

地基 SAR 基坑微形变监测方法研究

刘小阳,孙广通,李峰,宋萍,刘军,钱安,王秋玲

(防灾科技学院 防灾工程系,河北 三河 065201)

摘要: 地基 SAR 作为一种新型地面遥感技术,因其高精度、全天候、设站灵活、实时连续观测等特点,在微形变监测领域具有广泛的应用前景。在深入研究了地基 SAR 微形变监测关键技术问题的基础上,结合基坑监测特点,采用加权圆周中值滤波去噪,提高干涉图信噪比,削弱噪声引起的相位差;提出了基于 PSC 网的气象改正,减小气象扰动影响,削弱大气相位差。并将改进方法应用到基坑监测实验。实验结果表明,通过加权圆周中值滤波和 PSC 网的气象改正有效地削弱地基 SAR 基坑监测中噪声和大气引起的相位变化,实现了亚毫米级的监测精度。为验证地基 SAR 监测的准确性,利用高精度全站仪进行了同步观测,监测结果表明二者高度一致,进一步说明了地基 SAR 技术用于基坑微形变监测的可靠性和可行性。

关键词: 地基 SAR; 基坑; 微形变监测; 气象改正

中图分类号: P237 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0317002

Research on microdeformation monitoring of foundation pit based on ground-based SAR

Liu Xiaoyang, Sun Guangtong, Li Feng, Song Ping, Liu Jun, Qian An, Wang Qiuling

(Department of Disaster Prevention Engineering, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, China)

Abstract: The ground-based SAR, as a new type of ground remote sensing technology, is widely used in the field of microdeformation monitoring because of its high precision, all-weather, flexible and real-time continuous observation. Based on the deep research on the key technical problems of micro-deformation monitoring of ground-based SAR, combined with the characteristics of foundation pit monitoring, the method of weighted median filter denoising was used to improve the signal-to-noise ratio of interferogram and weaken the noise phase difference. The method of atmospheric correction based on the PSC network was proposed to reduce the impact of meteorological disturbances and weaken the atmospheric phase difference. The improved methods were applied to the foundation pit monitoring experiment. The experimental results show that the weighted median filter and PSC network weather correction effectively weaken the phase change caused by noise and atmospheric, and achieve monitoring accuracy of submillimeter. In order to verify the accuracy of ground-based SAR monitoring, the synchronous

收稿日期:2017-10-05; 修订日期:2017-11-03

基金项目:中国地震局教师科研基金(20150105)

作者简介:刘小阳(1978-),男,副教授,硕士,主要从事遥感图像处理、工程测量的教学与研究。Email:liuxiaoyang1209@163.com

observation is carried out using high-precision total station, the monitoring results are consistent with the results of ground-based SAR, which verifies the reliability and feasibility of ground-based SAR technique in monitoring the microdeformation of pits.

Key words: ground-based SAR; foundation pit; microdeformation monitoring; atmospheric correction

0 引言

随着城市的快速发展,各种大型建筑不断涌现,工程基础开挖的面积和深度也不断增大。为保障基坑开挖及地下基础施工过程中基坑边坡安全,需对基坑边坡进行支护与加固。但基坑边坡侧向压力的存在,以及降雨、坡顶外加荷载等外界因素的影响,都将引起基坑边坡位移形变。过大的形变不仅能导致基坑垮塌,还会危及周边建筑物和构筑物的安全,造成巨大的经济损失和人员伤亡。为确保安全,需对基坑边坡进行水平形变安全监测。

常规的监测手段主要有全站仪、GPS、三维激光扫描等。全站仪和 GPS 可以通过高精度连续观测,获取高精度基坑边坡形变信息,但都局限于不同点位的形变量。三维激光扫描虽可获取边坡整体形变信息,但因测量精度低而难以及时、精确获得基坑的真实形变量。地基 SAR 作为一种基于雷达的地面遥感成像系统,在雷达传感器沿轨道往返运动时通过发射和接收微波脉冲进行重复监测,实时获取目标区域的形变信息。因其高精度、全天候、设站灵活、实时连续观测等优点,已发展成为一种全新的监测手段,被广泛应用到滑坡^[1]、冰川^[2]、露天矿^[3]、大坝^[4]、建筑物^[5]、桥梁^[6]等形变监测。但在基坑微形变监测领域,国内外鲜有研究。

