引文格式:王鹏,史波,张斌,等.短时间基线集GB-InSAR白鹤滩特高拱坝坝面变形监测应用[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(7):1440-1451.DOI:10.13203/j.whugis20250043

Citation:WANG Peng,SHI Bo,ZHANG Bin,et al.Deformation Monitoring of the Baihetan Ultra-High Arch Dam Surface Using Short Temporal Baseline Subset GB-InSAR[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2026,51(7):1440-1451.DOI:10.13203/j.whugis20250043

短时间基线集GB-InSAR白鹤滩特高拱坝坝面变形监测应用

王 鹏[1] 史 波[2] 张 斌[2] 段 杭[3] 柯传芳[3] 徐福斌[2]
王雨佳[1] 金 霄[1]

1 苏州科技大学地理科学与测绘工程学院,江苏 苏州,215009
2 长江空间信息技术工程有限公司(武汉),湖北 武汉,430010
3 中国三峡建工(集团)有限公司,四川 成都,610000

摘 要:常规大坝变形监测方法能够反映典型坝段和高程的变形情况,但测点密度不足,容易遗漏重要部位。地基合成孔径雷达干涉测量(ground-based synthetic aperture radar interferometry,GB-InSAR)技术为坝面区域性变形监测提供了有效手段。但由于受到大气扰动的严重制约,单主影像时序分析方法在长时序监测应用中难以获得理想的解算结果。针对这一问题,对时序GB-InSAR技术进行了改进,选取气象变化平稳时段的连续影像计算平均影像序列,据此构建短时间基线干涉对,利用稳定区域高质量像元(high quality pixel,HQP)的解缠相位进行干涉图大气建模和改正,进而反演变形序列。将所提方法应用于白鹤滩特高双曲拱坝的长时序变形监测,在准确识别坝面区域HQP的基础上,对时序GB-InSAR和传统垂线+水准的监测结果进行了对比分析。结果表明,除受深孔旁瓣效应影响区域外,两种方法在多个垂线测点处符合程度较高,均方根误差达到2 mm左右。短时间基线时序GB-InSAR能够克服近水区剧烈的大气环境变化干扰,解决日波变形同大气相位混杂的问题,可实现长期坝面变形的高精度测量,为高拱坝安全分析和结构变形解译提供重要技术支撑。

关键词:地基合成孔径雷达;干涉测量;像集子影;变形监测;白鹤滩;拱坝

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2025-05-15

DOI:10.13203/j.whugis20250043 **文章编号**:1671-8860(2026)07-1440-12

Deformation Monitoring of the Baihetan Ultra-High Arch Dam Surface Using Short Temporal Baseline Subset GB-InSAR

WANG Peng[1] *SHI Bo*[2] *ZHANG Bin*[2] *DUAN Hang*[3] *KE Chuanfang*[3] *XU Fubin*[2]
WANG Yujia[1] *JIN Xiao*[1]

1 School of Geography Science and Geomatics Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China
2 Changjiang Spatial Information Technology Engineering Co., Ltd., Wuhan 430010, China
3 China Three Gorges Construction Engineering Corporation, Chengdu 610000, China

Abstract: **Objectives**: The conventional dam deformation monitoring method has been demonstrated to be capable of reflecting the displacement of typical dam sections and elevations. However, the density of measuring points is often inadequate, with important parts consequently being missed. Ground-based synthetic aperture radar interferometry (GB-InSAR) has emerged as an effective means of monitoring regional deformation of dam surfaces. Nevertheless, the precision of long-term sequential monitoring is frequently compromised by atmospheric disturbances, which significantly impede the ability to obtain reliable deformation measurements through single-master time series InSAR analysis. **Methods**: In order to address this issue,

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(41801381);中国三峡建工(集团)有限公司科研项目资助(BHT/0931)。

第一作者:王鹏,博士,副教授,研究方向为精密工程测量与变形监测技术。geomaticpeter@vip.qq.com

improvements were made to the GB-InSAR time series technology. The optimized approach used continuous imagery acquired during periods of stable meteorological conditions to compute average image sequences, which were then used to construct short temporal baseline interferometric pairs. Atmospheric phase correction was then applied to the interferograms using high-quality pixel (HQP) identified in stable regions, enabling precise deformation inversion. The proposed method was applied to the long-term deformation monitoring of the Baihetan ultra-high hyperbolic arch dam. A comparative analysis was conducted between the time-series GB-InSAR results and the traditional monitoring method, based on the accurate identification of HQP across the dam surface. **Results:** Except for localized regions affected by the sidelobe effect of deep outlets, the deformation sequences derived from both methods at multiple plumbline observation sites exhibit a high degree of consistency, with root mean square error values of approximately 2 mm. Furthermore, the deformation center of the dam, as identified by the GB-InSAR technique, is located at the top of the 16th dam section, which is consistent with the results obtained from numerical simulations. **Conclusions:** The proposed method has the capacity to overcome the interference of severe atmospheric variations in near-water regions and address the issue of diurnal deformation signals being mixed with atmospheric phases in GB-InSAR, which facilitates high-precision measurements of long-term dam surface deformation. The approach provides critical technical support for safety analysis and structural deformation interpretation of high arch dams.

Key words: ground-based synthetic aperture radar; interferometry; image subset; deformation monitoring; Baihetan; arch dam

水库大坝是水利工程体系的重要组成部分,其变形受坝体结构类型、库水位、内外温度以及河谷地形等多种因素影响,变形特征复杂多样。持续开展坝体的变形监测,能够掌握大坝动态,验证大坝性能,及时发现病害异常,以采取工程措施,确保大坝安全[1]。重大库坝工程结构往往既需要进行长期稳定性监测,也需要在灾后、蓄水、泄洪等特殊时期进行连续安全监测,对变形监测的精度、可靠性和持续性提出了全方位要求。大坝变形监测通常采用垂线、引张线、全站仪和GNSS等技术,以稀疏离散点测量为主要形式,能够反映典型坝段和典型高程的变形情况。该类技术虽然能够达到较高的单点测量精度,但难以获取足够密度的监测点,容易遗漏变形体的关键部位。而对于特高拱坝,长拱形结构又限制了廊道内部的通视距离,使得引张线敷设困难,横向监测点的连续性受到一定影响。三维激光扫描[2]和数字近景摄影测量技术[3]虽然能够提供空间上连续覆盖的面状监测成果,但受测量距离、特征点选择和建模精度的限制,目前难以达到较高的变形监测精度。

星载和地基合成孔径雷达(synthetic aperture radar,SAR)干涉测量(ground-based SAR interferometry,GB-InSAR)技术的发展为全天时、全天候监测水工结构变形提供了有效手段。星载SAR受雷达测试视角、重访周期等因素影响,对于地表局部区域特定方向变形测量的精度、灵敏度和时空分辨率受到一定限制。地基SAR系统,如IBIS-L、FastGBSAR等,结构简单、安装方便、参数配置灵活,能够实现较高空间和时间分辨率的影像数据采集,其变形测量的精度一般可达亚毫米级[4]。近年来,GB-InSAR技术已经成功应用于各类自然灾害监测(如火山[5]、滑坡[6]、岩石崩塌[7]、雪崩[8]和冰川移动[9]),以及人工结构监测(如大坝[1,10-11]、港口结构[12]和基坑工程[13]),为这些领域的研究或安全评估提供了有效工具。GB-InSAR技术的应用模式可大致划分为以下两种:一种是固定雷达传感器轨道的连续变形监测,适用于监测连续的、短时的或快速的变形[14]。另一种是不固定雷达传感器轨道的非连续变形监测,亦称为离散时间基线监测模式,适用于长时间跨度的大尺度变形监测[15]。该方法通常需要考虑雷达传感器运行轨道重复安装误差的影响[16-17]。

