

姚宜斌,何畅勇,张豹等. 一种新的全球对流层天顶延迟模型 GZTD. 地球物理学报, 2013, 56(7): 2218-2227, doi:10. 6038/cjg20130709.

Yao Y B, He C Y, Zhang B, et al. A new global zenith tropospheric delay model GZTD. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2013, 56(7): 2218-2227, doi:10. 6038/cjg20130709.

一种新的全球对流层天顶延迟模型 GZTD

姚宜斌^{1,2}, 何畅勇¹, 张豹¹, 许超钤¹

¹ 武汉大学测绘学院, 武汉 430079

² 武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室, 武汉 430079

摘 要 对流层延迟是 GNSS 导航定位主要误差源之一, 主要受气象参数(如总气压、温度和水汽压等)的影响, 具有变化随机性强的特点. 本文利用 GGOS Atmosphere 提供的 2002—2009 年全球天顶对流层延迟格网时间序列研究了全球对流层天顶延迟的时空变化特征. 并以此为基础对全球天顶对流层延迟(Zenith Troposphere Delay, ZTD)进行建模, 提出了一种基于球谐函数的全球非气象参数对流层天顶延迟改正模型——GZTD 模型. 实验对比结果表明考虑 ZTD 经纬向变化的 GZTD 模型内符合精度全球统计结果(bias: 0.2 cm, RMS: 3.7 cm)优于只考虑 ZTD 纬向变化的 UNB3m (bias: 3.4 cm, RMS: 6.0 cm)、UNB4 (bias: 4.7 cm, RMS: 7.4 cm)、UNB3 (bias: 4.0 cm, RMS: 7.0 cm)和 EGNOS (bias: 4.5 cm, RMS: 6.9 cm)等模型. 使用全球 385 个 IGS 站进行外符合检验, 统计结果表明 GZTD 模型(bias: -0.02 cm, RMS: 4.24 cm)同样优于其它模型. GZTD 模型具有改正效果良好、使用简单、所需参数少等优点.

关键词 天顶对流层延迟, GZTD 模型, EGNOS 模型, UNB 系列模型

doi:10. 6038/cjg20130709

中图分类号 P228

收稿日期 2012-12-26, 2013-02-20 收修定稿

A new global zenith tropospheric delay model GZTD

YAO Yi-Bin^{1, 2}, HE Chang-Yong¹, ZHANG Bao¹, XU Chao-Qian¹

¹ School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

² Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract Troposphere delay is one of the main error sources in global navigation satellite systems (GNSS). Its obvious randomness is mainly attributed to meteorological parameters (total pressure, temperature and water vapor pressure, etc.). In this paper, the temporal and spatial variations of global Zenith Troposphere Delay (ZTD) is analyzed using the time series of global 4D-grid ZTD from 2002 to 2009, provided by Global Geodetic Observing System (GGOS) Atmosphere. According to the analysis, a new global ZTD correction model without requiring meteorological parameters, called GZTD, is developed based on spherical harmonics. Experimental results show that the precision of inner coincidence of GZTD model (bias: 0.2 cm, RMS: 3.7 cm) considering the longitudinal and latitudinal variations of ZTD performs better than other latitude-only models, such as UNB3m (bias: 3.4 cm, RMS: 6.0 cm), UNB4 (bias: 4.7 cm,

基金项目 国家自然科学基金面上项目(41174012, 41274022)、国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2013AA122502)、教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-12-0428)联合资助.

作者简介 姚宜斌, 男, 1976 年生, 教授, 主要从事测量数据处理理论与方法、GPS 空间环境学(电离层及对流层)、地壳形变与地球动力学解释等研究. E-mail: ybyao@whu.edu.cn

RMS: 7.4 cm), UNB3 (bias: 4.0 cm, RMS: 7.0 cm) and EGNOS (bias: 4.5 cm, RMS: 6.9 cm). Compared to ZTD time series from 385 global International GNSS Service (IGS) sites, GZTD model (bias: -0.02 cm, RMS: 4.24 cm) is still clearly superior to other similar models. The GZTD model owns such advantages as well-performance, simplicity in computation and less parameters-requirement.

Keywords Zenith tropospheric delay, GZTD model, EGNOS model, UNB series model

1 引言

在电磁波空间技术中,卫星电磁波信号在到达接收机之前需要穿越对流层,期间会受到大气折射的影响而使信号发生弯曲和延迟,对流层延迟在天顶方向时大小约为 2.3 m,而当地平高度角为 10° 时可达 20 m^[1]. 天顶对流层延迟可根据成因进一步分为天顶静力学延迟 (Zenith Hydrostatic Delay, ZHD) 和天顶非静力学延迟 (又称为“湿”延迟, Zenith Wet Delay, ZWD). 在 GNSS 导航定位中,一般将信号传播路径上的斜延迟通过映射函数投影到天顶方向,因此通常对天顶对流层延迟 (ZTD) 进行建模来削弱大气对信号的影响. 然而对流层延迟受气象参数 (总气压、温度和水汽压) 影响具有变化随机性强的特点,所以目前仍有许多学者在进行对流层延迟模型的精细建模研究. 对流层延迟模型大致可分为以下两类.

(1) 气象参数模型. 例如传统的 Hopfield、Saastamoinen、Black 等模型^[2-4]. 该类模型计算时需要已知测站实测气象参数,改正精度可达厘米或分米级. Saastamoinen 模型受高程的影响很小,而 Hopfield 模型精度随高度的增加而降低^[5]. 为了适应更高精度的要求,不同学者利用探空气球等气象资料通过线性回归的方法建立对流层改正模型. 但该类模型高度依赖实测气象参数,若采用标准大气气象参数则改正效果较差^[6],这很大程度上限制了它们在实时导航中的应用.

(2) 非气象参数模型. 例如 UNB、EGNOS 等模型. Collins 和 Langley 为美国广域增强导航系统 (WAAS) 的推广应用建立了 UNB 模型^[7]. 它将美国标准大气资料沿纬度进行网格化,得到一个 15° 纬度间隔的大气参数表 (温度、压强、水汽压、温度垂直梯度、水汽垂直变化指数) 用来估算所需气象参数. 经过不断发展改进,UNB 系列模型目前有 UNB1—4、UNB3m、UNB. na. 在北美地区,UNB3 模型估计的对流层天顶延迟平均误差为 2 cm^[8].

