

论文

基于时间序列 SAR 影像分析方法的三峡大坝稳定性监测

王腾^{①②*}, Daniele PERISSIN^{②③}, Fabio ROCCA^②, 廖明生^①

① 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079;

② Politecnico di Milano, Dipartimento di Elettronica e Informazione, Milan 20133, Italy;

③ 香港中文大学太空与地球信息科学研究所, 香港

* E-mail: wang.teng@gmail.com

收稿日期: 2009-09-06; 接受日期: 2010-05-25

国家重点基础研究发展计划(编号: 2007CB714405)、国家自然科学基金(批准号: 40721001)和三峡库区地质灾害防治重大科学研究项目(编号: SXKY3-6-4)资助

摘要 本文提出了结合永久散射体和准永久散射体干涉测量技术的时间序列合成孔径雷达(SAR)影像几何信息提取方案, 利用 2003~2008 年获取的 40 景 SAR 影像量测并分析了三峡大坝运行时的稳定性问题及其周边区域的形变规律. 我们发现在数据获取期间, 三峡大坝左段的时效沉降基本停止, 大坝形变受水位的影响较大, 季节性变化也有一定体现. 该实验结果和已发表的该坝段形变监测结果十分吻合. 在数据处理结果中我们还在大坝上游秭归县附近堤坝发现一处形变异常. 研究结果表明了时间序列 SAR 影像信息提取技术在大坝稳定性监测及坝区形变参数获取中的应用潜力.

关键词

三峡工程
形变监测
合成孔径雷达干涉测量
永久散射体技术

当前, 中国正处在一个基础设施建设高峰期, 一批大型工程纷纷建成投入使用, 长江三峡水利枢纽工程便是这些重大项目中具有代表意义的一个. 三峡工程是世界最大的水利枢纽工程, 其防洪、发电及航运三大功效带来了巨大的经济、社会和环保效益. 三峡大坝建成后形成了长达 660 km 的水库, 其蓄水后的库容水重力及其渗透作用对整个三峡地区地质稳定性的影响还在不断研究中^[1-3]. 除了上游水位的升高, 三峡大坝本身的重力也会对坝基所在地壳造成一定的压力, 从而产生形变.

任何大坝在建成投入使用后, 都不可避免的会发生形变. 通常, 微小的形变对于大坝的运行而言是

允许的, 但是, 当形变超过一定范围时就会影响大坝的正常使用, 造成安全隐患^[4]. 对于三峡大坝这样关系到长江中下游流域数亿人民生命财产安全的重大工程, 对大坝及其周边地区地表形变的长时间监测就显得更为重要^[5].

三峡工程的枢纽部分采用混凝土重力坝, 其形变类型主要分为两类: 一类是由于大坝的自身重力造成的垂直沉降, 对这部分形变而言, 其监测主要利用精密水准测量来获取高精度垂直沉降数据; 另一类是由于上游水压造成的垂直于大坝轴线的水平形变, 这类形变的观测比较复杂, 需要根据坝体的周边情况进行综合考虑, 其中传统的水平位移监测包括

视准线法、三角网交会法、边角网法等^[4]。近几年来,随着全球定位系统(GPS)技术的成熟,差分GPS技术也已经被应用在大坝水平位移监测中^[6]。

由于三峡大坝坝基建立在稳定性很高的地块上,其形变值一般都在毫米级,对形变监测的精度要求十分严格^[5]。虽然现有的形变监测系统已经能够获取一定数量的高精度大坝形变数据,但是无论何种监测手段,在坝区布设和维护观测点都是必要的,这也造成了坝区传统形变监测数据不可能有很高的空间分布。另外,有些观测手段,如精密水准测量,还需要一定的作业时间来获取测量数据。综合来看,传统的坝区形变监测技术能够在一定数量的观测点上获取高精度的形变监测结果,但大量的人力财力消耗都是必不可少的。

合成孔径雷达(SAR)作为一种工作在微波波段的相干成像雷达,由于具备大面积、全天时、全天候的数据获取能力,在传统光学传感器成像困难的多云多雨地区有着特别重要的意义^[7]。干涉测量(InSAR)技术利用雷达信号相位值的相干特性获取地表精确的几何信息,是SAR数据的一项重要应用手段。该技术的基本原理是通过SAR在不同位置获取的同一地区两景数据之间的相位差和轨道位置参数,结合两信号传播的几何关系反演地形参数^[7-12]。当地表参数已知并从干涉图中去除时,残余相干相位则与SAR传感器的位置无关,而代表了地表形变。作为InSAR技术的延伸,该技术被称为差分干涉测量(D-InSAR),能够实现较高空间分辨率的厘米级地表形变监测,并在地震、火山和矿区沉降等大范围形变监测上取得了成功应用^[13-17]。

常规D-InSAR技术的优势在于获取大范围的剧烈地表形变,但却无法满足大坝形变监测毫米级的精度要求。其原因主要有以下几方面:1)空间基线带来的频谱偏移影响了信号的质量,即空间去相干问题^[18];2)地面物理属性变化引起的时间去相干问题;3)不同时相的雷达波在传播过程中受到的大气不一致性影响而造成的大气效应误差^[19,20];4)系统热噪声,影像配准误差等。

针对上述问题,永久散射体(Permanent Scatterer, PS)技术的提出成为实现地表微小形变监测的突破口^[21-23]。与传统的D-InSAR技术不同,PS-InSAR技

术把注意力集中到了时间序列SAR数据集中有着稳定散射特性的PS点上。地面目标成为一个永久散射体必须满足以下三个基本条件^[21,22,24]:1)长时间内目标点物理属性保持稳定;2)目标足够小(小于影像的分辨单元),受空间去相干影响小;3)该目标后向散射系数远远高于其所在SAR影像分辨率单元内的其他目标。在由PS点构成的稀疏图上,根据地形相关相位、形变相位和大气效应相位三者不同的时空特性进行分离,能够最终获取高精度的形变监测结果^[25,26]。PS-InSAR技术利用近二十年来SAR数据的积累,克服了传统D-InSAR技术在时间、空间去相干及大气效应上的劣势,在地表高精度微小形变监测,尤其是城市沉降监测等应用领域取得了巨大的成功^[27-29]。与此同时,一些研究小组还开发出了在地球科学界普遍应用的开源系统^[30,31]。

PS-InSAR技术第一次利用星载对地观测数据将地表形变观测精度提升至毫米级,其贡献是毫无疑问的。但是,由于该技术对PS点选取的要求十分严格,在时间维度上部分保持相干性的目标和空间维度上的分布式(Distributed)目标中所蕴含的信息都被舍弃,这就造成了PS技术在人工地物缺乏的地区受到了一定限制。针对上述问题,通过采取降低选取PS点要求的策略和新的时空滤波手段,出现了利用小基线数据集提取地表地形参数和形变速率的新方法^[31-33]。通过对干涉组合策略的研究,本文作者提出了部分永久散射体技术,或称为准永久散射体技术(Quasi-PS, QPS)^[1]。这些技术将PS-InSAR技术的应用扩展到滑坡监测、断层形变研究等地质科学应用领域^[31,33-35],同时也为实现三峡坝区的形变监测提供了可能性。

从2003年起,欧洲空间局Envisat卫星搭载的ASAR传感器已经连续7年获取了三峡坝区的SAR数据(最短重访周期35天),随着三峡水利枢纽工程2009年的全面完成,本文尝试利用时间序列SAR数据集获取及分析大坝和其周边地区的地表形变情况。由于三峡坝区地表目标的分布十分复杂,我们提出了结合PS和QPS算法获取坝区形变参数的技术方案,并首次利用星载SAR对地观测数据获取了坝区形变结果,该结果与目前已公开发表的大坝形变监测结果在形变趋势上能够较好的吻合^[36],表明了时间序

1) Perissin D, Wang T. Repeat-Pass SAR Interferometry with Partially Coherent Targets. 已投稿至IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2010

列 SAR 数据集及相应的信息提取技术在大坝稳定性监测和坝区地表形变量测中的应用潜力。

1 时间序列 SAR 影像信息提取技术

在下面的讨论中, 我们首先简要回顾一下 PS 技术的基本原理及算法, 并在此基础上概述我们最新提出的 QPS 算法. 由于三峡坝区地表目标的分布十分复杂, 既有散射特性非常稳定的人工金属地物, 又有裸地、岩石等分布式目标. 本文将同时采用 PS 和 QPS 算法以兼顾观测点数量和形变监测精度两方面的要求。

