

对流层延迟估计对高差较大短基线解算的影响^{* 1}

章迪^{1,2)} 郭际明^{1,2,3)} 陈雪丰^{1,2)} 覃发超^{1,2)}

(1)武汉大学测绘学院,武汉 430079
(2)精密工程与工业测量国家测绘地理信息局重点实验室,武汉 430079
(3)广西空间信息与测绘重点实验室(桂林理工大学),桂林 541004

摘要 使用两台 Leica 1200 接收机对一条高差约为 156 m、长约 1.2 km 的短基线进行了 20 h 的观测,利用 GAMIT10.4 软件进行了 3 种不同方案的基线解算。结果表明,对流层延迟估计与否对平面的影响可以忽略;不进行对流层延迟估计的基线重复性指标仍然较好,但会导致高程方向的系统性偏差。

关键词 GAMIT;高差;短基线;对流层延迟估计;系统性偏差

中图分类号:P228.4

文献标识码:A

INFLUENCE OF ESTIMATION OF TROPOSPHERIC DELAY ON SHORT BASELINE WITH BIG HEIGHT DIFFERENCE

Zhang Di^{1,2)}, Guo Jiming^{1,2,3)}, Chen Xuefeng^{1,2)} and Qin Fachao^{1,2)}

(1) School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079
(2) Key Laboratory of Precise Engineering and Industry Surveying, NASMG, Wuhan 430079
(3) Guangxi Key Laboratory of Spatial Information and Geomatics, Guilin 541004

Abstract Generally, GPS users often apply no estimation of the tropospheric delay to short baselines. To study the influence of the estimation of the tropospheric delay on the short baseline with big height difference, 20 hours of continual GPS observation data of a 1.2 km short baseline with the height difference of 156m were collected by 2 leica1200 GPS receivers. The result from GAMIT 10.4 shows that there is a no apparent influence on the horizontal components, and the height repeatability is still good, without the estimation of atmospheric delay, however, in which condition, systematic errors on the up direction will be included.

Key words: GAMIT; height difference; short baseline; estimation of tropospheric delay; systematic errors

1 引言

GPS 信号穿透对流层过程中,由于干性大气和水汽的共同作用,会使信号的传播速度和路径均发生变化,由此造成对流层延迟。受测站位置、气象条件的影响,对流层延迟在天顶方向约为 1.9 ~ 2.5

m,在高度角为 5°时可达 20 m 以上,是 GPS 定位的主要误差源之一。干性大气和水汽造成的延迟分别称为干延迟和湿延迟,干延迟可以通过模型计算达到很高的精度,而湿延迟则很难用模型进行精确拟合。

对于中长基线,多采用 GAMIT^[1] 等高精度科研

* 收稿日期:2013-07-22

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(121001);广西空间信息与测绘重点实验室 2011 年开放基金(桂科能 1103108-12);武汉大学开放实验项目(2014005),武汉大学实验技术项目(2013005)

作者简介:章迪,男,1984 年生,博士生,从事 GNSS 定位研究. E-mail: dzhang@sgg.whu.edu.cn

软件在双差的基础上进行对流层延迟估计;对于短基线,可以通过双差基本消除,因而不具备对流层延迟估计功能的 GPS 商业软件也可满足精度要求。这是因为基线较短时,通常其高差也较小(但也存在基线虽短而高差较大的特殊情况,如隧洞洞外控制测量),此时由于测站上空的对流层厚度不同,对 GPS 信号的影响会出现较大差异,通过双差并不能完全消除,因而理论上也应进行对流层延迟估计,但估计与否所造成的影响有多大,目前尚未有文献讨论。在 GAMIT 的配置文件 sestbl 中,用户可以选择是否进行对流层延迟估计,这为我们的研究提供了便利。

2 对流层延迟估计

在大地测量中,任意高度角 ε 方向的对流层延迟的表达式为:

$$\Delta L(\varepsilon) = \text{ZHD}mf_h(\varepsilon) + \text{ZWD}mf_w(\varepsilon) \quad (1)$$

