

基于再分析资料ERA5计算对流层延迟精度分析

袁 炜*, 张显云#, 苏 雷

贵州大学矿业学院, 贵州 贵阳

收稿日期: 2022年3月14日; 录用日期: 2022年4月8日; 发布日期: 2022年4月18日

摘 要

对流层延迟是GNSS导航定位的重要误差源, 目前有多种方法可实现天顶对流层延迟(ZTD)的估算。ERA5作为ECMWF发布的最新一代再分析产品, 能够提供覆盖全球的高时空分辨率气象资料, 据此可估算出高精度的ZTD。然而, 当前对ERA5对流层延迟产品精度评价的相关研究仍甚少。本文以高精度的IGS对流层延迟产品为参考, 在编程实现ERA5对流层延迟估算的基础上, 对其精度进行了评价。试验结果表明: 相较于GPT2w-1S模型和GPT3-1S模型, 由ERA5气象资料估算的ZTD产品具有更高的精度, 均方根误差分别提高了27.53 mm和27.50 mm。

关键词

ERA5, 对流层延迟模型, Saastamoinen模型, GPT, 气象参数

Accuracy Analysis of Tropospheric Delay Calculation Based on Reanalysis Data ERA5

Wei Yuan*, Xianyun Zhang#, Lei Su

Mining School of Guizhou University, Guiyang Guizhou

Received: Mar. 14th, 2022; accepted: Apr. 8th, 2022; published: Apr. 18th, 2022

Abstract

Tropospheric delay is an important error source for GNSS navigation and positioning, and there are many methods to estimate the zenith tropospheric delay (ZTD). As the latest generation of

*第一作者。

#通讯作者。

reanalysis products released by ECMWF, ERA5 can provide meteorological data with high spatial and temporal resolution covering the whole world, based on which high-precision ZTD can be estimated. However, there are still few related studies on the accuracy evaluation of ERA5 tropospheric delay products. This paper takes the high-precision IGS tropospheric delay product as a reference, and evaluates its accuracy on the basis of programming the ERA5 tropospheric delay estimation. The experimental results show that compared with the GPT2w-1S model and the GPT3-1S model, the ZTD product estimated from the ERA5 meteorological data has higher accuracy, and the root-mean-square deviation is increased by 27.53 mm and 27.50 mm, respectively.

Keywords

ERA5, Tropospheric Delay Model, Saastamoinen Model, GPT, Meteorological Parameters

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

电磁波信号在经过对流层时,会受到大气折射的影响,产生对流层延迟 ZTD (Zenith Total Delay) [1]。ZTD 作为卫星定位解算过程中的一种重要误差源,需要对其进行改正,从而达到提高 GNSS 导航定位精度的目的。Hopfield 模型和 Saastamoinen 模型是目前比较常用的对流层延迟改正模型[2] [3],但受限于实测气象参数的获取,这两种模型并不适用于多数地区的对流层延迟解算。为摆脱实测气象参数限制,气象再分析资料被应用于对流层延迟改正。当前,欧洲中期天气预报中心 ECMWF 发布的第五代全球气候再分析资料数据集 ERA5 在国际上应用较广,与上一代产品 ERA-Interim 相比,ERA5 在时间分辨率上有了较大提升,从 6 h 提高到了 1 h。张永林等[4]提出一种基于再分析资料 ERA5 的天顶对流层延迟计算方法,并与前一代再分析资料 ERA-interim 的计算结果进行对比分析,结果表明 ERA5 在精度上较 ERA-Interim 有明显提升。李瑞辉[5]基于气象要素的检核方案,利用 ERA5 计算气象要素和 ZTD 的精度,研究表明,利用 ERA5 提取的气象要素可代替实测值用于对流层研究。

但目前对 ERA5 对流层延迟产品精度评价的相关研究仍甚少,且多数研究是进行同类模型间的比较。因此,本文在利用 ERA5 估算对流层延迟 ZTD 的基础上,与分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 GPT2w_1 + Saastamoinen、GPT3_1 + Saastamoinen (以 GPT2w-1S、GPT3-1S 表示)估算的 ZTD 进行比较分析,旨在为 ERA5 资料在对流层延迟改进中的应用提供参考。