湿度和温度是影响GB-InSAR原始相位观测值的最主要的两种气象参数[18]。高坝峡谷近水区域气象变化较为复杂,气象环境的频繁剧烈变化容易导致GB-InSAR连续观测出现长时段大量低质量影像。此时,干涉相位和大气改正均可能受到干扰,导致变形序列中出现不符合实际变形规律的异常跳变,使得传统的时域干涉相位积分法[18]、干涉相位滑动平均法[19]难以得到持续、稳定的解算结果。而长时间跨度的GB-InSAR影像之间受大气去相干影像非常明显,干涉

相位质量较差,同样难以实现高精度变形监测。WANG等[1]基于高质量的影像子集序列和永久散射体(permanent scatterer,PS)点目标进行时序分析,将多项式大气改正方法和PS-InSAR时序分析中的滤波方法相结合,处理短时间间隔干涉图的大气相位,能够较好地解决时域变形相位和大气相位混杂的问题,利用几天的影像序列即可以较高的精度解算变形速度和变形序列。但由于PS-InSAR采用单主影像方式构建干涉对,在长时序的GB-InSAR影像序列处理中难以获得较好的变形解算结果。

针对GB-InSAR库坝监测应用的上述问题,本文利用GB-InSAR连续监测模式获取的高质量影像子集序列,参考星载InSAR小基线集技术[20],采用多主影像方式构建短时间基线干涉对解算变形序列。结合白鹤滩水电站特高拱坝的GB-InSAR连续监测实践,利用垂线+水准监测数据对本文方法的有效性进行验证分析。

1 研究方法

现阶段GB-InSAR设备采样频率较高,最快能在数十秒内完成一景影像采集。固定测站连续成像模式降低了成像过程大气干扰,同时也能够测量更大的相位变化。该模式一般不需要考虑雷达重复安装误差影响,降低了变形解算难度,本研究改进了时序GB-InSAR技术流程。

1.1 高质量影像子集选取与平均影像计算

GB-InSAR视场内各像元均受到大气环境影响,气象参数变化直接反映在各像元的观测相位和振幅中。考虑到热信噪比(thermal signal-to-noise ratio,TSNR)较高的像元具有较高的相位观测精度,可以通过高TSNR像元的邻域差分相位序列来分析大气影响的剧烈程度[11]。邻域差分相位值越小,说明气象变化越平缓。邻域差分相位小、解缠相位线型趋势明显的连续影像序列可视为高质量影像子集,据此计算平均影像能够避开观测相位受到严重干扰的时段,削弱观测噪声影响[1]。为充分利用原始影像数据,相邻影像子集的时间间隔有时较短,这也是导致影像序列中大气相位与时域低通变形分量混杂的直接原因。由于高质量影像子集内部连续影像序列的相位变化一般较为缓慢,可以直接对各像元进行时域一维相位解缠而无需进行空间相位解缠。各像元的平均相位和信号强度为:

$$\begin{cases}\varphi_m=\dfrac{1}{K_m}\displaystyle\sum_{n=1}^{K_m}\left(\angle\left(f_{m1}\right)+\angle\left(W^{-1}\left(f_{mn}\cdot\mathrm{conj}\left(f_{m1}\right)\right)\right)\right)\\ A_m=\dfrac{1}{K_m}\displaystyle\sum_{n=1}^{K_m}\mathrm{abs}\left(f_{mn}\right)\end{cases}\tag{1}$$

式中,φ_m为平均相位;A_m为平均信号强度;m为子影像集序号;n为子影像集内部影像序号;K_m为影像子集m中连续采集的GB-InSAR影像总数;f_{m1}和f_{mn}分别是影像子集m中选作主影像的首影像复矢量和第n景从影像的复矢量;conj(·)为取复数的共轭;W^{-1}(·)为相位解缠算子;∠(·)为相位提取操作;abs(·)为计算复数的模。随后将影像子集融合为一景平均复影像图:

$$I_m=A_m\exp\left(\mathrm{i}\varphi_m\right)\tag{2}$$

结合平均相位和平均信号强度,后续的相干计算和干涉分析均基于平均影像序列进行。

1.2 短时间基线干涉图相位解缠

多主影像解算方式可以在一定程度上解决PS-InSAR单主影像干涉对时间跨度过长导致的去相干问题。GB-InSAR固定测站模式没有空间基线,可通过限制关联影像之间的时间跨度,构建短时间基线干涉对以确保干涉图质量。同时,后续解算均基于高质量像元(high quality pixel,HQP)进行。计算各干涉对的相干系数,采用平均归一化振幅和平均相干系数双阈值法选取HQP。基于离散HQP进行最小费用流空间相位解缠,选定某一稳定HQP为基准点进行相位的绝对校正。干涉对的时间基线较短,可认为时段内以线性变形为主,解缠(unwrap,unw)干涉相位模型为:

$$\varphi_{\mathrm{unw}}=-\frac{4\pi}{\lambda}v\Delta t+\Delta\varphi_{\mathrm{atm}}+\varphi_{\mathrm{atm},e}+\varphi_{\mathrm{noise}}\tag{3}$$

式中,λ为电磁波信号波长;v为主从影像之间的平均变形速度;Δt为主从影像时间间隔;$\Delta\varphi_{\mathrm{atm}}$为大气(atmosphere,atm)模型相位;$\varphi_{\mathrm{atm},e}$为大气模型残差相位;$\varphi_{\mathrm{noise}}$为干涉图噪声相位。

1.3 大气相位建模与改正

干涉图中包含两幅平均影像大气差异相位,由于相邻平均影像的时间间隔较短,影像序列中大气相位与变形时域低通分量混杂,需要对该大气相位成分进行处理,使时间上的大气残余相位与变形处于不同频段,以便应用时序分析技术进一步削弱大气影响。GB-InSAR在小区域范围内

成像,电磁波信号路径距离跨度较小,各像元路径上大气成分的同质性、连续性较高。此时,可建立 HQP 的多项式大气相位模型,如 HQP 雷达平面坐标(x,y)的二元多项式模型:

$$\Delta\varphi_{\mathrm{atm}}=\frac{4\pi}{\lambda}\sum_{p=0}^{P}\sum_{q=0}^{Q}a_{p,q}x^{p}y^{q} \tag{4}$$

式中,p、q分别为x和y的阶次;P、Q分别为x和y的最高阶次;$a_{p,q}$为系数。该模型可改正解缠相位中与空间位置相关的大气相位成分,即大气相位的空间低通分量。在各干涉图进行空间相位解缠的计算时,统一以某一选定的稳定参考点为基准进行解算。若所选基准点未发生变形,其观测相位的时序变化可认为完全是大气变化的影响。解缠干涉图的大气改正相当于以该基准点的相位序列为参考对各 HQP 像元的相位序列在时间上进行大气相位改正,由此也削弱了大气相位时间低通分量。此时,各 HQP 的残余大气相位可认为在时间上和空间上已经不具有显著相关性。

1.4　变形序列解算

设 GB-InSAR 影像子集平均影像序列对应的累积变形序列为$\boldsymbol{\varphi}=[\varphi_1\ \varphi_2\ \cdots\ \varphi_N]^{\mathrm{T}}$,其中$N$为影像子集总数,对应$N-1$个时段的平均变形速度:

$$v_i=\frac{\varphi_{i+1}-\varphi_i}{t_{i+1}-t_i},i=1,2,\cdots,N-1 \tag{5}$$

满足短时间基线标准的干涉对数目为M,生成的解缠干涉相位为$\delta\boldsymbol{\varphi}=[\delta\varphi_1\ \delta\varphi_2\ \cdots\ \delta\varphi_M]^{\mathrm{T}}$,第$j$幅干涉图的相位值可写为各时段速度在主、从影像时间间隔上的积分:

$$\sum(t_{k+1}-t_k)v_k=\delta\varphi_j \tag{6}$$

式中,$j=1,2,\cdots,M$;k为干涉图主、从影像间隔内部的时段序号,组成矩阵形式为:

$$\boldsymbol{B}\boldsymbol{v}=\delta\boldsymbol{\varphi} \tag{7}$$

式中,$\boldsymbol{B}$为$M\times(N-1)$的矩阵,对于第j行主从影像之间的列,$\boldsymbol{B}(j,k)=t_k-t_{k-1}$,其他元素值为 0。

