

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2011.03.023

基于 GBInSAR 技术的微变形监测系统 及其在大坝变形监测中的应用

黄其欢^{1 2 3}, 张理想¹

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098;
2. 国土环境与灾害监测国家测绘局重点实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 河海大学文天学院, 安徽 马鞍山 243031)

摘要 研究基于地基合成孔径雷达干涉技术的微变形监测系统(IBIS-L)的组成及关键技术, 并与 TCA2003 全站仪进行变形监测精度对比。大坝变形监测试验研究表明, 该系统能以优于毫米级精度实现大坝高空间分辨率以及连续的变形监测。

关键词 变形监测 地基合成孔径雷达干涉 步进频率连续波 微变形监测系统
中图分类号 P23 **文献标识码** A **文章编号** 1006-7647(2011)03-0084-04

Ground-based synthetic aperture radar interferometry and its application to deformation monitoring//HUANG Qi-huan^{1, 2, 3}, ZHANG Li-xiang¹ (1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory for land Environment and Disaster Monitoring of SBSM, Xuzhou 221116, China; 3. Wentian College, Hohai University, Ma'anshan 243031, China)

Abstract : The components and key techniques of the IBIS-L system were studied by means of the ground-based synthetic aperture radar interferometry (GBInSAR). The deformation accuracy of the GBInSAR-based IBIS-L system was compared with that of the total station TCA2003. The test results of dam deformation monitoring indicate that : the IBIS-L system can be employed to monitor dam deformation with both high spatial and temporal resolutions with accuracy better than one millimeter.

Key words : deformation monitoring ; ground-based synthetic aperture radar interferometry (GBInSAR); stepped-frequency continuous wave (SF-CW); IBIS-L

变形观测方法可分为地面测量、空间测量、摄影测量和地面三维激光扫描、专门测量 4 类^[1]。地面测量的方法精度高、应用灵活, 适用于各种变形体和监测环境, 但野外工作量大; 空间测量技术可提供大范围的变形信息, 但受观测环境影响大, 如在山区峡谷, GPS 卫星的几何强度差, 定位精度低, 有些地方则多路径影响大, 定位结果不可靠; 与前 2 种方法相比摄影测量外业工作量少, 可以提供变形体表面上任意点的变形, 但精度较低; 地面三维激光扫描技术遥测的距离有限(小于 1 km), 变形监测固有误差达数毫米, 且随着遥测距离的增大精度急剧降低; 专门测量手段相对精度较高, 但仅能提供局部的变形信息。

合成孔径雷达干涉(synthetic aperture radar interferometry, InSAR)技术可全天时、全天候、高精度地进行大面积地表变形监测, 是变形监测的前沿技

术和研究热点。但其工程化应用中还存在以下问题^[2-4] : ①时空失相干降低了干涉图的质量, 影响变形监测的可靠性和可行性; ②受可获取影像数量和空间分辨率的限制, 变形监测的时空分辨率难以满足实际工程需要, 特别是难以实现单个建(构) 筑物的变形监测。地基合成孔径雷达干涉(ground based InSAR, GBInSAR)技术基于微波探测主动成像方式获取监测区域二维影像, 通过合成孔径技术和步进频率技术实现雷达影像方位向和距离向的高空间分辨率, 克服了星载 SAR 影像受时空失相干严重和时空分辨率低的缺点, 通过干涉技术可实现优于毫米级微变形监测。在国外, GBInSAR 技术已经广泛用于滑坡^[5-8]、冰川^[9]和大坝^[10]变形监测, 而国内关于 GBInSAR 技术及其应用的文献报道非常少。因此笔者拟对 GBInSAR 的关键技术、基于 GBInSAR 技术的 IBIS-L 系统的变形监测精度及其在大坝变形监测中

基金项目 国家自然科学基金(40701103); 中央高校基本科研业务费专项资金(2009B11214); 国土环境与灾害监测国家测绘局重点实验室开放基金(LEDM2009C09); 高等学校优秀青年人才基金(2011SQRL170)

