

Application of InSAR Radar Technology in Slope Monitoring of Water Conservancy and Hydropower Projects

Jun Deng

Testing and Testing Branch, Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 611730, China

Abstract

In recent years, with the continuous development and progress of social modernization, water conservancy and hydropower projects play a more and more prominent role in our daily life, and the construction of various large-scale water conservancy projects continues to increase. However, due to construction, geology, climate and other factors, the slope load increases, resulting in deformation of the geological structure of the slope, which brings serious safety risks to the construction personnel, construction equipment and long-term operation. Radar deformation monitoring technology is an active microwave remote sensing technology widely used in recent years, with all-day, all-weather and other advantages. The target deformation can be monitored in a wide range with high precision and fine, and then the safety and health status of the slope can be comprehensively evaluated.

Keywords

radar deformation monitoring technology; microwave remote sensing technology; large range and high precision; refinement

InSAR 雷达技术在水利水电工程边坡监测中的应用

邓军

中国水利水电第七工程局有限公司试验检测分公司, 中国·四川成都 611730

摘要

近几年, 随着社会现代化的不断发展、不断进步, 水利水电工程在我们日常生活中起到的作用越来越突出, 各种大型水利工程建设不断增加。但由于施工、地质、气候等多种因素导致边坡荷载加重增加, 致使边坡地质结构发生形变, 给施工人员、施工设备和长期运营带来严重的安全隐患。雷达形变监测技术是近年来应用较多的一种主动式微波遥感技术, 具有全天时、全天候等优势, 可以在大范围内高精度、精细化地监测目标变形, 进而全面地评估边坡的安全健康状况。

关键词

雷达形变监测技术; 微波遥感技术; 大范围高精度; 精细化

1 目前工程边坡变形监测技术概述

对于边坡的变形监测主要为简易监测法、设站监测法、仪表监测法和远程监测法四种基本类型, 或者也可以分为单点监测和区域监测两种基本类型。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^[1,2]。现有手段在边坡施工期存在数据获取分散、实施复杂、效率低、成本高、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^[3]。

雷达形变监测技术是近年来应用较多的一种主动式微波遥感新技术, 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。但卫星雷达存在分辨率低、监测视角固定、重访周期长等问题。相对于卫星雷达技术, 地基雷达技术具有高分辨率、观测视角灵活、实时、测量精度高(可达亚毫米级)等优势, 可以获取边坡的面状点云变形信息, 全面评估边坡的安全健康状况, 但由于边坡类型繁多, 环境条件变化复杂, 需要研究与之适应的地基雷达数据大气修正方法、监测方法、预(报)警标准和预测模型。

随着技术的不断发展, 三维激光扫描技术、星载干涉合成孔径雷达技术也不断地应用到工程边坡监测中来。这些技术虽然已经应用于各类工程, 并取得了一定的效果, 但是在应用当中还是表现出其缺陷与不足。三维激光扫描技术易受通视条件干扰, 且数据量大、数据处理较慢。星载 InSAR 技术往返周期较长, 且易受大气基线干扰等。以合成孔径雷达技术为代表的滑坡遥感作为“数字滑坡^[4]”中重要的组成部分, 随着高分辨遥感影像产品的增多, 机载 SAR、地基 SAR 等技术的出现、对地观测数据处理能力的逐步增强、

【作者简介】邓军(1988-), 男, 中国四川成都人, 工程师, 从事水利水电安全监测与管理研究。

交叉学科的深入合作，有效克服了传统边坡形变监测技术所存在的缺点，促进了遥感技术在滑坡灾害研究中的普及^[5]。

2 InSAR 雷达技术在水利水电工程应用中的难点

2.1 临水库区，大气环境变化复杂

InSAR 是利用微波成像，大气环境的变化会引起电磁波折射，从而引起传播路径和方向的变化，在监测范围较大时，场景内环境更为复杂，特别是监测中大气环境的变化影响，在两个成像时刻大气条件（温度、压力和湿度）的变化会导致不同的传播延迟^[6]，并且在相位中将存在大气相位分量（通常称为“大气相位屏”）。目前的 InSAR 大气相位校正^[7]方法主要分为两类，一类基于距离函数模型，主要包括稳定的永久散射体或高相干点。当满足大气空间均匀性假设时，稳定的永久散射体点相位差在距离方向上的投影呈现多项式函数关系，通常大气影响在空间上具有强相关性，即在空间上变化平稳。另一类基于多元回归模型，在距离方向上折射率分布不均匀的情况下，温度、压力、湿度和高程差均是影响大气相位的重要因素。此外大气在空间非均匀变化时，可以根据选取点类型不同进行大气相位校正或者兼顾高程等信息的多参数函数模型。另外基于稳定 PS 点函数模型的方法易于实现，并且已广泛应用在 InSAR 形变监测领域^[8]。然而，在大范围形变监测场景下，InSAR 系统通常要具有大视场角度，较长的监测距离，使得观测场景内环境更为复杂，可能存在明显的湍流或者局部水汽变化，大气分布在方位或水平方向也是非均匀的。因此，需要更为通用的大气校正方法，如图 1 所示。

