

# Research on Radar Deformation Monitoring Technology of High and Steep Slope of Hydropower Station

Yougen Li

Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 611730, China

## Abstract

The slope of a hydroelectric power station is an important component of the hydroelectric water conservancy system. Effectively grasping its deformation situation is an important link in ensuring the safe operation of slopes and hydroelectric facilities. At present, deformation results are mainly obtained through methods such as deploying sensors and GNSS at key points. Existing methods have problems such as complex implementation, low efficiency, high cost, scattered data acquisition, and discontinuous point monitoring. In addition, due to the shortcomings of poor representativeness of single point measurement data and unknown monitoring range, it is not possible to grasp the overall situation of slope deformation in real time, which is not conducive to timely discovering hidden dangers and taking corresponding safety measures. This time, through the analysis of high-precision radar deformation monitoring technology for the foundation of high and steep slopes of hydropower stations, and further combining with on-site measurement to correct the warning standards, a long-term prediction model for slope deformation is established to guide the monitoring and safety control of engineering construction and operation periods.

## Keywords

hydropower station slope; ground-based radar; deformation monitoring; atmospheric phase correction

## 水电站高陡边坡地基雷达形变高精度监测技术研究

李有根

中国水利水电第七工程局有限公司, 中国·四川成都 611730

## 摘要

水电站边坡是水电水利系统中的重要组成部分,有效掌握其变形情况,是保障边坡和水电设施安全运营的重要环节。目前,主要通过关键点位布设传感器、GNSS等方法获取变形结果,现有手段存在实施复杂、效率低、成本高、数据获取分散、点式监测不连续等问题。此外,依据单点测量数据代表性差、监测范围不可知等弊端,不能实时掌握边坡变形的总体态势,不利于及时发现隐患并采取相应安全措施。本次通过对水电站高陡边坡地基雷达形变高精度监测技术分析,进一步结合现场实测修正预报标准,并建立边坡变形的长期预测模型,以指导工程施工期和运营期监测及工程安全控制。

## 关键词

水电站边坡; 地基雷达; 大气相位修正; 形变监测

## 1 引言

伴随着国家对水利水电工程的不断开发,水利水电工程在我们日常生活中起到的作用越来越突出。但由于水利水电工程的各种因素对边坡荷载产生的负重增加,给工程带来了潜在隐患。边坡滑坡灾害是典型的地质灾害,中国地形地貌条件复杂,极端气象事件频发,强震活动频繁以及各种工程对地质环境的破坏等因素加剧了边坡滑坡灾害的发生。对于边坡工程特别是大型复杂边坡,应及时有效地开展边坡工程的动态监测,对边坡可能存在的潜在危险因素进行监测且提出相应的安全措施,为国家的发展和人民的安全提供有效保

证。鉴于水电站边坡滑坡灾害的严峻形势及其带来的巨大损失,如何实现边坡形变的智能实时监测、边坡形变分析与风险评价、滑坡体信息的准确提取、滑坡灾害的预测与评估等是水利水电工程安全管理的核心内容。边坡滑坡灾害产生原因、诱发因素与发展机理复杂多变,以及边坡滑坡演化过程的极其不稳定等原因使得边坡滑坡灾害往往难以及时、准确地监测和预报,加之治理成本高。因此,对于边坡工程特别是大型复杂边坡,除了进行常规的工程地质调查、测绘、勘探、试验和稳定性评价外,应及时有效地开展边坡工程的动态监测,预测边坡失稳的可能性和滑坡的危险性,并提出相应的防灾减灾措施,对于确保国民经济发展与保障人民群众生命财产安全具有重大意义。鉴于水电站边坡滑坡灾害的严峻形势及其带来的巨大损失,如何实现边坡形变的智能实时监测、边坡形变分析与风险评价、滑坡体信息的准确提取、滑坡灾

