

基于二维形变场的地基 SAR 精度验证与分析

周 吕^{1,2} 郭际明^{1,3} 胡纪元¹ 章 迪¹ 陈 明^{1,4} 杨 飞¹

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079
2 桂林理工大学测绘地理信息学院,广西 桂林,541004
3 武汉大学精密工程与工业测量国家测绘地理信息局重点实验室,湖北 武汉,430079
4 国家基础地理信息中心,北京,100830

摘 要:地基 SAR(synthetic aperture radar)可实现高精度的小区域性连续形变监测。为研究其形变探测能力与精度,建立了一套精度验证平台和系统。在楼顶布设不同位置分布的角反射器,并采用步进平台控制角反射器模拟不同数值形变,形变角反射器与稳定点及楼顶表面构成小区域二维形变场,利用 IBIS-L(image by interferometric system-landslides)系统完成形变监测与分析。实验结果表明,当角反射器发生毫米级形变时,地基干涉雷达 IBIS-L 系统形变探测平均精度为 0.27 mm,而角反射器发生亚毫米级形变时,其形变探测平均精度为 0.11 mm;该系统可以实现小区域性的亚毫米级形变探测,对于缓慢微小变化,其具有更好的形变探测能力与可靠性。

关键词:地基 SAR;干涉;角反射器;形变探测;精度验证

中图分类号:P228 **文献标志码:**A

雷达干涉测量技术作为一种新兴的微波遥感技术,凭借其可以穿过大气层,全天时、全天候获取监测目标的形变信息等特性,已在地表形变监测、冰川运动、人工建筑物形变信息提取等多种领域展开了应用。为了实现高精度与实时性的建筑物或局部区域形变监测,地基合成孔径雷达干涉测量(ground-based synthetic aperture radar interferometry, GB-InSAR)技术应运而生^[1-2],它不仅可以实现零基线监测,同时观测也更为灵活,可以自由调整雷达的监测方向及雷达的监测位置。自 1992 年初,国外就开展了 GB-InSAR 系统研究,如欧洲联合研究中心研制了 LISA(linear SAR)系统^[3];意大利研制了 IBIS(image by interferometric system)系统,该系统包括 IBIS-S(IBIS-structures)、IBIS-L(IBIS-landslides)和 IBIS-M(IBIS-mines)3 种型号^[4];澳大利亚研制了 SSR(slope stability radar)系统,该系统采用真实孔径数据获取模式^[5]。国内开展地基雷达干涉测量系统的研究起步较晚,目前主要有北京理工大学研制的边坡监测雷达系统^[6-7];中国科学院电子学研究所研制的 ASTRO(advanced scannable two-dimensional rail observation)系统和 Arc FMCW SAR(Arc frequency-modulated continuous wave SAR)系统^[8-9];国防科技大学研制的 SFCW(steppped frequency continuous wave)系统^[10]等。GB-InSAR 集成了 SAR 技术、SFCW 技术以及干涉测量等技术,可以完成监测区域二维 SAR 影像的获取和不同时段 SAR 影像间微小位移变化量的提取^[11]。

近年来,国内外对 GB-InSAR 进行形变监测开展了试验和研究,如 Rödel-sperger 等运用 IBIS-L 系统持续监测 Fogo 火山的位移变化,并发现在监测时段内该火山无明显形变^[4];占朝彬等研究了 IBIS-S 测量系统并进行了精度分析^[12];杨红磊等采用地基干涉雷达 IBIS-L 系统完成了某露天矿区边坡监测,监测结果与全站仪获取的结果一致^[13];邢诚等探究了地基干涉雷达 IBIS-S 系统的检测方法,并对该系统探测目标物的分辨率进行了研究^[14];曲世勃等研究了中国科学院电子学研究所研制的 ASTRO 系统,结合该系统的成像几

何给出了其变形监测与精度分析模型,验证了该系统探测形变的能力^[15];余红楚等基于边坡变形监测,对比分析了 TM30 全站仪与地基 SAR 的形变探测精度^[16]。在实际工程应用中,地基干涉雷达 IBIS-L 系统所能达到的精度是人们所关注的重点。目前,针对地基干涉雷达 IBIS-L 系统的精度验证分析研究较少,且较少文献分析当形变体发生不同量级形变时 IBIS-L 系统的形变探测能力,据此本文介绍了 GB-InSAR 过程中相位提取与形变量获取方法,设计了实验验证当形变体分别发生毫米级与亚毫米级形变时采用地基干涉雷达 IBIS-L 系统进行监测时的精度,并分析研究地基干涉雷达 IBIS-L 系统探测形变体发生不同形变速率时的能力与可靠性。