2. 对流层延迟的估计方法

2.1. 基于 Saastamoinen 模型的对流层估计

Saastamoinen 模型是基于 Shell 定律,利用天顶距三角函数展开被积函数进行两层积分所建立[3]。从地面到对流层 10 km 为第一层,温度下降率为 $6.5^\circ\text{C}/\text{km}$; 从对流层 10 km 顶部到 70 km 处的层顶区间为第二层,温度为一个恒定值[6]。Saastamoinen 模型计算公式如下:

$$ZTD = \frac{0.002277}{f(\varphi, h)} \times \left[P + e \times \left(0.05 + \frac{1255}{T} \right) \right] \quad (1)$$

$$e = rh6.11 \times 10^{\frac{7.5T - 273.15}{T}} \quad (2)$$

$$f(\varphi, h) = 1 - 0.00266 \cos 2\varphi - 0.00028h \quad (3)$$

式中, T 为地面温度(K), P 为地面压强(hPa), e 为地面水汽压(hPa), rh 为地面相对湿度。 $f(\varphi, h)$ 为地球自转引起的重力加速度的修正, φ 为测站纬度, h 为测站高程(km)。本文中, 上述气象参数(T 、 P 、 e)可由 ERA5 气象再分析资料提供或利用分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 GPT2w/3 模型解求。

2.2. ERA5 气象资料与 Saastamoinen 模型协同的对流层延迟估计

ERA5 是欧洲中期天气预报中心 ECMWF 最新发布的一种再分析产品(用户可从 <https://cds.climate.copernicus.eu>注册下载), 水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 垂直分辨率为 37 层, 相比于 ERA-Interim 资料, 主要在时间分辨率上有了较大提升, 从 6 h 提高到了 1 h。由于 ERA5 数据顶层高度一般为 47 km 左右, 该位置几乎没有湿延迟影响[7], 且 ERA5 只能提供气象数据, 不能直接提供对流层延迟结果, 所以本文将基于再分析资料 ERA5 计算对流层延迟分两部分进行。对于顶层以下的 ERA5 数据, 利用积分延迟计算方法求取对流层延迟 ZTD_1 , 再引入 Saastamoinen 干延迟模型计算顶层以上对流层延迟 ZTD_2 (以 ERA5-S 表示), 最终得到总对流层延迟, 即为两部分对流层延迟之和。具体计算方法如下:

$$ZTD_1 = 10^{-6} \int N dh = 10^{-6} \sum_i^{n-1} (N_i + N_{i+1}) \times (h_{i+1} - h_i) / 2 \quad (4)$$

$$ZTD_2 = \frac{0.002277 \times P_{top}}{f(\varphi, h_{top})} \quad (5)$$

$$N = \frac{k_1(P-e)}{T} + \frac{k_2 e}{T} + \frac{k_3 e}{T} \quad (6)$$

$$e = \frac{qP}{(0.622 + 0.378q)} \quad (7)$$

上式中, $k_1 = 77.604 \text{ K/hPa}$, $k_2 = 64.79 \text{ K/hPa}$, $k_3 = 377,600 \text{ K}^2/\text{hPa}$, N 为大气折射指数, n 为测站上方 ERA5 数据包含的气压总层数, P_{top} 为顶层气压值, h_{top} 为顶层高度, 其余气象参数含义与式(1)一致。

ERA5 数据按气压分层, 各等压面之间的高度存在差距, 然而测站点很少出现与 ERA5 数据格网点重合, 或与等压面高程相等的情况, 因此在使用 ERA5 数据时还需对其做以下处理:

1) 时间与高程的单位统一。ERA5 数据采用格里高利历作为时间单位, 在计算时应将其转换为 UTC 时。GNSS 测站采用大地高作为高程系统, 而 ERA5 数据采用位势高来表示高度, 在处理测站处气象参数之前需进行高程统一, 具体方法参考文献[8]。

