

对流层经验改正模型在中国区域的精度评估

王君刚^{1,2} 陈俊平¹ 王解先² 章洁君¹ 宋 雷³

1 中国科学院上海天文台,上海,200030

2 同济大学测绘与地理信息学院,上海,200092

3 山东交通学院交通土建工程学院,山东 济南,250357

摘要:对流层延迟是全球导航卫星系统(GNSS)计算的主要误差之一,其模型精度对测站坐标解算有较大影响,在高程方向尤为明显。因此,有必要对不同的对流层延迟改正模型的适用性进行评估。采用 SHA 解算了中国陆态网 GNSS 跟踪站的对流层天顶延迟数据,对常用的对流层改正模型 EGNOS/UNB3m/GPT/GPT2 的天顶延迟量在中国不同区域、不同季节的适用性进行了分析。结果显示,4 种模型 RMS 均为 4~5 cm,各模型 RMS 之差小于 1 cm,其中 GPT2 模型 RMS 最小;4 种模型的平均偏差(BIAS)为 1 cm 左右,GPT2 模型的 BIAS 最大,为 1.5 cm;时间上,各个模型在夏季精度普遍较低,这是因为夏季水汽丰富,对流层湿延迟变化较大;空间上,各模型在东南沿海精度较低,因为东南沿海气候湿润,湿延迟变化较大;各模型精度对测站高程不敏感,精度在比较高的测站并无明显降低。通过对不同模型在中国区域的精度分析,验证该改正模型可以为中国区域用户的对流层模型的选择提供一定的参考。

关键词:对流层天顶延迟;对流层改正模型;陆态网;精度评定

中图法分类号:P228.42

文献标志码:A

大气延迟是全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)的主要误差源之一。大气延迟主要包括对流层延迟与电离层延迟,后者可以通过无电离层组合消除。对流层延迟分为干延迟和湿延迟,干延迟可以通过气象参数准确建模,而湿延迟难以精确建模,在精密定位中常作为参数估计,或由区域 GNSS 参考网络给出^[1-3]。天顶方向对流层总延迟(zenith total delay, ZTD)约为 2.3 m,信号传播方向的延迟量需要通过映射函数^[4](mapping function, MF),如 NMF^[5]、GMF^[6]、VMF1^[7]等进行投影,在 5°高度角时斜路径延迟量可达 20 m^[8]。

对流层天顶延迟量可以由数值气象模型(numerical weather model, NWM)提供的气象参数计算^[9,10],其建模精度与有效性已得到检验^[11,12]。但基于 NWM 计算对流层天顶延迟的步骤过于复杂,使用不方便,因此实际计算中,常采用一些简单模型计算天顶对流层延迟,如 Saastamoinen^[13]、EGNOS^[14]、UNB3m^[15,16]、GPT^[17]、GPT2^[18]等,这些模型都是基于气象参数的改正

模型。近年来有一系列基于天顶延迟时间序列分析结果的改正模型,如根据国际 GNSS 服务(International GNSS Service, IGS)全球站实测 ZTD 时间序列的改正模型^[19],根据 NWM 计算的 ZTD 时间序列的改正建模 IGGtrop^[20]、GZTD^[21]、SHAO^[22]等。上述模型在全球范围的精度已有较多的讨论^[23-25],但是在中国区域的精度分析较少。随着中国区域卫星导航定位的迅速发展,有必要对这几种模型的适用性与精度进行评估。本文采用上海天文台解算的陆态网(crustal movement observation network of China, CMONOC)共 223 个测站 2012 年 1 月~2013 年 12 月的实测数据,对 EGNOS、UNB3m、GPT、GPT2 模型在中国区域的精度进行了详细分析,其结论对中国区域 GNSS 解算时对流层模型的选择有一定的参考价值。

1 计算数据

上海天文台 GNSS 分析中心(GNSS Analy-

收稿日期:2015-02-03

项目资助:中科院百人计划;国家 863 计划(2013AA122402,2014AA123102);国家自然科学基金(11273046,41174023);国家 973 计划(2013CB733304);上海市科学技术委员会基金(12DZ2273300,13PJ1409900)。

第一作者:王君刚,硕士生,主要从事 GNSS 对流层研究。wangjungang2009@yeah.net

sis Center at Shanghai Astronomical Observatory, SHA)对全球 110 个 IGS 测站和中国区域的 260 个陆态网测站的 GPS/GLONASS 观测数据进行处理,提供精密轨道、钟差等产品^[26,27],其提供的精密轨道与钟差等产品精度与 IGS 一致。SHA 在解算时,对流层参数设置如下:固定 GPT^[17]模型的干延迟量,每小时估计一个湿延迟改正数,映射函数采用 GMF^[6]。