由于采用多主影像方法,$\boldsymbol{B}$容易产生秩亏,采用奇异值分解方法可以解算出最小范数意义上的变形速度,再利用时间基线将变形速度转换为累积变形序列。进一步对 HQP 处的累积变形序列分别进行时间上和空间上的低通滤波处理,以削弱残余大气模型相位和噪声相位的影响。利用 WANG 等[21]提出的方法,计算累积变形的内符合精度,同时还应考虑时空滤波对变形序列的影响,对解算结果精度进行综合评价。

1.5　坝面变形提取

为准确识别坝面变形,应用倾斜摄影测量技术获取坝面点云。借助高精度点云数据可去除坝面复杂结构在 GB-InSAR 影像中形成的阴影和叠掩区域像元。通过 GB-InSAR 地理编码技术[22]实现 HQP 像元坐标到三维地理坐标的转换计算,最终获取坝面 HQP 变形序列。技术路线见图 1。

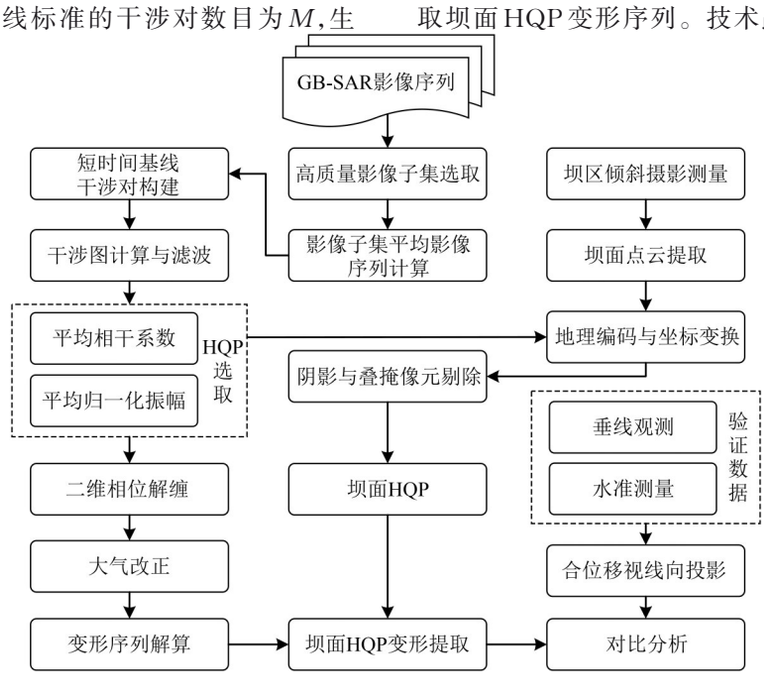


图 1　研究技术路线图

Fig. 1　Technical Flowchart of the Research

2　研究区与数据

白鹤滩水电站位于金沙江下游四川省宁南县和云南省巧家县(图 2),开发任务以发电为主,兼顾防洪,并有拦沙、发展库区航运和改善下游通航条件等综合利用效益,是西电东送骨干电源

点之一。水库总库容206.27亿m^3。电站装机容量16 000 MW,多年平均发电量625.21亿kW·h。枢纽工程由拦河坝、泄洪消能建筑物和引水发电系统等主要建筑物组成。泄洪设施包括大坝的6个表孔、7个深孔和左岸的3条泄洪隧洞。白鹤滩水电站大坝为300 m级混凝土特高双曲拱坝,拱坝具有不对称性,坝顶高程834 m,最大坝高289 m,拱冠坝顶厚度14 m,拱冠坝底厚度63.5 m,最大中心角96.43°,顶拱中心线弧长708.7 m,厚高比0.22,弧高比2.45。坝体设横缝不设纵缝,共分31个坝段。

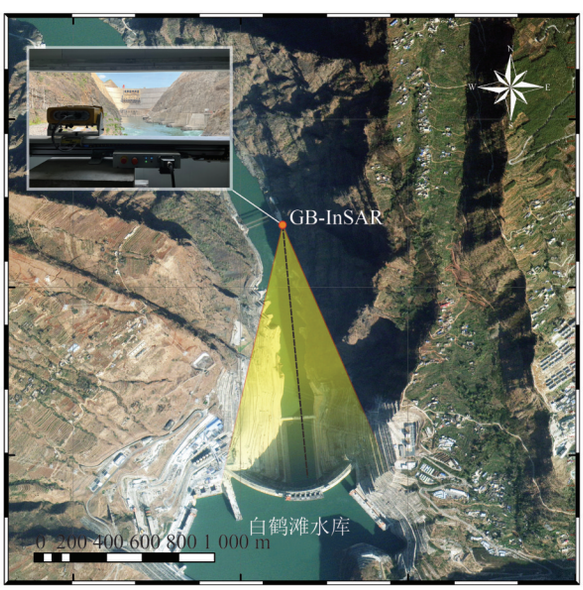


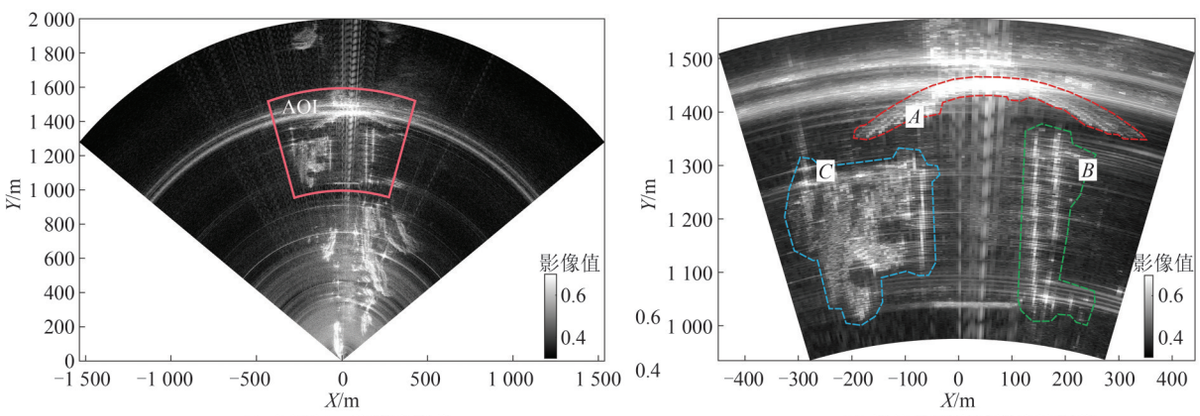
图2 白鹤滩水电站遥感影像与GB-InSAR观测视场

Fig. 2 Remote Sensing Image of the Baihetan Hydropower Station and GB-InSAR Observation Field

实验选用GB-InSAR系统IBIS-FM EVO开展影像采集工作。该系统采用双向扫描成像方式,单景影像采样耗时约为20~30 s,成像水平范围约80°,最大探测距离可达5 km,标称变形测量灵敏度0.01 mm。线性轨道长度2 m,方位向分辨率为4.38 mrad,信号带宽为200 MHz,距离分辨率为0.75 m。雷达系统安装在大坝下游左岸,距离坝体约1.43 km,运行导轨和雷达传感器姿态水平,雷达波束中心朝向坝体中部,两侧主要坝段处于雷达信号覆盖的最优视场内,如图2所示。实验采用GB-InSAR连续观测模式,影像采集时间间隔约为2.5 min,自2023-8-12—2023-11-03共持续84 d,共计采集45 067景影像。

