

基于升降轨 SAR 数据的地下核爆参数反演 与 3D 形变监测方法

贺黎明, 康家帅, 郭聪, 王兴杰
(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 以朝鲜第6次地下核试验为例, 基于升降轨 ALOS-2 SAR 数据, 首先利用 D-InSAR 技术获取核试验场的视线向形变, 以此为基础, 基于贝叶斯反演方法确定核爆参数, 然后引入 POT 技术测量核试验场方位向和距离向形变, 最后, 融合 D-InSAR 与 POT 结果计算核试验地表三维形变场。研究发现, 核爆位于朝鲜丰溪里试验场万塔山下, 其坐标为东经 129.079 2°, 北纬 41.302 6°, 深度约为 550 m, 核爆导致发生水平方向位移约 3 m, 垂直方向位移约 1 m。结果表明天基 SAR 遥感技术, 特别是长波段 SAR, 在地下核试验监测中具有重要的应用价值, 可为地下核试验监测提供新思路。

关键词: 地下核试验; InSAR; 核爆参数反演; 像素偏移量跟踪; 三维形变场

中图分类号: P 228

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2024)03-0382-09

Parameter Inversion and 3D Deformation Monitoring Method of Underground Nuclear Explosion Based on Ascending and Descending SAR Data

HE Li-ming, KANG Jia-shuai, GUO Cong, WANG Xing-jie

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: HE Li-ming, E-mail: heliming@mail.neu.edu.cn)

Abstract: Taking the sixth underground nuclear test of North Korea as an example, based on the ascending and descending ALOS-2 SAR data, firstly, the line-of-sight deformation of the nuclear test site is obtained by D-InSAR technology, and the nuclear explosion parameters are determined by Bayesian inversion method. Then, the POT technology is introduced to measure the azimuth and range deformation of the nuclear test site. Finally, the D-InSAR and POT results are combined to calculate the three-dimensional surface deformation field of the nuclear test site. This study found that the nuclear explosion was located beneath the Wanta Mountain at the Punggye-ri test site in the Democratic People's Republic of Korea. The longitude and latitude of the explosion are 129.079 2° east longitude and 41.302 6° north latitude, with a depth of approximately 550 m. The nuclear explosion resulted in a horizontal displacement of about 3 m and vertical subsidence of about 1 m. The results indicate that the significance of space-based SAR remote sensing technology, especially long-band SAR, in monitoring underground nuclear test, and it could offer new ideas for underground nuclear test monitoring.

Key words: underground nuclear test; InSAR; nuclear explosion parameter inversion; pixel offset tracking; three-dimensional deformation field

近年来,随着多波段、高分辨率合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)遥感卫星发射

升空, SAR 干涉(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)测量技术得到广泛应用。特别是对

于植被覆盖度高且人员无法实地到达的区域,天基InSAR技术能够以高精度、高分辨率、全天候的典型优势进行对地观测^[1],因此成为核试验研究的重要手段之一.当核试验转入地下时,就如同天然地震一般,空腔周围岩体在巨大的冲击力作用下原始应力平衡受到破坏,造成地表发生强烈的非线性形变,而天基SAR遥感技术能够监测获取地表三维形变信息,并反演核爆位置、深度等参数,可为地下核试验监测提供一种新的非接触、远距离探测技术^[2-5].

2017年9月3日,朝鲜民主主义人民共和国(朝鲜)在丰溪里核试验场进行了有史以来最大规模的地下核试验,此后不久,朝鲜政府宣称此次核试验引爆的是一枚氢弹.有资料表明,朝鲜于2006年至2016年间陆续进行了5次地下核武器试验,据美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)和中国地震台网中心的报道,第6次核试验威力远大于前5次^[6].

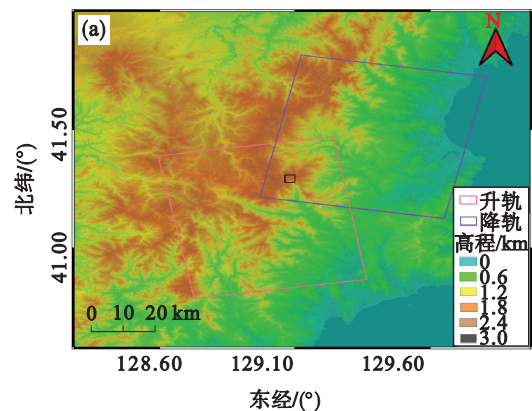
目前,地下核试验多采用地震学方法^[7]进行监测,因其高时效性已成为监测地下核试验的最佳手段之一,但由于受到地震台站分布位置的限制,事件定位估算存在一定的误差^[8-9].而InSAR技术不受敏感区域位置的影响,可快速获取研究区大范围高空间分辨率的地表形变以及反演事件位置信息.历史上,Vincent等^[10]首次基于ERS-1数据利用干涉测量方法对1992年内华达州核试验的位置进行估计.对于朝鲜核试验,Wei^[11]利用InSAR方法测量了2016年1月6日朝鲜第4次核试验相关的地表形变和爆源特征.Wang等^[6]通过TerraSAR-X数据和地震波数据揭示第6次核试验三维形变场以及核爆事件发生过程,并确定震源位置、深度和当量等信息.Sreejith等^[12]利用Mogi模型反演了朝鲜第6次核试验的位置、深度以及体积变化等信息.目前,对于地形复杂、植被茂密的核试验场三维形变监测的精度仍有待提高,本文基于长波段的升降轨SAR数据,通过融合算法来提高地表三维形变监测精度,并以此为基础改善核爆参数反演的准确性,这对于进一步提升地下核试验遥感监测能力具有重要意义.

