DOI: 10.12265/j.gnss.2020120701

一种优化的对流层天顶延迟融合模型 FZTD

全雪贞1,张洁1,宋秀容1,杨彬2

(1. 青海省基础测绘院, 西宁 810001;2. 湖南大学电气与信息工程学院, 长沙 410082)

摘 要: 对流层延迟是影响全球卫星导航系统 (GNSS) 定位精度的主要误差源之一, 模型修 正法是目前削弱对流层延迟影响的主要方法. 以简单易用的角度为切入点, 综合 UNB3 模型的 简易性和 GPT2w 模型的高精度特点, 构建一种简易且精度较高的对流层天顶延迟融合模型 (FZTD). 并利用多年的国际 GNSS 服务 (IGS) 对流层天顶延迟 (ZTD) 数据对该模型精度进行了验 证. 结果表明 FZTD 模型的均方根 (RMS) 与平均偏差 (bias) 值分别为 4.4 cm 和-0.3 cm, 均小于传 统模型 UNB3m(RMS: 5.1 cm, bias: 1.1 cm) 和 EGNOS(RMS: 5.1 cm, bias: 0.3 cm), 定位精度提高了 14%, 而且在南半球提高尤为明显, 特别在南极地区, 精度提高了近 3 倍, 弥补了传统模型在南 北半球精度差异大的不足. 新模型总气象参数仅为 120 个比 GPT2w 模型急剧减少, 与传统模型 相当, 为 GNSS 实时导航定位终端的预定义对流层延迟改正提供了更优的选择.

关键词:对流层延迟;GNSS 实时导航定位;UNB3m 模型;GPT2w 模型;精度评价 中图分类号:P228 文献标志码:A 文章编号:1008-9268(2021)03-0061-05

0 引 言

当电磁波穿过大气层时会产生折射延迟,按照折 射介质的不同,主要分为电离层延迟和对流层延迟. 其中电离层延迟可以利用双频观测进行校正,但对于 对流层延迟这一方法并不适用.在天顶方向对流层延 迟约为2m,而在低卫星高度角的情况下延迟值则会 增加到几十米,因此对流层延迟是影响空间大地测量 精度的主要因素之一.

通过建立对流层天顶延迟融合模型 (FZTD)进行延迟改正是目前减弱这一影响的主要方法.而其中 盲模型法由于其无需实测气象参数的输入被广泛应 用于实时的 GNSS 导航定位中.早期的盲模型则是 以 UNB 系列模型为代表^[1-2], Collins 等^[1]首先于 1996 年等提出了 UNB1 模型,该模型将气象参数假 设为常量,并未考虑空间位置和时间变化的影响,其 精度较差为 dm 级.随后引入纬度的变化影响,建立 了 UNB2 模型,但仍未考虑气象参数随时间变化的 影响.1998 年,作者基于美国标准大气 (1996)提出 了 UNB3 模型,其中气象参数的时间变化参考 Niell 映

收稿日期:2020-12-07 资助项目:广西省重点研发计划(桂科 AB18050014) 通信作者:全雪贞 E-mail: xzh_quan@163.com

射函数的表达方式,并以表格的方式表示不同纬度的 气象参数.之后又考虑到直接采用水汽压参数所导致 的相对湿度异常问题,将气象参数表格中的水汽压替 换为相对湿度,建立了 UNB3m 模型,其全球改正精 度约为5 cm. UNB3 系列模型简单易用, 是目前应用 最为广泛的模型之一,但由于其假设气象参数南北半 球对称,导致其在南半球的精度明显低于北半球,到 2000年后,随着大气数值模式的发展,涌现了许多基 于数值模拟再分析资料的对流层延迟盲模型,主要 有: TropGrid 系列模型^[3-4]、GPT 系列模型^[5-8]、IGGtrop 系列模型^[9-10]以及全球天顶对流层延迟 (GZTD)模 型[11-12]. 由于气象参数时空分辨率的提高, 使得这些 模型的精度提高到了4 cm 左右, 但这也直接导致了 气象参数的急剧增加.目前标称精度最高的模型为 GPT2w 模型, 可达 3.6 cm. 因此 GPT 系列模型也是 目前对流层研究领域最为关注的模型.2007年 Bohm^[5] 等利用 ECMWF 资料基于球谐函数提出了面 向大地测量应用的 GPT1 模型, 该模型仅包含全球气 压和温度参数. 之后 Lagler 等¹⁶ 对 GPT1 模型进行了 改进提出了 GPT2 模型,模型不仅增加了比湿、温度

