



基于单视线向 D-InSAR 技术的倾斜煤层 开采地表沉陷监测方法

王磊¹ 蒋创¹ 张鲜妮¹ 李楠¹ 查剑锋²

¹ 安徽理工大学测绘学院,安徽 淮南,232001

² 中国矿业大学国土环境与灾害监测国家测绘地理信息局重点实验室,江苏 徐州,221116

摘要:基于合成孔径雷达差分干涉测量(differential interferometric synthetic aperture radar,D-InSAR)技术的开采沉陷监测理论和方法是矿山变形监测领域研究的热点,当前已有学者融合单视线向 D-InSAR 技术和开采沉陷规律成功构建了开采沉陷三维监测模型,然而由于该模型仅融合了水平煤层开采地表沉陷规律,其并不适用于倾斜煤层开采地表沉陷监测。针对上述问题,根据 D-InSAR 监测的视线向变形与三维变形的关系,融合倾斜煤层开采地表沉陷规律,提出了基于单视线向 D-InSAR 技术的倾斜煤层开采地表沉陷监测方法。模拟实验表明,所提出的方法下沉监测相对误差绝对值小于 9.53%,平均为 1.31%,南北方向和东西方向水平移动监测相对误差绝对值小于 9.78%,平均为 3.71%,满足开采沉陷监测精度要求。并利用该方法成功监测了中国山东省兖州矿区南屯煤矿 9310 工作面在 2012-01-27—2012-02-07 期间开采引起的地表移动与变形。

关键词:D-InSAR;倾斜煤层;开采沉陷;概率积分法;移动与变形监测

中图分类号:P258

文献标志码:A

合成孔径雷达差分干涉测量(differential interferometric synthetic aperture radar,D-InSAR)技术由于具备高精度、全天时、面测量、低成本(特别是免费数据源雷达卫星的发射)等特点,引起矿山测量学者的广泛关注,已经成为当前矿山变形监测领域的研究热点。当前提出的三维变形监测方法有多视线向 D-InSAR^[1-3]、D-InSAR + Offset tracking^[4-5]、D-InSAR + MAI^[6]、融合 GPS 和 D-InSAR 法^[7-8]、地表先验模型 + D-InSAR^[9-10]等,主要用于解决地震、滑坡、火山喷发、冰川移动等特点的移动与变形监测问题,并不适用于矿山开采沉陷监测。

近年来,针对煤矿开采地表移动与变形特点,有学者提出了开采沉陷预计模型 + 单视线向 D-InSAR 的矿山开采沉陷融合监测方法。文献[11]提出了概率积分法预计模型 + D-InSAR 方法进行开采沉陷监测,该方法首先利用 D-InSAR 技术近似获取地表下沉场,反演出与下沉有关的概率积分参数;然后在假定水平移动系数已知的条件下,利用概率积分法模型和已反演的参数体

系预计出开采引起的地表移动与变形,进而实现了对开采沉陷的监测。针对文献[11]方法要求水平移动系数为已知的条件,文献[12]对其进行了改进,首先利用概率积分法模型预计任意像元下沉、SN 和 EW 向水平移动,并投影合成 D-InSAR 视线(line of sight,LOS)向变形;然后以 D-InSAR LOS 向实测值和预计值之差的和最小为准则,基于模矢法对所有概率积分法参数进行全局寻优;最后利用概率积分法模型和全局最优参数预计出地表移动与变形,即实现了对开采沉陷的监测。然而文献[12]方法在应用时仍然存在以下两个难点:①求参模型为高度非线性函数,如何保证基于模矢法求取的概率积分参数为全局最优解;②要求掌握工作面的面长、推进尺寸、采高、采深、工作面 and 煤层的走向、倾向等精细地质采矿条件以及概率积分参数的量值范围。文献[13]提出了基于开采沉陷规律 + 单视线向 D-InSAR 的融合监测方法,即依据 D-InSAR LOS 向变形为下沉、SN 和 EW 方向水平移动沿 LOS 向投影之和的关系,融合水平煤层开采沉陷规律(下沉、倾斜、

水平移动之间的关系),并在假设采动区地表 LOS 向变形场中,最后一行、最后一列像元水平移动为 0 的条件下,首次从 LOS 向变形中提取了下沉、SN 和 EW 方向水平移动。显然文献[13]方法在适用条件、准确性、计算机编程难易程度上具有一定优势。但文献[13]方法由于仅融合了水平煤层开采沉陷规律,对于倾斜煤层开采沉陷监测并不适用。而工程实践中煤系地层多为倾斜地层,这也使得该方法的推广应用存在较大困难。