本研究采用日本的L波段ALOS-2卫星数据,首先利用差分SAR干涉(differential InSAR, D-InSAR)测量技术处理覆盖万塔山试验场的升降轨SAR影像,爆前和爆后分别采集数据,测量山体地表厘米级的形变,然后,基于D-InSAR监测得到的形变结果,利用Mogi模型反演核试验

位置和深度等信息.常规的星载SAR通常是极轨右视成像方式,导致SAR干涉测量只对传感器成像方向(即东西方向)形变敏感,对于地下核试验这种由点源从内向外往四周发散所产生的位移,就无法全面有效提取其地表形变^[13].特别是在核试验热辐射后效阶段,空腔内压力和温度急剧降低,地下核爆炸对围岩从膨胀到收缩再到由重力作用下产生的压实整个复杂形变过程^[8].因此,本文引入像素偏移追踪(pixel offset tracking, POT)技术对核试验场地表形变进行测量,计算主从影像的像素偏移量,获取方位向形变和距离向形变,在此基础上,结合升降轨的D-InSAR结果来解算三维综合形变场,以对地下核试验所产生的复杂地表形变有更全面的认识,进而对地下核试验形变机理进行探讨.

1 研究区概况和数据源

朝鲜第6次地下核试验发生在朝鲜东北部咸镜北道吉州郡丰溪里万塔山下,该区域山体密集,地形起伏较大,万塔山的最高海拔约为2200 m,核试验场地下基岩主要是由花岗岩等硬岩组成,山体表面覆盖着一层火山沉积物^[8,14].万塔山山体结构稳定,且树林密布,春冬季时常有积雪覆盖,地质条件和环境因素使得万塔山被认为是进行地下核试验的适宜区域,本文选择北纬41.28°~41.31°,东经129.065°~129.1°范围作为研究区域(图1).鉴于密集植被覆盖等环境因素影响,数据源使用的是日本宇宙航空研究开发机构(Japan aerospace exploration agency, JAXA)发射的ALOS-2L波段卫星数据.配准和去除地形信号的数字高程模型(DEM)使用的是分辨率为30 m的航天飞机雷达地形测绘(shuttle radar topography mission, SRTM)数据.



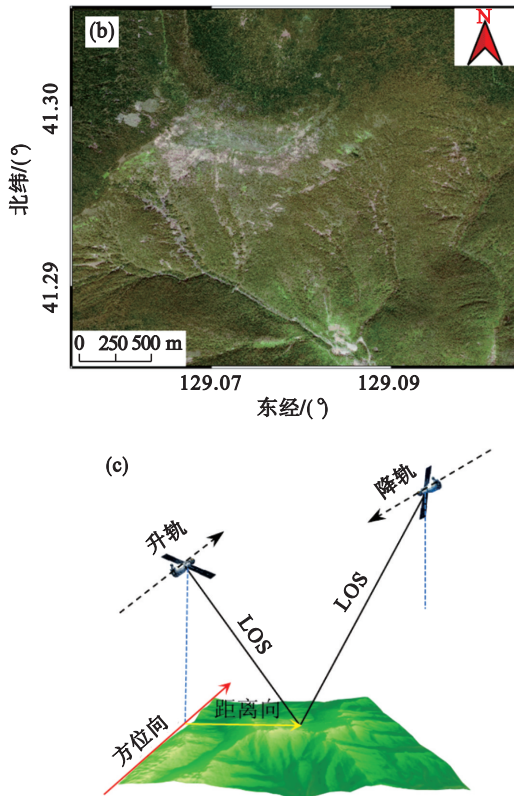


图1 研究区地理位置图

Fig. 1 Geographic location of the study area

- (a) 核试验场位置和 ALOS-2 数据覆盖情况;
 (b) 2018 年 7 月 30 日覆盖万塔山的 Wordview 卫星影像;
 (c) 升降轨 SAR 监测示意图.

2 核试验场 InSAR 干涉测量

2.1 InSAR 视线向位移提取

地下核试验必然会导致地下岩层或地质构造体的受力状态发生变化,对于当量大的核试验,理论上核爆区域地表会发生较大形变.在考虑监测对象地表形变时空变化特征和研究区地形起伏的前提下,保持 SAR 干涉对相位相关性是 SAR 数据选择的首要原则.在使用 L 波段数据之前,处理了 Sentinel-1B 卫星获取的覆盖研究区的 C 波段雷达数据,可以发现,由于核试验区植被茂密, Sentinel-1B 干涉图失相干严重,噪声非常大,无法用于形变分析.因此,选择了覆盖 2017 年第 6 次核试验区的一对升轨和一对降轨 ALOS-2 L 波段 SAR 数据作为主、副影像,将副影像配准并重采样到与主影像相同的雷达影像坐标系,通过分离初始干涉图中地形起伏相位、大气延迟相位和噪声相位等其他相位贡献,得到核试验场地表形变相位,然后由“相位-形变”转换模型计算山体表面在 SAR 两次成像时刻间的形变量,图 2 是朝鲜第 6 次地下核试验差分干涉测量获取的地表位移图.

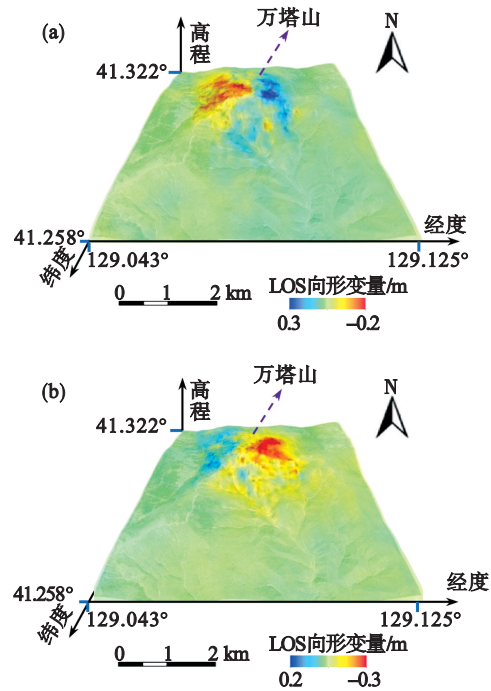


图2 升降轨 ALOS-2 数据获取的朝鲜第 6 次核试验地表位移图

Fig. 2 The surface displacement map of the sixth nuclear test in the Democratic People's Republic of Korea obtained from the ascending and descending ALOS-2 data
 (a) 升轨; (b) 降轨.

