

文章编号:0253-9993(2012)12-2038-05

# DInSAR 动态下沉监测特征点错失问题研究

阎跃观<sup>1,2</sup>,戴华阳<sup>1</sup>,GE Lin-lin<sup>2</sup>,ALEX Hay-Man Ng<sup>2</sup>,LI Xiao-jing<sup>3</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083;2. 新南威尔士大学测绘与空间信息学院,悉尼 2052;3. 新南威尔士大学土木与环境工程学院,悉尼 2052)

**摘要:**本文以开采沉陷基本理论为依据,建立了 DInSAR 和 GPS 联合加密观测工作面推进距离模型,得出了工作面推进过程中的两次加密时间,即地表变形点下沉速度的剧增点和剧减点监测时刻,从而提高了 DInSAR 技术监测地表动态变形的有效性。最后以澳大利亚 West Cliff 煤矿长壁工作面 32 开采期间获取的 DInSAR 和 GPS 数据进行了实例分析。

**关键词:**DInSAR;GPS;地表沉陷;特征点;缺失;模型

**中图分类号:**TD325 **文献标志码:**A

## Problem of dynamic of monitoring subsidence feature points missed by DInSAR technology

YAN Yue-guan<sup>1,2</sup>,DAI Hua-yang<sup>1</sup>,GE Lin-lin<sup>2</sup>,ALEX Hay-Man Ng<sup>2</sup>,LI Xiao-jing<sup>3</sup>

(1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China;2. School of Surveying and Spatial Information Systems, University of New South Wales, Sydney 2052, Australia;3. School of Civil and Environmental Engineering, University of New South Wales, Sydney 2052, Australia)

**Abstract:**The advanced working face model of DInSAR and GPS joint encryption observation was established based on the basic theory of mining subsidence. The two encryption times that are surge point and dramatic reduction point of surface subsidence velocity were obtained from this model. Therefore the effectiveness of surface dynamic deformation monitoring of DInSAR technology was improved. At last DInSAR and GPS data monitored during mining Long wall 32 in West Cliff colliery in Australia were analyzed.

**Key words:**DInSAR;GPS;surface subsidence;feature point;missed;model

下沉盆地中地表点的移动轨迹总体上可以分为 3 个阶段:开始阶段,活跃阶段和衰退阶段。开始阶段地表点下沉速度从 0 增大到 1.67 mm/d,进入活跃阶段,下沉速度继续增大直到最大值,然后减小,当下沉速度刚小于 1.67 mm/d 时,地表点进入衰退阶段<sup>[1]</sup>。DInSAR 技术目前已经成为一种重要的地表沉陷监测手段<sup>[2-5]</sup>,能够动态监测地表移动变形情况,但是卫星存在一定的监测周期,可能会导致非线性变形阶段地表移动变形特征点错失。特别是沉陷区内的重要建筑物,DInSAR 不一定能准确测量出地表变形特征值,因此需要在变形特征点处加强两次传

统的地面测量或者 GPS 测量,此时获取的测量数据有助于提高 DInSAR 技术监测地表动态变形的有效性。但是如果频繁地使用 GPS 进行多次加密观测,又会浪费大量的人力、物力和财力。文献[6-11]表明国内外已经对 DInSAR 和 GPS 数据融合等方面做了大量工作,如罗海滨等利用 DInSAR 和 GPS 互补的特性,采用 Kriging 插值算法对 GPS 结果进行内插,得到了高精度,高空间分辨率的三维变形信息<sup>[6]</sup>。独知行等对 GPS 和 InSAR 数据融合在矿山沉陷变形监测中的优势和存在的问题进行了探讨<sup>[7]</sup>。Ge Lin-lin 等提出了 DIDP 方法对 InSAR 和 GPS 数据进行融

收稿日期:2011-11-14 责任编辑:常琛

基金项目:中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放基金资助项目(SKLCRSM10KFB15);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2010QD01)

