

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2020.04.017

利用探空产品评估 GNSS-PPP 估计 ZTD 精度

赵 涛^{1,2}, 夏鹏飞¹, 叶世榕¹

(1. 武汉大学 GNSS 技术研究中心, 武汉 430072;

2. 武汉大学测绘学院, 武汉 430079)

摘要:无线探空测站可以提供高精度和高垂直分辨率的大气产品。为评估 GNSS 精密单点定位获得的天顶对流层延迟(ZTD)的精度,将无线探空产品获得的 ZTD 作为真值,选取中国地区 4 个 IGS 观测站及其附近的探空测站 2014—2018 年的数据进行试算和分析。针对两种产品空间分辨率不一致性问题,利用 GNSS 气象观测值来弥补探空测站与 GNSS 测站高程的不匹配。实验结果表明:GNSS 气象观测能够较好地弥补探空测站与 GNSS 测站高程的不一致性;GNSS 精密单点定位技术获取的 ZTD 与探空产品估算的 ZTD 差值的 RMS 值小于 4cm。

关键词:GNSS; ZTD; 无线探空; 时空分辨率

中图分类号:P228.4

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号:2095-8110(2020)04-0131-07

Evaluating the Accuracy of ZTD Obtained by GNSS-PPP Using Radiosonde Products

ZHAO Tao^{1,2}, XIA Peng-fei¹, YE Shi-rong¹

(1. GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Radiosonde provides atmospheric products with high precision and high vertical resolution. In order to evaluate the accuracy of zenith troposphere delay(ZTD) obtained by GNSS precise point positioning, taking ZTD obtained by radiosonde products as true value, the data of four IGS observations in China and those of the nearby sounding stations from 2014 to 2018 are selected for calculation and analysis. Considering the inconsistency of spatial resolution between these two products, the GNSS meteorological observations are applied to compensate the mismatch of altitude between radiosonde stations and GNSS stations. The experiment results show that GNSS meteorological observations can well compensate the inconsistency of altitude between radiosonde stations and GNSS stations, and the RMS value of the difference between the ZTD obtained by GNSS precise point positioning technology and the ZTD estimated by sounding products is less than 4cm.

Key words: GNSS; ZTD; Radiosonde; Spatial and temporal resolution

收稿日期:2019-05-31;修订日期:2019-07-04

基金项目:国家自然科学基金(41904025);国家重点研发计划(2019YFC1509603);中国博士后基金面上(2019M652706);中央高校基本科研业务费(2042019kf0032);福建省工业引导性(重点)资助项目(2019H0044)

作者简介:赵涛(1998-),男,本科生,主要从事 GNSS 数据处理方面的研究。E-mail:1374971944@qq.com

通信作者:夏鹏飞(1989-),男,博士后,主要从事 GNSS 高精度数据处理及 GNSS 气象学研究。

E-mail:pfxial30@whu.edu.cn

0 引言

全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 具有全天候、连续性、全球覆盖等优势。在满足全球导航和定位需求的同时, GNSS 还可以向用户提供时间、速度和大气延迟等信息, 因而在测量、军事、大气研究等领域得到了广泛的应用^[1-3]。当前, 利用 GNSS 技术探测对流层大气已成为国内外研究的热点, 国内外研究者根据 GNSS 获得的天顶对流层延迟 (Zenith Troposphere Delay, ZTD) 反演对流层水汽时空分布信息, 并将其成功地应用到了气象和气候方面的研究中^[3]。在 20 世纪 80 年代, 美国的 Davis 和 Herring 等在该领域利用 GNSS 数据进行了许多理论研究及实验, 取得了丰硕的成果。随着 GNSS 观测精度的不断提高, GNSS 信号的大气延迟效应已可用于地球大气的探测中^[3]。一方面, GNSS 定位中求得的天顶延迟改正项可以用来计算测站上空可降水汽量的垂直积分, 这就是地基 GNSS 气象学; 另一方面, 一个安装在低轨卫星上的 GNSS 接收机在观测一个正在掩星过程中的 GNSS 卫星信号时, 可用反演方法提供地球大气的压力、温度和湿度的详细剖面, 这就是空基 GNSS 气象学^[3]。

地基 GNSS 大气反演通常建立在局域地基 GNSS 网的基础上, 通过双差处理消除卫星钟差的影响, 可实时提供各测站上空的大气可降水量 (Perceptible Water Vapor, PWV)^[3]。由于距离较近的相邻测站 ZTD 具有相关性, 双差模式只能获得测站间的相对 PWV, 而获取测站上空的绝对 PWV 则需要在网中某个测站上配置水汽辐射计进行定标才能实现。而 GNSS 非差模式, 即精密单点定位技术可以直接获取测站上方的 ZTD 和绝对 PWV。因此, GNSS 精密单点定位技术估算 ZTD 一直是国内外研究的热点^[4-5]。Shi 研究了中国大陆对流层变化的特征^[6], 认为 ZTD 的结果与国际 GNSS 服务 (International GNSS Service, IGS) 一样具有很高的准确性和可靠性。国内外许多学者都对对流层延迟模型的精度进行了评估^[7-9], 其中一些学者分析了对流层延迟计算结果在不同地区的精度^[10-13], 提出了新的对流层延迟反演方法^[14-15]。

