

区域精密对流层延迟建模

戴吾蛟^{1,2} 陈招华^{1,2} 匡翠林^{1,2} 蔡昌盛^{1,2}

(1 中南大学测绘与国土信息工程系,长沙市麓山南路 932 号,410083)
(2 湖南省精密工程测量与形变灾害监测重点实验室,长沙市麓山南路 932 号,410083)

摘 要:在详细分析高差以及对流层延迟水平变化对 GPS 测量精度影响的基础上,通过 Bernese 软件估算香港连续参考站网基站数年的天顶对流层延迟,建立了符合香港地区的只需时间与位置输入参数的精密对流层延迟改正模型。经检验,新模型的对流层改正精度与输入标准气象的 Saastamoinen 模型相比提高了约 2~3 倍,对高差较大的对流层延迟改正效果更加显著。
关键词:对流层延迟;区域对流层模型;GPS 测量精度
中图法分类号:P228.42

对流层延迟是影响 GPS 定位精度的关键因素,消除对流层延迟误差主要方法有模型改正法、参数估计法、外部修正法以及差分法等。其中,外部修正法精度最高,但价格昂贵,成本较高,常规测量中并不采用;参数估计法虽然精度可以到 mm 级,但要求基线两端的对流层相关性较小,实际应用时一般针对长基线。在短基线测量应用中,一般采用经验对流层延迟模型对该误差进行改正,而且差分后的残余对流层延迟误差常忽略不计。但当基线两端的高差较大或小区域范围内的气象差异较大时,差分后的残余对流层延迟仍然是精密测量的主要误差来源^[1-3]。所以,在如高山滑坡监测^[4]、悬索桥动态位移监测^[5]、高楼振动位移测量^[6]等高精度短基线 GPS 测量中,经验对流层改正模型难以满足要求。文献[7,8]分别从高差及对流层水平变化对普通短基线 GPS 测量精度的影响进行了详细分析。

随着 GPS 技术的广泛应用,许多地区都已经建成了 CORS(continuously operating reference stations,连续运行参考站)系统。经过大量检验,利用 GPS 参数估计方法测定的天顶对流层延迟的精度达到了 mm 级^[9,10]。本文利用 Bernese 软件估算香港连续参考站网基站数年的天顶对流层延迟,在进一步分析高差以及对流层延迟水平变化对

GPS 测量精度影响及其规律的基础上,建立了符合香港地区的只需时间与位置输入参数的精密对流层延迟改正模型,并对模型的精度进行了检验。

1 数据处理与结果分析

1.1 数据来源

本文选择了香港 CORS 网 12 个基站 2005 年~2009 年 6 月 4.5 a 的观测数据,每天每个基站 1 个观测文件,采样间隔为 5 s。由于差分 GPS 对流层延迟参数估计精度优于非差分模式,是目前高精度测定对流层延迟最常用的方法之一,但要求网内必须有基线距离大于 200 km,所以差分模式下常与邻近的一个或多个 IGS 站的数据进行联合处理^[11]。为此,选择了邻近香港地区的 5 个国际 IGS 站的数据进行联合解算,3 个站分别是 BJFS(北京)、KUNM(昆明)和 WUHN(武汉),另外两个站在日本境内为 TSKB 和 USUD 站。

1.2 数据处理方法

采用 Bernese 软件差分模式进行测站 ZTD 估计。估计时先验天顶对流层延迟(zenith tropospheric delay, ZTD)采用 Sasstamoinen 模型计算,干分量映射函数采用 DRY NIELL,湿分量映射函数为 WET NIELL,参数估计先验中误差为

0.001 m,坐标 3 个方向(N,E,U)的先验中误差为 0.1 m,参数估计间隔为 1 h,对流层水平梯度参数估计采用倾斜(TILTING)估计模型,时间间隔为 24 h。为了验证 Bernese 软件估计 ZTD 的精度,以 IGS 站提供的 ZTD 作为参考值,将本文解算得到的 5 个 IGS 站的 2005 年的日平均天顶对流层延迟与之比较,计算得到的平均中误差约为 4.7 mm,由此说明 Bernese 软件可估计出无系统偏差、精度达到 mm 级的绝对 ZTD。

