

基于多要素大气延迟改正的 InSAR 地面沉降监测研究^{*}

刘严萍¹, 王 勇², 张立辉²

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 河北省地震工程研究中心, 河北 唐山 063009)

摘 要: 同区域不同期 SAR 数据时间的大气延迟差异是影响 SAR 干涉测量的最主要因素之一。以北京主城区作为研究区域, 综合地形和气象要素, 将 BP 神经网络技术用于 GPS 对流层延迟内插, 并用于 InSAR 大气延迟改正研究。实验证明, 经与 GPS 沉降量相比较, 该方法优于克里金插值法, 大气延迟双差改正结果用于 InSAR 大气效应改善, 可有效提高 InSAR 处理精度。

关键词: 对流层延迟; 全球定位系统; 合成孔径雷达干涉测量; 地面沉降

中图分类号: P227; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2013)03-0038-04

合成孔径雷达干涉测量(InSAR)是获取米级精度、数十米空间分辨率地面高程信息的一种高效手段, 其差分技术(D-InSAR)可用于探测毫米级的微小地表形变。InSAR 差分技术已成功应用于不同领域的地表形变监测, 如油田快速沉降监测^[1]、地震研究^[2]、滑坡灾害监测^[3]、城市地表沉降^[4-6]。据中国之声《央广新闻》报道, 目前全国大部分城市都遭受地面沉降的影响, 全国累计地面沉降量超过 200 mm 的地区达到了 79 000 km², 并且有进一步扩大的趋势。2012 年年初, 由国土资源部、水利部会同发改委、财政部等十部委联合编制的中国首部地面沉降防治规划目前已经获得国务院批复^[7]。

InSAR 技术是监测城市地面沉降的有效手段, 如何提高 InSAR 处理精度, 使其满足城市地面沉降监测要求是目前 InSAR 应用研究的一个热点和难点。随着 InSAR 技术研究的不断深入, 尽管其测量精度已有较大提高, 但在实际形变探测中受到一些因素的制约, 限制了该方法的应用。同区域不同期 SAR 数据时间的大气延迟差异是影响 SAR 干涉测量的最主要因素之一, 易变的大气条件导致不同的相位延迟, 最大可导致数厘米的形变误差, 影响 InSAR 技术在城市地表形变、矿区沉降监测的应用。因此, 在 InSAR 数据处理和干

涉影像的解释过程中, 必须研究和分析大气的影响并加以处理。

目前常用的 InSAR 大气校正方法受天气状况或 SAR 图像数量的限制, 本文拟综合地形和气象参数, 提出一种不受天气状况和 SAR 图像数量限制的大气延迟估算方法, 与 GPS 对流层延迟比较其估算精度, 并以北京 SAR 数据和 GPS 数据进行该方法的 InSAR 大气校正应用, 提高 InSAR 数据处理精度。

1 实验数据处理

从北京 GPS 连续跟踪网数据中选取与 SAR 数据时间对应的 GPS 数据, 数据时间为 2007 年 6 月 11 日、2008 年 3 月 17 日、2008 年 6 月 30 日、2008 年 8 月 4 日。GPS 数据用于解算对流层延迟以及对实验的形变结果对比, 以验证改善效果。

GPS 对流层延迟和站点坐标的解算采用高精度 GPS 软件 GAMIT/GLOBK 来完成, 解算如下: 卫星星历采用精密星历, 松弛解模式, 每半小时估算一个对流层延迟, 按天解算。GAMIT/GLOBK 解算的站点坐标平面精度为 1~2 mm, 高程精度为 5~6 mm, GPS 站点对流层延迟可以从 GPS 解算结果文件提取(SAR 卫星经过北京的时间为 UTC 时间 02:30, 本文提取

^{*} 收稿日期: 2013-01-03 修回日期: 2013-02-24

基金项目: 湖南省研究生科研创新项目(CX2012B061); 河北省教育厅项目(ZH2012060); 国家科技支撑计划课题(2011BAK07B01)

作者简介: 刘严萍(1979-), 女, 河南汝南人, 博士生, 讲师, 主要从事地面沉降监测研究. E-mail: liuxiawy@126.com

通讯作者: 王勇(1978-), 男, 江西南都人, 博士, 教授, 主要从事 GPS 气象学、InSAR 大气校正研究. E-mail: wangyongjz@126.com

对流层延迟均为该时间)。将 GPS 对流层延迟提取出来,并用于大气延迟的估算。

2 综合多要素的大气延迟模型构建与效果比对

2.1 综合多要素的大气延迟模型构建

由于对流层延迟(大气延迟)与站点的地形(平面位置、高程)和气象参数(气压、温度)有关,本文将综合地形和气象要素,进行大气延迟的估算。

各影响因素的数值差别也较大,以一个直接的确定化模型来进行大气延迟的估算实施非常困难。地形参数和气象参数的数值差异较大,如何构建基于两种类型参数的大气延迟估算模型是一个复杂的问题。