鉴于文献[13]方法存在不适于倾斜煤层开采深陷监测的问题,本文基于单视线向 D-InSAR 技术,拟结合倾斜煤层开采沉陷规律,构建适用于水平、倾斜煤层开采沉陷监测的一般模型。

1 监测模型

1.1 监测模型构建

在倾斜煤层开采时,由于煤层倾角 α 的存在,地表任意点除了发生水平煤层开采引起的指向采空区的水平移动之外,在煤层倾向方向上还将附加因煤层倾斜引起的地表水平移动分量 $\Delta U_{y'}$,文献[14]给出了倾斜煤层开采引起的地表任意点 $S(x, y)$ 沿走向 x' 和倾向 y' 的水平移动 U 、倾斜 T 和下沉 W 的关系:

$$\Delta U_{y'} = W(x, y) \cot \theta \quad (1)$$

$$U_{x'}(x, y) = b \cdot r \cdot T_{x'}(x, y) \quad (2)$$

$$U_{y'}(x, y) = b \cdot r \cdot T_{y'}(x, y) + \Delta U_{y'} \quad (3)$$

式中, b 为水平移动系数; r 为主要影响半径,其中 $r = H / \tan \beta$, H 为采深; $\tan \beta$ 为主要影响角正切值; θ 为最大下沉角。

如图 1 假设煤层倾角与 SN 方向存在 φ 夹角,当计算 SN、EW 向水平移动时,需要将 $\Delta U_{y'}$ 向 SN、EW 方向分解,通过推导可得到 SN、EW 方向水平移动 U 与倾斜 T 、下沉 W 的关系模型:

$$U^{\text{SN}}(x, y) = b \cdot r \cdot T^{\text{SN}}(x, y) + W(x, y) \cot \theta \cos \varphi \quad (4)$$

$$U^{\text{EW}}(x, y) = b \cdot r \cdot T^{\text{EW}}(x, y) + W(x, y) \cot \theta \sin \varphi \quad (5)$$

工作面沿煤层走向布置, $o'-x'y'$ 、 $o-x'y'$ 、 $o-xy$ 分别表示工作面坐标系、地面坐标系、测量坐标系, $o'-x'y'$ 与 $o-x'y'$ 坐标轴平行,且 x' 、 y' 分别与工作面走向和倾向一致。 P 为过 $S(x, y)$ 点且与倾向平行的竖直面。

考虑到地表下沉 W 与倾斜 T 的关系,

$$T^{\text{SN}}(x, y) = \frac{dW(x, y)}{dx} \quad (6)$$

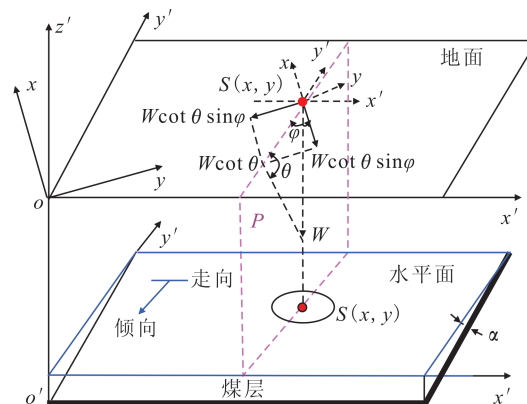


图1 滑移参数 $\Delta U_{y'}$ 沿 SN、EW 方向分解示意图

Fig. 1 Sketch Map of Decomposition of Sliding Parameter $\Delta U_{y'}$ Along SN and EW Directions

$$T^{\text{EW}}(x, y) = \frac{dW(x, y)}{dy} \quad (7)$$

综合上述式(4)~(7),可得到:

$$U^{\text{SN}}(x, y) = b \cdot r \cdot \frac{dW(x, y)}{dx} + W(x, y) \cot \theta \cos \varphi \quad (8)$$

$$U^{\text{EW}}(x, y) = b \cdot r \cdot \frac{dW(x, y)}{dy} + W(x, y) \cot \theta \sin \varphi \quad (9)$$

当前 SAR 卫星多数属于极轨飞行、侧视成像, D-InSAR 变形场相邻 4 个像元排列示意图如图 2 所示,假设任意像元的下沉值为 W_{ij} ,则式(6)~(9)写成差分形式可表达为:

$$T_{ij}^{\text{SN}} = \frac{W_{i-1,j} - W_{i,j}}{\Delta x} \quad (10)$$

$$T_{ij}^{\text{EW}} = \frac{W_{i,j-1} - W_{i,j}}{\Delta y} \quad (11)$$

$$U_{ij}^{\text{SN}} = b \cdot r \cdot \left(\frac{W_{i-1,j} - W_{i,j}}{\Delta x} \right) + W_{ij} \cot \theta \cos \varphi \quad (12)$$

$$U_{ij}^{\text{EW}} = b \cdot r \cdot \left(\frac{W_{i,j-1} - W_{i,j}}{\Delta y} \right) + W_{ij} \cot \theta \sin \varphi \quad (13)$$