1.3 高差引起的残余对流层延迟变化规律

为了分析高差引起的残余对流层延迟的变化规律,共挑选了高差逐渐增大且基线长度都小于 20 km 的 9 条基线进行处理,基线情况如表 1 所示。经处理后得到相对 ZTD 估计值,然后运用标准气象参数+Saastamoinen 模型计算出相对 ZTD。视估计得到的相对 ZTD 为真值,与模型计算值求差,得到了基线两端的残余相对 ZTD,并对此统计,结果如图 1 所示。

表 1 不同高差基线信息表

Tab.1 Information of Baselines with Different Height

序号	基线	距离/km	高差/m
1	HKFN-HKSS	11.4	2.501
2	HKFN-HKSC	19.1	20.983
3	HKSL-HKKT	16.4	60.746
4	HKMW-HKSL	15.0	99.662
5	HKOH-HKSC	12.2	146.191
6	HKMW-HKPC	4.8	176.842
7	HKST-HKSS	9.6	220.018
8	HKNP-HKSL	14.1	255.397
9	HKNP-HKPC	15.4	332.577

1.4 对流层延迟在水平方向变化规律

为了分析对流层延迟在水平方向变化规律,选取了高差小于 50 m,基线长度逐渐增大的 8 条基线进行处理,基线情况如表 2 所示。水平方向上的残余对流层延迟,经验模型到底能改正多少,这是 GPS 实际测量时关心的问题。同样将 GPS 估计得到的相对 ZTD 与经验模型 Saastamoinen 模型+标准气象参数计算的相对 ZTD 作差得到残余相对 ZTD,然后对此统计,结果如图 2 所示。

表 2 高差小于 50 m 不同长度基线信息表

Tab.2 Information of Baselines with Different Length

序号	基线	距离/km	高差/m
1	HKSS-HKWS	-25.08	6.8
2	HKKT-HKFN	-6.653	9.2
3	HKSS-HKFN	-2.501	15.2
4	HKKT-HKSS	-4.152	20.9
5	HKPC-HKFN	-23.087	25.4
6	HKLT-HKOH	-40.483	30.4
7	HKPC-HKWS	-45.666	34.8
8	HKWS-HKSL	-31.514	42.5

从图 2 中可以看出,残余相对 ZTD 中误差总体呈上升趋势,且每年的变化曲线非常接近,没有出现大的偏差,说明统计结果可靠。图中还可看出 HKWS-HKSL 的 RMS 值偏大,这是因为该基线的一端距海边较远,另一端靠近海边,水汽变化差异很大。其他基线的 RMS 值基本上随着基线长度的增大而增大。总体上,残余相对 ZTD 中误差在水平方向整体上随着基线长度的增大而呈线性增长,但变化速度比高差引起的变化小。

2 香港区域精密对流层模型的建立

2.1 建模思想

首先选择网内某个基站的天顶对流层延迟的年变化建立只有时间参数的对流层模型。把这个初始模型作为参考基准,得到其他各站的对流层延迟与初始模型的差值,这些差值随测站位置而呈空间分布,再根据空间变化规律建立空间改正部分的模型,然后再把剩余部分进行时空建模,三部分综合即得到总的天顶对流层模型。

2.2 建模过程

1) 建立初始模型。选择香港 CORS 网内靠近网的中心的 HKSC 站作为基准站,运用 HKSC 站4 a对应年积日的天顶对流层延迟平均值作为 1 a的天顶对流层延迟时间序列,并以年积日为参数建立初始模型,该模型反映了该区域中心天顶对流层延迟的变化规律。利用 6 阶多项式和 5 次傅立叶函数对天顶对流层延迟序列进行拟合,结果如图 5 所示,从中可以看出傅立叶 5 次函数曲线拟合精度较高。因此,初始模型即为傅立叶 5 次函数,具体如式(1)所示:

$$\begin{aligned} ZTD_{\text{priori}}(t) = & a_0 + a_1 \cos(tw) + b_1 \sin(tw) + \\ & a_2 \cos(2tw) + b_2 \sin(2tw) + a_3 \cos(3tw) + \\ & b_3 \sin(3tw) + a_4 \cos(4tw) + b_4 \sin(4tw) + \\ & a_5 \cos(5tw) + b_5 \sin(5tw) \end{aligned} \tag{1}$$

