zhangshuanglou Mining Area

2.2　相位闭合误差比较

对4组卫星获得的SAR影像分别进行差分干涉处理,生成的干涉图构成时间上的闭合环路,计算张双楼煤矿研究区相位闭合误差的标准差,如表3所示。闭合误差的标准差越小,表明SAR卫星相位干涉结果质量越高。考虑到干涉图多视及滤波处理对相位闭合误差的影响[22],除中分辨率Sentinel-1卫星(多视比5:1)外,其他3组高分辨国产SAR卫星影像干涉处理多视比均为2:2。

由表3可知,陆探一号卫星的相位闭合误差标准差最小,约为0.78 rad,涪城一号和Sentinel-1卫星的相位闭合误差标准差相近,分别为1.49 rad和1.69 rad;宏图一号卫星闭合误差标准差最大,达到3.49 rad。相位闭合误差易受到电磁波属性、地面散射体特征等因素影响,宏图一号卫星X波段SAR数据易受去相干噪声影响,L波段的陆探一号卫星表现最佳,工作在C波段的涪城一号与Sentinel-1卫星居中。由相位闭合误差标准差指

表3 张双楼矿区干涉相位闭合误差标准差统计表

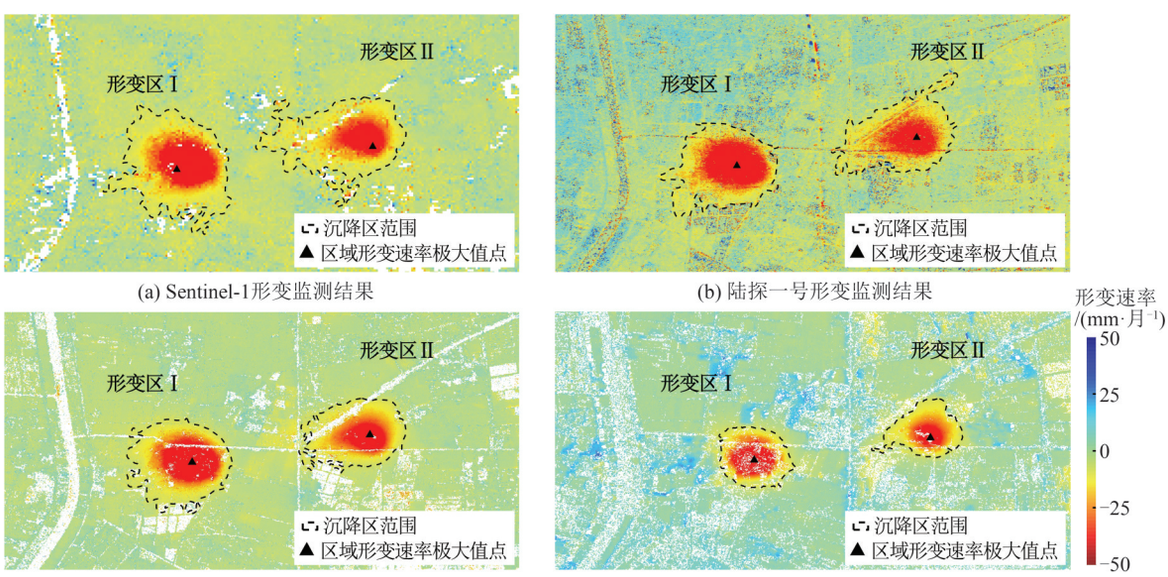
Table 3 Standard Deviations of Phase Closure Loop Errors in Zhangshuanglou Mining Area

卫星	闭合环时间基线	相位闭合误差标准差/rad
Sentinel-1	2023-12-15—2024-01-20—2024-02-13	1.69
陆探一号	2023-12-18—2024-01-15—2024-02-12	0.78
涪城一号	2023-12-07—2024-01-09—2024-01-31	1.49
宏图一号	2023-12-13—2024-01-27—2024-02-11	3.49