从图 2 可以看出,升降轨 SAR 数据干涉处理结果均清楚显示,万塔山山顶出现显著形变,产生的形变往相反方向运动,沿山顶的东西两侧相对突出,这主要是由于卫星近南北方向飞行,测量结果对东西方向的灵敏度较高.升轨和降轨的形变图上正、负形变波瓣近似呈对称分布,移动方向远离山两侧的中心,这种相反性表明发生沿山坡同向的水平运动,形成一个各向同性的爆炸源.在这段时间内,除了朝鲜进行第 6 次核试验以及之后约 8.5 min 发生的巷道坍塌所引发的二次地震,并没有其他事件发生,因此判定形变主要是由核试验以及巷道坍塌综合导致.从图 2 监测的结果得到万塔山地表真实位移矢量,表示山体在视线向的弹性运动.山体东侧附近向东位移 15~30 cm,西侧附近向西位移 10~20 cm,从两侧到中间形变量逐渐变小,因此,结合地下核试验爆炸理论可以判定,爆炸源位于山顶表面同向形变量接近 0 的正下方位置.

2.2 基于 LOS 向形变的核试验参数反演

地下核爆炸引起空腔体积变化,进而造成空腔周围岩体的原始应力平衡受到破坏,在宏观上将造成山体表面发生变形.在理想状况下,假设核试验的空腔为球形空腔,且处于均匀弹性半无

限空间中,引入Mogi模型,用以有效解释山体表面的变形与空腔的体积变化和半径变化之间存在的联系^[15-16],进而得到地面垂直位移和水平位移的弹性解析解.首先,以爆炸前后的InSAR监测形变为数据源,基于Mogi模型,使用贝叶斯反演方法估计爆源空腔体积变化、深度和位置.将爆源模型置于不同的位置和深度,计算理论上的地表形变场.然后将各模型的理论地表形变场和SAR影像监测得到的地表形变场进行对比,与SAR影像观测差异最小的模型值,便被视作爆源位置和深度的最佳拟合结果.

图3a和图4a为InSAR升、降轨监测形变结果,以此为基础利用Mogi模型和贝叶斯反演的方法进行模拟,得到图3b和图4b的模拟形变结果,考虑到地形对理论地表形变计算的影响,实验过程中多次模拟,将误差最小的模拟值作为最终结果,这使得模型反演更为真实,最终反演计算得到核爆位置为东经129.079 2°,北纬41.302 6°,位于万塔山下方约550 m的深度.需要注意的是,结合测量的地表位移和山体地形的弹性建模是基于均匀弹性介质假设,但现实情况下,山体表面形变是综合因素作用的结果,其中两次事件以及由其引发的山体局部滑坡都会对最终结果产生影响,山体非均匀结构也可能会使本文的结果

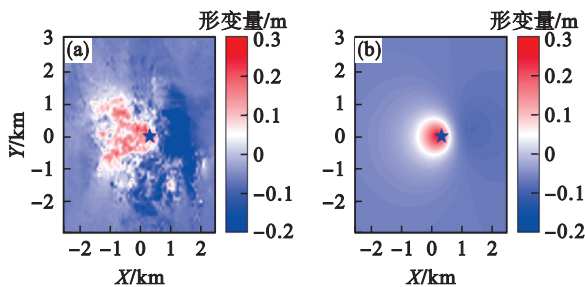


图3 升轨ALOS-2数据观测和模拟结果

Fig. 3 Observation and simulation results of ascending ALOS-2 data

(a)—InSAR观测图;(b)—模拟图.

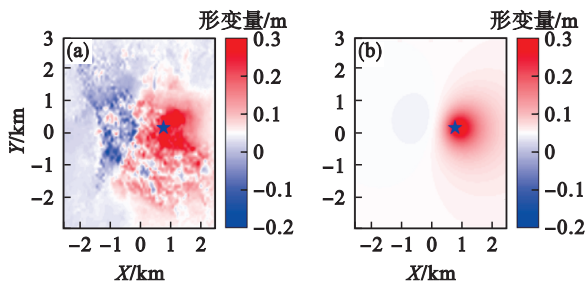


图4 降轨ALOS-2数据观测和模拟结果

Fig. 4 Observation and simulation results of descending ALOS-2 data

(a)—InSAR观测图;(b)—模拟图.

产生偏差,所以真实的核爆深度可能比反演的深度更深.

3 融合D-InSAR和POT的核试验三维形变场计算

3.1 利用POT方法测量核试验场地表形变

升降轨数据干涉测量得到的仅是两次LOS向形变结果,在单一数据源条件下无法获取真实的核试验场垂直向和水平向形变.因此,为了对朝鲜第6次地下核试验引起的三维地表变形场进行解析,本文将像素偏移量追踪(pixel offset tracking, POT)技术应用于一对升轨和降轨的ALOS-2SAR影像,因其不仅能测量距离向(视线向)位移,更能测量沿卫星飞行方向的山体形变,可以有效进行三维形变重建,从而可以更全面地研究地下核试验所引起地表变形过程及相关的爆源几何参数.

与D-InSAR不同,POT技术以选取的SAR影像对为基础,以一定长和宽的矩形框为滑动窗口模板,对影像对进行互相关计算,根据SAR影像幅度信息测量因地核试验导致的山体表面偏移量.但其测量精度容易受影像空间分辨率、匹配窗口大小、地形起伏等因素的影响,通常来说,较为复杂的区域提高SAR影像的分辨率,其距离向和方位向结果精度将得以提高.已有研究表明,通常得到的距离向(LOS向)的精度要低于常规D-InSAR的结果,方位向形变的测量精度约为方位向像元间隔的2.4%~3%(约为7.2~9 cm),能达到厘米级,因此可以用来监测地下核试验引起的较大地表形变.在计算主、副影像间的偏移量时,计算窗口大小必须仔细调整,因为偏移追踪得到的结果精度与其密切相关^[17].当窗口尺寸偏大或偏小时,都会降低精度.本研究采用了统计学方法,依次改变估计窗口大小、搜索窗口大小和滤波阈值等参数,进而测量出万塔山中心区域因核试验导致的偏移量,这个偏移量可以分为距离向和方位向上的二维形变.图5是利用POT技术测量的沿卫星飞行方向(方位向)和雷达视线方向(距离向)位移图.

