引文格式：刘智勇,王娟娟. 基于时序 InSAR 的地下核试验爆后形变监测与分析[J]. 地理空间信息, 2023, 21(11): 25-28. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.11.006

基于时序 InSAR 的地下核试验爆后形变监测与分析

刘智勇[1]，王娟娟[2]
（1. 武汉大学 遥感信息工程学院，湖北 武汉 430072；2. 66444 部队，北京 100094）

摘　要：地下核试验必然导致地表发生强烈形变，而在核爆后热辐射后效阶段，核试验区域仍会下沉，为更好地理解核爆后长时序沉降变化规律，利用时序 InSAR 技术处理了 2017-09-10—2018-12-10 的 39 景 Sentinel-1 SAR 数据，得到朝鲜试验区第六次核爆后长时间序列的累积地表形变量。结果表明，万塔山山体表面在核试验后仍持续下沉；核试验区山顶约下沉 30 mm，而边坡的形变量更高，约为 70~100 mm。时序 InSAR 技术可为非天然地震所引起的地表形变提供可靠的监测结果，为核爆后长期监测提供技术支撑，具有重要的实用价值。

关键词：时序 InSAR；地下核试验；地表形变
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）11-0025-04

Monitoring and Analysis of Post-explosion Deformation of Underground Nuclear Test Based on Time Series InSAR

LIU Zhiyong[1], WANG Juanjuan[2]
(1. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. Troops of PLA 66444, Beijing 100094, China)

Abstract: The underground nuclear test will inevitably lead to strong deformation of ground surface, and the nuclear test area will still sink over time in the thermal radiation aftereffect stage after the nuclear explosion. In order to better understand the long-term deformation law after the nuclear explosion, we used the time series InSAR technology to process the Sentinel-1 SAR data from September 10, 2017 to December 10, 2018, and obtained the cumulative surface deformation over the entire period after the sixth nuclear explosion conducted by the Democratic People's Republic of Korea in the nuclear test area. The results show that the surface of Mt. Mantap still continues to sink after the nuclear test, the top of mountain in the nuclear test area sinks about 30 mm, while the deformation amount of slope is relatively high, about 70~100 mm. Time series InSAR can provide a reliable monitoring results for the surface deformation caused by non-natural earthquakes, which means it showing strong application value in nuclear explosion monitoring.

Key words: time series InSAR, underground nuclear test, surface deformation

天然地震、火山活动等自然灾害，工程爆破、地下核武器试验等人类活动都会引起地面震动。通常可根据震源深度来区分该事件是自然灾害还是人为活动[1]：地震发生于中上地壳的脆弱区，离地表较深[2]；地下核试验或工程爆破引起的地面震动位于浅层地表。朝鲜民主主义人民共和国（朝鲜）在 2006-10-09—2017-09-03 共进行 6 次被证实的地下核试验，其中最后一次核试验威力远超前 5 次，一次又一次的地下核试验引发了国际社会的广泛关注[3]。因其引起的地面震动与地震类似，很多学者采用监测地震的方法对地下核试验进行监测，如 Gaber H[4]等采用震源深度与位置、频率成分、复杂度、谱比值、Ms-mb 震级比等判别方法区分地震和爆炸，成功区分了朝鲜 2016-09-09 的核试验与 2000-09-08 的 4.9 级地震；Ichinose G A[5]等基于朝鲜第 2~5 次核爆炸的表面波和体波对核试验位置进行了相对定位，分析了核试验发生的位置区域；谢小碧[6]等利用地震学方法对朝鲜 6 次地下核爆炸展开研究，结果表明朝鲜地下核试验表现出典型浅源爆炸的特征。综上所述，基于地震学方法可确定核爆的相对位置与当量，但受限于地震台网的数量与密度，核试验的详细位置与爆炸范围估算存在较大的不确定性。

20 世纪 70 年代遥感技术开始出现于地震灾害监测研究领域。随着高分辨率的合成孔径雷达（SAR）遥感卫星的发射升空，对于植被覆盖度高且人员无法实地到达的区域，合成孔径干涉雷达（InSAR）技术能以高精

