DOI:10.14075/j.jgg.2024.12.578

文章编号:1671-5942(2025)12-1211-04

一种顾及递减因子时空因素的中国区域精细分层 ZTD 模型

祝会忠[1]　刘广盛[1]　高　祥[2]　陈少妮[1]
杨添宇[1]　王帅民[3]　李　耸[4]　蒋春华[1]

1　辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院,辽宁省阜新市玉龙路 88 号,123000
2　长安大学地质工程与测绘学院,西安市雁塔路 126 号,710054
3　河北工程大学矿业与测绘工程学院,河北省邯郸市太极路 19 号,056038
4　山东大学空间科学研究院,山东省威海市文化西路 180 号,264209

摘　要:为提高 ZTD 垂直外推精度,提出一种中国区域精细分层的 ZTD(zenith tropospheric delay fine-scale stratification, ZTDFS)垂直改正模型,该模型在 10 km 以下精细分层并顾及每层季节和日内变化特征,同时充分考虑了三阶指数函数的递减因子的时空变化特征。探空数据结果显示,ZTDFS 模型的 RMSE 均值为 31.43 mm,较 GPT3 模型精度提升 36.6%。GNSS ZTD 数据评估结果表明,在 500 m 以上,ZTDFS 模型的 RMSE 均值为 28.64 mm,较 GPT3 性能提升 9%。随着高度的上升,ZTDFS 模型的性能优势逐渐显现。

关键词:精细分层;ZTD;递减因子;ERA5;探空站;GNSS

中图分类号:P228　　**文献标识码**:A

天顶对流层延迟(ZTD)是卫星信号在中性大气层中的总延迟,直接影响 GNSS 精密定轨定位的精度[1]。精确的 ZTD 对于提高精密单点定位(PPP)的性能至关重要,特别是在垂直方向和收敛时间估计方面。对流层延迟模型作为估算 ZTD 的主要方法,广泛应用于定位、气象、灾害等领域。因此,精确的 ZTD 模型在空间大地测量和大气科学研究方面具有重要意义[2]。

早期的对流层延迟模型,如 Saastamoinen、Black 等模型依赖于温度、气压等观测变量,这会限制其适用性[3-4]。针对该问题,部分学者提出无气象观测变量的 ZTD 模型,如 UNB、GPT 等,这些模型通过内插或外推方法获取所需的气象变量,结合物理模型计算对流层延迟[5-6]。随着多源气象数据同化能力的提高,越来越多的高精度数值天气数据被用于构建优化的 ZTD 模型。

李薇等[7]利用美国国家环境预报中心的数据,建立考虑了对流层延迟随经纬度变化的 IGGtrop 模型,精度约为4.0 cm。Yao 等[8]结合球面谐波函数和指数函数,同时考虑对流层延迟的日变化建立 GZTD2 模型,其 RMSE 为 3.9 cm,较 GZTD 模型提高 3 mm。谐波函数等模型可以捕捉对流层的周期性变化特征,但在准确反映对流层的垂直变化方面存在局限性。为此,Zhu 等[9]基于 ERA5 数据构建全球尺度的 ZTD 分段模型 GZTD-P,与 GPT3 模型相比,精度提高0.96 cm。Huang 等[10]考虑 ZTD 垂直递减率建立 GGZTD-H 模型,精度约为 4.11 cm。

上述模型虽能在一定程度上提升 ZTD 垂直拟合精度,但在大高度外推和复杂时空变化下仍存在误差积累的问题。为进一步提升 ZTD 垂直改正精度,本文提出一种中国区域精细分层的对流层延迟模型 ZTDFS。该模型在垂直方向上精细分层,并引入三阶指数函数表征垂向变化特征,同时还考虑了 ZTD 及递减因子的时空变化特征,以精准刻画 ZTD 垂直结构。新模型基于 ERA5 格网数据构建,并利用探空和 GNSS 数据进行精度验证。

1　数据和方法

1.1　数据介绍

利用 2016—2019 年 ERA5 气压层的温度、

收稿日期:2024-12-23
项目来源:国家自然科学基金(42074012, 42030109, 41904037);辽宁省振兴人才计划(XLYC2203162);河北省自然科学基金(D2023402024);辽宁省自然科学基金(20240347, 20240336, 20240350)。
第一作者简介:祝会忠,博士,教授,主要研究方向为高精度 GNSS 定位,E-mail: zhuhuizhong@lntu.edu.cn。

