



全球对流层天顶延迟模型 IGGtrop 的建立与分析

李薇^①, 袁运斌^①, 欧吉坤^①, 李慧^{①②}, 李子申^{①②}

① 中国科学院测量与地球物理研究所, 大地测量与地球动力学国家重点实验室, 武汉 430077;

② 中国科学院研究生院, 北京 100049

E-mail: liweifreedom@hotmail.com

2011-11-17 收稿, 2012-01-18 接受

国家重点基础研究发展计划(2012CB825604)、国家自然科学基金(41104103, 41021003, 40890160, 41074013)、国家杰出青年科学基金(40625013)和中国科学院国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划资助

摘要 对流层延迟是高精度 GNSS 导航定位的重要误差源. 利用 IGS 站提供的高精度对流层天顶延迟时间序列和 NCEP 大气资料进一步研究了全球及中国区域对流层天顶延迟的时空变化特征. 在此基础上, 根据 NCEP 资料建立了无需地面实测气象参数且同时顾及经、纬度差异的全球对流层天顶延迟 IGGtrop 模型. IGGtrop 模型在全球 125 个 IGS 站的平均误差(bias)和平均中误差(RMS)分别为-0.8 和 4.0 cm, 优于同等条件下国际上常用对流层延迟模型 EGNOS, UNB3 和 UNB3m 模型的结果(上述三模型的 bias 和 RMS 分别为 2.0, 2.0, 0.7 cm 和 5.4, 5.4, 5.0 cm). 同时, IGGtrop 模型的 bias 和 RMS 的分布范围小于 EGNOS 等模型, 显示其在全球各地区的改正效果具有相对更好的一致性. IGGtrop 模型在中国几个 IGS 站的 bias 范围为-2.0~0.4 cm, RMS 为 2.1~6.4 cm, 总体上优于 EGNOS 等模型的改正效果. IGGtrop 模型在南半球的改正精度也显著优于 EGNOS 和 UNB3m 模型. IGGtrop 模型的另一优点是误差随高度增加没有明显变化, 从而避免了其他许多模型随高度增加而精度明显降低的情况.

关键词

对流层天顶延迟
全球对流层天顶
延迟模型
EGNOS
UNB3
UNB3m
IGGtrop

无线电信号的对流层延迟是卫星导航定位技术的主要误差源之一. 对流层延迟量在天顶方向时大小约为 2 m, 而接近地面方向时其影响可达 20 多米. 在 GNSS 导航定位中, 特别是实时应用中, 通常需要建立一个用以削弱对流层影响的适当的对流层大气延迟改正模型.

传统的 Hopfield 和 Saastamoinen 等对流层延迟模型的改正精度可达分米-厘米级, 但应用时需要测站的实测气象参数, 如果用参考大气来计算, 则改正效果较差. 因此, 限制了它们用于实时导航时的改正精度. Collins 和 Langley^[1]为美国广域增强导航系统的应用建立了 UNB3 模型. 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(温度、压强、水汽压、温度垂直梯度、水汽垂直梯度因子)表用来估算所需气象参数. 在北美地区,

UNB3 模型估计的对流层天顶延迟偏差都在 20 cm 以内^[2], 平均误差为 2 cm. 在全球范围内, UNB3 的改正精度与使用实测气象参数的 Hopfield 模型和 Saastamoinen 模型基本相当, 但对于位置较高的测站改正精度优于 Hopfield 模型^[3]. EGNOS 模型对 UNB3 模型进行了简化, 成为国际民航组织的推荐模型^[4], 已用于美国^[1,2]、欧洲^[5,6]及日本^[7]等地区的增强导航系统中. UNB 系列模型还在不断发展改进中. 例如, UNB3m 模型在参数表中用相对湿度代替水汽压, 改善了对湿延迟的估计, 使得 bias 减小为-0.5 cm^[8,9]; UNBw.na 模型^[10]是专门针对北美地区的模型, 它利用北美地面气象资料建立了水平分辨率为 5°×5°的二维大气参数表, 同时顾及对流层延迟随纬度及经度的变化, 可以描述有限区域内对流层延迟的精细空间变化特征, 误差比 UNB3m 减小了 30%, 但其参数

英文版见: Li W, Yuan Y B, Ou J K, et al. A new global zenith tropospheric delay model IGGtrop for GNSS applications. Chin Sci Bull, 2012, 57: 2132–2139, doi: 10.1007/s11434-012-5010-9

表的建立过程相对较为复杂.

值得注意的是, UNB3 等模型的大气参数表中的参量仅随纬度变化, 而没有考虑对流层延迟在经向上的差异. 虽然这些模型的全球平均修正结果较好, 但在某些地区的偏差仍然比较大, 尤其是在我国这样地域广阔环境复杂的地区改正效果较为有限. UNBw.na 模型虽然由于采用了二维参数表, 改善了其改正效果的一致性, 但它的这种应用效果局限于北美地区, 且建立其参数表需要大量计算. 在我国, 相关研究主要集中于中国局部地区对流层延迟特征分析与模拟, 建立了一些局部模型^[11-13], 并初步开展了中国区域^[14]及全球^[15]对流层延迟模型的研究.

本文利用 GPS 观测的及 NCEP 大气资料计算得到的对流层天顶延迟数据, 分别对其时间和空间变化特征进行了分析, 在此基础上利用 NCEP 大气资料计算纬度、经度、高度三维网格上的对流层天顶延迟, 获取其相对精细的年变化特征参数, 初步建立了一种新的全球对流层天顶延迟的三维经验模型: IGGtrop 模型. 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, 能更好地反映中国及全球对流层天顶延迟的时空变化特征, 而且建模方法较为简单, 可以满足实时定位和导航的研究与应用的精度要求, 也可作为我国自主全球卫星导航系统建设和应用的参考模型之一.