收稿日期：2022-10-27。
第一作者简介：刘智勇（1982—），硕士，工程师，主要从事资源与环境、遥感卫星图像智能处理等工作，E-mail：bear2001321@163.com。

度、高分辨率、全天候的典型优势进行观测。Vincent P[7]等采用InSAR对地下核试验引起的表面位移进行观测，干涉图时间序列显示震后沉降形变受区域地质和水文环境影响呈现不同的变形速率和大小；Wang T[8]等利用TerraSAR-X SAR影像分析了第6次朝鲜核试验引起的地表位移，并建立弹性模型模拟山体的上升和倒塌，估计爆炸的位置、深度和能量；Xu X[9]等基于沉降坑形成过程的缩放规律，利用Wang T[8]估计的位置、深度和能量，开发了一种爆炸模型装置，验证了沉降带和坍塌坑的半径接近经验公式和InSAR观测值；Yocky D A[10]等对比了极化SAR测量爆炸引起的表面形变与加速计记录的地面运动预测，结果表明极化SAR表面相干空间范围与测量和预测的表面形变速率有较强的相关性；Zhu M[11]等利用Mogi模型研究了朝鲜第4次地下核试验引起的地面位移，得出校正电离层延迟能有效减小干涉图中大尺度相位斜坡影响的结论。本文以朝鲜核试验场（朝鲜东北部咸境北道吉洲郡）为研究区域，基于33景Sentinel-1雷达降轨影像，通过SBAS-InSAR技术建立研究区LOS向地表沉降模型，获取朝鲜核试验区域山谷、山脊处2017-09-10—2018-12-22的累积形变量，利用时序InSAR技术为非天然地震所引起的地表形变监测提供可靠的数据。技术路线见图1。

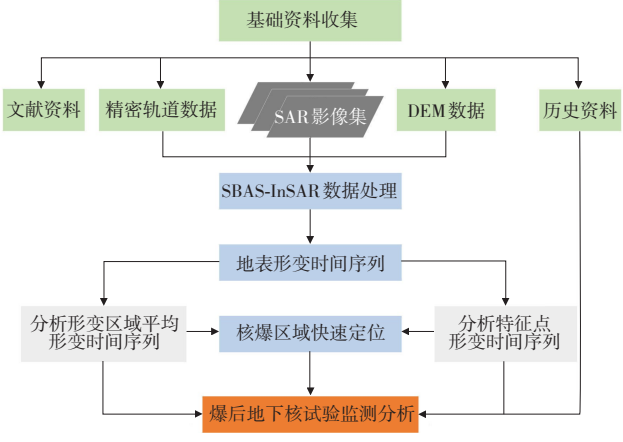


图1 技术路线图

1 核试验区概况与数据来源

朝鲜核试验区位于朝鲜东北部咸镜北道吉州郡丰溪里地区，地下核试验发生在山脉中，海拔高程约为500~2 300 m，地形起伏较大，核试验场地下基岩主要由花岗岩等硬岩组成。万塔山山体结构稳定，树林密布，大部分区域植被覆盖度较高、隐蔽性强，成为地下核试验的适宜区域，本文选取41.275°~41.31°N、129.055°~129.125°E范围作为研究区。

由于SAR卫星覆盖范围大、空间分辨率高且具备全天候运行能力，已广泛用于地表位移监测研究。欧空局的Sentinel-1 A/B卫星安装了适用于大规模成像的SAR传感器，具有短回访周期（6 d）和相当高的空间分辨率。Sentinel-1 A卫星的工作模式主要包括波模式（WV）、极宽幅模式（EW）、干涉宽幅模式（IW）和条带模式（SM）4种[12]（表1）。本文采用IW模式数据进行地表形变监测分析。