文中介绍了地基 SAR 干涉测量技术原理,深入研究了地基 SAR 形变监测中的噪声相位差和气象扰动相位差的消除方法。通过基坑边坡监测实验,验证了改进方法的有效性。同时,通过与传统高精度全站仪监测结果对比分析,验证了基地 SAR 用于基坑边坡形变监测的可靠性和可行性。

1 地基 SAR 基坑微形变监测方法

1.1 地基 SAR 干涉测量技术

地基 SAR 干涉测量采用合成孔径雷达和进步频率连续波等技术,对目标物体进行有间隔的重复观

测,以获取目标区域的高空间分辨率的雷达影像^[1-6]。对于每个影像像素,地基 SAR 都提供接收回波的同向和正交分量,从而可以导出信号二维相位和振幅。振幅主要用于解释图像场景并研究被监视区域的反向散射特性,相位可以用于变形测量或数字高程模型生成。在地基 SAR 变形监测中,干涉测量技术通过对目标物体不同时刻的反射信号相位差计算其形变量。设在不同时间获取两幅图像,取两个同源像素(即对应于相同目标的像素)的相位 φ_1 和 φ_2 :

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= \varphi_{\text{geom}-1} + \varphi_{\text{scatt}-1} = \frac{4\pi R_1}{\lambda} + \varphi_{\text{scatt}-1} \\ \varphi_2 &= \varphi_{\text{geom}-2} + \varphi_{\text{scatt}-2} = \frac{4\pi R_2}{\lambda} + \varphi_{\text{scatt}-2}\end{aligned}\quad (1)$$

式中: R_1 和 R_2 为两次传感器到目标距离; φ_{scatt} 为雷达信号目标间传播产生的相移; λ 为发射信号的波长。忽略信号传播效应,地基 SAR 观测的干涉测量相位 $\Delta\varphi_{21}$ 为:

$$\Delta\varphi_{21} = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{4\pi(R_2 - R_1)}{\lambda} + (\varphi_{\text{scatt}-2} - \varphi_{\text{scatt}-1}) \quad (2)$$

如果相移分量 $\varphi_{\text{scatt}-1}$ 和 $\varphi_{\text{scatt}-2}$ 在两次采集之间保持恒定(即其随时间的变化是可忽略),则 $\Delta\varphi_{21}$ 直接与距离差 $(R_2 - R_1)$ 相关,即反映了目标位移信息。但客观上因为相移分量的变化,干涉测量相位 $\Delta\varphi_{21}$ 可表示为:

$$\Delta\varphi_{21} = \varphi_2 - \varphi_1 = \varphi_{\text{disp}} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_{\text{geo}} + \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{noise}} - 2n\pi \quad (3)$$

式中: φ_{disp} 为雷达视线向地表形变引起的相位差; φ_{atm} 为气象扰动引起的相位差; φ_{geo} 为两幅图像采集时轨道误差导致的相位差; φ_{topo} 为空间基线引起的相位差; φ_{noise} 为噪声引起的相位差; n 为整周模糊度。

由于地基 SAR 是在轨道非常稳定的状态下连续观测,图像采集时轨道误差 φ_{geo} 和空间基线引起的相位差 φ_{topo} 均可忽略,所以雷达视线向地表形变引起的相位差 φ_{disp} 可表示为:

$$\varphi_{\text{disp}} = \Delta\varphi_{21} - \varphi_{\text{atm}} - \varphi_{\text{noise}} + 2n\pi \quad (4)$$

因此,要获得精确的地表形变相位差 φ_{disp} ,以获得高精度目标雷达视线向形变量,就必须有效地消除地基 SAR 干涉测量中的噪声相位差 φ_{noise} 和气象

扰动相位差 φ_{am} 。

1.2 噪声相位去除

由于大量相位噪声的存在,降低了地基 SAR 数据原始干涉相位图像的质量,影响后续相位解缠及测量精度。为有效地削弱噪声影响,需对干涉相位图进行滤波处理。针对地基 SAR 形变监测区域不连续性导致干涉相位图中的信号与噪声频带相互混叠问题,文中引入能够同时滤除热噪声和环境噪声的加权圆周中值滤波^[7-8],其基本思路如下:

(1) 对滤波窗口内的各点相位矢量求和,获得主矢量 $d_{n,m}$;

(2) 利用主矢量 $d_{n,m}$ 计算窗口相角差 $\bar{\varphi}_{kn,km}$ 及窗口区域内相角差中值 $M_{n,m}$;