IGS 解算的 ZTD 综合了多个分析中心(analysis center, AC)的结果,其精度为-2 mm^[28],采样间隔为 5 min。为评估 SHA 对流层延迟产品(下文简称 SHA ZTD)的精度,统计 2012 年 1 月

~2013 年 12 月中国区域的 7 个 IGS 测站的 SHA ZTD 与 IGS ZTD 的平均偏差(BIAS)和均方根误差(root mean square, RMS),统计公式见式(1)。IGS ZTD 采样间隔为 5 min,统计时将其重采样至 1 h。各测站的 SHA ZTD 统计精度见表 1。

$$\begin{cases} \text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\text{ZTD}_i^{\text{IGS}} - \text{ZTD}_i^{\text{SHA}})^2} \\ \text{BIAS} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\text{ZTD}_i^{\text{IGS}} - \text{ZTD}_i^{\text{SHA}}) \end{cases} \quad (1)$$

表 1 SHA 中国区域 IGS 测站对流层产品精度/mm

Tab.1 Accuracy of SHA ZTD Comparing to IGS Solution/mm

	BJFS	SHAO	CHAN	LHAZ	URUM	KUNM	TWTF	MEAN
BIAS	1.2	-0.7	1.5	1.5	1.0	1.0	1.0	0.9
RMS	2.0	2.0	2.3	2.6	1.6	3.8	1.6	2.3

从表 1 中可以看出,中国区域测站的 SHA ZTD 与 IGS ZTD 一致性很好,各测站平均 BIAS 为 0.9 mm,平均 RMS 为 2.3 mm。考虑到二者的采样间隔不同,而且 IGS 综合了多个分析中心的结果,因此 SHA ZTD 的 mm 级的精度足以评价其他模型精度。

2 精度分析

为评估不同模型的天顶总延迟精度,本文选

取陆态网 223 个测站,计算各测站 2012 年 1 月~2013 年 12 月期间的 EGNOS、UNB3m、GPT、GPT2 等 4 种模型天顶延迟,与 SHA ZTD 比较,统计不同模型的 BIAS 与 RMS(式(1)),BIAS 为实测值与模型值之差。由于经验模型的时间分辨率为 1 d,而实测 ZTD 分辨率为每小时一个估计值,因此将实测 ZTD 重采样为每天一个。各测站的平面与高程分布见图 1(a)。此外,计算各测站两年的 ZTD 均值,结果见图 1(b)。

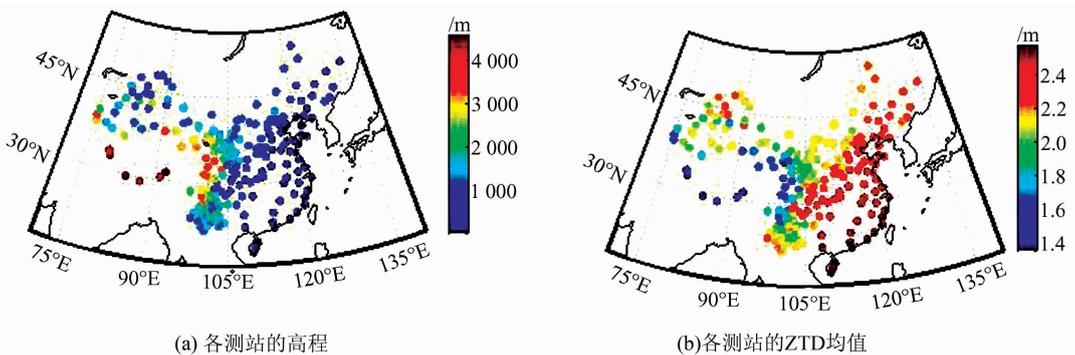


图 1 各测站的高程及 ZTD 均值(2012~2013)

Fig.1 Distribution of Elevation and Mean ZTD of Each Stations (2012~2013)

从图 1 中可以看出,各测站分布均匀,但在西藏地区较为稀疏;ZTD 与测站高程近似成反比,高程越高,年平均 ZTD 越小。如东部地区高程较低,ZTD 较大;而西部地区,尤其是青藏高原地区高程较高,则年均 ZTD 相对较小。

各模型的 BIAS 与 RMS 的分布见图 2、图 3。从图 2 中可以看出,ENGOS、UNB3m 模型的 BI-

AS 在中国北部地区普遍小于 0,在南方地区大于 0;GPT2 模型在全国范围内各测站的 BIAS 略大于 EGNOS、UNB3m,在(30°N, 105°E)附近明显偏大,最大值可达 5 cm;与 EGNOS、UNB3m、GPT2 相比,GPT 模型在东南沿海的 BIAS 明显偏大,最大可达 10 cm,在新疆部分区域则偏小(小于-5 cm),这种在全国范围内的较大波动是

