

基于地形和气象要素的 GPS 对流层延迟插值 估算研究^{* 1}

刘严萍¹⁾ 张立辉²⁾ 张飞涟¹⁾

(1)中南大学土木工程学院,长沙 410075
(2)黑龙江省水文地质工程地质勘察院,哈尔滨 150030)

摘 要 为解决 InSAR 大气校正受 SAR 影像数量的限制或天气状况影响问题,提出一种新的对流层延迟估算方法——基于地形和气象要素的对流层延迟估算模型,并以北京 GPS 网为例进行对流层延迟估算模型的构建和对流层延迟估算。结果表明,利用该模型的估算结果与 GPS 对流层延迟吻合较好,精度基本在 mm 级,可满足 InSAR 大气校正的要求。

关键词 对流层延迟;全球定位系统;BP 神经网络;地形要素;气象要素

中图分类号:P423.31

文献标识码:A

ESTIMATION OF GPS ZENITH TROPOSPHERIC DELAY BASED ON TERRAIN AND METEOROLOGICAL ELEMENTS

Liu Yanping¹⁾, Zhang Lihui²⁾ and Zhang Feilian¹⁾

(1)School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075
(2)Hydrogeology and Engineering Geology Prospecting Institute of Heilongjiang Province, Haerbin 150030)

Abstract In order to solve the problem that the InSAR atmospheric correction is limited by the number of SAR image and weather conditions, a new tropospheric delay estimation method is proposed, which is based on the terrain and meteorological elements. The zenith tropospheric delay model is constructed and the zenith tropospheric delay is estimated by taking the GPS network in Beijing as an example. The result shows that the precision of the model is similar to the GPS tropospheric delay, which is amounted to mm, and can meet the requirements of InSAR atmospheric correction.

Key words:zenith tropospheric delay; global positioning system; BP neural network; terrain elements; meteorological elements

1 引言

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。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。目前,InSAR 大气校正的方法可分为两类:第一类是利用干涉图自身的图像特性进行大气

* 收稿日期:2012-03-18

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);大地测量与地球动力学国家重点实验室开放基金(SKLGED2013-5-5-E)

作者简介:刘严萍,女,1979年生,讲师,博士生,主要从事 GPS 应用研究. E-mail: liuxiawy@126.com

校正,如线性叠加法、堆叠法、随机滤波法和永久散射体法;第二类是利用外部独立数据计算大气延迟,将其从干涉图中去除,目前可利用的外部数据有 GPS、MODIS、MERIS 以及各种地面气象信息。

利用干涉图自身的图像特性(线性叠加法、堆叠法、随机滤波法)的不足之处在于:相位梯度不能直接和地面形变的大地测量值进行比较,需要相位解缠。采用永久散射体(PS)技术必须满足:有大量的可用影像(一般大于 30 幅);目标的移动应该足够慢以免发生混叠现象;在研究区域里应该有足够多的 PS 点。而采用 MODIS、MERIS 用于 InSAR 大气校正时,由于 MODIS 水汽产品和 MERIS 水汽产品对视场内云的存在比较敏感,只有在晴朗的天气条件下收集到的水汽值才可以用来改正 InSAR 的测量结果^[1]。

由于 GPS 测站的站间密度一般为数十千米,为达到 InSAR 大气校正的要求,需要对 GPS 对流层延迟进行插值。部分学者利用克里金、反距离加权、神经网络等方法进行了 GPS 对流层延迟的插值研究^[2-5],王勇利用北京、武汉两地的 GPS 数据,采用反距离加权法、克里金法研究不同地形 GPS 对流层延迟插值效果,在地形起伏较大地区,对流层延迟插值效果为 cm 级,无法满足 InSAR 大气校正的要求^[6]。对流层延迟不仅与 GPS 站点的平面位置(经度、纬度)有关,还与站点海拔以及温度、气压等气象要素有关。

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,提出了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,以北京 GPS 连续观测网数据为例,进行综合地形和气象要素的对流层延迟估算模型的构建和估算,并与实测 GPS 站点对流层延迟相比较,验证了该模型的可靠性。

