

文章编号:1672-9331(2018)03-0079-06

某钻井水溶开采矿区地表形变 D-In SAR 监测精度分析

贺跃光, 刘 聪, 邢学敏

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要: 为了研究矿区地表形变以及沉降漏斗的生成机理、过程和趋势, 获取沉陷发展规律, 以及及时采取有效措施进行生态重建, 采用 D-In SAR 对某钻井水溶矿区进行了监测。选取某钻井水溶矿区地表 2015—2017 年 Sentinel-1A 影像构成 2 个干涉影像对, 进行地表形变监测。在 SAR Scape 软件平台, 针对 D-In SAR 干涉影像的基线误差、大气误差和地形误差等, 通过干涉影像对配准、基线估计、滤波去噪和相位解缠, 获取矿区地表形变图; 借助 ArcGIS 空间分析工具和 MATLAB 软件, 与水准测量数据进行叠加, 分析沉陷区域的空间动态分布。然后进行 D-In SAR 形变数据和矿区水准沉降监测精度、相关性和误差源分析。研究结果表明, 精细化 D-In SAR 监测与水准观测的形变趋势一致, 达到了水溶矿山地表沉降体积的获取精度要求。

关键词: 钻井水溶开采; 矿区地表形变; D-InSAR 监测; 精度分析; 精细化; 误差分析

中图分类号: P227

文献标识码: A

Precision analysis of surface deformation D-In SAR monitoring in a drilling water-soluble mining area

HE Yue-guang, LIU Cong, XING Xue-min

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and
Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to study the formation mechanism, process and trend of surface deformation, settlement funnel in mining area, obtain the law of the development of subsidence, and take effective measures to carry out ecological reconstruction in time, the D-In SAR is used to monitor the water soluble mining area. Sentinel-1A image data from 2015 to 2017 is selected as the interference image data, constituting two interference image pairs, making surface deformation monitoring. According to the defects of baseline error, atmosphere error, terrain error and time losing correlation of the interferometry images, taking the SAR scape software as the study platform, based on the fine two-pass D-In SAR mode, the

收稿日期: 2018-03-06

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41701536); 湖南省自然科学基金青年基金项目(2017JJ3322); 道路灾变防治及交通安全部工程研究中心开放基金资助项目(KFJ150402); 长沙理工大学公路养护技术国家工程实验室开放基金资助项目(kfj150105)

通讯作者: 贺跃光(1966—), 男, 湖南益阳人, 长沙理工大学教授, 博士, 主要从事大地测量和变形监测方面的研究。
E-mail: hyg@csust.edu.cn

interferometry images are processed by using registration method, baseline estimation method and phase unwrapping method, control point selection, orbital refining and re-leveling, got mine deformation map. With Arc GIS Spatial Analysis Tools and MATLAB software, overlay with leveling data, analysis of mining subsidence area of the spatial distribution of dynamic location. Accuracy and correlation analysis of D-In SAR deformation data and mining subsidence monitoring and error source analysis. The results show that from coarse to fine streamline D-In SAR monitoring results consistent with the deformation of the observed results, to meet the requirements of watermelon surface settlement volume acquisition accuracy.

Key words: water-soluble mining; surface deformation; D-In SAR monitoring; accuracy analysis; fine; error analysis

钻井水溶法开采投资少、见效快,生产费用和能耗低,环境污染相对较低。钻井水溶开采在地下形成大规模溶腔,并随开采范围增大而导致上覆岩层与地表移动,破坏含水地层、农作物与建(构)筑物,威胁居民生命安全^[1,2]。

钻井水溶开采矿山一般范围较大,而地表形变相对较为平缓。差分干涉测量技术(D-In SAR)通过比较地表形变前、后干涉图的相位差来监测地表目标位移,具有监测地球表面微小形变能力。D-In SAR技术获取较高精度的地表垂直形变信息,相对于传统水准测量、GPS差分测量、全站仪三角高程测量等,具有高分辨率、高覆盖度、全天候测量、低成本等优点^[3]。