因为 GPT 模型未提供测站的湿度数据,计算湿延迟时采用了经验相对湿度 60%。由图 3 可以看出,4 种模型 RMS 均呈现在西北地区小,东南地区大的整体趋势;EGNOS、UNB3m 在全国范围内的整体精度比 GPT/GPT2 要差;GPT 在

东南沿海地区的 RMS 明显大于其他模型(大于 10 cm),这是由于其采用了经验湿度参数导致的;GPT2 模型 RMS 整体小于其他模型,但是在(30°N, 105°E)附近较差。

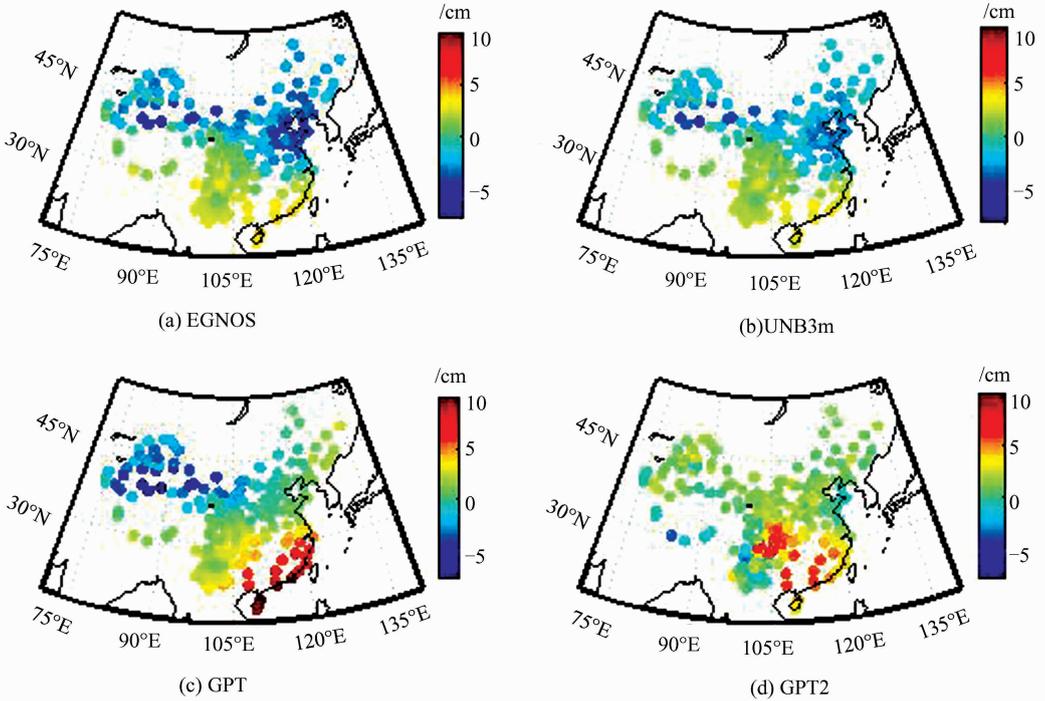


图 2 不同模型在中国区域的 ZTD 平均偏差
Fig. 2 ZTD BIAS of Different Models over China Area

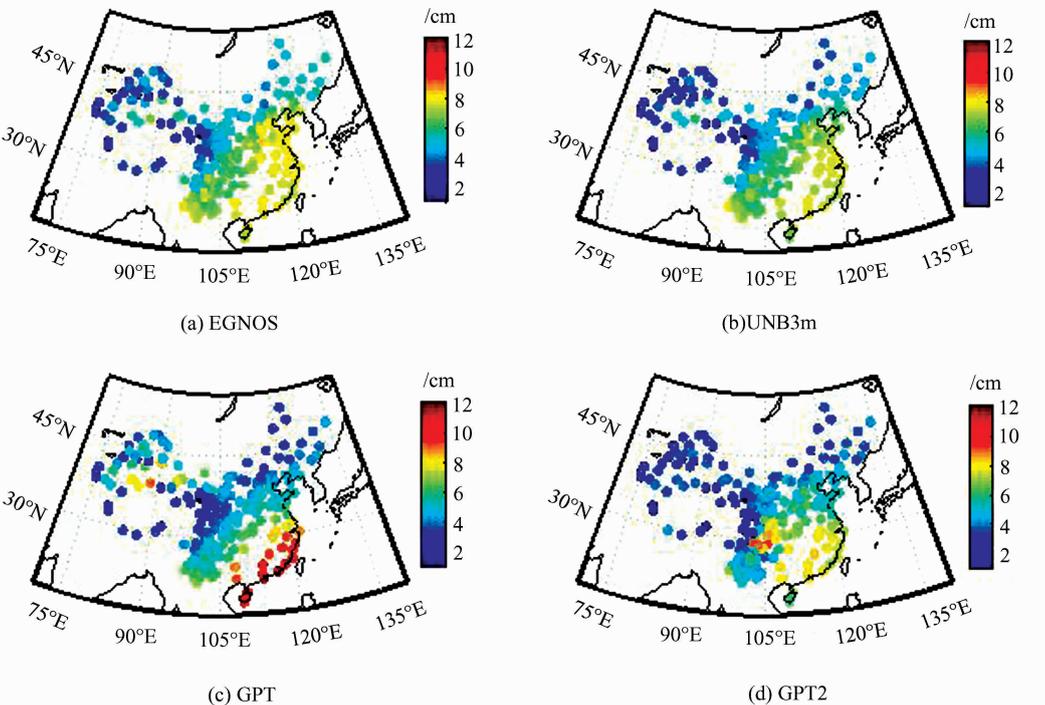


图 3 不同模型在中国区域的 ZTD 平均中误差
Fig. 3 ZTD RMS of Different Models over China Area

对所有测站 4 种模型 RMS 和 BIAS 进行统计,结果见表 2。从表 2 中可以看出,4 种模型的中误差为 5 cm。其中,GPT2 模型精度最高,RMS 为 4.65 cm;EGNOS 模型精度最差,为 5.59 cm;UNB3m 和 GPT 模型的 RMS 分别为 5.16 cm、5.00 cm;GPT 模型相对湿度虽然采用了经验参数(60%),其 RMS 仍然小于 EGNOS、