1.1 PS 技术

我们将包含 N 幅单视复数 SAR 影像的时间序列数据集中的第 i 幅影像记为 $s_i (i = 1, 2, \dots, N)$. 由第 i 和第 k 幅 SAR 影像构成的干涉图可记为 $I^{i,k} = s_i \cdot s_k^*$. 这里*代表复数共轭运算. 假设目标 p_0 为参考点, 则干涉相位 $\Delta\phi_{p,p_0}^{i,k} = \angle I^{i,k}$ 将依赖于目标 p 与参考点 p_0 之间的高程、形变、大气扰动和噪声差异. 我们可以将两目标之间的高程和形变差造成的相位差记作^[9]:

$$\Delta\phi_{H,p,p_0}^{i,k} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{1}{R \sin \theta} \Delta h_{p,p_0} B_n^{i,k}, \quad (1)$$

$$\Delta\phi_{D,p,p_0}^{i,k} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta v_{p,p_0} B_t^{i,k}, \quad (2)$$

其中, $\Delta h_{p,p_0}$ 和 $\Delta v_{p,p_0}$ 分别为目标 p 和 p_0 之间的高程和形变速率差, $B_n^{i,k}$ 和 $B_t^{i,k}$ 分别代表 SAR 影像 i 和 k 之间的垂直于雷达视线向的空间基线和时间基线. λ 为雷达信号波长, R 为目标与卫星间斜距, θ 为 SAR 入射角.

在经典 PS 技术中, 通常通过最大化时间相干性 ξ_p 来估计目标高程和其沉降速率^[21]:

$$(\Delta\hat{h}_p, \Delta\hat{v}_p) = \arg\{\max\{|\xi_p|\}\}. \quad (3)$$

这里,

$$\xi_p = \frac{1}{M} \sum_{i,k} e^{j(\Delta\phi_p^{i,k} - \Delta\phi_{H,p}^{i,k} - \Delta\phi_{D,p}^{i,k})}, \quad (4)$$

式中, $\Delta\phi_p^{i,k}$ 为获取的干涉相位(经过平地效应去除和外部地形数据改正); $\Delta\phi_{H,p}^{i,k}$ 为式(1)中的高程相关相位; $\Delta\phi_{D,p}^{i,k}$ 为式(2)中的形变速率相关相位.

其中, 时间相干性的估计值 $\hat{\xi}_p$ 可以被近似为相位离差的函数: $\hat{\xi}_p \approx e^{-\delta_\phi^2/2}$ ^[23]. 最终 PS 技术所估计的高程和形变速率离差, 即精度指标 $\delta_{\Delta h}^2$ 和 $\delta_{\Delta v}^2$ 可以近似写作相位离差 δ_ϕ^2 , 干涉图几何与时间基线离差 ($\delta_{B_n}^2$ 和 $\delta_{B_t}^2$) 及干涉图数目 M 的函数^[23]:

$$\delta_{\Delta h}^2 \approx \left(\frac{\lambda R \sin \theta}{4\pi} \right)^2 \frac{\delta_\phi^2}{M \delta_{B_n}^2}, \quad (5)$$

$$\delta_{\Delta v}^2 \approx \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \frac{\delta_\phi^2}{M \delta_{B_t}^2}. \quad (6)$$

式(5)和式(6)表明 PS 技术获取的高程及形变速率精度是时间相干性和时空基线分布的函数. 该模型与干涉组合方式无关, 因此, 其表达式适用于所有时间序列 InSAR 影像分析技术.

1.2 QPS 技术

假设我们用图论中的顶点(Vertex)和边(Edge)来分别代表 SAR 影像和两幅 SAR 影像所生成的干涉图, 则传统 PS 技术的干涉组合策略生成的是一种星状图, 即干涉相位由单一主影像与所有影像进行干涉处理后产生. 这样做的好处是保证了形变监测在时间序列上的连续性, 同时使得在时间维上的相位解缠成为可能^[31]. 更进一步说, 这种干涉组合策略使得各个干涉图的时间、空间基线配置较为分散, 即在式(5)和式(6)拥有较高的 $\delta_{B_n}^2$ 和 $\delta_{B_t}^2$ 值, 从而能够获取较高的高程和形变速率估计精度. 但是, 这一组合方式使得蕴含在部分时间保持相干的目标和分布式目标中的信息难以得到充分利用. 如果继续从图论的角度来考虑时间序列 SAR 影像集的组合问题, 在保持图的连通性即保持形变观测连续性的同时, 我们需要给出一个评价干涉质量优劣的标准来获取不同于 PS 技术的最优干涉组合.

在 InSAR 研究中, 空间相干性(简称相干性)测度是评价干涉相位质量最常用的一种指标. 相干性定义了一对复信号间的相似程度, 它的数学定义为^[37]:

$$\gamma = \frac{E\{s_i \cdot s_k^*\}}{\sqrt{E\{|s_i|^2 \cdot |s_k|^2\}}}, \quad (7)$$

其中 $E\{\cdot\}$ 为数学期望, s_i 和 s_k 为组成干涉图的两幅 SAR 影像. 由于在实际应用中无法求得真正的数学

期望值, 因此通常采用对一个固定窗口下信号的空间平均来代替数学期望求得相干系数的一个估计值:

$$\hat{\gamma} = \frac{\sum_{n=1}^L s_{i,n} s_{k,n}^* \cdot e^{-j\phi(n)}}{\sqrt{\sum_{n=1}^L |s_{i,n}|^2} \sqrt{\sum_{n=1}^L |s_{k,n}|^2}} \quad (8)$$

这里, n 代表了在一个相干估计窗口中的第 n 个像素. 由于相干信号中地形造成的干涉相位会使相干估计值偏低, 可以通过外部数字高程模型 (DEM) 获取这部分干涉相位 $\phi(n)$, 并加以去除^[37].

假设时间序列 SAR 影像的数目为 N , 生成的干涉图数目为 M , 则要实现干涉组合的相干性最大化, 需要首先估计所有可能干涉图的相干性, 即要生成 $M = N \cdot (N - 1) / 2$ 幅相干图, 这对计算机的计算速度和存储量要求都十分巨大. 为解决这一问题, 首先, 我们对时间序列 SAR 影像的幅度值进行分析, 得到幅度离差值^[21]较低的像素, 随后计算这些像素在每对干涉组合中相干性, 并用其平均值 $\hat{\gamma}$ 作为该干涉组合相干性的近似. 如果给定 $1 - \hat{\gamma}_{i,k}$ 作为连接 SAR 影像 i, k 边的权重值, 则我们可以利用图论中的最小生成树算法^[38], 如式 (9) 所示, 得到最优干涉子集 $\{I_{i,k}\}$:

$$\{I_{i,k}\} = \min \sum (1 - \hat{\gamma}_{i,k}) \quad (9)$$

在按照最小生成树原理得到干涉图序列的基础上, QPS 技术与 PS 技术在时空维度上均有一定的区别. 在时间维度上, 由于这一干涉组合策略生成的干涉图中包含了一些只在部分时间保持相干性的目标, 所以相干估计值 $|\hat{\gamma}_p^{i,k}|$ 可以作为权重引入式 (4) 中, 并重新得到 QPS 技术下的时间相干性定义:

$$\xi_p = \frac{\sum_{(i,k)} |\hat{\gamma}_p^{i,k}| e^{j(\Delta\phi_p^{i,k} - \Delta\phi_{H,p}^{i,k} - \Delta\phi_{D,p}^{i,k})}}{\sum_{(i,k)} |\hat{\gamma}_p^{i,k}|} \quad (10)$$

由于相干估计算法 (8) 在低相干区域存在着一定的高估现象^[39], 当目标在一些干涉图中完全去相干, 即目标消失时, 其相干性通常并不为 0. 针对这一现象, 我们通过设定一定的低相干阈值 (如 0.2) 来避免这些干涉相位参与时间相干性 ξ_p 的最大化过程. 换句话说, 当目标在 SAR 影像 i, k 生成的干涉图中相干性小

于 0.2 时, 式 (10) 中的 $|\hat{\gamma}_p^{i,k}| = 0$, 即, 在最大化 ξ_p 的过程中, 这一干涉相位将不参与迭代计算.