3.2 计算核试验场三维形变

尽管两次独立的视线向观测值无法解析完整的万塔山核试验表面三维位移场,但通过融合升、降轨SAR影像POT测量结果和D-InSAR测量结果理论上可以计算出万塔山表面完整的三维位移场^[18-19].为了定量分析核试验场形变信息,假设地下核试验引起的地表三维形变为 R_U, R_E ,

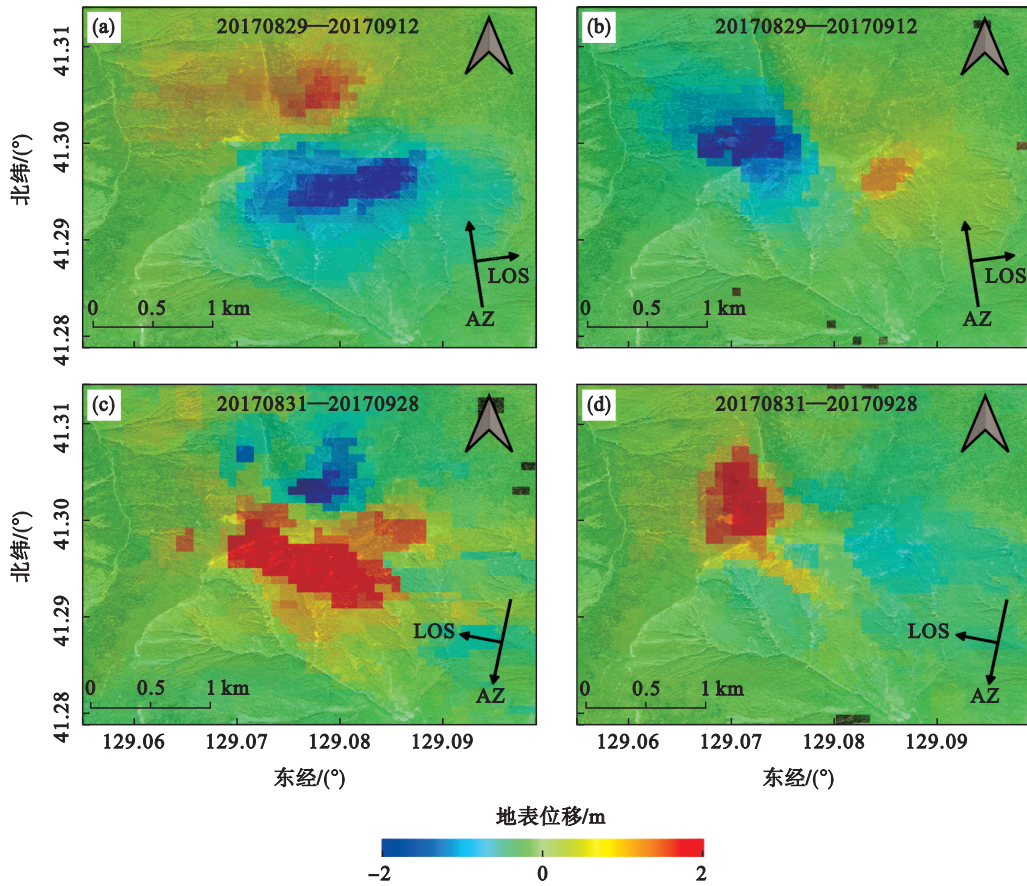


图 5 ALOS-2升降轨 SAR 影像像素偏移量追踪的结果

Fig. 5 The pixel offset tracking results using ALOS-2 ascending and descending SAR image
(a)一升轨方位向; (b)一升轨距离向; (c)一降轨方位向; (d)一降轨距离向.

R_N , 依次代表万塔山试验区域垂直、东西和南北方向的位移量, 而融合 D-InSAR 的升、降轨距离向观测值分别记为 U_{RA}^A, U_{RA}^D ; 升、降轨观测获得的方位向偏移量则记为 U_{AZ}^A, U_{AZ}^D . 并根据卫星在空中飞行的姿态, 确定雷达成像几何之间的投影关系(图 6), θ 为 SAR 图像中雷达入射角; OA 是卫星飞行方向在地面上的投影; OP 是 LOS 方向在

地面上的投影; α 为卫星方位角, 即北方向与 OA 方向之间的夹角(顺时针).

根据成像几何关系以及升降轨获取到的不同方向观测量估算 R , 构造如下解算方程:

$$U = BR. \tag{1}$$

式中; $R = [R_U, R_E, R_N]^T$; 观测值矩阵 $U = [U_{RA}^A, U_{RA}^D, U_{AZ}^A, U_{AZ}^D]^T$; 系数矩阵 $B = [B_1, B_2]^T$,

$$B_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_A - \sin(\alpha_A - \frac{3\pi}{2}) \sin \theta_A - \cos(\alpha_A - \frac{3\pi}{2}) \sin \theta_A \\ \cos \theta_D - \sin(\alpha_D - \frac{3\pi}{2}) \sin \theta_D - \cos(\alpha_D - \frac{3\pi}{2}) \sin \theta_D \end{bmatrix},$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 0 & -\cos(\alpha_A - \frac{3\pi}{2}) & -\sin(\alpha_A - \frac{3\pi}{2}) \\ 0 & -\cos(\alpha_D - \frac{3\pi}{2}) & -\sin(\alpha_D - \frac{3\pi}{2}) \end{bmatrix}.$$