2012年,Fitra Ismaya等人^[4]采用D-InSAR技术研究了美国State of Utah Book Cliffs煤矿,得到了矿区地表的三维形变图,与传统测量方法的结果基本一致。2013年,A Sowter等^[5]采用多视化处理和低解析方法改进D-InSAR技术,监测南德比郡和莱斯特郡煤田的地表沉降,反演出大范围地表变形的线性分量。2014年,F.Ardizzone等人^[6]调用19年的ERS-1/2和ENVISAT数据,利用D-InSAR技术获取地表变形时间序列,结合地质数据,反演了矿山地表形变数值模型。2015年,M.Przytucka等^[7]选用高分辨率TerraSAR-X卫星影像,利用差分合成孔径雷达干涉测量(D-InSAR)方法,获取了波兰西里西亚煤炭盆地开采沉陷规律。2016年,J.Mura等人^[8]融合D-InSAR和持久散射干涉测量(PSI)技术,对巴西亚马逊地区露天铁矿地面变形研究,检测出高速率非线性地面移动。作者利用D-InSAR,结合高分辨率SAR数据,对钻井水溶矿区

进行精确监测,以获取试验区域距离向和方位向的二维形变时间序列,并将获得的结果与已有的观测结果进行比较,来验证In SAR技术适用于钻井水溶开采矿山地表形变的实时快速监测。

1 矿区D-In SAR监测

某钻井水溶矿区面积达5 km²,矿区地形平坦,地处平原中部,海拔37.84~43.32 m。地表主要为农田,间有大小水塘多个,人工渠道纵横交叉。自然村落散布全区,人口稠密。该矿山从2002年开始不间断开采,开采矿量近100万t/年。

矿区采用D-InSAR监测,综合开采平面分布图和开采进度计划表,进行精细化分析。并结合水准测量数据,验证D-In SAR沉降监测精度,分析误差影响因素。

1.1 D-In SAR数据处理

某钻井水溶开采矿山地表D-In SAR形变监测,通过SAR Scape软件,结合DEM数据,影像资料经子区裁剪—基线估算—干涉图生成—自适应滤波和相干性计算—相位解缠—控制点选择—轨道精炼和重去平—相位转形变和地理编码等流程(如图1所示),监测矿区地形形变。

采用2015—2017年幅宽为250 km的Sentinel-1A影像数据,两井SAR影像的基线满足干涉处理要求,将其两两组合形成多个干涉对(如表1所示),进行数据处理。

从表1可知,两次试验数据空间基线小于临界基线值6 474.081 m,基线估算D-In SAR一个相位变化周期的地形变化为0.028 m。输入地理坐标进行数据裁剪,裁剪范围为,东端:E 111°54′;西端:E 111°36′;南端:N 29°48′;北端:N 29°33′。

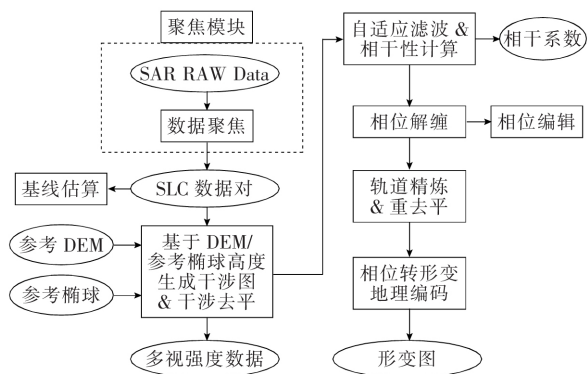


图 1 D-In SAR 数据处理流程图

Fig. 1 D-In SAR data processing flow chart

表 1 Sentinel-1A 影像数据对

Table 1 Sentinel-1A image data pairs

编号	主影像	辅影像	时间间隔/d	空间基线
试验 1	2015-12-24	2016-12-18	360	140.166
试验 2	2016-12-18	2017-08-27	252	9.265