1 对流层天顶延迟时空变化特征

精确了解对流层天顶延迟的时空变化特征是建立精密对流层延迟模型的基础. 本文利用 GPS 资料计算的对流层天顶延迟时间序列进一步分析其时间变化规律, 然后根据 NCEP 大气资料研究全球对流层天顶延迟的空间分布特征.

目前, 大部分对流层延迟模型都以探空仪等传统观测资料为基础. 全球分布的大量 GPS 基准站也为高精度对流层延迟的研究积累了多年丰富的数据资料. IGS(International GNSS Service)GPS 基准站自 1998 年起提供对流层延迟产品^[16]. 我们利用 2001-01~2005-12 全球分布的 125 个 IGS 站的 GPS 数据计算得到的 2 h 时间分辨率、精度优于 4 mm 的对流层天顶延迟结果分析其时间变化特征. 图 1 给出了其中 6 个 IGS 站(分别为中国境内的 wuhn(武汉)、bjfs(北京)、lhas(拉萨)站及北美的 drao 站、低纬的 kour 和高纬的 nyal 站)的对流层天顶延迟时间序列及其相应的频谱

分析结果. 从图 1 中可以看到, 各 IGS 站上空的对流层天顶延迟都具有明显的周期性: 主要表现为年周期和半年周期, 其中, 中、高纬站的对流层天顶延迟以年周期变化为主, 而赤道附近的 kour 站的对流层天顶延迟的半年周期与年周期分量基本相当. 各站的对流层天顶延迟几乎没有年际变化. 其他未列出的 IGS 站的分析结果基本与图 1 所示类似. 根据上述对流层天顶延迟的总体变化特征, 利用式(1)进一步分别对 125 个 IGS 站的对流层天顶延迟的时变特征进行拟合, 计算拟合参数.

$$\begin{aligned} \text{ZTD} = \text{mean} - \text{amp1} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365.25}(\text{DOY} - D1)\right) \\ - \text{amp2} \cdot \cos\left(\frac{4\pi}{365.25}(\text{DOY} - D2)\right), \quad (1) \end{aligned}$$

$$\text{ZTD} = \text{mean} - \text{amp1} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365.25}(\text{DOY} - D1)\right), \quad (2)$$

其中, 年积日 DOY 和对流层天顶延迟 ZTD(zenith tropospheric delay)为已知量; ZTD 的年均值 mean, 年变化的振幅 amp1 和相位 D1 及半年变化的振幅 amp2 和相位 D2, 均为待拟合的参量. 拟合结果显示, 在 15°S~15°N 的赤道地区, 有 4 个站的 amp2 大于或近似于 amp1, 这 4 个站的 amp2 与 amp1 的比值平均约为 1.4, 体现出对流层天顶延迟相对较强的半年周期变化, 而另 7 个站中 amp1 均大于 amp2, 其对流层天顶延迟时变特征仍以年变化为主; 在 15°S~15°N 以外的地区, 所有站的 amp1 都明显大于 amp2, 显示对流层天顶延迟的时间变化特征均以年变化为主, 而且变化趋势基本都呈夏季最大冬季最小的特征, 也即具有相似的年变化相位. 图 1 还给出了对上述 6 个 IGS 站对流层天顶延迟序列进行余弦拟合的结果(粗线), 其中, kour 站用(1)式进行拟合, 其他 5 个站则用(2)式进行拟合. 从图 1 可以看到, 在赤道地区适宜采用年周期加半年周期的余弦函数描述对流层天顶延迟的时间变化特征, 而在中、高纬地区, 包括中国区域, 采用年周期的余弦函数就能较好地描述对流层天顶延迟的时间变化规律. 对上述拟合结果进行统计分析, 发现 125 个 IGS 站的对流层天顶延迟的残差的 RMS 范围为 1.7~6.4 cm, 平均 RMS 为 3.6 cm. Jin 等人^[17]也曾对全球 150 个 IGS 站数年的对流层天顶延迟时间序列进行了相关研究. 总体来说, 对流层天顶延迟的年变化显著, 半年变化则相对较小, 这与文献^[17]的结论基本一致; 但在赤道附近, 本文的研究