标对比分析得到的结果与干涉相干性对比结果一致。

2.3 地表形变监测结果比较

利用差分InSAR获取研究区地表形变,根据线性拟合获取矿区的月平均形变速率,4组SAR卫星监测得到的卫星LOS向地表形变速率结果如图5所示。4组干涉结果相位解缠时相干性掩膜阈值设置为0.4。由于L波段波长较长,水体区域可能存在相干性大于0.4而未被掩膜的情况,因此导致图5(b)中存在少量解缠误差。该区域内监测到两个典型漏斗状沉降区,地理位置与张双楼煤矿矿区一致,地下采矿活动是该区域地面沉降的主要原因。



(a) Sentinel-1形变监测结果 (b) 陆探一号形变监测结果

(c) 涪城一号形变监测结果 (d) 宏图一号形变监测结果

图5 张双楼矿区InSAR地表形变速率结果

Fig. 5 InSAR Ground Deformation Rate Results of Zhangshuanglou Mining Area

图5中分别标注了以-10 mm/a速率等值线划定的沉降区范围以及两个沉降区中形变速率极大值的位置。4组卫星监测结果的形变区域范围和速率极大值位置并不完全一致,形变速率及沉降区面积统计结果分别如表4和图6所示。

由表4可知,相较而言,形变区Ⅰ的面积和最大速率均大于形变区Ⅱ。虽然各组卫星获得的矿区沉降区面积存在差异,但在每组卫星结果内,形变区Ⅰ的面积均是形变区Ⅱ面积的1.1~1.2倍。陆探一号结果的局部形变速率极大值最大,在形变区Ⅰ和Ⅱ分别达到了-142 mm/月和-100 mm/月,宏图一号结果最小,分别为-100 mm/月和-74 mm/月。由图6可知,4组卫星监测得到的形变速率中位数较为接近,分别为-18 mm/月(Sentinel-1)、-25 mm/月(陆探一号)、-23 mm/月(涪城一号)和-24 mm/月(宏图一号)。

统计4组地表形变速率监测结果之间的皮尔逊相关系数,如图7所示。其中右上三角为相关性热力图,表征不同卫星组合之间形变速率的相关系数大小;左下三角为散点图,表示垂直方向上归一化形变速率相关性结果,离散点颜色代表其样本密度。

皮尔逊相关系数被用于度量两组变量之间的相关程度,其绝对值越接近1,反映二者之间的相关性(或负相关性)越高。两两组合之间的皮尔逊相关系数显示(图7),4组卫星监测结果之间的一致性较好。其中,涪城一号、宏图一号与Sentinel-1卫星监测结果之间的相关性最高,分别达到0.90和0.91;陆探一号与涪城一号、Sentinel-1卫星之间的相关性在0.75左右,与宏图一号之间的

表4　4组SAR卫星监测结果形变速率及沉降区面积统计表

Table 4　Statistics of Deformation Rate and Subsidence Area of Four SAR Satellites

SAR卫星	形变区Ⅰ		形变区Ⅱ	
	区域形变速率极大值/(mm·月$^{-1}$)	形变区面积/km^2	区域形变速率极大值/(mm·月$^{-1}$)	形变区面积/km^2
Sentinel-1	−119	1.66	−82	1.50
陆探一号	−142	1.28	−100	1.21
涪城一号	−129	1.24	−87	1.00
宏图一号	−100	0.64	−74	0.55

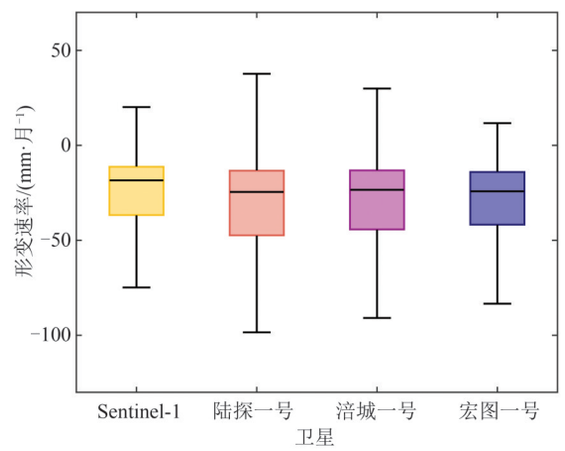


图6　4组SAR卫星张双楼矿区地表形变速率箱线图

Fig. 6　Box Plots of Ground Deformation Velocity Rates in Zhangshuanglou Mining Area Using Four SAR Satellites

