

# 对流层模型评估及其在 GNSS 精密单点定位中的应用

陈 猛<sup>1,2</sup> 陈俊平<sup>2</sup> 胡丛玮<sup>1</sup>

1 同济大学测绘与地理信息学院,上海市四平路 1239 号,200092

2 中国科学院上海天文台,上海市南丹路 80 号,200030

**摘 要:** 以水汽辐射计(WVR)精确测定的天顶方向延迟值作为参考,评估 Saastamoinen、GPT2、EGNOS、UNB3M 四种常用对流层模型在上海地区的改正精度;并将 WVR 观测值及以上 4 种对流层模型计算的对流层延迟值作为真值应用到 GNSS 精密单点定位(PPP)中,评估其对定位精度的影响。比较发现,GPT2 模型的对流层改正精度比其余 3 种要好,其天顶干延迟(ZHD)的偏差均值与中误差分别为-0.11 cm、±0.75 cm,天顶湿延迟(ZWD)的平均偏差与中误差分别为-2.34 cm、±7.67 cm;和传统的 PPP 结果相比,采用 WVR 对流层观测值的定位精度提高了 16%。

**关键词:** 水汽辐射计; 对流层模型; 天顶延迟; 精密单点定位

中图分类号:P228

文献标识码:A

WVR 可以对大气水汽进行监测,利用水汽与湿延迟之间的关系求出天顶方向湿延迟<sup>[1-2]</sup>。许多学者对 WVR 的应用进行研究。陈俊平等<sup>[3]</sup>利用气象观测值直接求出的水汽含量与 WVR 观测值的平均差值为 0.03 mm,均方差为 0.02 mm;Ware 等<sup>[4]</sup>通过使用 WVR 对卫星进行定向跟踪来改正不同方位的水汽含量,50 km 基线的高程精度可达 2.6 mm;王勇等<sup>[5]</sup>利用事后精密星历解算对流层延迟并与 WVR 观测数据比较,得出 WVR 与精密星历湿延迟差值的均值为 0.77 cm,均方根为 1.51 cm;陈俊平等<sup>[6]</sup>将 WVR 水汽观测数据引入 GPS 基线解算,对于 10<sup>6</sup> m 的基线能够产生 cm 级差异。本文收集了上海某高校楼顶并址的 GPS 气象仪与 WVR(两者相距约 3 m)2014-06~12 观测数据,以 WVR 精密观测值为标准,评估常用对流层模型在上海地区的适用性;并将 WVR 精密观测值、常用对流层模型计算的延迟值引入单点定位,分析不同模型动态 PPP 的精度。

## 1 常用的对流层模型

### 1.1 Saastamoinen 模型

Saastamoinen 模型(简称 SAAS)主要通过三

角函数展开并逐项积分而得到对流层天顶总延迟 ZTD<sup>[7]</sup>:

$$ZTD = \frac{0.002\ 277}{f(\varphi, h)} [P_s + (\frac{1\ 255}{T_s} + 0.05)e_s] \quad (1)$$

$$e_s = r_h \times 6.11 \times 10^{7.5(T_s - 273.15)/T_s} \quad (2)$$

$$f(\varphi, h) = 1 - 0.002\ 66 \cos(2\varphi) - 0.000\ 28 h \quad (3)$$

式中,ZTD 单位为 m,  $T_s$  为地面温度(K),  $P_s$  为地面气压(mbar),  $e_s$  为地面水汽压,  $r_h$  为地面相对湿度(0~1)。其中,气象参数可以是实测数据;  $f(\varphi, h)$  是纬度和高度的函数,反映了重力加速度随地理位置和海拔高度不同而变化;  $\varphi$  为测站的地心大地纬度(rad);  $h$  为测站大地高(m)。

若没有实测气象数据,可通过加拿大新布伦斯威克大学标准大气参数 DIPOP 模型计算:

$$\begin{cases} T_s = T_0 - 0.006\ 8h \\ P_s = P_0(1 - \frac{0.006\ 8}{T_0}h)^5 \end{cases} \quad (4)$$

$$e_s = \begin{cases} e_0[1 - \frac{0.006\ 8}{T_0}h]^4, & h < 1\ 100\ \text{m} \\ 0, & h \geq 1\ 100\ \text{m} \end{cases} \quad (5)$$