UNB4 改善了 UNB3 在高海拔地区的精度较低的缺陷^[9]. UNB3m 模型采用相对湿度估计湿延迟,使得平均偏差约为 0.5 cm 左右,但当高度超过 2000 m 时,湿延迟的平均偏差达到 -6.1 cm^[10]. EGNOS 模型是欧盟星基广域增强系统 EGNOS 采用的天顶对流层延迟改正模型,该模型可以提供计算对流层天顶延迟所需气象参数. 其精度总体上与采用实测气象参数的 Hopfield 和 Saastamoinen 模型相当^[5]. 李薇等根据 NECP 再分析资料采用三维空间参数表构建了最新的 IGGtrop 全球对流层延迟经验模型. 该模型考虑了天顶对流层随经度的变化,精度有明显改善,但计算天顶对流层总延迟的过程中需要大量参数. 如三维参数表的空间网格为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ \times 1$ km (网格水平分辨率与 NCEP 数据一致),最高高度为 25 km 时,南北纬 15° 以内需要 5 个参数,南北纬 15° 以外需要 3 个参数,全球共需约 888125 个参数^[6],这给该模型的推广使用带来了困难.

Collins 等 (1996) 使用加拿大机载导航数据验证使用 UNB1 模型进行动态定位的水平误差约为 3 cm,垂直误差为 15 cm^[11]. Zhao 等 (2009) 空基 GPS 数据定位结果说明当截止高度角取 10° 时,UNB3 模型水平、垂直定位误差分别为 3 cm、9.1 cm^[12]. McGraw (2012) 认为在向多频多系统导航定位发展过程中,更可靠的对流层延迟模型将有助于改善导航定位水平^[13].

本文利用 GGOS (Global Geodetic Observing System) Atmosphere 提供的全球天顶对流层延迟格网数据,计算纬度、经度、高度三维网格上的对流层天顶延迟,获取其周期变化特征参数,使用球谐函数建立全球非气象参数对流层天顶延迟模型 GZTD. 该模型在全球范围内同时考虑了对流层天顶延迟随经、纬度的分布,能更好地反映全球对流层天顶延迟的时空变化特征,其建模方法相较于 IGGtrop 更为简单. 经过内符合和外符合的检验, GZTD 模型在全球范围内的总体精度优于 EGNOS、UNB3m 等模型且与 IGGtrop 模型相当,可以满足实时动态定位和导航的研究与应用的精度要求,同

时计算简便,非常适合作为动态导航与定位的对流层改正模型。

2 天顶对流层延迟数据与时空分布特性分析

确定天顶对流层延迟的时空变化特征是建立精密对流层延迟模型的基础和关键。本文利用 GGOS Atmosphere 资料提供的 ZHD 和 ZWD 全球格网数据分析天顶对流层延迟的时空变化规律。GGOS Atmosphere 基于 ECMWF (European Center for Medium Range Weather Forecasts) 40 年再分析资料^[14] 提供 1979—2011 年时间分辨率为 6 小时、空间分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2^{\circ}$ 的全球天顶对流层总延迟(包括 ZHD 和 ZWD)格网数据(<http://ggosatm.hg.tuwien.ac.at>)。由于 ECMWF 40 年再分析资料的层顶气压可达 0.1 hPa^[14],若层顶高度取 25 km,采用 Bosser 等(2007)^[15] 提出的适用于 9~70 km 的改进 ZHD 模型可以估算出 0.1 hPa 以上的大气对流层延迟(主要为 ZHD)的贡献仅为 0.23 mm,故可忽略不计。Chen 等^[16] 将中国地区 ECMWF 再分

析资料计算的 ZTD 与 GAMIT 计算的 GPS 站 ZTD 比较结果表明,两者 bias 约为 -1 cm, RMS 约为 2.4 cm;且 ECMWF 再分析资料计算的 ZTD 比 NCEP(United States National Centers for Environmental Prediction)再分析资料计算结果更加接近于 GPS 技术解算的 ZTD。

使用 GGOS Atmosphere 的全球 ZTD 格网数据绘制的 2011 年全球地表 ZTD 分布如图 1a 所示,图 1b 为全球高度分布状况。由图 1 可知,在全球范围内天顶对流层延迟的空间分布不仅与纬度有关,还随着高度的增加减小。同时,在同一纬度上不同经度的地区天顶对流层延迟也存在差异,这与李薇等^[6] 的结果相符。这说明要建立高精度的全球对流层改正模型需要同时考虑 ZTD 随经纬度和高度的变化。另外约占天顶对流层延迟 90% 的 ZHD^[17] 主要由气压决定,而海洋和大陆由于热力差异对气压的分布也会产生巨大影响,因此在海陆分布极不相同的南北半球对流层延迟的空间分布也是极不对称的,这可以从图 1a 中明显看出。因此很多对流层延迟模型,例如 EGNOS、UNB 系列模型等,关于南北半球对称的简化假设是不甚合理的。

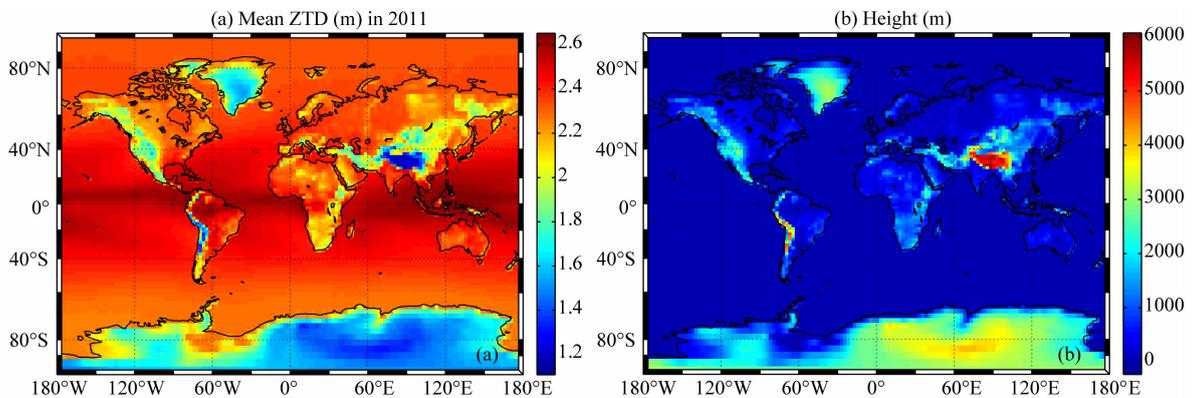


图 1 2011 年平均 ZTD(a)和高度(b)全球分布

Fig. 1 Global distribution of mean ZTD (a) in 2011 and height (b)

在 15°S — 15°N 及以外地区,文献[6]分别使用(1)式和(2)式对 ZTD 进行拟合,两式参数含义详见原文献。其研究结果表明在 15°S — 15°N 的赤道地区,有部分 IGS (International GNSS Service) 站 ZTD 半年变化振幅 amp_2 大于或近似于年变化振幅 amp_1 ,体现出 ZTD 具有相对较强的半年周期变化;在 15°S — 15°N 以外的地区,所有 IGS 站 ZTD 年变化振幅 amp_1 都明显大于半年变化振幅 amp_2 ,即天顶对流层延迟的时间变化特征均以年变化为主。但我们在对格网点 ZTD 时间序列数据进行分析中发现, 15°S — 15°N 以外的广大区域拟合后的半年周期

