

杜强. 基于无人机摄影的地震形变场测量技术研究[J]. 华南地震, 2019, 39 (2): 118-123. [DU Qiang. Research on Seismic Deformation Field Measurement Technology Based on UAV Photography[J]. South China journal of seismology, 2019, 39(2): 118-123]

## 基于无人机摄影的地震形变场测量技术研究

杜 强

(陕西能源职业技术学院 资源与测绘工程学院, 陕西 咸阳 712000)

**摘要:** 采用当前方法测量地震形变场时, 不能有效去除地震图像中存在的噪声, 得到的测量结果与实际结果之间的误差较大, 存在抗干扰性差和测量精准度低的问题。提出基于无人机摄影的地震形变场测量技术, 对无人机摄影得到的主图像和辅图像做配准处理, 采用 SAR 处理器处理图像数据, 得到干涉图。利用 SUSAN 算法检测干涉图的边缘, 通过 K 均值方法划分模板区域中存在的特征值类别, 根据划分结果得到干涉图的相关参数和噪声区域, 结合非线性扩散方法和 SUSAN 算法完成干涉图的去噪处理, 依据基线估计去除干涉图中存在的平地效应, 利用网络流算法完成相位解缠, 获得地形相位值, 绘制地震形变图, 完成地震形变场的测量。实验结果表明, 所提方法的抗干扰性强、测量精准度高。

**关键词:** 无人机摄影; 地震形变场; 测量技术

**中图分类号:** P227      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-8662(2019)02-0118-06

**DOI:** 10.13512/j.hndz.2019.02.017

## Research on Seismic Deformation Field Measurement Technology Based on UAV Photography

DU Qiang

(School of Resource and Geomatics, Shaanxi Energy Institute, Xianyang 712000, China)

**Abstract:** By using the present method of measuring the seismic deformation field, the noise in the seismic image cannot be effectively removed, measured results got is far from the actual results, and the poor anti-interference and low measurement accuracy are the big problems. Therefore, a seismic deformation field measurement technology based on UAV photography is proposed. The main image and auxiliary image obtained by UAV photography are registered, and the image data are processed by SAR processor to obtain the interferogram. The edge of the interferogram is tested by SUSAN algorithm, and the eigenvalue classes in the template area are divided by K-means method. According to the partition results, the relevant parameters and noise areas of the interferogram are obtained. The denoising of the interferogram is completed by combining the

**收稿日期:** 2018-05-30

**作者简介:** 杜强(1983-), 男, 硕士, 讲师, 研究方向: 测绘工程、变形监测。

**E-mail:** duqiang2517@163.com.

non-linear diffusion method and SUSAN algorithm. The flat-ground effect in the interferogram is removed by baseline estimation, and the phase solution is completed by using network flow algorithm. The phase value of topography is obtained by entanglement, and the seismic deformation map is drawn to complete the measurement of the seismic deformation field. The experimental results show that the proposed method has strong anti-interference and high measurement accuracy.

**Keywords:** Drone photography; Seismic deformation field; Measurement technology

## 0 引言

无人机是一种不载人的飞机,通过自备程序和无线电遥控设备操纵,可以通过计算机间歇性的或完全的自主操作<sup>[1]</sup>。无人机与有人驾驶飞机相比,可以执行危险系数较高的任务,按照应用领域,可将无人机分为民用和军用,无人机在军用方面分为靶机和侦察机<sup>[2-3]</sup>。无人机被广泛的应用在影视拍摄、航拍、救灾、农业、电力巡检、微型自拍、新闻报道和快递运输等领域中。差分干涉技术的成熟和雷达数据的增多,促进了 DInSAR 技术的发展,利用 DInSAR 技术监测地面形变时,可将精度精确到厘米,甚至是毫米量级,被广泛的应用在构造监测、地震、活动板块、火山、滑坡监测和地面沉降等领域中<sup>[4]</sup>。当前地震形变场测量技术存在抗干扰性差和测量精准度低的问题,需要研究地震形变场测量技术。

庾露、单新建、宋小刚等人提出基于子带干涉测量的地震形变场测量方法,该方法划分 DEM 实验区,将误差和干涉图相干性作为评价指标,通过逐步参数选择法分析子带干涉测量受相关参数的影响,根据分析结果制定相关的测量方案,在参数选取原则的基础上获取地震形变场数据,完成地震形变场的测量,该方法得到的测量结果与实际结果之间的误差较大,存在测量精准度低的问题<sup>[5]</sup>。左荣虎、屈春燕、张国宏等人提出基于 Sentinel-1A 数据的地震形变场测量方法,该方法通过高分辨率的 SRTM 数据去除地震形变场中存在的地形相位,并利用最小费用流方法完成相位解缠,在同震形变场的基础上通过最小二乘算法完成迭代拟合,得到地震的部分震源参数和断层滑动分布参数,该方法不能有效去除干涉图中存在的噪声,存在抗干扰性差的问题。