式中,初始标准参考大气参数  $P_0 = 1\ 013.25$  mbar,  $e_0 = 11.691$  mbar,  $T_0 = 288.15$  K,  $h$  为测站大地

收稿日期:2015-06-14

项目来源:中国科学院百人计划;国家 863 计划(2013AA122402,2014AA123102);国家自然科学基金(11273046,41174024);上海市科学技术委员会项目(12DZ2273300,13PJ1409900)。

第一作者简介:陈猛,硕士生,研究方向为 GNSS 数据处理,E-mail:cmkxf@sina.com。

高(m)。

### 1.2 GPT2 模型

GPT2 模型<sup>[8-9]</sup>是以 ERA-Interim 数据为基础建立的,可提供任意位置上的气压、温度、温度递减率、水汽分压、映射函数系数以及各系数年度与半年度的变化,年度或半年度测站高的振幅差异较小。文献[8,12]描述了 GPT2 模型的优势,可从维也纳理工大学网站(<http://ggosatm.hg.tuwien.ac.at/DELAY/SOURCE/>)下载子程序以及运行所需的格网数据。此模型根据测站年积日以及大地坐标来获取测站处的气象数据,不能直接得到延迟值,因此使用式(1)~(3)计算 ZTD。

### 1.3 EGNOS 模型

EGNOS 模型<sup>[10]</sup>在每个 15° 纬度网格点上提供 5 个平均海平面气象参数值,用户可根据自己的纬度和年积日,利用余弦函数计算自己所需的气象参数,进而基于高程改正计算对流层天顶延迟。其主要特点是计算天顶延迟时无需实测的气象数据。具体计算流程是:先根据接收机的纬度和观测日期,求得平均海平面的 5 个气象参数,计算相应的平均海平面处的天顶干延迟(ZHD)、天顶湿延迟(ZWD);然后根据接收机的高程,由平均海平面处的延迟值计算接收机处的 ZHD、ZWD,ZTD 则由两者相加求得。

### 1.4 UNB3M 模型

UNB3M 模型<sup>[11]</sup>使用 1966 年美国标准大气资料推导出的 5 个气象参数的平均值及周年变化振幅,全球纬度每隔 15° 给出一组数据,用户可根据所处纬度和时间,利用余弦函数计算所需的气象参数,进而计算大气延迟。但是某些地区会出现大气湿度超过 100% 的现象,UNB3M 模型针对此问题作了改进。文献[10]对模型公式和内插计算气象数据所需的数据表有具体描述,通过此模型可以获取测站处的 ZHD、ZWD、温度、气压、水汽压等参数。

## 2 对流层天顶延迟

为评估不同对流层模型的改正精度,本文以 WVR 观测值为基准,分析上述 4 种模型和采用 Bernese 软件进行 GNSS PPP 估计得到的对流层延迟值。实验数据为上海某高校楼顶并址的 GPS 气象仪与 WVR 2014-06~12 观测数据。首先采用 Bernese 软件,根据并址的 GPS 观测数据解算 ZHD、ZWD、ZTD,然后编写程序计算 SAAS、GPT2、UNB3M 和 EGNOS 四种模型的

ZHD、ZWD 和 ZTD。对流层天顶延迟的计算分为 3 种方式:

1)采用 Bernese5.0 软件,选择 NEILL 模型对天顶延迟进行估算。利用收集到的观测数据,对天顶方向干延迟(ZHD)利用模型进行修正,而天顶湿延迟(ZWD)则作为参数估计<sup>[2]</sup>。

2)采用经验模型 SAAS、GPT2、EGNOS、UNB3M 进行改正。引入实测气象数据、标准大气气象数据,直接求取天顶延迟。

3)基于 WVR 观测的天顶延迟改正。其中,干延迟是利用 WVR 的实测气象数据,根据经验模型求得,而湿延迟是使用转换因子以及水汽观测量(IWV)计算获得。

### 2.1 天顶干延迟的计算

各对流层模型的 ZHD 按下式计算<sup>[4-5]</sup>:

$$ZHD = \frac{0.0022768P_s}{f(\varphi, h)} \quad (6)$$

式中,  $P_s$  为 GPS 接收机天线处大气压力, ZHD 单位为 m,  $f(\varphi, h)$  及其变量含义同式(3)。

根据式(6)计算不同对流层模型的 ZHD,见图 1。图中 SCSAAS 表示 SAAS 模型使用气象仪实测气象数据计算的结果,SDSAAS 表示标准大气下 SAAS 模型天顶干延迟计算结果,WVR 为采用水汽辐射计实测气象数据获取的干延迟值。