变化相对于年周期变化依然很明显。

$$\text{ZTD}_1 = \text{mean} + \text{amp}_1 \cdot \cos\left(2\pi \frac{\text{doy} - D_1}{365.25}\right), \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{ZTD}_2 = & \text{mean} + \text{amp}_1 \cdot \cos\left(2\pi \frac{\text{doy} - D_1}{365.25}\right) \\ & + \text{amp}_2 \cdot \cos\left(4\pi \frac{\text{doy} - D_2}{365.25}\right). \quad (2) \end{aligned}$$

对 2002—2009 年 GGOS Atmosphere 提供的全球格网 ZTD 时间序列以 $4^{\circ} \times 5^{\circ}$ 的空间采样率选取了 3358 个格网点,分别使用模型(1)和模型(2)进行拟合,使用最小二乘方法求解未知参数,拟合结果

的纬度平均 RMS 如图 2 所示. 可以看出不仅在 15°S — 15°N 考虑半年周期变化对 ZTD 拟合结果有较大改善, 在 15°N 以北的北半球绝大部分地区, 模型(2)的结果都要显著优于模型(1); 而在 15°S 以南的南半球地区, 模型(2)只是略优于模型(1), 这也许是由于南半球海洋所占比例较大, 而海洋对气候的调节作用使得南半球 ZTD 半年周期变化并不显著, 下文将进一步分析.

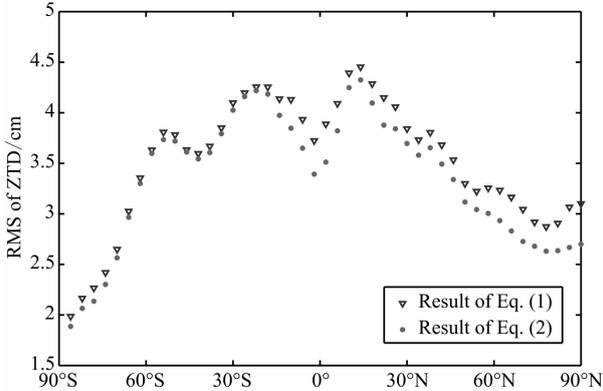


图 2 不同 ZTD 模型拟合结果对比

Fig. 2 Comparative result for different ZTD fitting methods

但在模型(1)和(2)中, 参数 mean 表示的是基于地球地表高度的 ZTD 平均值, 需要在考虑 ZTD 随高度变化的基础上将之归算到海平面(Mean Sea Level, MSL). Song 等^[17]使用高度 h 的二次函数来表征 ZTD 随高度的变化. 而 Jin 等(2007)^[18]认为 ZTD 随高度的分布与气压相似, 都是随着高度增加呈指数递减. 该结论与 Chen 等^[16]使用 ECMWF 数据给出的 HJAR、SUIY、QION 及 TASH 四个 GPS 站上 ZTD 随高度变化的图示相符. 我们通过研究发现, 使用 ZTD 随高度指数变化的模型能够有很好的精度.

由于 ZTD 的全球分布不仅受高度变化的影响, 同时还与纬度有关. 为了去除纬度的影响从而更好地分析高度对 ZTD 分布造成的影响, 我们对不同纬度平行圈上的 ZTD 格网数据单独进行拟合. 式(3)即为拟合所用指数模型, 其中 ZTD_0 为 MSL 上天顶对流层延迟, $ZTD(h)$ 表示 h 高度处的天顶对流层延迟, β 为转换系数. 图 3 为 90°N — 90°S 范围内系数 β 随纬度的分布状况, 从中可以看出系数 β 在全球范围内比较稳定, 但在 60°S 和 90°N 附近出现了异常值. 这两个区域几乎都被海洋所覆盖(南半球环海区域和北冰洋地区), 这使得这一区域的 ZTD 数

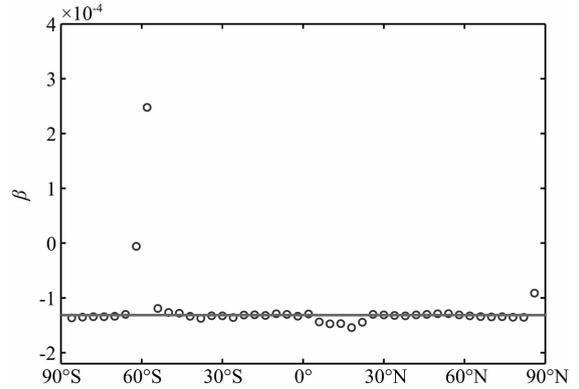


图 3 参数 β 随纬度变化的分布情况

Fig. 3 The distribution of latitudinal variations of coefficient β

据虽然变化较小(约为 $2\sim 3$ cm)但分布较散, 因此使用式(3)进行拟合并不能达到理想效果. 图 3 中的水平线为系数 β 在全球范围内剔除异常值之后的平均值, 约为 -1.3137×10^{-4} .

$$ZTD(h) = ZTD_0 \cdot \exp(\beta h). \quad (3)$$

3 GZTD 模型的建立

Boehm 等^[19]首次使用 9 阶 9 次球谐函数建立全球地表温度和气压经验模型(GPT 模型), 取得良好效果. Yao 等^[20]采用球谐函数方法对全球大气加权平均温度进行建模(GWMT 模型), 在减少模型参数数量的同时达到了 GPS 气象学中反演水汽的精度要求. 这说明球谐函数在表征球面物理参数具有极大的优势和应用前景. 本文采用类似的思想建立新的全球天顶对流层延迟模型——GZTD 模型, 模型建立过程如下所述.

由前述的天顶对流层延迟数据时空分布特性的分析可知, ZTD 存在年周期变化和半年周期变化, 且受高度变化的影响, 同时还与纬度有关. 因此首先将全球日平均 ZTD 格网时间序列按(4)式进行拟合:

$$ZTD = \left[a_0 + a_1 \cos\left(2\pi \frac{\text{doy} - a_2}{365.25}\right) + a_3 \cos\left(4\pi \frac{\text{doy} - a_4}{365.25}\right) \right] \exp(\beta h), \quad (4)$$

其中: doy 为年积日, h 为高度; a_0 、 a_1 、 a_3 分别为在 MSL 上的 ZTD 年均值、年周期变化振幅和半年周期变化振幅; a_2 、 a_4 分别为年周期变化和半年周期变化相位, 在 Boehm 等的 GPT 模型和 Yao 等的 GWMT 模型中, a_2 一般取固定值 28, 但本文将 a_2 、

a_4 系数参数化以提高模型精度; β 为将 h 高度(大地高或正高)处的 ZTD 改正到 MSL 处的改正常数, 根据第 2 节分析结果取 $\beta = -0.00013137$.