相关性为0.45,在所有组合中相较而言最低,推测是由其波长差异导致的;涪城一号与宏图一号的监测结果之间的相关性为0.68。由监测结果的样本量可以看出,3组国产SAR卫星以其高空间分辨率的优势,可以提供更加丰富的地表形变细节。国产SAR卫星干涉测量结果可靠,在矿区地表形变监测应用中具有巨大潜力。

3　多源SAR卫星地表形变分解

InSAR观测结果是地物目标形变在卫星LOS向上的投影,单一观测无法获取监测目标的真实三维形变信息[23]。多卫星星座可提供同一区域多个LOS向的观测信息,用于构建三维形变分解模型[24]。然而由于SAR卫星侧视成像,运行在太阳同步轨道上LOS向的几何结构相似,观测独立性差,导致难以准确分离三维形变分量。文献[25]研究表明,在当前SAR卫星星座观测几何条件下,忽略监测目标的南北方向形变、仅获取垂直及东西方向形变,可以显著改善形变分解模型的条件数,从而降低模型对数据误差的敏感度。本文综合利用4组卫星观测数据开展形变二维分解,公式如下:

$$\begin{pmatrix} D_{\mathrm{E}} \\ D_{\mathrm{U}} \end{pmatrix} = \left(-\sin\theta_i \cos\alpha_i,\ \cos\theta_i \right)^{-1} \cdot D_{\mathrm{LOS}_i} \tag{2}$$

式中D_{E}、D_{U}分别为目标点东西向和垂直方向的形变;D_{LOS_i}为包含4组卫星LOS向形变的列向量;θ_i、α_i分别表示4组卫星的航向角与雷达波入射角。

利用最小二乘方法提取矿区地表二维形变信息,结果如图8所示。由图8可以看出,张双楼矿区的形变区Ⅰ、Ⅱ均以垂直沉降为主,最大沉降速率分别为−120 mm/月和−85 mm/月。两个形变区的边缘均存在水平方向位移,表现为西侧向东、东侧向西的趋势,形变区Ⅰ和形变区Ⅱ的最大水平位移速率分别为36 mm/月、−39 mm/月和28 mm/月、−22 mm/月(东向位移为正)。可见,国产SAR卫星为矿区地表形变精细刻画提供了数据保障。

4　结　语

本文以欧洲空间局Sentinel-1卫星数据为参考,从干涉相干性、相位闭合误差及形变速率一致性等方面对陆探一号、涪城一号、宏图一号3组国产SAR卫星地表形变差分InSAR监测结果进行比较。分析表明,3组国产干涉SAR卫星具有良好的形变测量能力,具体表现在:

1) L波段的陆探一号卫星干涉测量结果相干性最好,X波段的宏图一号受去相干噪声影响显著,C波段的涪城一号相干性表现居中;陆探一号干涉图中超过95%像素的相干性大于0.40,这一比例在涪城一号和宏图一号上分别为85%和64%,三者相干性中位数分别为0.96、0.82和0.53。

2) 干涉相位闭合误差的标准差表征SAR干涉结果质量,3组卫星干涉相位闭合误差的标准差分别为0.78 rad(陆探一号)、1.49 rad(涪城一号)和3.49 rad(宏图一号)。由相位闭合误差标准差指标对比分析得到的结论与干涉相干性对

