

GB-InSAR 的监测流程和关键技术

麻德明^{1,2}, 刘焱雄¹, 徐文学¹, 王彦兵³, 高兴国⁴

(1. 国家海洋局第一海洋研究所 青岛 266061; 2. 中国海洋大学环境科学与工程学院 青岛 266100;
3. 国网经济技术研究院有限公司 北京 102209; 4. 山东电力工程咨询院有限公司 济南 250013)

摘要:地基合成孔径雷达干涉技术(GB-InSAR)是全新的形变监测技术,具有高度自动化、全天时和全天候监测以及高分辨率和高精度等优势。为推进 GB-InSAR 在我国海岛海岸带监测中的应用,文章概述 GB-InSAR 的技术原理和监测流程,分析其配准图像、生成干涉图和相干图、干涉图滤波、相位解缠、大气相位校正以及框架基准确定和地理编码等关键技术。研究结果表明:GB-InSAR 将步进频率连续波技术、合成孔径雷达技术以及雷达干涉测量技术有效融合,在采集目标形变信息方面具有广阔的应用前景;我国应积极推进 GB-InSAR 在海岛海岸带监测中的研究和应用,为海岛海岸带管理提供有力的技术支撑。

关键词:地基合成孔径雷达干涉技术;海岛海岸带;海洋监测;形变监测;动态监视监测

中图分类号:P715 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-9857(2018)08-0081-05

Monitoring Process and Key Technology of GB-InSAR

MA Deming^{1,2}, LIU Yanxiong¹, XU Wenxue¹, WANG Yanbing³, GAO Xingguo⁴

(1. The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China;
2. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;
3. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., LTD, Beijing 102209, China;
4. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., LTD, Jinan 250013, China)

Abstract: Ground-based Synthetic Aperture Radar Interferometry (GB-InSAR) is a new deformation monitoring technology with advantages of high automation, all-day and all-weather monitoring, high resolution and high precision. In order to promote the application of GB-InSAR in the monitoring of islands and coastal zone in China, the technical principles and monitoring processes of GB-InSAR were summarized. Key techniques such as image registration, interferogram and coherence map generation, interferogram filtering, phase unwrapping, atmospheric phase correction, frame reference determination and geo-coding were analyzed. The results showed that GB-InSAR effectively integrated stepped frequency continuous wave technology, synthetic aperture radar

收稿日期:2018-01-04;修订日期:2018-07-05

基金项目:海岛监视监测研究(SY0518002);海底电缆工程高精度多元数据获取及分析技术研究(JYYKJXM[2017]003);测绘新技术在海上工程勘察中的应用研究。

作者简介:麻德明,工程师,博士研究生,研究方向为 3S 技术在海岛海岸带综合管理中的应用

technology and radar interferometry. It had a broad application prospect in collecting deformation information of target. The research and application of GB-InSAR in islands and coastal zone monitoring should be actively promoted in China. It would provide strong technical support for the management of islands and coastal zone.

Key words: GB-InSAR, Islands and coastal zone, Marine monitoring, Deformation monitoring, Dynamic monitoring

0 引言

海岛海岸带处于海陆相互作用的交汇地带,具有重要的社会经济、生态环境、科学研究和国防价值。由于受自然因素和人为因素的共同影响,海岛海岸带的外部形态变化很快,区域内的人工建筑设施也易受多种因素的影响而发生形变,因此加强对海岛海岸带的监测十分必要。目前卫星遥感、全站仪、测量机器人、全球导航定位系统和船载传感器等传统技术已在海岛海岸带监测中得到广泛应用,但其已难以满足对监测范围、精度和时效的要求;无人机低空遥感技术以其灵活、快速和分辨率高的特性被成功应用于海岛海岸带监测,但其精度有限,且易受天气的影响;三维激光雷达技术以点云的方式获得监测目标的空间信息,不仅能获得单点形变信息,而且可反映目标的整体变化,但其遥测距离有限,且精度随监测距离的增加而急剧降低。因此,迫切需要更加高效、快速、灵活、高分辨率和高精度的监测技术,实时监测港口码头、防波堤坝和跨海大桥等海上构筑物以及岛礁的变化信息,掌握山体滑坡等地质灾害的发生和发展过程,建立动态监视监测系统,对于维护海岛海岸带的安全以及提高预警和应急能力具有重要意义。

近年来逐渐发展的地基合成孔径雷达干涉技术(GB-InSAR)具有全天候、高分辨率和连续空间覆盖等特点,尤其具有可达亚毫米级的高精度监测能力,已被认为是前所未有的形变监测技术,为海岛海岸带监测开辟了新的道路。Tarchi 等^[1]最早提出利用 GB-InSAR 远程监测建筑物的形变;随后许多学者陆续将此技术应用于监测坝体^[2]、滑坡^[3-8]、山崩和雪崩^[9]、冰川^[10-11]以及火山^[12-13]等的变化,取得一系列丰硕成果;Oriol 等^[14]基于已有研究,综述 GB-InSAR 的基本原理及其应用,较系