式中,t 为年积日,a_i,b_i(i=0,⋯,5)为系数,a₀=2.579,a₁=-0.078 44,b₁=-0.030 79,a₂=-0.010 39,b₂=-0.011 28,a₃=-0.009 456,b₃=0.006 091,a₄=0.003 92,b₄=0.006 597,a₅=-0.010 46,b₅=0.005 33,w=0.018 33。

2) 空间变化平均改正部分。由前面的分析可知,对流层延迟具有较强的空间相关性,但同时具有一定的差异,并具有一定的规律。因此,其他位置的 ZTD 可认为是由初始模型部分与 HKSC 站的空间差异部分组成。空间差异改正模型的建模过程为:首先将其他各站的年平均天顶对流层

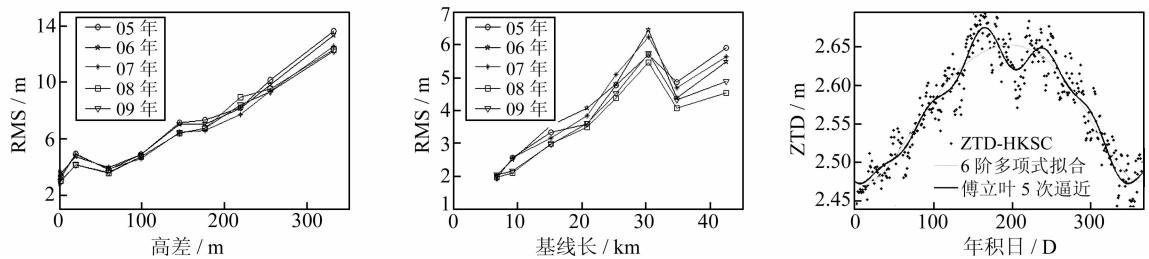


图 1 不同高差 2005~2009 年
残余对流层延迟中误差曲线

Fig.1 RMS Values of Residual
ZTD of Baselines with Different
Height from 2005 to 2009

图 2 不同长度基线 2005~
2009 年残余 ZTD 中误差

Fig.2 RMS Values of Residual
ZTD of Baselines with Different
Length from 2005 to 2009

图 3 HKSC 站天顶对流
层延迟拟合曲线

Fig.3 Curve of ZTD of
HKSC Station

延迟与初始模型计算得到的平均值作差,得到各基站的实测值与初始模型的差值;参照其他经验改正模型,将经度 $L(\text{rad})$ 、纬度 $B(\text{rad})$ 按式(2)转化成余弦函数;采用逐步回归分析方法,将其中 10 个基站的对流层延迟差值与空间上 3 个参数作相关分析,计算得到与经度、纬度、高程的平均相关系数分别为 $-0.345\ 2$ 、 $-0.574\ 6$ 、 $-0.999\ 7$,参考经验模型,剔除不显著参数经度,只保留高程和纬度;采用最小二乘法进行曲面拟

合,即建立天顶对流层延迟空间变化改正值与高差及经纬度的函数关系,模型表达式如式(3)所示。其中 a_{ij} 为 $p \times q$ 的系数矩阵, $f(B)$ 为式(2)所表示的函数, h 为高程(m);通过改变方程阶数 p 和 q 来确定最佳拟合参数,经过逐步实验得 p 与 q 的最佳值都为 5,系数矩阵 a_{ij} 如表 3 所示。

$$f(B) = \cos(2B), f(L) = \cos(2L) \tag{2}$$

$$\text{ZTD}(h, f(B)) = \sum_{i=0}^{p-1} \sum_{j=0}^{q-1} a_{ij} h^i f(B)^j \tag{3}$$