2 GPS 数据处理

北京的西、北和东北群山环绕,东南是平原。平原海拔高20~60 m,山地 1 000~1 500 m。由表 1 可以看出,北京的 GPS 测站高程差别较大。

本文的实验数据为北京 GPS 连续网部分站点数据以及与这些站点对应的温度、气压数据,数据时间为 5 天的观测数据(2007-12-03 日、2008-02-11 日、2008-03-17 日、2008-06-30 日、2008-08-04 日),GPS 对流层延迟的解算采用 GAMIT/GLOBK 完成,解算如下:卫星星历采用精密星历,松弛解模式,每小时估算一个对流层延迟,按天解算,为获得 GPS 测站绝对的对流层延迟,GPS 数据解算时引入了 SHAO、WUHN、URUM IGS 站点。GPS 测站对流层延迟从 GPS 解算结果文件中提取,并用于对流层延

迟估算。

表 1 北京 GPS 测站高程

Tab. 1 Elevation of GPS stations in Beijing

| 测站名 | 海拔(m) | 测站名 | 海拔(m) |
|------|-------|------|-------|
| BJFS | 46.6 | PING | 28.1 |
| DAXN | 37.6 | THKO | 331.6 |
| SHIJ | 65.6 | MYUN | 71.8 |
| CHPN | 76.2 | YANQ | 487.9 |
| CHAO | 35.3 | ZHAI | 440.3 |

3 综合地形和气象要素的对流层延迟估算模型的构建

对流层延迟(大气延迟)与站点的地形(经度、纬度、海拔)和气象要素(气压、温度)有关,本文综合地形和气象要素进行大气延迟估算。由于各影响因素的数值差别较大,以一个直接的、确定化的模型进行大气延迟估算非常困难。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。

反向传播(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,该网络能学习和存贮大量的输入-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。其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。模型构建过程如下:

- 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:

$$X'_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

(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} 和 X_{\min} 分别为 X 参数的最大值和最小值。

- 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 为地形参数和气象参数的个数)、 x 个隐层节点、1 个输出节点(大气延迟)。

- 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

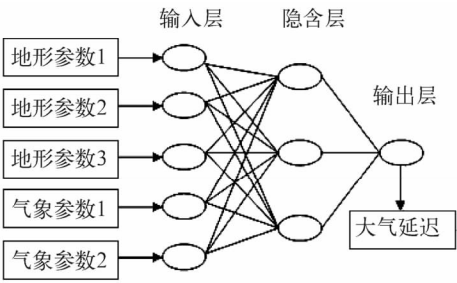


图1 大气延迟预测结构

Fig.1 Prediction frame of atmospheric delay

点的输出为隐层节点输出的线性组合：

$$y_k = \sum_i w_{ki} q_i - \theta_k \tag{2}$$

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, 当误差接近零, 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。

4 大气延迟估算及其可靠性验证

将北京 GPS 测站对流层延迟提取出来以后, 结合测站的地形与气象要素, 利用 Levenberg-Marquart 算法改进的 BP 神经网络进行训练与预测。本文采用的对流层延迟共有 5 天的数据, 相同时间为一组数据, 每天从 1 时开始每隔 3 个小时取一组数据, 共有 60 组数据。在应用 BP 神经网络进行对流层延迟估算时, 采用两种模型进行对流层延迟估算, 分别为地形要素(测站经纬度和海拔)模型、综合地形和气象要素(测站经纬度、海拔、气温和气压)的模型。在对训练样本训练后, 对测试样本进行预测, 获得测试样本的对流层延迟估算值。

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。为了能将预测的对流层延迟进行实际应用, 需要对预测的结果进行检验, 将估算的大气延迟与 GPS 测站对流层延迟进行比较。图 2 为考虑地形要素的对流层延迟估算值、综合地形和气象要素的对流层延迟估算值与 GPS 站点对流层延迟的比较。