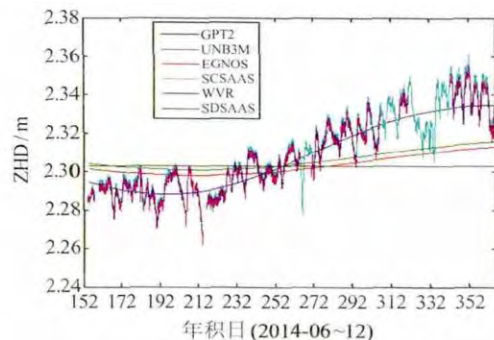


图 1 利用经验模型以及 WVR 观测的气象数据计算的天顶干延迟的比较

Fig. 1 Comparison of ZHD between WVR and empirical troposphere models

以 WVR 为参考,比较对流层模型之间的差异,见表 1 和图 2。

表 1 各模型与 WVR 天顶干延迟的偏差均值、中误差  
Tab. 1 Mean bias and RMS of ZHD between WVR and troposphere models

	GPT2	UNB3M	EGNOS	SCSAAS	SDSAAS
偏差/cm	-0.11	-0.17	-0.45	0.24	-0.40
RMS/cm	±0.75	±1.56	±1.62	±0.25	±2.01

式(6)表明,气压直接影响干延迟的计算结果,10 hPa 的气压变化会引起约 3 cm 的 ZHD 变

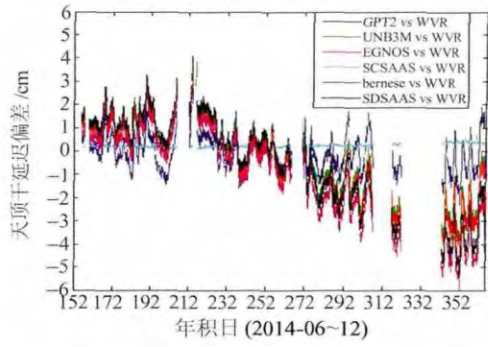


图 2 利用经验模型与 WVR 观测的气象数据计算的天顶干延迟偏差  
Fig. 2 Bias of ZHD between WVR and empirical troposphere models

化。由图 1、2 和表 1 可知,在夏季不同模型干延迟的改正精度相当,冬季差异较为明显。GPT2 模型干延迟中误差为 ±0.75 cm,与实测气压差值在 2 hPa 左右;SDSAAS 模型改正精度最差,气压差值约为 7 hPa;UNB3M 模型与 EGNOS 模型干延迟改正精度介于两者之间,气压差值 5 hPa;GPT2 模型气压数据更接近测站处的气压真实值。

2.2 天顶湿延迟的计算

湿延迟量主要受水汽影响。由于水汽含量随时间和空间变化剧烈,模型化表达不精确,一般是从求出的天顶总延迟中扣除天顶干延迟<sup>[13]</sup>:

$$ZWD = ZTD - ZHD \quad (7)$$

此外,WVR 能够对水汽进行观测,可将其观测的综合水汽含量 IWV 转换为天顶湿延迟<sup>[14-15]</sup>:

$$ZWD = IWV \cdot \Pi^{-1} \quad (8)$$

式中,  $\Pi^{-1}$  为转换因子,无量纲,一般随季节变换有所不同,主要取决于水汽加权平均温度  $T_m$ :