为了解决上述方法中存在的问题,将无人机技术与 DInSAR 技术相结合,应用到地震形变场测

量技术中,提出基于无人机摄影的地震形变场测量技术。

## 1 数据预处理

### 1.1 图像配准

为了获得精准的地震形变场数据,对无人机摄影得到的图像进行几何配准处理。图像几何配准是利用传感器、无人机摄影数据与地面点之间的方位和距离关系在椭球坐标中计算图像中点对应的同名点。地面点与传感器之间的方位和距离关系如下:

$$\check{V}(\check{P}-\check{S})=0 \quad (1)$$

$$(\check{P}-\check{S})-vt=0 \quad (2)$$

$$\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}+\frac{z^2}{c^2}-1=0 \quad (3)$$

式中, $\check{P}$ 代表的是无人机的矢量位置; $\check{S}$ 代表的是像元点在图像中的位置矢量; $v$ 代表的是光速; $t$ 代表的是回波延迟,可以通过 RSR 和列数、PRF 值和行数计算得到; $\check{V}$ 代表的是无人机的速度矢量, $\check{V}$ 可以在无人机摄影获得的图像参数文件中获得。公式(3)为椭球坐标系,其中  $a$ 、 $b$ 、 $c$  均为可以计算得到的参数。根据公式(1)、公式(2)和公式(3)计算通过无人机摄影得到的图像中存在的像素在椭球坐标系中相对应的坐标。

确定地理空间在主从图像中的覆盖范围,并划分覆盖范围,将其划分为  $M \times N$  的格网,划分得到的格网即为主点,在覆盖范围中获得  $(M-1) \times (N-1)$  个主点,在椭球坐标系中计算主点  $M(l', p')$  对应的坐标  $(x, y, z)$ ,再计算出坐标相同的辅图像中存在的辅点  $S(l, p)$  在图像中对应的位置, $l'$ 、 $p'$ 、 $l$ 、 $p$  代表的是图像中存在的像素对应的行列值。

根据  $(M-1) \times (N-1)$  个辅点和主点的位置通过下式变换辅图像的坐标。

$$\begin{cases} l = a_0 + a_1 l' + a_2 p' + a_3 l'^2 + a_4 l' p' + a_5 p'^2 \\ p = b_0 + b_1 l' + b_2 p' + b_3 l'^2 + b_4 l' p' + b_5 p'^2 \end{cases} \quad (4)$$

在计算主图像中存在的像元  $(l', p')$  对应的同名坐标时, 得到的结果不是正数的概率较大, 出现以上情况时, 在相邻点数据的基础上重新完成数据采样工作, 实现主图像和辅图像的配准<sup>[7]</sup>。

## 1.2 生成干涉图

通过无人机摄影得到的数据为粗数据, 采用 SAR 处理器对粗数据做预处理, 将粗数据变为单视复数影像, 用复数的形式表示图像中的像元  $(i, j)$  信号:

$$P(i, j) = \sqrt{a^2 + b^2} \cdot e^{-i\phi} \quad (5)$$

式中,  $\sqrt{a^2 + b^2}$  代表的是灰度值, 即振幅;  $\phi$  代表的是相位值, 在区间  $[-\pi, \pi]$  内取值。

设  $R$  代表的是地面目标与传感器中心之间的斜距, 其计算公式如下:

$$R = \frac{2k\pi + \phi}{4\pi} \quad (6)$$

设  $u_{im}$  代表的是干涉, 通过主图像和辅图像中的同名点计算得到:

$$u_{im} = |u_1| \cdot |u_2| e^{i(\phi_2 - \phi_1)} / R \quad (7)$$

式中,  $u_1$ 、 $u_2$  分别代表的是主图像和辅图像中的同名点, 通过振幅值  $|u_1| \cdot |u_2|$  描述干图, 通过相位值  $\phi_1 - \phi_2$  描述干涉图, 如图 1 所示。

