

地基干涉雷达 IBIS-L 堰塞湖边坡监测影像质量分析

刘艳, 董燕, 柳志云 (昆明理工大学国土资源工程学院, 云南昆明 650093)

摘要 2014年8月3日16时30分, 云南省鲁甸县发生6.5级地震, 地震造成两岸山体塌方形成堰塞湖。在堰塞体右岸边坡有大量岩体崩塌, 坡度为 $70^{\circ} \sim 90^{\circ}$, 部分地方有倒悬体, 常规手段难以布设仪器监测。故采用先进的 GB-SAR 系统 IBIS-L 对右岸裸露新岩体进行变形监测, 通过此方式获取的 GB-SAR 影像质量直接关系到干涉图的生成、相位滤波和相位解缠。该研究根据 IBIS-L 采集的云南鲁甸红石岩堰塞湖边坡监测数据, 通过 Kaiser-Bessel 窗进行加窗处理后, 选用估计热信噪比(TSNR)、时间和空间相关系数、相位稳定性等能够直接表征观测相位的稳定程度特征量, 间接分析了 GB-SAR 影像采集的质量好坏, 为进行连续高质量的影像选择提供依据。

关键词 边坡监测; GB-SAR; IBIS-L; 热信噪比(TSNR); 影像质量分析

中图分类号 S126 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2015)36-379-03

Ground-based Radar IBIS-L Image Quality Analysis of Barrier Lake Slope Monitoring

LIU Yan, DONG Yan, LIU Zhi-yun (Faculty of Land Resouce Engineering of Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093)

Abstract At 4:30 p. m. on August 3, 2014, the 6.5 earthquake occurred in Ludian County of Yunnan Province. The earthquake caused landslides on both sides and resulting a Barrier lake, a large number of rock collapsed in the right bank slope of damming body. The slope is between 70-90 degrees with overhanging structure in some places, so conventional method is difficult to lay the instrument monitoring. Therefore, using advanced GB-SAR system IBIS-L to do deformation monitoring for the exposed rock on the right bank. GB-SAR image quality obtained in this way is directly related to the generation of the interferograms, phase filtering and phase unwrapping. In this paper, the barrier lake slope monitoring data acquisition based on IBIS-L in Hongshiyuan Ludian Yunnan Province. Using the Kaiser-Bessel window while focusing the range profile, the stability of the GB-SAR image acquisition is analyzed by the estimation of the thermal signal to noise ratio (TSNR), temporal and spatial coherence, phase stability, provided the basis for continuous high-quality image selection.

Key words Slope monitoring; GB-SAR; IBIS-L; Thermal signal to noise ratio(TSNR); Image quality analysis

近几年来,我国地质灾害频发,其中地震灾害最为严重。地震之后极易造成山体滑坡引发次生灾害,必须对边坡进行监测,以便及时预警。目前边坡监测方法主要有地面测量、空间测量、摄影测量和地面三维激光扫描4种,但这些方法存在以下不足:地面测量野外工作量大;空间测量易受外界环境限制;摄影测量精度较低,无法满足变形监测要求;激光扫描技术遥测距离短^[1]。相较于以上传统的观测方法,GB-InSAR 技术以其测量范围大、精度高、操作自动化等优点开辟了一条变形监测的新道路^[2]。SAR 影像是通过获得相干电磁波的后向散射来成像,相干成像方式固有的斑点噪声会导致图像的分辨率和图像的结构信息量降低。干涉数据中不仅包含了通常的幅度信息,还包含了相干性信息、相位差信息等,而相干性不仅用于衡量干涉信号的质量,还反映了地物其他方面丰富的信息。最近的一些研究表明,干涉数据中的多方面信息应该充分应用于 SAR 图像分析和解译中^[3]。笔者基于影像质量分析管理,对云南省鲁甸县6.5级地震形成的红石岩堰塞湖边坡地基干涉雷达 IBIS-L 影像质量进行分析,为相应的整体变形监测提供参考。