另一方面, 在空间维度上, 考虑到分布式目标中所蕴含的信息受到垂直基线去相干的影响^[40], 在传统 PS 技术中通常不被采用的空间滤波手段在 QPS 技术中却需要应用在干涉图中以获取更多的信息.

QPS 技术通过最大化目标的时间相干性因子 ξ_p , 在时间序列 SAR 数据集中选择具有较高相干性的干涉图子集提取目标的高程和形变速率信息. 虽然 QPS 算法的提出改变了 PS 技术的数据组合策略, 但是它却可以十分方便的直接嵌入在标准的 PS 数据处理流程中而无需对原有算法进行大的改动. 另外, PS 技术的理论精度模型式 (5) 和式 (6) 同样适用于评价 QPS 技术获取的高程和形变量测值.

1.3 PS 与 QPS 的联合分析

QPS 技术的提出主要是为了解决在非城区 PS 点不足的情况下如何更好的提取时间序列 SAR 数据集中蕴含的相干信息的问题, 但它也有其自身的缺点, 即信息提取的精度不够. 这是因为具有高相干性的干涉图主要集中在短时间、空间基线数据中, 根据式 (5) 和式 (6), 较小的 $\delta_{B_n}^2$ 和 δ_B^2 值限制了量测精度的提高. 另外, 空间滤波的应用也会影响目标信息的提取精度.

综合 PS 和 QPS 两种技术手段来看, 二者的互补性是十分明显的, 在城市等人工地物稳定且密集的区域, PS 技术无疑能带来精度更高的观测结果, 而在目标的点状特性不明显和在时间维上不稳定的区域, QPS 则具有更好的适应性.

本文的研究对象为三峡坝区, 在这一区域, 不仅有坝体上的稳定点目标, 还有大坝周边许多分布式目标和大坝施工过程中消失和新出现的目标. 大量分布式目标的存在导致我们在坝区无法获取足够数量的 PS 点. 而 QPS 技术虽然能够提高观测点的数目, 但由于其多采用短时间基线的数据来形成干涉, 在高精度形变分析中往往难以满足大坝稳定性监测的要求.

在这种情况下, 单凭 PS 或 QPS 技术都无法获得满意的结果. 另外, 三峡大坝为大型人工地物, 整个坝区的自然地貌均变化较大, 非时效性 DEM 无法满足 PS 技术所需要地形起算值. 因此, 在三峡坝区,

我们提出了结合 PS 和 QPS 技术获取该地区地形和形变参数的解决方案. 即先利用 QPS 技术对坝区数据进行处理, 获得目标高程值并分析其形变趋势. 随后, 将其作为初始值, 重新对数据进行 PS 分析, 并结合三峡总公司提供的水文数据, 对大坝形变进行更进一步的解译.

2 试验区 and 实验数据

三峡坝区位于距湖北省宜昌市区 40 km 的三斗坪镇. 坝区地势开阔, 坝址所在地江中原有一小岛(中堡岛), 有利于大坝的分段施工. 坝区地质条件为坚硬完整的花岗岩体, 岩石抗压强度较高. 岩体内断层、裂隙不发育, 且大多胶结良好, 透水性微弱, 十分利于修筑混凝土重力坝. 两岸山体岩石风化壳较厚, 一般在 20~40 m, 坝址区及水库区地震活动强度小、频度低, 属弱地震环境^[41].

坝区各部分如图 1 所示. 坝区内分布着裸地、山丘、坝体、船闸等各种自然及人工地物. 其中水力枢纽建筑分为坝体、发电站和通航设施三部分. 大坝主体长约 2355 m, 最高海拔高程 185 m, 坝基宽 115 m, 坝顶宽 40 m. 大坝泄洪坝段位于河床中部, 即原主河槽部位, 位于大坝底部的 23 个泄洪闸起到分洪和排沙的功效. 发电设施位于泄洪坝段的两侧, 分别被称为左岸和右岸电站, 共计 26 套水力发电机组被安置在这些厂房中. 其中左岸电站第一台发电机组于

2003 年开始并网发电, 右岸电站 2006 年修建完毕并于 2008 年全部并网发电. 三峡工程的通航设施均布置于左岸, 由永久船闸和升船机构成.

本文采用 Envisat 卫星 2003 年 8 月至 2008 年 4 月获取的 40 景 SAR 影像作为数据源. 该 SAR 传感器波长为 5.62 cm, 空间分辨率约为方位向 5 m, 距离向 25 m. 本文还利用了三峡工程总公司公布的坝区水文数据作为参考数据. 图 2 显示了数据的获取时间和相应的大坝上游水位提升情况. 从中可以发现, 在 2003 年初第一景 SAR 影像获取前水位提升了将近 90 m, 在 2006 年中期, 水位有一次近 20 m 的提升. 后文我们将从时间序列 SAR 影像集中提取的信息来分析水位提升对大坝稳定性的影响.

图 3 为这 40 景 SAR 影像的幅度平均值, 由于雷达信号指向大坝下游面(见图 1), 因此, 位于坝后的发电站、泄洪闸、坝体等均清晰可见. 在数据获取的大部分时间, 右岸大坝及电站正处在施工状态, 所以经过平均后的幅度影像实际显示了整个施工现场的目标. 另外, 右岸围堰在 2006 年 6 月份经过爆破拆除, 但是在图 3 中依然可见.

3 结果及讨论

3.1 干涉组合

在进行时间序列分析前, 我们将这 40 景 SAR 影

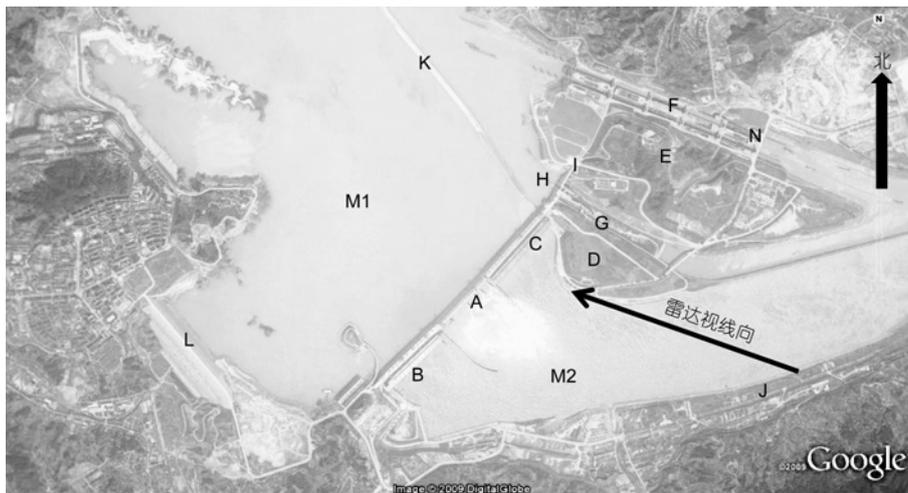


图 1 三峡大坝坝区示意图

光学影像来自 Google Earth 软件. A, 泻沙孔; B, 右岸电站; C, 左岸电站; D, 大坝观景台; E, 坛子岭; F, 永久船闸; G, 临时船闸; H, 船舶升降梯; I, 185 m 平台; J, 纪念公园; K, 护波堤; L, 护堤; M1, 长江上游; M2, 长江下游; N, 船闸观景平台