然后采用 10 阶 10 次的球谐函数将上述 5 个参数进行球谐展开, 即

$$a_i = \sum_{n=0}^{10} \sum_{m=0}^n P_{nm}(\sin\varphi) \cdot [A_{nm}^i \cos(m\lambda) + B_{nm}^i \sin(m\lambda)] \quad (5)$$

$(i = 0, 1, \dots, 4)$

式中 P_{nm} 为勒让德多项式, φ 和 λ 分别为格网点纬度和经度. A_{nm}^i 和 B_{nm}^i 为使用最小二乘确定的球谐函数 n 阶 m 次系数(共 5×121 个非零系数).

图 4 为拟合后 MSL 处 ZTD 平均值 a_0 、年周期变化振幅 a_1 和半年周期变化振幅 a_3 的全球分布状况. 从图 4a GZTD 模型系数 a_0 的分布状况可以看出经过模型拟合之后基本消除了高度对 ZTD 的影响, 更直接地显示了全球范围内天顶对流层延迟随纬度的空间分布. 总的来说, a_0 在中低纬度地区较高, 在高纬度地区相对较低; 全球分布在南半球比在北半球更规律, 该结果与李薇等人的结果相似. 值得一提的是, a_0 在 40°N — 40°S 区域内的分布形成了明显的齿印型分布, 这些齿印都分布于海洋和陆地

的交界处且方向与赤道东北信风(北半球)和东南信风(南半球)方向相同^[20-21], 这说明海平面 ZTD 的分布不仅与海陆分布、地形有关还受热环流的影响.

图 4b 给出的是 ZTD 年周期变化振幅项 a_1 , 我们可以使用它来分析 MSL 处 ZTD 的年周期循环变化. 拟合后的振幅参数决定了一年中 ZTD 的变化幅度. ZTD 的年变化振幅 a_1 从 1 cm 到 12 cm 不等, 具体取值与地理位置有关. 在全球范围内平均年周期变化振幅为 3.5 cm. 海岸线附近 ZTD 年变化周期振幅整体大于内陆地区. 另外, 中低纬度地区 (40°S — 40°N) 年变化振幅分布极不均匀(印度半岛附近最大可达 1.1 cm, 部分赤道地区最小不到 4 mm). 大西洋东部和太平洋东北海岸线地区 ZTD 年变化振幅比较小, 这也许是由于海洋季风对气候具有调节作用, 使得气象参数变化幅度较小从而导致 ZTD 年周期变化也较小.

全球 ZTD 半年周期变化振幅 a_3 分布如图 4c 所示. 可以看出全球 ZTD 平均半年变化振幅比年变化振幅小大约 3 cm. 在北半球, ZTD 的半年变化振幅整体上要大于南半球. 半年周期变化同样在沿海附近要强于内陆地区, 在马来西亚和印度尼西亚

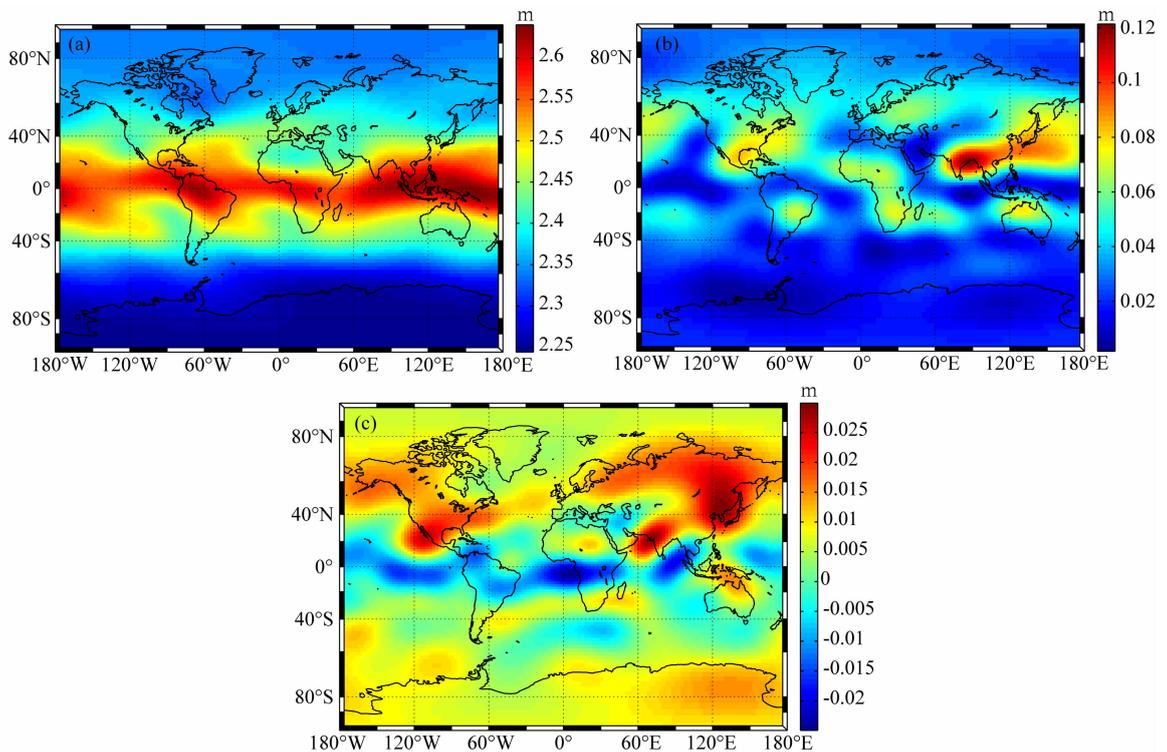


图 4 平均海平面 ZTD 均值、年周期变化振幅和半年周期变化振幅全球分布状况

(a) ZTD 平均值(系数 a_0); (b) ZTD 年周期变化振幅(系数 a_1); (c) ZTD 半年周期变化振幅(系数 a_3).

Fig. 4 Global distribution of mean ZTD, annual variation amplitude and semiannual variation amplitude

(a) Mean ZTD (coefficient a_0); (b) Global annual variation amplitude of ZTD (coefficient a_1);

(c) Global semiannual variation amplitude of ZTD (coefficient a_3).

赤道海域半年周期变化要强于周围地区,这说明 ZTD 在该地区的半年周期变化可能与厄尔尼诺现象有关. 因为厄尔尼诺现象的起因即是海洋和大气热力环流的异常^[21].

本文 GZTD 模型的计算只需年积日、纬度、经度和高度,它具有建立方法简单,使用时无需任何实测气象参数且计算方便所需参数少,且有良好的改正效果.