$$\Pi^{-1} = 10 - 6\rho_{H_2O}R_v(c_1/T_m + c_2) \quad (9)$$

式中,  $\rho_{H_2O}$  是液态水的密度  $10^3 \text{ kg/m}^3$ ;  $R_v$  为水汽特定气体常数  $461.5 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ ;  $c_1$  与  $c_2$  均为常量,  $c_1 = (3.739 \pm 0.012)105 \text{ K}^2/\text{hPa}$ ,  $c_2 = (22.1 \pm 2.2)\text{K}/\text{hPa}$ ;  $T_m$  是大气水汽加权平均温度。考虑到与地表温度的线性关系,其近似观测值可用测站的观测温度  $T_s$  计算,两者之间的线性关系具有区域性差异。针对上海地区,计算时可用下式<sup>[16]</sup>:

$$T_m \approx 75.3 + 0.72T_s \quad (10)$$

式中的测站温度为实测值。

比较实测温度与模型温度计算出的转换因子,结果见图 3。  $\Pi^{-1}$  值变化在图中以 Q 表示, SC 表示实测温度的转换因子值。

以实测温度的转换因子值为参考,比较各对流层模型转换因子的差异,见图 4 和表 2。

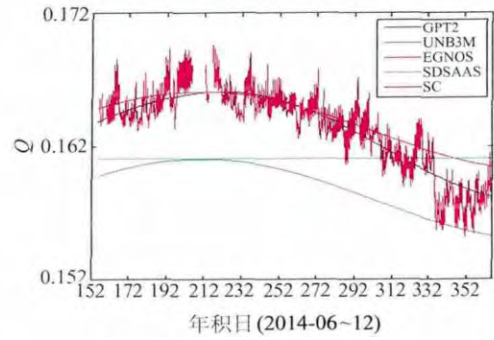


图 3 不同模型获取转换因子的比较  
Fig. 3 Comparison of converting factor, which is obtained from different empirical models

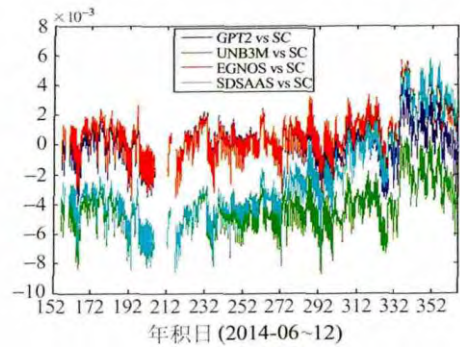


图 4 转换因子偏差  
Fig. 4 Bias of the converting factor

表 2 转换因子偏差均值和中误差

Tab. 2 Mean bias and RMS of converting factor

	GPT2	UNB3M	EGNOS	SDSAAS
偏差/ $10^{-3}$	0.08	-4.26	0.76	-2.19
RMS/ $10^{-3}$	±1.25	±4.56	±1.73	±3.75

式(9)、(10)表明,温度值变化 10 K 会导致转换因子值变动 0.005 8。由图 3、4 和表 2 可知,与实测气象值的转换因子相比,GPT2、EGNOS 模型转换因子差值均在 0.001 左右,温度差值约 2 K;UNB3M 模型与 SDSAAS 模型的转换因子差值均约为 0.004,温度差值约为 7 K。说明 GPT2 模型与 EGNOS 模型更符合上海地区的实际。

使用转换因子与水汽含量求湿延迟时,降雨天观测的水汽数值会增大 10~30 mm,引起 2~5 mm 的湿延迟偏差,因此需要根据观测文件中的降雨标志进行剔除。将剔除异常的水汽值转换为湿延迟并作为参考值,评估各对流层模型计算的湿延迟和 Bernese 软件解算的湿延迟精度(图 5、6),其偏差与中误差结果见表 3。

表 3 天顶湿延迟偏差均值与中误差

Tab. 3 Mean bias and RMS of ZWD

	GPT2	UNB3M	EGNOS	SCSAAS	Bernese	SDSAAS
偏差/cm	-2.34	-1.83	-1.68	-5.15	0.41	-11.31
RMS/cm	±7.67	±9.36	±9.72	±8.33	±2.58	±16.61