BP(Back Propagation)网络是一种按误差逆传播算法训练的多层前馈网络,该网络能学习和存储大量的输入-输出模式映射关系,而无需事前揭示描述这种映射关系的数学方程。它的学习规则是使用最速下降法,通过反向传播来不断调整网络的权值和阈值,使网络的误差平方和最小。

本文采用 BP 网络综合地形和气象要素,用于大气延迟的估算。模型的构建和大气延迟估算过程如下。

(1)BP 网络训练样本的建立

将地形参数和气象参数作为输入训练样本,对流层延迟作为输出训练样本。对训练样本进行归一化处理,见式(1)。

$$X'_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, \quad (1)$$

式中: X_i 为第 i 个参数的实际值, X'_i 为第 i 个参数的归一化后的数值, X_{\max} 为 X 参数的最大值, X_{\min} 为 X 参数的最小值。

(2)BP 网络控制结构

BP 网络控制结构如图 1 所示,该网络采用 $m-x-1$ 结构,即 m 个输入节点(m 为主要的地形参数和气象参数个数)、 x 个隐层节点、1 个输出节点(大气延迟)。

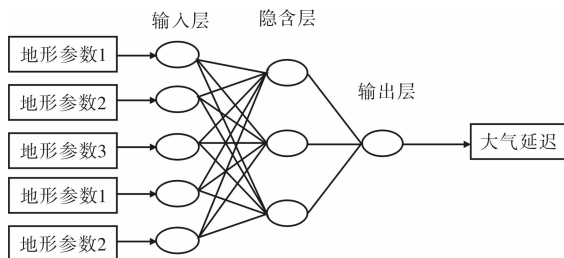


图1 BP 大气延迟神经网络预测结构

(3)BP 网络输出的计算

设网络输入为 n 维向量 u , 输出为 m 维向量 y , 输入/输出样本长度为 L 。

隐层是对作用函数的参数进行调整,采用的是非线性优化策略和无导师的学习算法。

输出层是对线性权进行调整,采用的是线性优化策略和有导师的学习算法。网络输出层第 k 个节点的输出为隐层节点输出的线性组合,见式(2)。

$$y_k = \sum_i w_{ki} q_i - \theta_k, \quad (2)$$

式中: w_{ki} 为 $q_i \rightarrow y_k$ 的连接权; θ_k 为第 k 个输出节点阈值。

(4)BP 网络的训练与验证

选取归一化后的前 m 组样本作为训练样本对网络进行训练。通过设置扩展常数 SPREAD, 迭代运行, 当误差几乎为零, 即达到目标误差平方和要求, 此时可以获得 BP 神经网络隐层单元数, 获得训练好的 BP 误差曲线。

取归一化后的后 n 组数据对训练好的网络进行验证, 预测结果与实际结果相符, 表明可以用 BP 网络进行大气延迟预测。

2.2 大气延迟估算及其可靠性验证

在对多组数据训练好的 BP 网络验证后, 利用该网络进行大气延迟的估算。为了验证大气延迟的估算效果, 将其与 GPS 测站对流层延迟、Kriging 插值结果进行比较。

图 2 所示为四个时间(SAR 数据时间)的 BP 神经网络法和 Kriging 法估算的对流层延迟与 GPS 站点对流层延迟(实际值)的比较。图中横轴为测站名, 纵轴为对流层延迟。蓝色曲线代表实际值, 红色曲线代表 BP 神经网络预测值, 黄色曲线代表 Kriging 法估算值。从图 2 可见, 与 Kriging 插值结果相比, BP 神经网络预测的对流层延迟结果与 GPS 站点对流层延迟更接近。

为进一步研究 BP 神经网络及 Kriging 插值对流层延迟与实际对流层延迟之间的差异, 比较两种方法所得对流层延迟与 GPS 对流层延迟的偏差见表 1。

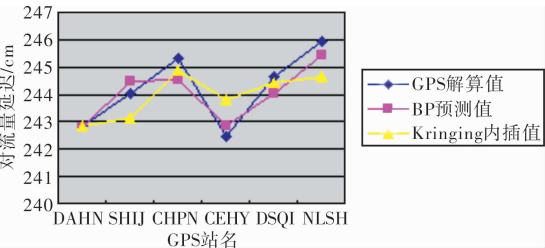
由图 2 和表 1 可见, BP 神经网络方法的对流层延迟精度高于 Kriging 法, 该方法精度优于 1 cm, 满足 InSAR 大气校正要求。