1 地基 SAR

地基 SAR 影像中包含了振幅与相位信息,而雷达与目标物之间的几何距离反映在地基 SAR 影像中的相位信息里,故依据地基 SAR 影像之间的相位变化采用干涉技术便可反演出雷达与目标物之间的距离变化^[17]。

通过将被监测的信息中加入相位调制,使被监测的信息反映到相位信息中,然后依据探测器陈列获取干涉条纹影像,最后通过处理条纹影像来进行相位提取^[18-19]。二维干涉图的强度信号 I 可表示为^[20]:

$$I(x,y) = a(x,y) + b(x,y) \cos \varphi(x,y) \tag{1}$$

式中, (x,y) 为影像坐标; $a(x,y)$ 为背景强光; $b(x,y)$ 表示振幅调制; $\varphi(x,y)$ 是需要求解的相位。假设共获取 N 景影像,且第 n 景影像中像素点 (x,y) 的振幅由 I_n 表示,则该点的相位为:

$$\varphi(x,y) = \arctan \frac{\sum_{n=1}^N I_n(x,y) \sin \left(\frac{2n\pi}{N} \right)}{\sum_{n=1}^N I_n(x,y) \cos \left(\frac{2n\pi}{N} \right)} \tag{2}$$

假设在不同时刻 t_A 与 t_B 获取了两景地基 SAR 影像, φ_A 与 φ_B 分别为地基 SAR 影像上同一像素在 t_A 与 t_B 时刻上的相位值($t_B > t_A$):

$$\varphi_A = \frac{4\pi \cdot R_A}{\lambda} + \varphi_{\text{scatter-A}} + \varphi_{\text{atm-A}} + \varphi_{\text{noise-A}} \tag{3}$$

$$\varphi_B = \frac{4\pi \cdot R_B}{\lambda} + \varphi_{\text{scatter-B}} + \varphi_{\text{atm-B}} + \varphi_{\text{noise-B}} \tag{4}$$

式中, R_A 与 R_B 分别为 t_A 与 t_B 时刻雷达与目标物之间的几何距离; λ 为雷达信号的波长; φ_{scatter} 为微波与目标物之间发生相互作用而产生的相移;

φ_{atm} 为微波受雷达与目标物之间的大气扰动影响而产生的相位; φ_{noise} 为噪声相位。

对这两景影像进行干涉处理,即可得到 t_A 与 t_B 时刻 SAR 影像的干涉相位 $\Delta\varphi_{BA}$:

$$\Delta\varphi_{BA} = \varphi_B - \varphi_A = \frac{4\pi \cdot (R_B - R_A)}{\lambda} + (\varphi_{\text{scatter-B}} - \varphi_{\text{scatter-A}}) + (\varphi_{\text{atm-B}} - \varphi_{\text{atm-A}}) + \varphi_{\text{noise}} \tag{5}$$

假设在 t_A 与 t_B 时刻相移分量 φ_{scatter} 均保持常数,则式(5)可以简化为:

$$\Delta\varphi_{BA} = \varphi_B - \varphi_A = \frac{4\pi \cdot d_{\text{defo}}}{\lambda} + (\varphi_{\text{atm-B}} - \varphi_{\text{atm-A}}) + \varphi_{\text{noise}} \tag{6}$$