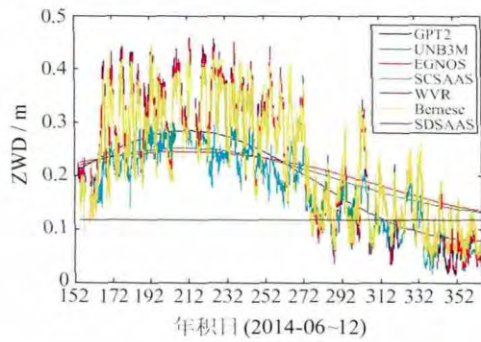


图5 各经验模型计算值和 WVR 观测天顶湿延迟的比较

Fig. 5 Comparison of ZWD between WVR and empirical models

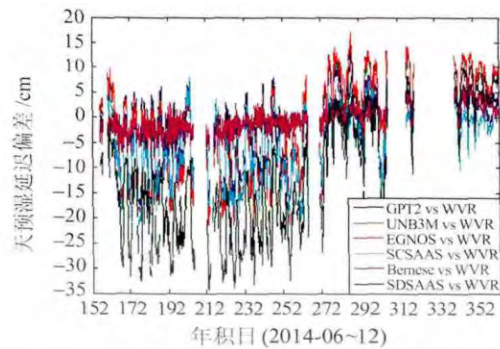


图6 各经验模型计算值与 WVR 观测天顶湿延迟的偏差

Fig. 6 Bias of ZWD between WVR and empirical models

由图 5、6 及表 3 结果可知,对流层模型湿延迟改正精度较低;GPT2 模型与 SCSAAS 模型湿延迟改正精度相当,具有明显的季节性变化,比其余对流层模型中改正精度最高的 UNB3M 模型精度提高了 18%;UNB3M 模型与 EGNOS 模型改正精度相当;SDSAAS 模型改正精度最差。

### 2.3 天顶总延迟

ZTD 代表了模型的整体精度。对流层模型计算的 ZTD 以及 Bernese 软件解算的 ZTD 见图 7。

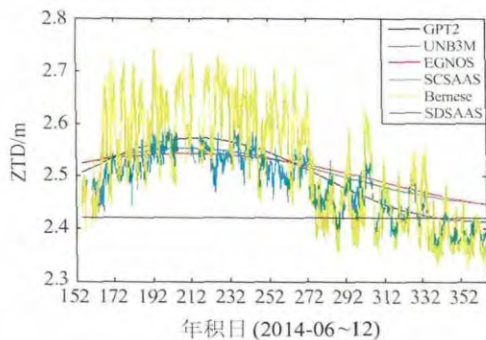


图7 各经验模型计算值与 Bernese 解算天顶总延迟的比较

Fig. 7 Comparison of ZTD between empirical models and Bernese estimation

WVR 测得的天顶总延迟精度较高,但连续性不好;而 Bernese 解算的天顶总延迟精度与 WVR 相当,且具有更好的连续性。为便于比较,以 Bernese 解算的天顶总延迟为基准,计算各对流层模型的偏差均值与中误差(图 8 和表 4)。

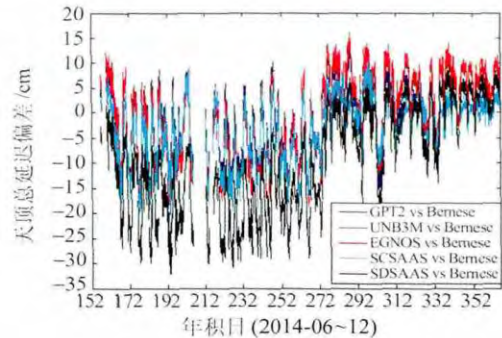


图8 各经验模型计算值与 Bernese 软件解算天顶总延迟的偏差

Fig. 8 Bias of ZTD between empirical models and Bernese estimation

表 4 天顶总延迟的偏差均值与中误差

Tab. 4 Mean bias and RMS of ZTD

	GPT2	UNB3M	EGNOS	SCSAAS	SDSAAS
偏差/cm	-1.26	-0.35	-0.35	-3.33	6.70
RMS/cm	±6.87	±7.88	±8.24	±6.70	±13.98

由图 7、8 和表 4 可知,天顶总延迟的变化趋势与天顶湿延迟基本一致,表明湿延迟虽然所占比重小,但影响很大。其中,GPT2 模型与 SCSAAS 模型改正精度相当,比其余对流层模型中改正精度最高的 UNB3M 提高了 13%;UNB3M 模型改正精度与 EGNOS 模型相当;SDSAAS 模型的延迟改正精度最差。可见,GPT2 模型能更好地描述上海地区天顶总延迟的变化情况。

