

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2008.05.017

GPS 水准精密高程测量关键技术

胡伍生, 李美娟

(东南大学交通学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 基于影响 GPS 水准精密高程测量的 2 个重要因素: 对流层折射和 GPS 高程转换, 介绍了对流层折射模拟的方法, 主要有单参数法、随机过程方法和随机过程的分段线性方法. 实例分析表明, 随机过程的分段线性方法模拟效果较好; GPS 高程转换常用数学模型拟合法和神经网络方法, 提出了二次曲面拟合法与 BP 神经网络方法相结合的混合转换法, 工程实例应用说明, 该方法应用效果良好.

关键词: GPS 高程; 对流层折射; 神经网络

中图分类号: P228.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-1980(2008)05-0659-04

国内外大量实践证明, GPS 平面相对定位精度已达到了 1×10^{-7} , 甚至更高^[1], 但是 GPS 高程测量的精度还不够高, 影响了 GPS 三维控制网的应用. 近 10 多年来, 国内外测绘界已进行了大量试验, 并进行了深入的研究, 得出影响 GPS 高程测量精度的主要因素有 2 个: (a) 电离层和对流层对 GPS 信号的折射严重影响 GPS 测量定位垂直分量的精度^[2-4]; (b) 受区域性似大地水准面精度的影响, GPS 测量的大地高在向正常高转换过程中, 精度受到较大损失^[5-11]. 目前众多学者在研究这两方面的问题, 并取得了较大进展. 本文主要研究了对流层折射模拟方法和 GPS 高程转换方法, 以提高 GPS 高程测量成果.

1 对流层折射模拟方法

1.1 对流层折射概述

大气对 GPS 信号的折射是影响高精度 GPS 平面相对定位及垂直方向测值重复性的重要因素之一, 其中电离层折射的影响通过改正模型、利用双频接收机进行改正, 以及通过双差观测值得到有效消除, 对 GPS 平面相对定位的影响已很小. 而对流层折射的影响, 一方面改正模型的精度不高, 另一方面在双差观测值中不能得到有效消除, 因此, 近几年来, 提高 GPS 网精度(尤其是 GPS 高程测量精度)的主要研究工作集中于对流层折射的改正方法上.

由于对流层中的物质分布在时间和空间上具有明显的随机性, 因而对流层折射延迟亦具有较大的随机性. 实际上, 对流层折射的影响是由干燥气体和水蒸气产生的影响共同组成的. 研究表明, 干燥气体引起的误差, 约占总延迟量的 80%, 这一部分影响量可通过模型改正得到较好的消除, 经改正后误差仅为 1%. 水蒸气引起的误差约占总延迟量的 20%, 湿分量 ρ_w 折射不稳定, 湿气延迟很复杂, 影响因素较多. 因此, 如何采用更精确有效的方法模拟计算湿分量成为提高 GPS 高程测量精度的关键. 对此, 一些学者研究了基于随机过程理论的比较方便且有效的对流层折射模型改正方法, 即在平差过程中采用附加未知参数的方法^[2-3].

1.2 模拟方法概述

1.2.1 单参数方法

单参数方法假设每个测站天顶方向的对流层折射的模型改正值与实际折射量之间存在一常数偏差 ρ_k (k 表示测站序号).

收稿日期: 2008-05-18

基金项目: 中国高技术研究发展计划(863 计划)(2007AA12Z228) 江苏省测绘科研基金(JSCHKY200809)

作者简介: 胡伍生(1965—), 男, 江西高安人, 教授, 博士, 主要从事精密工程测量和神经网络工程应用研究.

1.2.2 随机过程方法

天顶方向的湿分量折射变化规律可以用一阶高斯马尔可夫过程模拟.连续的一阶高斯马尔可夫过程的状态方程为

$$\frac{d\rho(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_{\rho}}\rho(t) + W(t)$$
(1)

式中: τ_{ρ} ——随机过程的相关时间; $W(t)$ ——方差为 σ_w 的零均值高斯白噪声.式(1)的离散解见文献[2].在随机过程方法中, τ_{ρ} 和 σ_w 是根据状态参数的先验信息预先给出的,这2个参数的取值对模拟结果有一定影响.

1.2.3 随机过程的分段线性方法

随机过程的分段线性方法是在每个观测历元上都设有一个状态未知数,但是,未知参数太多会影响解的可靠度,因此,可以考虑每隔一定的历元间隔 k 取一个状态未知数,并假定在这2个观测历元之间的历元上,测站天顶方向的对流层折射随时间线性变化.选择适当的参数个数(即决定每隔多长时间间隔附加一个参数)是随机过程分段线性方法的关键.