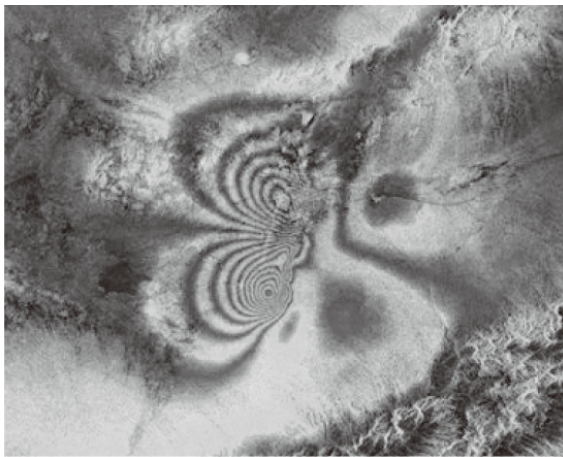


图 1 干涉图

Fig.1 Interferogram

## 2 基于无人机摄影的地震形变场测量方法

### 2.1 图像去噪

取  $n \times n$  的模板, 设  $p$  代表的是模板的中心点,

将干涉图中存在的各像素点与模板中心点重合, 在干涉图中布满模板, 通过结构张量矩阵  $M$  获得干涉图中存在 FFS 区域, 结构张量矩阵  $M$  的表达式如下:

$$M = \begin{pmatrix} G(\sigma)I_x^2 & G(\sigma)I_x I_y \\ G(\sigma)I_x I_y & G(\sigma)I_y^2 \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中,  $G(\sigma)$  代表的是高斯核函数;  $I_x$  代表的是在  $x$  轴中干涉图的梯度值;  $I_y$  代表的是在  $y$  轴中干涉图的梯度值。对结构张量矩阵  $M$  做特征值分解处理, 得到下式:

$$M = (w_1 \ w_2) \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_1^T \\ w_2^T \end{pmatrix} \quad (9)$$

式中,  $w_1$ 、 $w_2$  均为结构张量中存在的特征向量, 分别代表的是梯度方向和垂直梯度方向;  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  代表的是扩散强度。

在干涉图中布满模板, 得到像素点在干涉图中的  $\lambda_{sum}$  值:

$$\lambda_{sum} = \sum_{i=1}^{n \times n} |\lambda_1 - \lambda_2| \quad (10)$$

通过 K-means 算法对  $\lambda_{sum}$  值做分类处理, 将其划分为两个类别, 并计算不同类别数据集的均值, 均值越小的点与  $\lambda_{sum}$  值之间的距离越短<sup>[8-9]</sup>。根据计算结果通过均值较小的点选取干涉图中的 FFS 区域:

$$FFS = \{ \min[K\text{-means}(\lambda_{sum})]_{area} \} \quad (11)$$

设  $\Delta_N$ 、 $\Delta_S$ 、 $\Delta_W$ 、 $\Delta_E$  代表的是各像素点在区域中存在的四邻域差值, 根据干涉图中的 FFS 区域得到像素点在干涉图中的  $L(i, j)$  值, 其计算公式如下:

$$L(i, j) = \sqrt{\Delta_N^2 + \Delta_S^2 + \Delta_W^2 + \Delta_E^2} / 4 \quad (12)$$

根据公式(12)得到灰度阈值  $t$ :

$$t = \text{median}_{(i,j) \in FFS} [L(i, j)] \quad (13)$$

式中, median 为中值运算操作。结合 SUSAN 算法将灰度阈值  $t$  带入下式中, 区分干涉图中存在的边缘和噪声:

$$c(\vec{r}, \vec{r}_0) = e^{-\left(\frac{I(\vec{r}) - I(\vec{r}_0)}{t}\right)^6} \quad (14)$$

式中,  $c(\vec{r}, \vec{r}_0)$  代表的是判别函数;  $I(\vec{r})$ 、 $I(\vec{r}_0)$  分别代表的是模板中心像素和其他像素对应的灰度值。USAN 代表的是模板在干涉图中的最大值, 根据判别函数得到像素点在干涉图中的 USAN 大小  $n(\vec{r}_0)$ :

$$n(\vec{r}_0) = \sum_{\vec{r}} c(\vec{r}, \vec{r}_0) \quad (15)$$

设定阈值  $g$ , 阈值  $g$  的表达式如下:

$$g = 3n_{\max} / 4 \quad (16)$$

式中,  $n_{\max}$  代表的是像素点在模板中存在的总

数,通过设定的阈值得到干涉图的边缘响应  $R(r_0)$  表达式:

$$R(r_0) = \begin{cases} g - n(r_0), n(r_0) < g \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