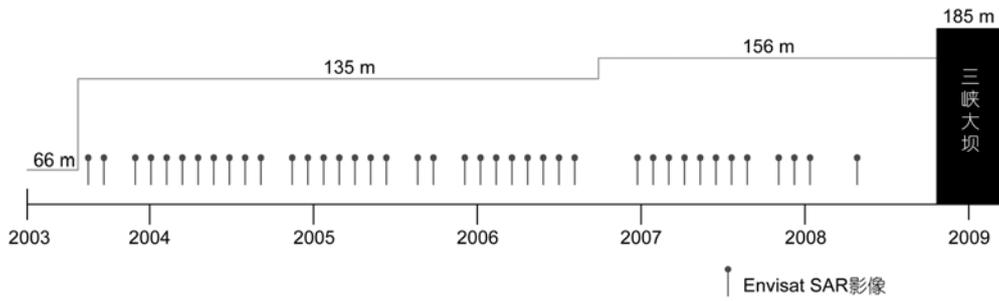


图2 Envisat 数据获取时间及相应的大坝上游水位变化

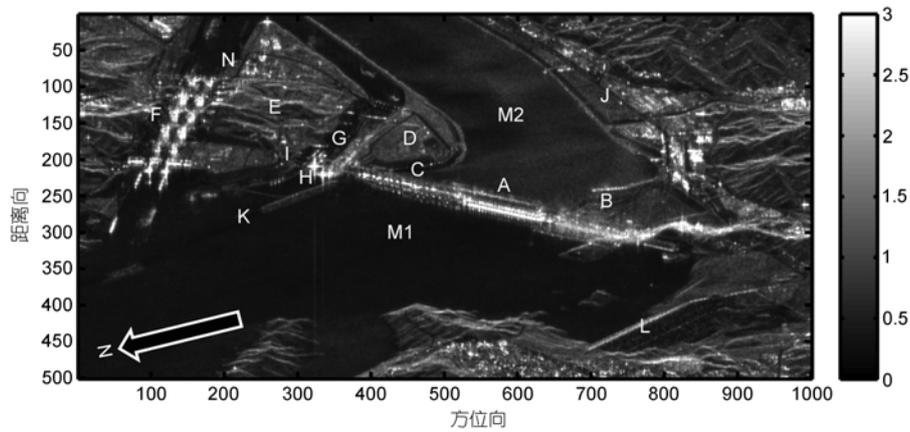


图3 SAR 影像幅度平均值

图中字母标识含义与图1中相同

像进行了距离向 2 倍过采样, 并以 2005 年 9 月 25 日获取的影像作主影像, 其余 39 景数据在进行重采样后与主影像配准. 通过上述步骤, 我们可以得到距离向约 12 m, 方位向约 5 m 分辨率的 40 景 SAR 影像.

根据前面的讨论, PS 与 QPS 技术的干涉组合策略存在着不同. 图 4(a)和(b)分别显示了以 SAR 影像为顶点; 干涉图对为边构成的图(Graph). PS 技术生成一个以主影像为中心的星状图, 而 QPS 技术生成的为图论中的最小生成树. 图 4(b)中边的颜色代表了该干涉图的相干性大小. 最小生成树算法不但能够实现相干组合的最优化, 而且图论中树的特性保证了得到的干涉组合矩阵是可逆的, 可以很方便地进行地形和形变参数反演. 两种干涉组合对应的空间和时间基线标准差分别为: $\delta_{PSBn} = 258 \text{ m}$, $\delta_{PSB_i} = 512 \text{ d}$; $\delta_{QPSBn} = 58 \text{ m}$, $\delta_{QPSB_i} = 210 \text{ d}$. 结合式(5)和(6)我们可以发现, 在相同的时间相干性条件下, 由于选用时空基线分布较小的干涉组合, QPS 技术获取的高程和形变误差在理论上均要弱于 PS 技术.

生成干涉组合后, 我们将所采用的干涉图的相干值进行平均, 选取平均相干性大于 0.25 的像素作为初始目标候选点. 由于相干性的计算是在 11×11 像素滑动窗口内进行的, 我们通过对 SAR 影像的幅度分析去除重复选取的像素^[28]得到最终的目标候选点. 后续计算中检测到的 PS 和 QPS 点将从这些候选点中产生.

3.2 地形参数及形变监测结果

在时间序列 SAR 数据分析中, 航天飞机雷达测图计划(SRTM)获取的 DEM 通常作为初始地形参数进行解算^[12], 但是, 由于 SRTM 任务于 2000 年执行, 此时三峡大坝的坝体施工还在进行中, SRTM DEM 无法真实反映坝区的地形状态. 因此, 本文首先采用 QPS 算法获取了坝区的地形数据. QPS 算法在这一试验区获取了较高的时间相干性值, 显示于图 5. 从中可以看出, 大坝左岸电站和坝顶部分由于在数据获取时保持稳定状态, 拥有较高的时间相干性. 另外, 除去植被覆盖区域, 坛子岭, 及大坝上游的护堤, 属

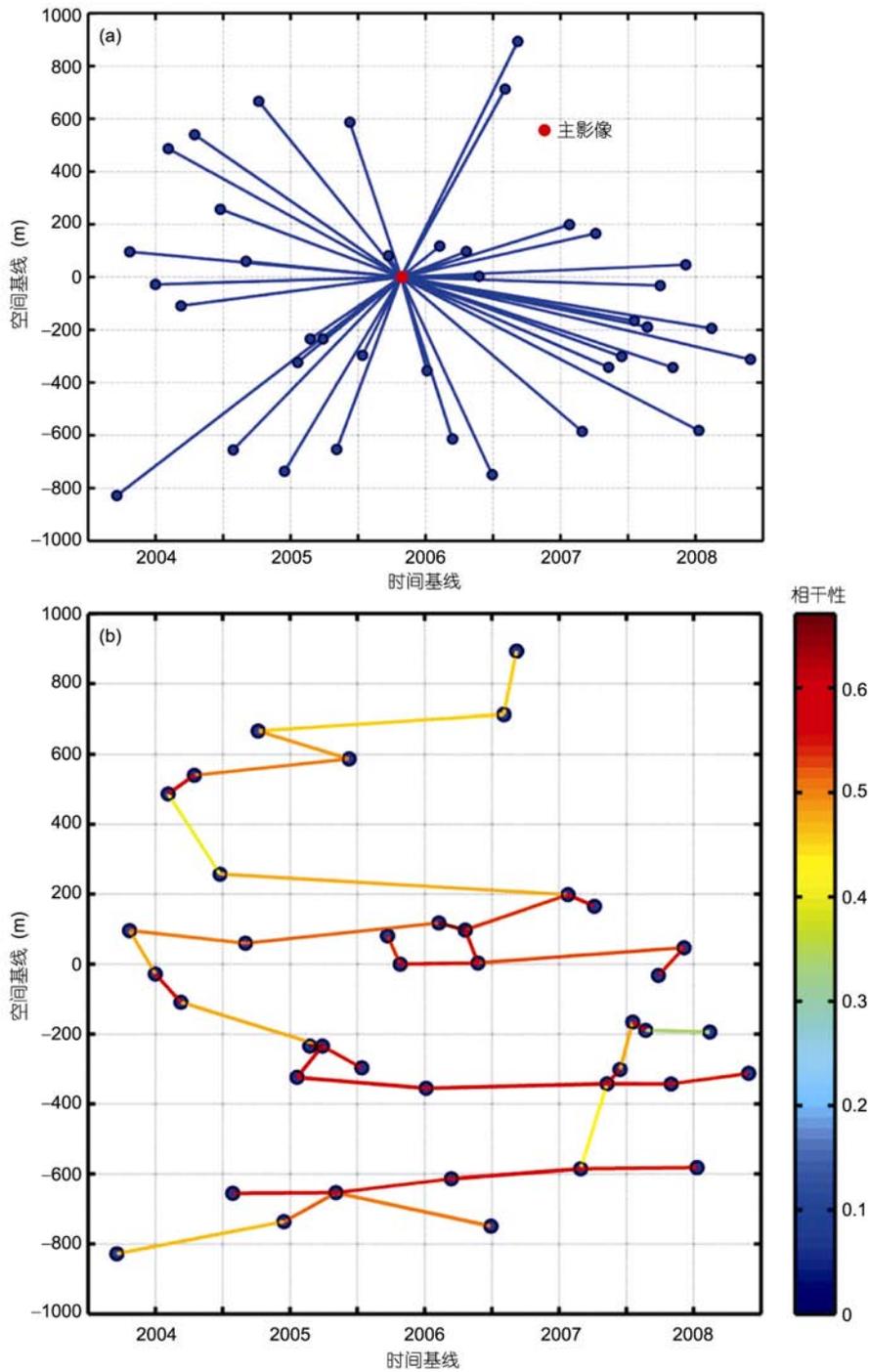


图 4 不同时间序列 SAR 影像分析技术的干涉组合策略

图中每一个点代表在不同时间与空间位置获取的一景 SAR 影像。(a) PS 技术干涉组合图, 图中红点为主影像, 2005 年 9 月 25 日获取。(b) QPS 技术干涉组合图, 连接两 SAR 影像边的颜色代表该干涉图的相干性

于比较稳定的分布式目标, 时间相干性也较高。反之, 泄洪坝段、通航设施和大坝右段相干性较低, 我们将

在下面讨论中分析其产生原因。根据 SAR 影像数目及干涉组合中空间基线的分布情况, 我们设定 0.75

作为时间相干性阈值提取 QPS 点. 在 60 km^2 范围内得到 QPS 点 11463 个, 其高程和形变速率信息显示于图 6 和 7.