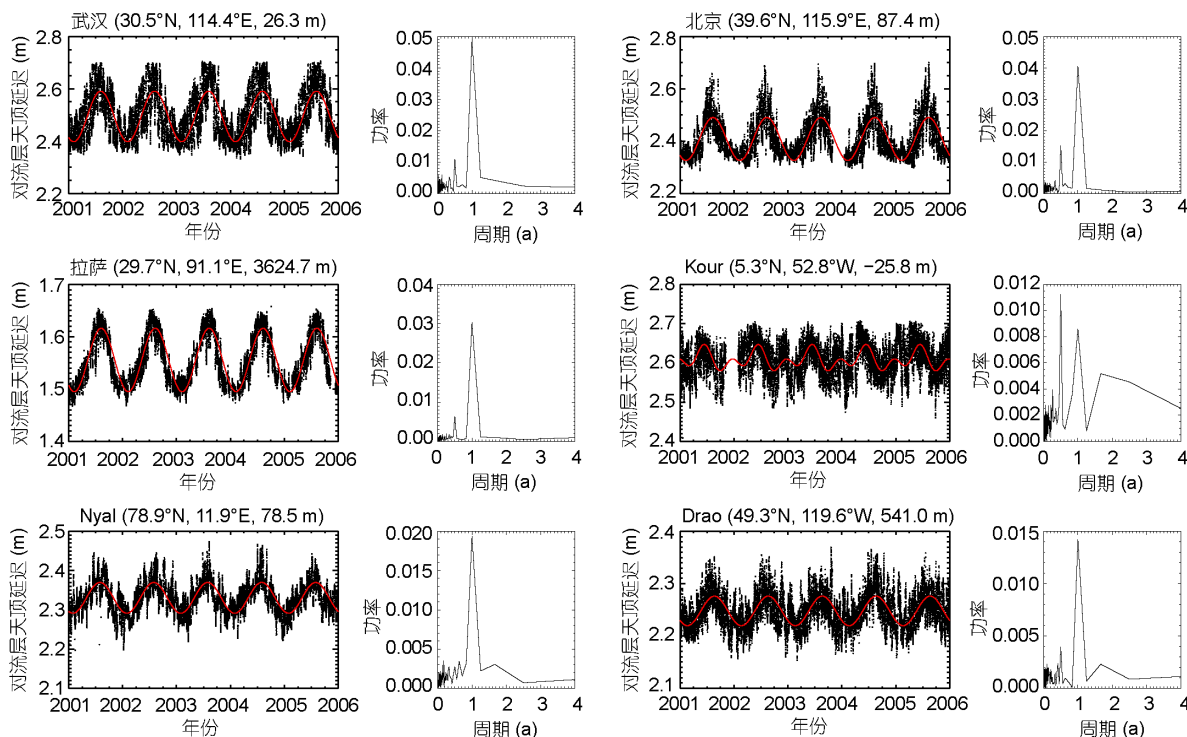


图1 武汉、北京、拉萨、Kour、Nyal及Drao等6个IGS站2001~2005年对流层天顶延迟的时间序列及相应的傅里叶频谱分析结果

站点名后面括号内依次为站点的纬度、经度和海拔高度

发现部分 IGS 站对流层天顶延迟的半年周期分量与年周期分量相当, 这在其他研究工作中没有提及, 本文在建立对流层延迟模型时将进一步考虑这一特征. 由于这一区域的 IGS 站数目相对较少, 要得到关于该地区更完整的对流层天顶延迟变化规律, 还有待利用其他的气象资料进行分析.

由于各 IGS 站的覆盖范围有限, 且高度通常也有所差异, 而对流层天顶延迟一般随高度增大而减小, 为避免高度差异对水平空间分布规律研究的影响, 我们进一步利用 NCEP 大气资料^[18]分析相同高度上对流层天顶延迟的空间分布规律. 基于 2004 年 NCEP 的全球水平分辨率 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 及高度上为 17 个等压面的大气压强、温度及相对湿度数据, 计算大气折射率, 并对折射率在高度上积分得到对流层天顶延迟^[19], 计算方法及公式如下所示:

$$N = \frac{k_1(P-e)}{T} + \frac{k_2e}{T} + \frac{k_3e}{T^2}, \quad (3)$$

$$\text{ZTD} = 10^{-6} \int_{h_0} N dh, \quad (4)$$

其中, P 为大气压强, T 为温度, e 为水汽压, N 为大气

折射率, h 为高度, 式中参数 k_1 , k_2 , k_3 的取值详见文献[19]. 水汽压由相对湿度计算得到^[20], 方法如下:

$$e = 0.01RH \cdot e_s \cdot f_w, \quad (5)$$

其中 RH 为相对湿度, e_s 为饱和水汽压, f_w 为增强因子, e_s 和 f_w 的计算方法参见文献[20]. 由于 NCEP 数据在高度上只覆盖到 10 hPa, 本文采用 MSIS00 大气模型得到的大气参数根据上述方法(水汽压为零)计算 10 hPa 以上的大气延迟(约为 0.023 m).

图 2 为由 NCEP 数据和上述方法计算得到的 2004 年全球平均海平面高度上年均对流层天顶延迟的等值线图. 从图 2 可以看出, 在全球范围内对流层天顶延迟的空间分布虽然主要与纬度有关, 其延迟量随纬度增加而减小, 但计算显示同一纬度上不同经度的对流层天顶延迟也存在约 1.5~26 cm 的差异, 平均约为 9 cm. 这主要体现在北半球上, 其海陆分布造成对流层延迟的空间变化比较复杂, 尤其是海陆交界处对流层延迟的变化比海洋和大陆上更剧烈. 而南半球以海洋为主, 对流层延迟的分布较为规律, 对流层延迟的等值线几乎与纬圈平行. 目前很多对流层延迟模型^[1,5,6,8]有南北半球对称的简化假设, 这

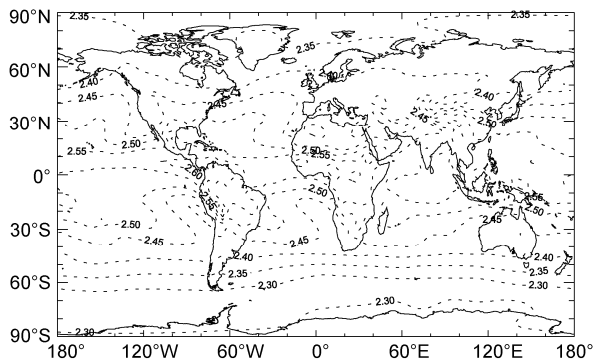


图2 全球平均海平面高度上年均对流层天顶延迟等值线图
(单位: m)

与实际情况明显存在差距. 特别地, 对流层延迟等值线在我国地区相对比较密集, 显示了比北美等地区更为复杂的空间变化特性. 就中国区域而言, 东、西部的对流层天顶延迟的空间分布也明显存在差异: 西部延迟等值线比东部密集. 因此, 为更好地描述我国及全球的对流层延迟特征, 在构建全球对流层延迟模型时也应尽可能顾及对流层天顶延迟随经度的变化.