(3) 以相角差中值 $M_{n,m}$ 为基础,计算窗口区域内各点相角差的权值 $W_{kn,km}$;

(4) 对窗口区域内各点相角差进行加权求和,再加上其对应的主矢量相角,即可获得滤波后的结果。

$$\hat{\varphi}_{n,m} = \sum_{kn=n-N}^{n+N} \sum_{km=m-M}^{m+M} W_{kn,km} \cdot \bar{\varphi}_{kn,km} + \arg(d_{n,m}) \quad (5)$$

其中:

$$W_{kn,km} = \frac{1/(1+(\bar{\varphi}_{kn,km}-M_{n,m})^2)}{S_{n,m}}$$

$$d_{n,m} = \sum_{kn=n-N}^{n+N} \sum_{km=m-M}^{m+M} \exp(j\varphi_{kn,km})$$

$$\bar{\varphi}_{kn,km} = \arg[\exp(j\varphi_{kn,km})/d_{n,m}]$$

$$M_{n,m} = \text{median}[\arg[\exp(j\varphi_{kn,km})/d_{n,m}]]$$

$$S_{n,m} = \sum_{kn=n-N}^{n+N} \sum_{km=m-M}^{m+M} [1/(1+(\bar{\varphi}_{kn,km}-M_{n,m})^2)]$$

式中: $d_{n,m}$ 表示主矢量; $\arg[\cdot]$ 表示对复数求相角运算; $\text{median}[\cdot]$ 表示对计算窗口中的各元素取中值运算; (kn, km) 表示窗口元素的坐标。

1.3 气象扰动相位去除

气象扰动对地基 SAR 时序形变监测精度影响非常大,为获得可靠的监测形变量,必须对相干相位图进行气象改正^[9]。鉴于大气影响的复杂性,气象改正方法多样^[10]。针对基坑监测区域小、空间变化平滑、边坡形变量小、图像时间连续等特点,文中提出基于 PSC(Persistent Scatterer Candidates)网的气象改正方法。首先通过设定相干系数阈值提取监测区域内的稳定点作为 PS 点,再利用振幅离散指数阈值对

所选 PS 点作进一步筛选,选择其中更加稳定点作为 PSC 点。利用提取出的 PSC 点构建 PSC 三角网,以此实现对区域内目标点的气象改正。

处理过程具体如下:

(1) 计算 N 幅地基 SAR 时序干涉图像各像元点的相干系数 γ_n ,并解算出其平均干涉系数 $\bar{\gamma}_n$ 。

$$\gamma = \frac{E\{z_1 z_2^*\}}{E\{|z_1|^2\}E\{|z_2|^2\}} \quad (6)$$

$$\bar{\gamma}_n = \frac{\sum_{n=1}^N \gamma_n}{N} \quad (7)$$

(2) 设置相干系数阈值 $\bar{\gamma}$,选取相干系数 $\gamma_n > \bar{\gamma}$ 的点作为 PS 点。

(3) 计算地基 SAR 干涉图中所选 PS 点的振幅离散指数 $D_{a,ps}$,设置振幅离散指数阈值 $D_{a,psc}$,从 PS 点中选择振幅离散指数 $D_{a,ps} < D_{a,psc}$ 的稳定点作为 PSC 点。

$$D_{a,ps} = \frac{\sigma_{a,ps}}{m_{a,ps}} \quad (8)$$

式中: $\sigma_{a,ps}$ 为 PS 点的振幅标准偏差; $m_{a,ps}$ 为 PS 点的平均振幅。

(4) 利用所选 PSC 点构建监测区域气象改正三角网进行大气改正。对网内目标点,利用该点所处三角形 PSC 点距离求权后进行加权改正。

2 基坑监测实验与分析

2.1 实验概况

此次监测对象为防灾科技学院基础教学楼地下停车场建筑基坑,该基坑长约 85 m,宽约 47 m,深约 9 m,占地面积约 4 000 m²。基坑主要采取边坡喷锚支护,部分采用悬臂桩支护。由于工地所处为潮白河冲积平原,整个基坑处于沙土层中,地质条件差。为保障基坑施工安全,同时为进一步了解工程施工过程中基坑边坡附近吊车、搅拌机及泵车对基坑边坡的影响,实验小组利用 FastGB SAR 对基坑北面边坡进行了形变监测。