的应用试验情况进行介绍。

1 GBInSAR 关键技术及 IBIS-L 系统介绍

采用 GBInSAR 技术能精确测定被测物表面沿雷达视线向(LOS)的微量变形信息,其基本原理是:通过合成孔径雷达技术获取监测区域的二维影像,利用 SF-CW 技术提高雷达的距离向分辨率,通过比较影像中目标点的电磁波相位信息,采用干涉技术求取监测区域的变形量。

1.1 合成孔径雷达技术

合成孔径雷达技术使雷达突破了物理天线宽度的限制,大幅度提高了方位向的分辨率。在实际应用中,一般合成孔径雷达被安装在一个滑杆上,通过滑杆的移动使合成天线的波宽与观测点到目标的距离成反比,合成孔径雷达的方位向分辨率 $\Delta\theta$ 可以表示为

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{2L} \tag{1}$$

式中 λ 为雷达发射波长; L 为雷达发射点相对于监测目标的相对移动距离。

如果滑轨相对于目标的移动距离为 2 m,则该系统在距离向的分辨率可以达到 4.5 m。

1.2 SF-CW 技术

对于脉冲雷达,距离向分辨率 Δr 与脉冲延续时间 τ 有如下关系:

$$\Delta r = \frac{c\tau}{2} \tag{2}$$

式中 c 为真空中的光速。

由于 τ 与带宽 B 满足 $\tau B = 1$,距离向分辨率还可表示为

$$\Delta r = \frac{c}{2B} \tag{3}$$

从式(2)和式(3)可以看出,要提高距离向分辨率,可以缩短脉冲发射时间或者提高信号带宽,要发射高频率脉冲波就必须以牺牲雷达距离向分辨率和作用距离为代价,距离向分辨率降低使雷达对监测目标区分能力下降,作用距离减小就不能有效地进行大面积变形监测。

不同于脉冲雷达在极短的 τ 内发射大带宽的脉冲信号,步进频率雷达是通过多脉冲相参合成处理来实现高距离分辨率。其基本工作过程为:雷达序贯发射一组窄带宽脉冲(设共有 N 个脉冲),其中每个脉冲的载频是均匀步进的,步进量为 Δf (一般取 $\Delta f = 1/\tau$),其带宽为

$$B = (N - 1)\Delta f \tag{4}$$

对这串脉冲的回波信号用与其载频相应的本振频率进行混频,再对混频后的 N 个脉冲回波数据进

行脉冲相参合成处理,这样合成所得的脉冲宽度可达 τ/N ,即距离向分辨率是单个脉冲测量时的 N 倍^[1]。

1.3 干涉技术

干涉技术通过对比不同时刻雷达的反射信号,能获取高精度的被测物体变形信息。设雷达波长为 λ ,目标 2 次成像的相位差为 $\Delta\phi$,则雷达视线向变形 d_r 可表示为

$$d_r = -\frac{\lambda}{4\pi}\Delta\phi \tag{5}$$

图 1 为意大利 IDS 公司基于 GBInSAR 技术研制的微量变形测量系统(IBIS-L),该系统由传感器模块、定位模块、PC 控制终端和供电模块组成。传感器模块负责产生、发射和接收微波信号,可方便安装在定位模块上,用 USB 接口连接 PC 数据处理终端,通过传感器在定位模块上的滑动产生合成孔径效果,使 IBIS-L 系统可以获取监测区的二维影像。定位模块由 1 个 2.5 m 长的铝制滑轨构成,利用该滑轨以及安装在一侧的步进马达装置推动传感器的滑动。PC 控制终端拥有管理软件,提供数据采集的参数控制、测量过程管理和数据处理结果实时可视化功能。供电模块利用电池组或外接电源为系统供电。