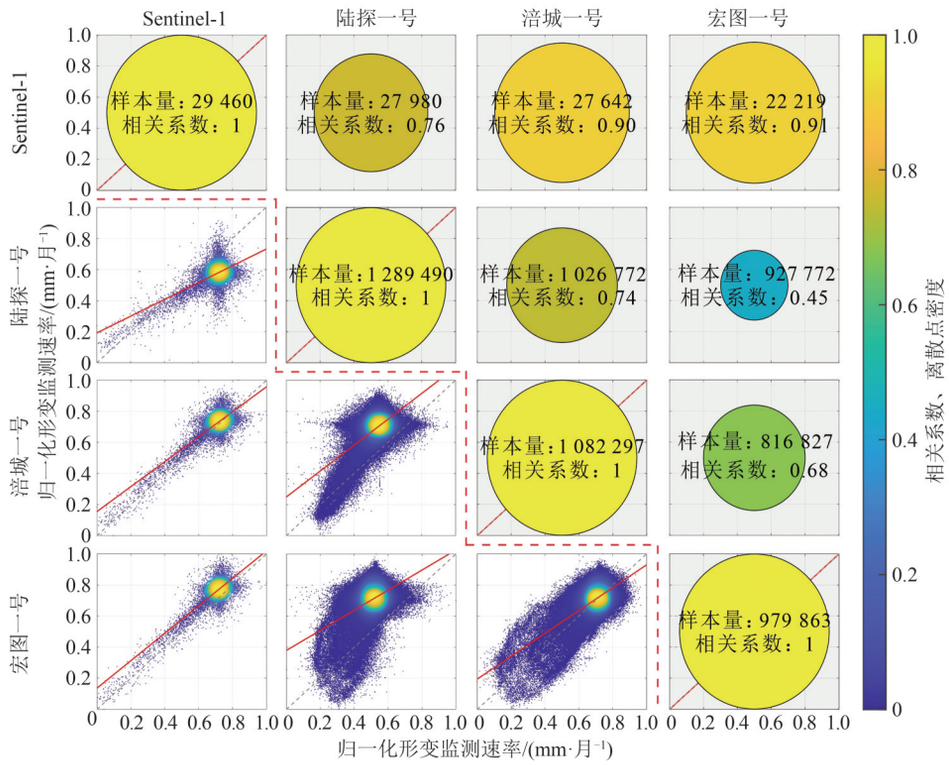
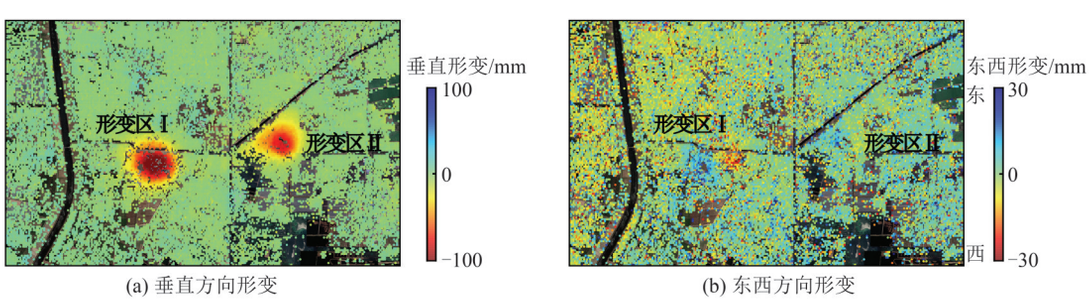


图7 4组SAR卫星张双楼矿区地表形变速率相关性统计

Fig. 7 Correlation Statistics of Ground Deformation Velocity Rates in Zhangshuanglou MiningArea from Four SAR Satellites



(a) 垂直方向形变 (b) 东西方向形变

图8 张双楼矿区地表垂直、东西方向InSAR形变结果

Fig. 8 InSAR Deformation Results of the Vertical and East-West Directions of Zhangshuanglou Mining Area

比结果一致。

3) 3组国产SAR卫星均监测到张双楼煤矿矿区2024年1月的两个漏斗状沉降区。虽各组卫星获得的矿区沉降区面积和区域形变极值之间存在差异,但监测结果之间的一致性较高,陆探一号与宏图一号之间的相关性0.45在所有组合中相较最低,推测是由其波长差异导致的。