1 测区简介

2014年8月3日16时30分,云南省鲁甸县发生6.5级地震。在地震中心鲁甸县龙头山镇南偏东8.2 km 牛栏江干流上因两岸山体大规模塌方形成堰塞湖。红石岩堰塞体右岸边坡由岩体崩塌形成,部分地方有倒悬体,受天气影响,右岸时常有碎石块和碎石土脱落,常规仪器如全站仪和 GNSS

无法在特定区域内设置测站。地基合成孔径雷达(Ground-based Synthetic Aperture Radar, GB-SAR)干涉测量技术是近10多年间发展起来的地面主动微波遥感形变探测技术,能够对目标物进行远距离、大范围的全天候监测,在时域和空域均具有较高的采样率,获取高精度的测量结果^[4]。IBIS-L 是一种新型的 GB-SAR 干涉测量系统,是由意大利弗洛伦萨大学电子信息工程系与 IDS 公司联合开发,由雷达主机、电脑控制单元、供电箱和线性滑轨等组成,主要应用于滑坡、大坝、高边坡等面状区域的二维变形监测,形变探测精度能够达到亚毫米级^[5]。

2 影像质量分析原理

合成孔径雷达具有全天时、全天候的优良特性,它是目前遥感领域中最具有发展潜力的技术之一。除了位移会影响相位变化外,大气效应和噪声也会对相位产生一定影响^[6],尤其是大气水汽含量在时间和空间上的变化对影像观测相位的影响非常剧烈^[7]。而经环境改正后数据会存在一定误差,因此,在实际工作中需要选取高质量连续监测影像序列,通过干涉处理提取长时间跨度影像之间的形变。由于成像方式不同,传统的光学影像的质量评价方法无法直接用于 SAR 图像质量评价。SAR 图像是以地面目标辐射的后向散射能量作为二维空间函数构成的,因此, SAR 图像质量的性能指标可以分为2类:一类是描述图像空间性能的指标;另一类是描述辐射性能的指标。空间性能指标主要有空间分辨率、图像精度、几何保真度等。辐射性能指标主要有峰值旁瓣比、积分旁瓣比、模糊度、辐射分辨率等。热信噪比(TSNR)、时间和空间相关系数、相位稳定性等能够直接表征观测相位的稳定程度,间接反映了 GB-SAR 影像采集的质量

好坏。其中空间相关系数表明了气象环境对成像的去相关作用,数值越高气象影像越弱影像质量越好,反之亦然。气象变化剧烈的,各点干涉相位的一致性降低,波动变化相应地也会变剧烈,基于这一特点在热信噪比图中按照数值高低选择多个点目标,分析其邻域干涉相位的变化规律,利用多点邻域干涉相位筛选部分高质量的连续影像序列。

2.1 GB-SAR 图像质量的性能指标 空间分辨率定义为点目标冲激响应半功率点处的宽度,包括距离向的空间分辨率和方位向的空间分辨率。而峰值旁瓣比是指主瓣峰值强度与旁瓣区域中峰值强度之比,在实际计算中,以当前像素幅度最大值点为起点向某一方向搜索,当像元灰度值从第一副瓣位置上升到旁瓣区域的最大值时,就可以得出旁瓣峰值强度,从而计算出当前像素的峰值旁瓣比。峰值旁瓣比的大小决定了强目标掩盖弱目标的能力,为了减小峰值旁瓣比,在成像处理中一般采用加权处理。积分旁瓣比是指旁瓣能量与主瓣能量的比值,它是表征图像质量的重要指标之一,积分旁瓣比越小则图像质量越高^[8]。计算机只能处理有限长度的信号,原始信号要以采样时间截断,即加窗处理。实际的信号处理过程中,我们用的矩形窗,但矩形窗在边缘处将信号突然截断,窗外时域信息全部消失,导致在频域增加了频率分量的现象,即频谱泄漏。为了避免频谱泄漏,必须考虑如何减少加窗时造成的泄漏误差,主要措施是使用合理的加窗函数,使信号截断的锐角钝化,从而使频谱的扩散减到最少。