4 GZTD 模型有效性检验

本文采用平均偏差(bias)和均方根误差(RMS)作为模型精度评定标准. 其计算公式如下:

$$\text{bias} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\text{ZTD}_i^c - \text{ZTD}_i^o), \quad (6)$$

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\text{ZTD}_i^c - \text{ZTD}_i^o)^2}, \quad (7)$$

其中, ZTD_i^c 是由本文 GZTD 模型计算得到估计值, ZTD_i^o 为真值, N 表示观测值总数, 平均偏差 bias 衡量模型计算值与真值的平均偏离程度, 均方根误差 RMS 衡量模型的可靠性.

4.1 内符合检验

为了检验 GZTD 模型使用球谐函数的方法建模是否合理, 我们使用 GGOS Atmosphere 提供的 2011 年全球 ZTD 每天 4 次(即 0、6、12、18 UTC)的格网数据与 GZTD 模型的估计值进行内符合检验. 全球所有 $2^\circ \times 2.5^\circ$ 的网格点上的 bias 和 RMS 全球分布如图 5 所示, 其中在第 1 节提及的各对流层改正模型 bias 和 RMS 结果对比见表 1.

表 1 与 GGOS 数据对比不同对流层延迟模型误差统计 (cm)

Table 1 Statistics of global bias and RMS for GZTD, UNB3m, UNB4, UNB3 and EGNOS models compared with GGOS data (unit: cm)

Models	bias	RMS
GZTD	0.2 [-5.4, 8.0]	3.7 [1.1, 9.1]
UNB3m	3.4 [-6.9, 16.2]	6.0 [1.2, 16.4]
UNB4	4.7 [-6.9, 17.0]	7.4 [1.5, 17.4]
UNB3	4.0 [-8.0, 16.2]	7.0 [1.6, 16.6]
EGNOS	4.5 [-7.4, 16.8]	6.9 [1.1, 16.9]

注:表中方括号内为取值范围.

从表 1 GGOS 数据检验结果可以看出在上述 5 种模型中本文提出的 GZTD 模型与 GGOS 的全球对流层数据最为接近. GZTD 模型全球内符合精度

为厘米级, 全球平均偏差明显小于 EGNOS 和 UNB3m 模型. 图 5 为 GZTD 模型内符合检验 bias 和 RMS 全球分布状况, bias 和 RMS 在全球分布基本上都在 $[-2, 2]$ cm 与 $[1, 5]$ cm 范围之内, 说明 GZTD 模型对 GGOS 数据建模的效果很好. 但是在赤道地区, 特别是太平洋以西的赤道地区, GZTD 模型的精度相对较低, 这有可能是由于该区域厄尔尼诺现象导致的^[18].

4.2 外符合检验

GPS 观测技术具有实时、连续和全天候等特性, 因而被广泛用于确定高时间分辨率的 ZTD. 目前 IGS 提供 1998 年起至今时间分辨率为 5 min 的对流层延迟最终产品 (ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/trop_new). 为了进一步分析 GZTD 模型的改正精度, 本文使用 2010 年全球 385 个 IGS 站 ZTD 产品验证新模型的精度. 图 6 为检验所用全球 385 个 IGS 站的分布. 图 7 为 2010 年 IGS 站对流层 ZTD 产品的标准差直方图, 可以看出全球大部分 IGS 站 ZTD 标准差都在 2 mm 以内.

表 2 给出了使用全球 IGS 对流层最终产品检验 GZTD 等对流层延迟模型的误差统计结果. 可看出 UNB3m 模型在全球平均偏差小于 2 cm, 但并未达到 Leandro 等所说 0.5 cm 的精度^[10], 这可能有两方面原因. 首先因为 UNB3m 模型采用的是无线电探空数据进行检验, 而不同的数据和观测技术获取的 ZTD 存在系统偏差, 这也可以从表 1 和表 2 的 ZTD 数据整体存在 1~2 cm 偏差得到证实; 其次 Leandro 等使用的是北美的探空站, 其结果在一定程度上只能代表该模型在北美地区的精度. UNB3 模型估计的天顶对流层延迟平均误差为 2 cm, 整体精度优于 UNB4 模型. EGNOS 模型的精度是 5 种模型精度最差的一种, 这与其气象参数的经验公式相对简单有关.

表 2 与 IGS 数据对比不同对流层延迟模型误差统计 (cm)

Table 2 Statistics of global bias and RMS for GZTD, IGGtrop, UNB3m, UNB4, UNB3 and EGNOS models compared with IGS data (unit: cm)

Models	bias	RMS
GZTD	-0.02 [-6.55, 5.57]	4.24 [0.84, 7.46]
UNB3m	1.46 [-7.01, 11.42]	5.20 [1.95, 12.04]
UNB4	2.47 [-6.94, 12.18]	5.85 [2.15, 13.38]
UNB3	1.91 [-8.12, 12.00]	5.71 [2.06, 13.19]
EGNOS	2.68 [-7.46, 13.96]	5.81 [2.21, 14.19]