2 SBAS-InSAR技术测量核试验后地表形变

2.1 SBAS-InSAR技术原理与方法

本文采用SBAS-InSAR技术对研究区进行沉降监测。SBAS技术是由早期小基线差分干涉演变而来的一项反演时序地表形变的数据处理方法[13]。

首先根据研究范围将覆盖研究区的$N+1$幅SAR影像按时间顺序排列，并通过合适的时间与空间阈值生成SAR影像干涉像对，可在一定程度上避免时空相干的影响，进而使用最小二乘法计算得到每个子集合的形变时间序列[14]；再根据所生成连接像对的关联结果，依次对所有像对进行处理，由于干涉图中还存在地形和残余相位，需引入外部DEM和选取合适（不能在形变处选点）的GCP控制点来去除和估算；然后对干涉图进行轨道精炼和重去平，并再次利用最小费用流方法进行相位解缠和滤波；最后利用奇异值分解法计算得到地表位移的时间序列形变信息，并进行地理编码获取所需坐标系下（WGS84）的时序地表变形和地表形变速率[15]。

表1 Sentinel-1 A不同成像模式具体参数

参数	WV	IW	EW	SM
幅宽	20 km	250 km	400 km	80 km
分辨率	5 m×5 m	5 m×20 m	20 m×40 m	5 m×5 m
极化模式	HH，VV	HH+HV，VH+VV，VV	HH+HV，VH+VV，VV	HH+HV，VH+VV，VV
平均入射角	23°，36.5°	25°	20°	20°

2.2 第6次朝鲜核试验爆后地表形变提取

地下核试验的发生必然会导致地下岩层的受力状态发生变化，对于震级大的核试验，爆后的持续下沉也十分明显。已有资料表明，朝鲜第6次核试验核爆

释放的能量相当于发生了6.3级地震，将导致核试验后地下空腔内的温度和压力较长时间高于外界，在重力作用下，山体会逐渐压实，宏观上表现为地表下沉。由于核试验区域地形复杂，山体表面植被覆盖度高，难以获取第6次朝鲜核试验爆后地表形变信息。在考虑监测对象地表形变时空变化特征的前提下，保持影像干涉对相位高相干性就显得十分重要。

时序InSAR处理的时空基线连接图见图2，可以清楚发现，很多影像的相干系数均值低于0.4，这主要是由于研究区植被覆盖度高，C波段的Sentinel数据穿透性不足，导致干涉效果非常差。因此，本文在影像连接的空间基线范围内对连接的干涉图进行筛选，剔除相干性差的干涉相对。剔除前后干涉系数的变化情况见图3，通过保留高相干的干涉像对，提高相干性。地理编码后的监测结果见图4，结果表明，2017年9月—2018年12月核试验区在核爆后出现地表下沉，具体表现为靠近山体南侧区域的形变速率最快，最大形变达到100 cm/a；山体东西两侧也出现部分滑动，位移速率约为50 cm/a。

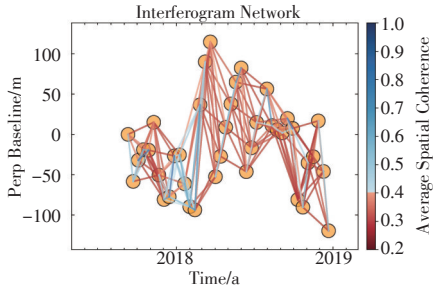
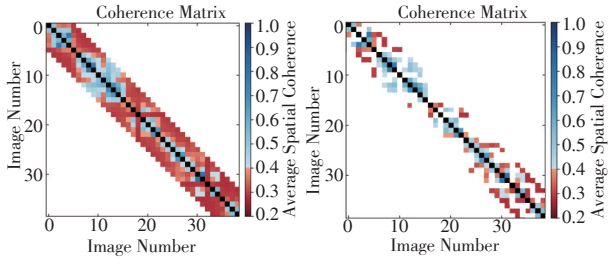