作者简介:阎跃观(1981—),男,山西太原人,讲师。Tel:010-62339180,E-mail:yyg\_0720@163.com

合,提高了解算的精度和可靠性<sup>[9-10]</sup>。Jarosz 和 Wanke 利用 DInSAR 技术对澳大利亚西部 Leinster 地区矿区地表沉陷进行了研究,得到地面最大下沉值为 150 mm<sup>[3-4]</sup>。上述研究表明目前利用 DInSAR 和 GPS 数据主要是从算法上进行融合,对沉陷区的研究仅仅局限在移动盆地的大小和范围,都未真正从开采沉陷的角度去研究开采状况与动态监测特征点的关系。

为此本文基于澳大利亚 West Cliff 矿区 ALOS PALSAR 数据,以开采沉陷规律为依据,建立 DInSAR 和 GPS 联合加密观测工作面推进距离模型,找出单点下沉速度剧增点和剧减点监测时刻,合理地求出监测加密时间,进而可以有效地利用 GPS 进行两次加密观测。

## 1 区域概况及基础数据的选取分析

### 1.1 研究区域工作面概况

West Cliff 煤矿位于澳大利亚新南威尔士州悉尼盆地 Southern 煤田,开采 Bulli 煤层<sup>[12-13]</sup>,采煤方法为长壁开采。32 工作面沿煤层倾向布置,开切眼处采深 540 m,终采线一侧 470 m,工作面长度为 3 222 m,宽度为 305 m,平均煤厚为 3 m,工作面布置如图 1 所示。31 工作面于 2007 年 2 月回采完毕;32 工作面于 2007-02-17 开始回采,2008 年 6 月中旬回采完毕;2008 年 6 月下旬开始回采 33 工作面。



图 1 West Cliff 煤矿工作面布置

Fig. 1 Longwall plan of West Cliff Mine

### 1.2 基础数据的选取分析

研究表明 L 波段影像图比 C 波段更适合监测茂密植被覆盖的位移梯度较大的地表沉陷,因此选取 West Cliff 煤矿 32 工作面开采期间获取 10 幅 L 波段的 ALOS PALSAR 影像图、GPS 数据和开采状况作为确定 DInSAR 和 GPS 联合加密观测工作面推进距离模型的基础数据。

#### 1.2.1 DInSAR 数据选取

第 1 幅影像图的获取时间为 2007-06-29,其后每间隔 46 d 获取一幅,最后两幅影像图的间隔时间

为 92 d。图 2 为 32 工作面推进过程中,长时序 SAR 影像生成的沿视线方向地表动态下沉盆地<sup>[14]</sup>。图中显示了不同开采阶段的地表下沉盆地的动态发展过程,随着工作面的推进,地表动态下沉盆地的大小和范围都越来越大。地表沉陷盆地的计算时间起点为 2007-06-29,分别到(A)2007-08-14;(B)2007-09-29;(C)2007-11-14;(D)2007-12-30;(E)2008-02-14;(F)2008-03-31;(G)2008-05-16;(H)2008-07-01;(I)2008-10-01。

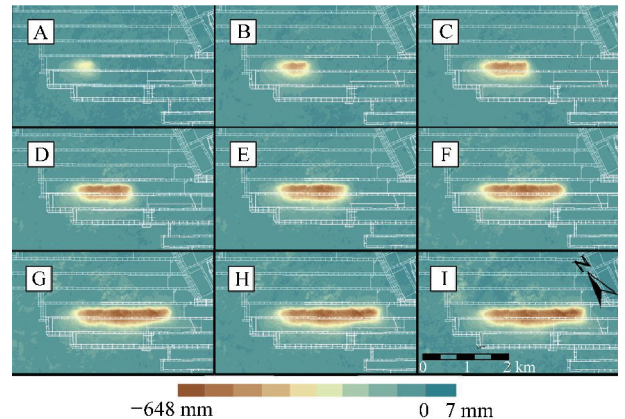


图 2 32 工作面推进过程中 SAR 影像生成的视线方向地表动态下沉盆地

Fig. 2 Measured dynamic subsidence maps along LOS direction with advanced of workface 32