供电模块 PC 控制终端 传感器模块 定位模块

图 1 IBIS-L 系统组成

2 BIS-L 系统变形监测精度试验

试验采用 IBIS-L 系统和 Leica TCA2003 电子全站仪,将 IBIS-L 系统靶标与电子全站仪靶标同时和量测精度为 0.001 mm 的千分表相连,利用千分表控制靶标的微小移动,图 2、图 3 分别展示了靶标向监测设备调节 3 次(1 mm/次)、2 次(0.5 mm/次)和 5 次(0.1 mm/次)并回调至原位置时 IBIS-L 系统和全站仪捕捉到的位移变化情况。

从测量结果可以看出,IBIS-L 系统的监测结果和千分表设置的位移完全一致,而全站仪每次测量值有微小的跳跃,IBIS-L 系统和 Leica TCA2003 电子全站仪都能够监测出大于 0.5 mm 的位移,当位移小于 0.5 mm 时,全站仪的测量误差和微小位移混合在一起难以区分,IBIS-L 系统能监测出 0.1 mm 的目标位移,测量精度高于 Leica TCA2003 电子全站仪。

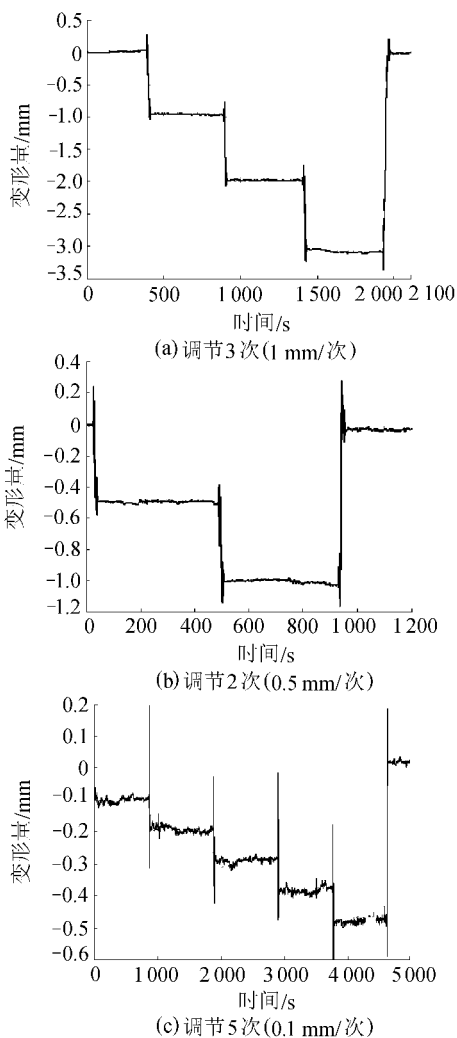


图2 IBIS-L系统监测结果

3 IBIS-L 系统在大坝变形监测中应用

用 IBIS-L 系统对紫坪铺大坝进行变形监测试验,最大观测距离为 4000 m,在 1000m 处监测分辨率为 $0.5\text{ m} \times 4.5\text{ m}$,该系统功耗为 100 W,质量为 130 kg。紫坪铺大坝为混凝土面板堆石坝,坝高为 156 m,坝顶高程为 884 m,正常蓄水位为 887 m,水库总库容为 11.12 亿 m^3 。试验中 IBIS-L 系统架设于大坝正下游距离坝顶 800 m 处,和大坝底部基本处在同一个水平面上,设备和大坝之间无遮挡物,设备位置稳定,雷达信号的发射能覆盖整个大坝,并尽量保证较小的入射角。整个大坝连续采集 1 次完整的数据约需 5 min,IBIS-L 系统监控软件负责数据的采集、管理、显示和处理,试验从 2008 年 7 月 31 日 21 时延续到 8 月 1 日 12 时,共计 15 h。

图 4 为雷达信号的反射强度图,从图 4 中可以看出,IBIS-L 系统能准确记录整个监测区域内反射体的反射情况,坝体、基岩、厂房、江岸的轮廓非常明显,图中大坝的楼梯和马道清晰可见,坝体各点的信噪比大部分在 15 dB 之上。