根据开采沉陷移动与变形的定义,同理可得到 SN、EW 方向水平变形 ϵ 、曲率变形 K 的表达式为:

$$\epsilon^{\text{SN}}(x, y) = \frac{dU^{\text{SN}}(x, y)}{dx} = \frac{U_{i-1,j}^{\text{SN}} - U_{i,j}^{\text{SN}}}{\Delta x} \quad (14)$$

$$\epsilon^{\text{EW}}(x, y) = \frac{dU^{\text{EW}}(x, y)}{dy} = \frac{U_{i,j-1}^{\text{EW}} - U_{i,j}^{\text{EW}}}{\Delta y} \quad (15)$$

$$K^{\text{SN}}(x, y) = \frac{dT^{\text{SN}}(x, y)}{dx} = \frac{T_{i-1,j}^{\text{SN}} - T_{i,j}^{\text{SN}}}{\Delta x} \quad (16)$$

$$K^{\text{EW}}(x, y) = \frac{dT^{\text{EW}}(x, y)}{dy} = \frac{T_{i,j-1}^{\text{EW}} - T_{i,j}^{\text{EW}}}{\Delta y} \quad (17)$$

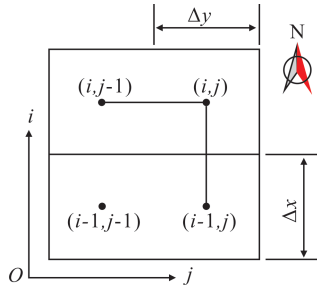


图2 SAR影像相邻4像元排列示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of Neighboring

Four Pixels Arrangement for SAR Imagery

对于 D-InSAR 监测的任意像元 LOS 向变形 L_{ij} 与下沉 W_{ij} 、SN 向水平移动 U_{ij}^{SN} 、EW 向水平移动 U_{ij}^{EW} 存在如下投影关系:

$$W_{i,j} = \frac{L_{i,j} + b \cdot r \cdot W_{i-1,j} \cdot P_1 / \Delta x + b \cdot r \cdot W_{i,j-1} \cdot P_2 / \Delta y}{b \cdot r \cdot P_1 / \Delta x - \cot \theta \cdot \cos \varphi \cdot P_1 + b \cdot r \cdot P_2 / \Delta y - \cot \theta \cdot \sin \varphi \cdot P_2 + \cos \varphi_{ij}} \quad (20)$$

式中,

$$P_1 = \sin \varphi_{ij} \cos(\alpha_{ij} - \frac{3}{2}\pi)$$

$$P_2 = \sin \varphi_{ij} \sin(\alpha_{ij} - \frac{3}{2}\pi)$$

根据开采沉陷规律,开采沉陷移动盆地下沉范围往往大于水平移动范围,据此可假设 D-InSAR 反演的变形场中第一行、第一列像元水平移动量为零,此时式(18)退化成式(21),即:

$$W_{ij} = L_{ij} / \cos \varphi_{ij} \quad (21)$$

基于上述假设,利用式(21)可求取采动区地表变形场第一行、第一列像元的下沉值,然后在此基础上基于递推关系式(20),可求取剩余 $(m-1) \times (n-1)$ 像元下沉值(m 为影像行数, n 为影像列数),最后利用任意像元下沉值,根据式(10)~(17)求取任意像元沿 SN 和 EW 向水平移动值 T^{SN} 、

$$L_{ij} = -U_{ij}^{\text{SN}} \sin \varphi_{ij} \cos(\alpha_{ij} - \frac{3}{2}\pi) -$$

$$U_{ij}^{\text{EW}} \sin \varphi_{ij} \sin(\alpha_{ij} - \frac{3}{2}\pi) + W_{ij} \cos \varphi_{ij} \quad (18)$$

式中, φ_{ij} 为卫星入射角; α_{ij} 为卫星飞行方向方位角。

联合式(10)~(13)以及式(18)可得到:

$$L_{ij} = -[b \cdot r \cdot (\frac{W_{i-1,j} - W_{i,j}}{\Delta x}) + W_{i,j} \cot \theta \cdot \cos \varphi] \sin \varphi_{ij} \cos(\alpha_{ij} - \frac{3}{2}\pi) - [b \cdot r \cdot (\frac{W_{i,j-1} - W_{i,j}}{\Delta y}) + W_{i,j} \cot \theta \sin \varphi] \sin \varphi_{ij} \sin(\alpha_{ij} - \frac{3}{2}\pi) + W_{i,j} \cos \varphi_{ij} \quad (19)$$