其中: θ_A 和 θ_D 为升、降轨时的雷达入射角, 由于研究区域只局限于万塔山附近, 入射角范围变化较小, 对大量级的形变所带来的误差为毫米级, 不会影响解算的精度, 所以本文中升降轨的入射角取平均值, 分别为 42.91° 和 36.18° ; α_A 和 α_D 则是升、降轨的雷达方位角, 分别为 -9.42° 和 -169.74° . 依据最小二乘原理解算得到的三维形变场为

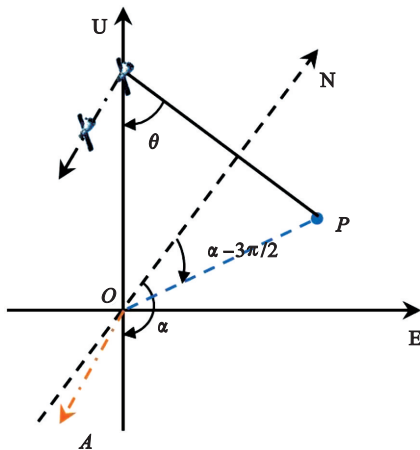


图 6 雷达卫星成像几何关系示意图

Fig. 6 Schematic diagram of radar satellite imaging geometry

$$R = (B^T P B)^{-1} B^T P U. \quad (2)$$

其中, P 为观测值的权重矩阵, 考虑到融合的 POT 结果和 D-InSAR 结果精度不同, 故需要赋予不同的权重. 本研究中将观测值分为 $U_1 = [U_{RA}^A, U_{RA}^D]^T$, $U_2 = [U_{AZ}^A, U_{AZ}^D]^T$. 相对应的观测值权重为 P_1 和 P_2 , 组成权重矩阵 $P = [P_1, P_2]^T$, 构成的误差方程式为

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= B_1 \cdot R - U_1, \\ V_2 &= B_2 \cdot R - U_2. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中, $V_1 = [V_{RA}^A, V_{RA}^D]^T$, $V_2 = [V_{AZ}^A, V_{AZ}^D]^T$ 为对应的观测值误差矩阵.

$$\left. \begin{aligned} \delta_i^2 &= \frac{V_i^T P_i V_i}{Z_i}, \\ Z_i &= n_i - \text{tr}(P_i W_i W_i^{-1} W_i^T). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: δ_i^2, n_i 分别表示 $U_i (i=1, 2)$ 的方差因子的估计值和观测值个数; P_1, P_2 以单位矩阵为初始值, $W = B^T P B, W_i = B_i^T P_i B_i (i=1, 2)$, 再根据式(5)进行定权:

$$P'_i = \frac{1}{\delta_i^2} P_i. \quad (5)$$

权重计算完成后, 将得到的新权重再代入式(2)计算, 并对式(3)和式(4)进行迭代计算, 直到观测值误差近似相等, 即 $\delta_1^2 \approx \delta_2^2$, 得到最终所需权重 P_1 和 P_2 . 图7为计算得到的朝鲜第6次核试验区三维形变场, 由结果可知, 万塔山表面发生约为3 m的水平位移, 垂直方向发生了约1 m的隆起和沉陷位移.

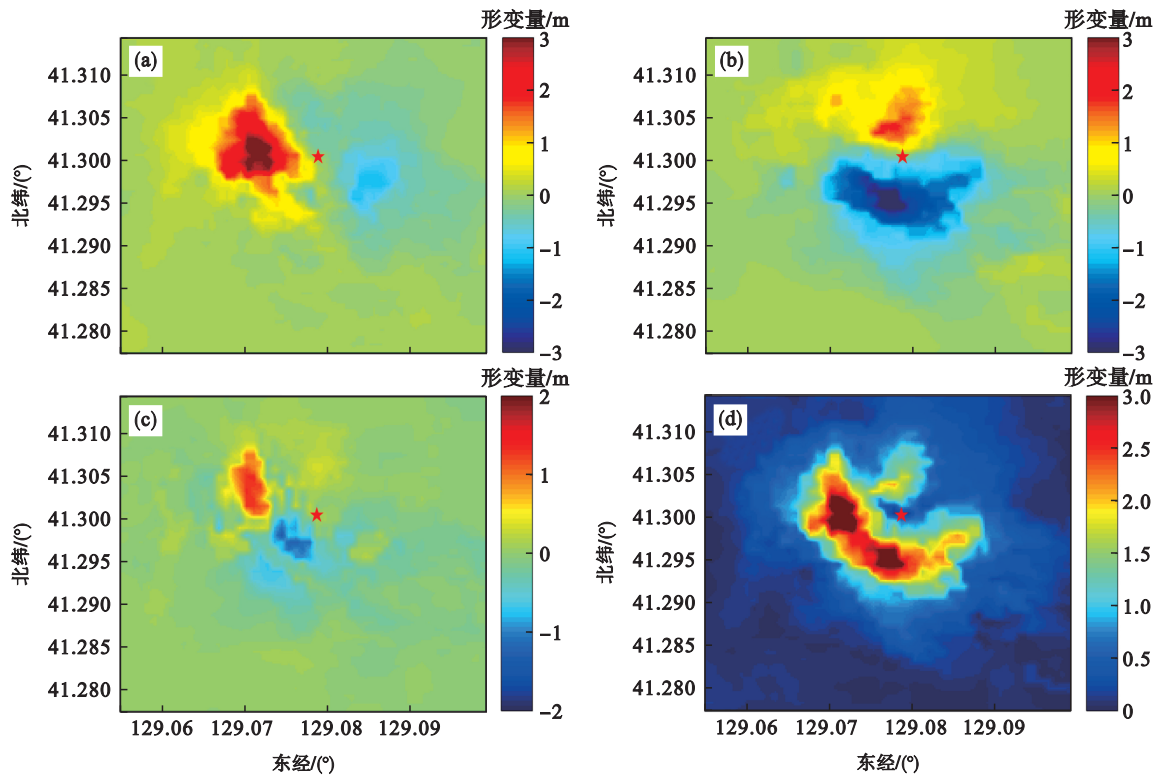


图7 朝鲜第6次核试验区三维形变场

Fig. 7 3D deformation field of the sixth nuclear test area in the Democratic People's Republic of Korea
(a)一东西向形变; (b)一南北向形变; (c)一垂直向形变; (d)一水平向形变.

