

InSAR双向矩形角反射器阵列形变监测精度评估与验证

王彦平, 白泽朝, 林赟, 李洋

引用本文:

王彦平, 白泽朝, 林赟, 等. InSAR双向矩形角反射器阵列形变监测精度评估与验证[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(10): 1471–1477, 1488.

WANG Yanping, BAI Zechao, LIN Yun, et al. [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(10): 1471–1477, 1488.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

川藏铁路沿线Sentinel-1影像几何畸变与升降轨适宜性定量分析

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(10): 1450–1460 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210130>

时序InSAR用于安康膨胀土机场稳定性监测

Time-Series InSAR for Stability Monitoring of Ankang Airport with Expansive Soil

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(10): 1519–1528 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210223>

利用AB算法进行高分四号卫星数据反照率反演

Retrieval of GF-4 Satellite Image Data Surface Albedo Based on Angular Bin Algorithm

武汉大学学报·信息科学版. 2020, 45(4): 542–549 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20180291>

多模态序列遥感影像的洪涝灾害应急信息快速提取

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(10): 1441–1449 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210465>

利用方向相位特征进行多源遥感影像匹配

A Multi-source Remote Sensing Image Matching Method Using Directional Phase Feature

武汉大学学报·信息科学版. 2020, 45(4): 488–494 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20180445>



InSAR双向矩形角反射器阵列形变监测精度 评估与验证

王彦平¹ 白泽朝^{2,1} 林 赞¹ 李 洋¹

1 北方工业大学信息学院雷达监测技术实验室,北京,100144

2 北方工业大学电气与控制工程学院,北京,100144

摘 要:在时间序列合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)形变监测研究中,常规三角反射器越来越多地被用作点目标,但在升降轨观测场景下无法同时满足获取多角度形变信息的要求,需要针对特定数据类型量身定制满足监测需求的角反射器。构建了一套角反射器设计和精度验证方案,根据X波段雷达卫星拍摄特点设计了同时满足升降轨监测场景双向可调节矩形角反射器,并将其布设在监测区公路边坡上,通过人工模拟二维形变场验证时间序列InSAR对双向矩形角反射器的探测精度。实验结果表明,在有效消除像素点旁瓣效应的情况下,所设计的双向矩形角反射器后向散射信息最强像素点被识别;精确计算出在2018-05-13—2018-05-24期间,有2个角反射器发生了移动,形变探测的中误差为0.6 mm。时间序列InSAR对设计的双向矩形角反射器形变具有很高的敏感度。

关键词:时间序列InSAR;双向矩形角反射器;X波段雷达卫星;精度验证;边坡监测

中图分类号:P237

文献标志码:A

合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)作为一种基于面观测的形变监测技术,具有覆盖范围广、形变灵敏度高等优势,被广泛应用于城市地面沉降^[1]、矿区开采沉降^[2]、滑坡监测^[3-4]和水坝监测^[5]等领域。但其在植被覆盖较多或地物变化明显的低相干区域仍然存在一定局限性^[6-7],在这种情况下,适当使用人工角反射器(corner reflector, CR)有助于克服这些限制^[8-9],同时CR的使用也可以大大提高监测的精度^[10]。

近年来,国内外对CR的设计和结合CR进行InSAR形变监测开展了实验和研究。文献[11]设计了低信噪比的小型CR,形变结果达到了毫米级的测量精度。文献[12]设计了适用于不同波长数据的CR,揭示了常规三角反射器尺寸和影像分辨率对形变结果的影响关系。文献[13]设计了不同尺寸常规三角反射器和单面矩形反射器,并成功应用于冰川位移监测。文献[14]利用二面CR实现了亚毫米级的监测精度。文献[15]在中国香港地区利用实验验证了永久散射体干涉测量(per-

manent scatterers InSAR, PS-InSAR)技术和传统测量方法相结合的能力,安装的4个CR得到了毫米级的测量精度。文献[16]利用改进的CR干涉测量(CR-InSAR)技术对四川甲居滑坡形变进行监测,准确获取非线性形变时间序列结果。文献[17]为了获取建筑工程等低相干区地表形变信息,利用CR-InSAR结合Lambda算法,精确估算了人工CR的形变信息。

在实际应用中,升降轨同时观测场景下需要获取多角度形变信息,另外时间序列InSAR所能达到的精度也是关注的重点。目前,CR都是单轨道三面角形状,缺少同时满足升降轨监测需求,获取多角度形变信息的CR。针对InSAR形变结果的精度验证,主要是根据现有的水准点或者全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)点寻找最邻近的InSAR测量点进行,较少有专门结合CR的精度验证分析实验。本文介绍了人工CR雷达反射截面(radar cross section, RCS)及其差分相位估算,设计了同时满足升降轨监测需求的双向矩形CR,当CR发生厘