2) 完成高程单位的统一后, 根据测站点坐标找到距离站点最近的四个格网点, 通过线性外推或内插方法, 得到四个格网点在高程等于测站点高程时对应的气象参数[9]。

3) 对步骤 2)中的气象参数进行双线性内插, 得到测站位置处的气象参数。

4) 对测站点高程上方各层等压面进行双线性内插, 得到平面位置与测站坐标一致、高度等于各层高度时的气象参数。

5) 将处理后的气象参数代入公式(4)至(7)即可得到最终的对流层延迟 ZTD。

上述过程均在 MATLAB 软件平台上完成。

2.3. 基于 GPT2w/3 模型的对流层延迟估计

Böhm 等在 GPT2 模型的基础上增加了大气加权平均温度和水汽压垂直梯度两个参数, 建立了 GPT2w (Global Pressure and Temperature 2 wet)模型[10]; Landskron 等通过改进映射函数 VMF3, 提出一种新的基

于全球网络的经验模型 GPT3 [11]。GPT2w/3 模型均可提供两种空间分辨率的地表温度、地表气压、水汽压和大气加权平均温度等气象参数，为目前公开的标称精度较高的对流层延迟经验模型。该类模型计算各气象参数的公式为：

$$\begin{aligned} \Phi = & A_0 + A_1 \cos\left(\frac{doy}{365.25} 2\pi\right) + B_1 \sin\left(\frac{doy}{365.25} 2\pi\right) \\ & + A_2 \cos\left(\frac{doy}{365.25} 4\pi\right) + B_2 \sin\left(\frac{doy}{365.25} 4\pi\right) \end{aligned} \quad (8)$$

上式中，doy 为年积日， A_0 为气象参数的平均值， A_1 和 B_1 为气象参数的年周期振幅， A_2 和 B_2 为气象参数的半年周期振幅。表 1 为上述 2 种对流层延迟模型参数类型对比。

Table 1. Comparison of GPT2w/3 model parameters
表 1. GPT2w/3 模型参数对比

模型名称	输入参数	输出参数
GPT2w	dmjd/Lat/Lon/H	P/T/dT/Tm/e/ah/aw/la/undu
GPT3	dmjd/Lat/Lon/H	P/T/dT/Tm/e/ah/aw/la/undu/Gn_h/ Ge_h/Gn_w/Ge_w

表 1 中，(Lat, Lon, H) 分别为测站经纬度和大地高，dmjd 为简化儒略日，year 为年份，doy 为年积日，ah 为干映射函数，aw 为湿映射函数，la 为水汽下降因子，undu 为大地水准面差距，Gn_h 为流体静力北梯度，Ge_h 为流体静力东梯度，Gn_w 为湿北梯度，Ge_w 为湿东梯度。

通过测站坐标找到距离最近的四个格网点，对其输出的气象参数进行高程改正，求出测站高程处的格网点气象参数：

$$\begin{cases} T = T' + dT \times dh \\ P = P' \times \exp\left[\frac{-g_m \times dM}{R_g \times T \times (1 + 0.6077q)} \times dh\right] \\ e' = \frac{qp}{(0.622 + 0.378q)} \\ e = e' \times \left(\frac{100P}{P'}\right)^{\lambda+1} \end{cases} \quad (9)$$

该式中，(T' , P' , e') 分别为格网点气温、气压、水汽压；(T , P , e) 分别为高程改正后测站点高度的气温、气压、水汽压； dT 为温度下降率； dh 为站点与格网点之间的高差； g_m 为重力加速度，一般取值为 9.80665 m/s^2 ； dM 为气体相关常数，取值为 $28.965 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$ ； R_g 为通用气体常数，取值为 $8.3143 \text{ J/(K}\cdot\text{mol)}$ ； q 为比湿； λ 为水汽下降因子。将高程改正后的四个格网点气象参数进行双线性插值可得到测站位置的气象参数，结合 Saastamoinen 模型，即可输出 ZTD。

