

引用格式:郭宝,雷辉,杨旭海,等.四种对流层延迟修正模型精度及适用性分析[J].时间频率学报,2025,48(3):242-251.

四种对流层延迟修正模型精度及适用性分析

郭宝^{1,2}, 雷辉^{1,†}, 杨旭海^{1,3}, 张泽文^{1,2}, 彭鹏⁴

1.中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;
2.中国科学院大学, 北京 100049;
3.中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 100049;
4.合肥工业大学 土木与水利工程学院, 合肥 230002

摘要:为了评估当前常用对流层延迟修正模型的性能,选取 SAASTAMOINEN、BLACK、EGNOS 及 GPT2w 4 种模型进行了详细分析。由低到高选择了 6 个不同纬度的测站,通过比较模型气象数据与实际气象数据来评估修正效果。研究首先使用 4 种非实测气象参数模型方案(EGNOS、GPT2w、GPT2w+ SAASTAMOINEN 及 GPT2w+ BLACK)修正对流层延迟。随后,利用 2020 年 IGS(International GNSS Service)的实际气象数据,对 6 个测站分别应用 SAASTAMOINEN 和 BLACK 模型进行修正,并以 2020 年 IGS 天顶对流层延迟(zenith tropospheric delay, ZTD)作为真实值进行对比。根据均方根误差(RMSE)和平均绝对百分比误差(MAPE)两个精度指标,分析评估各模型在选定的 6 个测站中的修正效果,结果表明:EGNOS 模型在中高纬度地区表现出较高的修正精度且计算简便,但在低纬度地区的表现较差;GPT2w 模型提供了修正精度,但其建立过程复杂,且上述两种基于非实测数据的模型无法有效反映 ZTD 的短期快速变化;实测气象数据能够准确反映 ZTD 的短期变化且精度较高,但数据获取难度相较于模型数据更高且容易缺失。这些发现为对流层延迟修正模型的选择和应用提供了重要参考。

关键词:对流层延迟;实测参数修正模型;非实测参数修正模型;气象数据;精度指标

DOI:10.13875/j.issn.1674-0637.2025-03-0242-10

Analysis of accuracy and applicability of four tropospheric delay correction models

GUO Bao^{1,2}, LEI Hui^{1,†}, YANG Xu-hai^{1,3}, ZHANG Ze-wen^{1,2}, PENG Peng⁴

1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
4. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230002, China

Abstract: To evaluate the performance of commonly used tropospheric delay correction models, a detailed analysis was conducted on four models: SAASTAMOINEN, BLACK, EGNOS, and GPT2w. Six stations, representing a range of latitudes from low to high, were selected to assess correction efficacy by comparing model-based meteorological data with actual meteorological data. Initially, four correction

strategies utilizing unmeasured meteorological parameters were applied (EGNOS, GPT2w, GPT2w + SAASTAMOINEN, and GPT2w + BLACK). Subsequently, actual meteorological data from the 2020 IGS (International GNSS Service) was used to apply the SAASTAMOINEN and BLACK models to the six stations, with the 2020 IGS zenith tropospheric delay (ZTD) serving as the reference true value. Based on two accuracy indicators, namely the root mean square error (RMSE) and the mean absolute percentage error (MAPE), the correction effects of various models at the selected six measurement stations were analyzed and evaluated. The results show that: The EGNOS model demonstrated high accuracy and ease of use at mid- to high-latitudes, but showed lower performance at low latitudes. The GPT2w model achieved the higher correction accuracy, though its complexity is a notable drawback, and the above two models based on non-measured data were insufficient for capturing short-term rapid changes in ZTD. But actual meteorological data accurately reflects short-term ZTD variations and offers high precision, data acquisition is more difficult than model data and is prone to missing. These findings provide valuable insights for selecting and applying tropospheric delay correction models.

Keywords: tropospheric delay; measured parameter correction model; non-measured parameter correction model; meteorological data; accuracy indicators

在空间大地测量技术中,卫星信号在穿越距离地面50 km以内的中性大气层时,由于大气效应会发生折射,从而产生对流层延迟^[1]。这一延迟是现代空间大地测量技术中的一个重要误差源^[2]。随着空间大地测量技术的不断发展,对卫星导航、定位、轨道确定和授时等功能的精度要求也越来越高。因此,如何以简便且高精度的方式进行对流层延迟修正变得尤为重要。

卫星精密轨道测定技术,作为空间大地测量技术的关键组成部分,对对流层延迟修正有着较高的精度要求。对流层作为一种非弥散介质,其信号传播与折射率和传播路径有关^[3]。在卫星轨道测定过程中,需要通过计算天顶对流层延迟及其映射函数来对测站的对流层延迟进行修正^[4],从而提高卫星轨道测定的精度。有学者利用高精度对流层产品应用于高精度轨道测定中,结果表明重叠弧段的轨道差可以降低4~13 cm^[5]。在卫星轨道测定过程中,修正对流层延迟在一定程度上可以提高轨道计算精度,因此对操作简单同时具备较高修正精度的对流层修正方法开展研究对于卫星精密轨道测定领域具有重要意义。

当前常用的对流层延迟修正方法包括外部修正、参数估计以及模型修正^[6]。为了简便又精准地对对流层延迟进行修正,准确地计算出天顶对流层延迟,本文研究了目前常用于卫星轨道精密测定技术的几种对流层延迟修正模型;模型修正可以根据是否需要实测气象数据分为两类:需要实测气象参数的模型,如HOPFIELD、SAASTAMOINEN和

BLACK模型;以及无需实测气象参数的模型,如新布伦瑞克大学(University of New Brunswick, UNB)提出的UNB系列模型、全球气压和温度(GPT)系列模型和欧洲地球静止导航重叠服务(EGNOS)模型^[7]。