根据制图分辨率及数据头文件信息,自动计算距离向和方位向视数之比为 5 : 1,生成如图 2 所示的干涉图和图 3 所示的去平干涉图。

为提高干涉条纹清晰度,减少由空间基线或时间基线引起的失相干噪声,需采用滤波处理。常用的滤波方法包括 Boxcar 滤波、Adaptive 滤波及 Goldstein 滤波,采用合适的滤波方法能够抑制斑点噪声并保持干涉图条纹细节。

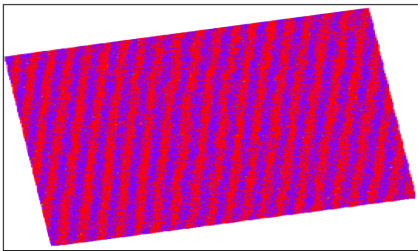


图 2 包含所有相位信息的干涉图

Fig. 2 Contains interference of all phase information

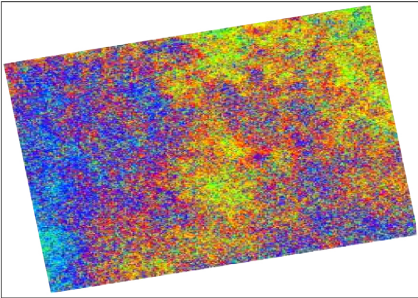
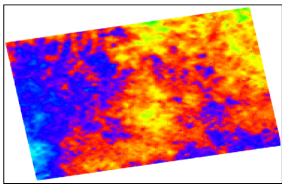


图 3 去平后的干涉图

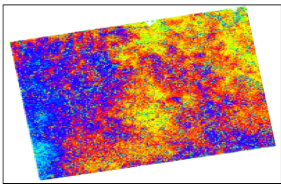
Fig. 3 Interference after the interference map

图 4 所示为 3 种滤波方法的去噪结果图。图 5 所示为 3 种滤波方法的相干系数图。

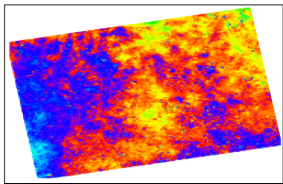
由图 4,5 可知,Boxcar 滤波方法的干涉图中,大量的斑点噪声和有效细节信息被去除,平滑度很高;相干系数图对比度较大,颜色局部较暗淡,相干性太低,影响数据处理精度。Boxcar 滤波效果太差,故不宜差分干涉图去噪。



(a) Boxcar 滤波



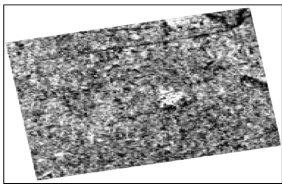
(b) Adaptive 滤波



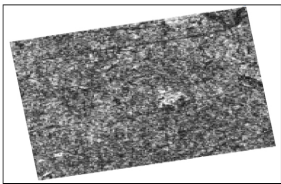
(c) Goldstein 滤波

图 4 滤波去噪结果图

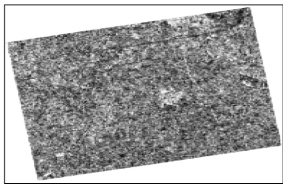
Fig. 4 Filter denoising result graph



(a) Boxcar 滤波



(b) Adaptive 滤波



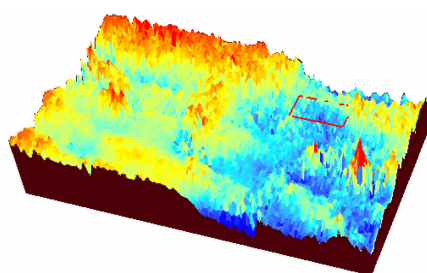
(c) Goldstein 滤波

图 5 滤波相干系数图

Fig. 5 Filter coherence coefficient

Adaptive 滤波方法的干涉图含有大量的斑点噪声、条纹形变和位移,平滑度太低,图质模糊,边缘杂乱;相干系数对比度较小,颜色最暗,浅亮色部分较少,说明相干性较差。Adaptive 滤波方法适宜更高分辨率的影像数据的去噪。Goldstein 滤波方法的干涉图大量斑点噪声被剔除,保留的条纹细节信息较清晰明朗,平滑度较好;相干系数图相对 Adaptive 滤波颜色较亮,整体突变小,滤波效果较好。