3. 数据源与精度评价指标

3.1. 数据源

本文选用中国地区 5 个同属于 IGS 中心的 GNSS 测站(URUM、LHAZ、JFNG、HKSL、TWTF) 2021

年全年的 ERA5 格网数据(测站分布如图 1 所示), 水平格网分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 、垂直方向上包含 37 层等压面、时间分辨率为 1 h。

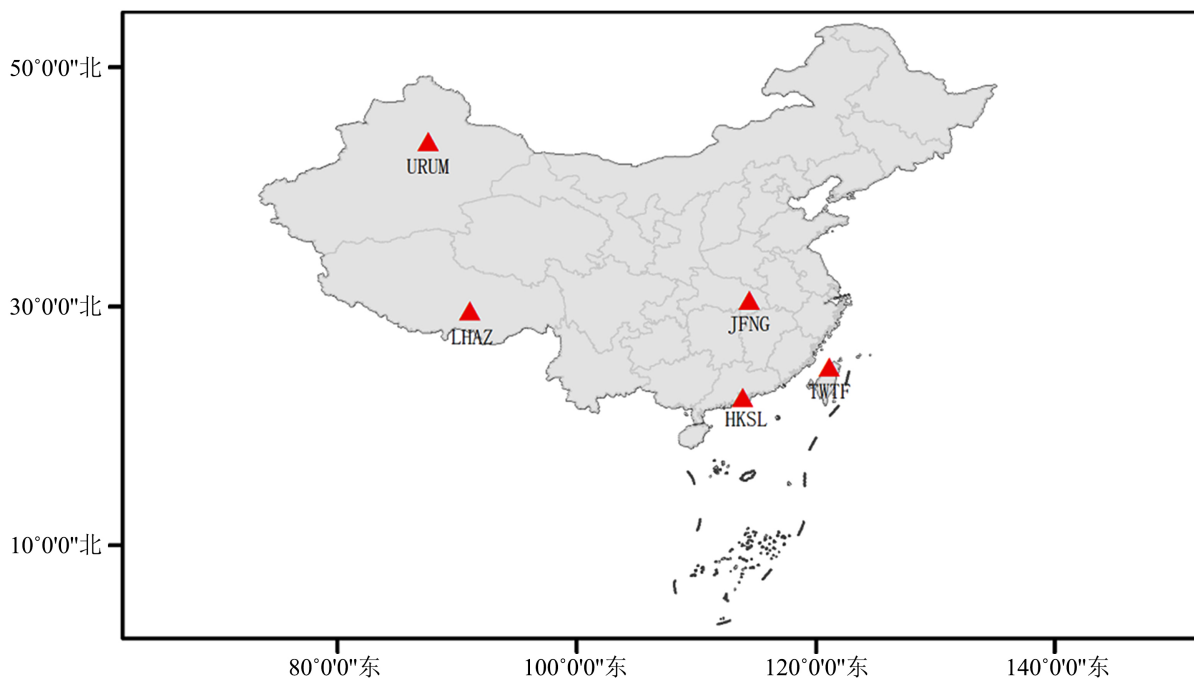


Figure 1. GNSS station distribution

图 1. GNSS 测站分布

3.2. 精度评价指标

IGS/ZTD 产品精度高, 不确定性小, 是当前国际上公认的精度最高的实测数据[12], 因此本文以 IGS/ZTD 日均值作为真值, 用于检验模型的精度。采用偏差(bias)和均方根误差(RMSE)作为精度评价指标, 计算公式为:

$$\begin{cases} \text{bias} = \sum_i^n (ZTD_i - ZTD'_i) / n \\ \text{RMSE} = \sqrt{\sum_i^n (ZTD_i - ZTD'_i)^2 / n} \end{cases} \quad (10)$$

上式中, n 为样本个数, 此处 $n = 365$; ZTD_i 为 IGS/ZTD 真值; ZTD'_i 为模型所得 ZTD 。

4. 实验结果分析

利用前文介绍的计算方法分别解算得到 ERA5-S、GPT2w-1S 及 GPT3-1S 3 种延迟模型的 ZTD 值, 并以高精度的 IGS 对流层延迟产品为参考, 其结果如图 2 所示。