收稿日期:2021-03-02

项目资助:国家重点研发计划(2018YFC1505103);国家自然科学基金(61860206013)。

第一作者:王彦平,博士,教授,博士生导师,主要从事雷达三维成像、地基SAR系统研制与应用。wangyp@ncut.edu.cn

通讯作者:白泽朝,博士生。baizechao1991@163.com

米级与毫米级形变时,采用时间序列 InSAR 进行监测,分析和评估结合 CR 的时间序列 InSAR 形变探测能力与精度。

1 人工 CR RCS 及其差分相位

RCS 是衡量目标在雷达方向上反射雷达信号的能力,CR 的 RCS 与其实际尺寸比应更大^[13,18]。常规三角反射器是由等腰直角三角形板制成,RCS 与角反射器尺寸之间的关系为^[13]:

$$T_{\text{RCS}} = 4\pi L^4 / 3\lambda^2 \quad (1)$$

式中, T_{RCS} 是反射能量换算的等效反射面积; λ 为电磁波波长; L 为 CR 的直角边长度。

此外,对于相同大小的 CR,还有其他形状可以提供更大的 RCS,矩形 CR 相比于常规三角反射器,采用较小的尺寸即可获得与三角反射器同等大小的 RCS。矩形 CR 由矩形板制成,RCS 与角反射器尺寸之间的关系为^[13]:

$$S_{\text{RCS}} = 12\pi L^4 / \lambda^2 \quad (2)$$

式中, S_{RCS} 是反射能量换算的等效反射面积; λ 为电磁波波长; L 为 CR 的直角边长度。

差分干涉相位 $\Delta\phi$ 包含形变相位 $\Delta\phi_{\text{def}}$ 、地形残余相位 $\Delta\phi_{\text{topo}}$ 、大气延迟相位 $\Delta\phi_{\text{atm}}$ 和热噪声相位 $\Delta\phi_{\text{noise}}$ 等分量。由于研究区范围较小,不考虑大气延迟相位,则相位成分包括:

$$\Delta\phi = \Delta\phi_{\text{def}} + \Delta\phi_{\text{topo}} + \Delta\phi_{\text{noise}} \quad (3)$$

为了将形变相位有效分离,需要对同一地区进行规律的重复观测,采用 PS-InSAR 分析方法^[14]提取长时间序列散射特性稳定的测量点相位值,组成相位函数模型,解算形变速率和地形残余高程。一般地,构建的形变模型前提是监测区以线性形变为主,求解线性形变速率和地形残余高程:

$$\max \left\{ |\gamma| = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M e^{-j(\Delta\phi_{H,P}^i + \Delta\phi_{v,P}^i - \Delta\phi_p^i)} \right\} \quad (4)$$

式中, γ 为可靠性度量; M 为干涉对数量; $\Delta\phi_{H,P}^i$ 和 $\Delta\phi_{v,P}^i$ 分别为测量点的地形残余高程和线性形变速率; $\Delta\phi_p^i$ 是残余相位。

根据本文实验的特点,在 PS-InSAR 分析方法的基础上对数据处理过程进行了优化。首先,由于人工 CR 布设范围较小,CR 之间最远距离小于 1 km,不进行大气相位的去除。然后,为了避免永久散射体干涉测量(permanent scatterers, PS)点构网造成的误差传递,PS 点间不构建三角网,由参考点分别与 PS 点连接进行后续计算。

最后,一般 CR 具有极高信噪比,受噪声影响也很小,残余相位即为非线性形变相位,线性形变和非线性形变相加得到最终形变信息。

2 研究区及 SAR 数据概况

2.1 研究区概况

连江县地处中国福建省东南沿海,闽江口北岸,西邻省会福州市。连江县属于中亚热带海洋性季风气候,温暖湿润,雨量充沛,年平均气温 16.7~19.4℃。研究区位于 G15 沈海高速福建省连江县段,距离县城约 3 km。如图 1 所示,研究区边坡位于沈海高速公路东侧,近东西方向,形如字母 M,南北长约 290 m,东西宽约 200 m,高差约 65 m,坡度约 19.0°。



图 1 研究区范围

Fig.1 Study Area

2.2 SAR 数据情况

本文采用的数据为 X 波段雷达卫星条带模式合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)影像,分辨率为 3 m×3 m,侧视角度 35.3°,根据设计的实验要求对图 1 中研究区进行编程拍摄,共获取了 15 景影像,时间为 2018-01-01—2018-06-15。考虑时间、空间基线等因素,选取 2018-03-30 的影像作为主影像,进行 PS-InSAR 处理。差分干涉处理使用航天飞机雷达地形测绘使命(shuttle radar topography mission, SRTM)数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据,格网间隔为 90 m×90 m。