递减率和干湿映射参数,而且引入了气象参数的半年 变化周期,空间分辨率为 5°×5°. Bohm^[7]等则在 GPT2模型的基础上,通过引入新的湿延迟模型,并 增加水汽压递减率和加权平均温度两个参数,提出 了 GPT2w模型,其空间分辨率可达 1°×1°,全球精度 为 3.6 cm,目前最新的 GPT 系列模型版本为 GPT3^[8]. 虽然时空分辨率以及气象参数的增加提高了 GPT 系 列模型的精度,但也使得模型参数的总量急剧增加到 了 270 多万个. 这限制了该系列模型在内存占用要求 较小的 GNSS 终端上的应用.

针对上述问题,本文结合 UNB3 与 GPT2w 模型 各自的优势,提出了一种融合 UNB3 与 GPT2w 模型 的简易且精度较高的 FZTD.并利用多年的国际 GNSS 服务 (IGS) 天顶对流层延迟 (ZTD)数据对该 模型的精度进行了验证,结果表明 FZTD 模型在精度 上优于传统 UNB3m 和 EGNOS 模型,在气象参数数 量上比 GPT2w 模型急剧减少,与传统模型相当,可 作为 GNSS 接收机中预定义的对流层延迟模型.

1 FZTD 模型的构建

考虑到 UNB3 模型表达的简易性以及 GPT2w 模型参数的精确性,本文首先分析在 ZTD 模型的基 础上,从 GPT2w 模型中提取基础模型所需的气象参 数,然后通过分析气象参数的空间分布特征,按照 UNB3 模型的表达方式建立新模型的气象参数查询 表,最后完成 FZTD 模型的构建.

1.1 ZTD 基础模型

ZTD 可分为干延迟 (ZHD) 和湿延迟 (ZWD) 两个部分,其中干延迟计算的采用 Saastamoinen 公式^[13]

ZHD =
$$\frac{0.002\ 276\ 8 \times P_0 \left(1 - \frac{\beta H}{T_0}\right)^{\frac{8m}{\beta R_d}}}{1 - 2.66 \times 10^{-3} \cos\left(2\phi\right) - 2.8 \times 10^{-7} H},$$
 (1)

式中: P_0 为平均海水面处的大气压; H为测站海拔高度; ϕ 为测站 纬度; T_0 为海平面处温度; R_d = 287.054 J·(kg·K)⁻¹为干气气体常数; g_m = 9.806 65 m/s² 为平均重力加速度; β 为温度递减率.

ZWD 计算则采用 Askne & Nordius 公式^[14]

ZWD =
$$10^{-6} (k_2' + k_3/T_m) \frac{R_d e_0 (P/P_0)^{\lambda + 1}}{(\lambda + 1)g_m},$$
 (2)

式中: k'_2 = 16.52 K/mbar、 k_3 = 377 600 K²/mbar均为 经验常数; T_m 加权平均温度; R_d = 287.054 J·(kg·K)⁻¹ 为干气气体常数; λ 为水汽垂直变化指数; g_m = 9.806 65 m/s²为平均重力加速度; e_0 为海平面处的水 汽压; *P*为测站处气压; 可由*P*₀利用压高公式计算得到. **1.2** 气象参数的空间特征分析与建模

根据以上对流层基础模型可以看到,模型计算所 需的气象参数主要包括*P*₀、*T*₀、*e*₀、*β*、*λ*以及*T*_m等 6个参数.本文首先利用 GPT2w 模型计算得到以上 6个参数在 1°×1°网格上 5 年的时间序列.考虑到所 建模型的简易性,我们仅考虑气象参数的年变化规 律,因此我们需要对上述获取的气象参数时间序列做 进一步的拟合处理,具体拟合公式如下:

$$a = a_0 + A\cos\left(\frac{\text{doy} - 28}{365.25}2\pi\right),\tag{3}$$

式中: *a* 为气象参数; *a*₀为气象参数的年均值; *A*为年 变化振幅; doy 为年积日.