图中黑色实线为 GPS 测站对流层延迟, 黑色虚线为综合地形和气象要素的模型估算的对流层延迟, 黑色实线带上三角标示为地形要素模型估算的对流层延迟。

由图 2 各测站对流层延迟估算值与 GPS 对流层延迟的比较可以看出, 基于地形要素模型的对流层延迟估算结果与综合地形和气象要素的模型对流层延迟估算结果基本一致, 综合地形和气象要素的模型对流层延迟估算结果略优于基于地形要素模型的对流层延迟估算结果。BJFS、DAXN、CHAO、CHPN、PING、SHIJ、THKO、MYUN 8 个测站的对流层延迟真值与两种方法的估算结果较为吻合, 除了个别时间的估算值与对流层延迟的测量值之间的差值稍大(1 cm 左右), 其他估算值与实际值差异大都在 5 mm 左右, 而 YANQ、ZHAI 两站的对流层延迟与估算值在个别时间差异较大, 2007 年 12 月 3 日 YANQ 站点的估算结果和 2008 年 8 月 4 日 ZHAI 站点的估算结果与对流层延迟值的差异为 2 ~ 4 cm, YANQ、ZHAI 其他时间的估算效果与 GPS 对流层延迟值一致, 差异大都在 5 mm 左右, 少部分在 1 cm 左右(表 2)。

从表 2 可知, 利用地形要素模型、综合地形和气象要素的模型估算北京 10 个 GPS 站点对流层延迟与 GPS 对流层延迟的比较分析, 由均方根误差统计项得出, 综合地形和气象要素的模型估算结果优于地形要素模型估算结果, 如 BJFS、THKO 两站的对流层延迟估算: 综合地形和气象要素的模型估算与 GPS 对流层延迟的差异小于 1 cm, 而地形要素模型表 2 对流层延迟估算值与 GPS 对流层延迟值的比较(单位: cm)

Tab.2 Comparison of ZTD between the prediction values and GPS(unit:cm)

| 测站 | 对流层延迟估算值与 GPS 对流层延迟值的差值 | 均值 | 绝对值 均值 | 均方根 误差 |
|------|----------------------------|-------|-----------|-----------|
| | | | | |
| BJFS | $ZTD_{T\&M} - ZTD_{GPS}$ | 0.23 | 0.53 | 0.71 |
| | $ZTD_T - ZTD_{GPS}$ | 0.33 | 0.84 | 1.07 |
| DAXN | $ZTD_{T\&M} - ZTD_{GPS}$ | -0.11 | 0.29 | 0.47 |
| | $ZTD_T - ZTD_{GPS}$ | -0.04 | 0.26 | 0.38 |
| CHAO | $ZTD_{T\&M} - ZTD_{GPS}$ | 0.05 | 0.46 | 0.59 |
| | $ZTD_T - ZTD_{GPS}$ | 0.16 | 0.45 | 0.67 |
| CHPN | $ZTD_{T\&M} - ZTD_{GPS}$ | 0.31 | 0.36 | 0.50 |
| | $ZTD_T - ZTD_{GPS}$ | 0.32 | 0.42 | 0.73 |
| PING | $ZTD_{T\&M} - ZTD_{GPS}$ | 0.94 | 0.98 | 1.73 |
| | $ZTD_T - ZTD_{GPS}$ | 0.93 | 0.98 | 1.69 |
| SHIJ | $ZTD_{T\&M} - ZTD_{GPS}$ | -0.21 | 0.41 | 0.56 |
| | $ZTD_T - ZTD_{GPS}$ | -0.41 | 0.53 | 0.63 |
| YANQ | $ZTD_{T\&M} - ZTD_{GPS}$ | -1.43 | 1.48 | 2.32 |
| | $ZTD_T - ZTD_{GPS}$ | -1.46 | 1.50 | 2.35 |
| THKO | $ZTD_{T\&M} - ZTD_{GPS}$ | -0.06 | 0.42 | 0.57 |
| | $ZTD_T - ZTD_{GPS}$ | -0.16 | 0.70 | 1.27 |
| ZHAI | $ZTD_{T\&M} - ZTD_{GPS}$ | -0.70 | 1.04 | 1.74 |
| | $ZTD_T - ZTD_{GPS}$ | -0.77 | 1.14 | 1.90 |
| MYUN | $ZTD_{T\&M} - ZTD_{GPS}$ | -0.04 | 0.04 | 0.07 |
| | $ZTD_T - ZTD_{GPS}$ | -0.08 | 0.14 | 0.20 |

注: $ZTD_{T\&M}$ 为综合地形和气象要素模型的对流层延迟估算值, ZTD_T 为地形要素模型的对流层延迟估算值, ZTD_{GPS} 为 GPS 测站对流层延迟