图2　时空基线连接



a 剔除前　　b 剔除后

图3　剔除前后相干系数矩阵

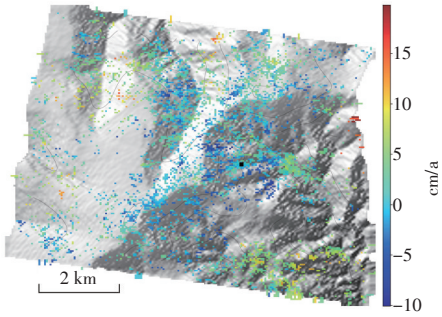


图4　地表形变速率图

3　核试验场地表形变分析

3.1　核试验场整体形变分析

由核试验场时间序列形变结果（图5）可知，核试验场东北侧存在异常变形，且随着时间的推移，形变缓慢增大；选取高相干性区域，并进一步筛选测量结果中保留下来的高相干点位，大部分区域分布在无植被覆盖的裸岩或建筑区域，观测获得的时间序列形变表明在朝鲜第6次地下核试验后的15个多月里，核爆后地表形变向远离卫星方向移动（LOS地表形变为负）。整体来看，万塔山山体地表形变出现不同程度的沉降，山坡上位移最明显，主要原因可能是核试验发生导致地下爆室的收缩，在山坡上出现缓慢局部滑坡；山顶形变量并不是很大，可能是由于山体构造的基岩主要为花岗岩，结构较稳定，导致形变速率缓慢。此外，万塔山之外出现了许多正值点位，其原因可能是提取形变时根据高程范围选取掩膜区域，导致少许噪声点未去除，该部分点位并不在研究区域内，对研究万塔山试验区形变影响不大。

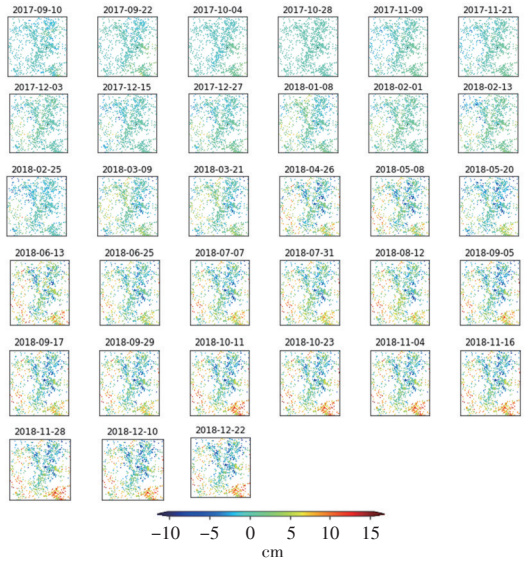


图5　朝鲜核试验场时间序列形变图

3.2　核试验场地表形变单点分析

为定量分析万塔山地表形变趋势，本文在关键区域选择典型点位进行单点时序序列形变分析。由于SBAS-InSAR技术获取的是地表LOS向形变，需转换为地表沉降值LOS $\cos\theta$，本文采用Sentinel数据的平均入射角（约为39°）。图6a中红色三角形位置为形变区域山顶上的点（41.3007N、129.07E）；图6b为该三角形点在2017-09-10—2018-12-22的形变量变化情况，随着时间增加，形变量逐渐增大，形变速率变化较平均，最大累积沉降量约为30 mm。图6c中红色三

角形位置为形变区域山坡上的点（41.3007N、129.07E）；图6d为该三角形点在在2017-09-10—2018-12-22的形变量变化情况，随着时间增加，形变量逐渐增大再减小，出现明显“两段”特征，前段形变速率较大，后段形变速率较缓和，定量验证了核试验发生后地表下沉由快变慢的现象。