#### 1.2.2 GPS 数据选取

图 3 为 GPS 点位布设图<sup>[14]</sup>,沿工作面走向布设一条观测线,共 21 个点,记为 LO01 ~ LO21;垂直工作面走向布设一条观测线,共 15 个点,记为 LA01 ~ LA15。从 2007-09-19—2008-03-11,共进行了 21 次观测,观测间隔时间为 7 d,第 1 次测量结果作为初始值。

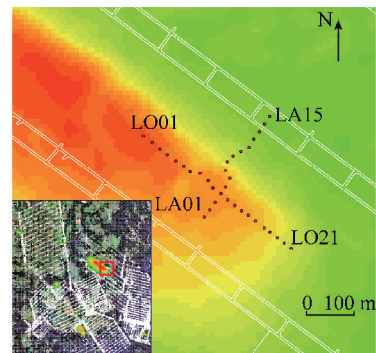


图 3 GPS 点位布设

Fig. 3 Layout of GPS survey points

### 1.3 DInSAR 与 GPS 数据联合观测线分析

为了能与 DInSAR 数据进行联合分析,将 GPS 测量的三维位移合成到视线方向。图 4 为 GPS 实测的

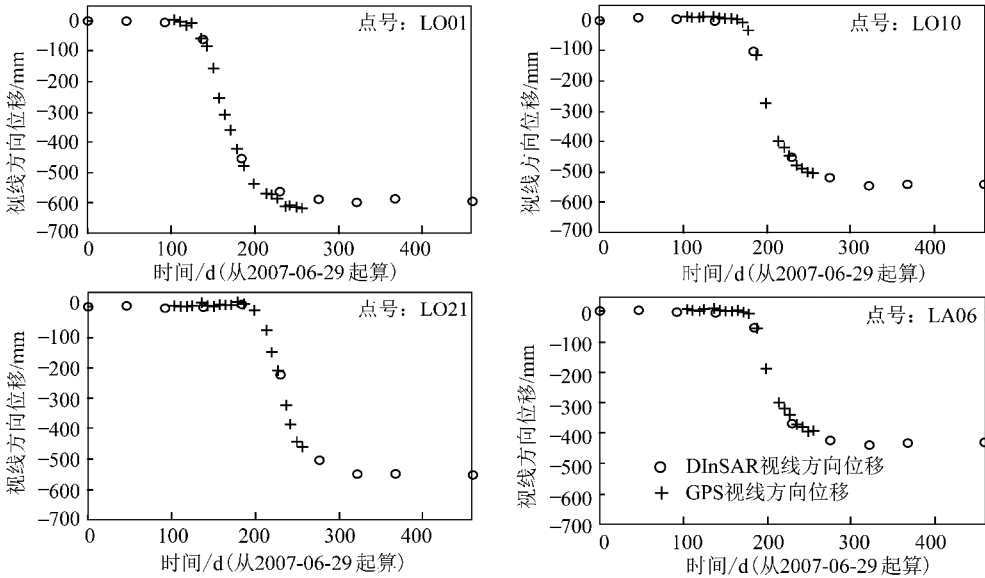


图4 GPS点位 LO01, LO10, LO21 和 LA06 的 DInSAR 和 GPS 位移沿视线方向对比

Fig. 4 Comparison between DInSAR measured deformations and GPS measured deformations projected along the LOS direction for points LO01, LO10, LO21 and LA06

三维位移合成到视线方向后, 点位 LO01, LO10, LO21 和 LA06 的 DInSAR 和 GPS 数据对比图<sup>[14]</sup>。

图4中横轴为时间轴, 起算日期为2007-06-29, 纵轴为视线方向的位移量。圆圈为DInSAR不同时期测量的视线方向位移量, 时间间隔46 d, 十字为GPS不同时期观测的视线方向位移量, 时间间隔7 d。从图4可以看出, 两者非常的吻合。

下面以 LO10 为具体研究对象进行分析。图5为 LO10 的 DInSAR 与 GPS 实测数据联合观测线。图中红线为 DInSAR 监测结果, 蓝线为 GPS 实测资料, 黑线为 DInSAR 和 GPS 联合观测线。