统地总结了该技术的优缺点。我国对 GB-InSAR 也开展了相关研究,在监测桥梁^[15-16]、大坝^[17]、煤矿^[18-19]、山体滑坡^[20]和微地形变化^[21]等方面也取得一些进展,但仍处于起步阶段,很多问题尚未解决,应用领域也需进一步拓展,尤其亟须加强在海岛海岸带监测方面的应用。

1 GB-InSAR 的原理和优势

GB-InSAR 是基于微波探测主动成像方式的、非接触式的全新监测技术。通过步进频率连续波技术(SF-CW)和合成孔径雷达技术(SAR)可实现较高的距离向分辨率和方向分辨率;通过雷达干涉测量技术可实现优于毫米级的微变形监测,无需接近目标区域即可精确获取地表信息。

GB-InSAR 的工作原理是利用微波对目标区域扫描,并对后向散射信号进行相干记录,接收的回波信息经聚焦和滤波等一系列处理后,得到合成孔径雷达图像,并从每个复数的虚部和实部计算矩阵相应元素的相位和振幅信息。通过雷达干涉测量技术,利用相位信息计算位移图,在 2 个不同时刻发射微波信号,根据 2 次信号回波之间的相移推导后向散射目标的运动,从而获得监测目标的微形变量。

(1)SF-CW 在最小扫描脉冲内,以不同的频率发射 1 组微波信号,以保证长距离传输,从而提高距离向分辨率。

(2)SAR 是近年来发展的空间对地观测新技术,属于多普勒分析技术,即用 1 个真实的小天线运动等效 1 个长天线运动,根据运动的雷达在同一距离单元中不同方位向的散射体之间小的多普勒频移的差别,从而提高方向分辨率;其一边相对观测区域运动,一边发射和接收步进频率连续波信号,再经过信号处理模拟雷达天线,天线的长度取决于雷达移动的距离,即合成孔径^[22]。

(3)雷达干涉测量技术通过比对不同时刻扫描采样之间的位移相位差,得到监测目标在径向方向的形变信息。

与传统的监测技术相比,GB-InSAR 可在恶劣环境下实现全天候、全天时和高精度的位移监测,主要有 6 个优势^[17,23-27]:①监测全过程高度自动化,无需在目标区域安装角反射器,可实现对危险区域的远程监测;②不受气候条件的限制,可实现全天候和全天时的实时监测;③监测精度高,雷达视线方向可达亚毫米级,遥测距离可达数千米,可实现波束覆盖范围内数千平方千米区域的监测;④监测形变率范围大,可从数毫米/a 至 1 m/h;⑤数据采集时间短,可为整个目标区域提供时空连续的变形监测图,1 次监测范围可达数十万平方米;⑥通过无线控制可实现连续远程处理和监测。

2 监测流程

海岛海岸带的地形复杂多变,外部形态变化迅速,各处潮汐差异较大,滩涂种类性质多样,易受人类活动干扰,这些都为监测工作带来很大的困难。因此,在监测前要整体谋划,从顶层设计统筹制定工作流程,主要包括构建基准网、建立监测系统、采集数据、处理和分析数据、制作形变图和预测变化趋势以及制订防护措施和应急预案等步骤。

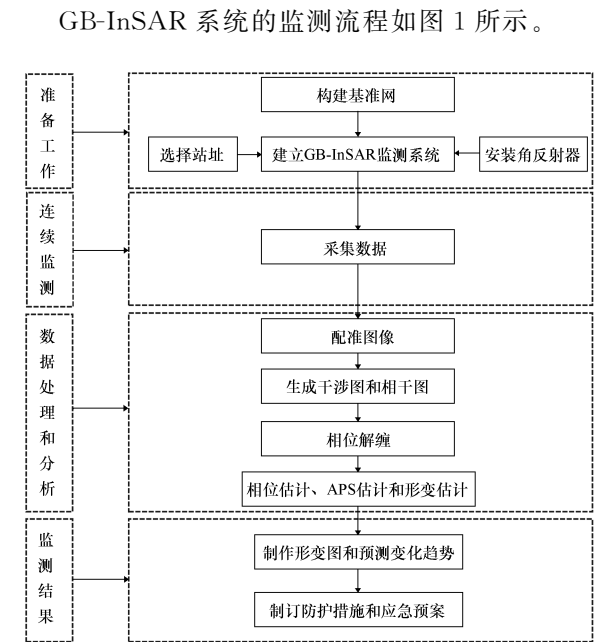


图 1 GB-InSAR 系统的监测流程

3 关键技术

高精度的变形监测需要精准的干涉相位来保证,图像的精确配准是有效监测的前提。因此,在优化站址选择的基础上,利用基础数据大致推算形变场及其特征,通过采集多时段、零基线的重复监测数据以提升匹配精度;重点研究相干点目标的提取、消除和减弱误差等数据精细处理的关键算法;利用全球导航定位系统和水准测量等其他监测手段进行精度评估和验证,以确保监测结果的有效性和可靠性。