此次观测时间为 2016 年 11 月 30 日 12 时 03 分至 12 月 1 日 6 时 28 分,历时 18.2 h。数据采集间隔为 5 min,共获取 SAR 影像 222 幅, FastGB SAR 观测参数如表 1 所示。设备 FastGB SAR 安置在基坑的南面,设站地点地基稳定。监测边坡位于仪器的前方,监测距离目标约为 100 m。由于观测视线倾角很小,

雷达视线向与基坑边坡移动方向基本平行,故可以认为雷达监测的形变量即为基坑边坡位移量。图 1 为实验现场实景。为更精确提取基坑边坡坡顶的位移量信息,在坡顶 P1、P2、P3、P4、P5 位置埋设了 5 个角反射器。同时为进一步验证地基 SAR 监测基坑的可靠性,在 P1、P3 位置附近埋设 2 个小棱镜(如图 2 所示),利用高精度徕卡 TM50 测量机器人对小棱镜进行同步观测,以便同时利用两种监测方法获取同一位置的形变信息,进行对比分析。

表 1 Fast GBSAR 观测参数

Tab.1 Fast GBSAR observation parameters

Parameter	Value
Observation distance/m	240
Working frequency/GHz	17.2
Scan length/m	1.8
Resolution in range/m	0.5
Resolution in azimuth/mrad	4.8
Sampling frequency/min	5
Starting time	2016-11-30 T12:03
End time	2016-12-01 T06:28
Number of radar images	222
Radar inclination/(°)	<0.6



图 1 监测现场

Fig.1 Monitoring site

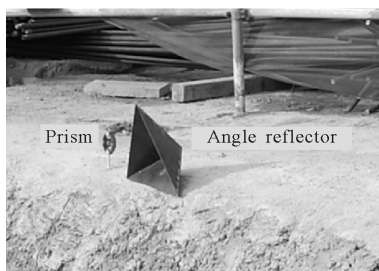


图 2 小棱镜和角反射器

Fig.2 Prism and angle reflector

2.2 实验结果与分析

2.2.1 数据质量分析

对 FastGBSAR 监测数据进行聚焦处理后,获得了基坑边坡及周边物体振幅强度图。基坑边坡为混凝土结构,具有较强的雷达反射。因此从振幅强度图中可以清晰看出基坑边坡的位置轮廓(如图 3 所示),并对感兴趣的监测区域进行裁剪处理。为降低热噪声和环境噪声对地基 SAR 数据原始干涉相位图像质量的影响,提高相位解缠及距离测量精度,对监测数据进行了加权圆周中值滤波的处理。

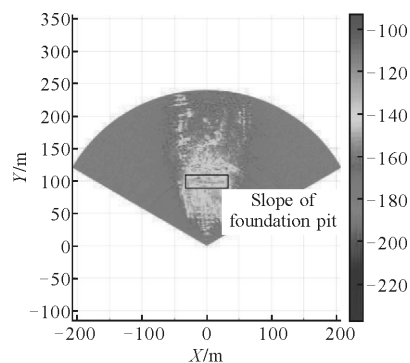
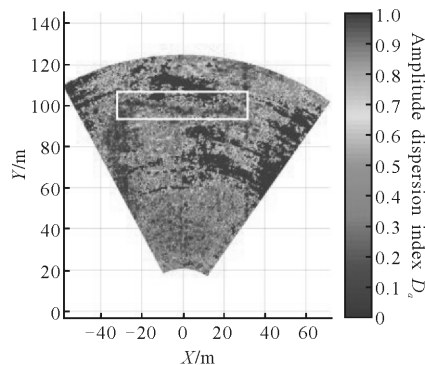


图 3 振幅强度

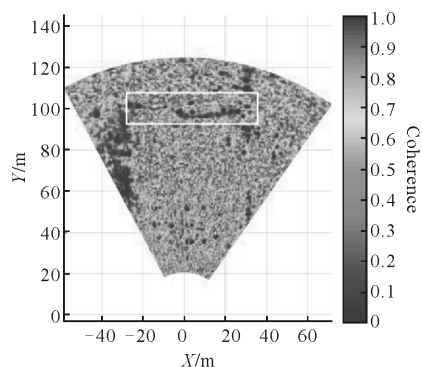
Fig.3 Amplitude intensity

为进一步评估噪声处理效果及监测数据质量,对数据处理后的振幅离散指数、相位相干性,估计的稳定性指数和位移精度等图像质量参数进行了分析。如图 4(a)所示,目标区域监测点的振幅离散指数优于 0.1;图 4(b)所示,监测点在观测时间内的相位相干性接近 1;图 4(c)所示,估计的稳定性指数,即每个像素相对于振幅值变化的稳定性>7;图 4(d)所示,相位测量精度优于 0.1 mm。所有这些指标表明地基 SAR 监测数据通过加权圆周中值滤波处理后具有很高的干涉质量。