2 一种新的全球对流层天顶延迟模型: IGGtrop 的建立

第1节的分析显示: 对流层天顶延迟随时间的变化具有明显的年变化特征, 可以用余弦类函数来描述; 而相同高度上不同地区的对流层天顶延迟的空间分布则比较复杂, 虽然主要与纬度相关, 但是其随经度的变化也非常明显, 尤其是在自然环境复杂或变化剧烈的地区, 同一纬度带的不同经度上对流层天顶延迟的差值可达数厘米至数分米, 这对模型精度的影响是比较大的. 因此, 要精确模拟对流层天顶延迟的特征不仅需要像 UNB3 等模型那样顾及对流层天顶延迟的纬向变化, 还应同时考虑其经向的差异. 由于对流层天顶延迟空间分布的复杂性使其难以用统一的函数来表示, 为此, 我们采用三维空间参数表尝试构建一种新的全球对流层延迟经验模型: IGGtrop 模型. 其建模的具体步骤如下:

(1) 将全球大气区域按纬度 φ 、经度 λ 、高度 h 划分为各维上均匀分布的三维网格 $(\varphi_i, \lambda_j, h_k)$, 网格的分辨率为 $(\Delta\varphi, \Delta\lambda, \Delta h)$, 其中, 模型网格高度分辨率 Δh 依气象数据的高度分辨率而定. 对于具有均匀水平分辨率 $(\Delta\varphi_a, \Delta\lambda_a)$ 的气象数据, 设模型网格的水平

分辨率 $\Delta\varphi \geq \Delta\varphi_a, \Delta\lambda \geq \Delta\lambda_a$, 即 $\Delta\varphi$ 和 $\Delta\lambda$ 的取值一般与气象数据的水平分辨率相同, 当精度要求较低时, 也可使其低于气象数据的水平分辨率. 对于水平面上非均匀分布的气象数据, 可依据数据的水平分布密度和所需改正精度选取合适的空间网格. 本研究中所选的三维网格分辨率在纬度、经度和高度方向上分别为 $2.5^\circ, 2.5^\circ$ 和 1 km .

(2) 根据气象资料中的大气参数值, 包括大气压强 $P(\varphi, \lambda, h, t)$ 、温度 $T(\varphi, \lambda, h, t)$ 以及相对湿度 $RH(\varphi, \lambda, h, t)$ 或水汽压 $e(\varphi, \lambda, h, t)$, t 为(以天为单位)时间, 利用第1节中提到的方法计算对流层天顶延迟 $ZTD(\varphi, \lambda, h, t)$, 然后将其插值到模型的三维网格点 $(\varphi_i, \lambda_j, h_k)$ 上, 从而得到每个网格点上的对流层天顶延迟的时间序列 $ZTD(\varphi_i, \lambda_j, h_k, t)$. 具体插值方法为: 先对 $ZTD(\varphi, \lambda, h)$ 在高度上进行插值得到 $ZTD(\varphi, \lambda, h_k)$. 由于 ZTD 随高度近似指数递减^[17], 对 $ZTD(\varphi, \lambda, h)$ 取对数后, 在高度上做样条插值得到 $ZTD(\varphi, \lambda, h_k)$ 的对数从而得到 $ZTD(\varphi, \lambda, h_k)$; 然后, 对同一 h_k 高度上的 $ZTD(\varphi, \lambda, h_k)$ 进行二维线性插值得到 $ZTD(\varphi_i, \lambda_j, h_k)$; 对于 $\Delta\varphi = \Delta\varphi_a, \Delta\lambda = \Delta\lambda_a$ 的情况省略曲面插值这一步.

(3) 利用(6)式对步骤(2)中所得的各网格点上的对流层天顶延迟时间序列 $ZTD(\varphi_i, \lambda_j, h_k, t)$ 进行拟合, 计算格点的模型参数. 对于 $15^\circ\text{S} \sim 15^\circ\text{N}$ 以外的地区, 模型参数为: 年平均值 $\text{meanZTD}(\varphi_i, \lambda_j, h_k)$ 和年变化幅度 $\text{ampZTD}(\varphi_i, \lambda_j, h_k)$ (相位取固定值); 对于 $15^\circ\text{S} \sim 15^\circ\text{N}$ 的赤道地区, 模型参数为: 年平均值 $\text{meanZTD}(\varphi_i, \lambda_j, h_k)$, 年变化幅度 $\text{ampZTD1}(\varphi_i, \lambda_j, h_k)$ 和相位 $D1(\varphi_i, \lambda_j, h_k)$ 以及半年变化幅度 $\text{ampZTD2}(\varphi_i, \lambda_j, h_k)$ 和相位 $D2(\varphi_i, \lambda_j, h_k)$.

$ZTD(\varphi_i, \lambda_j, h_k, t)$

$$= \begin{cases} \text{meanZTD}(\varphi_i, \lambda_j, h_k) - \text{ampZTD}(\varphi_i, \lambda_j, h_k) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365.25}(t - D)\right), & 15^\circ\text{S} < \varphi_i \leq 90^\circ\text{S} \text{ 或 } 15^\circ\text{N} < \varphi_i \leq 90^\circ\text{N} \\ \text{meanZTD}(\varphi_i, \lambda_j, h_k) - \text{ampZTD1}(\varphi_i, \lambda_j, h_k) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365.25}(t - D1(\varphi_i, \lambda_j, h_k))\right) - \text{ampZTD2}(\varphi_i, \lambda_j, h_k) \cdot \cos\left(\frac{4\pi}{365.25}(t - D2(\varphi_i, \lambda_j, h_k))\right), & 15^\circ\text{S} \leq \varphi_i \leq 15^\circ\text{N} \end{cases} \quad (6)$$