3 综合多要素大气延迟模型在北京市地面沉降监测的应用

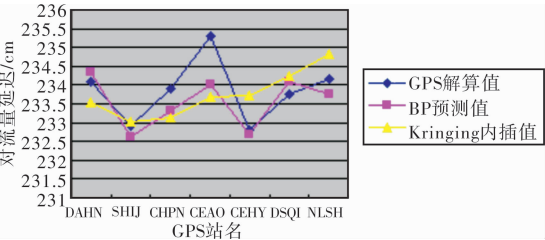
本文采用两对干涉影像对研究北京主城区以

表 1 对流层延迟预测值与实际值差量统计

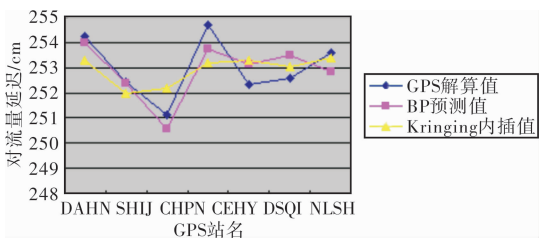
时间	预测值与 GPS 对流层延迟的差值	均值 /cm	绝对值均值 /cm	均方根误差 /cm
2007-06-11	BP 神经网络	0.19	0.47	0.57
	Kriging 插值法	0.26	0.70	0.94
2008-03-17	BP 神经网络	0.29	0.47	0.64
	Kriging 插值法	0.11	0.73	0.92
2008-06-30	BP 神经网络	0.10	0.08	0.71
	Kriging 插值法	0.08	0.78	0.98
2008-08-04	BP 神经网络	-0.12	0.62	0.80
	Kriging 插值法	0.11	0.85	1.18



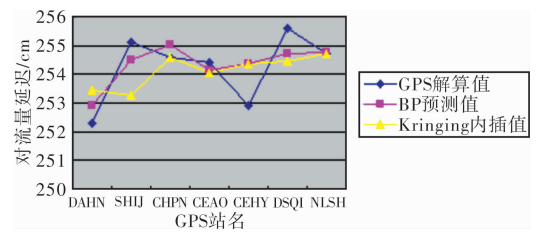
(a)2007 年 6 月 11 日



(b)2008 年 3 月 17 日



(c)2008 年 6 月 30 日



(d)2008 年 8 月 4 日

图 2 对流层延迟实际值与预测值的比较

及周围地区形变情况。所用 SAR 数据由 ENVISAT 卫星获取的北京地区 ASAR 数据。见表 2。

利用 ROI_ PAC 软件和 DORIS 精密星历、

SRTM 采用“二轨法”获得北京市 InSAR 垂直方向形变图，见图 3。通过本文提出的综合多要素的大气延迟构建模型，获得与 SAR 数据时间对应的大气延迟数据，将两 SAR 数据时间的大气延迟作差获得 InSAR 大气延迟改正图。

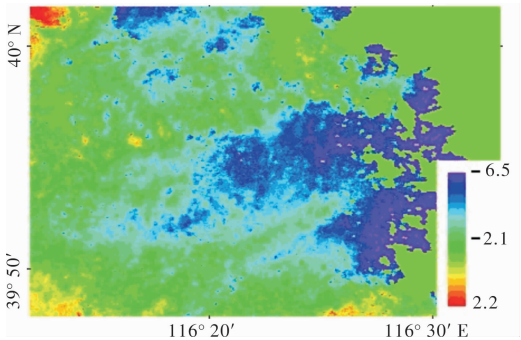


图 3 InSAR 垂直形变图

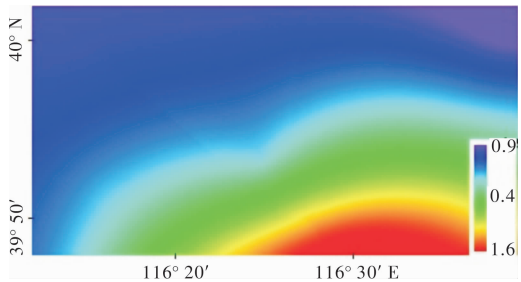


图 4 大气延迟改正图

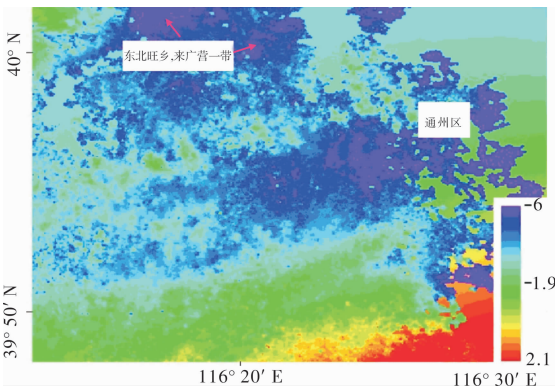


图 5 基于综合模型改善大气延迟影响的 InSAR 垂直形变图

表 2

ENVISAT ASAR 数据

影像对	影像时间	轨道号	轨迹号	帧号	水平基线/m	垂直基线/m	时间基线/d
主影像	2007-06-11	27598	2490	2799	61	-59	280
从影像	2008-03-17	31606	2490	2799			