气压、比湿和位势高参数构建 ZTDFS 模型，并使用全球综合无线电探空档案库（IGRA）提供的 2020 年中国及周边区域 92 个无线电探空站数据（https://www.ncei.noaa.gov）和 2015 年 202 个中国大陆构造环境监测网络 GNSS 观测数据验证新模型的精度。

1.2 ZTD 计算方法

ZTD 可通过积分方法确定，表达式为：

$$N = K_1 \frac{(P-e)}{T} + K_2 \frac{e}{T} + K_3 \frac{e}{T^2} \tag{1}$$

$$e = \frac{\mathrm{Sh} \cdot P}{0.622} \tag{2}$$

$$\mathrm{ZTD} = 10^{-6} \int_{H_0}^{H^{\mathrm{top}}} N \mathrm{d}h \tag{3}$$

式中，N 为总大气折射率；T 为温度；e 为水汽压；P 为气压；Sh 为比湿；H_0、H^{top} 分别为剖面底和剖面顶的高度；h 为高度；K_1、K_2、K_3 为常数系数，分别为 77.604 K/hPa、64.79 K/hPa、375 463 $\mathrm{K^2/hPa}$。

2 ZTDFS 模型构建

本研究将 0～10 km 的 ZTD 垂直空间细化为 10 层，间隔 1 km，利用式(4)表征每个垂直层内各 1°×1°格网点的年变化、半年变化和日变化；利用式(5)所示三阶指数函数拟合垂直 ZTD 剖面[11]；利用式(6)对 ZTD 递减因子的年度和半年周期项建立分辨率为 1°×1°的格网模型。综合式(4)～(6)，即可得到中国区域 ZTD 垂直改正模型 ZTDFS：

$$\begin{aligned}\mathrm{ZTD}_h^k = {} & a_0^k + a_1^k \cos\left(\frac{2\pi \mathrm{DOY}}{365.25}\right) + a_2^k \sin\left(\frac{2\pi \mathrm{DOY}}{365.25}\right) + \\ & a_3^k \cos\left(\frac{4\pi \mathrm{DOY}}{365.25}\right) + a_4^k \sin\left(\frac{4\pi \mathrm{DOY}}{365.25}\right) + \\ & a_5^k \cos\left(\frac{2\pi \mathrm{HOD}}{24}\right) + a_6^k \sin\left(\frac{2\pi \mathrm{HOD}}{24}\right), \\ & k = 0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10\end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}\mathrm{ZTD}_t = {} & \mathrm{ZTD}_r \cdot \exp[\beta_1 (h_t - h_r) + \\ & \beta_2 (h_t^2 - h_r^2) + \beta_3 (h_t^3 - h_r^3)]\end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}\beta_i = {} & A_0^i + \sum_{n=1}^{2} \left[A_n^i \sin\left(\frac{2\pi n \mathrm{DOY}}{365.25}\right) + \right. \\ & \left. B_n^i \cos\left(\frac{2\pi n \mathrm{DOY}}{365.25}\right)\right], \ i = 1,2,3\end{aligned} \tag{6}$$

式中，a_0^k 为第 k 层 ZTD 的年均值；a_1^k、a_2^k、a_3^k、a_4^k、a_5^k 和 a_6^k 分别为季节和日间周期项系数；ZTD_t 和 ZTD_r 分别为目标高度 h_t 和参考高度 h_r 处的 ZTD 值；β_1、β_2、β_3 分别为 ZTD 的 1～3 阶递减因子；A_0^i、A_n^i、B_n^i 分别为 ZTD 递减率的年均值、年和半年振幅项；HOD 和 DOY 分别为 1 d 中的小时和年积日。

在使用模型时，输入经纬度、海拔、DOY 和 HOD，然后确定目标高度处 4 个最近模型网格点的 ZTD 值，最后采用双线性插值法计算目标位置的 ZTD。

3 精度验证与分析

使用 bias 和 RMSE 评价新模型的准确率。

3.1 基于探空数据的验证

以 2020 年中国及周边区域探空站剖面数据为参考值，分别利用 ZTDFS 和 GPT3 模型计算探空站剖面上所有点的 ZTD 并作差，统计结果见表 1。

表 1 ZTDFS 和 GPT3 ZTD 与探空 ZTD 的 bias 和 RMSE 统计

Tab. 1 Statistics of bias and RMSE of ZTDFS and GPT3 ZTD with radiosonde ZTD

模型	bias/mm			RMSE/mm		
	最小值	最大值	均值	最小值	最大值	均值
ZTDFS	−70.25	9.58	−3.00	13.05	96.63	31.43
GPT3	−44.20	46.51	24.00	19.21	84.56	49.54