1.3 实例分析

A级网是1992年国际GPS服务(IGS,International GPS Service)会战期间由中国资源卫星应用中心、国家测绘局等多个部门协调合作下组织的一次全国性GPS精密会战.在A级网中,选取6个测站6d(每天24h观测)的观测数据,用不同的对流层折射估计方法进行相对定位,以分析比较各种方法的精度.

基线分量的重复性反映了单天解之间的内符合精度,是GPS平面相对定位结果的重要质量指标之一,其定义为

$$R = \left[\frac{\frac{n}{n-1} \sum_{i=1}^n \frac{(c_i - \bar{c})^2}{\sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2}} \right]^{1/2}$$
(2)

式中: c_i, σ_i^2 ——单天解基线分量及相应分量的方差; $\bar{c}$ ——相应基线分量 n 个单天解的加权平均值.表1为3条基线分别采用单参数法、随机过程方法和分段线性方法得到的基线分量重复性结果.其中分段线性方法采用12个状态参数,即每2h设置1个参数.

从表1可看出,采用分段线性方法和随机过程方法比采用单参数方法在垂直方向的重复性上有明显的改善,南北方向和东西方向重复性也稍有改善,而分段线性方法的效果更好一些.分段线性方法可以将垂直方向的重复性提高到与东西方向接近的水平.

表1 模拟对流层折射影响的3种不同方案重复性比较

Table 1 Comparison of the accuracy of the three different methods for simulating the tropospheric delay

基线	方向	模拟计算的重复性 R/mm		
		单参数方法	随机过程方法	分段线性方法
基线一 (3 372 km)	南北方向	42	24	25
	东西方向	41	44	42
	垂直方向	79	46	43
基线二 (2 900 km)	南北方向	36	21	22
	东西方向	30	29	23
	垂直方向	71	37	40
基线三 (1 454 km)	南北方向	17	15	16
	东西方向	38	26	24
	垂直方向	42	24	20

2 GPS 高程转换

2.1 GPS 高程转换方法概述

由GPS平面相对定位的基线向量,可以得到高精度的大地高差.经平差可得GPS点相对于WGS-84参考椭球体的大地高 H_{GPS} .而我国采用的是正常高系统,因此,在工程应用中应将GPS测量所得的大地高转换为正常高.一般来说,转换GPS高程的方法有利用重力测量方法求高程异常值方法、数学模型拟合法、平差转换法、联合平差法、神经网络方法等.

数学模型拟合法的计算思路是,在某一区域内,如果有一定数量的已知水准点(正常高已知),则可以在这些已知高程的水准点上施测GPS,那么,每点的大地高和正常高均已知,该点的高程异常值就可通过计算得到:

$$\xi = H_{\text{GPS}} - H_{\text{Nor}}$$

(3)

然后,再用一个函数来模拟该区域的似大地水准面高度(区域高程异常变化情况),这样就可以用数学内插的方法求解区域内任一点的高程异常值 ξ 。根据数学模型的不同,数学模型拟合法又分为加权平均法、多面函数法、平面拟合法、二次曲面拟合法等。

2.2 神经网络新算法

目前,我国常用二次曲面拟合法来转换 GPS 高程,其拟合公式为

$$\xi_i = b_0 + b_1x_i + b_2y_i + b_3x_i^2 + b_4x_iy_i + b_5y_i^2$$

(4)

人工神经网络是一门新兴交叉科学,是处理非线性映射问题的有效工具。基于神经网络来转换 GPS 高程是一种自适应的映射方法,理论上比较合理,能减少人为构造的数学模型误差。笔者提出了 GPS 高程转换的神经网络新算法——混合转换法。其具体计算过程为:

- a. 假设区域共有 n 点,其中 n_1 个已知点(H_{GPS} 和 H_{Nor} 均已知),则待定点(已知 H_{GPS} ,待求 H_{Nor})的个数 $n_2 = n - n_1$ 。已知点个数应大于等于 8。
- b. 根据 n_1 个已知点信息,利用式(4)拟合出所有 GPS 点的高程异常值 ξ 。
- c. 计算 n_1 个已知点的高程异常误差:

$$\Delta\xi = \xi_0 - \xi$$

$$\xi_0 = H_{\text{GPS}} - H_{\text{Nor}}$$

(5)

式中 ξ_0 为高程异常已知值。

- d. 再将上述 n_1 个已知点的所有信息构成学习集样本:

$$\{x_i, y_i, \xi_i, \Delta\xi_i\} \quad (i = 1, 2, \cdots, n_1)$$

(6)

式中, (x, y, ξ) 作为输入单元参数, $\Delta\xi$ 作为输出单元参数;用常规 BP 神经网络方法来模拟高程异常误差 $\Delta\xi$,即利用 n_1 个学习集样本对该 BP 神经网络进行训练。隐含层节点数的选取需要经过大量试算得到。

