

一种改进的时序 InSAR 形变模型监测洞庭湖区软土变形

鲍亮

长沙理工大学交通运输工程学院测绘工程系

DOI:10.12238/gmsm.v4i1.975

[摘要] 针对永久散射体差分雷达干涉测量技术(PSI)中传统线性速率模型不能合理建模软土区域基础设施形变随时间演化的特征,物理意义不够明确的局限,本文提出一种改进的时序InSAR形变模型。该模型将热膨胀参数融入传统线性速率模型,顾及了湖区基础设施的热膨胀效应这一物理特征。选取了岳阳市洞庭湖区的16景TerraSAR-X数据开展实验,获取了此区域高相干点的热膨胀参数和2012年2月至2013年1月的长时间连续形变序列场。利用模型的残余相位来评估其建模精度,结果显示改进模型的残余相位为0.4rad,相比传统线性速率模型提升了14%。

[关键词] PSI; 热膨胀; 沉降监测

中图分类号: TV72 **文献标识码:** A

引言

由于软土含水量大、可压缩性高、强度较低、结构松散等一系列特点,软土区域公路地基和桥梁桩基更易发生危险性沉降。洞庭湖属于地质构造湖,位于长江南岸湖南省西北部。每个洪水季节,洞庭湖周围的居民区都面临着潜在的累积变形,地表塌陷甚至是斜坡滑坡的潜在危险,这极大地危害了该地区的安全。对湖区附近分布密集的基础设施进行稳定性控制非常重要。因此,对该区域进行长期时空变形监测对于了解其健康状况,防止潜在的交通安全问题具有重要意义。

永久散射体差分干涉测量技术(PSI)作为一种新兴的地表形变测量技术,这一技术通过提取测区内长时间保持散射特性稳定的点(PS点)进行建模分析,解算形变参数,进而实现测区形变的反演。由于PSI技术不易受时空失相关的严重影响,近年来已被国内外学者们广泛地应用于区域地表形变探测中,并取得了许多成功的案例^[1]。

形变模型的建立是PSI技术流程中至关重要的环节,即建模高相干点形变分量与时间、形变参数之间的函数关系。大型桥梁变形除与桩基土体沉降有关之外,更与钢结构桥面、拉索等部件随温度

变化而产生的物理形变(即热膨胀变形)有直接关系。因此,已有学者将热膨胀模型应用于大型基础设施的形变监测中^[2]。

鉴于上述原因,本文提出一种改进的时序InSAR形变模型。这一模型将热膨胀引入到传统线性模型,建模时序InSAR中相位的低通分量部分,以更合理地建模测区时序形变物理特征。

1 融入热膨胀参数的线性速率模型

对于PS网络中任意一条基线(含两个PS点*i*和*j*),对这两点的相位值作差,可建立如下模型:

$$\Delta\phi_{ij}^m = \beta_{ij}^m \cdot \Delta\delta H_{ij} + \frac{4 \cdot \pi \cdot T^m}{\lambda} \Delta v_{ij} + \frac{4\pi}{\lambda} Temp^m \cdot \Delta T h_{ij} + \Delta res_{ij}^m \quad (1)$$

其中 m 为干涉对序号; $\Delta\phi_{ij}^m$ 为相邻两PS点在第 m 幅干涉图中对应的相位增量; β_{ij}^m 为高程相位改正系数, $\beta_{ij}^m = \frac{4\pi B_j}{\lambda R_i \sin\theta}$ 其中 B_j , T^m 分别表示空间基线和时间基线; θ 为影像的入射角; R_i 表示雷达传感器与PS点

之间的距离; Δres_{ij}^m 表示残余相位,主要由大气延迟相位,非线性形变相位和传感器几何噪声等组成。

上式中 $\Delta\phi_{ij}^m$ 作为实测数据,未知参数为 Δv_{ij} 、 $\Delta\delta H_{ij}$ 及 $\Delta T h_{ij}$, 可利用LAMBDA算法求解出 Δv_{ij} 、 $\Delta T h_{ij}$ 、 $\Delta\delta H_{ij}$ 的估值,将其估值结果作为空间维相位解缠的观测数据,再利用间接平差的方法即可求解出各PS点上的绝对线性速率 v 、热膨胀系数 $T h$ 及高程改正值 δH 。

2 实验验证

2.1 测区概况

洞庭湖位于湘、鄂两省之间,面积辽阔,是中国五大淡水湖之一,其周边水系发达。洞庭湖周边区域土质以软土为主,主要由淤泥、淤泥质粘土、软塑状亚粘土、亚砂土以及松散状粉细砂组成^[3]。洞庭湖大桥横跨洞庭湖水道,大桥周边地下水系统丰富,覆盖上层的软土、河堤地泥沙范围广且质地软,具有高压缩性。因此,对洞庭湖周边地带进行长期沉降监测有重要意义。