不同的修正模型具有不同的特点和适用性。国内有学者分析了不同气候类型下的对流层模型修正效果,结果表明SAASTAMONIEN在高压低温低湿环境下表现优异,而在低压高温高湿环境下UNB3模型效果更优^[8]。也有学者针对不同模型的具体修正效果进行分析讨论,结果表明BLACK模型的精度最高,SAASTAMONIEN模型次之,HOPFIELD模型最差^[7]。但是目前分析比对实测气象参数修正模型与经验修正模型对天顶对流层总延迟修正效果的综合研究还较为稀少。本文是对实测和非实测气象参数修正模型之间的修正精度及适用性进行综合分析探讨,选取了两个需要实测气象数据的模型(SAASTAMONIEN和BLACK)以及两个无需实测气象数据的模型(EGNOS和GPT2w),对这些模型在不同纬度测站的修正精度进行了研究,并分析了它们的适用性,后续可以直接结合卫星相关参数,引入实际映射模型,对测站与卫星之间的实际对流层延迟进行精密修正,从而满足实际卫星定轨精度要求。

1 模型概述

1.1 气象参数

对流层延迟修正所用到的气象参数包括气压、

温度以及湿度,再根据这些气象参数通过模型进行计算模拟得出天顶对流层延迟;而非实测数据对流层修正模型可以通过内插表或者格网模型直接得到相关气象参数进行对流层修正。

气象参数获取的手段可以分为直接测量和间接测量,例如温度计、湿度计等为直接测量手段,而以遥感为基础的气象雷达、气象卫星等测量方式则为间接测量,可以获取全球范围内的气象数据^[3]。下文将针对对流层延迟修正所用到的气象参数进行简要概述。

气压指的是单位面积上所承受的大气压力,单位为帕斯卡(Pa),一般随着高度的升高呈指数降低^[9],气压随高度变化公式为

$$P_h = P_0 \cdot e^{\frac{h-h_s}{h_s}} \quad (1)$$

式(1)中: P_h 为对应高度 h 的气压值, P_0 为 h_s 高度下的初始气压值, h_s 为气压标高。

气温是表示空气冷热程度的物理量,单位为摄氏度(°C)或者开尔文(K),气温会随时间变化,一般来说短期内温度变化比较平缓,但是具有明显的半年周期变化和年周期变化,与日照、降水、地区等因素有关。在对流层延迟修正过程中,开氏温度的应用较为广泛,因此一般需要将摄氏温度转换为开式温度,转换公式为

$$K = ^\circ\text{C} + 273.15 \quad (2)$$

湿度是指空气中水蒸气的含量,分为相对湿度和绝对湿度,对流层模型所需实测气象数据一般采用的是相对湿度,根据相对湿度计算水汽压用于模型修正;空气中的水汽含量变化较快,且分布不均,会随海拔的增加而逐渐减少;根据相对湿度计算水汽压的计算公式为

$$e = 6.11 \times 10^{\frac{7.5T}{T+273.15}} \times h_r \quad (3)$$

式(3)中: e 为水汽压, T 为温度(°C), h_r 为相对湿度。

1.2 对流层修正模型

1.2.1 SAASTAMOINEN 模型

HOPFIELD 模型是 1969 年 Hopfield^[10] 根据全球仅有的 18 个测站数据拟合建立得出的模型,假设气压、温度和水汽压与高程存在一定的关系,将对流层延迟分为干延迟和湿延迟两部分分别进行计算得出。SAASTAMONIEN 模型是在 HOPFIELD 模型的基础上,结合美国的标准大气模型所建立的一种对流层修正模型^[11](以下简称 SAAS)。SAAS 模型将大气层划为 3 层,即大气温度固定不变的平流层以及大气温度随高程变化的对流层和电离层^[7],相较于

HOPFIELD 模型划分较为精细,对流层延迟修正精度因此也更高。SAAS 模型通过详细考虑大气湿度、温度和压力等因素,对折射率进行修正,从而解决了传统模型在高湿度条件下的不准确问题。该模型的计算公式为

$$D_{\text{SAAS}}^{\text{ZT}} = 0.002\ 277 \times \frac{\left[P + \left(\frac{1}{K} \right) e + 0.05 \right]}{f(l, h)}, \quad (4)$$

$$f(l, h) = 1 - 0.002\ 66 \cos 2 \cdot l - 0.000\ 28h. \quad (5)$$

式(4)~(5)中: P 为测站气压, K 为测站开氏温度, e 为水汽压, l 为测站纬度, h 为测站高程, $f(l, h)$ 为地球自转所引起重力加速度变化的修正。

1.2.2 BLACK 模型

BLACK 模型是由 Black^[12] 提出的一种在 SAAS 模型的基础上,将卫星信号传播路径上存在的弯曲进行修正,综合优化得出的一种对流层延迟修正模型,与其他模型相比,BLACK 模型可以提供更加精确的对流层折射率精度,因此 BLACK 模型对流层延迟的修正精度优于其他传统模型,具有较高的应用价值。BLACK 模型的计算公式为

$$D^{\text{ZH}} = K_d \left[\sqrt{1 - \left(\frac{\cos E}{1 + (1 - a_E)h_d/h} \right)^2} - b_E \right], \quad (6)$$

$$D^{\text{ZW}} = K_w \left[\sqrt{1 - \left(\frac{\cos E}{1 + (1 - a_E)h_w/h} \right)^2} - b_E \right], \quad (7)$$

$$D^{\text{ZT}} = D^{\text{ZH}} + D^{\text{ZW}}, \quad (8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} K_d = 0.002\ 312 \times (K - 3.96) \frac{P}{K} \\ K_w = 0.074\ 654\ 2 e \frac{h_w}{K^2} \\ h_w = 13\ 000 \\ h_d = 148.98(K - 3.96) \\ a_E = 0.833 + [0.076 + 0.000\ 15 \times T]^{-0.3E} \\ b_E = 1.92/(E^2 + 0.6)^2 \end{array} \right. \quad (9)$$