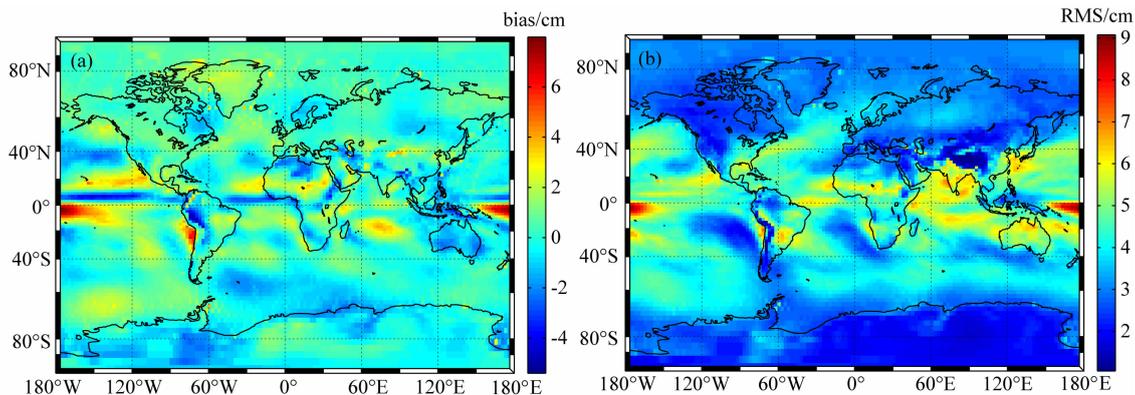


图5 GZTD模型内符合检验全球分布状况

Fig. 5 Global bias and RMS of GZTD model

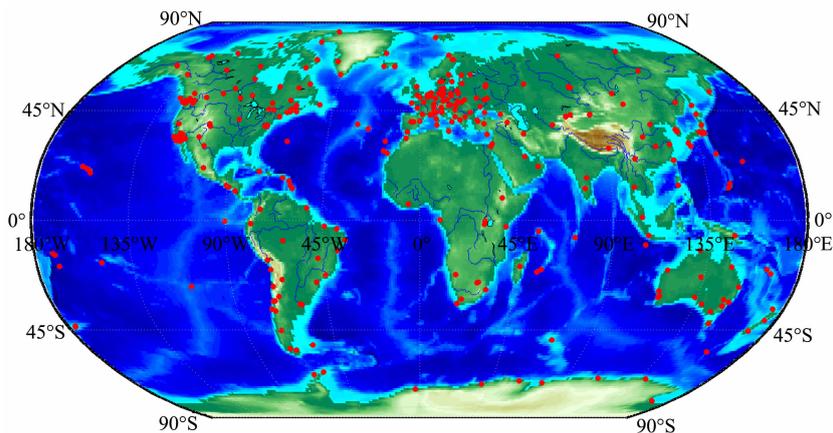


图6 全球385个IGS站分布状况

Fig. 6 Distribution of 385 global International GPS Service (IGS) sites

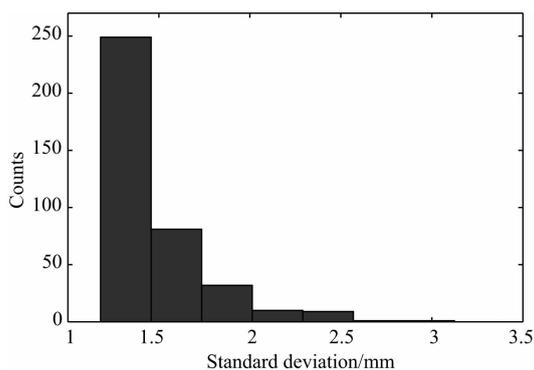


图7 全球IGS站ZTD最终产品平均标准误差直方图

Fig. 7 Histogram of the uncertainty for the ZTD solutions at 385 sites

为了能和文献[6]中的 IGGtrop 模型结果进行对比,我们采取和文献[6]中相同的区间误差统计方法,即分别按 IGS 测站的高度和纬度分成不同的区间计算 GZTD 等模型的 bias 和 RMS,统计结果见表 3—4.由这两个表格可以看出:在低于 1 km 和高于 2 km 的高度范围内, GZTD 模型的平均 bias 接

近于 0, RMS 都小于 EGNOS、UNB 系列模型的结果;在 1~2 km 高度范围, GZTD 模型(平均 bias: -0.5 cm)稍差于 UNB3m(平均 bias: 0.2 cm)的结果,但改正效果总体上优于 EGNOS 和 UNB 1—4 模型.且 UNB4 确实在 2 km 以上的高度范围内精度优于 UNB3.另外 GZTD 模型在整个高度范围内的平均 bias 都低于 IGGtrop 模型的结果,但 RMS 高于 IGGtrop 的结果,这是因为 IGGtrop 模型在高度方向上采用 1 km 分辨率的分段线性法,因而精度比单纯采用指数近似模型的 GZTD 要高.与 IGGtrop 模型类似, GZTD 模型平均 bias 随高度增加没有明显变化, RMS 随高度增加而减小,而 UNB3m 模型平均 bias 值与高度呈反比关系,此结果与李薇和 Leandro 等人的分析结果相符.应该看到的是,不论是 GZTD 模型还是 IGGtrop 模型在 1~2 km 的高度范围内平均偏差都大于 UNB3m 模型,因而这两种模型在该高度范围内都还有待改善.

GZTD 模型平均偏差与纬度不存在明显正比关

表 3 6 种对流层延迟模型在不同高度区间的误差统计 (cm)

Table 3 Statistics of bias and RMS for GZTD, IGGtrop, UNB3m, UNB4, UNB3 and EGNOS in different height ranges for 385 IGS sites in 2010 (unit: cm)

正高(m)	站点数	GZTD		IGGtrop		UNB3m		UNB4		UNB3		EGNOS	
		bias	RMS	bias	RMS	bias	RMS	bias	RMS	bias	RMS	bias	RMS
<500	282	0.1	4.4	-0.8	4.2	1.8	5.5	2.8	6.2	2.2	6.0	3.2	6.3
500~1000	51	0.0	4.0	1.0	3.7	0.8	4.3	2.1	5.1	1.3	4.9	1.9	4.6
1000~2000	40	-0.5	3.8	-0.8	3.5	0.2	4.3	1.3	5.0	0.6	4.8	0.6	4.4
>2000	12	-0.1	3.6	-0.6	2.7	-0.3	4.1	0.7	4.2	1.0	4.4	-0.4	4.2

注:表中 IGGtrop 模型数据取自文献[6]中 2001—2005 年 125 个 IGS 站统计结果。

表 4 6 种对流层延迟模型在不同纬度区间的误差统计 (cm)

Table 4 Statistics of bias and RMS for GZTD, IGGtrop, UNB3m, UNB4, UNB3 and EGNOS in different latitude ranges for 385 IGS sites in 2010 (unit: cm)

纬度范围	站点数	GZTD		IGGtrop		UNB3m		UNB4		UNB3		EGNOS	
		bias	RMS	bias	RMS	bias	RMS	bias	RMS	bias	RMS	bias	RMS
0°—15°	36	-1.8	5.0	-2.4	5.6	-2.2	6.1	-2.1	6.0	-3.1	6.3	-2.7	6.2
15°—30°	55	-0.4	4.8	-0.9	4.4	1.9	6.3	2.0	7.0	1.4	6.9	2.1	6.4
30°—45°	146	-0.1	4.4	-0.8	4.1	2.9	5.7	4.0	6.7	3.4	6.3	4.2	6.5
45°—60°	105	0.8	4.0	-0.5	3.6	0.2	3.8	1.6	4.2	1.2	4.1	2.0	4.4
60°—75°	37	-0.3	3.2	-0.6	3.3	2.3	4.8	3.7	5.7	3.4	5.6	4.5	6.1
75°—90°	6	-0.4	3.0	-0.4	3.2	1.9	4.0	3.2	4.9	3.0	4.9	3.9	5.3

注:表中 IGGtrop 模型数据取自文献[6]中 2001—2005 年 125 个 IGS 站统计结果。

系;除了 45°—60°范围内,各纬度区间上的平均偏差基本为负值;在赤道地区,GZTD 模型精度优于 IGGtrop 模型,在其它地区 GZTD 模型精度略低于 IGGtrop 模型。