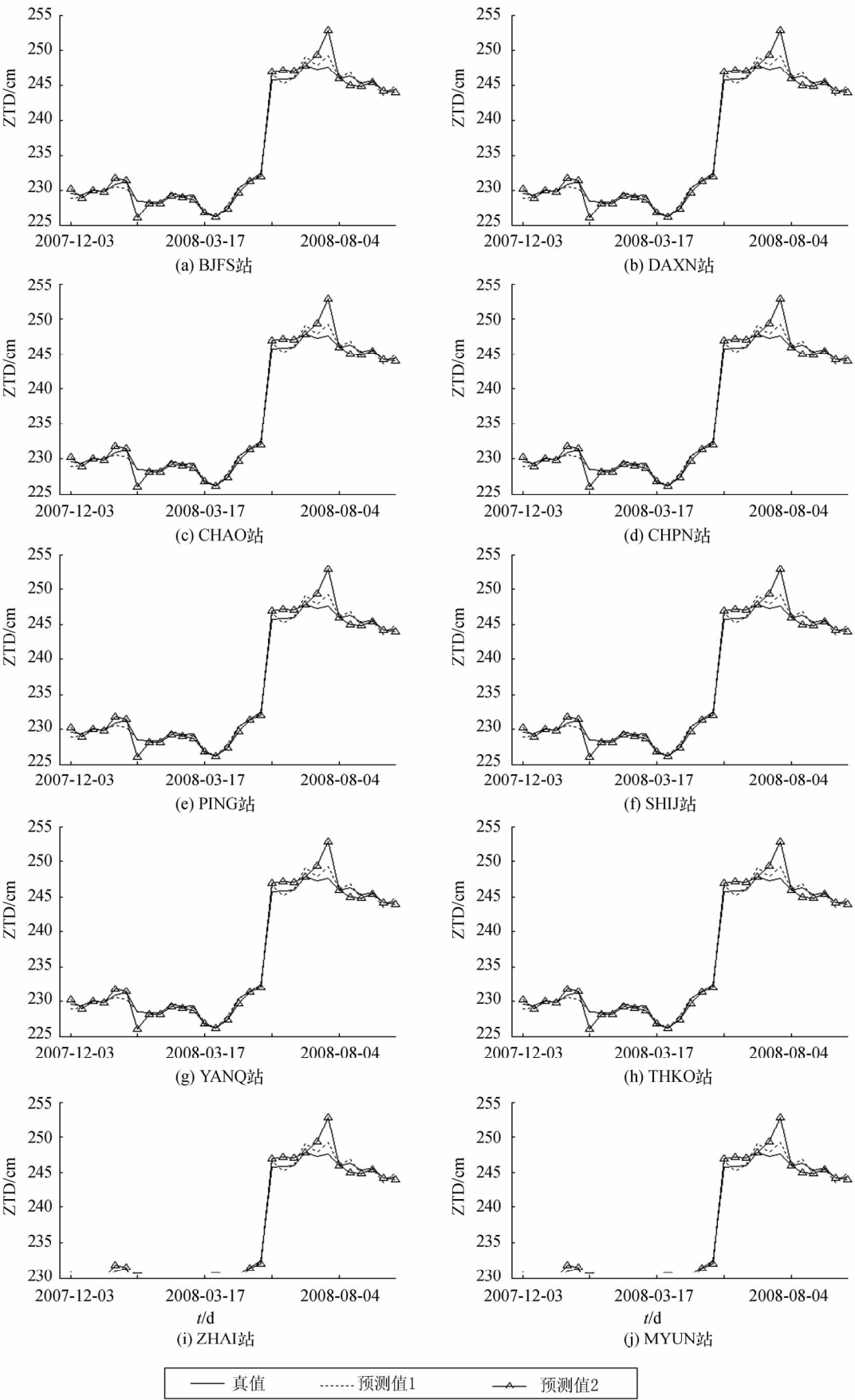


图2 各测站对流层延迟预测比较
Fig. 2 Comparison of ZTD in each station

型估算与GPS对流层延迟的差异略大于1 cm。

5 结论

本文在综合地形和气象要素的基础上构建了对流层延迟插值估算模型,并通过与地形要素模型的对流层延迟估算、GPS对流层延迟相比较,综合地形和气象要素的对流层延迟估算模型,其估算精度大部分在mm级,基本可以满足InSAR大气校正的要求。