经拟合后可得到上述 6个气象参数在全球 1°×1°网格上的年均值以及振幅,在此基础上对气象 参数的空间分布特征进行分析.从大量的前人研究结 果可以知道对流层延迟及其相关气象参数与纬度分 布密切相关,同时考虑到大气压和水汽压分别是 ZHD 和 ZWD 模型中的主要影响因子,因此我们依据大气 压和水汽压在纬度上的变化特征,对气象参数的空间 变化进行线性划分.首先我们获取同一纬度带不同经 度的大气压和水汽压年均值的平均值,然后依据它们 随纬度的变化规律,提取变化的特征点,在此基础上 对各气象参数进行分段线性建模.

图 1 为大气压和水汽压经向均值随纬度的变化 情况.水汽压呈现较为明显的南北对称,但大气压明 显呈现非南北对称,特别是在南纬 65°附近出现了 984 hPa 的最低值,比之北纬 65°处的 1 013 hPa 两者 相差 29 hPa.可见 UNB3 模型中假设气象参数均为南 北对称并不符合真实的大气压分布规律.因此,我们 通过提取以上两个参数随纬度的变化特征点,同时采 用分段线性函数进行建模,在纬度方向上对气象参数 进行了划分,共分为:[-90,-65]、[-65,-30]、[-30,



图 1 大气压和水汽压的纬度分布及其变化特征点提取

-5]、[-5, 5]、[5, 15]、[15, 35]、[35, 60]、[60, 80] 以及 [80, 90] 9个线性区间. 表 1 和表 2 分别为各分段点 的气象参数值年均值和振幅.

表 1 FZTD 模型气象参数年均值

纬度/(°)	P/hPa	e/hPa	<i>T</i> /K	$\beta/(K \cdot km^{-1})$	γ	T_m/K
-90	1 023.2	0.67	224.9	3.74	1.05	232.9
-65	983.8	3.54	267.2	-5.77	2.78	258.5
-31	1 019.7	15.80	292.4	-8.15	3.46	281.4
-5	1 010.7	26.65	299.5	-8.28	2.85	287.3
5	1 010.1	27.42	300.1	-8.40	2.51	286.7
15	1 010.6	23.83	300.4	-7.85	3.12	287.8
35	1 018.9	15.04	293.5	-7.01	3.21	277.5
60	1 012.7	6.83	274.7	-4.30	2.55	264.6
80	1 016.5	3.02	261.6	-0.77	1.92	255.5
90	1 016.8	2.67	259.3	1.15	1.67	254.8

表 2 FZTD 模型气象参数振幅

纬度/(°)	P/hPa	e/hPa	T/K	$\beta/(K \cdot km^{-1})$	γ	T_m/K
-90	-7.7	0.85	22.04	-4.65	1.03	5.8
-65	0.3	1.34	5.85	-2.31	0.23	3.8
-31	-2.5	3.42	3.49	-0.07	-0.2	3.1
-5	-1.1	1.37	0.33	-0.01	-0.2	-0.5
5	-0.7	-0.05	0.21	0.10	0.15	0.7
15	1.8	-3.74	-1.55	0.42	0.5	-0.1
35	3.4	-8.05	-7.15	-0.49	0.05	-7.0
60	1.4	-4.95	-13.58	1.60	-0.3	-10.4
80	2.3	-2.89	-13.30	3.15	-0.5	-10.6
90	3.3	-2.89	-14.71	7.63	-0.9	-10.8