ZTD 根据是否含有水汽可以分为 2 个部分: 天顶对流层干延迟 (Zenith Hydrostatic Delay, ZHD) 和天顶对流层湿延迟 (Zenith Wet Delay, ZWD)。

ZHD 变化较为平稳, 利用经验模型可以高精度地获取 ZHD。从 ZTD 中剔除 ZHD 后便可得到 ZWD, 利用湿度转换因子便可将 ZWD 转换为 PWV。根据上述内容可知, ZTD 的精度直接影响 PWV 的质量。因此, 评估 GNSS 精密单点定位技术获取 ZTD 的精度是 GNSS 气象学研究和应用的必然趋势。Olaleken 等分析了尼日利亚上空 ZTD 的时空变化^[16], ZTD 估计显示各站之间的空间依赖性较弱。陈于等分析了 IGS 精密星历和钟差对 ZTD 精度的影响^[17-18], 结果表明利用 IGS 精密轨道解算的 ZTD 与 IGS 提供的 ZTD 相当。Suparta 等利用自适应神经模糊推理系统建立了南极天顶路径延迟模型^[19]。Kalita 等认为对流层延迟是影响精确点定位方法收敛时间的关键因素之一, 讨论了对流层初始参数的方差和偏差对定位的影响^[20]。

无线探空提供了高精度和高垂直分辨率的大气参数 (大气压强、大气温度、相对湿度等), 利用这些大气参数可以计算出 ZTD。本文试图将探空产品获得的 ZTD 作为真值来评估 GNSS 估算的 ZTD。选取中国地区 4 个 IGS 测站的观测数据及其附近的探空产品进行试算, 并解决了两类观测产品空间分辨率不一致性的问题。

1 探空产品估算 ZTD

无线电探空仪简称探空仪, 是随着探空气球上升, 用敏感元件直接测量大气压力、温度和相对湿度层结曲线的无线电遥测仪, 是高空气象站主要仪器之一。无线电探空仪由感应元件、转换电路、编码装置、无线电发射机和电源组成。大气高度上的温度、压力和湿度分别由温度、压力和湿度元件感应, 其机械的或电的输出由转换开关依次接入编码器转变成电信号, 再由发射机经调幅或调频发送, 接收头在地面进行接收、解调和记录。利用探空测站历史探空数据计算 ZTD, ZTD 包括两部分分别为 ZHD 和 ZWD, 可以表示为

$$ZTD = ZHD + ZWD = \int_h^{\infty} (N_h^d + N_h^w) dh \quad (1)$$

其中, ZHD 表示天顶对流层干项延迟, ZWD 表示天顶对流层湿项延迟, N_h^d 和 N_h^w 分别表示干折射指数和湿折射指数。它们通常可以表示为

$$N_d = \left(k_1 \frac{P_d}{T} + \frac{k_1 \cdot R_d}{R_w} \cdot \frac{P_w}{T} \right) \cdot Z_d^{-1} \quad (2)$$

$$N_w = \left[\left(k_2 - \frac{k_1 \cdot R_d}{R_w} \right) \cdot \frac{P_w}{T} + k_3 \frac{P_w}{T^2} \right] \cdot Z_w^{-1} \quad (3)$$

其中, k_1, k_2, k_3 使用 Present study(1994) 模型。由式(2)和式(3)可以看出,这是一个积分过程,分别与不同高程处的 N_h^d 和 N_h^w 有关。在实际计算中,可以采用垂直分辨率的探空、无线掩星、数值天气预报等产品来求取。通常采用线性积分的方法分别将干项和湿项离散化

$$ZHD = \frac{10^{-6} \cdot \sum_{i=0}^{i=n-1} (N_{h_i}^d + N_{h_{i+1}}^d)}{2} \quad (4)$$

$$ZWD = \frac{10^{-6} \cdot \sum_{i=0}^{i=n-1} (N_{h_i}^w + N_{h_{i+1}}^w)}{2} \quad (5)$$

把式(4)和式(5)代入式(1),便可获得 ZTD。

中性大气延迟一般泛指电磁波信号在通过高度为 50km 以下的未被电离的中性大气层时所产生的信号延迟。由于探空测站观测值的高度一般只到达对流层顶处,在对流层顶以上没有观测数据或者只有部分高程有数据,故需要考虑对流层顶以上高度大气层产生的延迟值。由于对流层顶以上的大气层上水汽值可以忽略不计,本文直接利用 Saastamoinen 干延迟模型估算探空产品对流层顶以上的 ZTD 来弥补探空观测值的不足。