式中, $d_{\text{defo}} = R_B - R_A$ 为目标物于时刻 t_A 与 t_B 之间在雷达视线向发生的位移变化量。当去除了由大气效应产生的相位分量 $(\varphi_{\text{atm-B}} - \varphi_{\text{atm-A}})$ 和相应的噪声相位 φ_{noise} 后,即可求得 t_A 与 t_B 时刻之间目标物在雷达视线向发生的形变为:

$$d_{\text{defo}} = \frac{\Delta\varphi'_{BA} \cdot \lambda}{4\pi} \tag{7}$$

式中, $\Delta\varphi'_{BA}$ 为去除大气效应相位分量与其他相应噪声相位误差后 t_A 与 t_B 时刻之间地基 SAR 影像的干涉相位。

2 实验设计与结果分析

2.1 实验设计

此次实验布设于笔者所在的学院楼顶,利用步进平台进行 IBIS-L 系统的精度验证分析研究。IBIS-L 系统主要由雷达控制单元、电脑控制单元、线性导轨单元以及能量供应单元等构成,系统的各个单元如图 1 所示,系统参数设置见表 1。实验中将 A、B 两个角反射器分别固定在两个步进平台上,通过步进平台调节 A、B 角反射器的位移量,同时将 C、D、E 3 个角反射器分别固定于楼顶不同的强制对中观测墩上,各角反射器的分布如图 2 所示。

实验中采用步进平台分别调节 A、B 角反射器不同数值的毫米级与亚毫米级的位移量,共采集 18 景地基 SAR 影像数据,其中采集 1~8 景的过程中, A、B 角反射器均按毫米级位移量远离雷达移动(具体数值见表 2),且每完成两景影像数据采集后位移变动一次;采集 9~18 景的过程中, A 角反射器按亚毫米级位移量远离雷达移动,而 B 角反射器按亚毫米级位移量靠近雷达移动,具体数值见表 3,两角反射器位移量变动时间间隔

与毫米级变动时一致。实验观测时间为 2016-05-30 T 14:25-16:36。



图 1 IBIS-L 系统各个单元构成
Fig. 1 The Components of the IBIS-L System

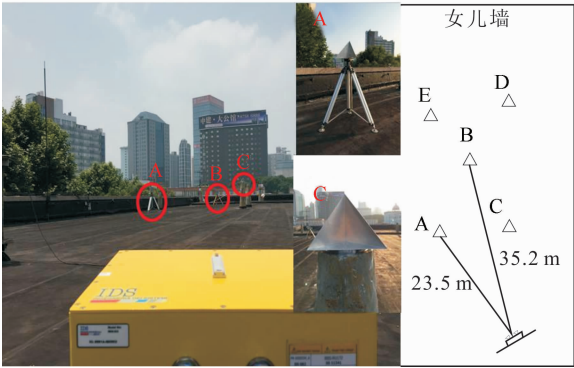


图 2 实验监测场景与角反射器分布图
Fig. 2 Experimental Monitoring Scene and Corner Reflector Distribution Map

表 1 IBIS-L 系统参数设置

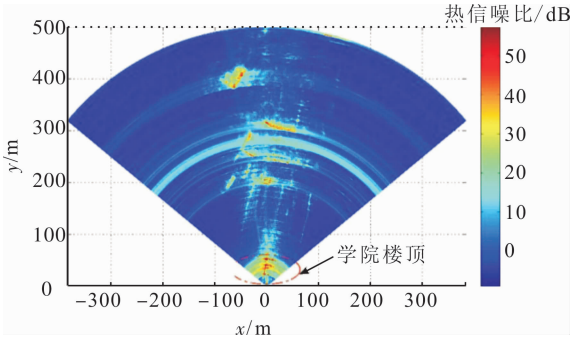
Tab. 1 IBIS-L System Parameter Setting

参数	参数值
雷达天线倾角/(°)	5
最大观测距离/m	500
距离向分辨率/m	0.5
角度向分辨率/mrad	4.4
时间采样间隔/min	7
天线类型	Type3 (Azimuth 17°, Vertical 15°)
导轨有效长度/m	2

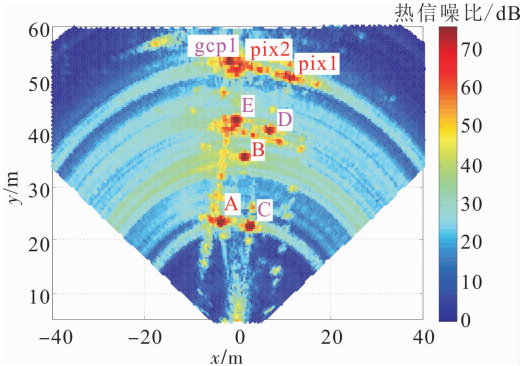
2.2 结果分析

图 3(a)为实验监测场景的热信噪比图,对比实验监测区域的实际场景(见图 2),发现监测场景中的各栋大楼及学院楼顶可清晰判读,且热信噪比大于 30 dB,说明此次采集的地基 SAR 影像质量较好。从图 3(a)选取学院楼顶的热信噪比图,结果如图 3(b)所示。