D 一般取固定值(北半球为 28 d, 南半球为 211 d)。

(4) 由模型计算测站 $A(\varphi, \lambda, h)$ 处对流层天顶延迟的方法: 先根据测站的经、纬度和高度确定其所在的网格 (i, j, k) , 再将观测日期(年积日)和网格 $(i, j, k = 1:N)$ (N 为高度网格的格点数)上的模型参数(对于 $15^\circ\text{S}\sim 15^\circ\text{N}$ 以外地区: $\text{meanZTD}(\varphi_i, \lambda_j, h_{k=1:N})$ 和 $\text{ampZTD}(\varphi_i, \lambda_j, h_{k=1:N})$; 对于 $15^\circ\text{S}\sim 15^\circ\text{N}$ 地区: $\text{meanZTD}(\varphi_i, \lambda_j, h_{k=1:N})$, $\text{ampZTD1}(\varphi_i, \lambda_j, h_{k=1:N})$, $D1(\varphi_i, \lambda_j, h_{k=1:N})$, $\text{ampZTD2}(\varphi_i, \lambda_j, h_{k=1:N})$ 和 $D2(\varphi_i, \lambda_j, h_{k=1:N})$) 代入(6)式计算 $1:N$ 所有高度网格的对流层天顶延迟 $\text{ZTD}(\varphi_i, \lambda_j, h_{k=1:N})$; 然后, 根据测站的高度 h 和 $\text{ZTD}(\varphi_i, \lambda_j, h_{k=1:N})$ 利用与步骤(2)中 ZTD 的高度插值相同的方法得到测站 A 的对流层天顶延迟 $\text{ZTD}(\varphi, \lambda, h)$ 。

在本文中, IGGtrop 模型是根据 NCEP 最近 4 年(2006-01~2009-12)的时间分辨率为 1 d 的大气资料构建的, 三维参数表的空间网格为 $2.5^\circ\times 2.5^\circ\times 1\text{ km}$ (网格水平分辨率与 NCEP 数据一致), 最高高度为 25 km。IGGtrop 模型的特点是建立方法较为简单, 使用时无需实测气象参数且计算简便, 而且有更好的模拟精度和改正效果。

3 IGGtrop 模型的误差分析及模拟和修正效果

为了分析和了解 IGGtrop 模型的模拟与改正效果, 利用全球 125 个 IGS 站 2001-01~2005-12 的高精度对流层天顶延迟数据作为“真值”, 通过与一些常用模型的结果进行比较, 分析 IGGtrop 模型的误差特征。主要以计算每个 IGS 站上 IGGtrop, EGNOS, UNB3 和 UNB3m 各模型的平均偏差 bias(模型计算结果减去“真值”)和中误差 RMS, 作为分析模型误差统计特征的基本量。表 1 给出了上述几个模型在全球分布的 125 个 IGS 站的 bias 及 RMS 的平均值及变化范围。

表 1 显示 IGGtrop 模型的全球改正精度为厘米级: 全球平均 bias 为 -0.8 cm , RMS 为 4.0 cm ; IGGtrop 模型的全球平均 bias 的绝对值小于 EGNOS 和 UNB3 模型, 与 UNB3m 模型基本相当; 而 IGGtrop 模型的

中误差 RMS 小于其他所有 3 个模型。由于 UNB3 模型与 EGNOS 模型的模拟与修正效果几乎完全一样, 为简便计, 在后面所有的统计分析与比较中, 将只考虑 EGNOS 模型。UNB3m 模型的全球平均 bias 比 UNB3 模型小得多, 但其 RMS 只略小于 UNB3 模型。值得注意的是, 我们统计 UNB3m 模型的 bias 为正值, 这与 Leandro 等人^[8]的统计结果相反, 导致这一差异的原因可能是因为他们提供的只是北美地区的平均结果, 而我们计算的是全球范围内的平均结果。图 3 给出了 IGGtrop, EGNOS 及 UNB3m 等 3 个模型的全球 bias 和 RMS 分布直方图。图上显示 IGGtrop 模型的 bias 都在 $-6\sim 6\text{ cm}$ 之间, RMS 在 $2\sim 8\text{ cm}$ 之间, 其 bias 和 RMS 分布的集中程度高于 EGNOS 和 UNB3m 模型, 说明 IGGtrop 在各 IGS 站改正效果的一致性优于其他几个模型。另一方面, 我们的计算结果还显示, 如果 IGGtrop 模型不考虑对流层延迟的经向变化, 虽然其全球平均 bias 值变化不会很大, 但 bias 的变化范围增加到 $-9.0\sim 9.0\text{ cm}$, RMS 也将增大为 4.6 cm 。表 1 和图 3 的结果表明, 同时顾及纬度和经度差异的对流层延迟模型比只考虑纬向变化的模型, 总体上将更符合全球对流层延迟的变化特征。

图 4 描述了 IGGtrop 模型在 125 个 IGS 站的平均偏差 bias 的统计情况。从图 4 可以看到, IGGtrop 模型的误差分布具有以下特征: IGGtrop 模型的平均 bias 的绝对值在内陆地区比大陆边缘和海洋上小; 大多数情况下, 其内陆地区的平均 bias 为正, 而大陆边缘和海洋区域的平均 bias 为负; 有 3 个低纬地区的 IGS 站的对流层延迟的 bias 的绝对值大于 3 cm 。由于 NCEP 在较低高度上的数据主要来源于探空仪观测, 进一步分析这 3 个 IGS 站附近探空仪站的数据, 可以发现都存在明显的数量少、数据质量差的问题。这表明较大的 bias 可能源自低质量的 NCEP 数据。因此, 利用其他更高质量的数据可望进一步改善 IGGtrop 模型的模拟与改正精度。