3 CR 几何设计与 RCS 分析

在实际边坡监测中,由于边坡的坡度坡向等因素,边坡往往存在着三维形变,需要采用升降轨联合观测的方式获取真实的三维形变。而边坡区域常存在植被覆盖较多情况,可以布设人工角反射器增加有效测量点。常规的三角反射器

无法满足升降轨联合监测的要求,需要根据监测需求,重新设计适合不同角度监测的通用角反射器。本文实验采用矩形 CR 进行尺寸设计,如图 2 所示为雷达强度图,根据分析可知研究区边坡的背景反射强度约为 -15 dB (较暗像素)至 -3 dB (较亮像素),需要实现 30 dB 的优势反射信噪比,根据式 (2) 计算可得 CR 需要达到 RCS 约 27 dBm^2 ,则需要 CR 矩形边长不小于 0.35 m 。

如图 3 所示,本文实验的 CR 采用共纵轴双立方体的形状设计,即将两个立方体反射器按照升降轨不同朝向的入射方向紧密结合在一起,形成一个能够同时对升降轨影像形成有效反射的共轴复合双反射器系统。立方体由矩形金属板构成,计算可得反射器矩形边长为 0.35 m ,由于反射器尺寸较大,选用一定厚度且带有冲压孔的镁

空金属板制作,确保反射器不会因风力等影响而发生面板弯曲。此外,角反射器与底座采用 4 颗可调节高度的螺丝固定,可人工调节反射器的高度,模拟形变,测试 InSAR 监测敏感性。

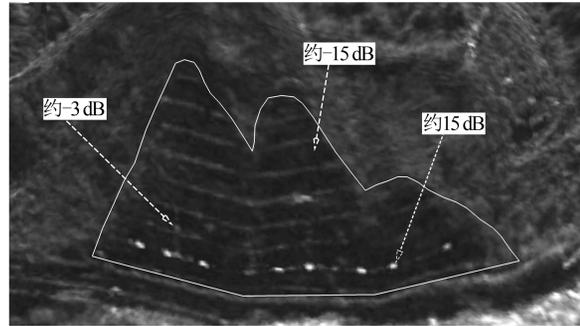


图 2 研究区雷达强度图

Fig.2 SAR Intensity Map of Study Area

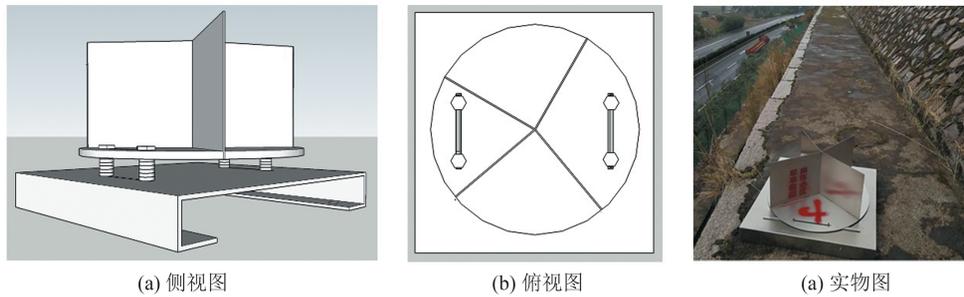


图 3 人工 CR 设计图

Fig.3 Design of Artificial CR

双向矩形 CR 布设在边坡前缘混凝土加固区域的第二级台阶,数量为 10,CR 之间间距为 20 m ,避免 CR 之间相互干扰。在具体安装时,根据 X 波段雷达卫星影像的侧视角度 (35.3°),选取距离坡体较远的位置作为 CR 的安装位置,避免坡体突出部分遮挡信号(见图 4),并且 CR 底座水平,纵轴垂直于底座,从而保证能够有效反射升降轨雷达信号。

的边界,在 CR 上部位置生长有植被,由于植被的遮挡,未能获取强散射信号。为了确定 CR 点的位置,利用在数据采集中主瓣相位和旁瓣相位不同的特性,采用了一种基于相位相关的方法,消除强散射体旁瓣,用于 CR 点的准确选择^[20]。选取每个 CR 点对应的 1 个像素点后,对 CR 点的时间序列后向散射强度信息进行分析。