对干涉图做若干次非线性扩散处理,通过边缘响应得到去噪后的干涉图。

## 2.2 消除平地效应

相邻点  $P_1$ 、 $P_2$  在干涉图中的相位梯度如图 2 所示。

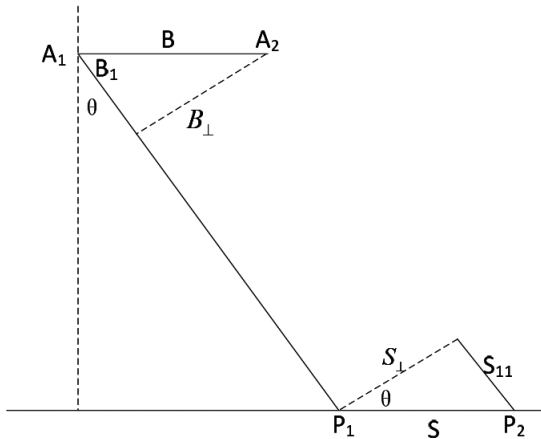


图 2 相邻点的相位梯度

Fig.2 Phase gradient of adjacent points

设  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  分别代表的是点  $P_1$ 、 $P_2$  在干涉图中的相位,其计算公式如下:

$$\varphi_1 = \frac{4\pi}{\lambda} VR_1 \quad (18)$$

$$\varphi_2 = \frac{4\pi}{\lambda} VR_2 \quad (19)$$

图 2 中  $A_1$ 、 $A_2$  代表的是无人机的位置;  $B_{11}$  代表的是在视线方向中基线  $B$  的投影;  $B_{\perp}$  代表的是在垂直方向中基线  $B$  的投影;  $\theta$  代表的是点  $P_1$  的视线入射角;  $S$  代表的是  $P_1$ 、 $P_2$  之间的距离;  $S_{11}$  代表的是在视线方向中距离  $S$  的投影;  $S_{\perp}$  代表的是在垂直视线方向中距离的  $S$  投影。  $\Delta(\Delta B)$  代表的是无人机在不同位置对于点  $P_1$ 、 $P_2$  斜距差之间的差值,其计算公式如下:

$$\Delta(\Delta R) = -\frac{B_{\perp} S_{\perp}}{R} \quad (20)$$

设  $\Delta\varphi_i$  代表的是无人机相对于点  $P_1$ 、 $P_2$  的相位差之间的差值,其计算公式如下:

$$\Delta\varphi_i = -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{B_{\perp}}{R} \cdot \frac{S_{11}}{\tan \theta} \quad (21)$$

当两个点不存在于相同的水平面中时,两点

之间存在高差  $\Delta q$ , 将公式(21)转变为下式:

$$\Delta\varphi_i = -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{B_{\perp}}{R} \cdot \frac{S_{11}}{\tan \theta} - \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{B_{\perp}}{R} \cdot \frac{\Delta q}{\sin \theta} \quad (22)$$

相位差的差值  $\Delta\varphi_i$  代表的是干涉相位在干涉图中的梯度,通常情况下包含高差分量和平地分量,去除干涉相位数据中存在的平地分量可以利于获取高程信息,去除干涉相位数据中存在的平地分量获得更加清晰的干涉图,消除平地效应<sup>[10]</sup>。

## 2.3 相位解缠

基于无人机摄影的地震形变场测量技术通过网络流算法得到解缠相位结果。具体步骤如下:

(1)通过较高相干系数的相位构建相位数据集,在相位点位置的基础上构建三角网。

(2)识别构建的三角网中存在的残差点,采用网络流算法完成正负残差点对之间的连接,构建枝切线。

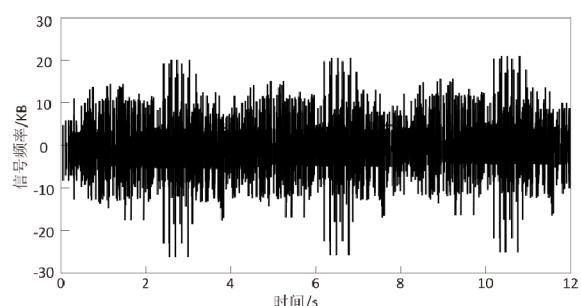
(3)根据绕过或穿过枝切线加  $2n\pi$  或减  $2n\pi$  的方法完成积分处理,根据处理结果得到解缠相位的结果,在解缠相位结果的基础上获得地形相位值,绘制出地震形变图,完成地震形变场的测量。