### 3 延迟模型对 PPP 结果的影响

在精密单点定位过程中,通常是将干延迟固定,湿延迟作为参数与坐标一起解算。为进一步考察不同对流层模型对定位精度的影响,采用 PPP 方法,引入不同模型的湿延迟作为固定值,进行逐历元动态单点定位。数据处理过程中对 Bernese 软件进行修改,将水汽辐射计与对流层模型的湿延迟作为已知值,引入动态坐标解算<sup>[12]</sup>。采用 2014 年年积日 223、258、278、305 的数据,测站为静态观测站,其每天的精确坐标通过单天静态 PPP 获得。将动态坐标与精确坐标比较,求取偏差并统计重复率,见图 9 和表 5。其中 EST 为估计对流层参数得到的动态坐标结果,WVR 表示引入水汽辐射计湿延迟的定位结果。

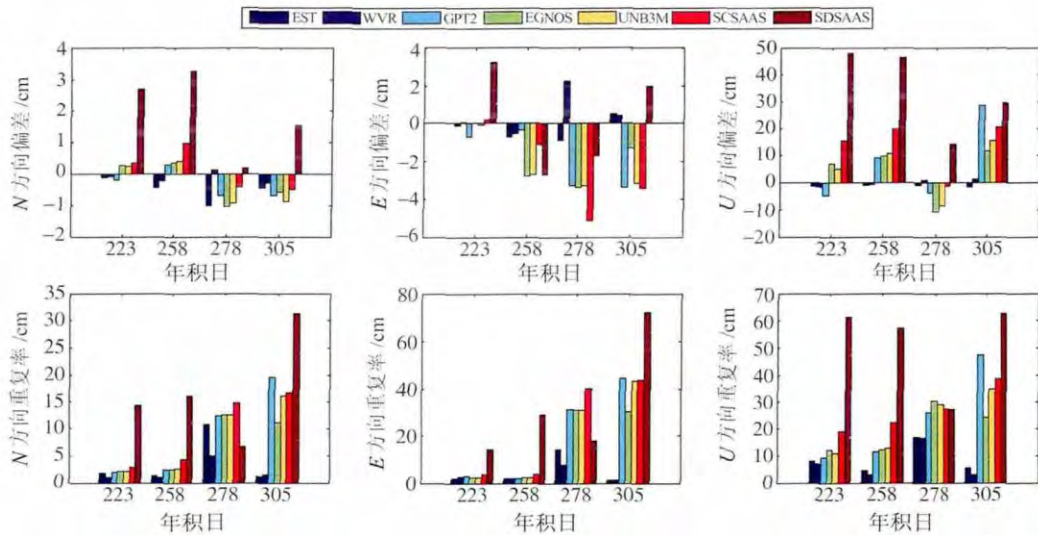


图 9 固定不同对流层模型条件下的精密单点定位动态坐标比较  
 Fig. 9 Comparison of kinematic PPP using different troposphere models

表 5 动态坐标的偏差均值与中误差

Tab. 5 Mean bias and RMS of kinematic coordinates

	EST/cm	WVR/cm	GPT2/cm	EGNOS/cm	UNB3M/cm	SCSAAS/cm	SDSAAS/cm
dN	223	-0.12±1.79	-0.10±1.07	-0.20±1.89	0.25±2.20	0.22±2.10	0.34±2.88
	258	-0.45±1.34	-0.22±1.09	0.29±2.41	0.34±2.51	0.38±2.60	0.95±4.36
	278	-1.00±10.74	0.13±5.00	-0.69±12.41	-1.03±12.56	-0.92±12.49	-0.42±14.82
	305	-0.44±1.19	-0.27±1.43	-0.68±19.56	-0.58±11.06	-0.87±16.09	-0.49±16.84
dE	223	-0.14±2.02	0.05±2.80	-0.71±3.16	0.03±2.50	-0.07±2.40	0.19±3.90
	258	-0.72±2.05	-0.53±2.15	-0.34±2.12	-2.78±2.17	-2.71±2.24	-1.14±3.70
	278	-0.87±14.26	2.26±7.90	-3.29±31.11	-3.36±30.80	-3.29±30.91	-5.11±40.03
	305	0.50±1.42	0.42±1.38	-3.38±44.58	-1.28±30.09	-3.13±43.28	-3.40±43.68
dU	223	-1.40±7.94	-1.49±7.21	-4.65±9.26	6.92±12.09	5.00±10.80	15.42±18.97
	258	-0.77±4.68	-0.57±3.06	9.05±11.45	9.90±12.24	10.59±12.93	19.84±22.12
	278	-1.05±16.82	0.99±16.44	-3.87±26.11	-10.57±30.58	-8.50±29.03	-1.14±27.47
	305	-1.44±5.50	1.20±2.87	2.87±47.4	11.55±24.19	15.48±34.84	20.36±38.55