式中,ZHD、ZWD 分别表示天顶方向对流层延迟的干、湿分量, mf_h 、 mf_w 分别表示干、湿映射函数。映射函数用于将天顶方向的延迟量映射到某一高度角方向。

GPS 定位中常用的对流层延迟模型有 Saastamoinen 模型、Hopfield 模型、Black 模型和 UNB3 模型等,都通过测站的气象元素来计算 ZHD 和 ZWD 的初始值。当没有测站的实测气象元素时,在 GAMIT 软件中可以采取以下方法替代:1)STP(标准气象元素)模型,即依据海平面上的一组标准的气象元素值和测站高程,采用经验公式计算出测站的气象元素值;2)GPT(全球气压气温)模型,利用 20 a 的气象数据拟合出一个球谐函数,将测站位置和时间代入该函数即可求出某处的气象元素。

映射函数通常都是利用气象资料建立的模型^[2-5],常用的映射函数有 NMF、IMF、UNBabc、VMF1、GMF 等。研究表明,各种映射函数在高度角 15°以上时均没有明显差异。GAMIT 可供选择的映射函数为 NMF、GMF 和 VMF1,三者的精度被认为是依次递增的。

由于映射函数通常都是基于大气球对称假设而建立的,而这与实际大气状况存在一定的差距,为此 GAMIT 引入了大气梯度的概念,以进一步减弱由此造成的影响。在其 solve 模块中采用的梯度模型表达式为^[6]:

$$\Delta L(\varepsilon, \varphi) = \frac{G_{\text{NS}} \cos(\varphi) + G_{\text{EW}} \sin(\varphi)}{(\sin(\varepsilon) \tan(\varepsilon) + 0.003)} \quad (2)$$

其中 ε 代表高度角, φ 代表方位角, G_{NS} 和 G_{EW} 分别代表南北、东西方向的梯度。

对流层延迟估计方法可以分为单参数法、多参数法、随机过程方法、分段线性(PWL)方法,其实质都是一阶高斯马尔科夫过程的近似^[7]。限于篇幅,这里重点介绍 GAMIT 中采用的 PWL 方法^[7,8]。PWL 方法用步长为 $K\Delta t$ 的离散随机过程表示对流层延迟随时间的变化:

$$\rho(I+K) = e^{\frac{K\Delta t}{\tau_p}} \rho(I) + \tilde{W}(I+K) \sigma_w^2 = \frac{1}{2} \tau_p \sigma_w^2 [1 - e^{\frac{2K\Delta t}{\tau_p}}] \quad (3)$$

并假定在历元 I 到 $I+K$ 之间,测站天顶方向的对流层折射随时间线性变化:

$$\rho(j) = \frac{(I+K-j)\rho(I) + (j-1)\rho(I+K)}{K} \quad (I \leq j < I+K) \quad (4)$$

适当选择 K 使待求解的测站天顶方向的对流层折射参数 $\rho(I)$ 、 $\rho(I+K)$ 等的个数较少,从而可以用最小二乘的方法估计参数。

3 实验方案及结果分析

为了分析对流层延迟估计对高差较大短基线解算的影响,选取一条特殊的基线,基线总长度约为 1.2 km,高差约为 156 m。采用两台 Leica 1200 接收机,进行采样率为 10 s、时长为 20 h 的连续观测。

解算采用 GAMIT10.4 版本,数据处理流程如下:将观测数据按每 2 h 划分一个时段,共得到 10 个时段,每一个时段均采取如下 3 种方案进行基线解算。方案 1:同时估计对流层延迟和梯度,即在 sestbl 文件中设置 Zenith Delay Estimation = Y 和 Atmospheric gradients = Y;方案 2:只估计对流层延迟,不估计梯度,Zenith Delay Estimation = Y 和 Atmospheric gradients = N;方案 3:对流层延迟和梯度均不估计,Zenith Delay Estimation = N 和 Atmospheric gradients = N。前两个方案的对流层延迟按每 2 h 估计一个参数(Interval zen = 2)。3 种方案的 sestbl 文件中的其余配置完全一致:观测值选用“L1, L2 Independent”,而非 LC 组合,以避免引入过高的噪声;对流层映射函数采用 VMF1;气象数据来源选择 GPT;对流层估计选择 PWL;星历采用 IGS 精密星历;截止高度角 10°。