4 三维形变结果分析和精度评价

4.1 水平向变形结果分析

地下核试验在热辐射后效阶段^[8], 空腔内压力和温度会随着时间降低, 但因其为地下试验, 很长时间内空腔压力和温度都高于空腔外, 在重力作用下, 山顶垂直方向的形变会随着时间增加逐渐压实, 对于不同时相的 SAR 数据观测结果各不相同, 而水平向位移很明显, 因此在分析验证

时以水平向为主.

为了定量地分析核试验带来的水平向的形变, 根据反演确定的位置分别沿南北方向和东西方向各做一条剖面 $A-A_1$ 和 $B-B_1$, 得到线上各个点的形变量, 如图9和图10所示.

从图8a和图9可以发现, 山体南部出现较大位移, 最大的位移达到3.3 m, 北坡位移量相对较小, 约为2.3 m.

从图8b和图10可以看出, 万塔山西部出现

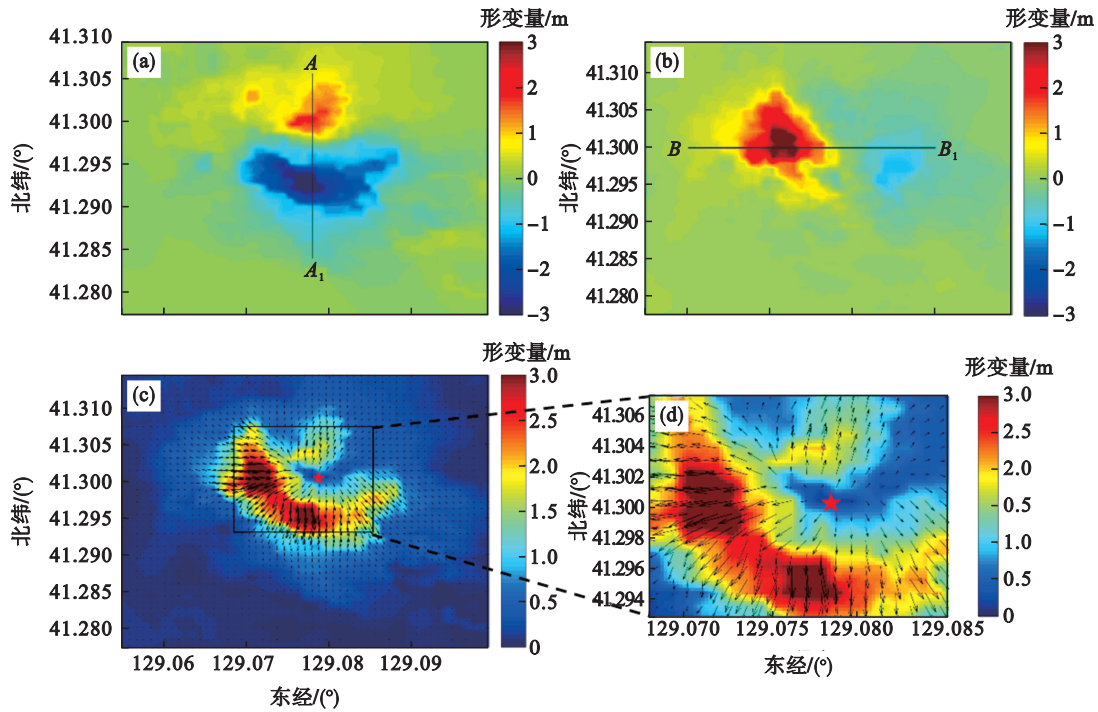


图 8 剖面 A—A₁ 和 B—B₁ 在南北方向和东西方向形变变化量

Fig. 8 Deformation of profiles A—A₁ and B—B₁ in north-south and east-west directions
(a)—南北向形变; (b)—东西向形变; (c)—水平形变; (d)—图 8c 局部放大矢量图.

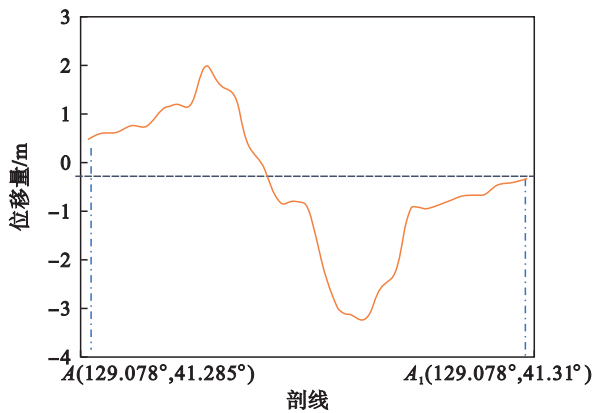


图 9 A—A₁ 剖线上的位移量

Fig. 9 Displacement along A—A₁ profile

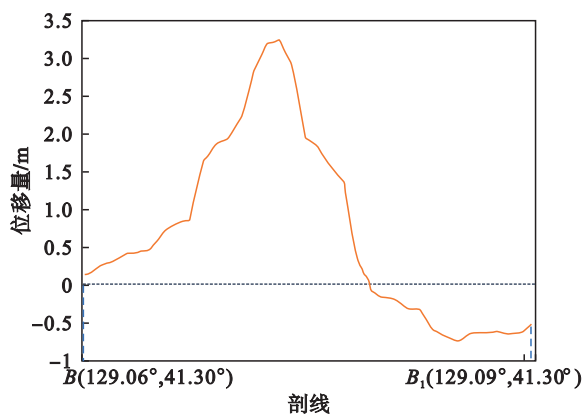


图 10 B—B₁ 剖线上的位移量

Fig. 10 Displacement along B—B₁ profile

较大位移,最大形变量约为 3.2 m,而东侧位移偏小,最大处只有 1.2 m.东西方向和南北方向在量级上与 Wang 等^[6]根据 TerraSAR-X 数据解算结果相一致.图 8c 显示了朝鲜核试验的水平向形变,主要是西侧及南侧发生了较大位移;图 8d 中颜色代表水平向位移大小,箭头代表位移方向.根据位移矢量图的箭头,结合地下核爆理论,可以由水平位移推断出爆源约为东经 129.077 8°,北纬 41.301 2°,这与利用贝叶斯反演方法获取的爆源位置十分相近.