由式(19)推导得到:

$$T^{\text{EW}}、U^{\text{SN}}、U^{\text{EW}}、\epsilon^{\text{SN}}、\epsilon^{\text{EW}}、K^{\text{SN}}、K^{\text{EW}}。$$

当最大下沉角取 $\theta = 90^\circ$, 上述倾斜煤层开采地表沉陷监测模型退化成水平煤层开采地表沉陷监测模型。

1.2 监测模型应用流程

基于单视线向 D-InSAR 技术的倾斜煤层开采地表沉陷监测模型应用流程为:首先利用 D-InSAR 技术获取采动区地表 LOS 向变形场;然后根据研究区域地质采矿条件获取采深 H 、水平移动系数 b 、主要影响角正切 $\tan \beta$ 、最大下沉角 θ , 以及影像的 EW、SN 方向分辨率 Δx 和 Δy , 并假设影像第一行、第一列水平移动为零;最后利用本文模型计算采动区地表的下沉、SN 和 EW 方向移动与变形。监测模型应用流程如图 3 所示。

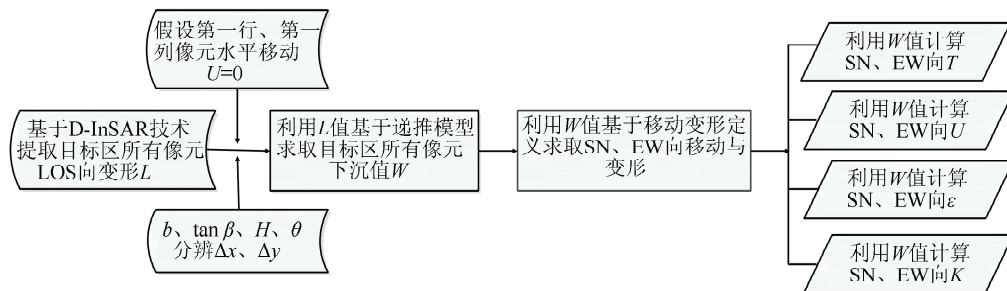


图3 本文监测模型应用流程图

Fig. 3 Application Flowchart of This Paper's Monitoring Model

2 模拟监测实验

2.1 模拟地质采矿条件概况

以淮南矿区地层条件为背景,模拟工作面上

覆岩层岩性为中硬,煤层倾角为 10° ,采高 $M = 2.5 \text{ m}$,采深 $H = 300 \text{ m}$,工作面沿倾向和走向水平投影尺寸为 $D_1 \times D_3 = 300 \text{ m} \times 600 \text{ m}$,工作面倾向方位角为 180° ,工作面沿走向布置,顶板管理方法为长壁垮落法。工作面尺寸满足 $D_1/H =$

$1.0 < 1.2, D_3/H = 2 > 1.2$, 工作面采动程度为倾向非充分采动, 走向超充分采动, 总体为非充分采动。工程实践表明淮南矿区沉陷盆地形态可用概率积分法模型进行预计, 假设模拟工作面的开采沉陷预计参数为: 下沉系数 $q = 0.8$, 水平移动系数 $b = 0.3$, 主要影响角正切 $\tan\beta = 2.0$, 最大下沉角 $\theta = 85^\circ$, 拐点偏移距 $S_1 = S_2 = S_3 = S_4 = 0 \text{ m}$ 。

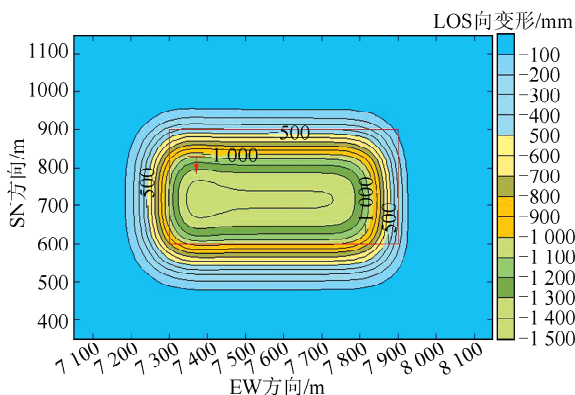
2.2 模拟实验及结果分析

以 TerraSAR 卫星为例进行卫星参数模拟。假设卫星回访目标区几何成像时雷达卫星的入射角为 $\Phi = 44.494^\circ$, 卫星视线向的方位角 $\alpha = 350.596^\circ$, 分辨率为 6 m 。模拟工作面开采引起地表 LOS 向变形方法如下: 首先将采动区地表沿 SN、EW 方向划分间隔为 6 m 的方格网, 模拟空间分辨率为 6 m 的影像; 然后利用概率积分法模型及选定的参数值预计所有格网点(模拟像元)的下沉值 $W_{i,j}$ 、SN 方向水平移动 U_{ij}^{SN} 和 EW 方向水平移动 U_{ij}^{EW} , 依据式(18)可计算目标像元沿 LOS 方向的模拟移动与变形, 模拟 D-InSAR 监测的采动区地表 LOS 向变形场如图 4(a)所示。