根据本次试验的干涉图和相干性图情况,差分干涉图选用 Goldstein 滤波方法去噪。然后进行解缠处理,解决 2π 模糊问题,使之与线性变化的地形信息对应。将合成相位转换成形变数据,地理编码转换到制图坐标系统中,获取如图 6 所示的矿区地表形变图。



(a) 矿区地表形变图

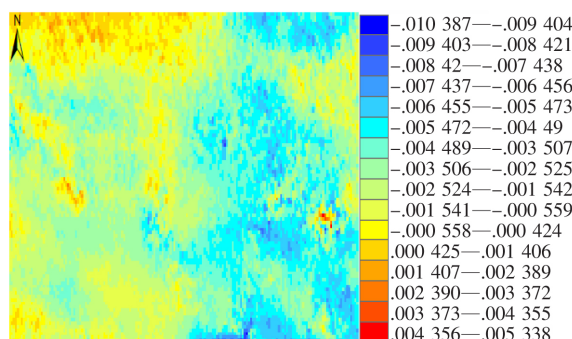
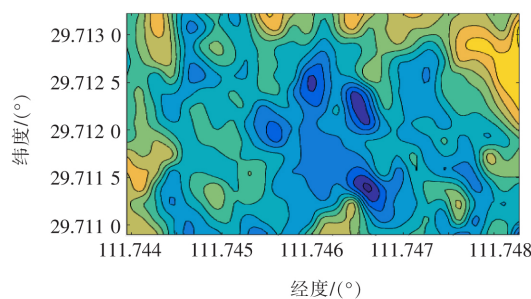


图 6 矿区地表形变图

Fig. 6 Mine surface deformation map

1.2 D-In SAR 监测结果

对矿区地表形变图进行整体三维成像处理(见图 7(a))后,发现矿区东部整体呈下沉趋势。借助 MATLAB 工具,精细化提取 $450\text{ m} \times 250\text{ m}$ 区域,生成等高线图(见图 7(b))。图 7 表明,矿区东部存在一系列成梅花桩分布的沉降漏斗,半径为 25 m 左右。



(b) 等高线图

图 7 水溶矿山地表三维形变图

Fig. 7 3D deformation of water-soluble mine surface map

2 矿区 D-In SAR 精度分析

为验证 D-In SAR 计算精度,将该矿区地表沉降水准测量数据与 D-In SAR 计算结果进行对比。D-In SAR 数据为栅格数据(见图 8)。选取 91 个水准实测点(见图 9),将其统一成相同数据格式进行分析。

2.1 D-In SAR 监测的精度

采用 Arc GIS 空间分析工具,将栅格数据提取至点,得到输出属性表,包括经纬度信息、水准沉降数据和 D-In SAR 形变数据。

计算 D-In SAR 结果与水准沉降监测结果的差值,分析结果如图 10 所示。由图 10 可知,两者最小差值为 2.9 mm,最大相差值为 1.12 cm。

以 D-In SAR 监测形变值的沉降值为横轴,以水准测量沉降值为纵轴,所监测的 91 个点位的散点分布如图 11 所示。计算相关系数为 0.813 5,一元线性回归拟合斜率接近 1,故 D-In SAR 监测值与水准沉降监测值呈显著的线性关系,表明 D-In SAR 监测结果与水准观测结果的形变趋势基本一致。

中误差计算公式为:

$$M_x = \sqrt{\frac{\sum (x - X_i)^2}{n - 1}} \quad (1)$$

计算垂直方向 x 的高差中误差 $M_x = 12.9\text{ mm}$,表明矿区整体沉降趋势 D-In SAR 监测结果与水准观测结果一致。精细二轨法 D-In SAR 钻井水溶开采矿区沉降监测可靠,其精度可以达到 12.9 mm。