在计算过程中发现,万塔山陡峭的西坡和南坡,吸收更多的核爆能量,从而产生更大的地表形变.由核试验的位置预测可知,地下空腔更靠近南坡的入口处,这使得西坡和南坡的地质结构相对来说更容易受到爆炸波的冲击,发生较大形变.

4.2 水平向形变对比验证

由于试验区没有全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)等可靠数据作为参考数据进行监测精度验证,因此本文将 Wang 等^[6]的解算结果作为验证数据.根据形变区域的面积大小,在东西方向上均匀选取了 21 个点,南北方向上选取了 19 个点,将三维形变场解算数据与“参考点”进行对比分析.

如图 11 所示,在东西方向上 2 号、10 号和 12 号点形变量出现异常,部分形变量有较大偏

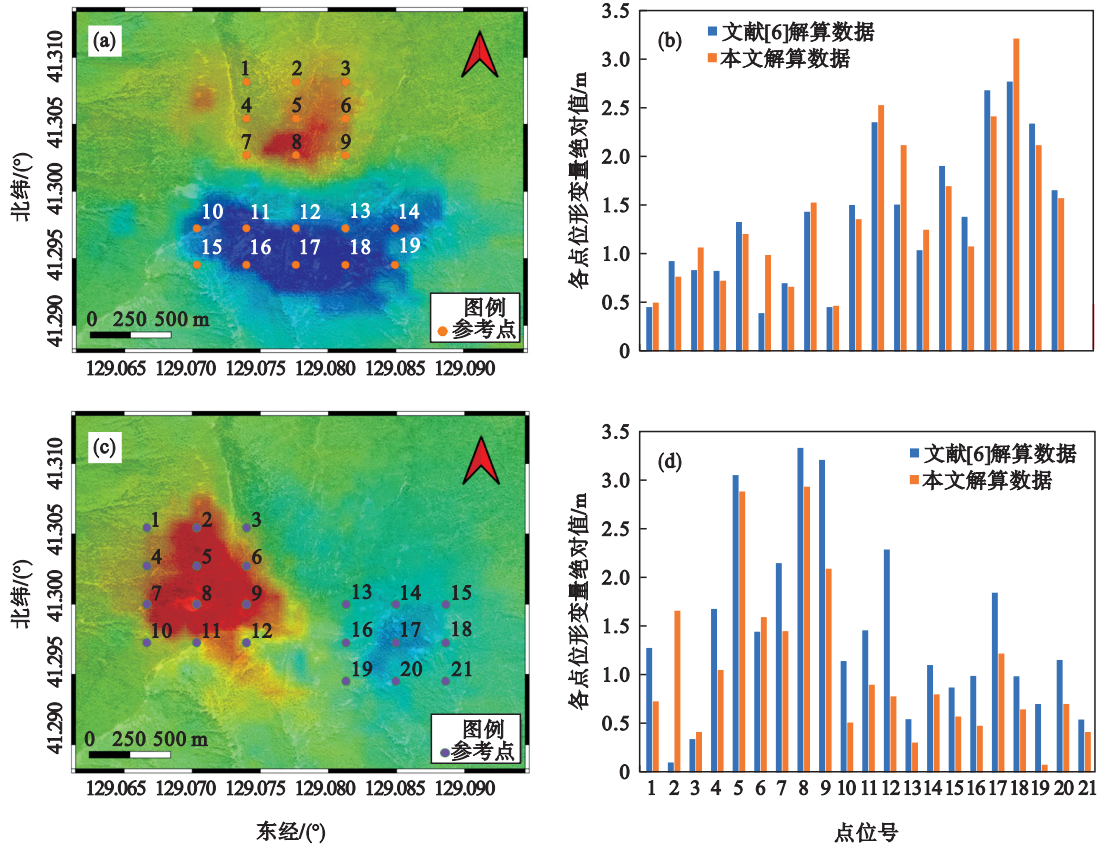


图 11 南北方向和东西方向形变量对比图

Fig. 11 Comparison map of displacements in north-south and east-west directions

(a)一南北向形变点位分布;(b)一南北向点位对比;(c)一东西向形变点位分布;(d)一东西向点位对比.

差,南北方向 6 号和 15 号点位形变量差异较大,其他点位形变量相差较小.

为了定量评价解算的精度,本文将选取的“参考点”和解算的结果依据式(6)计算均方根误差(root mean squared error, RMSE).

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(d_i - D_i)^2}{n}} \quad (6)$$

其中: d_i 表示样本中各点位所对应的数值; D_i 为本文解算各点位所对应的值; n 表示点位数.

计算得到的东西向的 RMSE 为 0.682 m,南北向的 RMSE 为 0.35 m,考虑到东西向上 2 号、10 号、12 号点和南北向 15 号点值异常,剔除异常点后的 RMSE 分别为 0.448 和 0.296 m.因此,利用 ALOS-2 数据解算的核试验场三维形变量与 TerraSAR-X 计算的结果精度相当,且从形变场的分布特征来看,ALOS-2 数据解算的形变场更能表现全面的细节特征.

5 结 论

1) 长波段的 SAR 卫星使得干涉合成孔径雷

达(InSAR)技术可以有效揭示密集植被覆盖下浅层地表剧烈运动所产生的形变.根据两对升降轨 L 波段的 SAR 影像,使用 D-InSAR 方法可以从不同方向监测估算核试验场地表形变,在此基础上,结合 Mogi 模型可反演获取核爆位置、深度等参数.