图 5 展示了 IGGtrop 及 UNB3m 模型的平均偏差 bias 和 RMS 随高度、纬度和经度的分布特征。为更好

表 1 IGGtrop, EGNOS, UNB3 及 UNB3m 对流层延迟模型的全球范围的误差统计^{a)}

	IGGtrop	EGNOS	UNB3	UNB3m
Bias	$-0.8\text{ }[-5.8, 2.7]$	$2.0\text{ }[-5.4, 12.6]$	$2.0\text{ }[-5.4, 12.6]$	$0.7\text{ }[-5.6, 11.8]$
RMS	$4.0\text{ }[2.1, 7.9]$	$5.4\text{ }[2.1, 14.0]$	$5.4\text{ }[2.0, 14.0]$	$5.0\text{ }[2.0, 13.8]$

a) “[]”内为取值范围, 单位: cm

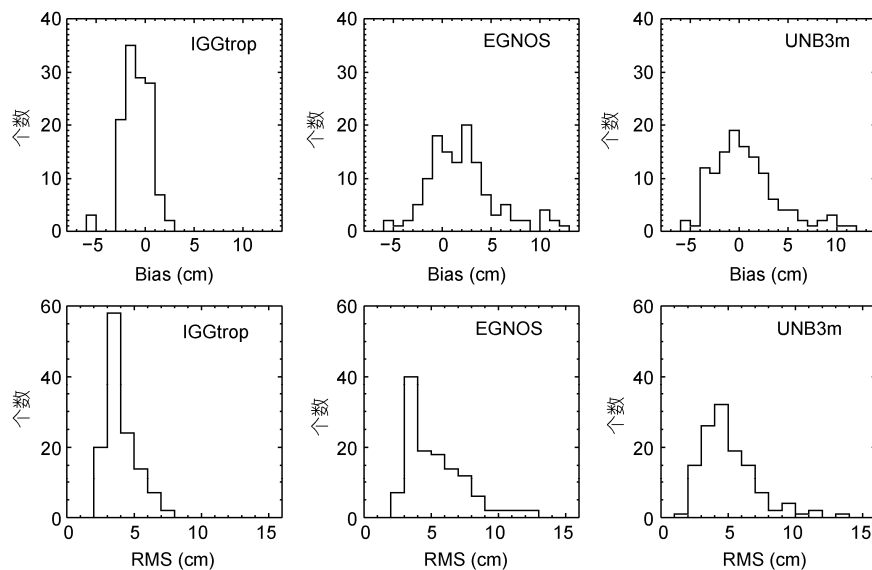


图3 IGGtrop, EGNOS 及 UNB3m 模型的全球偏差 bias 和 RMS 的分布直方图

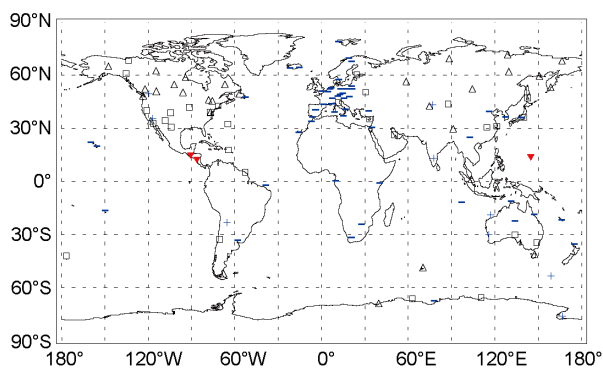


图4 IGGtrop 模型的平均偏差 bias 的全球分布特征

图中符号标识了 IGS 站的位置; 符号形状标识了 bias 的范围. 其中, Δ , $[0, 1]$ cm; $\square$, $[-1, 0]$ cm; $+$, $(1, 3]$ cm; $-$, $[-3, -1]$ cm; ∇ , $[-6, -3]$ cm

地描述 IGGtrop 模型的误差分布规律, 分别按站点的高度和纬度分成不同的区间统计 IGGtrop, EGNOS 和 UNB3m 模型的 bias 和 RMS, 统计结果列于表 2 和 3. 由上述图表可以看出: 在低于 0.5 km 和高于 2 km 的高度范围内, IGGtrop 模型的平均 bias 绝对值和 RMS 都小于 EGNOS 和 UNB3m 模型的相应结果; 在 0.5~2 km 的高度范围内, IGGtrop 模型的误差统计结果与 EGNOS 和 UNB3m 类似或者略好; IGGtrop 模型的 bias 随高度增加没有明显变化, RMS 随高度增加而减小; 而 UNB3m 模型的 bias 在各高度区间上并不一致, 其与高度存在明显的反比关系, 这同 Leandro 等人^[8]的结果类似. 由于对流层延迟随高度的表达式较为复杂, 一些对流层延迟模型一般都对其进行了简化,

从而给其带来了随高度增加而明显变化的误差. IGGtrop 模型则直接利用高度网格上精确的大气延迟进行插值计算, 从而可以明显降低这些误差的影响; IGGtrop 模型的平均偏差 bias 与纬度近似成正比, 各纬度区间上的平均偏差 bias 基本都为负值; 在赤道附近, IGGtrop 模型的平均偏差 bias 绝对值相对较大, 这主要是由 IGGtrop 模型在该地区的 3 个 IGS 站较差的修正效果所致. 如果不考虑这 3 个站, 则 IGGtrop 模型在 15°S ~ 15°N 纬度区间的平均偏差 bias 和 RMS 将分别为 -1.1 和 4.9 cm; 在中、高纬地区, IGGtrop 模型的误差统计结果总体上小于 EGNOS 和 UNB3m 模型, 尤其是在南半球的中、高纬以及北纬 30° 附近地区, IGGtrop 模型的改正效果明显好于 EGNOS (EGNOS 模型的 bias 和 RMS 随纬度的分布在图上未画出) 和 UNB3m 模型; 从图 5 上可以看到 IGGtrop 模型的精度在南、北半球间没有明显差别, 而 EGNOS 和 UNB3m 模型在南半球的修正精度明显低于北半球, 这再次说明对流层延迟的南北半球对称的假设存在较大误差, 需要对南、北半球使用不同的模型参数以得到更精确的模拟结果; 另外, IGGtrop 模型的平均偏差 bias 随经度呈现波状分布, 共有 2 个波峰, 分别位于大约 80°E 和 110°W , 这应与北半球大陆与海洋的地理分布特征有关 (大部分 IGS 站在北半球), 大陆地区的 IGGtrop 模型的平均偏差 bias 为正, 而海洋地区的相应值为负, 大陆与海洋在经向的交替造成了误差的波状分布.