由图 2 可看出, 对流层延迟整体上呈现出先上升后下降的变化趋势, 波峰部分主要集中在年积日 200 左右, 该时段正处于夏季, 符合降雨较多的实际情况。3 种模型中, ERA5-S 模型的对流层延迟与 IGS/ZTD 真值变化趋势一致, 整体上反映了对流层延迟随时间的变化特征, GPT2w-1S 与 GPT3-1S 模型的对流层延迟曲线几近重合, 表明 2 种模型的精度大致相当, 且该 2 种对流层延迟模型所得 ZTD 变化较小, 与 IGS/ZTD 真值存在较大差异。

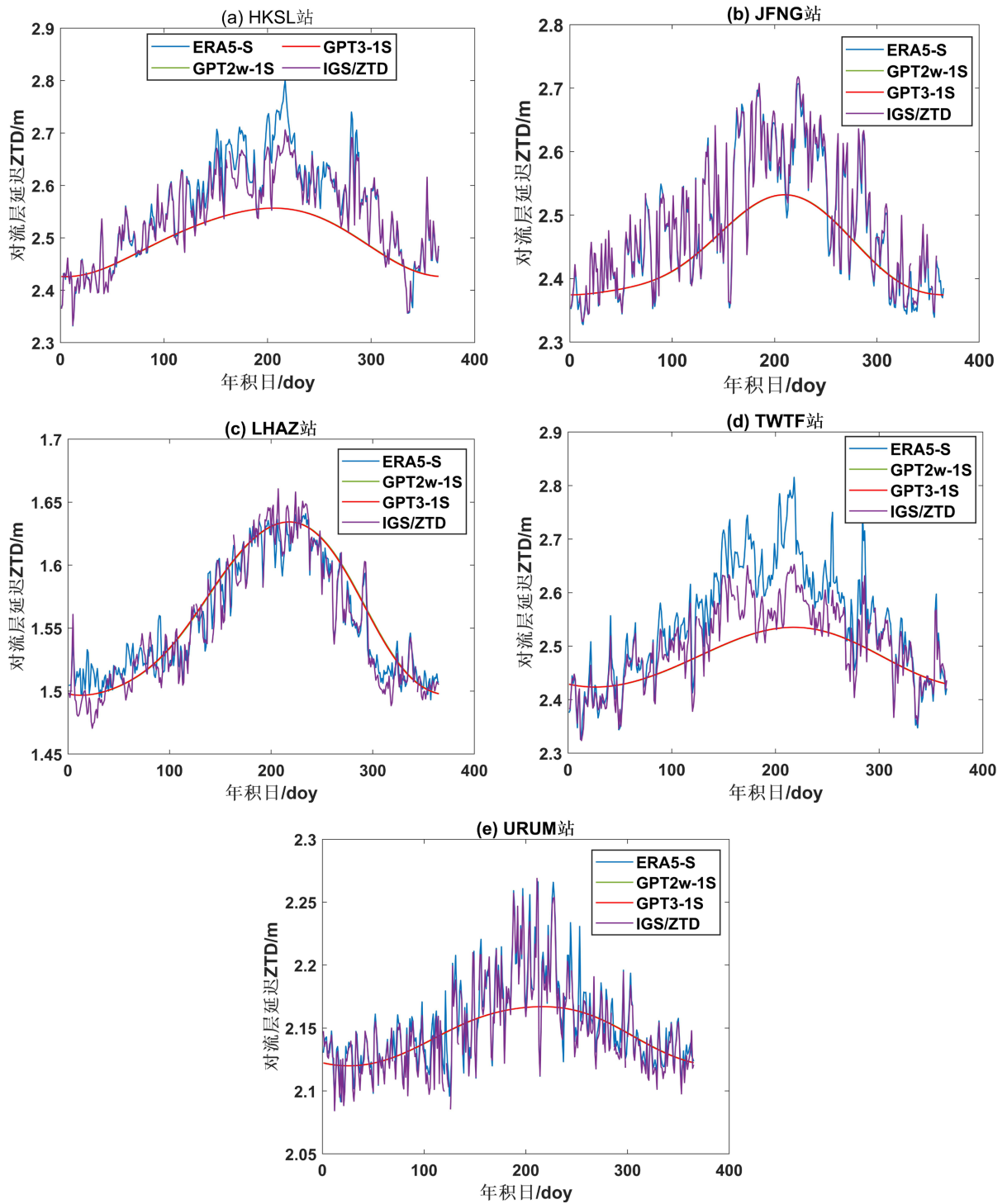


Figure 2. ZTD values of three tropospheric delay models at each station
图 2. 各测站 3 种对流层延迟模型的 ZTD 值

由图 3 可看出, 不同测站所得偏差 bias 与 RMSE 存在差异, 总体而言, 大部分测站 ERA5-S 模型的偏差 bias 与均方根误差 RMSE 均小于其它两种模型。为更好地分析各模型解算 ZTD 的精度, 给出各测站 bias 和 RMSE 计算结果, 如表 2 所示。

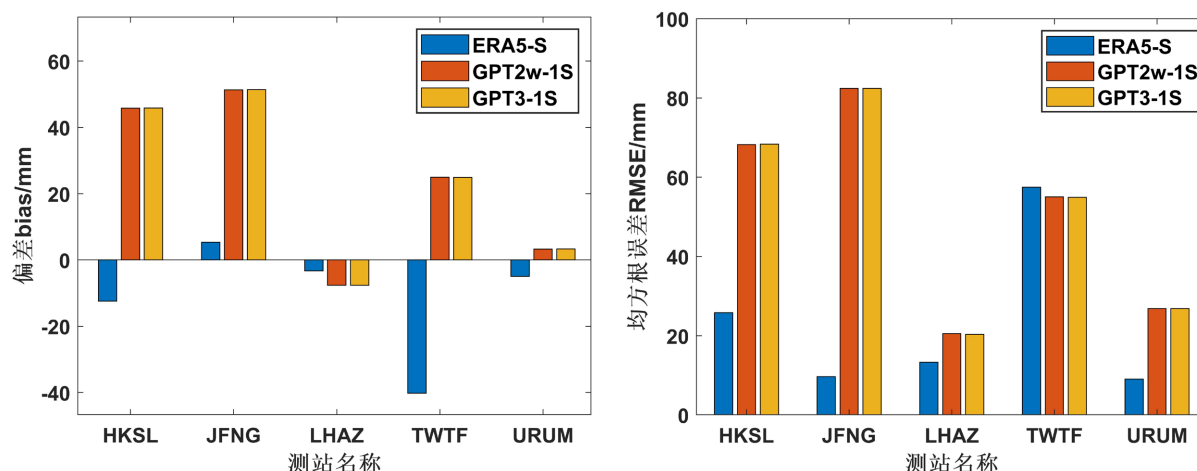


Figure 3. Different model deviations and root mean square errors at each station

图 3. 各测站不同模型偏差与均方根误差

Table 2. Three model accuracy evaluation indicators

表 2. 3 种模型精度评价指标

测站	ERA5-S/mm		GPT2w-1S/mm		GPT3-1S/mm	
	bias	RMSE	bias	RMSE	bias	RMSE
HKSL	-12.42	25.80	45.79	68.23	45.84	68.35
JFNG	5.33	9.69	51.37	82.42	51.38	82.42
LHAZ	-3.30	13.31	-7.65	20.52	-7.63	20.36
TWTF	-40.24	57.50	24.95	55.05	24.94	54.94
URUM	-4.92	9.07	3.29	26.84	3.32	26.84
min	-40.24	9.07	-7.65	20.52	-7.63	20.36
max	5.33	57.50	51.37	82.42	51.38	82.42
mean	-11.11	23.08	23.55	50.61	23.57	50.58