表 3 空间拟合模型的系数

Tab.3 Coefficient Values of Spatial Quadric Model

a_{ij}	$j=0$	$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$
$i=0$	2.641×10^{-3}	-5.049×10^{-5}	3.894×10^{-7}	-1.042×10^{-9}	8.331×10^{-13}
$i=1$	-6.857×10^{-4}	3.817×10^{-6}	-2.245×10^{-8}	5.911×10^{-11}	-6.787×10^{-14}
$i=2$	4.117×10^{-6}	-3.086×10^{-8}	3.453×10^{-11}	1.798×10^{-13}	-1.179×10^{-16}
$i=3$	-1.666×10^{-8}	9.499×10^{-11}	2.261×10^{-13}	-1.871×10^{-15}	1.375×10^{-18}
$i=4$	2.228×10^{-11}	-9.642×10^{-14}	-6.714×10^{-16}	3.648×10^{-18}	-2.738×10^{-21}

3) 空间差异随时间变化的改正部分。上述第二部分实际是空间差异的年平均改正部分。由前面分析可知,当空间位置差异一定时,相对对流层延迟还随时间的变化而变化,其中水平位置差异引起的相对对流层延迟随时间变化较小,高差引起的相对对流层延迟随时间变化部分较大。为了简化模型,空间差异随时间变化的改正部分只考虑高差引起的相对对流层延迟随时间变化部分。该部分建模的过程为:首先将各站估计得到的 ZTD 的平均值减去初始模型与空间平均改正

模型计算的 ZTD 得到残余量;令建立初始模型的 HKSC 站高程为零,则空间差异随时间变化的改正部分即为高程和时间的函数;利用最小二乘法进行曲面拟合,建立函数模型:

$$\text{ZTD}(h, t) = \sum_{i=0}^{p-1} \sum_{j=0}^{q-1} b_{ij} h^i t^j \tag{4}$$

式中, b_{ij} 为 $p \times q$ 的系数矩阵, h 为高程(m), t 为年积日。经过反复实验,通过检验模型中误差和图形拟合程度,得 p 、 q 的最佳值为 $p=q=5$ 。其系数如表 4 所示。

表 4 相对 ZTD 随高程和时间变化部分拟合模型的系数

Tab.4 Coefficient Values of Quadric Model of Height and Time

b_{ij}	$j=0$	$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$
$i=0$	$-8.068\ 8 \times 10^{-3}$	$1.262\ 8 \times 10^{-4}$	$-3.256\ 2 \times 10^{-7}$	$-9.076\ 2 \times 10^{-10}$	$2.931\ 5 \times 10^{-12}$
$i=1$	$3.251\ 2 \times 10^{-4}$	$-1.131\ 5 \times 10^{-5}$	$1.044\ 2 \times 10^{-7}$	$-3.478\ 3 \times 10^{-10}$	$3.781\ 5 \times 10^{-13}$
$i=2$	$-4.130\ 0 \times 10^{-6}$	$1.592\ 7 \times 10^{-7}$	$-1.567\ 0 \times 10^{-9}$	$5.446\ 6 \times 10^{-12}$	$-6.115\ 4 \times 10^{-15}$
$i=3$	$1.815\ 8 \times 10^{-8}$	$-7.061\ 9 \times 10^{-10}$	$6.987\ 3 \times 10^{-12}$	$-2.442\ 1 \times 10^{-14}$	$2.759\ 1 \times 10^{-17}$
$i=4$	$-2.505\ 3 \times 10^{-11}$	$9.813\ 5 \times 10^{-13}$	$-9.746\ 9 \times 10^{-15}$	$3.416\ 9 \times 10^{-17}$	$-3.871\ 9 \times 10^{-20}$

综合上面拟合得出的初始模型、空间变化改正模型和时空变化改正模型,得到香港地区精密

天顶对流层模型为:

$$\begin{aligned} \text{ZTD}(t,h,B) = & \text{ZTD}_{\text{priori}}(t) + \text{ZTD}(h,f(B)) \\ & + \text{ZTD}(h,t) + \xi \end{aligned} \tag{5}$$

式中, $\text{ZTD}_{\text{priori}}(t)$ 、 $\text{ZTD}(h,f(B))$ 和 $\text{ZTD}(h,t)$ 分别对应式(2)~式(4), ξ 表示特殊天气条件下的改正值,初始值为0。由于特殊天气条件如台风、暴雨等会引起天顶对流层延迟出现急剧变化,比较复杂,留待今后进一步研究。

2.3 模型精度检验

1) 绝对天顶对流层延迟检验。HKOH 站的数据未参与建模而作为检核站,利用新模型计算该站天顶对流层延迟与2006年GPS估计得到的天顶对流层延迟及采用年平均气象的Saastamoinen模型计算值进行比较,结果如图4所示。