4) 利用多源卫星观测数据对卫星LOS向形变测量结果进行垂直、水平方向的二维分解,获得张双楼煤矿两个形变区的形变情况。两个变形区均以垂直沉降为主,最大沉降速率分别为−120 mm/月和−85 mm/月,变形区边缘均存在水平方向位移,表现为西侧向东、东侧向西的趋势。国产SAR卫星为矿区地表形变精细刻画提供了数据保障。

除上述卫星外,其他国产干涉SAR卫星系统,如高分三号业务星、“神启号”等天仪系列卫星以及“水利一号”等航天宏图“女娲星座”,也展现出了显著的干涉测量应用潜力。未来,高分辨率国产干涉SAR卫星将在全球测图、广域地表形变监测、基础设施安全管控、三维形变精细刻画等领域凸显技术优势。随着影像数据的持续积累和产品业务化服务的不断深化,国产SAR卫星将成为构建自主可控的天基观测体系的关键力量,有效提升中国在地表形变监测领域的技术水平与应用能力。

致谢:感谢欧洲空间局提供的Sentinel-1卫星数据、自然资源部国土卫星遥感应用中心提供的

陆探一号卫星数据、天仪研究院提供的涪城一号数据和航天宏图信息技术股份有限公司提供的宏图一号卫星数据。

参 考 文 献

[1] OHENHEN L O, SHIRZAEI M, OJHA C, et al. Disappearing Cities on US Coasts[J]. *Nature*, 2024, 627(8002): 108-115.

[2] BIGGS J, WRIGHT T J. How Satellite InSAR Has Grown from Opportunistic Science to Routine Monitoring over the Last Decade[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 3863.

[3] AO Z R, HU X M, TAO S L, et al. A National-Scale Assessment of Land Subsidence in China's Major Cities[J]. *Science*, 2024, 384(6693): 301-306.

[4] XIAO R Y, JIANG M, LI Z H, et al. New Insights into the 2020 Sardoba Dam Failure in Uzbekistan from Earth Observation[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, 107: 102705.

[5] 肖儒雅, 何秀凤. 时序InSAR水库大坝形变监测应用研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(9): 1334-1341.
XIAO Ruya, HE Xiufeng. Deformation Monitoring of Reservoirs and Dams Using Time-Series InSAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(9): 1334-1341.

[6] 李振洪, 朱武, 余琛, 等. 雷达影像地表形变干涉测量的机遇、挑战与展望[J]. 测绘学报, 2022, 51(7): 1485-1519.
LI Zhenhong, ZHU Wu, YU Chen, et al. Interferometric Synthetic Aperture Radar for Deformation Mapping: Opportunities, Challenges and the Outlook[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(7): 1485-1519.

[7] 宋鑫友, 张磊, 李涛, 等. 陆探一号干涉SAR在轨测试阶段基线精化与DEM精度分析[J]. 测绘学报, 2024, 53(10): 1920-1929.
SONG Xinyou, ZHANG Lei, LI Tao, et al. Baseline Refinement and DEM Accuracy Analysis During the In-Orbit Test Phase of LT-1 SAR[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2024, 53(10): 1920-1929.

[8] 唐新明, 李涛, 张祥, 等. L波段差分干涉SAR卫星在轨应用关键参数测试分析[J]. 测绘学报, 2024, 53(10): 1863-1872.
TANG Xinming, LI Tao, ZHANG Xiang, et al. In-Orbit Application Parameters Test and Analysis of L-Band Differential Interferometric SAR Satellite Constellation[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2024, 53(10): 1863-1872.

[9] 楼良盛, 刘志铭, 张昊, 等. 天绘二号卫星关键技术[J]. 测绘学报, 2022, 51(12): 2403-2416.
LOU Liangsheng, LIU Zhiming, ZHANG Hao, et al. Key Technologies of TH-2 Satellite System[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(12): 2403-2416.

[10] 张宇, 赵齐乐, 蒋科材, 等. 基于BDS-3的陆地探测一号星间基线高精度解算方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(10): 1763-1769.
ZHANG Yu, ZHAO Qile, JIANG Kecai, et al. High-Precision Inter-Satellite Baseline Determination Method for Lutan-1 Based on BDS-3[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(10): 1763-1769.