3 数据处理结果

GB-InSAR全幅归一化强度影像如图3(a)所示,裁取坝体及两岸近坝边坡为兴趣区域(area of interest,AOI)。由图3(b)可知,AOI中主要包含坝体、左岸边坡和右岸边坡3个区域,分别对应图中区域A、B和C。坝肩同两侧山体界面被边坡遮挡,使得影像图中该区域出现较大阴影,坝体区域像元同两侧边坡的像元没有直接连接。坝中结构后向散射强烈,旁瓣效应明显并呈现环状和径向分布,两侧坝体信号强度偏弱,尤其是左岸一侧坝体,局部像元受到显著旁瓣干扰。此外,坝体影像上部出现因多次反射形成的影像区域。



(a) 全幅归一化强度影像 (b) 坝体及两岸近坝边坡影像

图3 坝区GB-InSAR影像与AOI选择

Fig. 3 GB-InSAR Imagery and AOI Selection of the Dam Area

依据像元平均强度剔除虚假信号和弱信号像元[11],筛选出HQP候选点用于预分析。图4是2023-08-13某HQP候选点的邻域差分相位序列。绿色区域为±50°区域,粉色直线为±80°参考线,相位在50°线以内表明大气变化极为平稳。由于当日午后出现持续降雨过程,相位观测受到明显影响,邻域差分相位数值较大,多数已超过±80°参考线。在单日连续影像中选取大气变化较为平缓的时段作为一个影像子集,影像数量一般为20~30景,将该子集合成为一景平均影像,共计

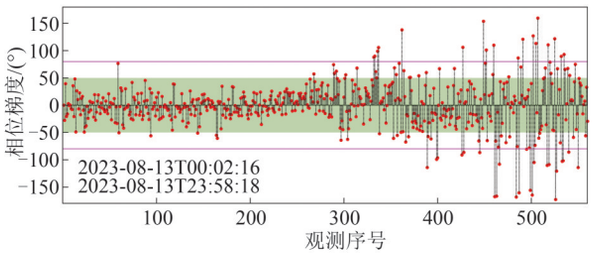


图 4　某 HQP 候选点单日邻域差分相位序列

Fig . 4　A Single-Day Neighborhood Difference Phase Sequence for an HQP

获取了 157 个影像子集平均影像。

构建短基线干涉对可充分避免由于时间间隔较大引起的大气相位去相干问题,保证了干涉图质量。时间基线阈值设置为 1～5 d,构建了 457 个干涉对,干涉对关系如图 5 所示。

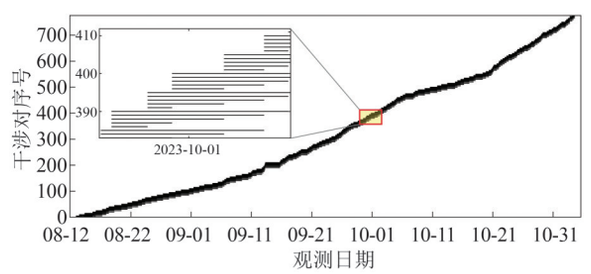


图 5　2023 年短时间基线干涉对构建

Fig . 5　Constructing a Short-Time Baseline Interference Pair of 2023

依据上述干涉对组合,分别计算各干涉对的相干系数。进一步结合平均相干系数阈值法选出 HQP 像元 23 024 个,其分布如图 6 所示,底图为归一化平均强度图,色彩表示相干系数大小。坝体右侧局部区域弱信号像元受旁瓣效应干扰,双阈值法难以将该部分像元彻底滤除。

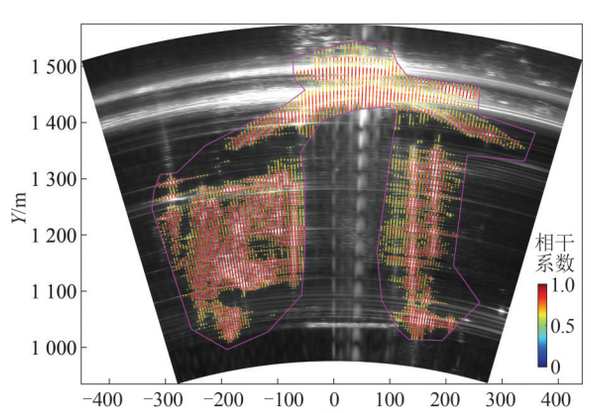


图 6　HQP 分布

Fig . 6　HQP Distribution

对各幅干涉图进行空间相位解缠,第 19 幅干涉图滤波和空间相位解缠的结果如图 7 所示。短时间基线条件下,两岸近坝边坡变形在雷达视线向(line of sight,LOS)的分量极小。解缠相位图中边坡上存在的趋势性相位可认为是由干涉对两幅影像采集时刻的大气差异造成的。由于横纵距离跨度不大,空间上的非线性变化不明显,可采用低阶的多项式模型对该趋势性大气相位进行建模和改正。考虑到坝体区域存在持续变形,应在掩膜掉坝体区域后,再对解缠相位进行大气建模。

图 8 比较了近坝边坡区域 HQP 大气改正前后相位的统计直方图。大气改正前解缠相位主要分布于－2～5 rad 区间,大气改正后相位均值降低为 0.165 3 rad,直方图近似正态分布。结合图 7(b)和图 7(d)相位的空间分布差异,说明趋势性大气相位已得到较好的去除。

影像子集的选取使得干涉图序列的大气在时间上具有一定的随机性,在完成各干涉图的大气改正后,残余大气相位在空间上和时间上的随机性进一步加强,可以视为与噪声相位具有一致的频谱特征。利用短时间基线时序 GB-InSAR 算法对 23 024 个 HQP 分别进行变形序列和变形速度解算,变形速度分布如图 9(a)所示。图 9(b)为 HQP 变形序列的平均中误差空间分布,平均中误差在 0.5 mm 以内的 HQP 占比 69.71%。

4　验证分析

为便于时序 GB-InSAR 同其他监测手段直接比较,实验采用倾斜摄影测量获取的坝体点云作为辅助数据,经 GB-InSAR 成像几何分析和地理编码,剔除了阴影和叠掩 HQP,在坝体表面共计识别出 2 116 个 HQP 并进一步获取其三维坐标。坝面 HQP 变形速率等成果可映射到坝体倾斜模型上,如图 10 所示。

由于大坝为双曲拱形立面结构,GB-InSAR 测站距离较远,使得坝面影像斜距投影后的距离跨度狭窄,观测噪声对坝面区域干涉相位处理的影响更容易凸显出来。坝体中部叠掩较为严重,表孔和底孔之间以及底孔下部区域缺少正常成像 HQP 像元。变形速度的空间分布整体呈现由两侧和底部向坝中顶部渐变趋势。由坝面区域的 GB-InSAR 影像可见,坝体中部结构散射体回波信号较强,其旁瓣形成了白色弧线区域。坝面处于弧线上的像元受到旁瓣干扰,解算结果出现明显偏差,如图 10 中 $A1$ 和 $A2$ 两个区域的变形速率小于两侧像元。监测前期右侧坝面散射信号