UNB3m,但其 RMS 最大值可达 11.49 cm,大于其他模型 RMS 最大值(7~9 cm);EGNOS、UNB3m 模型的 BIAS 均值小于 0,GPT 模型的 BIAS 均值大于 0,但是三种模型 BIAS 均值的绝对值都小于 1 cm;相反地,GPT2 模型的 BIAS 均值为 1.53 cm。结合图 2,可知 GPT2 模型在部分区域存在较大的系统偏差。

表 2 不同模型在中国区域的精度/cm
Tab. 2 Accuracy of Different Models/cm

	EGNOS	UNB3m	GPT	GPT2
RMS	5.59 [1.62, 8.20]	5.16 [1.52, 7.79]	5.00 [1.71, 11.49]	4.65 [1.42, 9.56]
BIAS	-0.59 [-5.85, 4.23]	-0.33 [-5.04, 3.59]	0.74 [-7.96, 9.45]	1.53 [-3.88, 7.71]

注:“[,]”表示最小值与最大值。

统计所有测站不同月份各种模型下的 RMS 与 BIAS 均值,如图 4 所示。从图 4 中可以看出,4 种模型 RMS 与 BIAS 分布均呈现相同的季节特性,即冬季小夏季大,在夏季 RMS 都达到最大值(8 cm),冬季为最小值 2~4 cm。这是因为夏季水汽丰富,湿延迟变化剧烈,模型难以精确估计。GPT、GPT2 模型在冬季 RMS 明显好于

EGNOS 和 UNB3m,其他时间段内 4 种模型 RMS 相当;EGNOS、UNB3m 模型的 BIAS 全年变化较大,冬季约为 -3 cm,夏季可达 6 cm;GPT、GPT2 模型 BIAS 全年变化较为平缓,GPT 模型 BIAS 全年变化最小,GPT2 模型 BIAS 冬季与 GPT 模型相当,夏季逐渐变大,在 7 月可达 6 cm,与 EGNOS、UNB3m 相当。