3.1 配准图像

图像配准是 GB-InSAR 形变监测的关键步骤之一,也是生成干涉图的基础。将两景影像中代表相同地物的像元匹配到同一位置,并利用同一位置的 2 幅图像重叠的相位信息,计算分布在 2 幅图像窗口的相干值。通常采用能够获得高质量干涉条纹的相关算法,主要包括图像匹配、仿射变换和图像重采样等步骤。

3.2 生成干涉图和相干图

在配准图像后,须利用雷达图像数据生成高质量的干涉图,通过准确提取干涉相位为相位解缠做准备。将配准后的图像对共轭相乘生成干涉图,根据相干性理论计算公式生成相干图。

3.3 干涉图滤波

由于噪声的存在,干涉图的相位数据可能跳跃和不连续,将导致误差传递,从而影响后续的解缠处理。因此,须滤除噪声干扰,提高信噪比,减少残余出现的频度。为保持数据的连续性,通常采用平滑滤波处理以及基于相干性加权的圆周期均值滤波处理等方法。

3.4 相位解缠

相位解缠是干涉相位主值还原为真值的过程,是 GB-InSAR 形变监测的关键环节之一,其准确性直接影响 GB-InSAR 监测结果的精确性。由于采用短波长雷达波,相位解缠的难度有所增加,常见方法包括路径跟踪法、最小二乘法、边缘分析或区域分割法以及最优估计法等。

3.5 大气相位校正

大气中不均匀的介质会对微波的传播路径和

方向造成干扰,产生大气相位(APS),该相位误差会在干涉处理过程中传播,形成大气效应,从而对于干涉结果造成严重影响。因此,须对大气相位进行校正,以提高监测精度,通常采用基于全球导航定位系统数据校正法、逐对分析法、层叠法、永久散射体法、空间辐射计测量法、基于地面气象信息建模法和建立大气模型校正法等方法。

3.6 框架基准确定和地理编码

为更加清晰地比对和融合通过 GB-InSAR 监测与其他技术手段获得的形变信息,须对监测结果进行地理编码,并将雷达坐标系中的结果投影到同一地理坐标框架下。

4 应用前景

GB-InSAR 基于地基平台,将步进频率连续波技术、合成孔径雷达技术以及雷达干涉测量技术有效融合,不仅可监测由于自然灾害引起的位移,而且可精确监测跨海大桥等海上构筑物的微小形变,同时可快速获取高分辨率和高精度的图像,具有系统结构简单、数据获取快速和监测形变精度高等特点,在采集目标形变信息方面具有传统监测技术无法比拟的优势,是进行区域空间形变监测的利器。GB-InSAR 已在各监测领域有成功的应用,如滑坡监测、高层建筑物形变监测、地面沉降监测、边坡稳定性监测、地表微形变监测、山崩和雪崩运动监测、火山灾害监测和预警以及冰川位移监测等。

目前我国在海岛海岸带监测中已广泛应用全球导航定位系统、遥感和地理信息系统等技术,并取得令人瞩目的成就,有的应用已达到国际先进水平。未来我国应积极推进 GB-InSAR 的研究和应用,通过借鉴国内外的典型应用和成功案例,结合海岛海岸带独特的地理环境,将此项新技术应用于海岛海岸带监测领域。随着测绘技术的进步,形变监测将向高精度、智能化、全方位和立体化的方向发展,具有巨大潜力的 GB-InSAR 在海岛海岸带监测方面具有广阔的应用前景。随着 GB-InSAR 系统软硬件的逐渐成熟以及数据处理和分析技术的不断完善,其将极大地提高在海岛海岸带监测中应用的深度和广度,更加形象和直观地表达海岛海岸带的形变趋势,更加有效地监控、预警和响应灾害