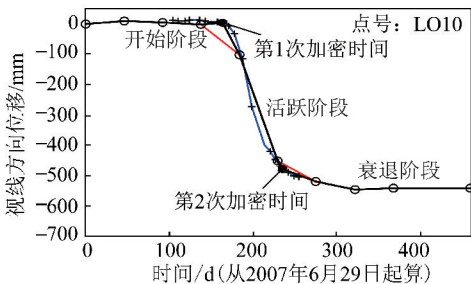


图5 DInSAR 与 GPS 联合观测线

Fig. 5 Interactive observation between DInSAR and GPS

从图5可以看出, 在 DInSAR 监测地表沉陷的过程中, 在 164 d 附近和 217 d 附近, 地表点 LO10 的下沉速度出现剧增(由开始阶段进入活跃阶段)和剧减现象(由活跃阶段进入衰退阶段), 而 DInSAR 数据恰恰缺失了该下沉特征点, 如果在此时进行两次 GPS 加密测量, 则可以大幅度提高监测效率, 如何能方便

地找出这两个时间点就成为建立 DInSAR 和 GPS 联合加密观测工作面推进距离模型的关键。

## 2 DInSAR 和 GPS 联合加密观测工作面推进距离模型

根据沉陷盆地内地表点动态移动变形规律, 充分开采时移动盆地内都经历了 3 个阶段, DInSAR 监测周期长, 难以全面监测某下沉点的整个移动过程, 可能错失动态下沉特征点, 为此需要确定加密时间, 进行加密观测。

为了能更方便地指导实际观测工作, 以超前影响角  $\omega$  作为工作面推进距离计算起始点, 如图6中位置1, 当工作面推进到位置2时, 对应的地表点  $O$  处为第1次加密时间, 位置1与位置2之间的距离记为  $l_2$ , 表示地表变形速度剧增特征点; 当工作面推进到位置3时, 对应的地表点  $O$  处为第2次加密时间, 位置1与位置3之间的距离记为  $l_3$ , 表示地表变形速度剧减特征点。例如地表有一重要建(构)筑物, 则只要确定工作面的推进位置与该保护对象的水平距离达到某一数值时, 就可以在此时进行一次 GPS 加密观测。

地表任意一点下沉的时间过程函数<sup>[1]</sup>为

$$W(t) = W_{\max}(1 - e^{-ct}) \quad (1)$$

其中,  $W(t)$  为某点在  $t$  时刻下沉量;  $W_{\max}$  为最大下沉值;  $c$  为取决于岩石性质的时间系数。  $c$  值的变化范围很大, 上覆岩层厚且坚硬时,  $c$  值较小; 岩层厚且软弱时,  $c$  值较大。通过大量的实测资料取平均值可以