式(6)~(9)中: D^{ZH} 为天顶对流层干延迟, D^{ZW} 为天顶对流层湿延迟, P 、 h 、 K 、 T 分别为测站气压、高程、开氏温度、摄氏温度, E 为卫星高度角, a_E 和 b_E 为传播路径弯曲改正因子。

1.2.3 EGNOS 模型

新布伦瑞克大学提出了基于美国标准大气资

料的UNB系列模型,根据气压、温度、水汽压、温度梯度以及水汽梯度内插表,按照纬度和年积日进行内插得出5种气象的年均值和年振幅值进行计算^[13],EGNOS模型是基于UNB系列模型进行简

化,并改进了气象内插估计方式的一种无需实测数据的对流层修正模型^[14];5种气象参数的年平均值和年振幅值见表1和表2。

表1 EGNOS气象参数年均值

纬度/(°)	温度/K	温度梯度/(K/m)	气压/hPa	水汽压/hPa	水汽梯度
≤15	299.65	6.30×10^{-3}	1 013.25	26.13	2.77
30	294.15	6.05×10^{-3}	1 017.25	21.79	3.15
45	283.15	5.58×10^{-3}	1 015.75	11.66	2.57
60	272.15	5.59×10^{-3}	1 011.75	6.78	1.81
≥75	263.65	4.53×10^{-3}	1 013.00	4.11	1.55

表2 EGNOS气象参数年振幅值

纬度/(°)	温度/K	温度梯度/(K/m)	气压/hPa	水汽压/hPa	水汽梯度
≤15	0	0	0	0	0
30	7	0.25×10^{-3}	-3.75	8.85	0.33
45	11	0.32×10^{-3}	-2.25	7.24	0.46
60	15	0.81×10^{-3}	-1.75	5.36	0.74
≥75	14.5	0.62×10^{-3}	-5.00	3.39	0.30

各气象参数内插计算公式为

$$Q_m(\varphi, d) = Q_m(\varphi_i) + [Q_m(\varphi_{i+1}) - Q_m(\varphi_i)] \left(\frac{\varphi - \varphi_i}{\varphi_{i+1} - \varphi_i} \right), \quad (10)$$

$$Q_a(\varphi, d) = Q_a(\varphi_i) + [Q_a(\varphi_{i+1}) - Q_a(\varphi_i)] \left(\frac{\varphi - \varphi_i}{\varphi_{i+1} - \varphi_i} \right), \quad (11)$$

$$Q(\varphi, d) = Q_m - Q_a \cos \left(\frac{2\pi(d - d_{\min})}{365.25} \right). \quad (12)$$

式(10)~(12)中: d 为年积日, Q_m 为气象数据的年平均值, Q_a 为气象数据的年振幅值,当纬度 $15^\circ \leq |\varphi| \leq 75^\circ$ 时, φ_i 与 φ_{i+1} 为相邻的两个纬度,根据公式(11)和(12)纬度和年积日进行内插, d_{\min} 在北半球为28,在南半球为211,求出平均海平面上的5种气象数据,再根据公式求出平均海平面的对流层干延迟和湿延迟:

$$D_{\text{sea}}^{\text{ZH}} = \frac{10^{-6} k_1 R_d P}{g_m}, \quad (13)$$

$$D_{\text{sea}}^{\text{ZW}} = \frac{10^{-6} k_2 R_d}{g_m (\lambda + 1) - \beta R_d} \cdot \frac{e}{K}. \quad (14)$$

式(13)~(14)中: P 、 K 、 e 、 β 、 λ 分别为内插得出的5种平均海平面气象参数:气压、温度、水汽压、温度梯度和水汽梯度,式中其他参数的值为

$$\begin{cases} k_1 = 77.604 \text{ K/hPa} \\ k_2 = 382 000 \text{ K}^2/\text{hPa} \\ R_d = 287.054 \text{ J/kJ}^{-2}\text{K}^\circ \\ g_m = 9.784 \text{ m/s}^2 \end{cases} \quad (15)$$

再根据平均海平面的对流层干延迟和湿延迟结合测站高度,计算出测站处的天顶对流层干延迟和湿延迟:

$$D^{\text{ZH}} = \left(1 - \frac{\beta h}{K} \right)^{\frac{g}{R_d \beta}} \cdot D_{\text{sea}}^{\text{ZH}}, \quad (16)$$

$$D^{\text{ZW}} = \left(1 - \frac{\beta h}{K} \right)^{\frac{(\lambda+1)g}{R_d \beta} - 1} \cdot D_{\text{sea}}^{\text{ZW}}. \quad (17)$$

式(16)~(17)中: $g = 9.8 \text{ m/s}^2$,再根据式(8)计算得出天顶对流层总延迟。

1.2.4 GPT2w模型

GPT系列模型是Böhm等^[15]利用欧洲中尺度数值预报模型气象资料数据建立的一种全球对流层延迟修正模型,随后在GPT和GPT2模型^[16]的基础上,通过对水汽压的修正,提高水汽压的精度提出了GPT2w模型^[17],GPT模型是对流层延迟修正精度最高的模型之一^[18],利用2020年全球 $1^\circ \times 1^\circ$ 网格数据,根据测站经纬度和简化儒略日计算出某点气象数据的年周期值和半年周期值进行计算,气

象数据包括气压、温度、水汽压、加权平均温度、水汽衰减因子以及比湿,根据 6 种气象数据的年周期值和半年周期值通过 GPT2w 模型计算得到某点的天顶对流层总延迟^[19],气象数据计算公式为

$$Q = A_0 + A_1 \cos\left(\frac{d}{365.25}2\pi\right) + B_1 \sin\left(\frac{d}{365.25}2\pi\right) + A_2 \cos\left(\frac{d}{365.25}4\pi\right) + B_2 \sin\left(\frac{d}{365.25}4\pi\right)。 \quad (18)$$