另外 GZTD 模型在中、高纬地区(45°—60°范围内)精度低于 UNB3m(主要体现在平均 bias)。其原因一方面可能是因为 IGS 站普遍分布于北半球,因而与 UNB3m 模型相比体现不出 GZTD 模型在南半球的优势;另一方面 UNB3m 模型在南半球平均 bias 偏正,在北半球偏负,这使得 UNB3m 模型在 45°—60°范围内平均 bias 偏差较小。为了进一步对比 GZTD 模型与 UNB3m 模型,图 8 给出了 GZTD 和 UNB3m 模型平均 bias 和 RMS 随高度、纬度及经度的全球分布状况。

从图 8 可以看出,与 IGGtrop 模型类似,GZTD 在南、北半球精度差别不大;而 UNB3m 模型在南半球的修正精度明显差于北半球。这首先证明对流层延迟模型南北半球对称的假设的不合理性,其次说明 GZTD 模型在 45°—60°纬度圈内精度差于 UNB3m 模型确实有可能受 IGS 分布原因的影响。另外,与 IGGtrop 模型不同的是,GZTD 模型平均

bias 在经度方向上并不存在明显呈波状分布特征;而 GZTD 模型平均 bias 随纬度的分布则存在明显的双峰分布,峰值位于南北纬 45°左右。图 9 为全球 IGS 站 GZTD 模型检验 bias 和 RMS 的全球分布状况,从图 9a 可以看出,bias 较大的区域如北大西洋、南美洲西南沿海和赤道地区都与内符合检验图 5a 中一致,但在欧洲西部(45°N 左右)出现了大于 4 cm 的平均偏差。同样在 RMS 的对比中,除欧洲西部地区之外 RMS 的分布都非常一致。这说明 GGOS 对流层延迟数据和 IGS 对流层延迟产品在欧洲西部地区可能有较大的差异。

从以上分析可知,GZTD 模型总体精度为厘米级,bias 和 RMS 精度优于其它常用的模型(UNB 系列模型、EGNOS 模型),整体上与 IGGtrop 模型相当,某些地区精度甚至要高于 IGGtrop 模型。

5 结 论

本文利用 GGOS Atmosphere 提供的 2002—2009 年全球天顶对流层延迟格网时间序列对全球天顶对流层延迟进行建模,提出了一种全球非气象

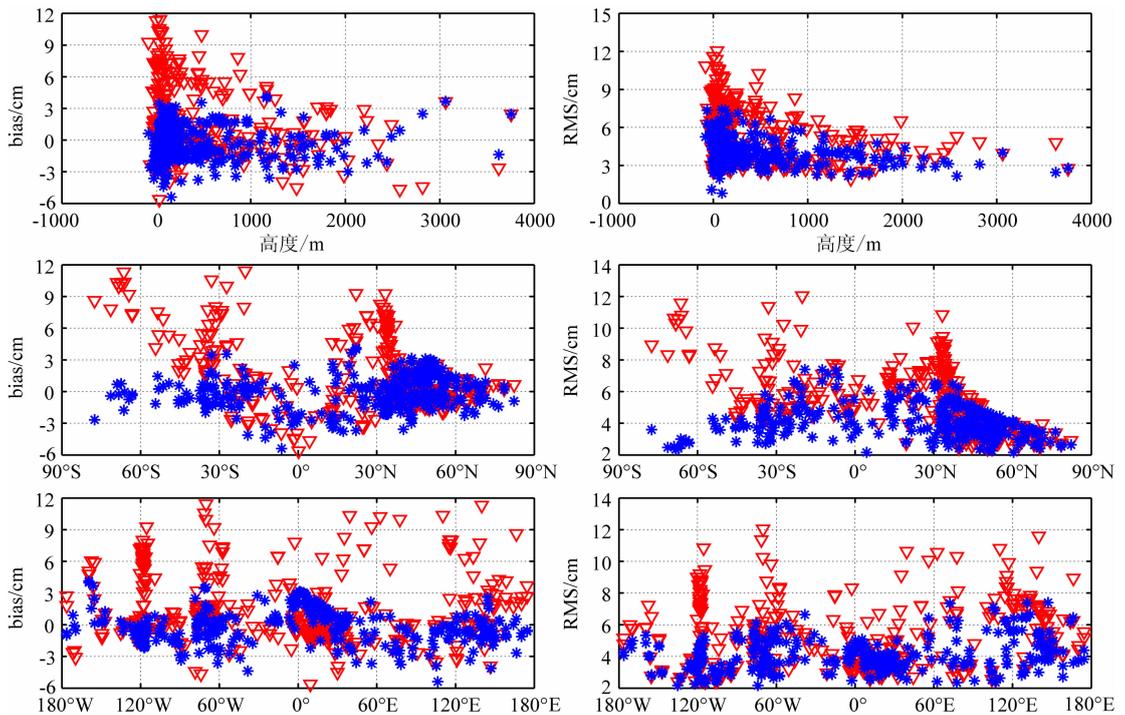


图 8 GZTD(蓝色*)和 UNB3m(红色▽)模型 bias 和 RMS 随高度、纬度及经度的全球分布
 Fig. 8 Distributions of bias and RMS with respect to height, latitude, and longitude for GZTD (blue*) and UNB3m (red▽)

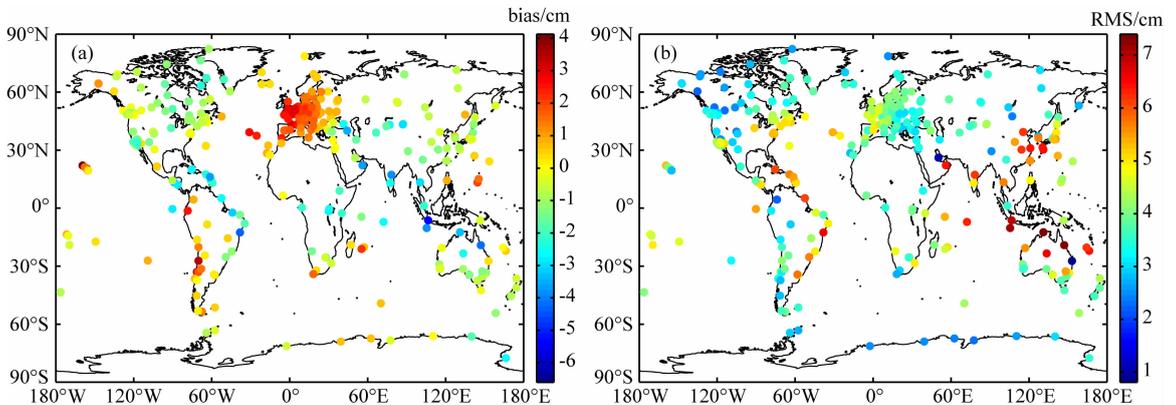


图 9 GZTD 模型外符合精度检验 bias (a)与 RMS (b)全球分布
 Fig. 9 Global distribution of (a) bias and (b) RMS for GZTD model at global IGS sites

参数天顶对流层延迟改正模型;GZTD 模型. 经与现有的同类模型 EGNOS、UNB3、UNB4、UNB3m、IGGtrop 对比分析显示:

(1)使用球谐函数展开 ZTD 变化特征参数建立的全球天顶对流层延迟(GZTD)模型,不仅建模方法简洁,计算简便,且该模型能有效反映天顶对流层延迟经向、纬向和高程方向的空间变化特征.