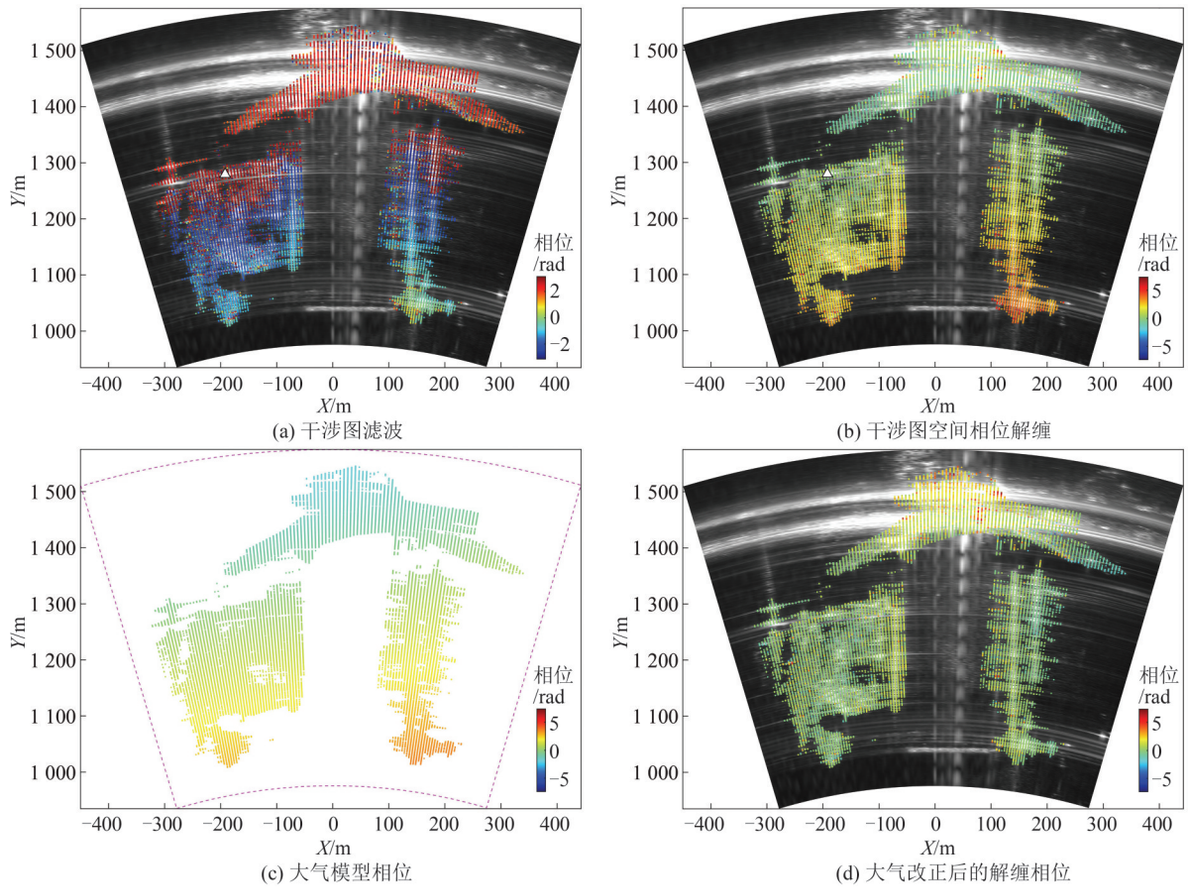


图7 解缠干涉图的大气改正

Fig. 7 Atmospheric Correction of the Disentanglement Interferogram

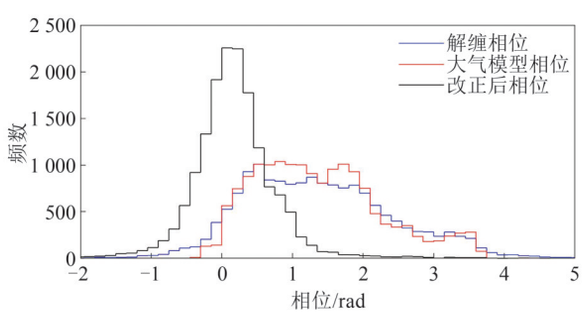


图8 大气改正前后近坝边坡区域相位统计直方图对比

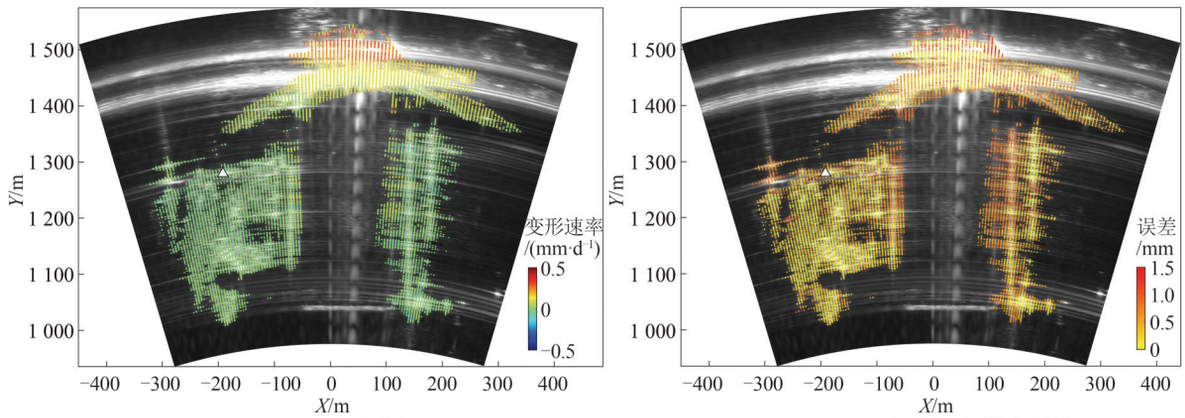
Fig. 8 Phase Statistics Comparison Before and After Atmospheric Correction in Slope Areas Near the Dam

整体偏弱,监测后期坝面右侧历经打磨修整过程,相位观测受到干扰,区域*A*3变形速率出现负值,不符合实际变形规律。

坝体及左、右坝肩内部布设了多条垂线,垂线数据采集每周开展一次,垂线测点处均设有水准点,廊道水准约20 d开展一次。实验收集了GB-InSAR观测期间的垂线和水准数据,依据垂线观测时刻对水准观测沉降量进行插值,融合为三维变形。图11(a)中蓝色箭头表示垂线测点处垂线+水准合位移。观测时段内沉降变形相对较小,最大累积沉降出现在12#坝段底部,也仅为2.56 mm。合位移方向接近水平,整体朝向下游拱圈中心。为便于同雷达监测成果进行直接比较,将合位移投影计算至雷达LOS,以红色箭头表示。图11(b)展示了合位移在4个观测日期的空间部分情况。在库水位、温度荷载等综合因素作用下,坝面变形在空间上呈现出明显的趋势性。合位移由坝底至坝顶、两侧至坝中逐渐增大。同一高程面处,12#坝段坝顶测点累积变形值略高于18#坝段。2023-09-27的分布图中,12#坝段坝顶测点处累积变形值达28.08 mm。

为进一步确定垂线测点对应的HQP像元,首先计算垂线测点在坝面处的三维坐标,依据GB-InSAR成像参数投影至雷达成像平面。在雷达平面坐标系中同GB-InSAR坝面区域的HQP进行最短距离匹配计算,选择距离满足一定限值(如0.20 m)的HQP作为垂线测点的对应像元。实验中成功匹配了18个垂线测点,编号如图12所示。

图13展示了18#1、23#1和12#1 3个典型坝段坝顶垂线测点的监测成果,对比了垂线+水准传统外观监测和时序GB-InSAR两种方法的变形序列。GB-InSAR监测时段内,库水位自797.10 m开始线性攀升至821.23 m,而后历经多次波动变化,形成



(a) HQP变形速率　　(b) HQP变形序列平均中误差

图 9　HQP 变形速率及变形序列平均中误差分布

Fig . 9　Deformation Rate and Average Estimated Standard Deviation of Deformation Series for HQP