由图 3(b)可以看出,实验布设的 A、B、C、D、E 角反射器的位置在热信噪比图中清晰可见,且它们的热信噪比均大于 75 dB,说明它们的相位稳定性较高。在角反射器 E 后面的点 gcp1、pix1、pix2 的热信噪比也均大于 70 dB,这 3 个点



(a)整个监测场景的热信噪比图



(b)学院楼顶范围的热信噪比图

图 3 热信噪比图

Fig. 3 Thermal SNR map

分别为楼顶的强制对中观测墩。由于 GB-InSAR 在解算目标物的位移量时,受大气扰动影响较大,为获取准确的形变量,需去除大气扰动相位分量。实验中 C、D、E 角反射器均固定在强制对中观测墩上,且 gcp1 也是强制对中观测墩,在短时间内它们的形变均为 0,故本文选择这 4 个稳定点作为控制点,采用多控制点校正法去除实验过程中的大气效应影响及相关噪声。

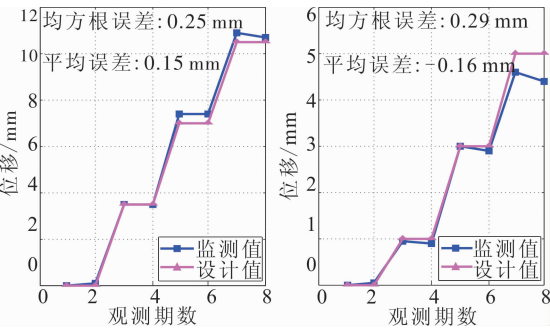
1)毫米级形变精度验证分析

由于 IBIS-L 系统在监测时雷达倾角为 5°,而步进平台控制 A、B 角反射器移动的位移为水平方向,故表 2 与表 3 的监测值均为视线向形变投影到水平方向上的结果,且正值代表远离雷达,负值代表靠近雷达。表 2 列出了采用步进平台进行毫米级调节 A、B 角反射器位移时,IBIS-L 系统监测值与实验设计值的对比结果。通过比较表 2 中 A、B 角反射器的设计值与监测值可以发现,A 角反射器设计值与监测值的偏差最大值与最小值分别为 0.4 mm 与 0 mm;B 角反射器的偏差最小值为 0 mm,而最大偏差值达-0.6 mm。从 A、B 角反射器的设计值与形变值的时间序列对比图(见图 4)可以看出,地基雷达 IBIS-L 系统获取 A、B 角反射器的形变趋势与设计的形变趋势一致性较好;A 与 B 角反射器的均方根误差分别为 0.25

mm 与 0.29 mm,同时 A 与 B 角反射器的平均误差分别为 0.15 mm 与 -0.16 mm。

表 2 A、B 角反射器毫米级设计值与监测值对比
Tab. 2 A and B Corner Reflectors mm-level Design and Monitoring Value Comparison

期数	A 角反射器/mm			B 角反射器/mm		
	设计值	监测值	残差	设计值	监测值	残差
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	3.5	3.5	0	1	0.9	-0.1
4	3.5	3.4	-0.1	1	0.9	-0.1
5	7	7.4	0.4	3	3.0	0
6	7	7.4	0.4	3	2.9	-0.1
7	10.5	10.8	0.3	5	4.6	-0.4
8	10.5	10.7	0.2	5	4.4	-0.6



(a) A角反射器 (b) B角反射器
图 4 A、B 角反射器设计值(毫米级)与监测值时间序列对比

Fig. 4 Comparison of Time Series Between Design (mm-level) and Monitoring Values of A and B Corner Reflector

综合分析表 2 与图 4 表明,在 A、B 角反射器发生毫米级形变过程中,A、B 角反射器的平均形变速率分别为 1.43 mm/min 与 0.09 mm/min,平均均方根误差为 0.27 mm,地基干涉雷达 IBIS-L 系统可以精确探测出角反射器的形变量,且精度可达到亚毫米级。