根据式(5), QPS 技术在该地区获取的高程精度在理论上优于 3 m. 在无地面实测数据的情况下, 我们主要依靠几个已知大坝高程点对反演结果进行分析和验证, 主要表现在: 1) 大坝左岸电站尾水平台高程 83.5 m; 2) 电厂厂房顶高程为 117.2 m; 3) 大坝坝顶高程为 185 m; 4) 大坝中段溢流堰高程 158 m. 结合图 3 中的标识和图 6 可以看出, QPS 技术反演的高程值与真实情况相符. 另外, 由于大坝下游面朝向雷达视线方向, 大坝的高程值明显可以分为 3 个部分: 左岸电站尾水平台, 电厂厂房屋顶和坝顶. 在大坝中段的吊装设备在 QPS 分析结果中的高程为 200 m 左右. 在永久船闸处, 虽然 QPS 点数量不多, 但也反映出了五级船闸的高程变化. 上述分析表明, 在缺乏时效性的外部 DEM 时, QPS 技术获取的高程十分可靠, 并可作为 PS 技术的起算高程, 节约 PS 技术的数据处理时间.

图 7 显示了 QPS 技术获取的年度形变速率图. 虽然 QPS 技术采用的干涉图时间基线较短, 在获取精确形变监测值时有一定劣势, 但在形变趋势量测上还是保持了较高的精度和可靠性, 其理论精度约为 1 mm/a .

从图 7 中我们可以发现三峡大坝在这一时间段保持了较高的稳定性, 形变值较小. 决定大坝形变的 3 个主要因素为^[41]: 水压分量, 温度分量, 时效分量. 其中水压分量为上游水位压力造成的大坝形变; 温度分量是由于坝体混凝土变温引起的形变; 时效分量是坝体在建成之后, 基岩沉降并达到稳定状态的过程中产生的形变. 由于 2003 年后, 大坝的左段施工已完成, 该坝段自身重量造成的时效变形已基本结束, 坝地质状态趋于稳定^[36]. 另外, 仅通过年度形变速率无法观测到大坝形变的温度分量. 这里我们仅从水压分量的角度讨论 QPS 技术观测到的形变结果.

如图 8 所示, 水压分量造成的大坝形变有 3 种类型^[42]: 1) 水压对库区基岩的作用使库区基岩倾斜, 坝体产生向上游的倾斜变形; 2) 上游水位对坝基的推力使坝体产生向下游的位移; 3) 坝体在水压作用

下产生向下游的挠曲变形(分别对应图 8(a)~(c)). 图 7 的观测结果显示大坝左段在坝顶处有远离雷达的微小形变趋势, 在左岸电站坝段有朝向雷达的微小形变趋势. 结合这 3 种类型的形变与雷达视线向之间的关系, 观测结果与图 8(a)中显示的形变类型相符. 据此我们推测在形变趋势上, 上游水位对坝基的压力造成的大坝轻微倾斜是其在一段时间产生形变的主要因素. 但是, 造成大坝形变的原因十分复杂, 形变本身也很难仅从年度形变速率来得到精确地解译, 在下面的分析中, 我们还将结合 PS 技术获取的时间序列形变结果来进一步分析大坝的形变规律.

对大坝周边区域而言, 在大坝左岸 QPS 处理结果中发现了一部分沉降漏斗, 尤其是在沿大坝轴线方向延伸至临时船闸和永久船闸之间区域的沉降尤其明显. 我们推测这是由于通航设施的建设造成了这一区域的地下水分布发生了变化, 出现了地表结构下陷. 另外在靠近江岸的部分地段也出现了轻微的沉降现象. 综合图 7 看, 地表沉降多发生在长江水域附近, 而最大的沉降出现在大坝上游秭归县附近的护堤. 这一部分护堤沿江岸斜坡建设, 有一定的下滑趋势, 从我们得到的结果看, 年沉降量相对周边区域超过了 10 mm, 值得有关部门注意.

在 QPS 数据处理结果的基础上, 我们对该数据集进行了 PS 分析. PS 技术的优势在于根据相位残余序列精确获取 PS 点的时间序列变形, 从而能够结合水位和温度的变化对大坝形变进行进一步分析. 我们同样设定时间相干性 0.75 作为 PS 点的选取阈值, 但仅得到 2000 余个 PS 点, 主要分布在大坝及观景平台等人工地物密集的区域.

经过前面的分析我们可以假设时效分量, 即在大坝刚完成浇筑时的坝基沉降已基本结束, 这时的大坝形变主要由水压分量和温度分量造成. 图 9(a)为大坝左段坝顶一 PS 点, (b)为左岸电厂尾水平台上一 PS 点. 图中显示了这两个典型 PS 点经过分析后的相位序列. 图 9(c)和(d)为数据获取时大坝上下游水位差和上游水位²⁾, 从中可以看出, 二者的变化趋势基本相同. 图 9 中三条红色虚线为大坝上下游水位差达到高点的时间, 这三条线将数据获取时间按照水位变化分为四个时间段 I~IV, 红色三角形表示了大坝右岸围堰的爆破拆除时间.