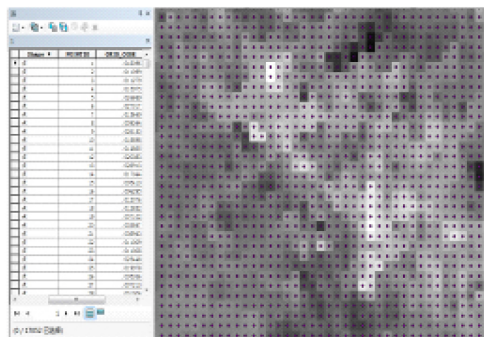


图 8 D-In SAR 监测地表形变栅格数据

Fig. 8 D-In SAR Surface deformation grid data

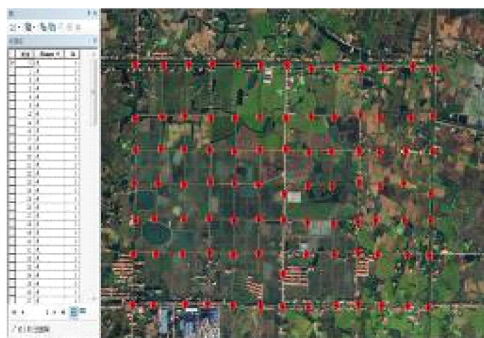


图 9 水准在 Arc GIS 上的沉降数据

Fig. 9 Level settlement on Arc GIS

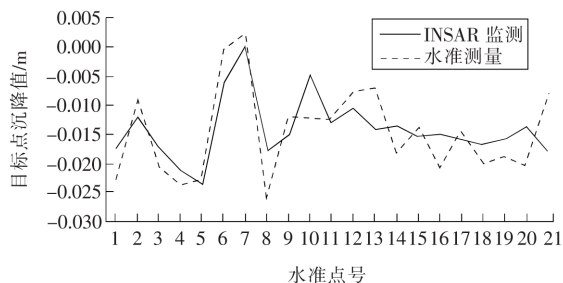


图 10 D-In SAR 监测与水准监测对比分析

Fig. 10 D-In SAR and level monitoring comparative analysis

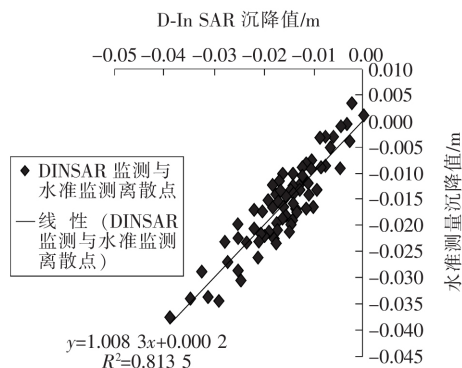


图 11 D-In SAR 与水准沉降数据

Fig. 11 D-In SAR and leveling data

2.2 D-In SAR 测量技术误差源

D-In SAR 技术具有高覆盖度、全天候测量和低成本等优势,影响监测精度的因素^[9,10]如下。

1) 空间不一致。

水准观测是监测一个“点”的沉降信息,而 D-In SAR 得到的是一个像元(在实际中对应 20 m × 20 m)的形变信息,不能完全对应,故存在点位对准误差,影响 D-In SAR 精度。

2) 主辅影像的精配准误差影响。

SAR 数据通过联合两幅单视复数影像(SLC)生成干涉图,需将两幅单视复数影像配准到亚像元的精度。配准误差影响干涉图的相干性,当配准误差达到一个像元时,干涉图会完全失相干;当配准误差小于 0.1 像元时,提高配准精度则对相干性无明显改善^[11,12]。

3) 两轨法误差主要受外部 SRTM DEM 数据 90 m 空间分辨率低、2015—2017 年获取的 SAR 数据与所使用的 2000 年 SRTM DEM 数据时间不同步、数据处理过程主影像与外部 DEM 数据配准等影响。