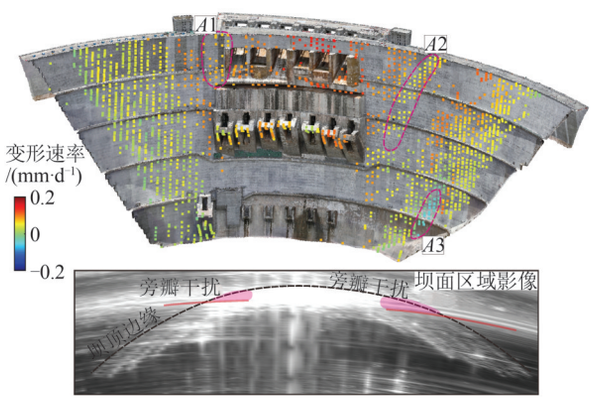


图 10　坝面 HQP 变形速率分布

Fig . 10　Distribution of Deformation Velocity of HQP at Dam Face

多个局部峰值，2023-10-07 达到最高水位 823.85 m。整体上看，两种监测方法同库水位变化趋势较为一致。2023-09-11 前随着库水位攀升，变形值同步增大，在后续波动变化过程中，时序 GB-InSAR 得益于更高的采样频率，呈现出了比传统监测方法更加丰富的变形细节。实验选取平均偏差（bias）、拟合优度 R^2 以及均方根误差（root mean square error，RMSE）作为外符合精度的评价指标，计算公式如下：

$$E_{\text{bias}}=\sum_{u=1}^{U}\left(d_{G,u}-d_{C,u}\right) \tag{8}$$

$$E_{\text{RMSE}}=\sqrt{\frac{1}{U}\sum_{u=1}^{U}\left(d_{G,u}-d_{C,u}\right)^2} \tag{9}$$

$$R^2=1-\frac{\sum_{u=1}^{U}\left(d_{G,u}-d_{C,u}\right)^2}{\sum_{u=1}^{U}\left(d_{G,u}-\bar{d}_{G,u}\right)^2} \tag{10}$$

式中，E_{bias} 和 E_{RMSE} 分别为平均偏差和均方根误差；d_G 为时序 GB-InSAR 变形量；d_C 为垂线＋水准 LOS 投影变形量；u 为垂线测点序号；U 为垂线测点总数。

变形数据在变化趋势上非常接近，测点 18#1、23#1 和 12#1 处的 R^2 均在 0.95 以上，但 12#1 处 bias 和 RSME 数值出现较大偏差，分别达到 −3.90 mm 和 4.19 mm。各测点对应 HQP 的时序 GB-InSAR 解算变形序列中误差均值以及两种方法间的 R^2、bias 和 RMSE 列于表 1 中。

由表 1 可见，各测点中误差均值均在 1 mm 内，平差的内符合精度较好。12#坝段受坝中结构旁瓣效应影响，虽然上部 12#1～3 3 个测点的 R^2 均在 0.90 以上，但 bias 和 RMSE 数值较大，反映的变形特征明显不是实际位置处的变形。坝顶 5 个测点的精度较好，除 23#1 和 12#1 的 RMSE 大于为 2 mm 外，其余 3 个测点的 bias 和 RMSE 均在 2 mm 以内。测点 12#5、23#4、23#5 处两种方法的变形序列偏差较大，R^2 数值偏低，坝体上部测点成果质量整体上优于下部测点。

在水位快速攀升阶段的 2023-08-12—2023-09-13 选取 6 个时间点，2023-10-07 最高水位以及后续第一个局部低谷水位和局部峰值水位处分别选取 1 个时间点，绘制累积变形分布图见图 14。

坝体变形呈现出明显的空间变化。白鹤滩拱坝中心线位于 18#坝段，坝体右侧第一和第二表孔之间为 16#坝段。本次观测过程中，16#坝段变形略高于两侧坝段，坝体最大变形不在拱坝中心线处。除受旁瓣干扰的异常区域，坝面变形由 16#坝段顶部向两侧和下部逐渐减小。相对于结构中心线，坝体变形的空间分布出现明显的不对称性。16#坝段顶部 HQP 的变形序列如图 15 所示，同水位变化趋势极为相似，R^2 为 0.99，最大累积变形 34.15 mm 出现于 2023-10-05 16 时。

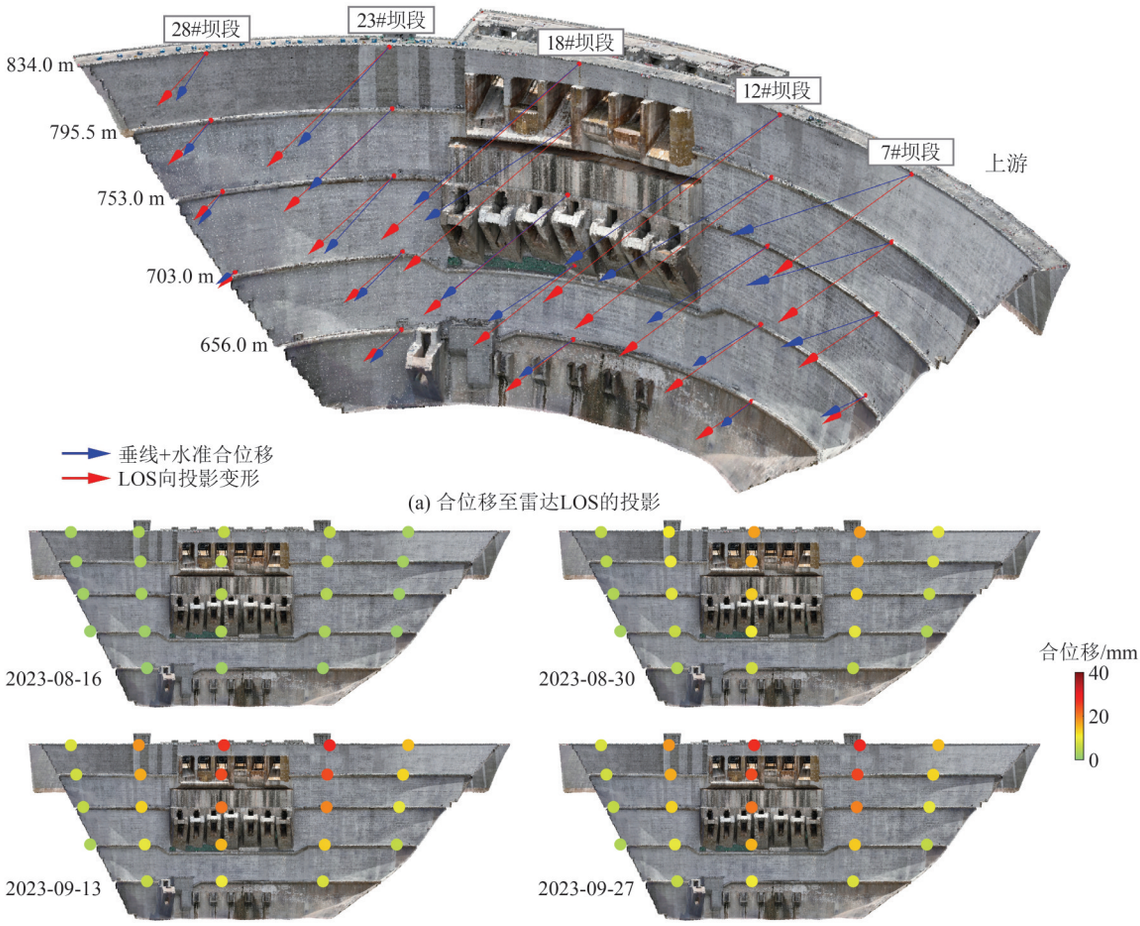


图11 垂线+水准合位移及其雷达LOS投影

Fig . 11 Plumbline+Leveling Combined Displacement and Its Projection onto Radar LOS