式(18)中: A_0 为气象数据的年平均值, A_1, B_1 为年周期值, A_2, B_2 为年半周期值。计算得出各气象参数后,先用 SAAS 模型天顶对流层干延迟计算公式计算得出干延迟,再利用 Askne 模型计算湿延迟^[20],计算公式为

$$D^{ZH} = 0.002277 \frac{P}{f(l, h)}, \quad (19)$$

式(19)中,参数含义见第 1.2.1 节 SAAS 模型。

$$D^{ZW} = 10^{-6} \times (k_2 + k_3/T_m) \times \frac{R_d}{(\lambda + 1)g_m} e, \quad (20)$$

$$\begin{cases} R_d = 28.9644 \text{ g/mol} \\ k_2 = 16.52 \text{ K/hPa} \\ k_3 = 3.776 \times 10^5 \text{ K}^2/\text{hPa} \end{cases} \quad (21)$$

式(20)~(21)中: T_m, λ, g_m, e 分别为加权平均温度(℃)、水汽递减因子、测站位置重力加速度(g/m^2)以及水汽压(hPa), R_d 为干空气分量常数;最后根据式(8)计算得出天顶对流层总延迟。

2 实验方案及结果分析

2.1 数据来源与测站选择

实验数据采用的参考真值为 2020 年 1—366 天 IGS(International GNSS Service)天顶对流层产品,实测气象数据为 2020 年 1—366 天 IGS 各测站的气象数据,包含气压、温度以及相对湿度(<https://igs.org/>),GPT2w 模型的数据来自 VMF 数据服务器提供的全球气象格网模型数据。卫星高度角 E 取观测截止高度角 7°。

对流层的变化主要影响因素为纬度、高程、季节等,实验中测站的选择是根据纬度的变化,按照 0°~30° 为低纬度,30°~60° 为中纬度,60°~90° 为高纬度为标准,从低纬度到高纬度分别从全球选取 6 个具有实测气象数据的观测站,分别为澳大利亚的 DARW 站、中国香港的 HKSL 站、中国的武汉(WUH2)站和乌鲁木齐(URUM)站,德国的 WARN 站以及挪威的 NYA2 站,各站的经纬度和高程见表 3。

表 3 测站经纬度和高程

测站名称	经度/(°)	纬度/(°)	高程/m
DARW	131.13	-12.84	125.1
HKSL	113.93	22.37	95.3
WUH2	114.36	30.53	28.2
URUM	87.60	43.81	858.8
WARN	12.10	54.17	50.7
NYA2	11.86	78.93	81.5

2.2 实验方案选择与实验策略

根据不同对流层修正模型的特点进行方案选择,可以通过生成的气象参数是否准确进行组合,EGNOS 模型内插得到的气象数据为平均海平面气象数据,没有考虑高程变化,因此模拟的气象数据与实测气象数据相差较大,不能直接作为气象参数使用;GPT2w 模型考虑的因素较为全面,模拟的气象数据与实测气象数据较为接近^[21],因此可以作为实际气象数据使用,以气压为例,以 IGS 气象数据为参考真值进行分析,结果见图 1 至图 4。