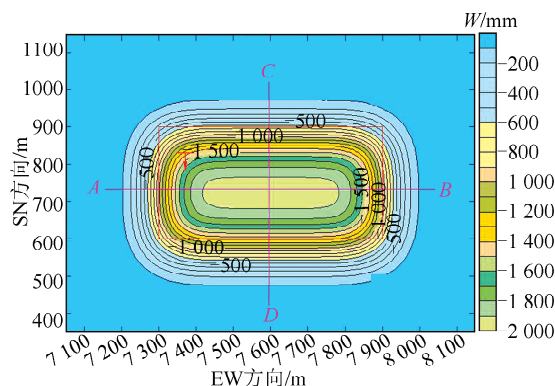
基于上述模拟的采动区地表 D-InSAR LOS 向变形场, 利用本文建立的基于单视线向 D-InSAR 技术的倾斜煤层开采地表沉陷监测模型, 提取了目标区下沉场 W 、SN 和 EW 方向水平移动场 U , 提取的采动区地表移动与变形场如图 4(b)-4(d)所示。

为了验证模型的正确性, 沿 SN、EW 方向分别设置了两条移动与变形检验剖面线 A-B (点间隔 6 m , 累计 148 个点)和 C-D (间隔 6 m , 累计 101 个点)。沿着剖面线 A-B 和 C-D 分别提取了下沉和水平移动, 并计算了下沉和水平移动计算相对误差。利用本文模型, 沿剖面线 A-B、C-D 的实际下沉、提取下沉以及下沉提取相对误差绝对值如图 5(a)-5(b)所示; 在 SN 方向水平移动场中沿剖面线 C-D 的实际水平移动、提取水平移动、水平移动提取相对误差绝对值如图 5(c)所示; 在 EW 方向水平移动场中沿剖面线 A-B 的实际水平移动、提取水平移动、水平移动提取相对误差绝对值如图 5(d)所示。

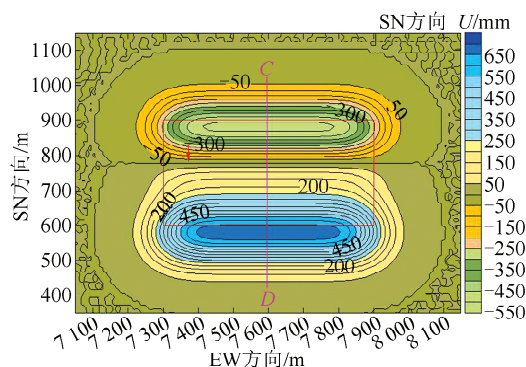
在去除移动与变形零边界影响后, 从图 5 可以看出: ①沿剖面 A-B 提取的下沉相对误差绝对值小于 9.53% , 平均为 1.58% , 沿剖面 C-D 提取的下沉相对误差绝对值小于 6.01% , 平均为 0.92% , 沿剖面 A-B、C-D 提取的下沉相对误差绝对值平均为 1.31% ; ②沿剖面 C-D 提取的 SN 方向水平移动相对误差绝对值小于 9.78% , 平均为



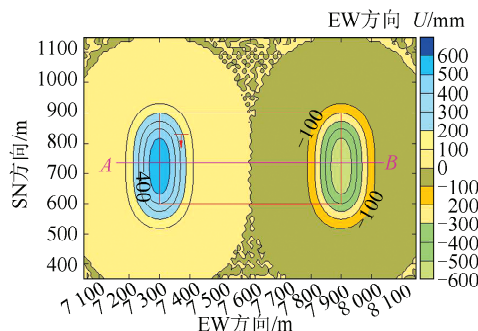
(a) 模拟采动区地表 LOS 向变形



(b) 提取采动区地表下沉



(c) 提取采动区地表 SN 方向水平移动



(d) 提取采动区地表 EW 方向水平移动

图 4 模拟的 LOS 向变形场和基于模拟的 LOS 向变形提取的下沉和水平移动场

Fig. 4 Simulated Deformation Field at LOS Direction and Extracting Subsidence and Horizontal Deformation Field Based on Simulated LOS Deformation