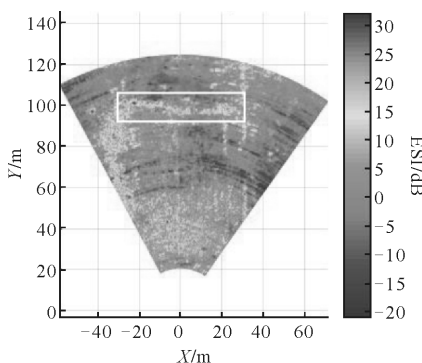


(a) 振幅离散指数

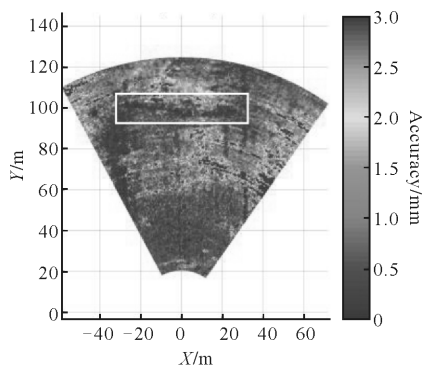
(a) Amplitude dispersion index



(b) 相位相干性
(b) Phase coherence



(c) 估计的稳定性指数
(c) Estimated stability index



(d) 位移精度
(d) Accuracy of displacement

图 4 地基 SAR 图像质量参数

Fig.4 Ground-based SAR image quality parameter

2.2.2 气象扰动分析

为有效提取监测区域内的稳定点,设定相位相干系数阈值 0.99 进行初选,共提取 PS 点 15 831 个(如图 5 所示)。所选 PS 点相关性很高,但大部分点的振幅离散指数较大。通过对所选 PS 点的振幅离散指数进行统计分析,并顾及 PS 点的密度,设定振幅离散指数阈值 0.2 做进一步筛选,提取出用于

此次气象改正的 PSC 点 64 个。最后设定距离阈值 50 m, 利用所选的 PSC 点构建气象改正网(如图 6 所示)。

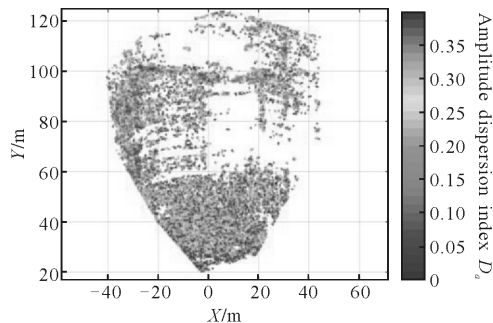


图 5 初选 PS 点
Fig.5 Selected PS

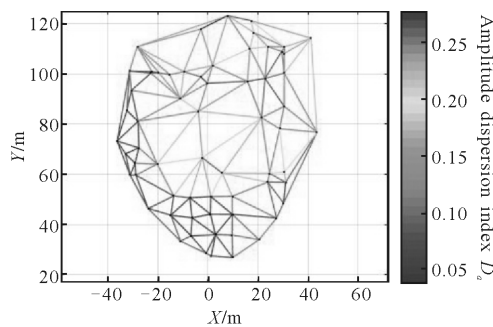
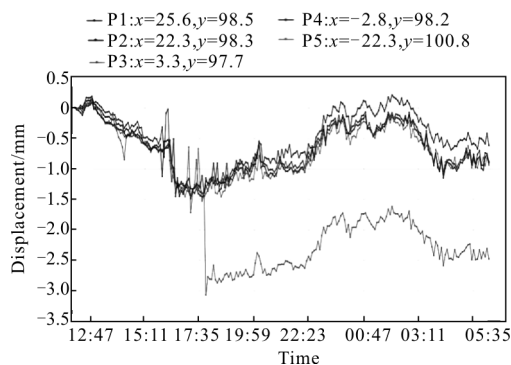