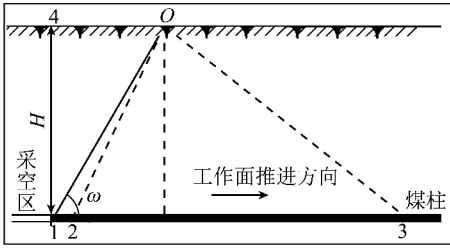


图 6 观测加密工作面推进距离示意图

Fig. 6 Schematic plot of observation encryption with advanced working face

确定时间系数  $c$ 。

图 6 中位置 1 在地表的投影 4 与  $O$  点之间的距离为超前影响距  $l_0$ ，若煤层为水平煤层<sup>[15]</sup>，则

$$l_0 = \frac{H_0}{\tan \omega} \quad (2)$$

式中,  $H_0$  为平均采深;  $\omega$  为超前影响角。

若工作面走向沿着煤层倾向, 则采深是一个变量, 由几何关系可知

$$l_0 = \frac{H - vt \sin \alpha}{\tan \omega} \quad (3)$$

式中,  $H$  为开切眼处开采煤层深度;  $v$  为工作面推进速度;  $\alpha$  为煤层倾角。

假设工作面匀速开采, 则工作面推进过程中剧增点和剧减点的推进距离为  $l$ , 即  $l = vt$ 。代入式(1)得

$$l = -\frac{v}{c} \ln \left( 1 - \frac{W(t)}{W_{\max}} \right) \quad (4)$$

由式(4)可知, 推进距离与  $W(t)$  直接相关, 因此提出两个指标  $X_1$  和  $X_2$ ;  $X_1$  为地表变形速度剧增点监测指标, 表示地表点由开始阶段进入活跃阶段, 此时地表点下沉速度刚达到  $1.67 \text{ mm/d}$ ;  $X_2$  为地表变形速度剧减点监测指标, 表示地表点由活跃阶段进入衰退阶段, 此时地表点下沉速度刚小于  $1.67 \text{ mm/d}$ , 可以得出剧增点和剧减点的工作面推进距离计算公式, 见式(5)和(6), 从而确定 DInSAR 和 GPS 联合加密观测工作面推进距离。

$$l_z = -\frac{v \ln(1 - X_1)}{c} \quad (5)$$

$$l_j = -\frac{v \ln(1 - X_2)}{c} \quad (6)$$

则  $l_0 - l_z$  为第 1 次加密观测时工作面推进位置与地表  $O$  点的水平距离,  $l_j - l_0$  为第 2 次加密观测时工作面推进位置与地表  $O$  点的水平距离。

### 3 实例分析

根据 West Cliff 煤矿 32 工作面开采期间 LO01, LO10, LO21 和 LA06 的实测资料, 32 工作面开采后

地表最大下沉值为  $856 \text{ mm}$ , 从 GPS 数据中求取相邻两次观测下沉差刚达到  $11.7 \text{ mm}$  时刻对应的下沉值, 可知剧增点处下沉值为  $11.9 \text{ mm}$ , 与最大下沉值之比可得  $X_1 = 0.014$ , 代入式(5), 可得该矿区剧增点监测加密工作面推进距离为  $l_z = 0.014v/c$ ; 剧减点处下沉值为  $806.9 \text{ mm}$ , 与最大下沉值之比可得  $X_2 = 0.943$ , 代入式(6), 可得该矿区剧减点监测加密工作面推进距离为  $l_j = 2.865v/c$ 。

利用 DInSAR 和 GPS 联合观测值, 可以反算出每个时刻的  $c$  值。4 个点位取平均后  $c$  值分别为:  $c_{LO01} = 0.0123/d$ ;  $c_{LO10} = 0.0126/d$ ;  $c_{LO21} = 0.0104/d$ ;  $c_{LA06} = 0.0121/d$ , 取平均值作为该矿区的时间系数为  $c = 0.0118/d = 4.307/a$ 。32 工作面平均开采速度为  $5 \text{ m/d}$ , 可以求得本矿区剧增点监测加密工作面推进距离为  $l_z = 5.9 \text{ m}$ ; 剧减点监测加密工作面推进距离为  $l_j = 1214.0 \text{ m}$ 。

West Cliff 矿区超前影响角为  $57^\circ$ , 假设地表某个建筑物 A 下采深为  $500 \text{ m}$ , 则可以由式(2)求出超前影响距  $l_0$  为  $324.7 \text{ m}$ 。因此, 当工作面推进位置与建筑物 A 的水平距离为  $318.8 \text{ m}$  时, 应进行第 1 次 GPS 加密观测, 当工作面开采通过建筑物 A 正下方的距离为  $889.3 \text{ m}$  时, 进行第 2 次 GPS 加密观测。从而在最省人力、物力和财力的前提下有针对性的提高 DInSAR 技术监测地表动态变形的有效性。

### 4 结 论

(1) 针对 DInSAR 监测周期长, 难以全面监测某下沉点的整个移动过程, 甚至可能错失沉降特征点的问题, 建立了 DInSAR 和 GPS 联合加密观测工作面推进距离模型:  $l_z = -\frac{v \ln(1 - X_1)}{c}$ ,  $l_j = -\frac{v \ln(1 - X_2)}{c}$ , 用于确定 GPS 加密时间, 找出地表变形点下沉速度的剧增点和剧减点监测时刻, 提高了 DInSAR 技术监测地表动态变形的有效性。

(2) 根据 West Cliff 矿区实测资料, 求出了剧增点监测加密工作面推进距离为  $l_z = 0.014v/c$ , 剧减点监测加密工作面推进距离为  $l_j = 2.865v/c$ , 本矿区时间系数  $c = 0.0118/d = 4.307/a$ 。