表 1 中 ZTDFS 模型的 bias 和 RMSE 的均值分别为 −3.00 mm 和 31.43 mm，GPT3 模型的 bias 和 RMSE 的均值分别为 24.00 mm 和 49.54 mm。ZTDFS 模型的 RMSE 均值比 GPT3 模型小 18.11 mm，表明其整体精度较 GPT3 提高 36.6%。ZTDFS 模型进行了精细分层并将垂直外推高度控制在 1 km 以内，能有效降低误差积累，同时采用三阶指数函数提高 ZTD 的垂直拟合精度，引入周期性递减因子增强季节适应性，从而提升了 ZTD 整体估计精度。

从图 1(a)和 1(b)可以看出，GPT3 模型的 bias 表现为明显的正偏差，而 ZTDFS 模型的 bias 更小，且大部分接近于 0，说明 ZTDFS 模型能更好地捕捉 ZTD 的时空变化特征。由图 1(c)和 1(d)可知，ZTDFS 模型在中国及周边区域具有较小的 RMSE 值，尤其在中国西北青藏高原和黄土高原等高海拔区域，复杂的地形和显著的时空变化特征更加突显了垂直分层和递减因子优化对提高 ZTD 计算精度的重要作用。

从图 2(a)可以看出，GPT3 模型在 2 km 以下呈现正偏差，在 2 km 以上呈现负偏差，且负偏差随高度不断增大。而 ZTDFS 模型在各高度区间均呈现较小的正偏差，这可能与 ZTDFS 模型垂向上各层的外推距离均在 1 km 以内有关，保证了垂直外推的稳定性。由图 2(b)可知，ZTDFS 模型的RMSE值随着海拔升高保持在较小的范围

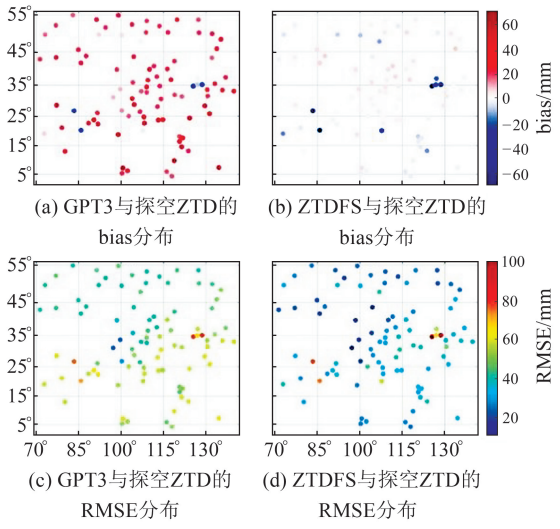


图 1　ZTDFS 和 GPT3 ZTD 与探空 ZTD 的 RMSE 和 bias 分布

Fig. 1　Distribution of RMSE and bias of ZTDFS and GPT3 ZTD with radiosonde ZTD

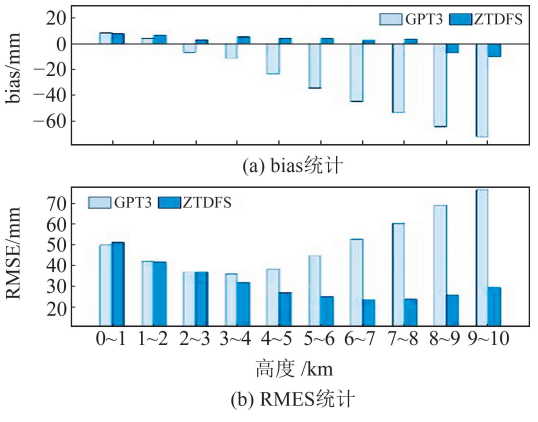


图 2　ZTDFS 和 GPT3 模型在不同高度区间内 ZTD 与探空 ZTD 的 RMSE 和 bias 统计

Fig. 2　Statistics of RMSE and bias of ZTDFS and GPT3 ZTD with radiosonde ZTD in different height interval