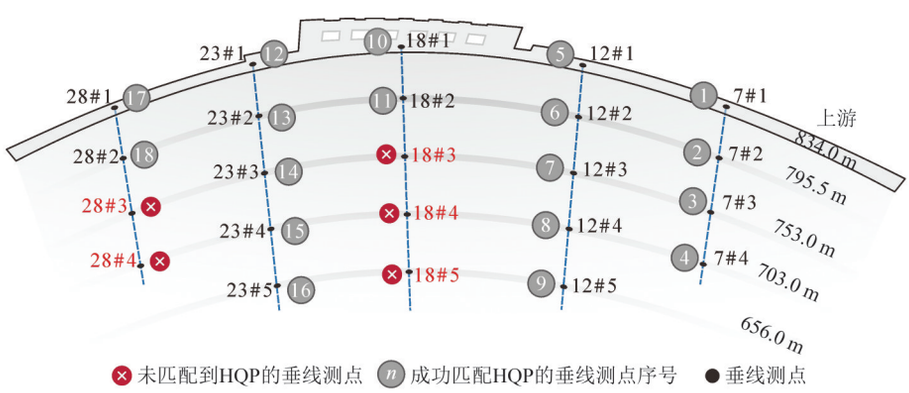


图12 各坝段垂线测点分布

Fig . 12 Distribution of Plumbline Measurement Points in Dam Sections

5 结 语

目前国内300 m级高拱坝运行时间较短,高拱坝运行安全状况研究是国内水电面临的重大课题。本文提出了一种基于高质量影像子集的短时间基线时序GB-InSAR技术,并应用至白鹤滩特高双曲拱坝的长时序变形监测中。在准确识别坝面区域HQP的基础上,同传统垂线+水准的监测结果进行了对比分析。结果表明,在大型复杂立面结构监测应用中,GB-InSAR能够提取高密度的测点数据。本文提出的利用稳定区域HQP数据进行干涉图大气建模和改正的方式,能够克服近水区剧烈的大气环境变化干扰,解决日波变形同大气环境变化混杂的问题,实现长期坝面变形的高精度测量。该技术可为高拱坝安全分析和结构变形解译提供重要技术支撑。

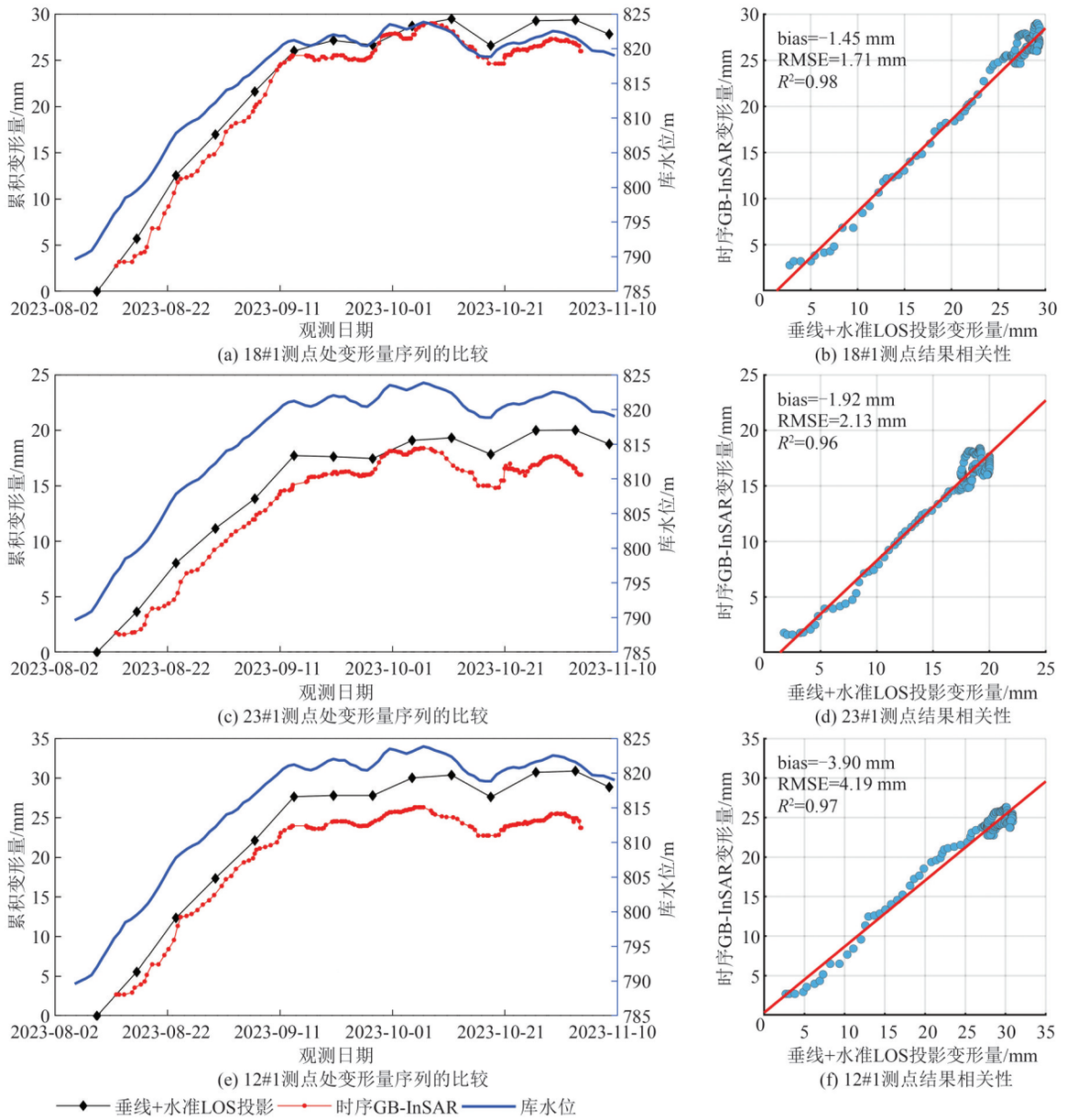


图 13　部分坝段垂线测点监测结果对比

Fig . 13　Comparison of Monitoring Results from Plumbline Points at Selected Dam Sections

表 1　18 个垂线测点成果对比

Table 1　Comparison of Results from 18 Plumbline Points

垂线测点	时序 GB-InSAR 中误差均值/mm	R^2	bias/mm	RMSE/mm	垂线测点	时序 GB-InSAR 中误差均值/mm	R^2	bias/mm	RMSE/mm
7#1	0.75	0.98	0.98	1.72	18#1	0.65	0.98	−1.45	1.71
7#2	0.68	0.95	−0.73	1.32	18#2	0.83	0.97	0.06	1.30
7#3	0.77	0.89	−2.00	2.38	23#1	0.98	0.96	−1.92	2.13
7#4	0.74	0.91	4.84	5.62	23#2	0.88	0.90	2.47	3.60
12#1	0.60	0.97	−3.90	4.19	23#3	0.79	0.97	1.13	1.49
12#2	0.61	0.90	−10.02	10.47	23#4	0.85	0.80	−1.01	1.47
12#3	0.74	0.90	−8.07	8.42	23#5	0.57	0.75	1.62	2.19
12#4	0.94	0.95	0.22	1.15	28#1	0.72	0.92	1.13	1.42
12#5	0.83	0.78	−3.86	4.25	28#2	0.73	0.96	1.24	1.48

基于上述的研究工作,本文目前还存在一些不足及需要进一步研究的地方。实验中 GB-InSAR 观测距离较远,坝面结构成像叠掩较为严重,导致坝面局部区域数据缺失。距离较远也使