3 结论

D-In SAR 技术具有全天时、全天候、广覆盖、高分辨率、空间连续性、高度自动化和高精度等优势,适用于钻井水溶开采矿区地表形变的实时快速监测。

1) 精细二轨 D-In SAR 可监测钻井水溶矿区地表微小形变,精度达到 12.9 mm。

2) D-In SAR 技术可以大面积、高精度、面矩阵测量对矿区地表形变进行监测,可以发现未知的地面沉降。D-In SAR 监测结果可以反映一个面的沉降情况,比水准测量的离散点监测更直观、更形象,可以取代钻井水溶矿山传统监测方法。

本研究所提出的由粗到精的精细化监测策略适应于钻井水溶开采矿区地表沉陷体获取的精度要求。

〔参考文献〕

- [1] 王清明.钻井水溶开采与设计[M].北京:化学工业出版社,2016.

- WANG Qing-ming. Drilling water-soluble mining and design [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016.
- [2] 邓宇声. 基于 InSAR 技术的矿区地表沉降监测及预测[D]. 南昌: 东华理工大学, 2017.
- DENG Yu-sheng. Research on surface subsidence monitoring of coal mining area based on D-In SAR technology[D]. Nanchang: East China University of Technology, 2017.
- [3] 甄艾妮. 基于 SBAS-InSAR 技术的北京市地面沉降分析[D]. 北京: 中国地质大学, 2017.
- ZHEN Ai-ni. Analysis of Beijing ground subsidence mechanism based on SBAS-In SAR technology[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017.
- [4] Fitra Ismaya, James Donovan. Applications of DInSAR for measuring mine-induced subsidence and constraining ground deformation mode[R]. USA: GeoCongress, 2012: 3001-3010.
- [5] Sowter A, Bateson L, Strange P, et al. DInSAR estimation of land motion using intermittent coherence with application to the South Derbyshire and Leicestershire coalfields[J]. Remote Sensing Letters, 2013, 4(10): 979-987.
- [6] Przytucka M, Herrera G, Graniczny M, et al. Combination of conventional and advanced DInSAR to monitor very fast mining subsidence with TerraSAR-X data: Bytom City (Poland) [J]. Remote Sensing, 2015, 7(5): 5300-5328.
- [7] Calò F, Ardizzone F, Castaldo R, et al. Enhanced landslide investigations through advanced DInSAR techniques: the Ivancich case study, Assisi, Italy[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 142(3): 69-82.
- [8] Mura J, Paradella W, Gama F, et al. Monitoring of non-linear ground movement in an open pit iron mine based on an integration of advanced DInSAR techniques using TerraSAR-X data[J]. Remote Sensing, 2016, 8(5): 409.
- [9] Jiang L M, Lin H, Ma J W, et al. Potential of small-baseline SAR interferometry for monitoring land subsidence related to underground coal fires: Wuda (Northern China) case study[J]. Remote Sensing of Environment, 2011(115): 257-268.
- [10] 尹宏杰, 朱建军, 李志伟, 等. 基于 SBAS 的矿区形变监测研究[J]. 测绘学, 2011, 41(1): 52-58.
- YIN Hong-jie, ZHU Jian-jun, LI Zhi-wei, et al. Ground subsidence monitoring in mining area using DIn SAR SBAS algorithm[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2011, 41(1): 52-58.
- [11] Miguel C, Andrew J, Hooper R. Surface deformation induced by water influx in the abandoned coal mines in Limburg, the Netherlands observed by satellite radar interferometry[J]. Journal Applied Geophysics, 2013(88): 1-11.
- [12] 魏海霞, 高照忠, 叶长斌. 融合 D-In SAR 技术与 Arc GIS 软件的矿区开采沉陷监测[J]. 金属矿山, 2016(11): 128-131.
- WEI Hai-xia, GAO Zhao-zhong, YE Chang-bin. Mining subsidence monitoring method based on D-In SAR technology and Arc GIS software[J]. Metal Mine, 2016(11): 128-131.