先通过与 IGS 站联测获得一个点的较为精确的地心坐标,然后固定该点进行基线解算。所有基线解算(每种方案有 10 个时段即 10 条基线,共计 30 条基线)完成后,利用自行编写的 cshell 脚本,从 GAMIT 输出的 O 文件中提取基线的北东高分量(NEU)和基线长度(d_L)。由于没有真值,本文根据基线重复性来评判基线精度,其计算公式为^[9]:

$$R=\sqrt{\frac{n}{n-1}\frac{\sum_{i=1}^n\frac{(c_i-\tilde{c})^2}{\sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^n\frac{1}{\sigma_i^2}}}\quad(5)$$

式中, n 代表观测时段总数, c_i 代表某基线分量或基线长度, σ_i 为其中误差, $\tilde{c}$ 为其加权平均值, 计算公式为:

$$\tilde{c}=\sum_{i=1}^np_ic_i\quad(6)$$

其中, c_i 的权根据 $p_i=\frac{1}{\sigma_i^2}/\sum_{i=1}^n\frac{1}{\sigma_i^2}$ 确定。

汇总 3 种方案计算的基线, 将各个时段的基线分量绘制为折线图(图 1)。从图 1 可以看出, 对于 N 分量, 3 种方案没有明显区别, 各个时段的差值都在 1.5 mm 之内。从变化趋势看, 方案 2 和方案 3 更为相近, 这说明在 N 方向, 梯度估计比对流层延迟估计造成的影响大; 对于 E 分量, 3 种方案也没有明显区别, 各个时段的差值在 1.5 mm 之内。从变化趋势看, 方案 1 和方案 3 较为接近, 这说明在 E 方向, 对流层延迟估计比梯度估计造成的影响大。对于 U 分量, 方案 1 和方案 2 差距很小, 而方案 3 则与前两种方案存在明显的系统性偏差, 最大的达到 15 mm, 最小的也有 4 mm, 说明对流层延迟估计的影响远远大于梯度估计。对于基线长度, 存在与 U 分量类似的情况, 只是系统性偏差数值并不大, 约在 2 mm 左右, 这是由于基线两端的高差对基线长度的贡献较小造成的。

3 种方案所得基线的 N 、 E 、 U 分量及长度的加权平均值(根据式(6)计算)见表 1。

表 1 基线分量加权平均值的比较(单位:m)

Tab. 1 Comparison of the weighted mean value of components of the baseline(Units:m)

	d_N	d_E	d_U	d_L
方案 1	-72.990 4	1 227.857 4	-156.296 5	1 239.915 3
方案 2	-72.990 6	1 227.857 4	-156.296 3	1 239.915 3
方案 3	-72.990 5	1 227.857 5	-156.288 6	1 239.914 4

可见, 经过加权平均后, 3 种方案的 N 和 E 分量的最大差值分别只有 0.3 和 0.1 mm, 这说明长时间观测后, 对流层延迟的残余误差对基线 N 、 E 分量的影响几乎被平均掉了。而对于 U 分量, 方案 3 与方案 1、2 分别相差 7.9、7.7 mm, 说明长时间观测不能消除残余的对流层延迟的影响; 方案 1、2 互差为 0.2 mm, 说明梯度估计造成的影响有限。

3 种方案的基线重复性计算结果列于表 2。可以看出, 方案 1 和方案 2 的各个分量的重复性相差极小。在 N 、 E 方向, 方案 1 稍优于方案 2, 在 U 方向和基线长度, 方案 2 稍优于方案 1, 这说明估计梯度可以小幅改善平面的精度, 但会对高程造成略微不