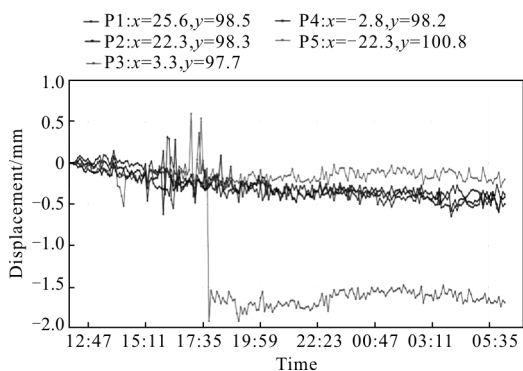
图 6 PSC 网络
Fig.6 PSC network

图 7(a)为气象改正前的监测点形变过程,监测点 P1、P2、P3、P4、P5 在 12~17 点位移为负值并不断减少至 -1.5 mm 左右,表示基坑边坡向雷达系统方向移动。但在 17 点至凌晨 3 点位移为负值并不断增大至 0 mm 左右,表示基坑边坡向远离雷达系统方向移动。随后又开始向雷达系统方向移动了约 1 mm。监测点 P3 除了一次形变量跳变外,也发生了相同的变化。



(a) 气象改正前

(a) Before the atmosphere correction



(b) 气象改正后

(b) After the atmosphere correction

图 7 监测点形变结果

Fig.7 Deformation of the monitoring point

基坑边坡移动在较短时间内出现如此大的反复,与实际情况不相符。这主要是由于气象扰动所引起。图 7(b)为气象改正后的监测点形变过程,除 P3 点有一次跳变外,各监测点整体向雷达系统方向缓慢移动,表示基坑边坡向雷达系统方向发生滑动,与实际情况相吻合。

为进一步验证 PSC 网气象改正的效果和地基 SAR 监测的可靠性,实验过程中,利用徕卡 TM50 测量机器人以 30 min 时间间隔对埋设在 P1、P3 位置的 2 个小棱镜自动观测。二者观测结果对比如图 8 所示。P1 点二者观测的最大位移差为 0.18 mm、最小位移差 0.02 mm、位移差标准差为 0.09 mm;P3 点二者观测的最大位移为 0.28 mm、最小位移差 0.1 mm、位移差标准差为 0.12 mm。地基 SAR 测量结果与全站仪测量结果高度吻合。由于观测过程中全站仪和小棱镜固定不

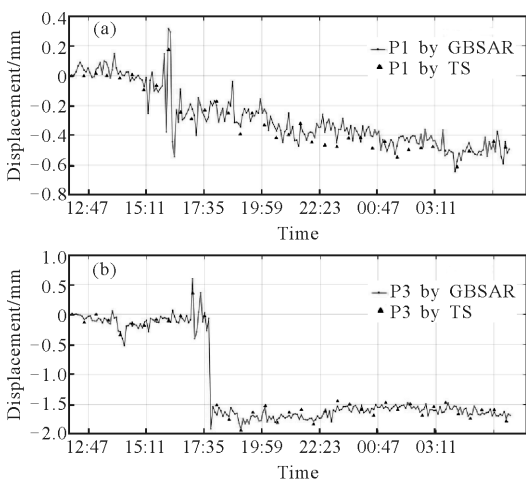


图 8 地基 SAR 与全站仪监测结果对比

Fig.8 Comparison of monitoring results by ground-based SAR and total station

动,且自动观测,有效避免了对中误差和照准误差,在 100 m 的测量距离下完全能够获得亚毫米级的精度。因此,对比结果说明 PSC 网有效消除了大气扰动的影响,同时也说明了地基 SAR 基坑监测的可靠性。