参 考 文 献

1 Ding X L, et al. Atmospheric effects on InSAR measurements and their mitigation[J]. Sensors 2008, 8:5 426 – 5 448.

2 剧成宇,等. 基于GPS的InSAR大气延迟校正方法研究[J]. 大地测量与地球动力学,2012,(1):141 – 144. (Ju Chengyu, et al. Study on method based on GPS for correcting InSAR atmospheric delay[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics,2012,(1):141 – 144)

3 王勇,张立辉,杨晶. 基于BP神经网络的对流层延迟预

测研究[J]. 大地测量与地球动力学,2011,(3):134 – 137. (Wang Yong, Zhang Lihui and Yang Jing. Prediction of zenith tropospheric delay based on BP neural network[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics,2011,(3):134 – 137)

4 周金国,崔书珍,彭军还. GPS对流层延迟改正模型及其InSAR应用研究[J]. 测绘通报,2009,(11):1 – 3. (Zhou Jinguo, Cui Shuzhen and Peng Junhuan. Tropospheric delay correction model and its application to InSAR[J]. Bulletin of Surveying and Mapping,2009,(11):1 – 3)

5 徐佳,等. InSAR大气误差改正中的空间插值研究[J]. 电子与信息学报,2008,(4):911 – 915. (Xu Jia, et al. Spatial interpolation methods for correcting atmospheric effects using interferometric SAR[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008,(4):911 – 915)

6 王勇,等. 基于不同地形的GPS对流层延迟插值方法研究[J]. 大地测量与地球动力学,2010,(3):132 – 136. (Wang Yong, et al. Study on zenith tropospheric delay interpolation methods for different terrain[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics,2010,(3):132 – 136)

(上接第55页)

11 赵辉,张书毕,张秋昭. 基于加权总体最小二乘法的GPS高程拟合[J]. 大地测量与地球动力学,2011,(5):88 – 91. (Zhao Hui, Zhang Shubi and Zhang Qiuzhao. GPS height fitting of weighted total least – squares adjustment [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2011,(5): 88 – 91)

12 岳东杰,李立瑞,郭培闪. 主成分分析在GPS高程拟合中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2011,39(3):323 – 326. (Yue Dongjie, Li Lirui and Guo Peishan. Application of principal component analysis in GPS height fitting [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2011, 39(3): 323 – 326)

13 张秋昭,等,基于Bayesian正则化BP神经网络的GPS高程转换[J]. 大地测量与地球动力学,2009,(3):84 – 87. (Zhang Qiuzhao, et al. GPS height conversion based on bayesian regularization BP artificial neural network[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2009,(3): 84 – 87)

14 王殊伟,等,基于BP神经网络算法的GPS水准高程转换[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2009,34(10):1 190 – 1 194. (Wang Shuwei, et al. Conversion of GPS height based on BP ANNS [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(10): 1 190 – 1 194)

15 朱卫东,李全海. 基于标准化动量BP神经网络

的GPS高程转换[J]. 大地测量与地球动力学,2010,(1):123 – 125. (Zhu Weidong and Li Quanhai. Conversion of GPS height based on standardization momentum BP neural network [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2010, 30(1): 123 – 125)

16 侯东阳,张书毕. 基于平面拟合和BP神经网络组合法的GPS高程转换[J]. 大地测量与地球动力学,2010,(6):91 – 94. (Hou Dongyang and Zhang Shubi. GPS height conversion based on combination methods of surface fitting and BP neural network[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2010,(6): 91 – 94)

17 吴良才,危志明. 转换GPS高程的遗传神经网络方法[J]. 测绘科学技术学报,2007,24(4):244 – 246. (Wu Liangcai and Wei Zhiming. Conversion of height by genetic neural network method[J]. Journal of Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping, 2007, 24(8): 244 – 246)

18 Golub H G and van Loan F C. An analysis of the total Least – squares problem[J]. SIAM J Numer Anal. , 1980, 17: 883 – 893.

19 Markovsky I, et al. The element – wise weighted total least – squares problem [J]. Comput Stat Data Anal. , 2006,50: 181 – 209.

20 Schaffrin B and Wieser A. On Weighted total least – squares adjustment for linear regression [J]. J Geodesy. , 2008,82: 415 – 421.