4 CR 阵列时序结果分析

4.1 CR 阵列 RCS 结果分析

由于 CR 点具有强的后向散射特性,其在 SAR 图像中显示为亮点^[19]。图 5 显示了研究区地物和布设的 CR 点成像情况。安装的 10 个 CR 点中,有 7 个 CR 点在图像上显示为亮点,能够明显识别,3 个 CR 点由于安装问题或人为破坏,不具备较强的后向散射特性。其中,位于 CR7 南侧的 1 个 CR 由于安装位置问题,未具备较强的后向散射特性,分析其原因因为 CR 安装位置靠近边坡

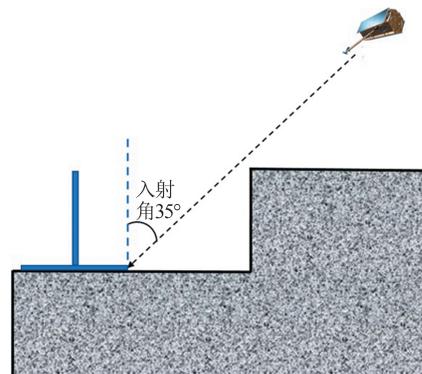


图 4 安装位置选取时应考虑附近坡体遮挡问题

Fig.4 Slope Sheltering Needs to Be Considered When Selecting the Installation Location

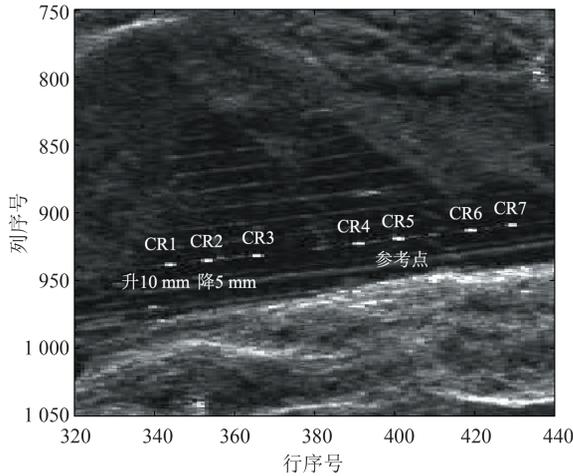


图5 SAR数据集平均强度图

Fig.5 Average Intensity Map of SAR Datasets

如图6所示,所有CR点在监测时间内均保持了较高且稳定的强度,7个CR的强度均值为14.6 dB,强度值在均值附近波动,波动的方差为1.4 dB。其中,CR5的强度均值最大,为15.9 dB,并且波动的方差最小,为0.7 dB,选取CR5作为形变计算的参考点。从图6中可以发现,在2018-03-19成像时间,所有CR点均出现明显的后向散射强度降低情况,查询研究区天气情况(见表1),当天天气为中雨,强降雨对CR点的后向散射强度影响明显。从表1中可以看出,在监测时间内,温度波动明显,最低温度为3℃,最高温度为33℃,温度的剧烈变化对CR点的后向散射强度无明显影响。

4.2 CR阵列形变结果分析

为验证CR的监测精度,人为地随机调节角反射器高度,模拟形变发生。在6个CR中选取2个进行调节,其中1个在垂直方向向上调节10 mm,1个在垂直方向向下调节5 mm,调节时间为2018-05-15(见图5)。图7为PS-InSAR计算获取的CR点时间序列形变值变化图,参考点为CR5。从计算的结果可以判断,CR1和CR2被人为调节高度,其中CR1在垂直方向向上调节了10 mm,计算得到的雷达视线方向形变量为7.7 mm,CR2在垂直方向向下调节了5 mm,计算得到的雷达视线方向形变量为-3.6 mm,判断调节角反射器的时间为2018-05-13—2018-05-24。对计算得到的CR点进行精度分析,将CR1和CR2雷达视线方向形变量转换为垂直方向,CR1在垂直方向形变量为9.4 mm,CR2在垂直方向形变量为-4.4 mm,CR1和CR2形变计算值和调节值差值均为0.6 mm,中误差为0.6 mm。除去参考点,其余4