[11] 李涛, 唐新明, 李世金, 等. L波段差分干涉SAR卫星基础形变产品分类[J]. 测绘学报, 2023, 52(5): 769-779.
LI Tao, TANG Xinming, LI Shijin, et al. Classification of Basic Deformation Products of L-Band Differential Interfero-Metric SAR Satellite[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2023, 52(5): 769-779.

[12] DENG Y K, ZHANG H, LIU K Y, et al. Hongtu-1: The First Spaceborne Single-Pass Multibaseline SAR Interferometry Mission[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2024, 63: 5202518.

[13] FENG S M, DAI K R, SUN T G, et al. Mini-Satellite Fucheng 1 SAR: Interferometry to Monitor Mining-Induced Subsidence and Comparative Analysis with Sentinel-1[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(18): 3457.

[14] 李永生, 李强, 焦其松, 等. 陆地探测一号SAR卫星星座在地震行业的应用与展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(10): 1741-1752.
LI Yongsheng, LI Qiang, JIAO Qisong, et al. Application of Lutan-1 SAR Satellite Constellation to Earthquake Industry and Its Prospect[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(10): 1741-1752.

[15] 刘斌, 张丽, 葛大庆, 等. 陆地探测一号卫星滑坡大变形InSAR监测应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(10): 1753-1762.
LIU Bin, ZHANG Li, GE Daqing, et al. Application of InSAR Monitoring Large Deformation of Landslides Using Lutan-1 Constellation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(10): 1753-1762.

[16] 许兵, 朱焱, 李志伟, 等. 国产卫星时序InSAR形变监测精度分析[J]. 测绘学报, 2024, 53(10): 1930-1941.

XU Bing, ZHU Yan, LI Zhiwei, et al. Analysis of InSAR Time-Series Deformation Monitoring Accuracy of Domestic Satellite[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2024, 53(10): 1930-1941.

[17] JIANG M, DING X L, LI Z W. Hybrid Approach for Unbiased Coherence Estimation for Multitemporal InSAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(5): 2459-2473.

[18] 李振洪, 宋闯, 余琛, 等. 卫星雷达遥感在滑坡灾害探测和监测中的应用: 挑战与对策[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 967-979.
LI Zhenhong, SONG Chuang, YU Chen, et al. Application of Satellite Radar Remote Sensing to Landslide Detection and Monitoring: Challenges and Solutions[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 967-979.

[19] ZHANG Y J, FATTAHI H, AMELUNG F. Small Baseline InSAR Time Series Analysis: Unwrapping Error Correction and Noise Reduction[J]. *Computers and Geosciences*, 2019, 133: 104331.

[20] MORISHITA Y, LAZECKY M, WRIGHT T, et al. LiCSBAS: An Open-Source InSAR Time Series Analysis Package Integrated with the LiCSAR Automated Sentinel-1 InSAR Processor[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(3): 424.

[21] 李永生, 张景发, 李振洪, 等. 时序InSAR离散相干点相位解缠误差检查与校正方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(10): 1199-1203.
LI Yongsheng, ZHANG Jingfa, LI Zhenhong, et al. Detection and Correction of Phase Unwrapping Errors in InSAR Time Series Analysis with Discrete Coherent Points[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(10): 1199-1203.

[22] 龚志强, 董杰, 廖明生. InSAR非零闭合相位产生机制及其对形变测量影响规律研究[J]. 遥感学报, 2024, DOI: 10.11834/jrs.20243500.
GONG Zhiqiang, DONG Jie, LIAO Mingsheng. Nonzero Closure Phase and Its Impact on InSAR Deformation Measurement[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2024, DOI: 10.11834/jrs.20243500.

[23] 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.
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.

[24] HU J, LI Z W, DING X L, et al. Resolving Three-Dimensional Surface Displacements from InSAR Measurements: A Review[J]. *Earth Science Reviews*, 2014, 133: 1-17.

[25] FUHRMANN T, GARTHWAITE M C. Resolving Three-Dimensional Surface Motion with InSAR: Constraints from Multi-Geometry Data Fusion[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(3): 241.