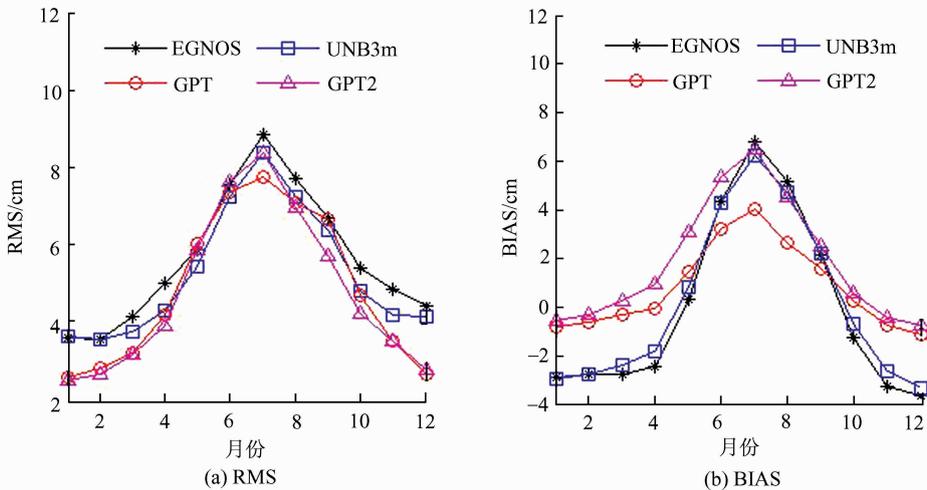


图 4 各模型不同月份的精度

Fig. 4 ZTD Accuracy of Different Models with Respect to Time

为探究不同模型对高程的敏感性,统计各模型在不同高程下的 RMS 与 BIAS,以 500 m 为间隔计算每一间隔区间内的所有测站 RMS 和 BIAS 均值,统计结果见图 5。从图 5 中可以看出,EGNOS、UNB3m 模型 RMS 明显大于 GPT、GPT2;GPT2 模型的 BIAS 在不同高程区间的测站均明显大于其他模型,这与上文分析一致;各模型 RMS、BIAS 与高程之间没有明显的关系,不存在随着高程递增或递减的趋势;4 种模型随高程变化的趋势比较一致,说明其对高程的敏感程度相同。此处分析与文献[11,12]中的模型 RMS 随高

程增加变小的分析不一致,有如下原因。

首先,对流层延迟的干延迟部分建模精度较高,误差主要由湿延迟的高频变化导致,这部分无法精确建模,而湿延迟与水汽的分布密切相关,因此测站的分布与误差随高程的分布相关性很大;其次,文献中对 2 000 m 以下的按 500 m 进行分段,2 000 m 以上没有细分,而本文对 2 000 m 以上的高程也按照 500 m 为间隔统计了各区间段的精度,统计方法略有区别;最后,本文按照文献[11,12]中的方法重新依高程区间段对 RMS 进行了统计,结果与文献一致,即随着高程增大,

RMS减小,但是减小幅度不大,而且本文认为2 000 m以上的测站数量仍很多,需要继续按照

500 m为区间进行细分统计,笼统地将其归为一类不合理。

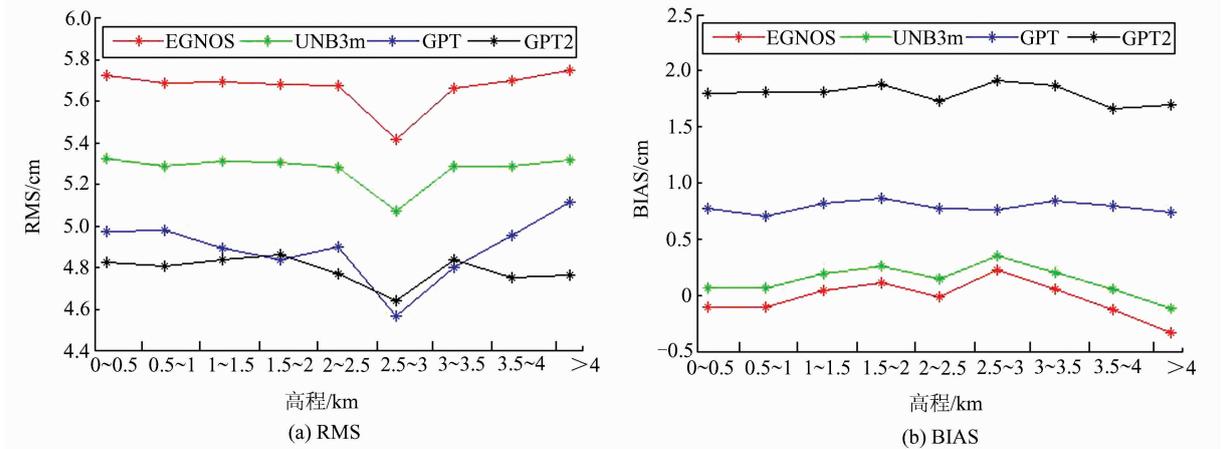


图5 各模型精度与测站高程关系

Fig. 5 ZTD Accuracy of Different Models with Respect to Altitude

不同模型的 RMS、BIAS 与测站纬度的关系如图 6 所示。从图 6 可以看出,随着纬度的增高,各种模型的 RMS、BIAS 均呈递减趋势,这与图 2、图 3 中各模型 RMS、BIAS 的区域分布关系一致,可能是低纬度地区水汽丰富,湿延迟分量变化

剧烈所导致的;在低纬度地区,GPT 模型的 RMS、BIAS 均明显大于其他模型,这是由于 GPT 的相对湿度参数采用了经验常数(60%),与这些区域的实际相对湿度相差太大;不同模型精度对纬度的敏感性没有明显的区别。