## 3 实验结果与分析

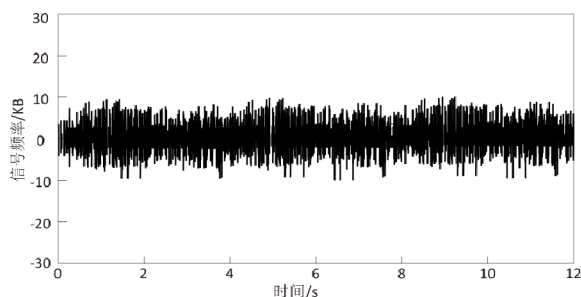
为了验证基于无人机摄影的地震形变场测量技术的整体有效性,在 *Mulan* 平台中测试基于无人机摄影的地震形变场测量技术,本次测试的操作系统为 *Windows10.0*, 光盘类型为无驱动,显存容量为 *5GB*, 主板结构为 *M-ATX*。测量地震形变场时易受到噪声的干扰,消除噪声的干扰是完成地震形变场测量的基础。分别采用基于无人机摄影的地震形变场测量技术(方法 1)、基于子带干涉测量的地震形变场测量方法(方法 2)、基于 *Sentinel-1A* 数据的地震形变场测量方法(方法 3)进行测试,对比三种不同方法的抗干扰性,测试结构如图 3 所示。

图 3(a)为没有去噪时无人机采集得到的图像信号,图 3(b)为采用基于无人机摄影的地震形变场测量技术的去噪结果,对比图 3(a)和图 3(b)可知,采用基于无人机摄影的地震形变场测量技术对图像做去噪处理后,图像的信号频率变小且波动减少。图 3(c)为基于子带干涉测量的地震形变场测量方法的去噪结果,对比图 3(a)和图 3(c)可知,采用基于子带干涉测量的地震形变场测量方法对图像做去噪处理后,得到的图像信号频率变

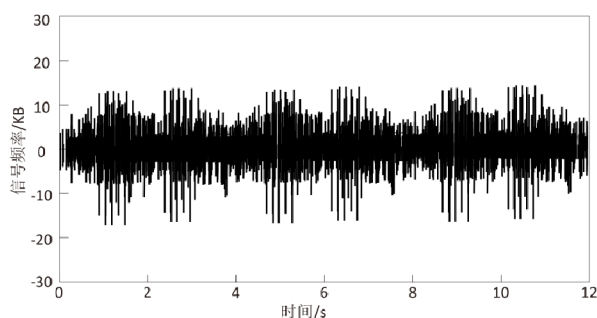
小但波动较大。图 3(d)为基于 Sentinel-1A 数据的地震形变场测量方法的去噪结果,对比图 3(a)和图 3(d)可知,采用基于 Sentinel-1A 数据的地震形变场测量方法对图像做去噪处理后,图像的信号频率波动较大。对比三种不同方法的测试结果可知,基于无人机摄影的地震形变场测量技术可有效去除通过无人机摄影得到的图像中存在的噪声信号,



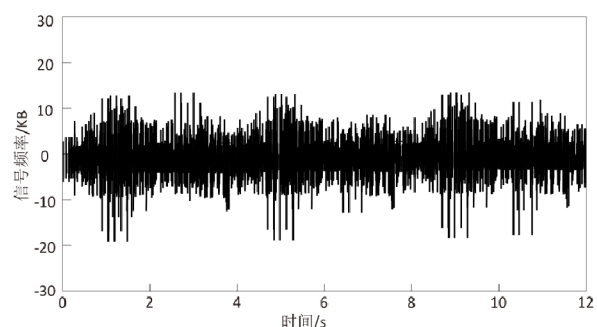
(a)去噪前的信号频率



(b)方法 1 的去噪结果



(c)方法 2 的去噪结果



(d)方法 3 的去噪结果

图 3 三种不同方法的去噪结果

Fig.3 Denoising results by three different methods

因为该方法采用 SUSAN 算法完成图像的边缘检测,并通过 K 均值法划分特征值,结合非线性扩散方法和 SUSAN 算法去除图像中存在的噪声,验证基于无人机摄影的地震形变场测量技术的抗干扰性好。

分别采用基于无人机摄影的地震形变场测量技术(方法 1)、基于子带干涉测量的地震形变场测量方法(方法 2)、基于 Sentinel-1A 数据的地震形变场测量方法(方法 3)测量地震形变场,对比三种不同方法的测量精准度,测试结果如图 4 所示。