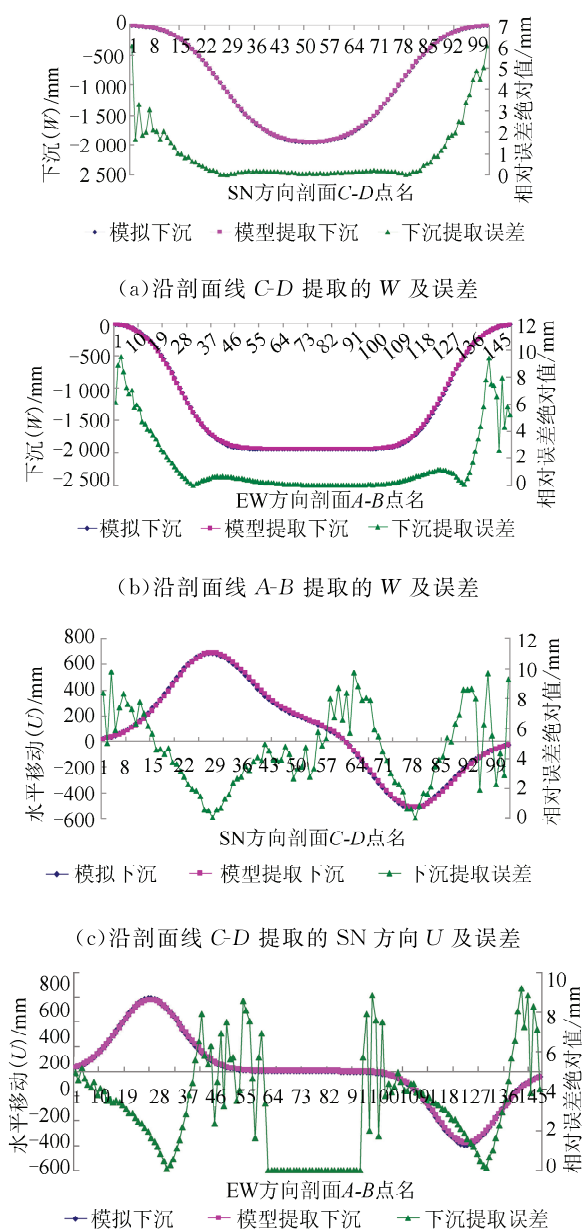


图5 沿剖面 A-B、C-D 提取下沉、水平移动及误差

Fig. 5 Extraction Subsidence and Horizontal Deformation and Its Error of A-B and C-D Profiles

4.61%;沿剖面 A-B 提取的 EW 方向水平移动相对误差绝对值小于 9.22%,平均为 3.11%,沿剖面 A-B、C-D 提取的水平移动相对误差绝对值平均为 3.71%;③移动盆地边界附近(下沉 0~50 mm 区域),下沉提取相对误差稍大,水平移动零边界附近(水平移动 -50~50 mm 区域),水平移动提取误差稍大,这主要因为零边界附近移动与变形量小,较小的提取误差可导致较大的相对误差所致,但是下沉、水平移动提取相对误差极值不超过 10%。从实验结果可以看出,基于单视线向 D-InSAR 的倾斜煤层开采地表移动与变形提取

模型可以从 D-InSAR 监测的 LOS 向变形场中较为精准地提取下沉和 SN、EW 方向水平移动。

3 工程应用实验

3.1 实验概况

实验区位于中国山东省兖州矿区南屯煤矿九采区上方地表。实验数据为 TerraSAR-X 卫星获取的单视复数雷达影像,分辨率为 3 m,影像大小为 $16\,224 \times 10\,710$ 像素,实验数据覆盖了整个南屯煤矿。主辅影像成像时间分别为 2012-01-27 和 2012-02-07,时间基线为 11 d,雷达卫星入射角为 $\theta = 44.494^\circ$,卫星视线向方位角 $\alpha = 350.596^\circ$ 。在 D-InSAR 监测期间(2012-01-27—2012-02-07),南屯煤矿正在回采 3 上煤层的 9310 工作面西段,工作面北侧 9312 工作面已回采结束形成老采空区。9310 工作面面长 197 m,实验期间工作面推进长度约为 26 m,工作面平均采深约 588 m,煤层倾角为 8° ,煤层倾向方位角约为 133° ,工作面沿走向布置,采用综放采煤方法。

3.2 下沉与水平移动提取实验

通过对主辅影像进行 InSAR 差分干涉测量,获取了 9310 工作面上方地表在 2012-01-27—2012-02-07 时段 LOS 向移动与变形场如图 6(a)所示。