2.2 相位稳定程度评判指标 估计热信噪比(TSNR)、时间和空间相关系数、相位稳定性等能够直接表征观测相位的稳定程度,间接反映了 GB-SAR 影像采集的质量好坏^[9]。其中空间相关系数表明了气象环境对成像的去相关作用,数值越高气象影像越弱影像质量越好,反之亦然。干涉空间相关系数是衡量干涉相位噪声程度、评价干涉图质量的量化指标。假设 GB-SAR 获取的单视复影像的大小为 $N \times M$,连续监测模式下获取 P 景影像图,第 k 景影像和第 l 景影像的干涉图可以表示为:

$$I_{ij}^{kl} = E_{ij}^k \cdot \text{conj}(E_{ij}^l) \quad (1)$$

式中, $i = 1, 2, 3, \dots, N; j = 1, 2, 3, \dots, M$,以第 k 景影像为主影像。

相关系数计算公式为:

$$CS_{ij}^{kl} = \frac{|\sum_{ij \in A} E_{ij}^k \cdot \text{conj}(E_{ij}^l)|}{\sqrt{\sum_{ij \in A} |E_{ij}^k|^2 \sum_{ij \in A} |E_{ij}^l|^2}} \quad (2)$$

式中, A 为以当前像元 (i, j) 为中心的窗口大小。

那么 P 景影像的空间相关系数为:

$$CS_{ij} = \frac{1}{P-1} \sum_{k=1}^{P-1} CS_{ij}^{k(k+1)} \quad (3)$$

相位稳定性则直接计算原始观测相位波动的剧烈程度。表征了某个像元在局部空间范围内变化的稳定程度,同样需要设定一定的窗口大小进行计算。定义第 k 景影像像元 (i, j) 辐角为 $\varphi_{ij}^k = \angle E_{ij}^k$,以 (i, j) 为中心的窗口 A 包含 n 个像元,窗口平均相位为:

$$\bar{\varphi}_{ij}^k = \frac{1}{n} \sum_{ij \in A} \varphi_{ij}^k \quad (4)$$

则窗口相位方差为:

$$\sigma_{ij}^k = \sqrt{\frac{\sum_{ij \in A} (\varphi_{ij}^k - \bar{\varphi}_{ij}^k)^2}{n}} \quad (5)$$

相位稳定性是窗口相位方差的倒数,即:

$$PS_{ij}^k = \frac{1}{\sigma_{ij}^k} \quad (6)$$

P 景影像的相位稳定性是各景窗口相位稳定性的算术平均值,计算公式为:

$$PS_{ij} = \frac{1}{P} \sum_{k=1}^P PS_{ij}^k \quad (7)$$

3 IBIS-L 影像质量分析

3.1 加窗处理 IBIS-L 提供 2 种加窗函数,一种是 Hanning 窗,适用于非周期性的连续信号,可以看作是 3 个矩形时间窗的频谱之和,或者说是 3 个 $\text{sinc}(t)$ 型函数之和,而括号中的 2 项相对于第一个谱窗向左、右各移动了 π/T ,从而使旁瓣互相抵消,消除高频干扰和漏能,但 Hanning 窗主瓣加宽,相当于分析带宽加宽,频率分辨率下降;另一种是 Kaiser-Bessel 窗,它定义了一组可调的由零阶 Bessel 函数构成的窗函数,通过调整参数 β 可以在主瓣宽度和旁瓣衰减之间自由选择它们的比重,区分频率接近且幅度几乎相等的信号效果较好。