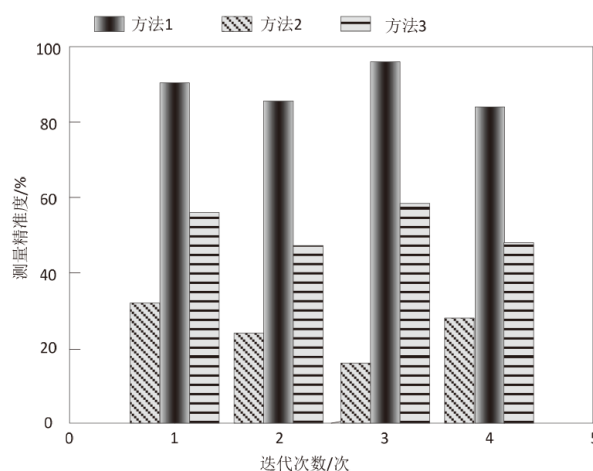


图 4 三种不同方法的测量精准度

Fig.4 Measurement accuracy by three different methods

分析图 4 可知,采用基于无人机摄影的地震形变场测量技术测量地震形变场时,在多次迭代中的测量精准度均在 80%以上,高达 95%;采用基于子带干涉测量的地震形变场测量方法测量地震形变场时,在多次迭代中该方法的测量精准度均在 40%以下;采用基于 Sentinel-1A 数据的地震形变场测量方法测量地震形变场时,该方法在多次迭代中得到的测量精准度在 50%上下波动。对比三种不同方法的测试结果可知,基于无人机摄影的地震形变场测量技术可精准的完成地震形变场的测量,因为该方法消除了平地效应,通常情况下干涉相位数据中存在高差分量和平地分量,基于无人机摄影的地震形变场测量技术去除了数据中存在的平地分量,提高了干涉图的清晰度,提高了基于无人机摄影的地震形变场测量技术的测量精准度。

## 4 结语

我国处于太平洋板块、欧亚板块和印度板块

三者的交汇处,是地震高发区。测量地震形变场对研究地震机理和灾害评估的意义较大。当前地震形变场测量方法存在抗干扰性差和测量精准度低的问题,提出基于无人机摄影的地震形变场测量技术,可以有效去除无人机获取图像中存在的噪声,精准的完成地震形变场的测量,解决了当前方法中存在的问题。

### 参考文献:

- [1] 白泽朝,徐青,靳国旺,等. 利用 Sentinel-1A 数据反演 2016 年青海门源  $M_w$  5.9 地震的同震形变场及断层参数[J]. 地震,2017,37(3):12-21.
- [2] 姚鑫,周振凯,李凌婧,等. 2017 年四川九寨沟  $M_s$  7.0 地震 InSAR 同震形变场及发震构造探讨[J]. 地质力学学报,2017,23(4):507-514.
- [3] 董景龙,沈强,汪汉胜,等. 台湾美浓  $M_w$  6.4 地震 InSAR 形变场初步分析[J]. 大地测量与地球动力学,2017,37(9):893-897.
- [4] 刘文祥. 升降轨 SAR 数据融合的地震形变场观测[J]. 遥感信息,2016,31(4):35-40.
- [5] 庾露,单新建,宋小刚,等. 基于子带干涉测量技术的巴基斯坦地震形变获取研究[J]. 地球物理学报,2016,59(4):1371-1382.
- [6] 左荣虎,屈春燕,张国宏,等. 基于 Sentinel-1A 数据获取美国纳帕  $M_w$  6.1 地震同震形变场及断层滑动反演[J]. 地震地质,2016,38(2):278-289.
- [7] 杨珍,张永志,焦佳爽,等. 基于 GIS 的当雄同震 InSAR 形变场分析[J]. 地震工程学报,2017,39(1):119-125.
- [8] 孟宪纲,王庆良,陈聚忠,等. 康定  $M_s$  6.3 级地震前形变场变化与区域地震活动性[J]. 地球物理学进展,2016,31(5):1986-1990.
- [9] 李铁明,白玉柱,邵德晟. 滇西南普洱强震群地区地壳形变的数值模拟[J]. 中国地震,2017,33(2):203-218.
- [10] 齐文博,刘培洵,郭彦双. 具有预触发采集功能的超声波检测系统的设计与实现[J]. 电子设计工程,2017,25(16):60-64.