2) 融合 D-InSAR 获取的视线向形变和 POT 得到的方位向与距离向形变,解算出朝鲜地下核试验三维形变场.反映出山顶表面破裂带上的位移变化情况,具体表现为西侧及西南侧位移高达 3.2 m,东侧处位移最大值为 1.2 m,南侧位移高达 3.3 m,北侧最大位移为 2.3 m,而在垂直方向位移约 1 m.

3) 基于升降轨 L 波段的 ALOS-2 数据解算的三维形变场,通过与已有 TerraSAR-X 结果进行对比验证,证实了在有限数据源下,利用升降轨 SAR 数据解算三维形变场的方法具有可行性.

4) 本研究证明长波段的卫星更有利于地下核试验的探测,星载 SAR 数据和贝叶斯反演技术结合可以有效确定地下核试验参数,并可更好地量测、解译和建模朝鲜第 6 次地下核试验的三维形变,这对于探究地下核试验过程及其对周边区

域的影响,以及对地下核试验进行非接触式监测具有重要意义。

参考文献:

- [1] Lu Z, Wicks C Jr. Characterizing 6 August 2007 Crandall Canyon mine collapse from ALOS PALSAR InSAR [J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2010, 1(1): 85-93.
- [2] Wang T, Jónsson S. Improved SAR amplitude image offset measurements for deriving three - dimensional coseismic displacements [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(7): 3271-3278.
- [3] 朱建军, 杨泽发, 李志伟. InSAR 矿区地表三维形变监测与预计研究进展[J]. *测绘学报*, 2019, 48(2): 135-144. (Zhu Jian-jun, Yang Ze-fa, Li Zhi-wei. Recent progress in retrieving and predicting mining-induced 3D displacements using InSAR [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(2): 135-144.)
- [4] Wang Z, Yu S, Tao Q, et al. A method of monitoring three-dimensional ground displacement in mining areas by integrating multiple InSAR methods [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2018, 39(3/4): 1199-1219.
- [5] 刘翠芝, 王兴杰, 贺黎明, 等. 基于时序 InSAR 技术的近距离多煤层参数反演方法[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(6): 897-904. (Liu Cui-zhi, Wang Xing-jie, He Li-ming, et al. Parameter inversion method of multi coal seams in short distance based on time series InSAR technology [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2022, 43(6): 897-904.)
- [6] Wang T, Shi Q, Nikkhoo M, et al. The rise, collapse, and compaction of Mt. Mantap from the 3 September 2017 North Korean nuclear test [J]. *Science*, 2018, 361: 166-170.
- [7] Yang G, Zhao L F, Xie X B, et al. High-precision relocation with the burial depths of the north Korean underground nuclear explosions by combining Pn and Pg differential traveltimes [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126(6): e2020JB020745.
- [8] 曾琪明, 周子闵, 朱猛, 等. 朝鲜第 6 次核爆后 InSAR 地表形变测量与分析[J]. *科学通报*, 2019, 64(22): 2351-2362. (Zeng Qi-ming, Zhou Zi-min, Zhu Meng, et al. InSAR surface deformation measurement and analysis after the sixth nuclear explosion in North Korean [J]. *Science Bulletin*, 2019, 64(22): 2351-2362.)
- [9] 赵连锋, 谢小碧, 何焘, 等. 2017 年 9 月 3 日朝鲜地下核试验的震学鉴别和当量估计[J]. *科学通报*, 2017, 62(35): 4163-4168. (Zhao Lian-feng, Xie Xiao-bi, He Xi, et al. Seismological identification and equivalent estimation of North Korean's underground nuclear test on 3 September 2017 [J]. *Science Bulletin*, 2017, 62(35): 4163-4168.)
- [10] Vincent P, Larsen S, Galloway D, et al. New signatures of underground nuclear tests revealed by satellite radar interferometry [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(22): 1-5.
- [11] Wei M. Location and source characteristics of the 2016 January 6 North Korean nuclear test constrained by InSAR [J]. *Geophysical Journal International*, 2017, 209(2): 762-769.
- [12] Sreejith K M, Agrawal R, Rajawat A S. Constraints on the location, depth and yield of the 2017 September 3 North Korean nuclear test from InSAR measurements and modelling [J]. *Geophysical Journal International*, 2020, 220(1): 345-351.
- [13] He L, Wu L, Liu S, et al. Mapping two - dimensional deformation field time - series of large slope by coupling DInSAR-SBAS with MAI-SBAS [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(9): 12440-12458.
- [14] Pabian F, Coblentz D. Observed surface disturbances associated with the DPRK's 3 September 2017 underground nuclear test [J]. *Seismological Research Letters*, 2018, 89(6): 2017-2024.
- [15] Kiyoo M. Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them [J]. *Earthquake Research Institution*, 1958, 36: 99-134.
- [16] Patton H J, Taylor S R. The apparent explosion moment: Inferences of volumetric moment due to source medium damage by underground nuclear explosions [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2011, 116: B03310
- [17] Lee W J, Sun J, Jung H S, et al. Detection of surface changes by the 6th North Korea nuclear test using high - resolution satellite imagery [J]. *Korean Journal of Remote Sensing*, 2018, 34: 1479-1488.
- [18] 胡俊, 李志伟, 朱建军, 等. 融合升降轨 SAR 干涉相位和幅度信息揭示地表三维形变场的研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40(3): 307-318. (Hu Jun, Li Zhi-wei, Zhu Jian-jun, et al. Research on revealing 3D surface deformation field by fusion of phase and amplitude information of elevating orbit SAR interferometry [J]. *China Science: Earth Science*, 2010, 40(3): 307-318.)
- [19] Wang Z W, Yu S W, Tao Q X, et al. A method of monitoring three-dimensional ground displacement in mining areas by integrating multiple InSAR methods [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2018, 39(4): 1199-1219.

注: North Korean is the Democratic People's Republic of Korea