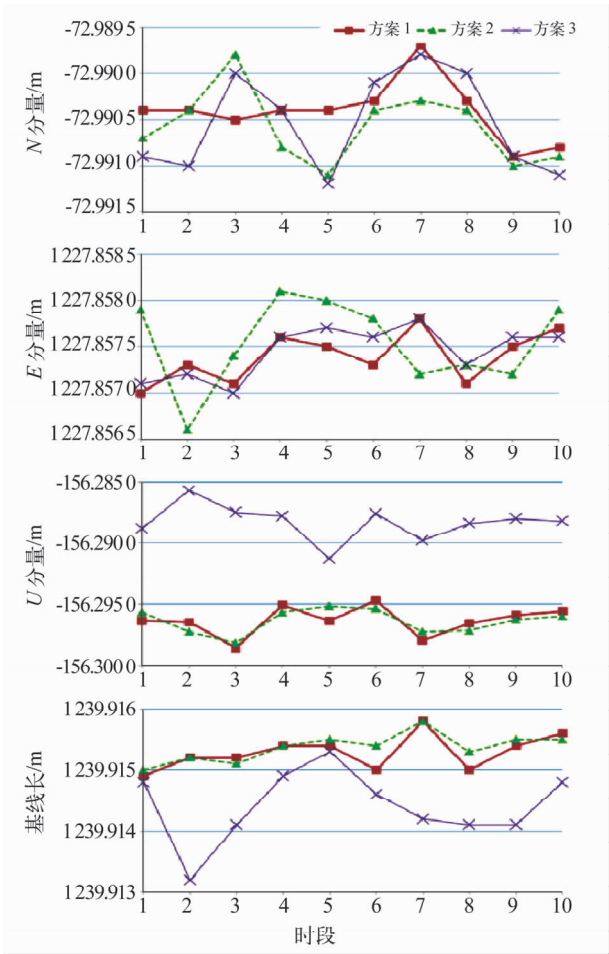


图 1 基线解算结果

Fig. 1 Results of baseline calculation

表 2 基线分量重复性的比较(单位:m)

Tab. 2 Comparison of repeatability of the components of the baseline(units:m)

	d_N	d_E	d_U	d_L
方案 1	0.000 33	0.000 29	0.001 2	0.000 28
方案 2	0.000 38	0.000 30	0.001 0	0.000 23
方案 3	0.000 53	0.000 46	0.001 6	0.000 58

利的影响; 方案 3 的各个分量的重复性在 3 个方案中都是最差的, 说明不估计对流层延迟对于此类基线会造成不利影响。

3 种方案存在的共同点是: E 方向的重复性稍优于 N 方向; U 分量的重复性约为东西或南北方向的 3 倍。这与卫星在天空的图形分布有关。

将基线两端的对流层天顶总延迟(ZTD)求差, 可以得到两测站的相对对流层延迟(RZTD)。由于方案 2 的 U 方向重复性最好, 因此将方案 3 与其进行 RZTD 的比较, 其结果列于表 3, 其中 ΔU 表示方案 3 与方案 2 的 U 分量的较差。

从表 3 可看出, 方案 3 由于未估计对流层延迟参数, RZTD 被视为常数; 而方案 2 估计的 RZTD 则

随时间表现出一定的变化。通过比较 ΔRZTD 和 ΔU 的均值可以得出, ΔRZTD 造成的高程分量 ΔU 的误差大致为其自身的 3 倍。进一步对 ΔRZTD 和 ΔU 进行最小二乘线性拟合, 结果为:

$$\Delta U = -3.167\Delta\text{RZTD}$$

绘制图形如图 2 所示。

表 3 U 分量较差与天顶方向的相对对流层延迟误差 (单位:m)

时段	方案 3	方案 2	ΔRZTD	ΔU
	RZTD1	RZTD2	RZTD1-RZTD2	
1	0.046 1	0.048 4	-0.002 3	0.007 5
2	0.046 1	0.048 7	-0.002 6	0.010 6
3	0.046 1	0.049 2	-0.003 1	0.008 8
4	0.046 1	0.049 2	-0.003 1	0.008 5
5	0.046 1	0.047 4	-0.001 3	0.005 0
6	0.046 1	0.048 6	-0.002 5	0.008 7
7	0.046 1	0.048 7	-0.002 6	0.006 5
8	0.046 1	0.048 7	-0.002 6	0.007 9
9	0.046 1	0.048 7	-0.002 6	0.008 3
10	0.046 1	0.048 3	-0.002 2	0.008 1
均值	0.048 6	0.046 1	-0.002 5	0.008 0