1.3 气象参数的计算方法

利用 FZTD 模型计算对流层天顶延迟首先需要 获得各气象参数值,依据表 1 和表 2 的气象参数年均 值和振幅,任意测站各气象参数经验模型系数可由 式 (4) 计算得到:

$$C_{s} = C_{i} + \frac{C_{i+1} - C_{i}}{L_{i}} (lat_{s} - \phi_{i}),$$

$$C \in \{A_{0}, A_{1}\}, \phi_{i} \leq lat_{s} \leq \phi_{i+1},$$
(4)

式中: C_s 为测站气象模型系数; C_i 为 ϕ_i 处的系数值, 具体值从年均值 A_0 集合和振幅 A_1 集合中获取; $L_i = \phi_{i+1} - \phi_i$ 为测站所在区间长度; lat_s 为测站纬度. 然后

将计算得到的气象模型系数代入到气象参数的年周 期模型中,即可得到该测站处任意时刻的气象参数 值.具体计算方法如下:

$$M_{s}(\text{doy}) = C_{s}^{A_{0}} + C_{s}^{A_{1}}\left(\cos\left(\frac{\text{doy} - 28}{365.25}2\pi\right)\right), \tag{5}$$

式中: M_s 为测站气象参数; doy为年积日; $C_s^{A_0}$ 为年均 值; $C_s^{A_1}$ 为振幅. 利用公式即可计算得到 p_0, T_0, e_0, β 、 $\lambda, T_m 6$ 个气象参数值. 最后将计算得到的气象参数, 作为式 (1) 和式 (2) 的输入参数,可分别计算得到 ZHD 和 ZWD, 两者之和即为总天顶对流层延迟值 ZTD.

2 FZTD 模型精度评价

为了验证 FZTD 模型的精度,我们利用全球 367个国际 GNSS 服务 (IGS) 站点 2011-2015年的 ZTD 数据作为参考值对 FZTD 模型的全球适应性进 行了评价,并与 UNB3m、EGNOS 以及 GPT2w 模型 进行了对比.表3为各模型在全球范围内的均方根 (RMS) 和平均偏差 (bias), 从表 3 可以看到, FZTD 模 型在全球范围内的 RMS 值为 4.4 cm 比 UNB3m 和 EGNOS 模型的 RMS 5.1 cm 提高了 0.7 cm, 精度提 升较为明显, 而且其 bias 为-0.3 cm, 说明该模型存在 低估 ZTD 的现象. FZTD 模型的 bias 绝对值与 EGNOS 相当,但比 UNB3m 模型的 bias 1.1 cm 提高了 0.8 cm. 当然相比于 GPT2w 模型, FZTD 模型在 RMS 和 bias 绝对值两个方面均较大,这主要是由于 FZTD 模型的 输入气象参数是源于对 GPT2w 模型数据的简化, 仅 考虑了参数的纬度和年变化,而 GPT2w 模型不仅空 间分辨率可达 1°×1°, 而且更是考虑了气象参数的半 年变化.但 FZTD 模型的参数数量仅为 120 个,比之 GPT2w 模型的 270 多万个,所需存储空间急剧减少, 更适用于嵌入式 GNSS 的实时导航定位应用.

表 3 FZTD、UNB3m、EGNOS 和 GPT2w 模型的 误差统计

cm

模型	RMS	bias
FZTD	4.4 [2.1 8.9]	-0.3 [-8.3 8]
UNB3m	5.1 [1.9 12.4]	1.1 [-9.3 11.5]
EGNOS	5.1 [1.7 11.9]	0.3 [-11.4 10.5]
GPT2w	3.4 [1.5 9.8]	0 [-2.2 8.9]

注:"[]"内的数值表示最小值与最大值.