2.2 实验处理流程

为验证本文提出的时序形变模型, 利用覆盖研究区域的2012年2月至2013年1月的16幅TerraSAR-X影像开展了时序形变建模及分析。首先, 利用ENVI-SARScape的雷达干涉处理模块, 辅以30米分辨率的STRM-DEM数据为高程参考, 对全部影像进行配准、干涉、去平、去地形相位等前期处理, 为了保证影像原始分辨率, 将沿距离和方位方向的多视比设置为1:1。干涉组合的时空基线的阈值分别设置为130米和300天, 共生成23幅去平滤波后的干涉图。然后利用Matlab编程实现PS点选取、PS基线网络布设。最后对每一条PS基线开展时空维解缠和残余相位时空滤波, 获取模型各参数值和最终时序形变场。

2.3 实验结果

实验发现热膨胀效应对于此测区地表形变的影响非常明显, 并且热膨胀系数在不同区域差异显著。整个测区热膨胀系数最大达 $0.31\text{mm}/^{\circ}\text{C}$, 最小为 $-0.23\text{mm}/^{\circ}\text{C}$ 。对于洞庭湖大桥, 我们通过(1)式得到的热膨胀系数后, 利用下式估计材料的热膨胀因子:

$$K = \Delta L / (L \cdot \Delta T) \quad (2)$$

其中, K 、 ΔL 分别为材料热膨胀因子和改进模型的热膨胀系数, L 为大桥主梁到桥墩底端的高度。我们进一步估算出桥梁材料热膨胀因子为 $13.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。通过查阅混凝土材料物理特性可知, 估算出的结

果与桥梁材料的物理性质大致吻合。

对于测区时序形变发育情况, 从空间分布上看, 城区北部沉降较为明显, 最大累积沉降达 11.3mm , 而城区中部区域沉降量较小, 最大累积沉降仅为 3.7mm 。从时序变化上看, 研究区域沉降速率在时序上呈现出明显的先快后慢的现象, 符合软土沉降的非线性规律。2012年2月10日至2012年12月14日, 洞庭湖东岸沿线一带沉降渐渐增大, 而从2012年12月14日至2013年1月16日, 沉降区趋于稳定。最大沉降发生在2012年8月26日, 最大沉降达 18mm 。而对于除湖区沿线以外的区域, 其变形在整个观测周期内, 则均呈轻微沉降趋势, 并主要分布在 $-10 \sim 0\text{mm}$ 范围内。

此外, 对洞庭湖大桥的观测结果显示, 该桥最大沉降值为 8mm , 发生在2012年8月26日, 表明在整个观测期间, 整个桥梁处于稳定状态。此外, 早期的研究表明洞庭湖区周围的沉降量在 1cm 以内, 这与本研究得到的沉降量一致^[4]。

由于研究区域没有可用的外部形变测量数据, 为了验证算法的精度, 利用模型(1)式中的残余相位来衡量建模精度, 分别对15个干涉对中的所有高相干点的残余相位进行了均方根的计算, 结果显示, 改进模型残差相位均方根(rms)为 0.39rad , 线性模型为 0.46rad , 拟合精度提高14%。表明融入热膨胀的改进模型可更好的建模这一试验区的时序形变。

3 结论

本文利用永久散射体干涉测量技术, 针对传统线性模型的不足, 应用融合了热膨胀参数的线性模型, 用于解算地表变形线性速率和形变场。算法总体思想是利用传统PS解算流程, 以测区在各影像获取日期当月的月平均气温作为PS基线网络的空间维解缠间接平差函数模型的气候参数数据, 利用最小二乘原理求解出所有PS点上的模型参数估值。这一算法估计了地面建筑物随温度发生变形的特点和线性模型方法解算效率高的优势, 可应用于以软土地基为主的城市研究区域形变监测。为验证算法可行性, 本文利用覆盖湖南省岳阳市的16景TerraSAR-X卫星数据, 设计并实现了详细的实验。从实验的结果可以看出, 这一融合算法解算地表形变速率可达到毫米级精度。

[参考文献]

- [1] 罗三明, 单新建, 朱文武, 等. 多轨PSInSAR监测华北平原地表垂直形变场[J]. 北京: 地球物理学报, 2014, 57(10): 3139.
- [2] 江剑锋, 黄其欢, 王一方, 等. InSAR技术在安庆铁路长江大桥变形监测中的应用[J]. 兰州: 甘肃科学学报, 2018, 30(6): 73-77.
- [3] 吴建宁. 洞庭湖地区软土工程地质性状初探[J]. 长沙: 中南公路工程, 2004, 29(02): 137-139.
- [4] 姜端午, 黄树春, 张苑平. 基于地质环境遥感调查与监测数据探讨洞庭湖演变规律[J]. 国土资源遥感, 2010, S1(B11): 124.