由图 9 与表 5 可知,与软件解算结果相比,水汽辐射计湿延迟值应用于动态 PPP,坐标精度提高了 16%。对流层经验模型湿延迟应用于动态 PPP,使定位精度有所降低。GPT2、EGNOS、UNB3M 模型以及基于实测气象数据的 SAAS 模型在 N、E 方向定位精度相当;在 U 方向虽然不能提高结果精度,但 GPT2 的定位精度比其他模型中精度最高的 UNB3M 提高了 15%。

#### 4 结 语

1)与 WVR 干延迟结果相比,GPT2 模型干延迟改正精度在 4 种经验模型中最高,其偏差均值为 -0.11 cm,中误差为 ±0.75 cm,气压与温度差值分别约为 2 hPa 和 2 K,与测站实测值差异最小。

2)与 WVR 湿延迟结果相比,GPT2 模型湿延迟改正精度在 4 种经验模型中最高,其偏差均值为 -2.34 cm,中误差为 ±7.67 cm,比其他模型中精度最高的 UNB3M 提高了 18%。

3)与 Bernese 解算的天顶总延迟相比,GPT2

模型总延迟改正精度在 4 种经验模型中最高,其偏差均值为 -1.26 cm,中误差为 ±6.87 cm,比其他模型中精度最高的 UNB3M 提高了 13%。GPT2 模型能更好地描述上海地区的温度、气压以及对流层延迟情况,有更好的适用性。

4)与软件估算结果相比,WVR 延迟值应用于动态精密单点定位,其精度提高了 16%。模型计算的延迟值对于结果精度没有提高,在 N、E 方向改正精度相当;但在 U 方向上,GPT2 模型定位精度比其他模型中精度最高的 UNB3M 提高了 15%。这表明,GPT2 模型在上海地区具有更好的适用性。

#### 参考文献

[1] 丁晓光. 对流层延迟改正 GPS 数据处理中的应用与研究 [D]. 西安:长安大学,2009 (Ding Xiaoguang. Research of Tropospheric Delay Model and Applications Based on the GPS Data Processing[M]. Xi'an: Chang'an University,2009)

[2] 王晓英,宋连春,曹云昌. 利用 BERNSE5.0 解算地基 GPS 天顶湿延迟[J]. 气象科技,2012,40(1):41-45 (Wang Xiaoying, Song Lianchun, Cao Yunchang. Using BERNE-SE5.0 to