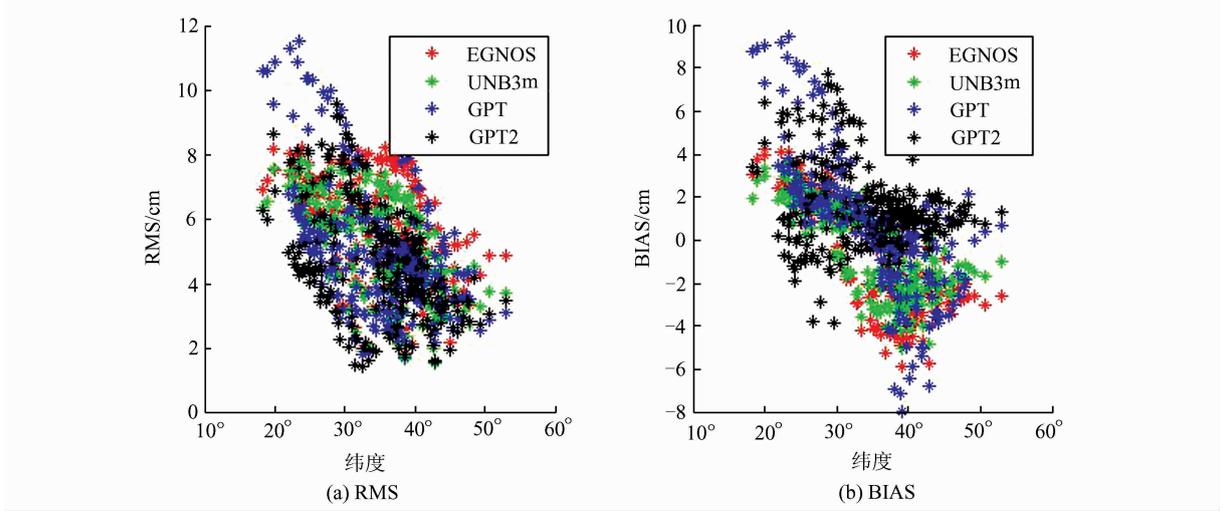


图6 各模型精度与测站纬度关系

Fig. 6 ZTD Accuracy of Different Models with Respect to Latitude

分析可知,GPT2 模型在(30°N, 105°E)区域附近精度明显低于其他模型,为此,我们单独考察该区域的 4 个测站,这 4 个测站不同模型的 ZTD 与实测值时间序列见图 7。从图 7 中可以看出,GPT2 模型的 ZTD 明显小于实测值,夏季更为明显,可能是因为 GPT2 模型提供的气象参数偏差较大;此外,GPT2 模型采用的是全球 5°×5°的格网,误差较大的测站位于 GPT2 模型的 [27.5°N, 32.5°N; 102.5°E, 107.5°E]格网内,因此,GPT2 模型的偏差可能是该处格网建模误

差导致的。

3 结 语

对流层延迟常用的改正模型有 EGNOS、UNB 系列、GPT、GPT2 等,本文针对这几种模型,采用陆态网 223 个测站 2 a 的实测数据,分析了各模型在中国区域的精度与适用性。结果表明,4 种模型在中国区域的 RMS 均为 4~5 cm;GPT2 模型在中国区域精度最好,其 RMS 为 4.65 cm,

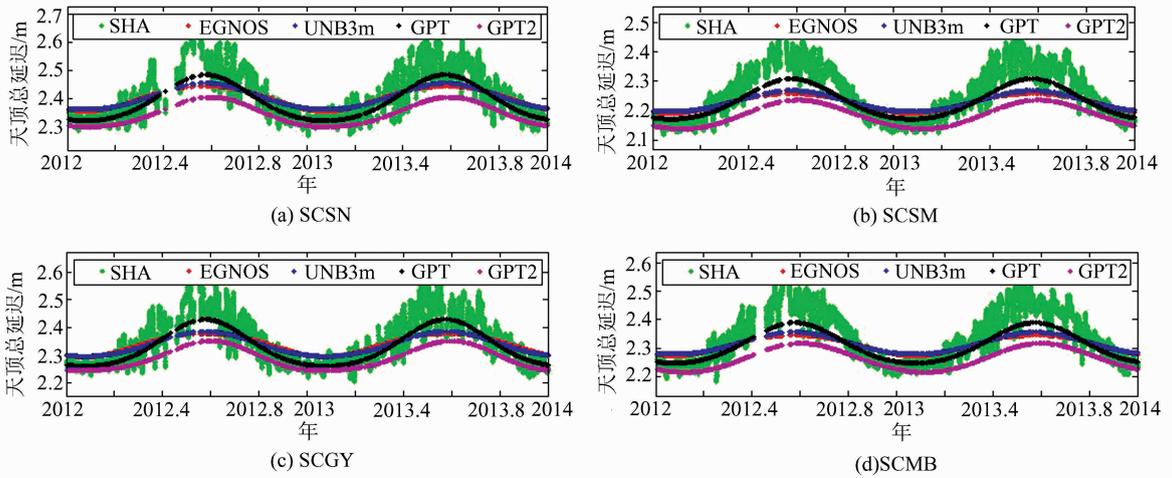


图 7 (30°N, 105°E)区域测站模型 ZTD 时间序列

Fig. 7 ZTD Time Series in Area of (30°N, 105°E)