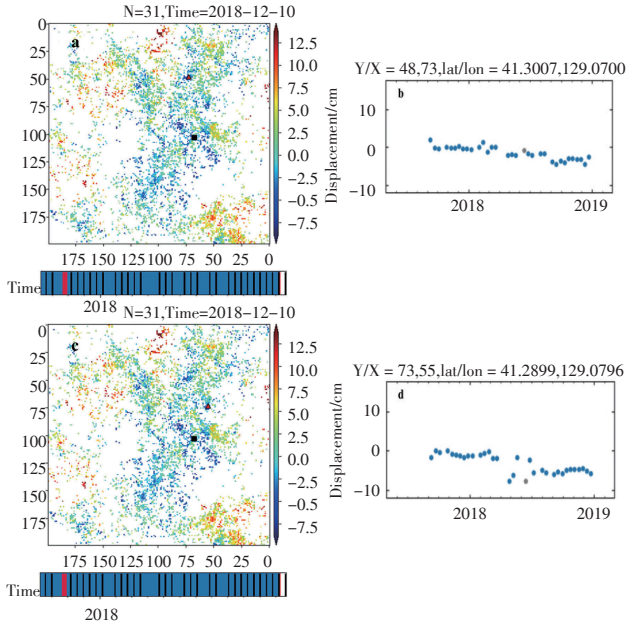


图6　朝鲜核试验场形变单点分析

4　结　语

本文以朝鲜第6次地下核试验为研究对象，基于长时序Sentinel-1雷达影像集，开展了核试验区爆后地表形变监测分析，主要结论为：①时序InSAR技术可用于爆后核试验场长时序地表形变监测，为非可达地区核试验监测提供了重要的技术支撑，监测结果对于爆后核试验场山体稳定性分析具有重要价值；②基于时序InSAR技术发现朝鲜第6次核试验爆后长时间序列累积地的表形变量在2017年9月—2018年12月核试验场各区域出现不同量级沉降，其中山顶出现约30 mm的下沉，边坡的形变量更高，约为70~100 mm。

参考文献

[1]　王向腾,倪四道,周勇,等. 地形起伏对基于地震波形的浅源地震深度反演影响:以2017年9月3日朝鲜M6.3事件为例[J]. 地球物理学报,2019,62(12):4 684-4 695

[2]　李佳欣,王赟,杨春. 盆地沉积结构对地震波初至走时的影响[J]. 地球物理学报,2022,65(9):3 554-3 568

[3]　曾琪明,周子闵,朱猛,等. 朝鲜第六次核爆后InSAR地表形变测量与分析[J]. 科学通报,2019,64(22):2 351-2 362

[4]　Gaber H, Elkholy S, Abdelazim M, et al. Seismological Investigation of September 09 2016, North Korea Underground Nuclear Test [J]. NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics,2017,6:278-286

[5]　Ichinose G A, Myers S C, Ford S R, et al. Relative Surface Wave Amplitude and Phase Anomalies from the Democratic People's Republic of Korea Announced Nuclear Tests[J]. Geophysical Research Letters,2017,44(17):8 857-8 864

[6]　谢小碧,赵连锋. 朝鲜地下核试验的地震学观测[J]. 地球物理学报,2018,61(3):889-904

[7]　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):1-14

[8]　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(6 398): 166-170

[9]　Xu X, Li J, Wang M, et al. Analogy Model Test by Experimental Simulation of the Subsidence Zone Associated with the 3 September 2017 North Korean Nuclear Test[J]. Review of Scientific Instruments,2019,90(12):124 503

[10]　Yocky D A, West R D, Abbott R E. Comparison of PolSARSurface Measurements from Underground Chemical Explosions to Recorded and Predicted Surface Ground Motion[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing,2020,14:165-174

[11]　Zhu M, Zeng Q, Jiao J. Quantitative Assessment to the Impact of InSAR Ionospheric and Tropospheric Corrections on Source Parameter Modeling: Application to the 4th Nuclear Test, North Korea[J]. Geophysical Journal International,2021,224(1):86-99

[12]　杨金明,刘志辉. Sentinel-1卫星数据产品应用探讨[J]. 地理空间信息,2016,14(12):18-20

[13]　贺黎明,裴攀科,吴立新,等. 基于时序InSAR的矿区滑坡前地表运动特征分析[J]. 东北大学学报(自然科学版),2022,43(9):1 314-1 321

[14]　Lauknes T R, Zebker H A, Larsen Y. InSAR Deformation Time Series Using an L1-Norm Small-baseline Approach[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2011,49(1):536-546

[15]　Ding Y K, Liu R, Fan Y F, et al. Monitoring Glaciers in the Chenab Basin with SBAS InSAR Technology[J]. Journal of Mountain Science,2022,19(9):2 622-2 633