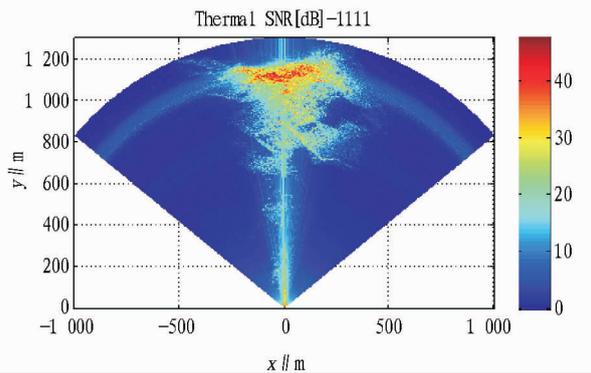


图1 未加窗处理的热性噪比图像

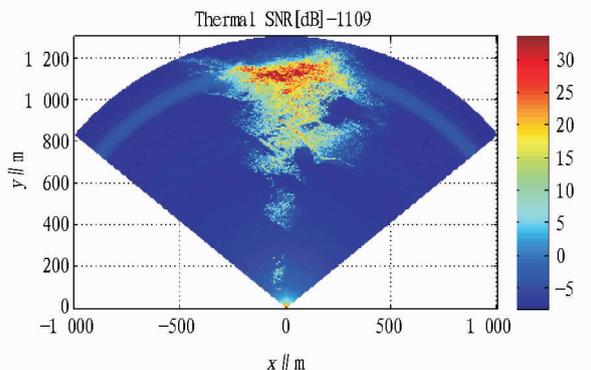


图2 加窗处理后的热性噪比图像

该研究采用 IBIS-L 监测区域为鲁甸红石岩堰塞湖右岸边坡。数据采集参数如下:预设探测距离为 1 300 m,实际探测距离为 1 299.8 m;GB-SAR 一景影像采集时间为 350 s,传

传感器滞留时间为 6 s, 距离向分辨率为 0.506 2 m; 方位向分辨率为 4.40 mrad (0.252°)。距离域加窗函数选定 Kaiser 窗, 参数 6.0, 方位向加窗函数同样选定 Kaiser 窗, 参数设置为 4.0。图 1 为未加窗处理的 GB-SAR 聚焦成像, 图 2 为加窗处理后图像。