图 2 和图 3 分别示出了 FZTD、UNB3m、EGNOS 和 GPT2w 四个模型 RMS 和 bias 值的全球分布情况,我们可以看到,FZTD 模型呈现在热带地区多为低估,其他地区多为高估的现象,较大 bias 值多出现

cm

在海陆交界处.由于采用了相同的气象参数查询表, UNB3m 与 EGNOS 模型的全球分布较为相似,在南 半球的高估现象异常明显,别特是在南极地区最大偏 差可达 11.4 cm.这主要是由于气象参数南北对称的 假设所导致的.GPT2w 模型的 bias 值在全球范围内 变化较为平缓,且多数值接近于 0,在所有模型中表 现最佳.在 RMS 值方面,FZTD 模型整体呈现从赤道 向两极递减的趋势,而 UNB3m 与 EGNOS 两模型则 呈现从北极向南极波动的变化趋势,在南极地区 RMS 值达到最大.GPT2w 模型的 RMS 值在全球范 围分布较为一致,其较大值多出现东南亚地区,这说 明在该地区 GPT2w 模型还需进一步细化.



图 2 FZTD、UNB3m、EGNOS 以及 GPT2w 模型 bias 值的全球分布



为了进一步验证 FZTD 模型的改正效果,我们统 计分析了不同纬度带各模型的 RMS 与 bias 值,具体 分析结果可如表 4 所示.从表中可以看到 FZTD 模型 精度在北半球高纬度地区略低于 UNB3m 模型,但高 于 EGNOS 模型.而在赤道附近 FZTD 模型与 UNB3m 模型精度相当,但高于 EGNOS 模型.在北纬 15°~ 60°以及南纬 30°~90°地区,FZTD 模型比之 UNB3m 与 EGNOS 模型有较为明显地提高,特别是的南极地 区精度更是提高了 3 倍多,且精度与 GPT2w 模型相 当,这说明 FZTD 模型更适合于在南极地区的应用.

表 4 FZTD、UNB3m、EGNOS 以及 GPT2w 模型在 不同纬度带下的 RMS 与 bias 统计

纬度	测站数	FZTD		UNB3m		EGNOS		GPT2w	
范围/(°)		RMS	bias	RMS	bias	RMS	bias	RMS	bias
[60,90)	29	3.3	0.7	3.1	0	3.4	-0.4	2.8	0.2
[35,60)	158	3.7	0	4.0	-0.4	4.3	-0.9	3.2	0.2
[15,35)	66	5.8	1.0	6.8	3.9	6.4	2.8	3.7	-0.1
[5,15)	15	5.9	-3.7	5.9	-1.2	6.6	-3.3	3.9	-0.6
[-5,5)	15	4.5	-2.5	4.5	-1.8	5.4	-3.7	2.7	-0.3
[-30,-5)	45	6.3	-2.5	6.3	1.4	6.3	-0.3	4.3	-0.3
[-65,-30)	38	3.5	-0.5	5.3	3.5	4.9	2.9	3.2	0.1
[-90,-65)	15	2.8	0.9	9.5	8.8	9.2	8.4	2.4	-0.2

3 结 论

本文基于 UNB3 模型中以查询表方式描述全球 气象参数分布规律的思想,对 GPT2w 模型参数进行 了简化,构建了 FZTD 模型.并通过 IGS 站提供的 ZTD 数据对 FZTD 模型在全球范围内的适用性进行 了评价,结果表明,该模型的全球改正精度优于传统 UNB3m 和 EGNOS 模型.特别是在南半球区域精度 改善尤为明显,在南极地区提高了近 70%.虽然该模 型整体精度不如 GPT2w 模型,但其所需气象参数少 和 UNB3m 和 EGNOS 模型处于一个量级,在 GNSS 实时导航定位领域具有更为广阔的应用前景,可以作 为一种预定义对流层延迟模型嵌入到 GNSS 接收机中.

参考文献

- [1] COLLINS J P, LANGLEY R B. A tropospheric delay model for the user of the wide area augmentation system[R/OL]. (1996-10-01)[2020-11-29].http://gauss.gge.unb.ca/papers.pdf/ waas.tropo.oct96.pdf
- [2] LEANDRO R, SANTOS M, LANGLE R B. UNB neutral atmosphere models, development and performance[C/OL]// Proceedings ION NTM 2006, Institute of Navigation, Monterey, California, 2006:564-573. https://www.docin.com/p-905444279.html
- [3] KRUEGER E, SCHUELER T, ARBESSER-RASTBURG B. The standard tropospheric correction model for the european satellite navigation system Galileo[C/OL]// The XXVIIIth General Assembly of the International Union of Radio Science (URSI), New Delhi, India, 2005. http://citeseerx.ist.psu. edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.532.9026&rep=rep1&typ e=pdf
- [4] SCHULER T. The TropGrid2 standard tropospheric

correction model[J]. GPS solut, 2014, 18(1): 123-131. DOI: 10.1007/s10291-013-0316-x