事件,为海岛海岸带管理提供有力的技术支撑,从而提升海洋管理效率和水平。

参考文献

- [1] 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.
- [2] ALBA M, BERNARDINI G, GIUSSANI A, et al. Measurement of dam deformations by terrestrial interferometric techniques[J]. *Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci*, 2008 (37): 133—139.
- [3] PIERACCINI M, CASAGLI N, LUZI G, et al. Landslide monitoring by ground-based radar interferometry: a field test in Valdarno(Italy)[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(6): 1385—1391.
- [4] ANTONELLO G, CASAGLI N, FARINA P, et al. Ground-based SAR interferometry for monitoring mass movements[J]. *Landslides*, 2004, 1(1): 21—28.
- [5] LUZI G, PIERACCINI M, MECATTI D, et al. Advancing ground-based microwave interferometry for landslide survey: a case study[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(12): 2331—2350.
- [6] BARLA G, ANTOLINI F, BARLA M, et al. Monitoring of the beauregard landslide (Aosta Valley, Italy) using advanced and conventional techniques[J]. *Engineering Geology*, 2010, 116(3/4): 218—235.
- [7] CASAGLI N, CATANI F, VENTISETTE C D, et al. Monitoring, prediction and early warning using ground-based radar interferometry[J]. *Landslides*, 2010, 7(3): 291—301.
- [8] ALESSANDRO C, MATTEO B, ANTONIO M, et al. Rapid assessment of landslide activity in Emilia Romagna using GB-InSAR short surveys[J]. *The Second World Landslide Forum*, 2013, 1(1): 334—338.
- [9] MARTINEZ V A, FORTUNY G J. Monitoring structural changes and stability of the snow cover with a ground-based synthetic aperture radar[A]. *Proceedings of the URSI 2005 Commission F Symposium on Microwave Remote Sensing of the Earth, Oceans, Ice, and Atmosphere*[M]. Brussels: Joint Research Centre, 2006.
- [10] LUZI G. Monitoring of an alpine glacier by means of ground-based SAR interferometry[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4(3): 495—499.
- [11] NOFERINI L, MECATTI D, MACALUSO G, et al. Monitoring of belvedere glacier using a wide angle GB-SAR interferometer[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2009, 68

(2):289—293.

[12] ANTONELLO G,TARCHI D,CASAGLI N,et al.SAR interferometry form satellite and ground-based system for monitoring deformation on the stromboli volcano[J].Geoscience and Remote Sensing Symposium,2004(1):20—24.

[13] RÖDELSPERGER S,BECKER M,GERSTENECKER C,et al.Digital elevation model with the ground-based SAR IBIS-L as basis for volcanic deformation monitoring[J].J Geodyn,2010,49(3):241—246.

[14] ORIOL M,GUIDO L,MICHELE C.Deformation monitoring using ground-based SAR data[J].Geophysical Journal International,2012,130:33—45.

[15] 戚斌,岳顺,宋亚宏.GB-InSAR 技术在桥梁变形监测中的应用[J].地理空间信息,2017,15(7):97—98.

[16] 刘春,程起军,李俊义,等.基于地基干涉雷达的大型桥梁动态挠度监测与分析[J].工程勘察,2017(1):53—58.

[17] 黄其欢,张理想.基于 GB-InSAR 技术的微变形监测系统及其在大坝变形监测中的应用[J].水利水电科技进展,2011,31(3):84—87.

[18] 杨红磊,彭军还,崔洪曜.GB-InSAR 监测大型露天矿边坡变形[J].地球物理学进展,2012,27(4):1804—1811.

[19] 任月龙,李如仁,张信.基于多传感器网的露天矿边坡变形监测[J].煤炭学报,2014,39(5):767—773.

[20] 刘斌,葛大庆,张玲,等.地基雷达干涉测量技术在滑坡灾后稳定性评估中的应用[J].大地测量与地球动力学,2016,36(8):674—677.

[21] 刘国祥,丁晓利.沿海地区 DInSAR 形变探测:精度与可应用性分析[J].测绘通报,2006(9):9—13.

[22] 刘艳.地面干涉雷达 IBIS-L 红石岩堰塞湖边坡监测研究[D].昆明:昆明理工大学,2016.

[23] LEVA D,NICO G,TARCHI D,et al.Temporal analysis of a landslide by means of a ground-based SAR interferometer[J].Geosci Remote Sens,2003,41(4):745—752.

[24] TARCHI D,ANTONELLO G,CASAGLI N,et al.On the use of ground-based SAR interferometry for slope failure early warning:the cortenova rock slide(Italy)[M].Berlin Heidelberg:Springer,2005.

[25] TAKAHASHI K,MATSUMOTO M,SATO M.Continuous observation of natural disaster-affected areas using ground-based SAR interferometry[J].Earth Observations Remote Sens,2013,6(3):1286—1294.

[26] 王现中.测绘新技术在港区形变检测中的应用[J].企业科技与发展,2013(3):17—19.

[27] 李俊慧.基于 SFCW 的 GB-InSAR 形变监测技术研究[D].成都:电子科技大学,2016.