### 参考文献:

[1] 刘宝琛, 廖国华. 煤矿地表移动的基本规律[M]. 北京: 中国工业出版社, 1965: 97-99.  
Liu Baochen, Liao Guohua. Basic rule of coal surface movement [M]. Beijing: China Industry Press, 1965: 97-99.  
[2] Ge L L, Chang H C, A H-M Ng, et al. Spaceborne radar interferometry for mine subsidence monitoring in Australia[A]. Internation Fu-

- ture Mining Conference & Exhibition[C]. Sydney,2008.
- [3] Ng A H-M, Chang H C, Ge L L, et al. Assessment of radar interferometry performance for ground subsidence monitoring due to underground mining[J]. *Earth, Planets and Space*, 2009, 61(6): 733-745.
- [4] Andrew Jarosz S. Detection and monitoring of mining deformations using insar technology[A]. 12th Australasian Remote Sensing and Photogrammetry Conference[C]. Fremantle, 2004.
- [5] 吴立新, 高均海, 葛大庆, 等. 工矿区地表沉陷 D-InSAR 监测试验研究[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2005, 26(8): 778-782.
- Wu Lixin, Gao Junhai, Ge Daqing, et al. Experimental study on surface subsidence monitoring with D-InSAR in mining area[J]. *Journal of Northeastern University (Nature Science)*, 2005, 26(8): 778-782.
- [6] 罗海滨, 何秀凤, 刘焱雄. 利用 DInSAR 和 GPS 综合方法估计地表 3 维形变速率[J]. *测绘学报*, 2008, 37(2): 168-171.
- Luo Haibin, He Xiufeng, Liu Yanxiong. Estimation of three-dimensional surface motion velocities using integration of DInSAR and GPS [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2008, 37(2): 168-171.
- [7] 独知行, 阳凡林, 刘国林, 等. GPS 与 DInSAR 数据融合在矿山开采沉陷形变监测中的应用探讨[J]. *测绘科学*, 2007, 32(1): 55-57.
- Du Zhixing, Yang Fanlin, Liu Guolin, et al. The discussions on GPS and InSAR data integrating and applying in monitoring subsidence and deformation of mines exploitation[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2007, 32(1): 55-57.
- [8] 龙四春, 李 陶, 刘经南, 等. 融合 GPS, CR 与水准数据的永久散射体雷达差分干涉测量技术[J]. *测绘通报*, 2009(2): 1-6.
- Long Sichun, Li Tao, Liu Jingnan, et al. PS-DInSAR technique with use of GPS, CR and leveling data[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2009(2): 1-6.
- [9] Ge L L, Han S, Rizos C. The double interpolation and double prediction (DIDP) approach for InSAR and GPS integration[A]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*[C]. Citeseer; Amsterdam, 2000: 205-212.
- [10] Ge L L, Han S, Rizos C. Interpolation of GPS results incorporating geophysical and InSAR information[J]. *Earth Planets and Space*, 2000, 52(11): 999-1002.
- [11] Jónsson S, Zebker H, Segall P. Fault slip distribution of the 1999 Mw7.1 Hector Mine, California, earthquake, estimated from satellite radar and GPS measurements[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2002, 92(4): 1377-1389.
- [12] NSWDP. NSW coal industry profile[R]. Sydney: Department of Mineral Resources, 2006.
- [13] NSWDoP. Impacts of underground coal mining on natural features in the southern coalfield; strategic review[R]. Australia: New South Wales Department of Planning, 2008.
- [14] Alex Hay-Man Ng, Ge Linlin, Yan Yueguan, et al. Mapping accumulated mine subsidence using small stack of SAR differential interferograms in the southern coalfield of New South Wales, Australia [J]. *Engineering Geology*, 2010, 115: 1-15.
- [15] 何国清, 杨 伦, 凌赓娣, 等. 矿山开采沉陷学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1991: 85-86.
- He Guoqing, Yang Lun, Ling Gengdi, et al. Mining subsidence [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1991: 85-86.