从图4可以看出,新的天顶对流层模型很好地拟合了GPS估计值。若以GPS估计得到的天顶对流层延迟为真值,新模型计算的HKOH站2006年的天顶对流层延迟的中误差为0.037 3 m,而Saastamoinen模型的中误差为0.093 1 m。

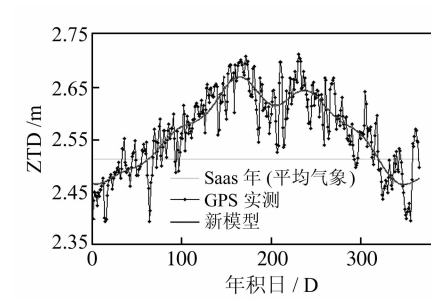


图4 2006年HKOH站天顶对流层延迟检验
Fig. 4 ZTD Curves of Different Models of HKOH Station in 2006

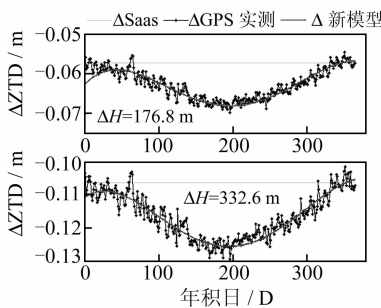


图5 计算不同高差的天顶相对对流层延迟的比较
Fig. 5 Relative ZTD of Baselines with Different Height Computed

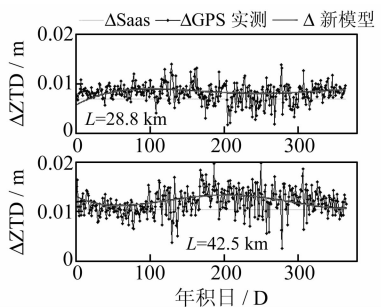


图6 不同长度基线的天顶相对对流层延迟的比较
Fig. 6 Relative ZTD of Baselines with Different Length Computed

表5 不同模型计算的相对对流层延迟中误差
Tab. 5 RMS Values of Relative ZTD Computed by Different Models

基线	距离/km	高差/m	RMS/m	
			Saastamoinen	新模型
HKMW-HKPC	4.8	176.8	0.006 5	0.002 5
HKNP-HKPC	15.4	332.6	0.012 2	0.003 4
HKSS-HKPC	28.8	20.6	0.002 3	0.002 1
HKSL-HKWS	42.5	31.5	0.003 0	0.002 5

从表5可以看出,新模型在高差较大时的相对对流层延迟改正精度明显高于Saastamoinen模型,大约是经验模型的2~3倍,而且随着高差的增大,新模型的改正精度更加明显。而在水平方向上,新模型与经验模型的相对对流层延迟改正精度相差很小,但都保持了比较高的精度。

将新模型测定的对流层天顶延迟与2005~2008年GPS估计得到的平均天顶对流层延迟进行比较,得到新模型改正的平均精度为0.022 4 m。

2) 相对对流层延迟检验。为检验新模型在相对定位测量中对流层延迟误差改正的效果,选择了4条基线进行了检验,即利用新模型计算的相对天顶对流层延迟与经验模型的计算值以及GPS估计值进行比较,结果如图5和图6所示。图5反映了基线较短(小于20 km)高差增大的情况,图6反映了高差较小(小于50 m)基线长度增长的情况。

从图5和图6可以看出,随着高差的增大,经验模型计算的相对天顶对流层延迟与GPS估计值之间偏差也在增大,而新模型总是接近于GPS估计值。而在水平方向,相对天顶对流层延迟没有高程方向精度变化明显,但仍然从图6中可以看出新模型计算的相对天顶对流层延迟更接近于GPS估计值。若视GPS估计值为真值,经验模型与新模型计算得到的相对天顶对流层延迟残差的RMS值如表5所示。