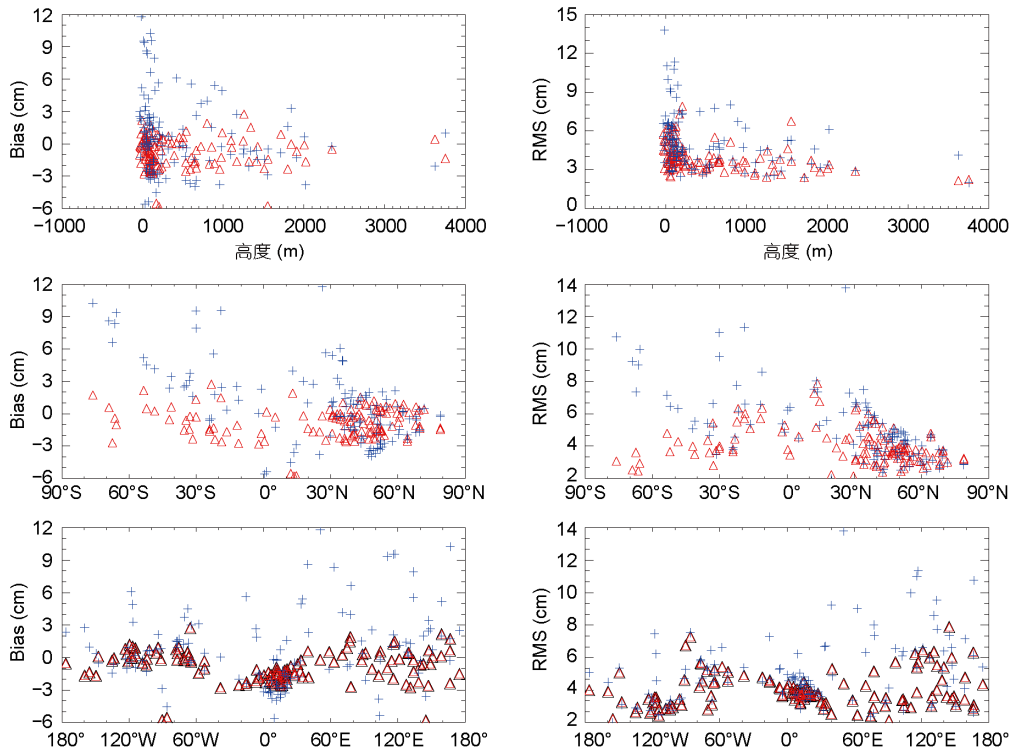


图 5 IGGtrop(Δ)和 UNB3m(+)模型的平均偏差 bias 和 RMS 随高度、纬度及经度的分布

表 2 IGGtrop 及 EGNOS, UNB3m 3 种对流层延迟模型在不同高度区间的误差统计

高度(m)	站点数	IGGtrop		EGNOS		UNB3m	
		Bias(cm)	RMS(cm)	Bias(cm)	RMS(cm)	Bias(cm)	RMS(cm)
<500	86	-0.8	4.2	2.6	5.9	1.1	5.4
500~1000	18	-1.0	3.7	1.4	4.7	0.2	4.7
1000~2000	16	-0.8	3.5	0.4	3.8	-0.4	3.7
>2000	5	-0.6	2.7	-0.6	3.9	-0.9	3.7

表 3 IGGtrop 及 EGNOS, UNB3m 3 种对流层延迟模型在南北纬不同纬度区间的误差统计

纬度	站点数	IGGtrop		EGNOS		UNB3m		IGGtrop(无季节变化)	
		Bias(cm)	RMS(cm)	Bias(cm)	RMS(cm)	Bias(cm)	RMS(cm)	Bias(cm)	RMS(cm)
0°~15°	11	-2.4	5.6	-1.0	6.4	-1.2	6.4	-2.4	6.2
15°~30°	15	-0.9	4.4	2.9	6.5	2.4	6.2	-	-
30°~45°	43	-0.8	4.1	2.7	5.4	1.5	5.0	-	-
45°~60°	35	-0.5	3.6	1.0	4.4	-0.7	4.3	-	-
60°~75°	18	-0.6	3.3	2.9	5.3	1.1	4.6	-	-
75°~90°	3	-0.4	3.2	4.7	6.2	3.3	5.5	-0.4	3.9

由于赤道地区大气参数的季节变化幅度较小, 因此 EGNOS 和 UNB3m 等模型都没有考虑该地区对流层延迟的季节变化^[1,5-8]. 同时, 我们的研究发现极区对流层天顶延迟的季节变化幅度也相对较小. 表 3 给出了在小于 15°和大于 75°的纬度带不考虑对流层

延迟季节变化时 IGGtrop 模型的平均偏差 bias 和 RMS. 从表中可以看到其改正效果明显较顾及季节变化时的模型差, 但与其他纬度带相比差别不大. 这说明在精度要求较低时, 可以通过忽略这些区域对流层延迟的季节变化特征来简化对流层延迟模型.

通过列出 IGGtrop, EGNOS 及 UNB3m 3 种模型在我国境内 6 个 IGS 站的误差统计结果, 进一步重点分析 IGGtrop 模型在中国区域的改正效果, 结果列于表 4. 从表 4 可以发现, IGGtrop 模型总体改正精度为厘米级, 且无论是 bias 还是 RMS, IGGtrop 模型总体均都优于其他几个常用的模型.

4 结论

利用 GNSS 对流层天顶延迟时间序列和 NCEP 大气资料分析了全球对流层天顶延迟的时空变化特征, 并利用 NCEP 数据建立了一种新的全球对流层天顶延迟模型: IGGtrop 模型. 研究结果显示:

(i) 提出通过采用三维空间(纬度×经度×高度)参数表建立的 IGGtrop 全球对流层天顶延迟模型, 其建模方法和模型使用都较为简单, 而且该模型能有

效反映对流层天顶延迟的时空变化特征, 它不仅有效顾及了对流层天顶延迟随纬度变化的特征, 还考虑了其随经度变化的特征.