3 基坑形变分析

此次基于地基 SAR 技术的基坑监测整体形变如图 9 所示。由图可知,在地基 SAR 监测期间,基坑边坡基本保持稳定,没有出现大的位移形变。但由图 7(b)监测结果可知,基坑边坡坡顶不同位置都存在微小位移形变。从 P1、P2 点的形变信息可以看出,基坑边坡右侧部分,因开挖较深(深 9 m),在观测期间内产生了 0.6 mm 左右的形变,由于受施工干扰较小,形变速率平稳,滑动趋势一致。基坑中部在 T15:10~17:45,因受施工吊车、搅拌车和泵车等外加荷载及震动的影响,边坡形变量发生了一些随机变化。在 T17:45 左右,P3 点突然出现了一个约 2 mm 的形变跳跃。通过现场观察发现,泵车移动后一只钢脚支撑在 P3 点不远处,形变跳跃因坡顶附近突然施加一个大的荷载所引起。T18:30 泵车离开后,P3 基本趋于稳定并出现了 0.3 mm 左右的回弹。从 P5 点的位移信息可以看出,形变量维持了 0.2 mm 左右,主要因为基坑边坡左侧开挖较浅(深 5 m),基坑底部进行了部分的硬化处理,趋于稳定。分析结果表明,监测期间基坑边坡整体发生了亚 mm 级的位移形变,且滑动速率平稳,趋势明显,但基坑边坡总体安全稳定。同时,基坑周围工程车等施工活动对基坑安全影响较小。但 P3 点位的局部跳跃形变表明,施工期间尽量避免在基坑边坡坡顶附近施加过大压力,防止因局部形变速率过快、形变过大而带来安全隐患。

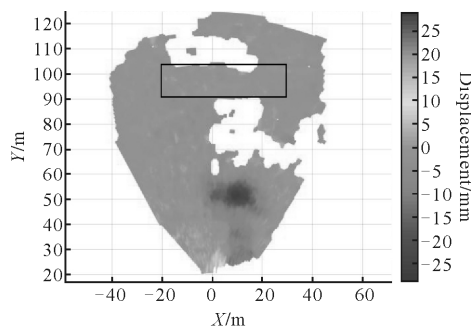


图 9 监测区域形变量

Fig.9 Deformation of the monitoring area

4 结论

通过对地基 SAR 基坑微形变监测关键技术的研究及实验,可以得出以下结论:

(1) 加权圆周中值滤波能同时滤除热噪声和环境噪声的影响,提高地基 SAR 干涉相位图的信噪比。通过对地基 SAR 图像参数的计算分析,表明该方法有效改善了地基 SAR 图像的质量。

(2) 通过对气象改正前后监测点形变量分析,可以看出基于 PSC 网的气象改正方法有效地削弱了大气扰动对测量结果的影响。通过与高精度全站仪监测结果进行对比分析,验证了地基 SAR 能实现亚毫米级形变监测。

(3) 基于地基 SAR 基坑微形变监测技术可行。同时因其能全面、实时监测基坑附近工程车辆施工过程中对基坑边坡的影响,地基 SAR 还可作为基坑安全应急监测的一种有效方法。

参考文献:

- [1] Atzeni C, Barla M, Pieraccini M, et al. Early warning monitoring of natural and engineered slopes with ground-based synthetic aperture radar[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48(1): 235-246.
- [2] Luzi G, Pieraccini M, Mecatti D, et al. Monitoring of an alpine glacier by means of ground-based SAR interferometry [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4(3): 495-499.
- [3] Yang Honglei, Peng Junhuan, Cui Hongyao. Slope of large-scale open-pit mine monitoring deformations by using ground-based interferometry [J]. *Progress in Geophysics*, 2012, 27(4): 1804-1811. (in Chinese)
- [4] Xing Cheng, Han Xianquan, Zhou Xiao, et al. Application of GB-SAR to dam monitoring [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2014, 31(7): 128-134. (in Chinese)
- [5] Tarchi D, Rudolf H, Pieraccini M, et al. Remote monitoring of buildings using a ground-based SAR: application to cultural heritage survey [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(18): 3545-3551.
- [6] Xu Yaming, Wang Peng, Zhou Xiao, et al. Research on dynamic deformation monitoring of bridges using ground-based interferometric radar IBIS-S [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(7): 845-849. (in Chinese)
- [7] Wang Yanping, Huang Zengshu, Tan Weixian, et al. Ground-based SAR interferometric phase filtering optimization [J]. *Journal of Signal Processing*, 2015, 31(11): 1504-1509. (in Chinese)
- [8] Duan Keqing, Xiang Jiabin, Wang Feng. An algorithm of weighted periodic pivoting median filtering for InSAR phase fringe [J]. *Journal of Air Force Radar Academy*, 2005, 19(1): 4-6. (in Chinese)
- [9] Xu Yaming, Zhou Xiao, Wang Peng, et al. A method of constructing permanent scatterers network to correct the meteorological disturbance by GB-SAR [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(8): 1007-1012. (in Chinese)
- [10] Liu Xiaoyang, Sun Guangtong, Song Ping, et al. Correction of atmospheric effect in ASAR interferogram using MODIS data [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 4111-4116. (in Chinese)