根据南屯煤矿开采沉陷预计参数经验值,取水平移动系数 $b = 0.30$,主要影响角正切 $\tan\beta = 2.0$,最大下沉角 $\theta = 86^\circ$,利用本文建立的基于单视线向 D-InSAR 的倾斜煤层开采地表移动与变形提取模型,从 LOS 向移动与变形场中提取了监测时段的下沉、SN 方向的水平移动、EW 方向的水平移动,其中下沉等值线、SN 方向的水平移动等值线、EW 方向的水平移动等值线如图 6(b)-6(d)所示。

从图 6(b)-6(d)可以看出,最大下沉约 74 mm,SN、EW 方向最大水平移动约为 33 mm;下沉和水平移动分布形态略偏向 9312 老采空区上方,这主要由于 9310 工作开采时诱发了相邻的 9312 采空区边界上方中的悬臂梁、砌体梁结构失稳“活化”导致地表二次移动与变形所致。利用本文模型监测的地表移动与变形特征符合南屯煤矿开采沉陷规律,进一步验证了基于单视线向 D-InSAR 技术的倾斜煤层开采地表移动与变形提取方法的科学性。

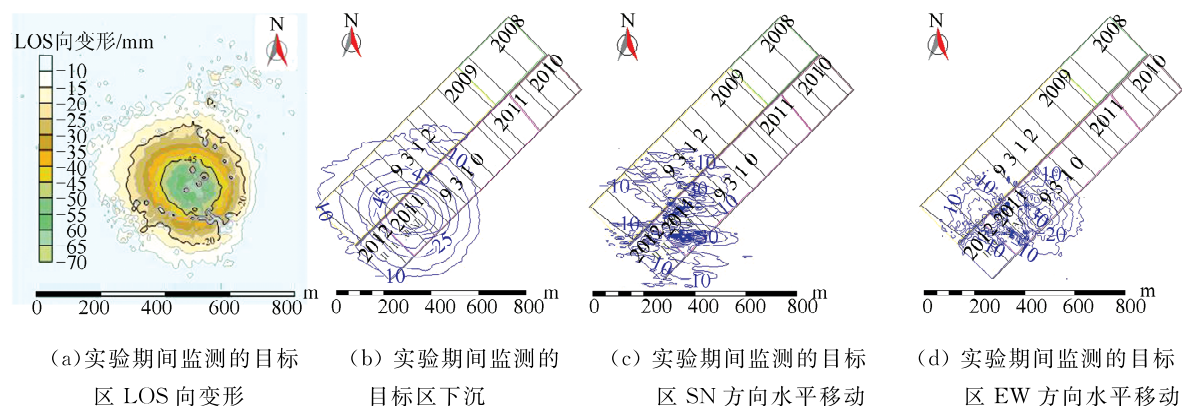


图 6 2012-01-27—2012-02-07 时段监测的 9310 工作面上方地表下沉和水平移动

Fig. 6 Monitoring Subsidence and Horizontal Deformation of Surface Above 9310 Working Face in 2012-01-27—2012-02-07 Time Interval

4 结 语

本文针对现有的基于单视线向 D-InSAR 技术的监测方法不适用倾斜煤层开采沉陷监测问题,依据 D-InSAR 监测的采动区地表 LOS 向变形与下沉、SN 和 EW 方向水平移动的投影关系,融合倾斜煤层开采地表沉陷规律,通过理论建模,构建了基于单视线向 D-InSAR 技术的倾斜煤层开采地表沉陷监测模型。模拟实验表明,本文模型下沉监测相对误差绝对值小于 9.53%,平均为 1.31%,SN、EW 方向水平移动监测相对误差绝对值小于 9.78%,平均为 3.71%,满足开采沉陷监测精度要求。将本文监测模型用于中国山东省兖州矿区南屯煤矿 9310 工作面开采地表沉陷监测,获取了 2012-01-27—2012-02-07 时段采动区地表下沉、SN 和 EW 方向水平移动,验证了模型的科学性。