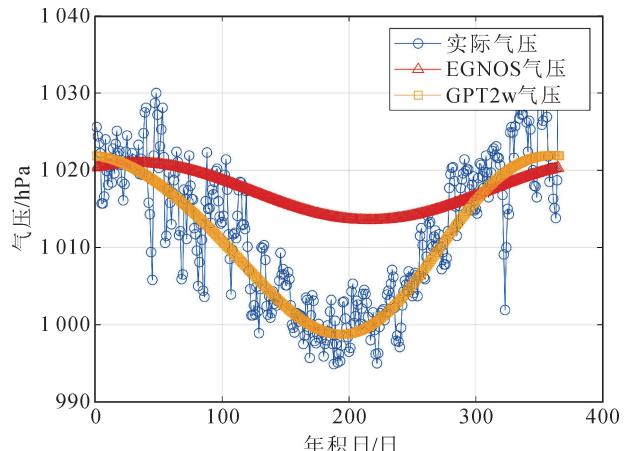


图 1 WUH2 站 2020 年模型气压与实测气压对比

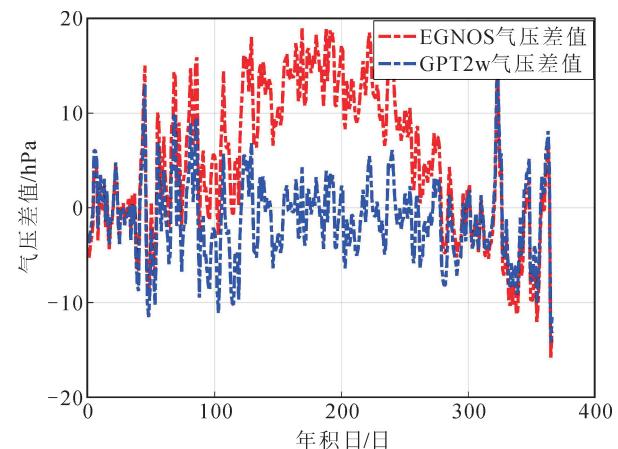


图 2 WUH2 站模型气压值与实际气压值差值变化图

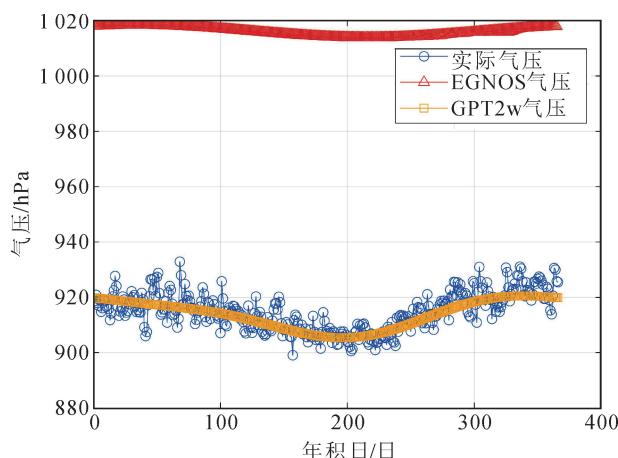


图3 URUM 站 2020 年模型气压与实测气压对比

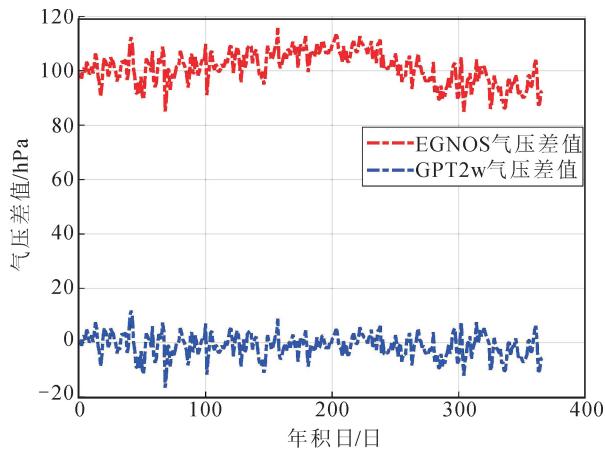


图4 URUM 站模型气压值与实际气压值差值变化图

由图1至图4可见,武汉站高度为28.2 m,乌鲁木齐站高度为858.8 m,即使在高程较低的WUH2站,EGNOS模型的模型气压与实际气压的差值偏离程度也要高于GPT2w模型,测站高度越高EGNOS模型模拟得到的气象数据与实测气象数据偏差越大,而GPT2w模型模拟得到的气象数据在不同测站高度上均与实测数据符合度较高,与实际气象偏差在±20 hPa范围内波动,具有较高的拟合精度;依此可以利用GPT2w模型拟合得到的气象参数与SAAS和BLACK模型结合进行对流层延迟修正,因此确定非实测气象数据模型方案为EGNOS模型、GPT2w模型、GPT2w+SAAS模型以及GPT2w+BLACK模型4种方案;使用实测气象数据方案为实测气象+SAAS模型和实测气象+BLACK模型。

因此实验分为6个模式,采用数据处理软件对SAAS、BLACK模型进行按照原理构建计算模型,EGNOS模型按照内插表进行内插计算获得模型数

据,GPT2w按照VMF提供的全球格网模型进行计算获得模型数据。表4为不同模式的具体策略。

表4 不同模式的具体策略

模式	具体策略
模式1:EGNOS	内插表获得气象参数 模型内插 根据公式计算ZTD
模式2:GPT2w	格网模型获得气象参数 模型内插 根据公式计算ZTD
模式3:GPT2w +SAAS	格网模型获得气象参数 通过SAAS模型计算ZTD
模式4:GPT2w +BLACK	格网模型获得气象参数 通过BLACK模型计算ZTD
模式5:实际气象 +SAAS	通过IGS网站获得气象数据 通过SAAS模型计算ZTD
模式6:实际气象 +BLACK	通过IGS网站获得气象数据 通过BLACK模型计算ZTD

2.3 结果及精度分析

2.3.1 非实测气象数据模型结果

非实测气象数据模型方案为EGNOS、GPT2w、GPT2w+SAAS以及GPT2w+BLACK4种方案,分别根据不同纬度的6个测站进行计算并与IGS对流层产品对比,结果如图5至图10所示。