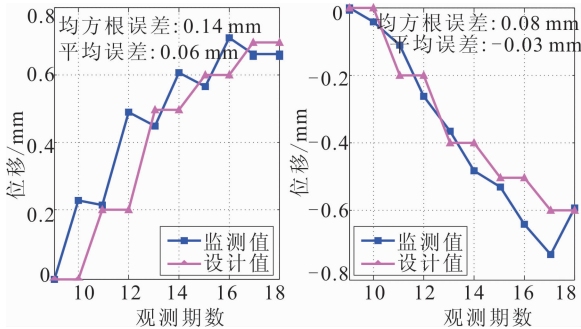
2) 亚毫米级形变精度验证分析

A、B 角反射器发生亚毫米级形变过程中,IBIS-L 系统监测值与步进平台设计值的对比结果如表 3 所示。A 角反射器偏差的最大值为 0.29 mm,最小值为 0.02 mm;B 角反射器在整个监测过程中偏差均小于 0.15 mm。图 5 显示了 A、B 角反射器的形变趋势图,两个角反射器的形变趋势与设计曲线吻合得较好。IBIS-L 系统探测 A 角反射器形变时的均方根误差为 0.14 mm,平均误差为 0.06 mm;探测 B 角反射器形变时均方根误差和平均误差分别为 0.08 mm 与 -0.03 mm。相比于 A、B 角反射器发生毫米级形变时,发生亚毫米级形变时的均方根误差和平均误差均较小,

这与相位解缠误差有较大的关系,因为 IBIS-L 系统属于微变形探测系统,当形变量较小时,相位解缠误差会相对较小一些,而当形变量超过某一阈值时,还会产生失相干而导致无法解算出形变量。综上所述可知,在 A、B 角反射器发生亚毫米级形变过程中,A、B 角反射器的平均形变速率分别为 0.01 mm/min 与 0.01 mm/min,平均均方根误差为 0.11 mm,IBIS-L 系统可以达到亚毫米级的形变探测精度,且形变探测精度高于 A、B 角反射器发生毫米级形变时的探测精度;IBIS-L 系统探测目标物发生缓慢微小形变的能力更强。

表 3 A、B 角反射器亚毫米级设计值与监测值对比
Tab. 3 A and B Corner Reflector Sub mm-level Design and Monitoring Value Comparison

期数	A 角反射器/mm			B 角反射器/mm		
	设计值	监测值	残差	设计值	监测值	残差
9	0	0	0	0	0	0
10	0	0.23	0.23	0	-0.04	-0.04
11	0.2	0.22	0.02	-0.2	-0.11	0.09
12	0.2	0.49	0.29	-0.2	-0.26	-0.06
13	0.5	0.45	-0.05	-0.4	-0.36	0.04
14	0.5	0.61	0.11	-0.4	-0.48	-0.08
15	0.6	0.57	-0.03	-0.5	-0.53	-0.03
16	0.6	0.71	0.11	-0.5	-0.64	-0.14
17	0.7	0.66	-0.04	-0.6	-0.73	-0.13
18	0.7	0.66	-0.04	-0.6	-0.59	0.01



(a) A角反射器 (b) B角反射器
图 5 A、B 角反射器设计值(亚毫米级)与监测值时间序列对比

Fig. 5 Comparison of Time Series Between Design (Sub mm-level) and Monitoring Value of A and B Corner Reflectors

为进一步分析 IBIS-L 系统探测亚毫米级形变的精度,本文选取了像素点 pix1、pix2 进行精度验证分析。由于 pix1 与 pix2 均为强制对中观测墩,且此次实验过程时间较短,故 pix1 与 pix2 可视的稳定点,其形变量理论上应为 0。图 6 为 IBIS-L 系统获取的 pix1 与 pix2 在整个实验过程的时间序列形变图。由图 6 可知,pix1、pix2 两个像素点的最大绝对偏差均为 0.28 mm,且形变趋

势基本一致,最小绝对偏差分别为 0.04 mm、0.06 mm;IBIS-L 系统获取 pix1 与 pix2 形变的均方根误差分别为 0.13 mm、0.18 mm,平均误差分别为-0.03 mm、0.16 mm。对比分析 A、B 角反射器毫米级形变与 pix1、pix2 稳定点以及 A、B 角反射器亚毫米级形变的探测精度结果可以发现,地基干涉雷达 IBIS-L 系统探测目标物发生缓慢微小形变的精度高于探测目标物发生较快形变的精度。