优于 EGNOS、UNB3m 及 GPT; GPT 模型 RMS 为 5 cm, 整体精度仍优于 EGNOS、UNB3m, 但由于 GPT 模型不提供湿度信息, 其在东南沿海精度较差; EGNOS 模型精度低于 UNB3m, 二者 RMS 分别为 5.59 cm、5.16 cm; GPT2 模型存在较大系统误差, 其 BIAS 为 1.53 cm, 其他三种模型的 BIAS 绝对值均小于 1 cm; 各模型的精度存在季节性规律, 在夏季精度最差, RMS 可达 8 cm, 冬季精度最好, RMS 为 2~4 cm; 各模型的精度与测站高程没有明显相关性; 随着测站纬度的增高, 各模型误差均有所减小。文章的分析可以为中国区域 GNSS 用户对对流层选择提供一定的参考。

参 考 文 献

- [1] Wang Qianxin, Xu Guochang, Chen Zhengyang. Interpolation Method of Tropospheric Delay of High Altitude Rover Based on Regional GPS Network [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(12): 1 405-1 408(王潜心, 许国昌, 陈正阳. 利用区域 GPS 网进行高海拔流动站的对流层延迟量内插[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(12):14 05-1 408)
- [2] Dai Wujiao, Chen Zhaohua, Kuang Cuilin, et al. Modeling Regional Precise Tropospheric Delay[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(4):392-396(戴吾蛟, 陈招华, 匡翠林, 等. 区域精密对流层延迟建模[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(4):392-396)
- [3] Yao Yibin, Zhang Rui, Yi Wenting, et al. A New Regional Troposphere Fitting Model and Its Application to PPP[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(9):1 024-
- [4] Zhang Shuangcheng, Ye Shirong, Liu Jingnan, et al. Latest Progress of Dynamic Mapping Functions and Its Application to GNSS Retrieved Water-Vapor [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(3): 280-283(张双成, 叶世榕, 刘经南, 等. 动态映射函数最新进展及其在 GNSS 遥感水汽中的应用研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(3):280-283)
- [5] Niell A E. Global Mapping Functions for the Mapping of the Atmospheric Delay at Radio Wavelengths [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101(B2):3 227-3 246
- [6] Johannes B, Arthur N, Paul T, et al. The Global Mapping Function (GMF): A New Empirical Mapping Function Based on Numerical Weather Model Data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33: L07304
- [7] Kouba J. Implementation and Testing of the Gridded Vienna Mapping Function 1 (VMF1) [J]. *J Geod*, 2008, 82:193-205
- [8] Yin Haitao, Huang Dingfa, Xiong Yongliang, et al. New Model for Tropospheric Delay Estimation of GPS Signal[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(5): 454-457(殷海涛, 黄丁发, 熊永良, 等. GPS 信号对流层延迟改正新模型研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(5):454-457)
- [9] Vedel H, Mogensen K S, Huang X Y. Calculation of Zenith Delays from Meteorological Data Comparison of NWP Model, Radiosonde and GPS Delays [J]. *Phys Chem Earth (A)*, 2001, 26(6-8): 497-