3 结 语

不同于一般经验模型建立时需要大量的探空气象资料,新模型是利用GPS估计得到的精确天顶对流层延迟进行建模。新模型主要由基准位置随时间变化部分、与基准位置空间差异平均变化部分以及与基准位置空间差异随时间变化部分3部分组成。经过检验,新模型计算的绝对天顶对流层延迟的平均精度约为2 cm;高差较大时的相对对流层延迟改正精度明显优于经验模型,约是Saastamoinen模型的2~3倍。新模型无需输入气象观测值,只与年积日与位置参数有关,使用方便,不仅在高精度短基线测量中具有较大的应用

价值,而且在高精度导航定位中也具有一定的推广价值。但新模型还未考虑特殊天气的影响,有待进一步研究完善。

参 考 文 献

[1] Brunner F K, Welsch W M. Effect of the Troposphere on GPS Measurements[J]. GPS World, 1993, 4(1):42-51

[2] Collins J P, Langley R B. Estimating the Residual Tropospheric Delay for Airborne Differential GPS Positioning[C]. ION GPS 1997, Kansas City, 1997

[3] Tsujii T, Wang Jinling, Rizos C, et al. Estimation of Residual Tropospheric Delay for High-Altitude Vehicles: Towards Precise Positioning of a Stratosphere Airship[C]. ION GPS 2000, Utah, 2000

[4] Schon S, Wieser A, Macheiner K. Accurate Tropospheric Correction for Local GPS Monitoring Networks with Large Height Differences[C]. ION GNSS 2005, Long Beach, CA, 2005

[5] Meng X L. Real-time Deformation Monitoring of Bridges Using GPS/accelerometers[D]. U K; the University of Nottingham, 2002

[6] Dai Wujiao, Ding Xiaoli, Li Zhiwei, et al. Tropospheric Effects in Monitoring Super High Buildings With GPS[C]. ION GNSS 2006, Fort Worth, 2006

[7] 戴吾蛟, 陈招华, 梁铭. 高差对 GPS 大地高测量精

度的影响[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(3):80-83

[8] 陈招华, 戴吾蛟. 区域对流层延迟水平变化对 GPS 测量精度的影响[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(3):83-87

[9] Mekik C. Tropospheric Delay Models in GPS[C]. International Symp on GIS/GPS, Istanbul, Turkey, 1997

[10] Collins J P, Langley R B. Estimating the Residual Tropospheric Delay for Airborne Differential GPS Positioning[C]. ION GPS 97, Kansas City, 1997

[11] Rocken C, Ware R, Von Hove T, et al. Sensing Atmospheric Water Vapor with the Global Positioning System[J]. Geophysical Research Letter, 1993, 20: 2 631-2 634

[12] 宋淑丽. 地基 GPS 网对水汽三维分布的监测及其在气象学中的应用[D]. 上海: 中国科学院上海天文台, 2004

[13] Dach R, Hugentobler U, Fridez P. Bernese GPS Software Version 5. 0 Tutorial Processing Example Introductory Course Terminal Session[M]. Bern: Astronomical Institute, University of Bern, 2007

第一作者简介: 戴吾蛟, 副教授, 博士, 主要从事变形监测、GNSS 数据处理及应用软件开发工作。
E-mail: wjdai@mail. csu. edu. cn

Modeling Regional Precise Tropospheric Delay

DAI Wujiao^{1,2} CHEN Zhaohua^{1,2} KUANG Cuilin^{1,2} CAI Changsheng^{1,2}

(1 Department of Surveying Engineering & Geo-Informatics, Central South University, 932 South Lushan Road, Changsha 410083, China)

(2 Key Lab. of Precise Engineering Surveying & Deformation Disaster Monitoring of Hunan Province, 932 South Lushan Road, Changsha 410083, China)

Abstract: In this paper, the effects of height difference and the horizontal change of troposphere on the accuracy of GPS surveying is discussed at first. And then GPS observation data collected in several years from Hong Kong Continuously Reference Station Network is used to model the precise tropospheric delay. This model is based on estimated zenith tropospheric delay of all the stations using the Bernese GPS software. The input parameters of the model are day of year and location of the station. The testing results show that the tropospheric delay error can be reduce about 2 to 3 times compared to Saastamoinen model with standard meteorological parameters, and the effect is more remarkable when the height difference of two stations is large.

Key words: tropospheric delay; regional tropospheric model; GPS measurement accuracy