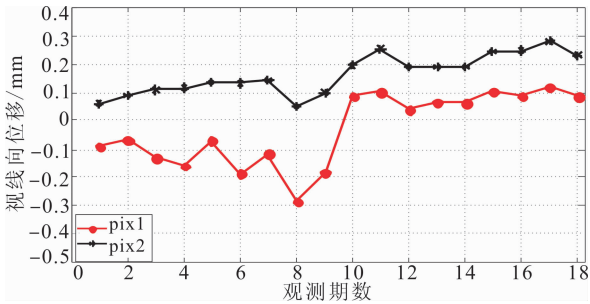


图 6 pix1 与 pix2 监测值时间序列

Fig. 6 Time Series of Monitoring Values of pix1 and pix2

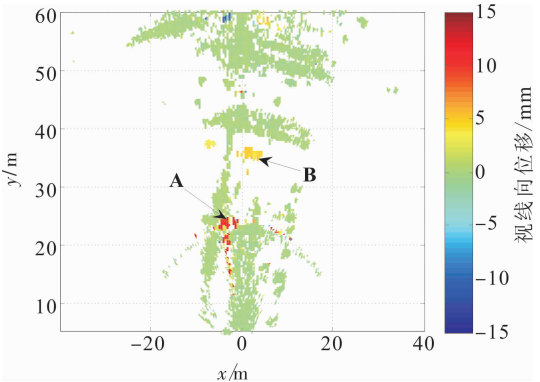
3) 区域性形变精度验证分析

为分析地基干涉雷达 IBIS-L 系统探测区域性形变的精度,本文给出了实验过程中 A、B 角反射器发生毫米级与亚毫米级两个时间段内楼顶的累积视线向的位移形变,结果如图 7 所示。由图 7(a)可知,在楼顶范围内除了 A、B 像素点,其余区域的累积形变基本趋近于 0;A 角反射器的累积形变为 10.76 mm,B 角反射器的累积形变为 4.49 mm,且 A 与 B 角反射器与它们的设计值分别相差 0.26 mm 与-0.51 mm。由图 7(b)可以得到 A 角反射器的累积形变为 0.66 mm,B 角反射器的累积形变为-0.66 mm,同时 A 与 B 角反射器与它们的设计值分别相差-0.04 mm 与-0.06 mm;楼顶其余区域的累积形变基本在小于 0.5 mm 的范围内波动。两个时段内楼顶大部分区域的累积形变并不完全为 0,这主要是因为大气相位分量与其余相关噪声相位未完全消除所致,故楼顶区域实际上并没有发生明显形变。

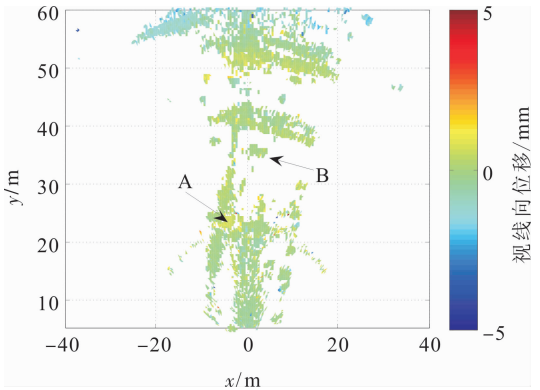
综上所述可知,地基干涉雷达 IBIS-L 系统可实现高精度的区域性形变探测,同时在目标物发生微小缓慢形变时,其形变探测精度优势更明显。

3 结 语

GB-InSAR 是进行区域性、全天候、全天时连续变形监测的重要手段,其形变探测精度是实际工程应用中关注的重点。为此,本文在某学院楼



(a) 1~8 景地基 SAR 影像累积形变



(b) 9~18 景地基 SAR 影像累积形变

图 7 累积位移形变图

Fig. 7 Cumulative Displacement Deformation Maps

顶布设模拟形变点,采用步进平台控制角反射器模拟形变,利用地基干涉雷达 IBIS-L 系统监测角反射器与楼顶范围的形变,并与设计值比对进行精度验证分析研究。实验结果表明:

1)地基干涉雷达 IBIS-L 系统获取的形变值与设计值吻合度较高,同时 IBIS-L 系统获取的楼顶的区域性累积形变结果符合实际形变情况。

2)当目标物发生毫米级与亚毫米级形变时,形变探测精度均达亚毫米级,如当 A、B 角反射器发生毫米级形变时,IBIS-L 系统的形变探测精度分别为 0.25 mm、0.29 mm;当发生亚毫米级的形变时,其对应精度分别为 0.14 mm、0.08 mm。

3)由于受系统所采用信号波长(Ku 波段)以及相位解缠误差等影响,目标物变形速率越小,形变微小缓慢时,地基干涉雷达 IBIS-L 系统的形变探测能力越强。

参 考 文 献

[1] Farrar C R, Darling T W, Migliori A, et al. Micro-wave Interferometer for Non-contact Vibration Measurements on Large Structures[J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 1999, 13(2):241-253

- [2] Tapete D, Casagli N, Luzi G, et al. Integrating Radar and Laser-Based Remote Sensing Techniques for Monitoring Structural Deformation of Archaeological Monuments[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2013, 40(1): 176-189
- [3] Tarchi D, Casagli N, Fanti R, et al. Landslide Monitoring by Using Ground-Based SAR Interferometry: An Example of Application to the Tessina Landslide in Italy[J]. *Engineering Geology*, 2003, 68(1-2): 15-30
- [4] Rödelsperger S, Läufer G, Gerstenecker C, et al. Monitoring of Displacements with Ground-based Microwave Interferometry: IBIS-S and IBIS-L [J]. *Journal of Applied Geodesy*, 2010, 4(1): 41-54
- [5] Harries N, Holmstrom M. The Use of Slope Stability Radar in Monitoring Slopes and Managing Slope Instability Hazards [J]. *Queensland Roads*, 2007, 44(4): 1 170-1 180
- [6] Zeng T, Wang R, Li F, et al. A Modified Nonlinear Chirp Scaling Algorithm for Spaceborne/Stationary Bistatic SAR Based on Series Reversion[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2013, 51(5): 3 108-3 118
- [7] Zeng Tao. Bistatic SAR: State of the Art and Development Trend[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(4): 329-341(曾涛. 双基地合成孔径雷达发展现状与趋势分析[J]. 雷达学报, 2012, 1(4): 329-341)
- [8] Wang R, Loffeld O, Nies H, et al. Focus FMCW SAR Data Using the Wavenumber Domain Algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2010, 48(4): 2 109-2 118
- [9] Luo Y, Song H, Wang R, et al. Arc FMCW SAR and Applications in Ground Monitoring[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2014, 52(9): 5 989-5 998
- [10] Zhang Xiang, Lu Biying, Song Qian. Atmospheric Disturbance Correction in Ground-Based SAR Differential Interferometry [J]. *Radar Science and Technology*, 2011, 9(6): 502-506(张祥, 陆必应, 宋千. 地基 SAR 差分干涉测量大气扰动误差校正[J]. 雷达科学与技术, 2011, 9(6): 502-506)
- [11] Crosetto M, Monserrat O, Luzi G, et al. Discontinuous GBSAR Deformation Monitoring[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2014, 93(7): 136-141
- [12] Zhan Chaobin, Hu Yumei, Wang Tao. IBIS-S Measurement System and Its Accuracy Analysis[J]. *Urban Geotechnical Investigation & Surveying*, 2015(2): 119-121(占朝彬, 胡玉梅, 王涛. IBIS-S 测量系统及精度分析[J]. 城市勘测, 2015(2): 119-121)
- [13] 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): 1 804-1 811(杨红磊, 彭军还, 崔洪曜. GB-InSAR 监测大型露天矿边坡形变[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(4): 1 804-1 811)
- [14] Xing Cheng, Xu Yaming, Zhou Xiao, et al. Research on the Testing Methods for IBIS-S System [J]. *Journal of Geomatics*, 2013, 38(4): 9-12(邢诚, 徐亚明, 周校, 等. IBIS-S 系统检测方法研究[J]. 测绘地理信息, 2013, 38(4): 9-12)
- [15] Qu Shibo, Wang Yanping, Tan Weixian, et al. Deformation Detection Error Analysis and Experiment Using Ground Based SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(1): 1-7(曲世勃, 王彦平, 谭维贤, 等. 地基 SAR 形变监测误差分析与实验[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(1): 1-7)
- [16] Yu Hongchu, Zuo Xiaoqing, Zi Chenbo, et al. Comparative Analysis of IBIS-L System and TM30 Total Station in Monitoring Slope Deformation[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2015, 35(4): 718-721(余红楚, 左小清, 字陈波, 等. IBIS-L 系统与 TM30 全站仪在边坡变形监测中的对比分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2015, 35(4): 718-721)
- [17] Bardi F, Frodella W, Ciampalini A, et al. Integration Between Ground Based and Satellite SAR Data in Landslide Mapping: The San Fratello Case Study [J]. *Geomorphology*, 2014, 223: 45-60
- [18] Luo Haibin, He Xiufeng. InSAR Phase Unwrapping Algorithms with the Aid of GPS Control Points [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(5): 630-636(罗海滨, 何秀凤. GPS 控制点辅助 InSAR 相位解缠算法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(5): 630-636)
- [19] Sun Hanwei, Zeng Tao, Yang Jian, et al. Simulation and Analysis of SAR Residual Phase Error on Forest Height Inversion [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(2): 153-158(孙晗伟, 曾涛, 杨健, 等. SAR 残余相位误差对森林高度反演影响的全链路模拟与分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(2): 153-158)
- [20] Servin M, Marroquin J L, Cuevas F J. Demodulation of a Single Interferogram by Use of a Two-dimensional Regularized Phase Racking Technique [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(19): 4 540-4 548