(ii) IGGtrop 模型的全球及中国区域误差统计结果: IGGtrop 模型在全球 125 个 IGS 站的平均 bias 和平均 RMS 分别为-0.8 和 4.0 cm. IGGtrop 模型全球平均 bias 的绝对值小于 EGNOS 和 UNB3 模型, 与 UNB3m 模型基本相当, 但全球平均 RMS 小于 EGNOS, UNB3 和 UNB3m 模型; IGGtrop 模型在全球各 IGS 站的改正效果的一致性也优于 EGNOS 等模型; IGGtrop 模型在我国几个 IGS 站的平均偏差 bias 范围为-2.0~0.4 cm, 平均 RMS 为 2.1~6.4 cm, 显示其在中国区域改正效果优于 EGNOS 等模型; IGGtrop 模型在南半球的修正效果明显优于 EGNOS 和 UNB3m 模型.

(iii) IGGtrop 模型的误差空间分布统计特征为: 其平均偏差 bias 随高度增加没有明显变化, RMS 随高度增加而减小, 模型精度稳定可靠; 平均偏差 bias 与纬度成正比, 随经度则呈现波状分布; IGGtrop 模型误差在低纬地区最大, 可能与该地区 NCEP 数据质量有关.

总体上, IGGtrop 模型总的模拟精度及改正效果优于 EGNOS, UNB3 和 UNB3m 等国际常用全球对流层模型, 且使用简单方便, 可为我国自己建设的全球卫星导航系统构建高精度对流层延迟改正模型以及相关研究与应用提供参考.

表 4 IGGtrop 及 EGNOS, UNB3m 3 种对流层延迟模型在中国区域的误差统计(单位: cm)

站点	IGGtrop		EGNOS		UNB3m	
	Bias	RMS	Bias	RMS	Bias	RMS
武汉	-0.3	6.2	1.8	7.2	1.0	6.4
北京	-2.0	5.4	3.9	6.7	2.1	5.4
上海	-0.1	6.4	2.2	7.5	1.1	6.6
昆明	-1.7	3.4	-3.5	6.2	-3.8	6.1
乌鲁木齐	-0.3	3.0	2.6	4.0	1.5	3.2
拉萨	0.4	2.1	-2.0	4.3	-2.1	4.1

致谢 感谢 IGS 数据中心提供的对流层天顶延迟数据和 NOAA 提供的 NCEP 大气资料.

参考文献

1 Collins J P, Langley R B. A tropospheric delay model for the user of the Wide Area Augmentation System. In: Final Contract Report for Nav Canada, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 187, University of New Brunswick, Fredericton, N B, Canada. 1997

2 Collins J P, Langley R B. The Residual Tropospheric Propagation Delay: How Bad Can It Get? In: ION GPS 1998, September 15-18, Nashville, Tennessee, USA, 1998. 729-738

3 曲伟箐, 朱文耀, 宋淑丽, 等. 三种对流层延迟改正模型精度估计. 天文学报, 2008, 49: 113-122

4 RTCA/DO-229C. Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment. SC-169, RTCA, Inc., Washington DC, 2001

5 Dodson A H, Chen W, Baker H C, et al. Assessment of EGNOS tropospheric correction model. In: ION GPS 1999, September 14-17, Nashville, Tennessee, USA, 1999. 1401-1407

6 Penna, N, Dodson A, Chen W. Assessment of EGNOS tropospheric correction model. J Navig, 2001, 54: 37-55

7 Uemo M, Hoshinoo K, Matsunaga K, et al. Assessment of atmospheric delay correction models for the Japanese MSAS. In: ION GPS2001, September 11-14, Salt Lake City, Utah, USA, 2001. 2341-2350

8 Leandro R F, Santos M C, Langley R B. UNB neutral atmosphere models: Development and performance. In: ION NTM 2006, January 18-20, Monterey, California, USA, 2006. 564-573

- 9 Leandro R F, Langley R B, Santos M C. UNB3m_pack: A neutral atmosphere delay package for radiometric space techniques. *GPS Solut*, 2008, 12: 65–70
- 10 Leandro R F, Santos M C, Langley R B. A North America wide area neutral atmosphere model for GNSS applications. *Navigation*, 2009, 56: 57–71
- 11 殷海涛. 基于参考站网络的区域对流层 4D 建模理论、方法及应用研究. 博士学位论文. 成都: 西南交通大学, 2006
- 12 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*, 2007, 32: 454–457
- 13 杨力. 大气对 GPS 测量影响的理论与研究. 博士学位论文. 郑州: 解放军信息工程大学, 2001
- 14 宋淑丽, 朱文耀, 陈钦明, 等. 中国区域对流层延迟改正模型(SHAO)的初步建立. 见: 第一届中国卫星导航学术年会文集. 北京: 中国卫星导航学术年会组委会, 2010
- 15 陈钦明, 宋淑丽, 朱文耀. 全球对流层天顶延迟改正模型(SHAO-G)的初步建立. 见: 第二届中国卫星导航学术年会文集. 上海: 中国卫星导航学术年会组委会, 2011
- 16 Dow J M, Neilan R E, Rizos C. The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems. *J Geodesy*, 2009, 83: 191–198
- 17 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: D09110, doi: 10.1029/2006JD007772
- 18 Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J. NCEP-DEO AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bull Atmos Met Soc*, 2002, 83: 1631–1643
- 19 Thayer G D. An improved equation for the radio refractive index of air. *Radio Sci*, 1974, 9: 803–807
- 20 McCarthy D D, Petit G. IERS Technical Note 32, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, 2004