【作者简介】李有根(1974-),男,中国江西抚州人,本科,高级工程师,从事水利水电工程安全监测与管理研究。

害的预测与评估等是水利水电工程安全管理的核心内容。

## 2 背景及国内外研究现状

雷达形变监测技术是最近应用广泛的一种主动式微波遥感新技术,其具有全天时、全天候等突出优势,可以在大范围区域内、高精度、精细化地监测目标变形。目前,国内外学者利用卫星雷达技术在边坡、大坝等的周期性变形等方面开展了相关研究,取得了一定应用成果。GB-InSAR 是一种基于合成孔径雷达原理的形变监测技术。系统平台放置于地面,对同一地物目标在空间上的相对位置变化进行重复或连续的观测称为形变测量。通过采集到的地基 SAR 影像数据获取观测区地物目标形变信息则为形变反演过程,一般使用地基差分干涉测量技术。对于不同工作体制的地基差分干涉雷达,其处理技术上会有一定的差别。

## 3 依托工程

天全锅浪跷水电站是四川省重点水电工程之一,也是大唐四川发电有限公司在雅最大的水电开发项目,位于四川省雅安市天全县紫石乡境内,距县城 37km,于 2013 年 10 月开工建设,系青衣江一级支流天全河梯级开发中的龙头水库,水库总库容 1.84 亿  $m^3$ ,水库正常蓄水位 1280m,大坝高 183m,是目前排名世界前十的面板堆石坝。

## 4 地基雷达形变监测技术流程

GB-InSAR 基本原理是通过零基线差分干涉测量技术获取距离向和方位向的二维图像。距离向通过步进频率连续波技术实现高分辨率,方位向利用天线在直线轨道匀速运动和孔径综合技术实现高分辨率。在 GB-InSAR 技术上,国内外很多学者提出了不同的形变处理算法,虽然处理流程上会有一些差别,但主要的处理技术相同,主要流程包括地基 SAR 影像获取、干涉处理、相位滤波、PS 点选择、大气相位校正、形变结果反演计算、地理编码等步骤。在地基 SAR 影像获取过程中,将具有零基线的数据集,通过一定的组合策略,经过干涉处理,获取干涉图。基于数据集相干性和幅度信息选择合适的 PS 点,对干涉图进行相位滤波和大气相位校正处理,即可以实现形变量的解算。

## 5 大气相位修正算法研究

以常见的线性滑轨地基 InSAR 系统为例,雷达传感器在线性滑轨运动形成直线合成孔径,通过带宽信号脉冲压缩技术获取观测区域的高分辨率二维图像。地基 InSAR 系统大多采用连续观测模式,对同一目标区域,在不同时间持续获取雷达重复图像,通过主图像  $\phi_M$  和辅图像  $\phi_S$  共轭相乘估算目标的形变量  $\Delta R$ ,其表达式:

$$\Delta R = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\varphi = \frac{\lambda}{4\pi} \times (\varphi_S - \varphi_M) \quad (1)$$

不同于重复轨道星载 InSAR 模式,地基 InSAR 系统采

用连续观测模式,空间基线为零,无需进行图像配准和地形相位  $\phi_{\text{topo}}$  去除,数据采集时间短。目标的形变速率  $v$  在相邻 SAR 图像获取时间间隔  $\Delta t$  内,一般能够满足  $|v| < \lambda/4\Delta t$ ,避免相位解缠处理。因此,在长时间序列持续观测中,考虑到大气延迟相位和观测噪声相位,假设有  $N$  幅地基 SAR 图像,可以生成  $N-1$  幅干涉图,则干涉图相位  $\Delta\phi_i$  为:

$$\Delta\phi_i = \Delta\phi_{\text{def}} + \Delta\phi_{\text{atm}} + \Delta\phi_{\text{noise}} \quad (2)$$

其中,  $\Delta\phi_i$  为两次测量的相位差;  $\Delta\phi_{\text{def}}$  为两次测量的形变相位;  $\Delta\phi_{\text{atm}}$  为大气延迟相位差;  $\Delta\phi_{\text{noise}}$  为观测噪声。根据振幅离差和相干性等参数设定阈值,选取稳定的参考点,依据参考点原始相位校正干涉图,则被测目标雷达视线向 (line of sight, LOS) 的累计形变量为:

$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \sum_{i=1}^{N-1} \Delta\varphi_i \quad (3)$$

针对大气校正过程,稳定的 PS 点选择是进行大气相位校正的必要前提。一般根据点的振幅离散和相位标准差的统计特性,在高信噪比的情况下,目标点的稳定性直接由振幅离差指数  $D_A$  表示,公式如下:

$$D_A = \frac{\delta_A}{m_A} \quad (4)$$

其中,  $\delta_A$  为振幅标准偏差;  $m_A$  为振幅平均值。振幅离差指数越小,振幅信息越稳定。然而场景中存在水域时,往往会出现误选等情况,可以通过估算相干系数来估计每个像素点的干涉相位质量,滤除水域的误选点,公式如下:

$$\gamma = |\gamma| \cdot \exp\{j\phi\} = \frac{E\{S_1 \cdot S_2^*\}}{\sqrt{E\{|S_1|^2\} \cdot E\{|S_2|^2\}}} \quad (5)$$

其中,  $S_1$  和  $S_2$  为与形成干涉图的采集的相同像素相对应的复值,“|”为绝对值运算符,“E{”为期望值。

GB-InSAR 目标点的干涉相位可以表示为:

$$\phi = \phi_{\text{def}} + \phi_{\text{atm}} + \phi_{\text{noise}} + 2k\pi \quad (6)$$

其中,  $k$  为整数表示模糊度;  $\phi_{\text{def}}$  为变形相位分量;  $\phi_{\text{atm}}$  为大气相位分量;  $\phi_{\text{noise}}$  为误差相位分量。由于观测区不存在显著变形且两次影像采集时间间隔较短,为了避免解缠处理引入误差,干涉相位不做解缠处理。则为了获取高精度的形变相位  $\phi_{\text{def}}$ ,需要有效的大气相位  $\phi_{\text{atm}}$  校正方法。

通过沿路径  $L$  积分得到雷达传感器与目标点之间大气相位分量可表示为:

$$\phi(t)_{\text{atm}} = \frac{4\pi}{\lambda} \int_L n(\gamma, t) dL \quad (7)$$

其中,  $n$  为折射率的变化,它随时间  $t$  和空间  $\gamma$  而变化;  $L$  为信号的传输路径;  $\lambda$  为波长。一般情况下,假设大气在空间上是均匀的,  $n$  在空间  $\gamma$  上不发生变化,在时间  $t$  上随机变化,因此可以将大气相位分量表示为随距离变化的公式:

$$\phi(t)_{am} = \frac{4\pi}{\lambda}(\beta_0 + \beta_1 \cdot \gamma) \quad (8)$$

其中,  $\beta_0$  为常数项;  $\beta_1$  为与距离相关的线性系数;  $\gamma$  为传感器与目标点之间的距离。另外, 考虑到地形变化对大气相位的影响, 兼顾距离和地形的大气相位可以表示为:

$$\phi(t)_{am} = \frac{4\pi}{\lambda}(\beta_0 + \beta_1 \cdot \gamma + \beta_2 \cdot \gamma h) \quad (9)$$

其中,  $\beta_0$  为常数项;  $\beta_1$  为与距离相关的线性系数;  $\beta_2$  为地形和距离相关的系数;  $\gamma$  为传感器与目标点之间的距离;  $h$  为目标点的高程值。可以建立大气相位与距离和地形的方程组:

$$\phi = X\beta + \varepsilon \quad (10)$$

$$\phi = \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \phi_n \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$X = \frac{4\pi}{\lambda} \begin{bmatrix} 1 & \gamma_1 & \gamma_1 h_1 \\ 1 & \gamma_2 & \gamma_2 h_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \gamma_n & \gamma_n h_n \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中,  $\phi$  为  $n$  个 PS 点的干涉相位构成的  $n \times 1$  维向量;  $X$  为常数 1 和  $n$  个 PS 点的距离与高程值构成的  $n \times 3$  维向量;  $\beta$  为待估计的  $3 \times 1$  维向量;  $\varepsilon$  为相位误差构成的  $n \times 1$  维向量。采用最小二乘对  $\beta$  进行求解:

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} \cdot X^T \phi \quad (15)$$

则大气相位的估计值为:

$$\phi_{am} = X\hat{\beta} \quad (16)$$

将干涉相位  $\phi$  减掉估计的大气相位  $\phi_{am}$  即为大气校正后相位。此外, 基于所有选取的 PS 点估算大气相位时, 可能存在一些不可靠 PS 点, 为了确保估算结果的准确性, 将大于二倍相位标准差 PS 点剔除, 重新迭代求解距离 - 高程函数模型参数校正大气相位。

稳定 PS 点的相位主要包含大气相位和噪声相位, 大气相位在空间上表现为非匀质特征, 但在较小的距离范围内可以视为匀质特征, 噪声相位在空间上表现为随机特征, 不具

备空间相关性。在一定的空间范围内进行均值滤波, 则可以有效滤除噪声相位影响, 同时采用反距离加权插值算法估计整个观测场景内大气相位, 从而有效校正非线性大气相位。其中反距离权重插值算法是利用已知点与待插值点的距离来定义权重, 根据周边的已知点加权计算待插值点的相位值, 距离越近权重越大, 其公式为:

$$Z_{(x,y)} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{|d_i|^\mu}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{|d_i|^\mu}} \quad (17)$$

其中,  $Z_{(x,y)}$  为插值点结果;  $(x, y)$  为待插值点的空间坐标;  $Z_i$  为第  $i$  个已知点相位值;  $|d_i|$  为第  $i$  个已知点与待插值点的空间距离;  $\mu$  为权重的幂指数, 一般取 2。此外, 考虑到大气相位的空间相关性和计算效率, 只选取待插值点周边最近的 3 个已知点参加计算

对于大气校正步骤, 提出一种两阶段半经验模型校正线性和非线性大气相位。首先采用距离 - 高程的函数模型对距离和高程相关的线性大气相位进行校正, 并剔除大于二倍相位标准差的 PS 点, 重新迭代求解距离 - 高程函数模型参数; 然后计算序列图像形变, 设定阈值提取出稳定 PS 点, 采用反距离权重插值算法估计所有 PS 点的大气相位, 从而有效校正非线性大气相位。

## 6 结语

此次研究主要在锅浪跷水电站项目, 针对水电站区域重点及典型边坡, 采用地基雷达进行监测, 研究其大气相位修正算法两大方面进行研究, 研究成果在锅浪跷水电站中应用, 有效地提高了水电站高陡边坡工程监测效率, 节约物料成本、人工成本, 提高人员工作效率, 通过基于 SAR 技术的水电站高陡边坡形变监测与滑坡检测评估研究技术研究应用, 实现“面监测”代替传统的“点监测”, 较原有监测手段更加快速、准确。原技术方法需后方配置 5~7 名专业技术人员, 新技术方法降低至 1~2 名; 在复杂天气及外部环境下新技术较传统监测手段更具适应性, 可实现在各种环境条件下的全天候、全时段、24 小时连续监测, 数据实时处理, 结果直观, 有效避免了传统技术数据获取不连续、随目标区域扩大而不断投入设备和其他物料消耗。社会效益明显, 具有较高的推广价值和前景, 对类似的库区边坡监测具有指导意义。

## 参考文献

- [1] 朱庆辉. 地基雷达在大坝及滑坡监测中的应用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- [2] 王治华. 滑坡遥感调查、监测与评估[J]. 国土资源遥感, 2017, 71(1): 10-15.
- [3] 桑文刚. 基于 GPS 多天线技术的远程自动化高边坡监测系统[J]. 河海大学卫星及空间信息应用研究所, 2006, 26(1): 63-65.
- [4] 李军. 基于毫米波多基线 InSAR 的雷达测绘技术[J]. 北京无线电测量研究所, 2019, 8(6): 820-830.
- [5] 李翔宇. 基于地基雷达干涉测量技术的大坝边坡形变监测与风险评估[D]. 北京: 华北水利水电大学, 2020.