- e. 用训练好的神经网络对 n_2 个待求点进行计算,可得各点的高程异常误差 $\Delta\xi$,从而计算出其正常高程。

$$H_{\text{Nor}} = H_{\text{GPS}} - \xi_0 = H_{\text{GPS}} - (\xi + \Delta\xi)$$

(7)

式中: ξ ——二次曲面拟合法拟合的高程异常值; $\Delta\xi$ ——BP 神经网络方法模拟得出的高程异常误差。

2.3 实例分析

某省 C 级 GPS 网水准联测点 171 个,采用三等水准测量,区域面积约 10 万 km^2 。高程异常值 ξ 的最大值和最小值分别为 12.5377 和 -8.2549,变化很大。171 个点的分布情况不是很好,部分是水域,水准测量的实施有一定的困难。经过常规方法检验,有 20 个粗差点。在剩下的 151 个点中,选取均匀分布的 76 个点为学习样本(已知点),余下的 75 个点为检验样本(检验点)。

对于该工程实例,笔者采用了 4 种不同的 GPS 高程转换方法,其结果见表 2。

相对于二次曲面拟合法,BP 神经网络方法的拟合精度提高了 20%。笔者提出的神经网络新算法,拟合精度提高了 50%。

3 结 语

- a. 大量研究表明,差分 GPS 技术并不能有效地消除对流层折射的影响,而对流层折射是影响 GPS 高程测量精度的主要因素之一。采用随机过程方法以及分段线性方法来模拟测站天顶方向对流层折射的影响,可使 GPS 测量的垂直方向与东西方向的重复性接近。
- b. 本文基于对 BP 神经网络理论的理解,以及对转换 GPS 高程二次曲面拟合法几何意义的思考,提出了一种转换 GPS 高程的方法——混合转换法。通过工程实例检验,该方法效果良好,值得推广。

表 2 某省 GPS 水准数据 4 种拟合方法结果

Table 2 Results of the four different methods of GPS height transformation mm

拟合方法	检验点中误差 (75 个点)	全部点中误差 (151 个点)
平面拟合法	± 306	± 302
二次曲面拟合	± 240	± 239
神经网络 BP 算法	± 182	± 180
神经网络新算法	± 115	± 112

参考文献:

- [1] 葛茂荣. GPS 卫星精密定轨理论及软件研究[D]. 武汉: 武汉测绘科技大学, 1995.
- [2] 葛茂荣, 刘经南. GPS 定位中对流层折射估计研究[J]. 测绘学报, 1996, 25(4): 285-291.
- [3] 邵占英, 刘经南, 姜卫平, 等. GPS 精密相对定位中用分段线性法估算对流层折射偏差的影响[J]. 地壳形变与地震, 1998, 18(3): 13-18.
- [4] 熊聚中. 估计对流层折射的随机过程方法研究[J]. 全球定位系统, 2007(6): 11-13.
- [5] 杨明清, 靳蕃, 朱达成, 等. 用神经网络方法转换 GPS 高程[J]. 测绘学报, 1999, 28(4): 301-307.
- [6] 胡伍生, 华锡生, 张志伟. 平坦地区转换 GPS 高程的混合转换法[J]. 测绘学报, 2002, 31(2): 128-133.
- [7] HU Wu-sheng, SHA Yue-jin. A new method for transforming GPS height into normal height based on neural network[J]. Journal of Surveying Engineering, 2004, 130(1): 36-39.
- [8] 车延国. GPS 高程水准拟合模型与精度分析[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2008, 27(1): 35-38.
- [9] 黄腾, 华锡生, 岳东杰. 精密 GPS 过江水准在特大桥梁工程中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2001, 21(5): 46-48.
- [10] 胡伍生, 华锡生, 鲍兴南. 转换 GPS 高程的神经网络方法[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2001, 29(6): 87-89.
- [11] 陈永勤, 吴尔林. GPS 水准高程测量方法研究与探讨[J]. 水利水电科技进展, 2001, 21(7): 145-147.

Key techniques of precise GPS height surveying

HU Wu-sheng, LI Mei-juan

(School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The tropospheric refraction and GPS height transformation are the two important factors that influence the accuracy of precise GPS height surveying. The estimation methods for tropospheric delay, such as the single parameter method, the stochastic process method and the piece-wise linear method, are introduced. The analysis of an example shows that the piece-wise linear method is better than the other methods. Based on the conicoid fitting method and the neural network method, which are usually used for transforming GPS height, the mixed method, which combines the two methods, is put forward. An application example shows that the mixed method is good for transforming GPS height to normal height.

Key words: GPS height; tropospheric refraction; neural network