2) 坝区水文数据由三峡建设总公司网站(<http://www.ctgpc.com.cn>)获得

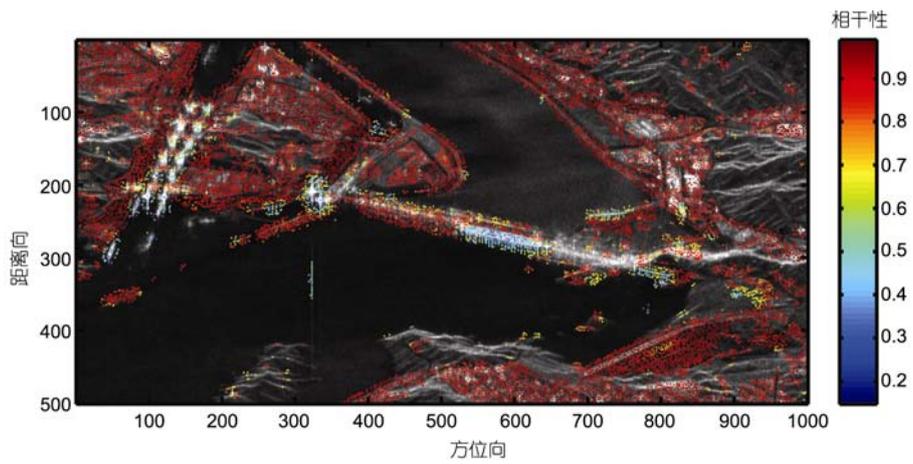


图 5 QPS 技术获取的目标候选点时间相干值
背景为 SAR 影像幅度平均值

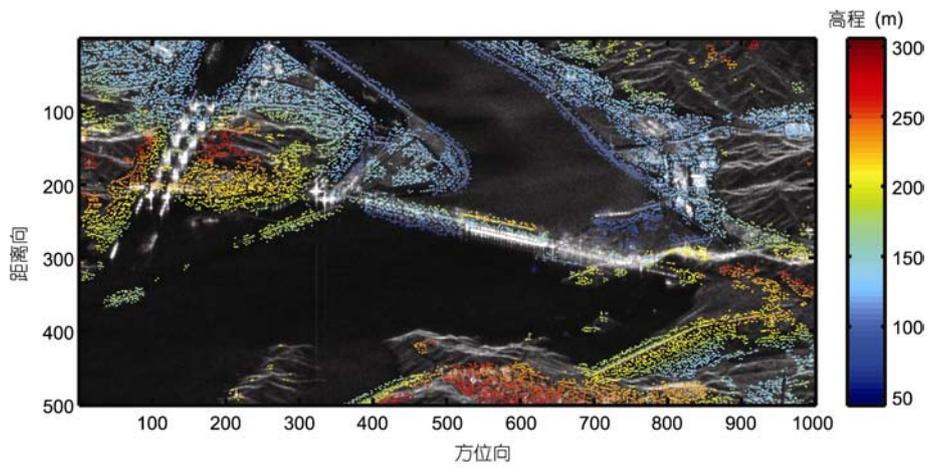


图 6 时间相干性高于 0.75 的 QPS 目标点上获取的高程值

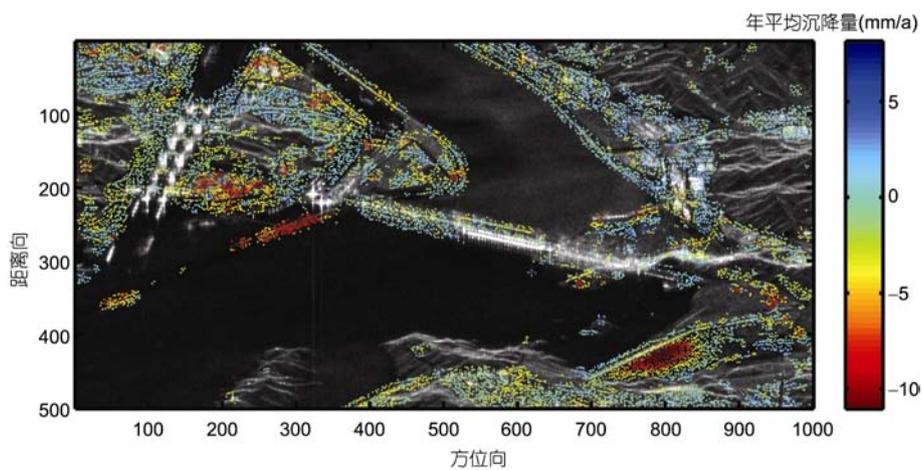


图 7 时间相干性高于 0.75 的 QPS 目标点上获取的年平均降水量

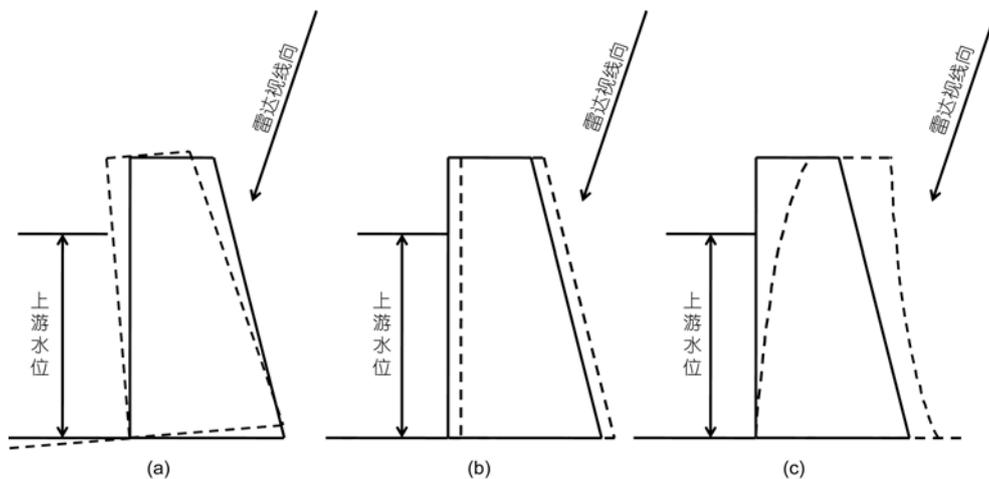


图8 水压分量造成大坝形变的三种类型示意图及与雷达视线向关系

(a) 水压对库区基岩的作用使库区基岩倾斜, 造成坝体产生向上游的倾斜变形; (b) 坝体对坝基的水平推力使坝体产生向下游的位移; (c) 坝体在水压作用下产生向下游的挠曲变形

PS 技术得到的形变相位显示, 在时间段 I~III 期间, 大坝在上游水位升高并达到水位差高点后形变值变化较为剧烈, 但经过一定时间在高水位的运行后, 形变趋于稳定. 而在 2006 年 6 月大坝右岸围堰爆破拆除后, 大坝首次进行 156 m 高水位运行时, PS 结果显示残余相位的稳定性有了较大的降低, 出现了一定程度的振动. 另外, 由于大坝的热胀冷缩效应造成的季节性形变也可以在每个时间段大坝运行的稳定期观察到. 通过对图 9(a)和(b)的残余相位比较还可以发现, 位于坝顶的 PS 点在形变值上要大于位于坝底的 PS 点. 这一现象与温度分量对坝顶的影响较大的结论相符^[42].

综合 QPS 和 PS 技术获取的大坝形变量测结果, 我们认为三峡大坝左段部分在 2003~2008 年的运行期内坝顶存在朝向上游方向的轻微变形, 坝底左岸电厂部分有轻微抬升, 大坝形变的时效分量基本消失, 仅存在由于水位和温度效应造成的微小形变. 为了验证本文获取的大坝形变监测结果, 我们查阅了文献[36]. 文献作者通过多年对大坝的形变监测数据给出的观测结果可以总结为以下两个方面(仅选取与 SAR 数据获取时间相符部分结果): 1) 垂直位移: 坝基沉降基本稳定, 且略有回弹. 2) 水平位移: 坝基水平位移较小, 大坝 175.0 m 高程的水平位移朝向上游. 这两点与我们得到的观测结果十分相吻合.

3.3 低时间相干性区域原因分析及结果解译

从图 5 可以看出, 坝区的低时间相干区域主要集中在大坝的中右段及通航设施. 由于通航设施在船只经过时需要不断开启和闭合, 在时间相干性上无法满足要求. 而右岸电站部分在数据获取期间正处在施工建设阶段, 大部分区域甚至无法找到候选点, 但是 QPS 技术仍然获得了右岸围堰的地形及形变信息. 对于通航设施, 我们在闸门顶部的混凝土平台上也能够得到一定的监测结果. 这验证了 QPS 技术在地表环境处在复杂变化时的适应性.

大坝的泄洪坝段存在着很多候选点, 但是它们的时间相干性较低. 通过对 40 景 SAR 影像幅度信息进行分析我们发现, 这 40 景数据中存在着大坝放水 and 蓄水两种状态. 由于闸门的开启和水流的散射作用, 当大坝开闸泄洪时, 我们在这一区域无法获取任何信号. 这也造成了该坝段时间相干性急剧降低. 图 10(a)和(b)显示了不同状态下大坝 SAR 幅度影像的对数平均. 通过对大坝处在这两种状态下 SAR 影像的比较, 图 10(c)显示了泄洪坝段的幅度影像对数差异, 其中大坝闸门在不同散射状态下的回波差异使我们甚至能够观测到每一个泄洪闸门, 这在中等分辨率 SAR 影像中是十分难得的. 当前由于闸门处于闭合状态时的数据数量还不足以进行可靠的时间序列分析, 因此我们现在还无法获取泄洪闸门的形变信息. 但是, 随着数据的不断积累和近几年来高分辨率