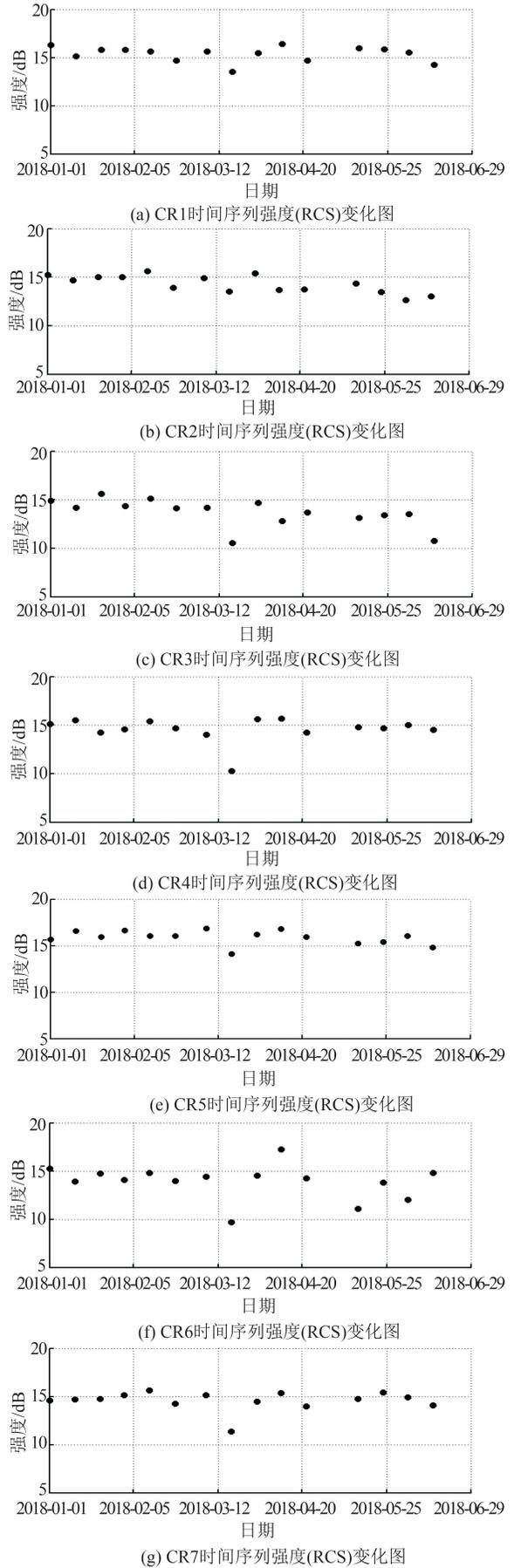


图6 CR点时间序列强度变化图

Fig.6 Time-Series Intensity Changes of CR Points

表 1 研究区天气情况
Tab.1 Weather in the Study Area

成像日期	最高气温/°C	最低气温/°C	天气	风向
2018-01-01	15	10	多云	西北风 2级
2018-01-12	12	3	晴	东北风 2级
2018-01-23	18	12	多云	东北风 2级
2018-02-03	9	4	多云	东北风 2级
2018-02-14	20	10	晴	东南风 微风
2018-02-25	17	11	小雨	西北风 2级
2018-03-08	15	7	多云	西风 1级
2018-03-19	26	13	中雨	南风 2级
2018-03-30	24	16	多云	东风 2级
2018-04-10	28	16	多云	东南风 2级
2018-04-21	29	20	阴	南风 2级
2018-05-13	33	23	雷阵雨	东南风 2级
2018-05-24	32	22	多云	东南风 2级
2018-06-04	30	24	多云	东南风 2级
2018-06-15	31	21	多云	东风 2级

个 CR 点相对于参考点均稳定,时间序列形变值大都在 1 mm 内波动,具有较高的形变探测精度。需要指出的是,本文给出了在使用设计的双向矩形 CR 和 X 波段雷达卫星 3 m 分辨率数据情况下 PS-InSAR 监测的精度分析,在 PS-InSAR 可量测形变范围内,本文实验监测的精度具有一定验证意义。

5 结语

时间序列 InSAR 是地表形变监测的重要手段,在实际应用中,其所能够达到的精度和获取多角度形变信息是关注的重点。为此,本文设计了双向矩形角反射器,并布设在监测区边坡,人工模拟二维形变场,利用 X 波段雷达卫星数据监测角反射器形变,并与设计值比对验证时间序列 InSAR 对双向矩形角反射器的探测精度。实验结果表明:

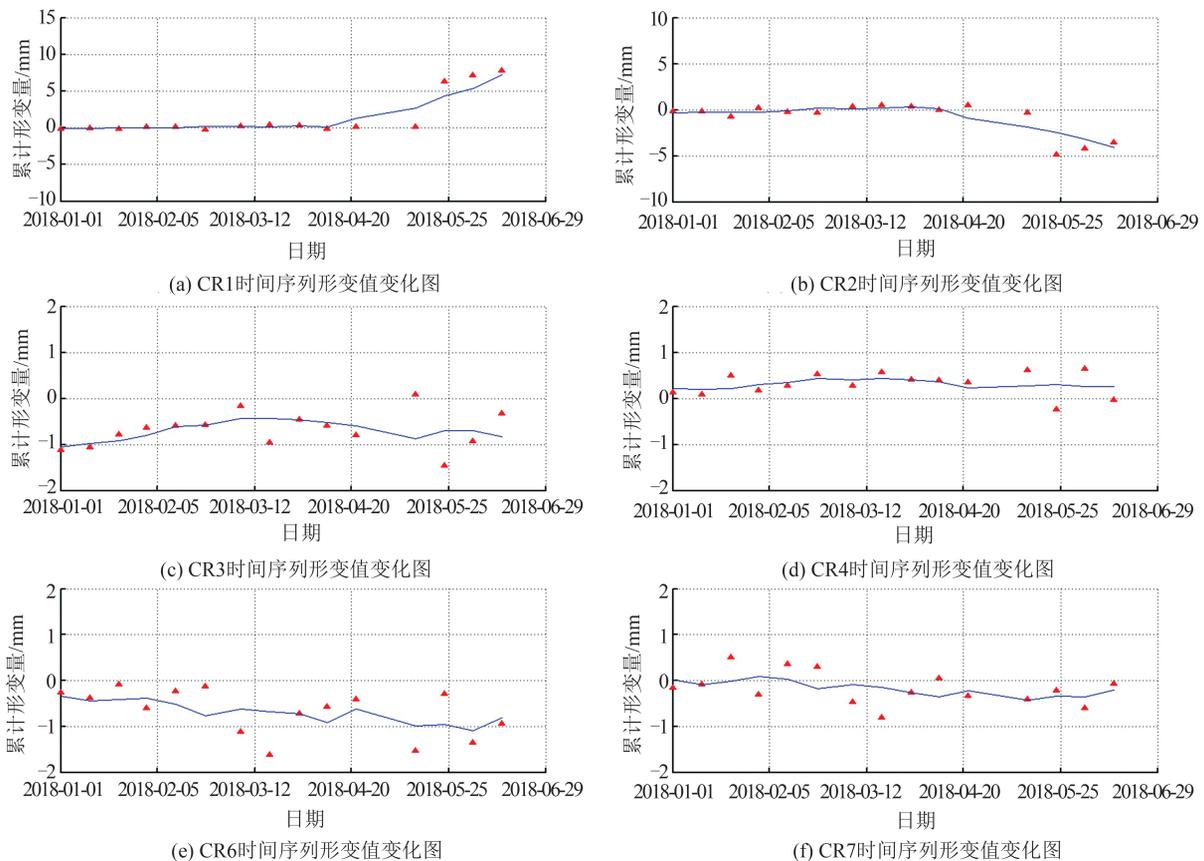


图 7 CR 点时间序列形变值变化图

Fig.7 Time Series Displacement of CR Points

1) 所设计的双向矩形可调节 CR 保持了较高且稳定的后向散射强度,能够很容易地被提取。通过对成像时刻的天气情况分析可知,强降雨对 CR 点的后向散射强度有一定影响。

2) 在人为调节 CR 高度的盲实验条件下,计算出在 2018-05-13—2018-05-24 期间有 2 个 CR 发生了移动,CR1 和 CR2 形变计算值和调节值差值均为 0.6 mm,中误差为 0.6 mm,形变探测精度

达到亚毫米级。

需要指出的是,受到数据限制,本文设计的方案只采用了降轨数据,得到了较好的实验效果。对于升轨数据监测效果,需要进一步实验验证,但从降轨数据的结果分析,推测所设计的双向矩形可调节CR能够满足升降轨监测场景获取形变的需求。