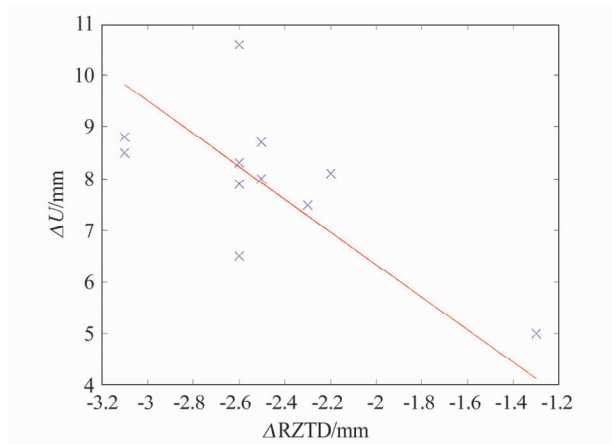


图 2 线性拟合结果
Fig.2 Result of linear fit

4 结语

对流层延迟与测站气象条件密切相关。当两测站的高差较大时,即使基线长度较短,模型改正和双差也不能完全消除对流层延迟的影响。简单地通过基线的长度来判断是否进行对流层延迟估计是不够严密的。计算结果表明,对于高差约为156 m、长度

约为 1.2 km 的基线,不估计对流层延迟会造成测站间 2.5 mm 的 ZTD 残余误差、高程方向 8 mm 的系统性偏差。尤其值得注意的是,如果没有方案 1、2 的比较而仅仅从基线重复性上看,方案 3 的精度仍然是较高的。

在进行一些小区域的高精度测量(如隧道贯通的控制测量)时,遇到基线长度虽短但高差较大的情况,应采用 GAMIT 等高精度科研软件进行数据处理,并在基线解算时设置对流层延迟估计。

参 考 文 献

- 1 Herring T, King R W and McClusky S. GAMIT reference manual(Release 10.4) [M]. Cambridge:Massachussetts Institute of Technology,2010.
- 2 Niell A E. Global mapping functions for the atmospheric delay at radio wavelengths[J]. Journal of Geophys Res,1996, 101:3 227 -3 246.
- 3 Guo Jiming and Langley B L. A new tropospheric propagation delay mapping function for elevation angles down to 2°[C]. ION GPS/GNSS,Portland,2003.
- 4 Boehm J. The global mapping function (GMF):A new eem-pirical mapping function based on numerical weather model data[J]. Geophysical Research Letters,2006,33(7):199 - 208.
- 5 Boehm J, Werl B and Schuh H. Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from Eu-ropean Centre for Medium-Range Weather Forecasts opera-tional analysis data [EB/OL]. http://mars.hg.tuwien.ac.at/~ecmwfl/boehm_et_al_3rd.pdf.
- 6 Chen G and Herring T A. Effects of atmospheric azimuthal a-symmetry on the analysis of space geodetic data[J]. Journal of Geophysical Research; Solid Earth, 1997, 102 (B9): 20 489 -20 502.
- 7 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. (Ge Maorong and Liu Jingnan. The estimation methods for tropospheric delays in global positioning system[J]. Journal of Surveying and map-ping,1996,25(4):285 -291)
- 8 Duan Jingping, et al. GPS meteorology: direct estimation of the absolute value of precipitable water[J]. Journal of Ap-plied Meteorology,1996,35(6):830 -838.
- 9 Dixon T H. First epoch geodetic measurements with the glob-al positioning system across the northern caribbean plate boundary zone[J]. Journal of Geophysical Research; Solid Earth,1991,96(B2):2 397 -2 415.