从表 2 可看出, ERA5-S 模型的偏差 bias 最大值为 5.33 mm, 平均值为 -11.11 mm。相比于 GPT2w-1S 模型 bias 最大值 51.37 mm、平均值 23.55 mm; GPT3-1S 模型 bias 最大值 51.38、平均值 23.57 mm, 均有较大提升。同时对比 3 种模型的 RMSE 可知, ERA5-S 模型的 RMSE 均值为 23.08 mm, 相较于 GPT2w-1S 模型 RMSE 均值 50.61 mm、GPT3-1S 模型 RMSE 均值 50.58 mm, 其 RMSE 分别提高了 27.53 mm 及 27.50 mm, 表明利用 ERA5-S 模型计算得到的对流层延迟 ZTD 精度在 3 种模型中精度最高。

5. 结语

针对当前 ERA5 对流层延迟产品精度评价的相关研究较少的情况。本文基于 2021 年全年的高时空分辨率的 ERA5 气象再分析资料, 利用分层积分法结合 Saastamoinen 模型组成 ERA5-S 模型, 解算对流层延迟 ZTD, 通过与上述 2 种模型 ZTD 进行精度对比, 验证了 ERA5-S 模型具有更高精度, 表明再分析资料 ERA5 可较好应用于对流层延迟改正。同时扩大研究区域, 延长时间范围, 分析 ERA5 获取 ZTD 周期

性变化以及高程差异的影响, 深入探究 ERA5 资料改进对流层延迟的效果将在后续工作中开展。

基金项目

国家自然科学基金项目(41901225、52064005); 贵州大学测绘科学与技术研究生创新实践基地建设项
目(贵大研 CXJD[2014]002)。

参考文献

- [1] Fernandes, M.J., Lazaro, C., Nunes, A.L., *et al.* (2010) GNSS-Derived Path Delay: An Approach to Compute the Wet Tropospheric Correction for Coastal Altimetry. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, **7**, 596-600. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2010.2042425>
- [2] Hopfield, H.S. (1971) Tropospheric Effect on Electromagnetically Measured Range: Prediction from Surface Weather Data. *Radio Science*, **6**, 357-367. <https://doi.org/10.1029/RS006i003p00357>
- [3] Saastamoinen, J. (1972) Introduction to Practical Computation of Astronomical Refraction. *Bullet in Géodésique*, **106**, 383-397. <https://doi.org/10.1007/BF02522047>
- [4] 张永林, 蔡昌盛. 基于再分析资料 ERA5 的对流层延迟估计方法及精度评估[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(1): 62-65.
- [5] 李瑞辉, 袁运斌, 张红星. ERA5 应用于区域对流层研究的适用性分析[J]. 导航定位学报, 2021, 9(6): 29-37.
- [6] 孟昊霆, 张克非, 杨震, 等. GPT2/GPT2w+Saastamoinen 模型 ZTD 估计的亚洲地区精度分析[J]. 测绘科学, 2020, 45(8): 70-76.
- [7] 马志泉, 陈钦明, 高德政. 用中国地区 ERA-Interim 资料计算 ZTD 和 ZWD 的精度分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(2): 100-104.
- [8] 陈猛, 陈俊平, 胡丛玮. 气象数值模型应用于 GNSS 精密单点定位[C]//第七届中国卫星导航学术年会论文集——S01 北斗/GNSS 应用技术, 2016: 152-159.
- [9] 黄瑾芳, 楼益栋, 张卫星, 等. 再分析资料计算中国区域对流层延迟精度[J]. 测绘科学, 2018, 43(5): 13-17.
- [10] Böhm, J., Möller, G., Schindelegger, M., *et al.* (2014) Development of an Improved Empirical Model for Slant Delays in the Troposphere (GPT2w). *GPS Solutions*, **19**, 433-441. <https://doi.org/10.1007/s10291-014-0403-7>
- [11] Landskron, D. and Böhm, J. (2018) VMF3/GPT3: Refined Discrete and Empirical Troposphere Mapping Functions. *Journal of Geodesy*, **92**, 349-360. <https://doi.org/10.1007/s00190-017-1066-2>
- [12] 杜晓燕, 乔江, 卫佩佩. 一种用于中国地区的对流层天顶延迟实时修正模型[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(1): 156-164.