Accuracy Verification and Analysis of Ground-based Synthetic Aperture Radar Based on Two-dimensional Deformation Field

ZHOU Lü^{1,2} GUO Jiming^{1,3} HU Jiyuan¹ ZHANG Di¹ CHEN Ming^{1,4} YANG Fei¹

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

3 Key Laboratory of Precise Engineering and Industry Surveying of NASG, Wuhan University, Wuhan 430079, China

4 National Geomatics Center of China, Beijing 100830, China

Abstract: Ground-based interferometric radar can realize small regional-scale continuous deformation monitoring with high-accuracy. To investigate the deformation detection capability and accuracy, a set of accuracy verification platform and system are established in this paper. The corner reflectors are arranged at different positions on the roof and the stepping platforms are used to control the corner reflectors and simulate deformation in different values. The deformation corner reflectors, stable points and the surface of the roof constitute a small two-dimensional deformation field. We use the IBIS-L system to finish the deformation detection and analysis. The experimental results show that when the millimeter level deformation occurs in the corner reflectors, the average accuracy of deformation detection of the ground-based interferometric radar IBIS-L system is 0.27 mm, while the sub millimeter level deformation occurs the corner reflectors, its average accuracy is 0.11 mm. This system can realize the sub millimeter level deformation detection in small regional-scale. For the small and slow change, this system has better deformation detection ability and reliability.

Keywords: GBSAR; interferometry; corner reflector; deformation detection; accuracy verification

First author: ZHOU Lü, PhD, specializes in the data processing theory and algorithm of InSAR/GB-InSAR. E-mail: zhoulv_w hu@163.com
Corresponding author: GUO Jiming, PhD, professor. E-mail: jmguo@s gg. whu. edu. cn
Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41474004, 41461089, 41604019.

++++++
(上接第 288 页)

based on the quasi-accurate detection, a specific calculation scheme and strategy for orientation parameter calculation is proposed. For the first time, quasi-accurate detection is applied to SAR image orientation. Finally, a series of experiments with both simulated data and real airborne SAR images are carried out to validate the proposed scheme and strategy. The experimental results show that the proposed scheme in this paper is able to detect and calculate the gross errors in image coordinates. Compared to the classical least-square estimation usually used in image orientation, a higher accuracy of both orientation parameters and the subsequent stereo positioning are achieved. The research in this paper is particularly meaningful to improve the quality of the SAR data affected by gross errors in situations where control points are not enough.

Key words: synthetic aperture radar; stereo positioning; orientation parameters; gross error detection; quasi-accurate detection

First author: QIU Chunping, master, specializes in radargrammetry. E-mail: Q_C_Ping@163.com
Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41071296, 41474010, 61401509; the National High-Tech R & D Program of China(863 Program), No. 2011AA120402.