参 考 文 献

- [1] Pu Chuanhao, Xu Qiang, Jiang Ya'nan, et al. Analysis of Land Subsidence Distribution and Influencing Factors in Yan'an New District Based on Time Series InSAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(11): 1 728-1 738 (蒲川豪, 许强, 蒋亚楠, 等. 延安新区地面沉降分布及影响因素的时序InSAR监测分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(11): 1 728-1 738)
- [2] Yao Jiaming, Yao Xin, Wu Zuoqi, et al. Inversion of Underground Goaf in Zhenfeng Coal Mine in Guizhou Province Based on InSAR Three-Dimension Decomposition Technology[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(4): 852-866 (姚佳明, 姚鑫, 吴作启, 等. 基于InSAR三维分解技术的贵州省贞丰某煤矿地下采空区反演[J]. 工程地质学报, 2020, 28(4): 852-866)
- [3] Ge Daqing, Dai Keren, Guo Zhaocheng, et al. Early Identification of Serious Geological Hazards with Integrated Remote Sensing Technologies: Thoughts and Recommendations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 949-956 (葛大庆, 戴可人, 郭兆成, 等. 重大地质灾害隐患早期识别中综合遥感应用的思考与建议[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(7): 949-956)
- [4] Bai Zechao, Lü Sen, Cao Kun, et al. Integration Between Ground Based and Satellite SAR Data in Analysis: A Case Study of Xinmo Village Landslide in Mao County, Sichuan Province[J]. *Progress in Geophysics*, 2020, 35(5): 1 637-1 643 (白泽朝, 吕森, 曹琨, 等. 结合星载地基InSAR分析的四川新磨村滑坡早期识别与灾后监测[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(5): 1 637-1 643)
- [5] Li T, Motagh M, Wang M, et al. Earth and Rock-Filled Dam Monitoring by High-Resolution X-Band Interferometry: Gongming Dam Case Study[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(3): 246
- [6] Li Zhenhong, Song Chuang, Yu Chen, et al. Application of Satellite Radar Remote Sensing to Landslide Detection and Monitoring: Challenges and Solutions[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 967-979 (李振洪, 宋闯, 余琛, 等. 卫星雷达遥感在滑坡灾害探测和监测中的应用: 挑战与对策[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(7): 967-979)
- [7] Bai Z, Fang S, Gao J, et al. Could Vegetation Index Be Derive from Synthetic Aperture Radar: The Linear Relationship Between Interferometric Coherence and NDVI[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 1-9
- [8] Xu Caijun, He Ping, Wen Yangmao, et al. Crustal Deformation Monitoring of Xianshuihe Fault by CR-InSAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(3): 302-305 (许才军, 何平, 温扬茂, 等. 利用CR-InSAR技术研究鲜水河断层地壳形变[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(3): 302-305)
- [9] Schlögel R, Thiebes B, Mulas M, et al. Multi-temporal X-band Radar Interferometry Using Corner Reflectors: Application and Validation at the Corvara Landslide (Dolomites, Italy)[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(7): 739
- [10] Xing Xuemin, Zhu Jianjun, Wang Changcheng, et al. A New Method for CR Point Identification and It's Application to Highway Deformation Monitoring[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(6): 699-703 (邢学敏, 朱建军, 汪长城, 等. 一种新的CR点目标识别方法及其在公路形变监测中的应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(6): 699-703)
- [11] Dheenathayalan P, Cuenca M C, Hoogeboom P, et al. Small Reflectors for Ground Motion Monitoring with InSAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(12): 6 703-6 712
- [12] Garthwaite M C. On the Design of Radar Corner Reflectors for Deformation Monitoring in Multi-frequency InSAR[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(7): 648
- [13] Jauvin M, Yan Y, Trouvé E, et al. Integration of Corner Reflectors for the Monitoring of Mountain Glacier Areas with Sentinel-1 Time Series[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(8): 988
- [14] Ferretti A, Savio G, Barzaghi R, et al. Submillimeter Accuracy of InSAR Time Series: Experimental Validation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(5): 1 142-1 153
- [15] Qin Y, Perissin D. Monitoring Ground Subsidence in Hong Kong via Spaceborne Radar: Experiments and Validation[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(8): 10 715-10 736
- [16] Ao Meng, Zhang Qin, Zhao Chaoying, et al. An

- Improved CR-InSAR Technology Used for Deformation Monitoring in Jiaju Landslide, Sichuan [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(3): 377-383 (敖萌, 张勤, 赵超英, 等. 改进的 CR-InSAR 技术用于四川甲居滑坡形变监测[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(3): 377-383)
- [17] Yang C, Hu J, Cheng Z, et al. CR-InSAR Using Two-Step LAMBDA Algorithm for Nonlinear Deformation Estimation: Case Study of Monitoring Xiangtan Converter Station, China [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2019, 17(6): 963-967
- [18] Gray A L, Vachon P W, Livingstone C E, et al. Synthetic Aperture Radar Calibration Using Reference Reflectors [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28(3): 374-383
- [19] Xu Xiaobo, Qu Chunyan, Shan Xinjian, et al. 2016. Mapping Slow Deformation of the Middle Segment of the West Qinling Fault Using the Combined Algorithm of CR-InSAR and PS-InSAR [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(8): 2796-2805 (徐小波, 屈春燕, 单新建, 等. CR-InSAR 与 PS-InSAR 联合解算方法及在西秦岭断裂中段缓慢变形研究中的应用 [J]. 地球物理学报, 2016, 59(8): 2796-2805)
- [20] Perissin D, Rocca F. High-Accuracy Urban DEM Using Permanent Scatterers [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(11): 3338-3347

On the Evaluation and Verification of Bidirectional Rectangle Corner Reflectors for Deformation Monitoring in Time-Series InSAR

WANG Yanping¹ BAI Zechao^{2,1} LIN Yun¹ LI Yang¹

¹ Radar Monitoring Technology Laboratory, School of Information Science and Technology, North China University of Technology, Beijing 100144, China