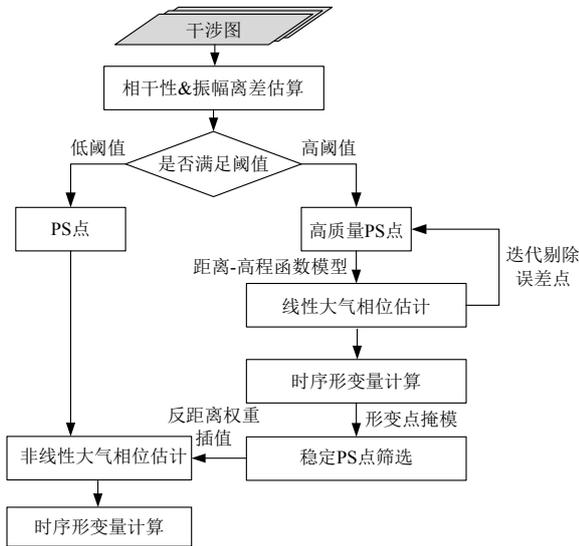


图 1 一种典型大气相位校正流程图

2.2 数据储存量大、数据处理复杂

水利水电工程边坡滑坡灾害具有影响范围大、周边环境地质地貌复杂多样等特点，传统人工方法无法满足大规模滑坡监测需求。而遥感技术能准确、快速获取同一地理区

域不同时刻间的变化信息，因其全天候、全天时、非接触、覆盖范围大等优势，对实现水库及其周边环境整体变化情况的大范围获取，特别是滑坡灾害的监测与评估，具有重要意义。但其伴随产生的数据量大及数据处理复杂也成为其在边坡监测中的快速、准确相悖，近几年针对数据量大及数据处理复杂的难题，通过对 SAR 图像的处理和识别，从而减小数据储存量，提高数据的处理速度。

在图像的处理和识别上，通常是采用采集到多幅边坡图像的变化进而判断出边坡变形的位臵及变形量等参数，主要包括三个基本步骤：①图像预处理（涉及图像滤波、图像配准、几何与辐射校正等）；②变化信息检测提取（指设计/选用合适的检测方法，从经预处理后的 SAR 图像中确定变化区域在研究时间内发生的变化）；③后处理及性能评估（主要目的是减少伪变化信息并利用客观评价指标如虚警率、漏检率、总错误率和 κ 系数等对检测结果进行有效评估）。

目前 SAR 图像处理、识别方法已经在很多文献中被提出，主要方法包括阈值分割法、混合模型法、多尺度分析法、聚类分析法等单通道 SAR 图像变化检测方法，与似然比法、检验量构造法、相似性度量法、信息融合法等的极化 SAR 图像变化检测方法。但是，这些传统变化检测方法通常过度依赖于手动设计特征，导致其存在特征判别性差、鲁棒性和通用性不足、检测精度有限等缺陷。近年来，随着深度学习在计算机视觉等领域的不断发展，深度学习技术以其强大的自主表示学习与模型泛化能力等优势，在各个领域取得显著的研究进展，并逐渐被引入到 SAR 图像变化检测领域。有研究者提出对原始 SAR 图像进行模糊 C 均值（Fuzzy C-means, FCM）聚类，利用得到的伪标签对深度神经网络^[9]进行训练，对图像中各个像素进行分类，并整合所有分类结果得到最终变化检测结果。以无监督的聚类方式，结合稀疏自编码器和卷积神经网络，得到包括“未变化类”和“变化类”的三元变化检测结果，其中，“变化类”细分为正变化和负变化两种类型。考虑到不同时刻获取的两幅光学图像和 SAR 图像具有互补性，Liu^[10]等提出了一种无监督的深度卷积耦合网络，用于异质图像的变化检测。由于深度学习网络强大的特征表达能力，使得基于深度学习的 SAR 图像变化检测技术得到越来越多研究人员的关注和应用，并不断取得新的研究成果，如图 2 所示。