参 考 文 献

- [1] Gray L. Using Multiple RadarSat InSAR Pairs to Estimate a Full Three-Dimensional Solution for Glacial Ice Movement[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(38):132-140
- [2] Wright T J, Parsons B E, Lu Z. Toward Mapping Surface Deformation in Three Dimensions Using InSAR[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(1):169-178
- [3] Hu J, Ding X L, Li Z W, et al. Kalman-Filter-Based Approach for Multisensor, Multitrack, and Multitemporal InSAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2013, 51(7):4 226-4 239
- [4] Fialko Y, Sandwell D, Simons M, et al. Three-Dimensional Deformation Caused by the Bam, Iran, Earthquake and the Origin of Shallow Slip Deficit[J]. *Nature*, 2005, 435(7 040):295-304
- [5] Hu J, Li Z W, Zhu J J, et al. Inferring Three Dimensional Surface Displacement Field by Combining SAR Interferometric Phase and Amplitude Information of Ascending and Descending Orbits[J]. *Sci China Earth Sci*, 2010, 53(4):550-560
- [6] Jung H S, Lu Z, Won J S, et al. Mapping Three-Dimensional Surface Deformation by Combining Multiple-Aperture Interferometry and Conventional Interferometry: Application to the June 2007 Eruption of Kilauea Volcano, Hawaii[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2010, 8(1):34-38
- [7] Gudmundsson S, Sigmundsson F, Carstensen J M. Three-Dimensional Surface Motion Maps Estimated from Combined Interferometric Synthetic Aperture Radar and GPS Data[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2002, 107(B10):2 250
- [8] Hu J, Li Z W, Ding X L, et al. Derivation of 3-D Coseismic Surface Displacement Fields for the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki Earthquake from InSAR and GPS Measurements[J]. *Geophysical Journal International*, 2013, 192(2):573-585
- [9] Gourmelen N, Kim S W, Shepherd A, et al. Ice Velocity Determined Using Conventional and Multiple-Aperture InSAR[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 307(1-2): 156-160
- [10] Guglielmino F, Bignami C, Bonforte A, et al. Analysis of Satellite and in Situ Ground Deformation Data Integrated by the SISTEM Approach: The April 3, 2010 Earthquake Along the Pernicana Fault (Mt. Etna-Italy) Case Study[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 312(3-4): 327-336
- [11] Fan H D, Cheng D, Deng K Z, et al. Subsidence Monitoring Using D-InSAR and Probability Integral

- Prediction Modelling in Deep Mining Areas [J]. *Survey Review*, 2015, 47(345): 438-445
- [12] Wang Lei, Zhang Xianni, Chen Yuanfei, et al. Method of Mining Subsidence Prediction Parameters Inversion Based on D-InSAR LOS Deformation [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2017, 46(5): 159-165, 180 (王磊, 张鲜妮, 陈元非, 等. 基于 D-InSAR LOS 向变形的开采沉陷预计参数反演方法研究[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(5): 159-165, 180)
- [13] Li Z W, Yang Z F, Zhu J J, et al. Retrieving Three-Dimensional Displacement Fields of Mining Areas from a Single InSAR Pair [J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89: 17-32
- [14] Wu kan, Ge Jiabin, Wang Lingding, et al. Integration Methods of Mining Subsidence Prediction [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1998 (吴侃, 葛家新, 王铃丁, 等. 开采沉陷预计一体化方法 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998)

Monitoring Method of Surface Subsidence Induced by Inclined Coal Seam Mining Based on Single Line of Sight D-InSAR

WANG Lei¹ JIANG Chuang¹ ZHANG Xianni¹ LI Nan¹ ZHA Jianfeng²

¹ School of Geodesy and Geomatics, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China

² Key Laboratory for Land Environment and Disaster Monitoring of NASG, China University of Mining & Technology, Xuzhou, 221116, China

Abstract: The theory and method of mining subsidence monitoring based on D-InSAR (differential interferometric synthetic aperture radar) technology is a hot topic in the current field of mine deformation monitoring. At present, three-dimensional monitoring model of mining subsidence has been constructed successfully by some scholars through integrating single line of sight to D-InSAR technology and mining subsidence law. However, the model is only suitable for the researches on mining subsidence of horizontal coal seam rather than inclined coal seam. In view of the above defects, according to the relationship between deformation of line of sight monitored by D-InSAR and three-dimensional deformation, considering the surface subsidence law of inclined coal seam mining, the surface subsidence monitoring method for inclined coal seam based on single line of sight to D-InSAR technology is proposed. The simulation experiment shows that the absolute relative error of the subsidence monitoring method is less than 9.53%, with an average of 1.31%. The absolute relative error of the horizontal movement monitoring along North-South (SN) and East-West (EW) is less than 9.78%, with an average of 3.71%, which meets the mining subsidence monitoring accuracy requirements. The surface movement and deformation caused by the mining of the 9310 working face of Nantun coal mine in yanzhou mining area, Shandong province China during 2012-01-27—2012-02-07 are successfully monitored by this method in this paper

Key words: D-InSAR; inclined coal seam mining; mining subsidence; probability integral method; movement and deformation monitoring

First author: WANG Lei, PhD, associate professor, specializes in the theories and methods of the mine deformation monitoring and control. E-mail: austwlei@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41602357, 41474026; Anhui postdoctoral Found, No. 2014B019; the Anhui University Natural Science Research Project, No. KJ2016A190.