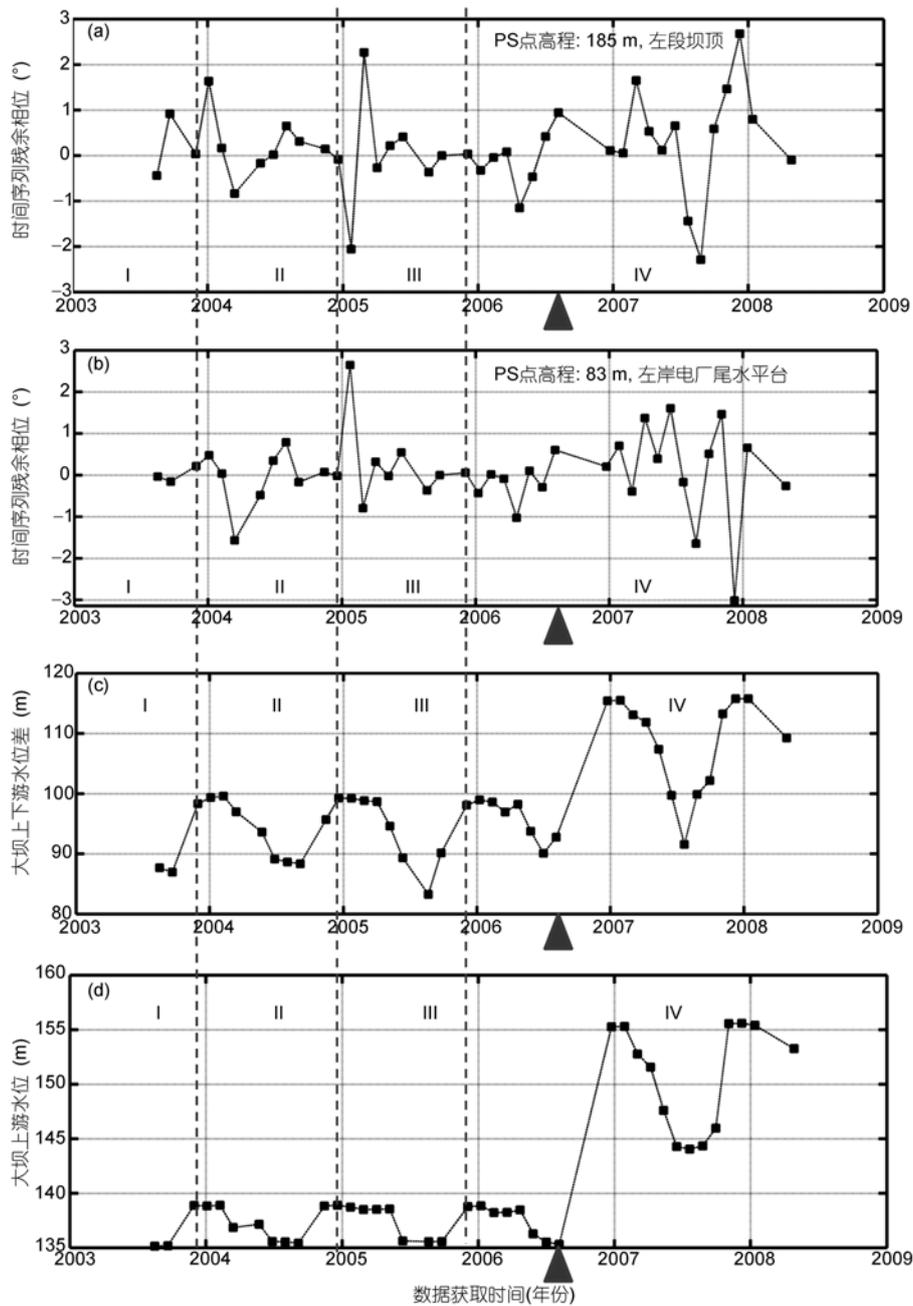


图9 PS点残余相位与大坝上下游水位差关系示意图

横轴为时间序列 SAR 影像获取时间. (a), (b) 分别为大坝左岸坝顶和坝底两典型 PS 点. 纵轴为 PS 点残余相位, 1° 相位差异约代表 4.5 mm 形变差异. (c) 纵轴为数据获取时大坝上下游水位差. (d) 纵轴为数据获取时大坝上游水位. 3 条虚线标明了水位差达到高点的时间, 并将数据获取时间按照水位变化分为 4 个时间段, 用罗马数字 I-IV 标识. 红色三角形表示大坝右岸围堰爆破拆除时间

SAR 卫星数据的获取, 相信我们也能够获取大坝右岸电厂坝段和中间泄洪坝段的形变数据. 另一方面, 随着 SAR 影像分辨率的不断提高, 单一像素的覆盖面积越来越小, 在该分辨率单元内只有唯一的后向

散射系数较大的目标可能性变大. 因此, 在高分辨率 SAR 影像上能够识别更多的点目标, 即增加 PS 点的获取数目. 如果能够在大坝上识别更多的 PS 点, 将使我们能够更加精确的分析大坝的形变规律, 并使

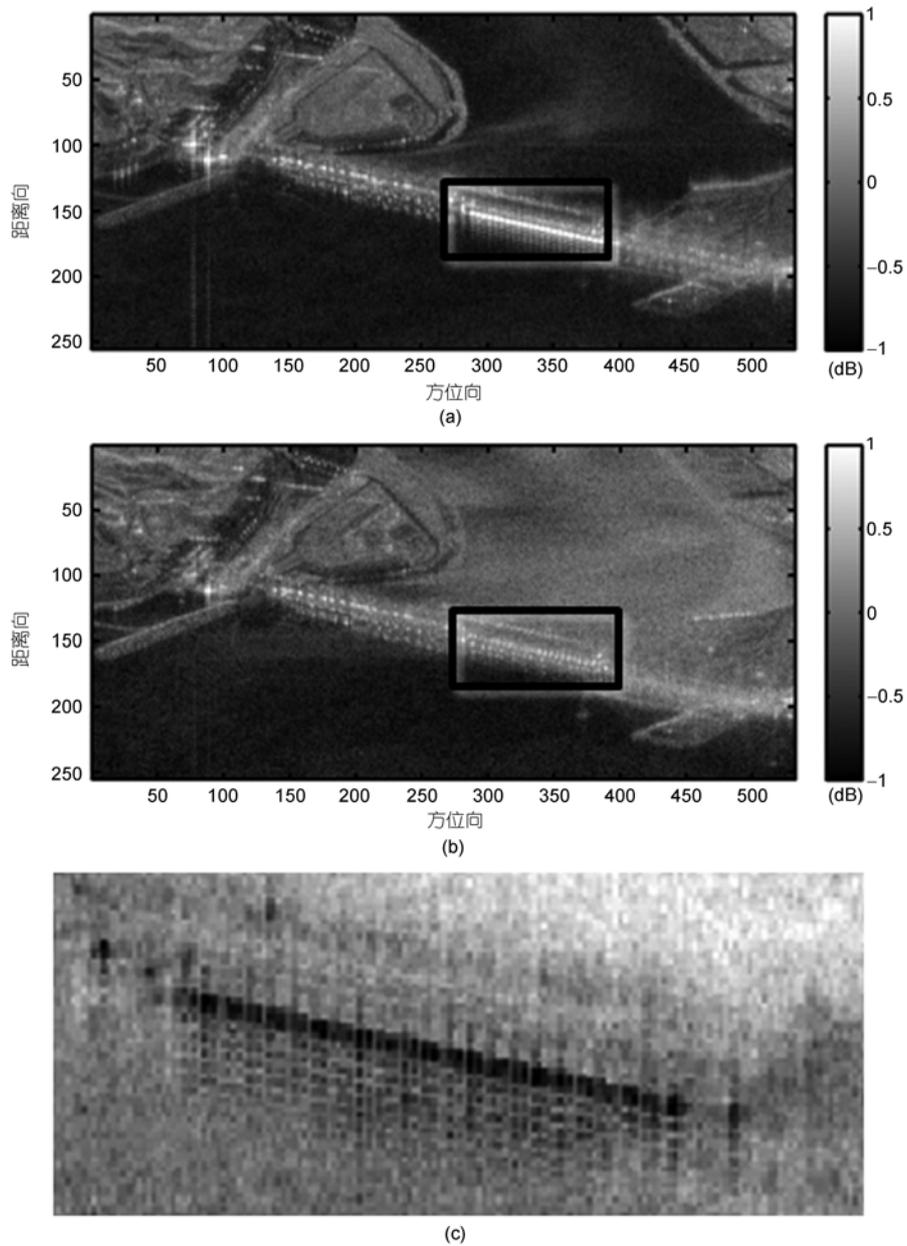


图 10 大坝泄洪闸处在不同状态下的幅度影像对数平均值及其差异

图中黑框标识处为泄洪闸. (a) 泄洪闸处于闭合状态下; (b) 泄洪闸处于开启状态下; (c) 二者之间对数影像差异值在泄洪闸处的放大影像. 不同泄洪孔闸门清晰可辨

获取大坝的三维结构模型和不规则形变成为可能.