内且有减小的趋势,这进一步验证了 ZTDFS 模型在高海拔地形复杂地区的精度和稳定性优势。

3.2　基于 GNSS ZTD 的验证

本文进一步利用 2015 年中国区域 202 个 GNSS 观测站的 ZTD 数据,评估 ZTDFS 和 GPT3 模型的 ZTD 精度,并从高度和分布特征 2 个方面进行详细分析。从表 2 可以看出,500 m 以下 ZTDFS 与 GPT3 模型的 bias 均值呈现较小负值,RMSE 均值相当,ZTDFS 模型精度提升优势不明显。500 m 以上区间共有 139 个站点,数量占比 69%,该高度区间内 ZTDFS 与 GPT3 模型的 RMSE 均值分别为 28.64 mm 和 31.49 mm,RMSE 均值减小 2.85 mm,性能提升 9%,并且随着高度的上升,ZTDFS 模型的优势愈加明显。

从图3(a)和3(b)可以看出,ZTDFS模型的

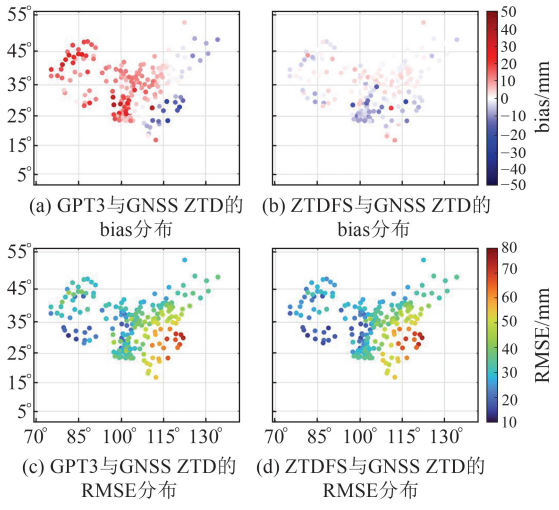


图 3　ZTDFS 和 GPT3 ZTD 与 GNSS ZTD 的 RMSE 和 bias 分布

Fig. 3　Distribution of RMSE and bias of ZTDFS and GPT3 ZTD with GNSS ZTD

表 2　ZTDFS 和 GPT3 模型不同高度区间内 ZTD 与 GNSS ZTD 的 bias 和 RMSE 统计

Tab. 2　Statistics of bias and RMSE of ZTDFS and GPT3 ZTD with GNSS ZTD in different height interval

模型	高度	bias/mm			RMSE/mm		
		最小值	最大值	均值	最小值	最大值	均值
ZTDFS	500 m 以下	−21.66	18.89	−0.35	20.37	66.42	48.56
GPT3	500m 以下	−25.08	37.93	−1.30	21.08	66.84	48.70
ZTDFS	500m 以上	−18.28	9.18	−1.89	14.34	50.02	28.64
GPT3	500m 以上	−7.58	38.16	11.37	11.36	50.25	31.49

bias 更小,说明 ZTDFS 模型的系统性偏差更小。相比于 GPT3,在天山山脉和喜马拉雅山脉区域,ZTDFS 模型的 bias 减小程度更加明显。进一步对比图 3(c)和 3(d)可知,在中国西北高海拔区域,ZTDFS 模型的 RMSE 明显小于 GPT3,进一步证实了 ZTDFS 模型在高海拔地区具有优越的垂直外推性能。这主要是因为 ZTDFS 模型在垂直方向上进行了精细分层,并考虑了三阶指数递减率的周期变化特征,能够准确捕捉 ZTD 的垂直变化特征,提高模型在高海拔地区的预测精度。

4　结　语

本文提出一种中国区域精细分层的 ZTD 垂直改正模型 ZTDFS。探空站数据评估结果表明,ZTDFS 模型的 bias 和 RMSE 均值分别为−3.00 mm 和31.43 mm,较 GPT3 模型精度提升36.6%。此