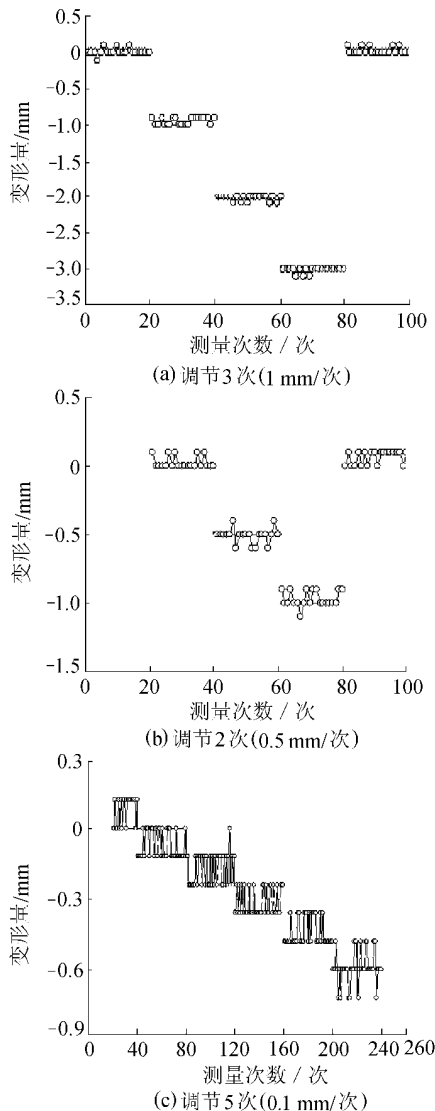


图3 全站仪监测结果

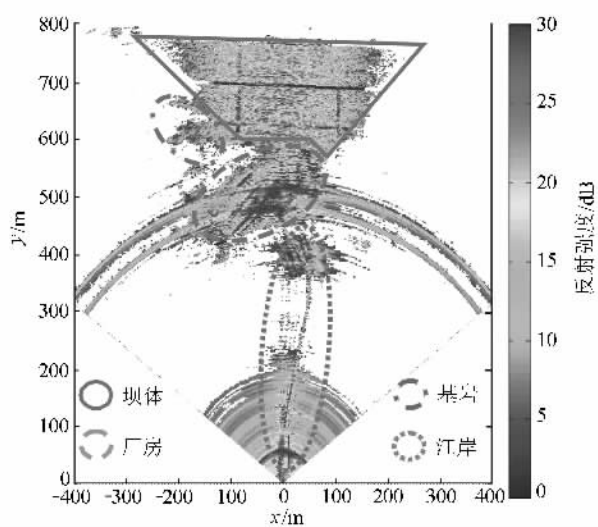


图4 雷达信号的反射强度

选择位于大坝下游右岸的基岩点 GCP 为变形参考基准点,假定该点的变形量为零,图 5 为获取的大坝区域沿雷达视线向变形的伪彩色图以及 $P1 \sim$

P5 点 15 h 的连续变形过程曲线 ,从图 5 中可以看出整个大坝在监测期间没有发生明显变形 ,各点的变形均小于 1 mm ,且这种微小变形在整个观测时间内变化较为一致 ,可以认为是大气延迟以及气温对观测结果的影响。

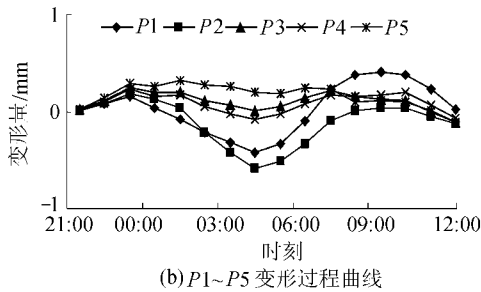
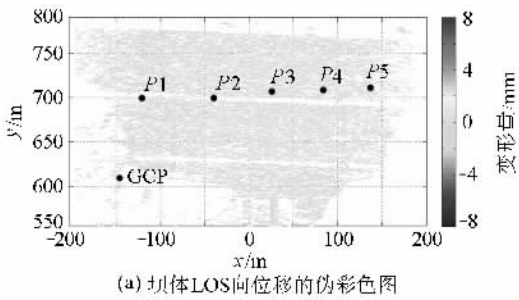