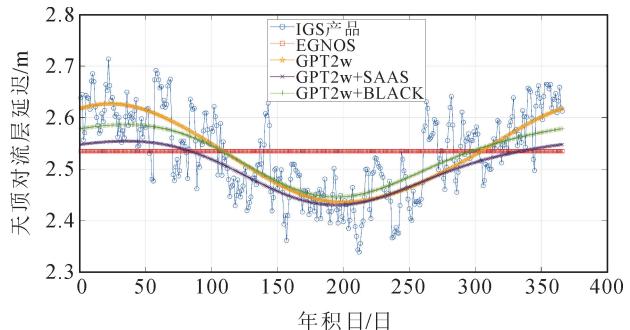


图5 DARW 站 2020 年模型 ZTD 与 IGS 产品对比

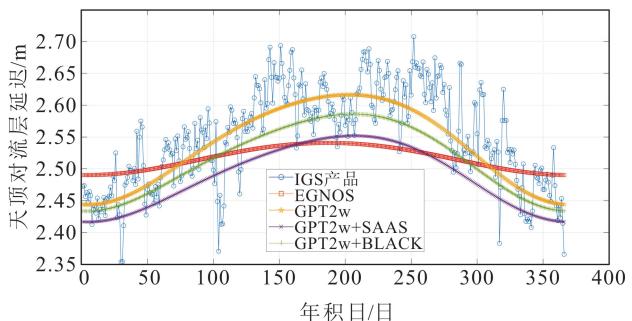


图6 HKSL 站 2020 年模型 ZTD 与 IGS 产品对比

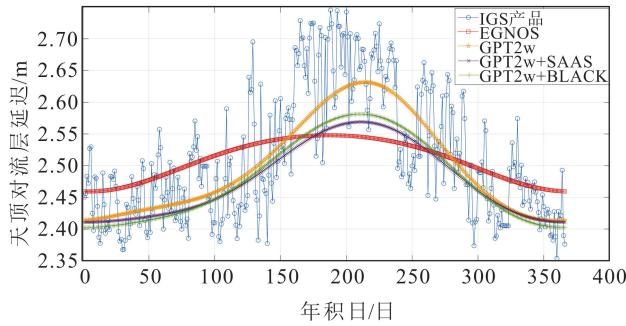


图 7 WUH2 站 2020 年模型 ZTD 与 IGS 产品对比

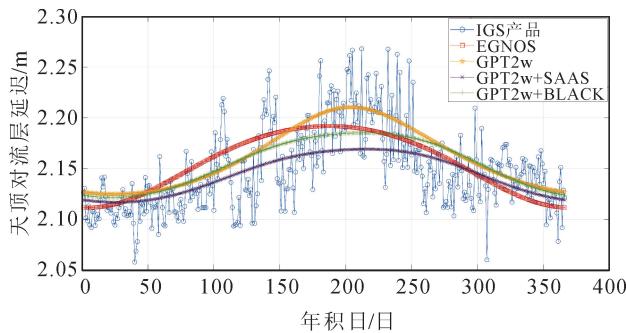


图 8 URUM 站 2020 年模型 ZTD 与 IGS 产品对比

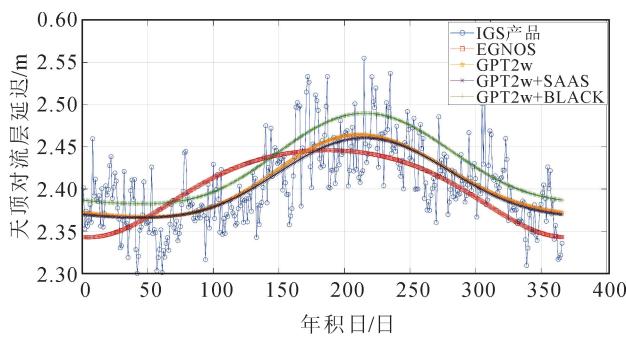


图 9 WARN 站 2020 年模型 ZTD 与 IGS 产品对比

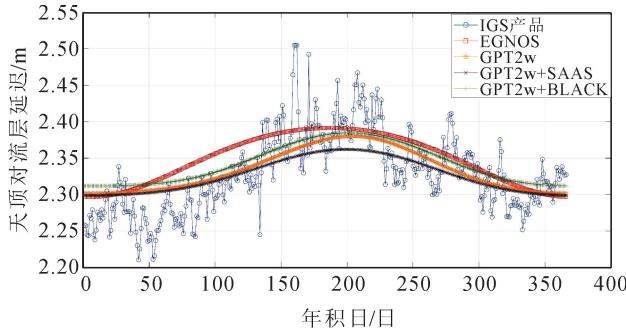


图 10 NYA2 站 2020 年模型 ZTD 与 IGS 产品对比

由结果可以看出,EGNOS 模型在低纬度测站的精度较低,当纬度低于 15° 时,EGNOS 模型由于气象参数年振幅值为 0,因此模型计算的 ZTD 为一

个恒定常值,EGNOS 模型在低纬度的变化趋势与 IGS 真值产品不贴合,随着纬度的增加,EGNOS 模型的结果在逐渐逼近 IGS 产品,精度随之变高,趋势越来越符合参考真值变化;而 GPT2w 模型在 6 个测站的精度和符合度都较为精确,从精度和趋势变化分析,在低纬度测站修正精度由高到低依次是:GPT2w、GPT2w + BLACk、GPT2w + SAAS、EGNOS;在中高纬度测站 EGNOS 模型的拟合精度与其他模型接近,均具有较高的修正精度。EGNOS 模型的计算十分简便而且在中高纬度测站的对流层修正精度与其他模型也较为接近,但是在低纬度地区修正效果较差,总体修正精度略逊于其他模型,但是仍然具有较高的可操作性,EGNOS 模型修正结果与刘英等^[13]较为一致。

2.3.2 实测气象数据模型结果

IGS 实测气象数据的时间间隔有 300 s、10 min 以及 30 min 等不同类型,由于非实测气象参数模型只能拟合 ZTD 长周期变化,为了方便对比且统一时间间隔,实验采取实测气象数据的日均值作为输入值以及 IGS ZTD 产品的日均值作为真值进行对比分析,其中由于 HKSL 站相对湿度数据缺失,采用 GPT2w 模拟的水汽压数据进行替换,结果见图 11 至图 16 所示。