对比分析图 1 和图 2 可知, 未加窗处理影像在距离向和方位向存在杂线, 这是由于雷达视场中部分散射体回波信号

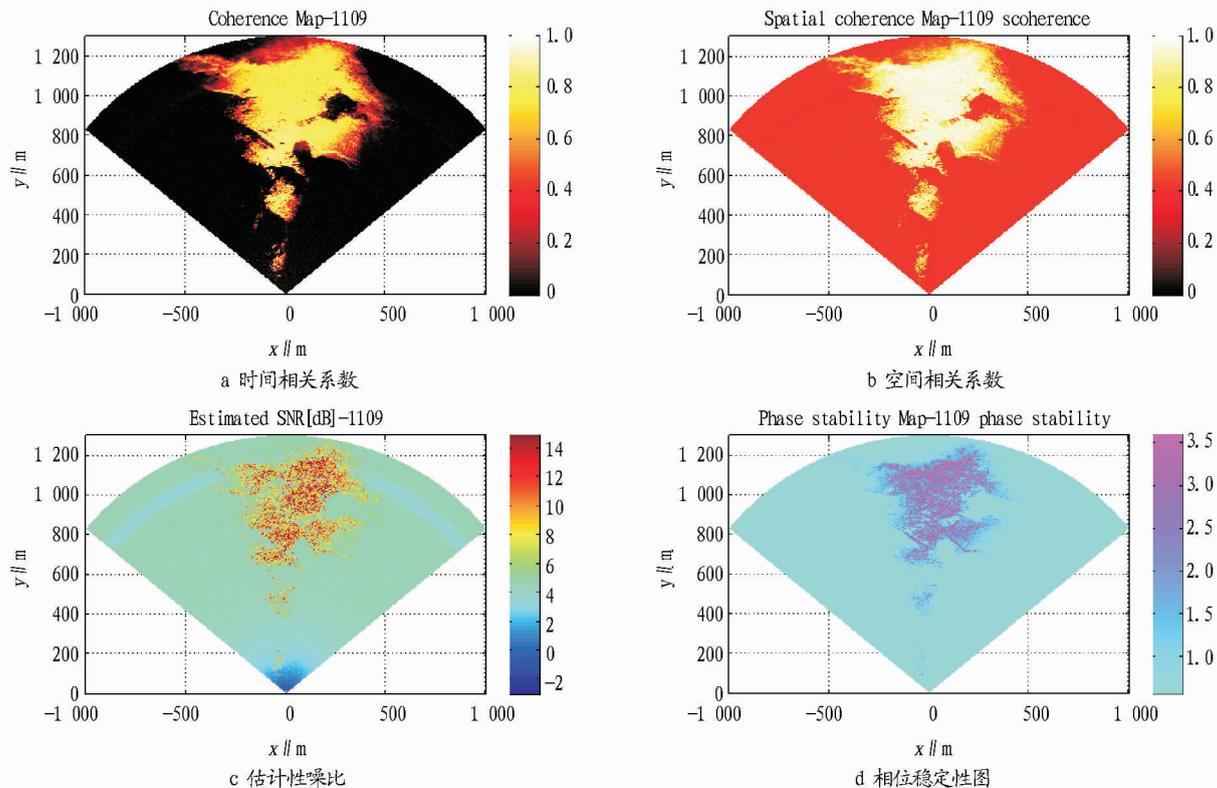


图 3 GB-SAR 影像的时间空间相关系数、估计性噪比和相位稳定性

从图 3 可以看出, 在监测时段内, 主要目标区域能够保持较高的时间和空间相干性, 监测区域相干系数均在 0.7 以上 (见图 3a 和图 3b), 性噪比均在 10 dB 以上 (见图 3c); 相位稳定性均在 2.5 以上 (见图 3d)。根据以上分析, IBIS-L 系统能够准确获取鲁甸红石岩堰塞湖右岸边坡表面反射信息, 此次采集影像质量较好。若要分析右岸边坡在时间上的变形趋势, 可在此监测时段内选择多幅连续高质量 GB-SAR 影像, 进行长时间跨度的整体变形分析。

4 结论

在地震之后通常伴有降雨等气象变化, 而地基雷达传播信号易受大气影响, 利用地基雷达干涉测量技术进行变形监测时, 需对雷达信号进行环境改正。但目前还没有提出较成熟的环境改正方法, 选择高质量的 GB-SAR 影像进行干涉图生成, 相位滤波和相位解缠就成为一种比较便捷可行的方法。该研究对红石岩堰塞湖边坡监测影像进行加窗处理后, 分析它们的性噪比、空间相关系数和相位稳定性等相关参数, 间接对 GB-SAR 影像质量进行了分析判别, 有助于进行高质量连续观测时段影像选取, 得到更为可靠的变形监测

较强, 形成旁瓣效应, 对附近的弱散射目标会产生破坏性影响; 而加窗处理后, 消弱了旁瓣效应, 杂线变少了。

3.2 相位稳定程度分析 在对监测数据进行干涉相位处理分析之前, 首先需对 IBIS-L 系统获取的数据进行质量分析。该研究以首影像为参考影像分析了 4 天内 GB-SAR 影像的估计性噪比、时间空间相关系数和相位稳定性, 结果见图 3。

结果。

参考文献

- [1] 邱志伟, 岳建平, 汪学琴. 地基雷达系统 IBIS-L 在大坝变形监测中的应用[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(10): 104-107
- [2] 岳建平, 方露, 黎妮. 变形监测理论与技术研究进展[J]. 测绘通报, 2007(7): 1-4.
- [3] 廖明生, 林晖. 雷达干涉测量: 原理与信号处理基础[M]. 北京: 测绘出版社, 2003.
- [4] 黄其欢, 张理想. 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[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(3): 85-87.
- [5] JUNGNER A. Ground-based synthetic aperture radar data processing for deformation measurement [D]. Sweden: Royal Institute of Technology, 2009.
- [6] RÖDELSPERGER S. Real-time processing of ground based synthetic aperture radar (GB-SAR) measurements [D]. München: Technische Universität Darmstadt, 2011.
- [7] 徐亚明, 周校, 王鹏, 等. 地基雷达干涉测量的环境改进方法研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2013, 3(3): 41-43.
- [8] 黄艳, 张永利, 刘志铭. 一种基于点目标的雷达影像质量评价方法[J]. 测绘工程, 2012, 21(1): 30-33.
- [9] TARCHI D, CASAGLI N, MORETTI S, et al. Monitoring landslide displacements by using ground-based synthetic aperture radar interferometry: Application to the Ruinon landslide in the Italian Alps [J]. Journal of geophysical research, 2003, 108: 2387.