图 5 坝体雷达视线向位移和 P1 ~ P5 变形过程曲线

4 结 论

地基合成孔径雷达干涉技术结合合成孔径、步进频率连续波和干涉技术 ,采用微波探测主动成像方式获取被监测区域二维影像 ,可以实现大坝、滑坡、矿山以及大型构筑物高空间分辨率连续的变形信息 ,是一种极具潜力的变形监测新技术。通过 IBIS-L 系统对千分表控制的靶标监测试验结果表明 ,该系统能监测出 0.1 mm 的目标位移。对紫坪铺大坝连续 15 h 的监测结果表明 ,地基合成孔径雷达干涉技术用于大坝安全监测的精度优于毫米级。

与全站仪、GPS、引伸仪、应变计等常规监测系统相比 ,地基合成孔径雷达干涉技术的优点主要有 :
①不需要在被测形体上安装传感器或反射设备 ;
②提供整个被测区域时空连续的变形监测图 ;③可实现全天时、全天候的实时变形监测 ;④通过无线控制可实现无人值守的连续变形监测。

目前 ,地基合成孔径雷达干涉技术设备费用较高 ,实际工程应用还有待进一步推广。另外 ,地基合成孔径雷达干涉技术获取的是雷达视线向的变形信息 ,如何获得三维的变形信息是需要进一步研究的课题。

致谢 :感谢北京博泰克机械有限公司为本研究提供微变形监测系统试验设备及相关技术支持。

参考文献 :

[1] 陈永奇 ,吴子安 ,吴中如 . 变形监测分析与预报 [M]. 北京 :中国测绘出版社 ,1998 .
[2] FERRETTI A ,CLAUDIO P ,ROCCA A . Permanent scatters in SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing 2001 39(1) :8-20 .
[3] COLESANTI C ,FERRETTI A ,PRATI C ,et al . Monitoring landslides and tectonic motions with the permanent scatterers technique [J]. Engineering Geology 2003 68 3-14 .
[4] 黄其欢 ,何秀凤 . 附加约束条件短基线 DInSAR 法及应用 [J]. 中国矿业大学学报 :自然科学版 ,2009 ,38(3) :450-454 .
[5] STROZZI T ,FARINA P ,CORSINI A . Survey and monitoring of landslide displacements by means of L-band satellite SAR interferometry [J]. Landslides 2005 2(3) :193-201 .
[6] NOFERINI L ,PIERACCINI M ,MECATTI D ,et al . Using GB-SAR technique to monitor slow moving landslide [J]. Engineering Geology 2007 95 88-98 .
[7] LUZI G ,NOFERINI L ,MECATTI D ,et al . Using a ground-based SAR interferometer and a terrestrial laser scanner to monitor a snow-covered slope :results from an experimental data collection in Tyrol (Austria) [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 2009 47(2) :382-393 .
[8] HERRERA G ,FERNÁNDEZ-MERODO J A ,MULAS J ,et al . A landslide forecasting model using ground based SAR data : the portalet case study [J]. Engineering Geology 2009 ,105(3/4) :220-230 .
[9] LUZI G ,PIERACCINI M ,MECATTI D ,et al . Monitoring of an alpine glacier by means of ground based SAR interferometry [J]. Geoscience and Remote Sensing Letters ,IEEE ,2007 ,4(3) :495-499 .
[10] MARIO A ,GIULIA B ,ALBERTO G . Measurement of dam deformations by terrestrial interferometric techniques [C] // CHEN Jun ,JIANG Jie ,ALAIN B . The XXI Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing . Beijing :ISPRS 2008 :133-139 .
[11] 刘峥 ,张守宏 . 步进频率雷达在精确制导武器中的应用 [J]. 制导与引信 2002 23(3) :9-13 .

(收稿日期 2010-08-16 编辑 :方宇彤)