4 结论

本文结合点目标和分布式目标的特点, 提出了 PS 和 QPS 技术相结合的数据处理方案, 分析了时间

序列 SAR 数据集在三峡坝区实施形变监测的可行性并给出了形变监测结果. 与传统形变监测手段相比, 时间序列 SAR 数据集在大坝稳定性监测及坝区形变监测中的优势主要可以体现在以下几个方面: 1) 无需人工测量和布设监测点, 如有必要, 在坝区一次性布设少量的角反射器可以起到提高量测精度的效果,

但角反射器的布设不是必需的,例如本文获取的结果均无角反射器的参与;2) SAR 影像的覆盖范围大,1 景 SAR 影像通常可以覆盖 100 km×100 km 区域,整个三峡库区 7~8 景 SAR 数据即可全部覆盖,在这样一个尺度上,我们既可以研究坝区的精确形变,也可以分析整个库区的地质变化造成的形变,(我们已经获得了巴东地区的形变监测结果^[35]);3) PS-InSAR 技术能够提供的量测点密度远远高于传统形变监测手段,在坝区,每平方公里可以观测到数十个甚至上百个 PS 和 QPS 点。

时间序列 SAR 影像进行形变监测的优势是能够大面积、高密度地获取 PS 点间精确的几何形变参数差异,该技术与传统形变监测手段的互补性十分明显,例如,差分 GPS 技术能够获取观测站毫米级的精

确形变监测量,但通常无法保证足够的观测点数目和覆盖面积.如果能将二者结合起来,利用差分 GPS 技术获取的精确形变模型作为时间序列 SAR 影像分析技术的起算模型,并将 GPS 观测站作为其解算参考点,相信能够在很大程度上提高本文技术手段获取的形变监测结果的精度,同时还能够提高差分 GPS 技术的覆盖面和监测点数目,从而使我们能够全面掌握大坝及周边地区的形变规律,对各种形变异常做到提前发现、提前采取措施.随着新一代 SAR 卫星的发射成功,分辨率更高,重访周期更短的 SAR 数据集将进一步提高时间序列 SAR 影像分析的形变参数获取精度^[43,44],使之与 GPS,精密水准测量等技术手段一道,长期提供高密度,高时效性的大坝稳定性及坝区形变监测结果。

致谢 感谢李德仁院士在本文研究工作中的大力支持.感谢审稿专家提出的宝贵修改建议.本文所采用的时间序列 SAR 数据由欧洲空间局(ESA)通过 ESA 及中国国家遥感中心合作“龙”计划提供.SRTM 数据由美国 JPL 提供.SAR 数据的成像和配准工作由意大利 TeleRilevamento Europa (TRE)公司完成,在此一并致谢。

参考文献

- 1 李强,赵旭,蔡晋安,等.三峡水库坝址及邻区中上地壳 P 波速度结构.中国科学 D 辑:地球科学,2009,39: 427—436
- 2 Fourniadis I G, Liu J G, Mason P J. Regional assessment of landslide impact in the three gorges area, China, using ASTER data: Wushan-Zigui. Landslides, 2007, 4: 267—278
- 3 申重阳,孙少安,刘少明,等.长江三峡库首区近期重力场动态变化.大地测量与地球动力学,2004,24: 6—13
- 4 杨一杰,吴中如.大坝安全监控的国内外研究现状与发展.西安理工大学学报,2002,18: 26—30
- 5 严建国,李双平.三峡大坝变形监测设计优化.人民长江,2002,33: 36—38
- 6 李征航,刘志赵,王泽民.利用 GPS 定位技术进行大坝变形观测的研究.武汉水利电力大学学报,1996,29: 26—29
- 7 郭华东.雷达对地观测理论与应用.北京:科学出版社,2000
- 8 廖明生,林瑛.雷达干涉测量——原理与信号处理基础.北京:测绘出版社,2003
- 9 Rosen P A, Hensley S, Joughin I R, et al. Synthetic aperture radar interferometry. Proc IEEE, 2000, 88: 333—382
- 10 Hanssen R F. Radar Interferometry Data Interpretation and Error Analysis. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001
- 11 Madsen S, Zebker H, Martin J. Topographic mapping using radar interferometry: Processing techniques. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1993, 31: 246—256
- 12 Liao M, Wang T, Lu L, et al. Reconstruction of DEMs from ERS-1/2 tandem data in mountainous area facilitated by SRTM data. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2007, 45: 2325—2335
- 13 Gabriel A K, Goldstein R M, Zebker H A. Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. J Geophys Res, 1989, 94: 9183—9191
- 14 Wang C, Zhang H, Shan X, et al. Application SAR interferometry for ground deformation detection in China. Photogramm Eng Remote Sens, 2004, 70: 1157—1166
- 15 Ge, L, Chang H, Rizos C. Mine subsidence monitoring using multi-source satellite SAR images. Photogramm Eng Remote Sens, 2007, 73: 259—266
- 16 Zebker H. On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The landers earthquake. J Geophys Res, 1994, 99: 19617—19634
- 17 单新建,马瑾,王长林,等.利用星载 D-INSAR 技术获取的地表形变场提取玛尼地震震源断层参数.中国科学 D 辑:地球科学,2002,32: 837—844

- 18 Zebker H, Villasenor A J. Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1992, 30: 950—959
- 19 Goldstein R. Atmospheric limitations to repeat-pass interferometry. *Geophys Res Lett*, 1995, 22: 2517—2520
- 20 Ding X, Li Z, Zhu J, et al. Atmospheric effects on InSAR measurements and their mitigations. *Sensors*, 2008, 8: 5426—5448
- 21 Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2001, 39: 8—20
- 22 Ferretti A, Prati C, Rocca F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2000, 38: 2202—2212
- 23 Colesanti C, Ferretti A, Novali F, et al. SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the permanent scatterers technique. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2003, 41: 1685—1701
- 24 Perissin D, Prati C, Engdahl M E, et al. Validating the SAR wavenumber shift principle with the ERS Envisat PS coherent combination. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2006, 44: 2343—2351
- 25 Ferretti A, Savio G, Barzaghi R, et al. Submillimeter accuracy of InSAR time series: Experimental validation. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2007, 45: 1142—1153
- 26 Perissin D. Validation of the sub-metric accuracy of vertical positioning of PS's in C Band. *IEEE Lett Geosci Remote Sens*, 2008, 5: 502—506
- 27 王艳, 廖明生, 李德仁, 等. 利用长时间序列相干目标获取地面沉降场. *地球物理学报*, 2007, 50: 598—604
- 28 Perissin D, Rocca F. High-accuracy urban DEM using permanent scatterers. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2006, 44: 3338—3347
- 29 Perissin D, Ferretti A. Urban target recognition by means of repeated spaceborne SAR Images. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2007, 45: 4043—4058
- 30 Kampes B M. *Radar Interferometry Persistent Scatterer Technique*. Dordrecht: Springer, 2006
- 31 Hooper A, Segall P, Zebker H. Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for Crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos. *J Geophys Res*, 2007, 112: B07407, doi: 10.1029/2006JB004763
- 32 Mora O, Mallorqui J J, Broquetas A. Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2003, 41: 2243—2253
- 33 Perissin D, Ferretti A, Piantanida R, et al. Repeat-pass SAR interferometry with partially coherent targets. *Fringe 2007, Frascati (Italy)*, 26—30 November, 2007
- 34 Hilley G, Burgmann R, Ferretti A, et al. Dynamics of slow-moving landslides from permanent scatterer analysis. *Science*, 2004, 304: 1952—1955
- 35 Wang T, Perissin D, Liao M, et al. Deformation monitoring by long term D-InSAR Analysis in three gorges area, China. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE International*, 2008
- 36 戴会超, 苏怀智. 三峡大坝深层抗滑稳定研究. *岩土力学*, 2006, 27: 643—647
- 37 Touzi R, Lopes A, Bruniquel J, et al. Coherence estimation for SAR imagery. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1999, 37: 135—149
- 38 Biggs N. *Discrete Mathematics*. Oxford: Clarendon Press, 1985
- 39 Zebker H, Chen K. Accurate estimation of correlation in InSAR observations. *IEEE Lett Geosci Remote Sens*, 2005, 2: 124—127
- 40 Gatelli F, Guamieri A M, Parizzi F, et al. The wavenumber shift in SAR interferometry. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1994, 32: 855—865
- 41 刘广润. 三峡工程地质概况. *水文地质工程地质*, 1993, 20: 56—57
- 42 黄声享, 尹晖, 蒋征. 变形监测数据处理. 武汉: 武汉大学出版社, 2003
- 43 廖明生, 田馨, 赵卿. TerraSAR-X/TanDEM-X 雷达遥感计划及其应用. *测绘信息与工程*, 2007, 32: 44—46
- 44 Soergel U, Thoennessen U, Brenner A, et al. High-resolution SAR data: New opportunities and challenges for the analysis of urban areas. *IEEE Proc Radar Sonar Navigation*, 2006, 153: 294—300