由于本文所选研究两幅 SAR 数据组成的干涉对时间为夏季与春季, 夏季 SAR 数据大气延迟误差相对大, 大气延迟分布不均衡, SAR 图像受大气影响不可忽略。为进行 InSAR 大气延迟改正, 把两幅 SAR 数据对应时间的大气延迟进行差分, 如图 4 所示。

在获得大气延迟改正结果的基础上, 对 InSAR 垂直形变结果进行大气延迟去除, 获得基于综合模型改善大气延迟影响的 InSAR 垂直形变 (图 5)。

由于 GPS 高程精度为毫米级, 为检验本文提出的模型效果, 作者利用 GAMIT/GLOBK 软件处理了与 SAR 数据同期的北京 GPS 数据, 获得了 GPS 站点大地高的变化。以 CEHY (测绘院)、DSQI (东三旗) 的高程变化 (沉降量) 为基准, 将大气改正前后的 InSAR 变形量与之进行比较 (图 5、表 3)。

由表 3 可见, 经大气改正的 InSAR 形变与 GPS 形变更接近, 说明 GPS 大气延迟可部分改善 InSAR 数据处理精度。

表 3 InSAR 大气改正前后形变与 GPS 沉降量对比

站点	GPS 沉降量/cm	InSAR 形变/cm	改善大气延迟差异的 InSAR 形变/cm
CEHY	4	1.4	5.8
DSQI	7.9	2.9	5.3

4 结论

本文利用 BP 神经网络综合经度、纬度、高

程、气压、温度、GPS 对流层延迟等要素进行了大气延迟的模型构建, 模型估算大气延迟精度为毫米级, 并将估算大气延迟用于 InSAR 大气延迟改正。通过与同期 GPS 沉降量比较, 本文提出综合多要素的大气延迟模型可有效改善 InSAR 地面沉降监测精度。下一步工作拟应用该模型用于其他区域 InSAR 的地面沉降监测, 证明该模型的普适性。

参考文献:

- [1] Fielding E J, Blom R G, Goldstein R M. Rapid Subsidence over Oil Fields Measured by SAR Interferometry [J]. Geophysical Research Letters, 1998, 25(17): 3215-3218.
- [2] 乔学军, 游新兆, 王琪, 等. 2008 年 1 月 9 日西藏改则扎西错 Ms6.9 级地震的 InSAR 实测形变场 [J]. 自然科学进展, 2009, 19(2): 173-179.
- [3] Massonnet D, Holzer T, Vadon H. Land Subsidence Caused by the East Mesa Geothermal Field, California, Observed Using SAR Interferometry [J]. Geophysical Research Letters, 1997, 24(8): 901-904.
- [4] 王超, 张红, 刘智, 等. 苏州地区地面沉降的星载合成孔径雷达差分干涉测量监测 [J]. 自然科学进展, 2002, 12(6): 621-625.
- [5] 宫辉力, 张有全, 李小娟, 等. 基于永久散射体雷达干涉测量技术的北京市地面沉降监测研究 [J]. 自然科学进展, 2009, 19(11): 1261-1266.
- [6] 张永红, 张继贤, 龚文瑜, 等. 基于 SAR 干涉点目标分析技术的城市地表形变监测 [J]. 测绘学报, 2009, 38(6): 482-488.
- [7] 中国广播网首部地面沉降防治规划获批复 沉降灾害或能遏制 [EB/OL]. (2012-02-21) [2012-12-12]. http://china.cn.cn/ygxw/201202/t20120221_509188435.shtml.

Study on Land Subsidence Monitoring by InSAR Based on Multi-element Atmospheric Delay Correction Model

Liu Yanping¹, Wang Yong², Zhang Lihui²

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;
2. Hebei Researching Center of Earthquake Engineering, Tangshan 063009, China)

Abstract: Atmospheric delay differences of SAR time data of one region in different time periods influences the interference measurement of SAR majorly. The main urban area in Beijing is selected as the study area, combining with terrain and meteorological element, and BP neural network technology is used for GPS tropospheric delay interpolation and InSAR tropospheric delay correction study. It shows that the predicted results of terrain and meteorological elements are better than Kriging interpolation method which the interpolation accuracy is suitable for tropospheric delay correction. The double difference correction of tropospheric delay is used to remove InSAR atmospheric effect. Comparison between InSAR deformation and GPS deformation shows that GPS atmospheric delay can improve the accuracy of InSAR.

Key words: tropospheric delay; GPS; InSAR; land subsidence