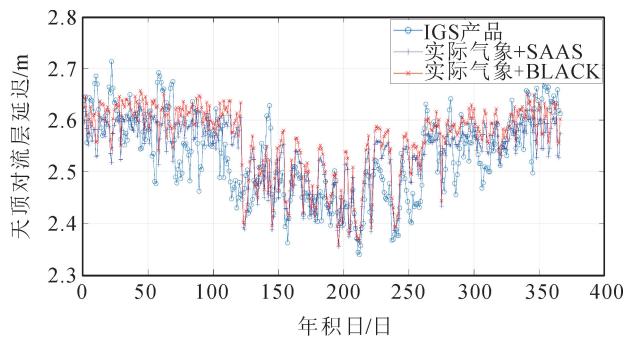


图 11 DARW 站 2020 年实测数据 ZTD 与 IGS 产品对比

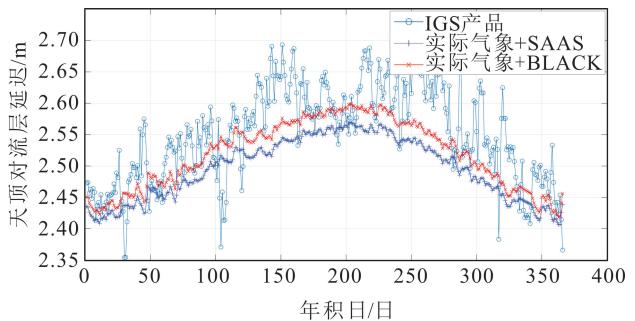


图 12 HKSL 站 2020 年实测数据 ZTD 与 IGS 产品对比

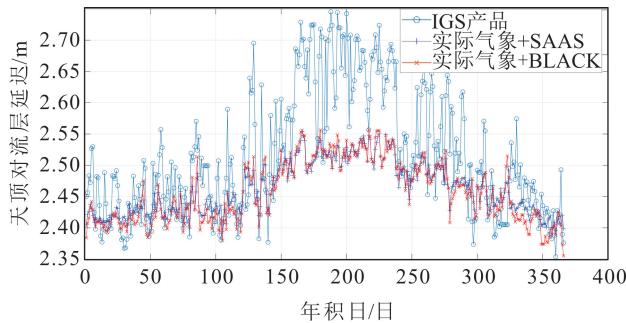


图 13 WUH2 站 2020 年实测数据 ZTD 与 IGS 产品对比

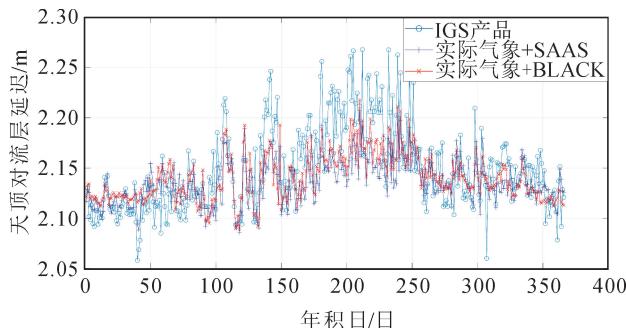


图 14 URUM 站 2020 年实测数据 ZTD 与 IGS 产品对比

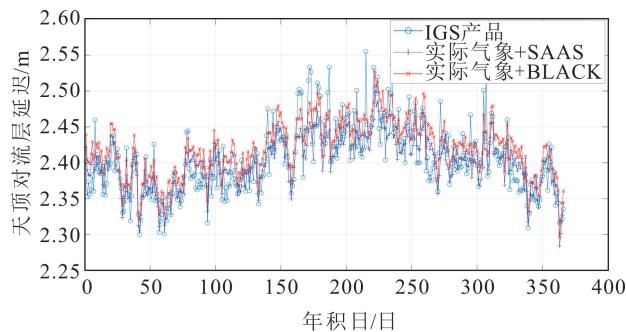


图 15 WARN 站 2020 年实测数据 ZTD 与 IGS 产品对比

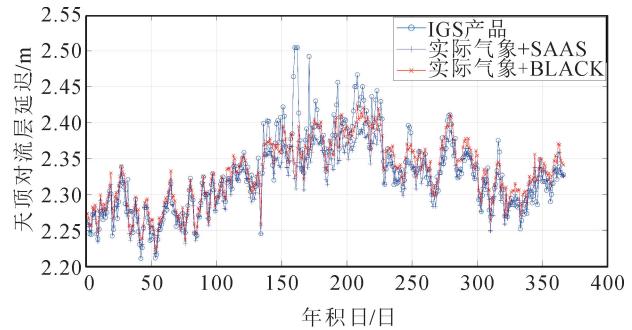


图 16 NYA2 站 2020 年实测数据 ZTD 与 IGS 产品对比

从图 11 至图 16 可以看出,由实测气象数据利用 SAAS 和 BLACK 模型进行对流层延迟修正后的 ZTD 产品与实际的 ZTD 产品具有较高的精度和符合度,并且可以反应短期内 ZTD 的快速变化,但是由于数据缺失、气象变化较大等因素,在部分测站的对流层修正效果并不理想。

2.3.3 精度分析

以 IGS 对流层产品作为真值进行分析,从均方根误差 RMS 以及平均绝对百分比误差 MAPE 两个方面进行精度衡量^[22],均方根误差是模型数据与真值误差平方根的均值,计算公式为

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (D_{\text{model}}^{\text{ZT}} - D_{\text{IGS}}^{\text{ZT}})^2}。 \quad (22)$$

平均绝对百分比误差是模型数据与真值的误差所占百分比,可以衡量模型数据与真值的相对误差,计算公式为

$$E_{\text{MAPE}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\left| \frac{D_{\text{model}}^{\text{ZT}} - D_{\text{IGS}}^{\text{ZT}}}{D_{\text{model}}^{\text{ZT}}} \right| \right) \times 100\%。 \quad (23)$$

每个测站不同模型的精度指标见表 5 和表 6。

表 5 各测站不同模型的均方根误差

单位:cm

测站名称	EGNOS	GPT2w	GPT2w+SAAS	GPT2w+BLACK	实测+SAAS	实测+BLACK
DARW	8.15	5.14	6.23	5.34	6.09	6.87
HKSL	7.20	4.82	7.81	5.86	7.47	5.90
WUH2	8.22	6.45	7.71	7.45	8.97	8.93
URUM	3.33	3.19	3.25	3.19	3.33	3.00
WARN	4.13	3.45	3.45	4.14	2.79	3.02
NYA2	4.32	3.78	3.97	4.02	2.94	2.51

表 6 各测站不同模型的平均绝对百分比误差 单位: %

测站名称	EGNOS	GPT2w	GPT2w+SAAS	GPT2w+BLACK	实测+SAAS	实测+BLACK
DARW	2.75	1.63	1.97	1.73	1.91	2.19
HKSL	2.29	1.49	2.58	1.83	2.43	1.83
WUH2	2.06	2.09	2.38	2.34	2.63	2.65
URUM	1.25	1.20	1.15	1.18	1.15	1.07
WARN	1.37	1.12	1.12	1.44	0.87	1.06
NYA2	1.56	1.27	1.30	1.39	0.74	0.71