- [5] BOHM J, HEINKELMANN R, SCHUH H. Short note: a global model of pressure and temperature for geodetic applications[J]. Journal of geodesy, 2007, 81(10): 679-683. DOI: 10.1007/s00190-007-0135-3
- [6] 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): 1069-1073. DOI: 10.1002/grl.50288
- [7] BOHM J, MOLLER G, SCHINDELEGGER M, et al. Development of an improved empirical model for slant delays in the troposphere (GPT2w)[J]. GPS solut. 2015(19): 433-441.DOI: 10.1007/s10291-014-0403-7
- [8] LANDSKRON D, BÖHM J. VMF3/GPT3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions[J]. Journal of geodesy, 2017, 92(4): 349-360. DOI: 10.1007/s00190-017-1066-2
- [9] 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[J]. 科学通报, 2012, 57(15): 1317-1325.
- [10] LI W, YUAN Y B, OU J K, et al. New versions of the BDS/GNSS zenith tropospheric delay model IGGtrop[J]. Journal of geodesy, 2015, 89(1): 73-80. DOI: 10.1007/

s00190-014-0761-5

- [11] 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[J].地球物理学报,2013,56(7):2218-2227.
- [12] YAO Y B, HU Y F, YU C, et al. An improved global zenith tropospheric delay model GZTD2 considering diurnal variations[J]. Nonlinear processes in geophysics, 2016, 23(3): 127-136. DOI: 10.5194/npg-23-127-2016
- SAASTAMOINEN J. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites[M]. The use of Artificial Satellites for Geodesy. Geophys, 1972, 15: 274–251.DOI: 10.1029/GM015p0247
- [14] ASHNE J, NORDIUS H. Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data[J]. Radio science, 1987, 22(3): 379-386.

作者简介

全雪贞 (1984—), 女, 工程师, 主要从事航空 摄影测量、遥感影像及 GNSS 数据处理.

张洁 (1981—),女,工程师,主要从事大地基 准、高程基准.

宋秀容 (1984—),女,工程师,主要从事遥感 影像、地籍测量.

A optimized fusion zenith tropospheric delay model-FZTD

QUAN Xuezhen¹, ZHANG Jie¹, SONG Xiurong¹, YANG Bin²

(1. Qinghai Basic Surveying and Mapping Institute, Xining 810001, China;

2. School of electrical and information engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Tropospheric delay is one of the main error sources that affect the accuracy of Global Navigation Satellite System (GNSS) navigation and positioning. One effective way to weaken the influence of tropospheric delay is the model correction method. This paper has proposed a simple and accurate fusion tropospheric delay model (FZTD) by combining the simplicity of the UNB3 model and the high-precision characteristics of the GPT2w model. The accuracy of the purposed model was verified by using the International GNSS Service (IGS) troposphere zenith delay (ZTD) data over 2011—2015. The results show that root mean square (RMS) and bias values of the FZTD model are 4.4 cm and -0.3 cm, respectively, which are smaller than the traditional models UNB3m (RMS: 5.1 cm, bias: 1.1 cm) and EGNOS (RMS: 5.1 cm, bias: 0.3 cm). Its global accuracy has increased by 14%, and the improvement is particularly obvious in the southern hemisphere, especially in the Antarctic region, the accuracy has increased by nearly 3 times. The FZTD model makes up for the shortcomings of the traditional models that there are large differences in accuracy between the northern and southern hemispheres. The total meteorological parameters of the new model are only 120, which are drastically reduced compared to the GPT2w model, which makes it possible to be hardwired in the GNSS receivers.

Keywords: tropospheric delay; real-time GNSS application; UNB3m model; GPT2w model; accuracy validation