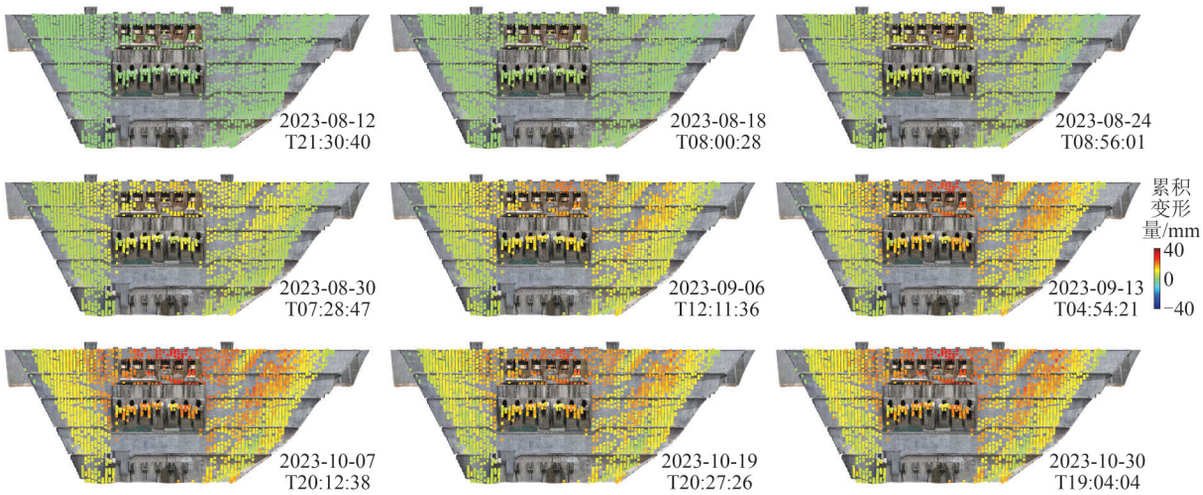


图14 坝面变形量分布的空间演化

Fig . 14 Spatial Evolution of the Deformation Distribution on the Dam Surface

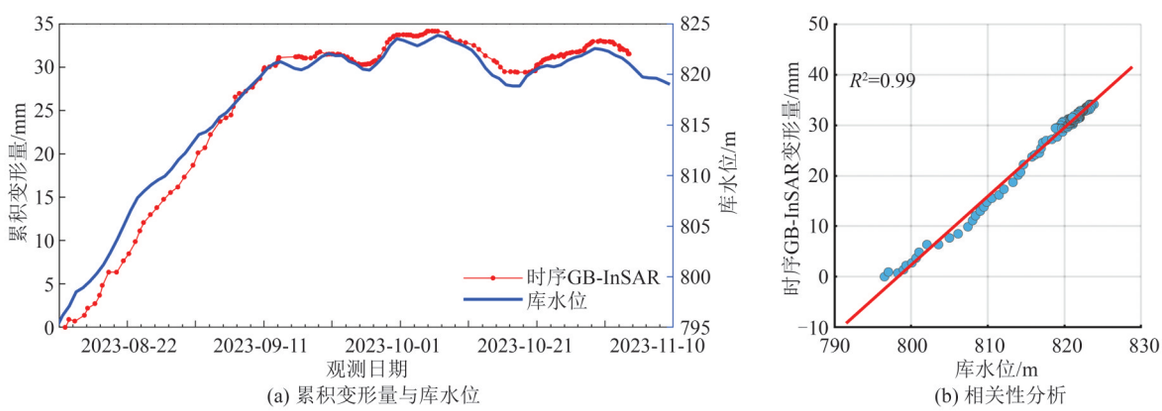


图15 16#坝段坝顶HQP变形趋势

Fig . 15 Deformation Trend of HQP at the Top of Dam Section 16

得信号传播路径上的大气相位变化更加复杂,但本文选用的大气模型相对简单,仅能够体现出雷达平面上的缓和变化的相位成分,难以区分大气在近坝竖直面上的变化差异和异常突变,这也容易导致部分干涉图或干涉图的局部区域出现大气改正异常。同时,单一雷达测站仅能提取LOS向变形,无法获取坝面实际的二维或三维变形。考虑到目前高分辨率三维成像雷达成本较高,在后续研究工作中可以实现中短距离多站监测模式,进一步提高大气改正建模精细化程度,提升GB-InSAR多维高精度监测能力,从而更加全面地解译大型复杂坝体结构的变形特征。

参 考 文 献

[1] WANG P, XING C, PAN X D, et al. Microdeformation Monitoring by Permanent Scatterer GB-SAR Interferometry Based on Image Subset Series with Short Temporal Baselines: The Geheyan Dam Case Study[J]. *Measurement*, 2021, 184: 109944.

[2] WANG X, WANG M N, JIANG R L, et al. Structural Deformation Monitoring During Tunnel Construction: A Review[J]. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2024, 14(3): 591-613.

[3] OMIDALIZARANDI M, KARGOLL B, PAFFENHOLZ J A, et al. Robust External Calibration of Terrestrial Laser Scanner and Digital Camera for Structural Monitoring[J]. *Journal of Applied Geodesy*, 2019, 13(2): 105-134.

[4] 吴星辉, 马海涛, 张杰. 地基合成孔径雷达的发展现状及应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 1073-1081.
WU Xinghui, MA Haitao, ZHANG Jie. Development Status and Application of Ground-Based Synthetic Aperture Radar[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 1073-1081.

[5] INTRIERI E, DI TRAGLIA F, DEL VENTISETTE C, et al. Flank Instability of Stromboli Volcano (Aeolian Islands, Southern Italy): Integration

of GB-InSAR and Geomorphological Observations [J]. *Geomorphology*, 2013, 201: 60-69.

[6] NURZAMAN F, IZUMI Y, SATO M, et al. A Robust APS Trend Estimation Technique for Ground-Based InSAR Measurements of Urban Landslide[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2024, 21: 4016905.

[7] GUNDERSEN R, NORLAND R, ROLSTAD DENBY C. Ground-Based Differential Interferometric Radar Monitoring of Unstable Mountain Blocks in a Coastal Environment[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(6): 914.

[8] MARTINEZ-VAZQUEZ A, FORTUNY-GUASCH J. A GB-SAR Processor for Snow Avalanche Identification[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(11): 3948-3956.

[9] LUZI G, PIERACCINI M, MECATTI D, et al. Monitoring of an Alpine Glacier by Means of Ground-Based SAR Interferometry[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4(3): 495-499.

[10] DI PASQUALE A, NICO G, PITULLO A, et al. Monitoring Strategies of Earth Dams by Ground-Based Radar Interferometry: How to Extract Useful Information for Seismic Risk Assessment[J]. *Sensors*, 2018, 18(1): 244.

[11] WANG P, XING C, PAN X D. Reservoir Dam Surface Deformation Monitoring by Differential GB-InSAR Based on Image Subsets[J]. *Sensors*, 2020, 20(2): 396.

[12] NICO G, CIFARELLI G, MICCOLI G, et al. Measurement of Pier Deformation Patterns by Ground-Based SAR Interferometry: Application to a Bollard Pull Trial[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2018, 43(4): 822-829.

[13] 徐甫, 李振洪, 宋闯, 等. 一种优化的地基SAR时序反演非局部相干点选取方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(11): 1884-1896.
XU Fu, LI Zhenhong, SONG Chuang, et al. An Enhanced Nonlocal Coherent Pixel Selection Method for Time Series Inversion of GBSAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(11): 1884-1896.

[14] WANG Z, LI Z H, LIU Y X, et al. A New Processing Chain for Real-Time Ground-Based SAR (RT-GBSAR) Deformation Monitoring [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(20): 2437.

[15] NOFERINI L, TAKAYAMA T, PIERACCINI M, et al. Analysis of Ground-Based SAR Data with Diverse Temporal Baselines[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(6): 1614-1623.

[16] PAN X D, XU Y M, XING C, et al. Study of a GB-SAR Rail Error Correction Method Based on an Incident Angle Model[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(1): 510-518.

[17] MO Y H, LAI T, WANG Q S, et al. A Novel Methodology for D-GBSAR Repositioning Error Compensation Based on Maximum Likelihood Estimation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2024, 62: 5204813.

[18] NOFERINI L, PIERACCINI M, MECATTI D, et al. Permanent Scatterers Analysis for Atmospheric Correction in Ground-Based SAR Interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(7): 1459-1471.

[19] TARCHI D, CASAGLI N, FANTI R, et al. Landslide Monitoring by Using Ground-Based SAR Interferometry: An Example of Application to the Tessina Landslide in Italy[J]. *Engineering Geology*, 2003, 68(1/2): 15-30.

[20] BERARDINO P, FORNARO G, LANARI R, et al. A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(11): 2375-2383.

[21] WANG Z, LI Z H, MILLS J. A New Approach to Selecting Coherent Pixels for Ground-Based SAR Deformation Monitoring[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, 144: 412-422.

[22] WANG P, GE L C, ZHANG B, et al. GB-SAR Geocoding Considering the Radar Attitude Inclination Angles for Building Facade Deformation Extraction[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2024, 45(22): 8455-8470.