外,ZTDFS 模型的 RMSE 值随着海拔升高呈现减小趋势,进一步验证了其在西北高海拔地区的精度和稳定性优势。GNSS ZTD 评估结果表明,在 500 m 以上高度区间(占站点数量的 69%),ZTDFS 模型的 RMSE 值较 GPT3 模型减少 2.85 mm,性能提升 9%,且随着高度的上升,ZTDFS 模型的性能优势逐渐显现,尤其在中国西北的高海拔区域。ZTDFS 模型垂直方向的精细分层及对三阶指数递减率年变化和半年变化特征的充分考虑,增强了模型对 ZTD 垂直变化特征的捕捉能力,显著提升了其在高海拔地区的预测精度。

参考文献

[1] Xu G C, Xu Y. GPS: Theory, Algorithms and Applications[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2016

[2] Zhang Z Y, Lou Y D, Zhang W X, et al. Dynamic Stochastic Model for Estimating GNSS Tropospheric Delays from Air-Borne Platforms[J]. GPS Solutions, 2023, 27

[3] Saastamoinen J. Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging Satellites[M]// Henriksen S W, Mancini A, Chovitz B H. The Use of Artificial Satellites for Geodesy. Washington: American Geophysical Union, 1972

[4] Black H D. An Easily Implemented Algorithm for the Tropospheric Range Correction[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1978, 83(B4): 1825-1828

[5] Leandro R, Santos M, Langley R. UNB Neutral Atmosphere Models: Development and Performance[C]. Proceedings of ION NTM, Monterey, 2006

[6] Landskron D, Böhm J. VMF3/GPT3:Refined Discrete and Empirical Troposphere Mapping Functions[J]. Journal of Geodesy, 2018, 92:349-360

[7] 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 (Li Wei, Yuan Yunbin, Ou Jikun, et al. A New Global Zenith Tropospheric Delay Model IGGtrop for GNSS Applications[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(15):1317-1325

[8] 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

[9] Zhu G, Huang L K, Yang Y Z, et al. Refining the ERA5-Based Global Model for Vertical Adjustment of Zenith Tropospheric Delay[J]. Satellite Navigation, 2022, 3(1)

[10] Huang L K, Zhu G, Peng H, et al. An Improved Global Grid Model for Calibrating Zenith Tropospheric Delay for GNSS Applications[J]. GPS Solutions, 2023, 27(1)

[11] Jiang C H, Gao X, Zhu H Z, et al. An Improved Global Pressure and Zenith Wet Delay Model with Optimized Vertical Correction Considering the Spatiotemporal Variability in Multiple Height-Scale Factors[J]. Geoscientific Model Development, 2024, 17(15): 5939-5959

A Fine-Scale Stratification ZTD Model Considering the Spatiotemporal Factors of Lapse Rate in China

ZHU Huizhong[1] *LIU Guangsheng*[1] *GAO Xiang*[2] *CHEN Shaoni*[1]
YANG Tianyu[1] *WANG Shuaimin*[3] *LI Song*[4] *JIANG Chunhua*[1]

1 School of Geomatics, Liaoning Technical University, 88 Yulong Road, Fuxin 123000, China

2 Schoo of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, 126 Yanta Road, Xi'an 710054, China

3 School of Mining and Geomatics Engineering, Hebei University of Engineering, 19 Taiji Road, Handan 056038, China

4 Institute of Space Science, Shandong University, 180 West-Wenhua Road, Weihai 264209, China

Abstract: In order to improve the accuracy of ZTD model, a fine-scale stratification ZTD (ZTDFS) model in China is proposed. The new model is finely stratified below 10 km and takes into account the seasonal and daily variation characteristics of each layer. At the same time, the model also fully considers the spatiotemporal variation of the vertical lapse rate of third-order exponential function. The radiosonde data shows that the mean RMSE of ZTDFS model is 31.43 mm, which is 36.6% smaller than that of GPT3 model. The GNSS ZTD data shows that above 500 m, the mean RMSE of ZTDFS model is 28.64 mm, which is improved by 9% compared to GPT3. With the increase in altitude, the performance advantage of ZTDFS model gradually emerges.

Key words: fine-scale stratification; ZTD; lapse rate; ERA5; radiosonde; GNSS

Foundation support: National Natural Science Foundation of China, No. 42074012, 42030109, 41904037; Liaoning Revitalization Talents Program, No. XLYC2203162; Natural Science Foundation of Hebei Province, No. D2023402024; Natural Science Foundation of Liaoning Province, No. 20240347, 20240336, 20240350.

About the first author: ZHU Huizhong, PhD, professor, majors in high-precision GNSS positioning, E-mail: zhuhuizhong@lntu.edu.cn.