- Calculate Ground-Based GPS Zenith Wet Delay[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2012, 40(1):41-45
- [3] 陈俊平, 王解先, 陆彩萍. GPS 监测水汽与水汽辐射计数据的对比研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2005, 25(3):125-128 (Chen Junping, Wang Jiexian, Lu Caiping. Study on Comparison between Water Vapor Value Calculated by GPS and Observed by WVR[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2005, 25(3):125-128)
- [4] Ware R, Rocken C. Pointed Water Vapor Radiometer Corrections for Accurate Global Positioning System Surveying [J]. *Geophysical Research Letters*, 1993, 20(23): 2 635-2 638
- [5] 王勇, 柳林涛, 刘根友. 基于水汽辐射计与 GPS 湿延迟的对比研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2005, 25(4):110-113 (Wang Yong, Liu Lintao, Liu Genyou. Comparison between Zenith Wet Delay by Water Vapor Radiometer and GPS[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2005, 25(4):110-113)
- [6] 陈俊平, 李光炎, 王解先. 水汽辐射计资料在 GPS 精密定位中的应用[J]. *测绘通报*, 2006(11):9-11 (Chen Junping, Li Guangyan, Wang Jiexian. The Application of Water Vapor Radiometer Data in GPS Precise Positioning[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2006(11):9-11)
- [7] 杨力. 大气对 GPS 测量影响的理论与研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2001 (The Theory and Research of Atmosphere Affection to GPS Surveying[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2001)
- [8] Schindelegger M, Bohm J. GPT2: Empirical Slant Delay Model for Radio Space Geodetic Techniques[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(6):1 069-1 073
- [9] 王君刚, 陈俊平, 王解先. GNSS 对流层延迟映射模型分析[J]. *天文学进展*, 2014, 32(3):383-394 (Wang Jungang, Chen Junping, Wang Jiexian. Analysis of Tropospheric Propagation Delay Mapping Function Models in GNSS[J]. *Progress in Astronomy*, 2014, 32(3):383-394)
- [10] Penna N, Dodson A, Chen W. Assessment of EGNOS Tropospheric Correction Model[J]. *Journal of Navigation*, 2001, 54(1):37-55
- [11] Leandro R F, Langley R B, Santos M C. UNB3M\_pack: Aneutral Atmosphere Delay Package for Radiometric Space Techniques[J]. *GPS Solution*, 2008, 12(1):65-70
- [12] Beutler G, Bock H, Dach R, et al. Bernese GPS Software Version 5.0[M]. Bern: University of Bern, 2007
- [13] 陈俊勇. 地基 GPS 遥感大气水汽含量的误差分析[J]. *测绘学报*, 1998, 27(2):113-118 (Chen Junyong. On the Error Analysis for the Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor by Ground Based GPS [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1998, 27(2):113-118)
- [14] Heise S, Dick G, Gendt G, et al. Integrated Water Vapor from IGS Ground-Based GPS Observations; Initial Results from a Global 5-min Data Set[J]. *Annales Geophysicae*, 2009, 27(7): 2 851-2 859
- [15] Wen Y T. Near Real-Time GPS PPP-Inferred Water Vapor System Development and Evaluation[D]. Calgary: University of Calgary, 2008
- [16] 于胜杰, 柳林涛. 水汽加权平均温度回归公式的验证与分析[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2009, 34(6):721-744 (Yu Shengjie, Liu Lintao. Validation and Analysis of the Water Vapor Weighted Mean Temperature from  $T_m-T_s$  Relationship[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(6):721-744)

## Performance Evaluation of Troposphere Models and Application in GNSS Precise Point Positioning

CHEN Meng<sup>1,2</sup> CHEN Junping<sup>2</sup> HU Congwei<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, 1239 Siping Road, Shanghai 200092, China

<sup>2</sup> Shanghai Astronomical Observatory, CAS, 80 Nandan Road, Shanghai 200030, China

**Abstract:** The troposphere delay is one of the most important sources of error in GNSS positioning. In this paper, the zenith tropospheric delay measured by water vapor radiometer (WVR) is used to evaluate the performance of four types of widely used troposphere models: Saastamoinen, GPT2, EGNOS and UNB3M, in Shanghai. Furthermore, the troposphere delays obtained from WVR and the four troposphere models are applied in GNSS precise point positioning (PPP). Data processes show that GPT2 shows the best performance in troposphere delay correction, as compared with the other three models; the mean ZHD bias of GPT2 is  $-0.11$  cm with RMS of  $0.75$  cm; the mean ZWD bias is  $-2.34$  cm with RMS of  $7.67$  cm. The position accuracy of PPP results from the ZHD and ZWD observed by WVR is improved by  $16\%$ , as compared with the conventional PPP model, in which the tropospheric parameter is estimated.

**Key words:** water vapor radiometer(WVR); troposphere model; zenith delay; precise point positioning

**Foundation support:** One Hundred Person Project of CAS; National High Technology Research and Development Program of China, No. 2013AA122402, 2014AA123102; National Natural Science Foundation of China, No. 11273046, 41174024; Projects of Shanghai Science and Technology Committee, No. 12DZ2273300, 13PJ1409900.

**About the first author:** CHEN Meng, postgraduate, majors in GNSS data processing and theoretical research, E-mail: cmkxf@sina.com.