从结果上看,所有模型在各测站的精度误差均在 10 cm 以内;其中 EGNOS 在中高纬度测站 URUM、WARN、NYA2 的精度明显优于低纬度测站,与结果相互印证;而且 EGNOS 模型在中高纬度测站的 ZTD 修正精度在低纬度测站与 GPT2w 模型精度相差 1~3 cm,在高纬度测站与 GPT2w 模型精度相差约 0.5 cm,而与实测气象数据修正在不同测站修正精度相差始终约 1~2 cm,精度相差不大,但是 EGNOS 模型计算相较于其他方案难度较低,具有很高的应用价值。GPT2w 模型和实测数据在各个纬度均有良好的精度,但是二者的数据计算和获取难度较高;此外,BLACK 模型的 RMSE 值和平均绝对百分比误差与 SAAS 模型较为接近,总体来说 BLACK 模型精度略优于 SAAS 模型,与理论相互印证。

3 结语

EGNOS 模型是根据年周期值和年振幅值根据内插表,通过测站纬度和年积日获得测站的气象数据,因此该模型的内插计算简单,参数获取较为容易;由拟合结果可以看出其在低纬度地区的对流层修正表现较差,修正精度低且修正后与真值符合度较低。但是在中高纬度测站的长期对流层延迟修正具有较高的精度,而且该模型建立难度低,模型数据计算获取较为容易,因此相较于 GPT 模型和实测数据修正,EGNOS 模型在中高纬度地区具有很高的应用价值。

GPT2w 模型的网格数据建立难度要高于 EGNOS 模型,需要根据大量气象数据资料建立全球气象网格模型,再根据网格模型计算出各气象数据的年平均值、年周期值和年半周期值,需要获取

的参数较多,而且与 EGNOS 类似,不包含短周期项,因此均不适用于对流层延迟的快速修正。该模型的对流层修正精度较高,对于不同纬度测站的对流层修正均具有良好的修正效果。

实测气象数据获取难度大,需要建立气象观测站,而且实测气象数据容易缺失;但 IGS 观测气象数据时间间隔可以达到秒级,根据实测数据进行对流层修正可以实时精准地修正短期快速对流层延迟,但是对部分气象数据变化幅度较大的测站,修正效果也存在一定误差,其相较于模型修正,可以对不同纬度测站进行短周期高精度的对流层延迟修正。

总的来说,EGNOS 模型以计算难度低,在中高纬度测站的对流层延迟修正精度较高,相较于 GPT 格网模型建立难度大且内插较为复杂以及实测气象数据难以获取优势较大,具有较高的应用价值,但是在低纬度测站无法适用。GPT2w 模型和实测气象数据对流层延迟修正精度较为接近,且二者在全球范围均可适用,但是模型建立和数据获取难度远远高于 EGNOS 模型。

参考文献:

- [1] 姚宜斌,赵庆志.GNSS 对流层水汽监测研究进展与展望[J].测绘学报,2022,51(6):935-952.
- [2] 翟树峰.GNSS 对流层延迟改正及其应用研究[D].郑州:网络空间部队信息工程大学,2018.
- [3] 苏行.GNSS 定位定时中的对流层延迟模型优化研究[D].西安:中国科学院大学(中国科学院国家授时中心),2021.
- [4] 贾浩然.基于干涉测量的卫星无源测定轨技术研究[D].西安:中国科学院大学(中国科学院国家授时中心),2021.

- 心),2022.
- [5] 南凯,杨旭海,曹芬,等.基于高精度对流层延迟改正的转发式卫星测定轨[J].时间频率学报,2018,41(1):57-65.
- [6] 赵铁刚.基于GNSS信号的对流层建模与延迟误差分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [7] 谭勇,姚宜斌.常用对流层延迟修正模型的适用性分析及精化[J].测绘科学,2022,47(6):15-20.
- [8] 戴祺,章浙涛,文援兰,等.不同气候条件下几种对流层模型性能分析[J].导航定位学报,2023,11(4):38-48.
- [9] 黎峻宇.中国地区对流层关键参量精化建模及预报研究[D].武汉:武汉大学,2021.
- [10] HOPFIELD J S. Tropospheric effect on electromagnetically measured range: prediction from surface weather data[J]. Radio Science, 1971, 6(3): 357-367.
- [11] SAASTAMOINEN J. Contributions to the theory of atmospheric refraction. Part II. Refraction corrections in satellite geodesy[J]. Bulletin Géodésique, 1973, 2(105): 279-298.
- [12] BLACK H D. An easily implemented algorithm for the tropospheric range correction[J]. Journal of Geophysical Research, 1978, 83(B4): 1825.
- [13] 刘英,王皓,高海阳,等.三种对流层延迟改正模型的精度比较分析[J].北京测绘,2023,37(6):829-834.
- [14] PENNA N, DODSON A, CHEN W. Assessment of EGNOS tropospheric correction model[J]. Journal of Navigation, 2001, 54(1): 37-55.
- [15] BÖHM 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.
- [16] 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.
- [17] BÖHM J, MÖLLER G, SCHINDELEGGER M, et al. Development of an improved empirical model for slant delays in the troposphere(GPT2w)[J]. GPS Solutions, 2015, 19(3): 433-441.
- [18] 林栋德,杨世超.GPT系列模型在HKCORS中的适用性分析[J].工程勘察,2023,51(11):59-62.
- [19] 张永林,李磊.GPT2w对流层延迟模型在中国区域的精度分析[J].导航定位学报,2020,8(5):97-101.
- [20] ASKNE J, NORDIUS H. Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data[J]. Radio Science, 1987, 22(3): 379-386.
- [21] 陈曦.基于GNSS的对流层水汽反演方法与应用研究[D].广州:广州大学,2023.
- [22] 李金羽,余学祥,魏民,等.基于GPT3和PSO-BPNN的欧洲地区天顶对流层延迟模型[J].大地测量与地球动力学,2024,44(7):693-697.