(2)GZTD 模型内符合精度统计结果为:全球平均 bias 和平均 RMS 分别为 0.2 cm 和 3.7 cm. 使用全球 385 个 IGS 站进行外符合检验统计结果为:站均 bias 和 RMS 分别为-0.02 cm 和 4.24 cm. 总体

上 GZTD 模型全球平均精度高于 EGNOS 和 UNB 系列模型,特别是在南半球地区. 且 GZTD 模型精度整体上与 IGGtrop 模型相当,除 1~2 km 高度范围和 45°N 附近的欧洲西部地区,GZTD 精度都略优于 IGGtrop. 但 GZTD 模型相对于 IGGtrop 模型最大的优点就是使用简单,所需参数少,可为构建高精度对流层延迟改正模型以及相关导航定位研究与应用提供参考.

(3)通过 GZTD 模型的外符合检验可以看到不同数据和技术计算 ZTD 都存在差异(例如欧洲西部地区 IGS 测站平均 bias 存在较大偏差),为了建立

精度更高的全球天顶对流层延迟模型,首先需要获得全球高质量、高分辨率的天顶对流层数据.这一问题尚需进一步的研究和分析.

致谢 感谢美国 GGOS Atmosphere 机构提供全球 2002—2011 年对流层延迟格网数据以及 IGS 数据中心提供 2010 年全球 IGS 站对流层天顶延迟时间序列数据.

参考文献(References)

- [1] 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. 武汉大学学报(信息科学版), 2007, 32(5): 454-457.
Yin H T, Huang D F, Xiong Y L, et al. New model for tropospheric delay estimation of GPS signal. *Geom. Inf. Sci. Wuhan Univ.* (in Chinese), 2007, 32(5): 454-457.
- [2] Hopfield H S. Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data. *J. Geophys. Res.*, 1969, 74(18): 4487-4499.
- [3] Black H D. An easily implemented algorithm for the tropospheric range correction. *J. Geophys. Res.*, 1978, 83(B4): 1825-1828.
- [4] Saastamoinen J. Contributions to the theory of atmospheric refraction Part II, refraction corrections in Satellite Geodesy. *Bulletin Géodésique*, 1972,(107): 13-34.
- [5] 曲伟箐, 朱文耀, 宋淑丽等. 三种对流层延迟改正模型精度评估. 天文学报, 2008, 49(1): 113-122.
Qu W J, Zhu W Y, Song S L, et al. The evaluation of precision about hopfield, saastamoinen and EGNOS tropospheric delay correction model. *Acta Astronom. Sin.* (in Chinese), 2008, 49(1): 113-122.
- [6] 李薇, 袁运斌, 欧吉坤等. 全球对流层天顶延迟模型 IGGtrop 的建立与分析. 科学通报, 2012, 57(15): 1317-1325.
Li W, Yuan Y B, Ou J S, et al. A new global zenith tropospheric delay model IGGtrop for GNSS applications. *Chin. Sci. Bull.*, 2012, 57(17): 2132-2139.
- [7] Collins J P, Langley R B. A tropospheric delay model for the user of the Wide Area Augmentation System. Final Contract Report for Nav Canada, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 187. Fredericton: University of New Brunswick, 1997.
- [8] Collins J P, Langley R B. The residual tropospheric propagation delay: How bad can it get? // ION GPS 1998, September 15-18, Nashville, Tennessee, USA, 1998; 729-738.
- [9] Collins J P, Langley R B, LaMance J. Limiting factors in tropospheric propagation delay error modeling for GPS airborne navigation. Proceedings of the Institute of Navigation 52nd Annual Meeting, June 19-21, Cambridge, Massachusetts, USA, 1996; 519-528.
- [10] Leandro R F, Santos M C, Langley R B. UNB neutral atmosphere models: Development and performance. // ION NTM 2006, January 18-20, Monterey, California, USA, 2006; 564-573.
- [11] Collins J P, Langley R B. Mitigating tropospheric propagation delay errors in precise airborne GPS navigation. // Position Location and Navigation Symposium, IEEE. Fredericton: Geodetic Res. Lab., New Brunswick Univ., 1996; 582-589.
- [12] Zhao S H, Lu X S, Wang Q F, et al. Analysis and evaluation of various tropospheric modeling approaches for high-precision GPS kinematic positioning over medium ranges and at high altitude: case study. *J. Surv. Eng.*, 2009, 135(2): 66-71.
- [13] McGraw G A. Tropospheric error modeling for high integrity airborne GNSS navigation. Position Location and Navigation Symposium(PLANS), 2012 IEEE/ION, 2012: 158-166.
- [14] Uppala S M, Kallberg P W, Simmons A J, et al. The ERA-40 re-analysis. *Quart. J. Meteor. Soc.*, 2005, 131(162): 2961-3012.
- [15] Bosser P, Bock O, Pelon J, et al. An improved mean-gravity model for GPS hydrostatic delay calibration. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 2007, 4(1): 3-7.
- [16] Chen Q M, Song S L, Heise S, et al. Assessment of ZTD derived from ECMWF/NCEP data with GPS ZTD over China. *GPS Solutions*, 2011, 15(4): 415-425.
- [17] Song S L, Zhu W Y, Chen Q M, et al. Establishment of a new tropospheric delay correction model over China area. *Science China (Physics, Mechanics and Astronomy)*, 2011, 54(12): 2271-2283.
- [18] 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. Geophys. Res.*, 2007, 112(D9): D09110.
- [19] Boehm J, Heinkelmann R, Schuh H. Short note: a global model of pressure and temperature for geodetic applications. *Journal of Geodesy*, 2007, 81(10): 679-683.
- [20] Yao Y B, Zhu S, Yue S Q. A globally applicable, season-specific model for estimating the weighted mean temperature of the atmosphere. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(12): 1125-1135.
- [21] Ackerman S A, Knox J A. Meteorology: Understanding the Atmosphere. Pacific Grove, California: Brooks/Cole/Thomson Learning Press, 2003.
- [22] 瞿盘茂, 李晓燕, 任福明. 厄尔尼诺. 北京: 气象出版社, 2009.
Qu P M, Li X Y, Ren F M. El Niño(in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2009.