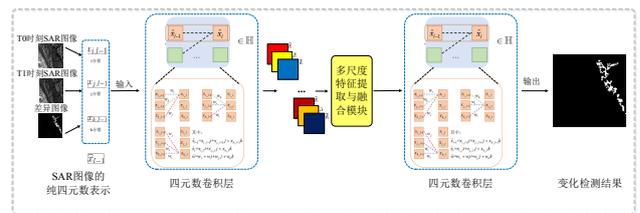


图 2 基于深度四元数卷积神经网络的 SAR 图像变化检测模型示意图

3 当前 InSAR 形变监测技术的发展

典型的 InSAR 系统常见于两种模式：直线扫描模式和弧线扫描模式。这两种模式距离向分析都是通过脉冲压缩原理实现，主要区别在于合成孔径形成方式。在直线扫描模式中，雷达天线沿着高精度直线滑轨做往返移动从而形成合成孔径，实现方位向分辨。代表性系统有 IDS 公司的 IBIS-L 系统，欧盟 JRC 的 LiSA 系统、荷兰 MetaSensing 公司的 FastGBSAR-S 系统、西班牙 UPC 大学的 RiskSAR 系统、中国安全生产科学研究院（安科院）的 S-SAR 系统、北京理工大学的 MIMO 系统、北方工业大学的微变感知系统等。在弧线扫描模式中，雷达天线在水平面内进行圆弧扫描，形成角度合成孔径。代表性系统有韩国的 ArcSAR、意大利 IDS 公司的 IBIS-ArcSAR 系统、中国科学院电子所的 ArcFMCW-SAR 系统等。需要注意的是，弧线扫描模式由于具有圆周合成孔径在三维成像、360° 全景监测方面具有更显著的优势。

早期的 InSAR 系统一般采用步进频体制，采用“一步一停”的工作方式。其发射信号的脉冲宽度较小，发射过程中目标与雷达平台的相对距离近似没有发生变化。当雷达需要测量远距离的目标时，受限于较小的脉冲宽度，只能通过提高发射功率来实现。发射功率的抬高导致其重量大、成本高。20 世纪 80 年代，英国首先提出调频连续波 SAR 的概念并将其投入应用。与步进频率工作模式不同，调频连续波 SAR 发射连续的线性调频信号，在平台运动过程中接收天线接收连续的回波信号，较长的扫频时间决定了在发射信号的过程中目标与雷达平台之间的距离是变化的，调频连续波雷达在作用距离较远时，对发射峰值功率等要求较低，从而带来体积小、重量轻、成本低等优势。

4 结语

相较于传统监测方式，InSAR 技术在节约物料成本、人工成本，提高人员工作效率方面优势突出，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。

传统的外部变形监测技术实施复杂，往往进行观测前需建立稳定的基准网和观测标点，基准网的建立又是一个比较漫长的过程，往往需要 15~30 天才能完成，且观测标点还需在变形体上进行施工，危险系数较大。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，运用新型合成孔径边坡雷达仪器设备，只需 15~30min 即能完成测站的架设并立即投入监测且不需布置任何观测标点，节约大量监测物料的投入，在满足观测质量的同时，极大降低了安全风险，提高了工作效率，特别是人工难于到达的高陡边坡方面优势更加突出。

参考文献

- [1] 王朱庆辉.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] 赵文飞.MT-InSAR土石坝形变监测及稳定性分析[D].郑州:华北水利水电大学,2023.
- [3] 侯巍.基于InSAR技术的丹江口坝区地表形变监测研究[D].郑州:河南大学,2019.
- [4] 王治华.数字滑坡技术及其典型应用[J].中国地质调查,2016,3(3):47-54.
- [5] 石菊松,吴树仁,石玲.遥感在滑坡灾害研究中的应用进展[J].地质论评,2008(4):505-514+579.
- [6] 范承玉,宋正方.大气湍流对激光跟踪系统角精度的影响[J].强激光与粒子束,1995(4):543-548.
- [7] 王泊静.基于PS点分类的GB-InSAR复杂大气相位校正方法研究[D].北京:北方工业大学,2023.
- [8] 李永生,张景发,姜文亮,等.基于网络法时序InSAR大气误差校正方法研究[J].大地测量与地球动力学,2015,35(1):145-149.
- [9] 罗震宇.基于深度学习的SAR图像处理研究[D].北京:中国电子科技集团公司电子科学研究院,2019.
- [10] Liu J, Gong M, Qin K, et al. A deep convolutional coupling network for change detection based on heterogeneous optical and radar images[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2018,29(3):545-559.