502

- [10] Andrei C, Chen R. Assessment of Time-series of Troposphere Zenith Delays Derived from the Global Data Assimilation System Numerical Weather Model [J]. *GPS Solution*, 2008, 13(2):109-117
- [11] Chen Qinming, Song Shuli, Heise S, et al. Assessment of ZTD Derived from ECMWF/NCEP Data with GPS ZTD over China [J]. *GPS Solution*, 2011, 15:415-425
- [12] Chen Qinming, Song Shuli, Zhu Wenyao. An Analysis of Accuracy of Zenith Tropospheric Delay Calculated from ECMWF/NCEP Data over Asian Area [J]. *Chinese J. Geophys*, 2012, 55(5): 1 541-1 548 (陈钦明, 宋淑丽, 朱文耀. 亚洲地区 ECMWF/NCEP 资料计算 ZTD 的精度分析[J]. 地球物理学报, 2012, 55(5): 1 541-1 548)
- [13] Saastamoinen J. Contribution to the Theory of Atmospheric Refraction Part II, Refraction Corrections in Satellite Geodesy[J]. *Bulletin Geodesique*, 1972, 107:13-34
- [14] Penna N, Dodson A, Chen W. Assessment of EGNOS Tropospheric Correction Model[J]. *Journal of Navigation*, 2000, 54(1):37-55
- [15] Collins J P, Langley R B. The Residual Tropospheric Propagation Delay: How Bad Can It Get? [C]. ION GPS 1998, Nashville, Tennessee, USA, 1998
- [16] Leandro R F, Santos M C, Langley R B. UNB Neutral Atmosphere Models: Development and Performance[C]. ION NTM 2006, California, USA, 2006
- [17] Böhm J R, Heinkelmann H S. Short Note: A Global Model of Pressure and Temperature for Geodetic Applications[J]. *J. Geod*, 2007, 81(10): 679 - 683
- [18] Lagler K, Schindelegger M, Böhm J, et al. GPT2: Empirical Slant Delay Model for Radio Space Geodetic Techniques[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013,40(6): 1 069-1 073
- [19] Mao Jian, Zhu Changqing, Guo Jifa. A New Global Zenith Tropospheric Delay Model[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(6):684-688(毛健, 朱长青, 郭继发. 一种新的全球对流层天顶延迟模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013,38(6):684-688)
- [20] Li Wei, Yuan Yunbin, Ou Jikun, et al. A New Global Zenith Tropospheric Delay Model IGGtrop for GNSS Applications[J]. *Chin Sci Bull*, 2012, 57:1 317-1 325(李薇, 袁运斌, 欧吉坤, 等. 全球对流层天顶延迟模型 IGGtrop 的建立于分析[J]. 科学通报, 2012, 57(15):1 317-1 325)
- [21] Yao Yibin, He Changyong, Zhang Bao. A New Global Tropospheric Delay Model GZTD[J]. *Chinese J. Geophys*, 2013, 56(7):2 218-2 227(姚宜斌, 何畅勇, 张豹. 一种新的全球对流层天顶延迟模型 GZTD[J]. 地球物理学报, 2013, 56(7): 2 218-2 227)
- [22] Song S L, Zhu W Y, Chen Q M, et al. Establishment of a New Tropospheric Delay Correction Model over China Area[J]. *Science China (Physics, Mechanics and Astronomy)*, 2011, 54(12): 2 271-2 283
- [23] Qu Weijing, Zhu Wenyao, Song Shuli, et al. The Evaluation of Precision About Hopfield, Saastamoinen and EGNOS Tropospheric Delay Correction Model[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2008,49 (1): 113-122(曲伟菁, 朱文耀, 宋淑丽. 三种对流层延迟改正模型精度评估[J]. 天文学报, 2008,49 (1): 113-122)
- [24] Yang Ling, Li Bofeng, Lou Lizhi. Effects of Different Troposphere Correction Models on GPS Position [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2009, 4:9-11(杨玲, 李博峰, 楼立志. 不同对流层模型对 GPS 定位结果的影响[J]. 测绘通报, 2009, 4:9-11)
- [25] 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(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)
- [26] Chen Junping, Wu Bin, Hu Xiaogong, et al. SHA: the GNSS Analysis Center at SHAO [J]. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2012, 160: 213-221
- [27] Chen Junping, Zhang Yize, Zhou Xuhua, et al. GNSS Clock Corrections Densification at SHAO: from 5 Minutes to 30 Seconds[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2013,6:1-10
- [28] Jin S G, Park J U, Cho J H, et al. Seasonal Variability of GPS-derived Zenith Tropospheric Delay (1994-2006) and Climate Implications[J]. *J Geophys Res*, 2007, 112: D09110

Assessment of Tropospheric Delay Correction Models over China

WANG Jungang^{1,2} CHEN Junping¹ WANG Jiexian² ZHANG Jiejun¹ SONG Lei³

1 Shanghai Astronomy Observation, CAS, Shanghai 200030, China

2 College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China

3 College of Transportation Building Engineering Academy, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China

Abstract: As one of the main error sources in the Global Navigation Satellite System (GNSS), the accuracy of tropospheric delay correction model influences the estimated coordinates, especially in vertical direction; therefore, it is necessary to make assessment of different tropospheric delay correction models. An assessment of four commonly used models, including EGNOS/UNB3m/GPT/GPT2, is made in this paper. The result shows that the RMS of the four models remains 4-5 cm, and the difference between each model is less than 1 cm, with GPT2 being the most accurate model; and the RMS of each model in summer is relatively much bigger than in winter, due to the abundant water vapor in summer, which makes it harder to model tropospheric delay precisely. All models show poor accuracy in southeast China, thanks to the rather changeable weather and the abundant water vapor there; and no model is sensitive to the height, since the accuracy varies little with respect to the variation of altitude. These findings provide a reference for the GNSS users in China area when choosing a suitable tropospheric delay correction model.

Key words: zenith tropospheric delay; tropospheric delay correction model; CMONOC; accuracy assessment

First author: WANG Jungang, postgraduate, specializes in tropospheric delay in GNSS, E-mail: wangjungang2009@yeah.net

Foundation support: The 100 Talents Programm of the Chinese Academy of Sciences; the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program), Nos. 2013AA122402, 2014AA123102; the National Natural Science Foundation of China, Nos. 11273046, 41174023; National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program), No. 2013CB733304; the Shanghai Committee of Science and Technology, Nos. 12DZ2273300, 13PJ1409900.