² School of Electrical and Control Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China

Abstract: Objectives: In the research of time-series interferometric synthetic aperture radar (TS-InSAR) deformation monitoring, the conventional triangular reflectors are increasingly used as point targets. But the conventional triangular reflectors cannot meet the requirements of obtaining multi-angle deformation information on ascending and descending track scenes. They need to be tailored for specific datasets to meet monitoring needs. **Methods:** A set schemes for corner reflector design and accuracy verification are constructed. According to the characteristics of X-band radar satellite, a two-way adjustable rectangular corner reflector is designed to meet the monitoring scene of the ascending and descending track. Due to the relationship between the radar cross section(RCS) and the size of the corner reflector, the side length of the bidirectional rectangular corner reflector is calculated to be 0.35 m. Ten bidirectional rectangular corner reflectors are placed on the side slope of the highway in the monitoring area. By artificially simulating the two-dimensional deformation, the detection accuracy and reliability of the TS-InSAR on the bidirectional rectangular corner reflector is verified. **Results:** Under the condition of effectively eliminating the sidelobe effect of the pixel, the designed bidirectional rectangular corner reflector maintains a high and stable backscattering intensity, which can be easily extracted. Through the analysis of the weather conditions at the time of imaging, heavy rainfall has a certain influence on the backscattering intensity of corner reflectors. Under the blind experimental conditions of artificially adjusting the height of the corner reflector, CR1 and CR2 are moved between May 13, 2018 and May 24, 2018. The root mean square error is 0.6 mm. The deformation detection accuracy reaches the sub-millimeter level. **Conclusions:** The TS-InSAR is highly sensitive to the deformation of the designed bidirectional rectangular corner reflector. The bidirectional rectangular corner

(下转第 1488 页)

Province are analyzed. **Results:** Experimental results show that the improved particle swarm optimization(IPSO)-LSTM neural network data fusion algorithm, based on mutual information is suitable for landslide deformation prediction with multi-source heterogeneous monitoring data. The environmental factor variable selection method based on mutual information is better than Pearson correlation coefficient selection method. After optimizing the parameters of the improved particle swarm optimization algorithm, the prediction accuracy of the fusion model is higher. **Conclusions:** The proposed fusion prediction model has high prediction accuracy in landslide cumulative displacement prediction, which has important reference value for improving the reliability of landslide monitoring and early warning. It should be noted that only a few typical environmental factors are collected. In practical application, other factors such as groundwater level, soil moisture and human activities can be considered to further improve the prediction accuracy and reliability of the fusion model.

Key words: landslide monitoring; data fusion; LSTM; mutual information; PSO; prediction

First author: WANG Li, PhD, professor, specializes in satellite navigation data processing and geological disaster deformation monitoring theory and method. E-mail: wangli@ehd.edu.cn

Corresponding author: SHU Bao, PhD, lecturer. E-mail: baos613@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (41877289, 41731066, 41604001, 42004024); the National Key Research and Development Program of China(2018YFC1504805, 2018YFC1505102); China Postdoctoral Science Foundation(2020M673321).

引文格式: WANG Li, XU Hao, SHU Bao, et al. A Multi-source Heterogeneous Data Fusion Method for Landslide Monitoring with Mutual Information and IPSO-LSTM Neural Network[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(10): 1478-1488. DOI: 10.13203/j.whugis20210131(王利, 许豪, 舒宝, 等. 利用互信息和 IPSO-LSTM 进行滑坡监测多源数据融合[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(10): 1478-1488. DOI: 10.13203/j.whugis20210131)

.....
(上接第 1477 页)

reflector can meet the requirements of obtaining multi-angle deformation information on ascending and descending track scenes.

Key words: time-series InSAR; bidirectional rectangular corner reflector; X-band radar satellite; accuracy verification; slope monitoring

First author: WANG Yanping, PhD, professor, specializes in radar 3D imaging, development and application of ground-based synthetic aperture radar. E-mail: wangyp@ncut.edu.cn

Corresponding author: BAI Zechao, PhD candidate. E-mail: baizechao1991@163.com

Foundation support: The National Key Research and Development Program of China (2018YFC1505103); the National Natural Science Foundation of China(61860206013).

引文格式: WANG Yanping, BAI Zechao, LIN Yun, et al. On the Evaluation and Verification of Bidirectional Rectangle Corner Reflectors for Deformation Monitoring in Time-Series InSAR[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(10): 1471-1477. DOI: 10.13203/j.whugis20210101(王彦平, 白泽朝, 林贇, 等. InSAR 双向矩形角反射器阵列形变监测精度评估与验证[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(10): 1471-1477. DOI: 10.13203/j.whugis20210101)