2 匹配探空测站与 GNSS 测站空间分辨率

为利用探空产品获得的 ZTD 评估 GNSS 精密单点定位技术估算 ZTD 的精度,选取中国区域 4 个 IGS 观测站及其附近探空测站 2014—2018 年共 5 年的数据。选取的测站分布如图 1 所示。

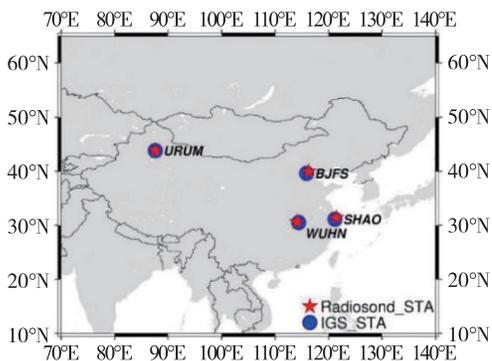


图 1 GNSS 测站及附近探空站的分布

Fig. 1 Distribution of GNSS stations and nearby radiosonde stations

本文利用 Bernese 5.2 软件,采用 IGS 分析中心提供的精密轨道和精密钟差文件,选用无电离层组合模型,将卫星截止高度角设置为 7° ,对 GNSS 观测

数据进行处理,每 1h 输出一次接收机坐标及接收机上方的 ZTD。由图 1 可以看出,GNSS 测站与探空测站相距很近,一般在 10km 以内,为了进行对比分析,需要事先统一两种产品的时空分辨率。探空产品的时间分辨率为 12h,而 GNSS 估算的 ZTD 为 1h。故每天可抽取出 GNSS 测站与探空产品测站相同时间点的 ZTD 值进行比较来匹配二者的时间分辨率。此外,文中计算了匹配时间分辨率后的探空测站与 GNSS 测站之间的高程差,以 BJFS 测站和 URUM 测站与其对应的探空测站为例,绘制图形如图 2 所示。

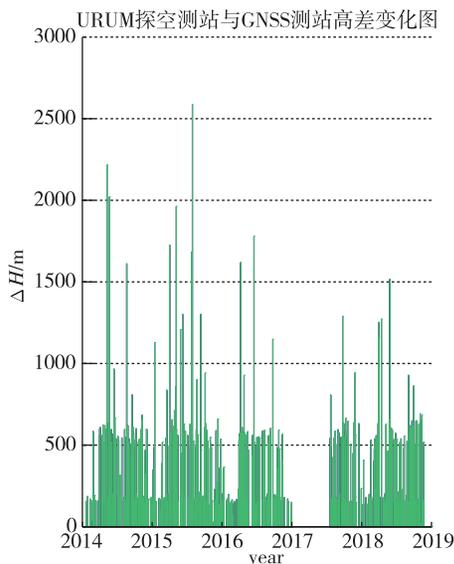
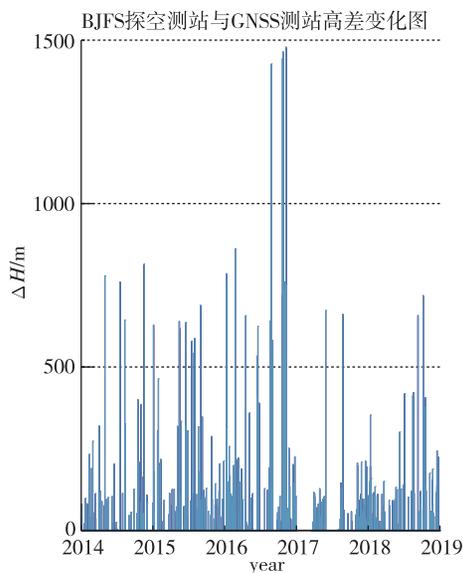


图 2 探空测站与 GNSS 测站高程差

Fig. 2 Elevation difference between radiosonde station and GNSS station

由图2可知,时间分辨率匹配完成后,探空测站与GNSS测站部分时刻存在高程差。以BJFS测站为例,高程差的均方差为99.48m,平均偏差为19.62m,最大偏差为1478m,其他测站的统计数据在表1中给出。在这样的情况下,无法评估GNSS精密单点定位技术估算ZTD的精度。因此,利用GNSS测站配置的气象观测值作为探空测站的起始观测值,弥补探空测站起始高度与GNSS测站不一致时的天顶方向对流层延迟ZTD,达到匹配两者的空间分辨率的目的。

表1 探空测站与GNSS测站高程差统计表

Tab. 1 Statistical table of elevation difference between radiosonde stations and GNSS stations m

测站	均方差	平均偏差	最大偏差
BJFS	99.48	19.62	1478
WUHN	182.30	72.98	1449
URUM	198.15	58.81	2586
SHAO	107.91	16.22	1821

完成GNSS实测数据与探空测站数据的时空分辨率匹配后,绘制探空测站天顶方向对流层延迟随时间的变化图如图3所示,分别对应BJFS、WUHN、URUM和SHAO测站。

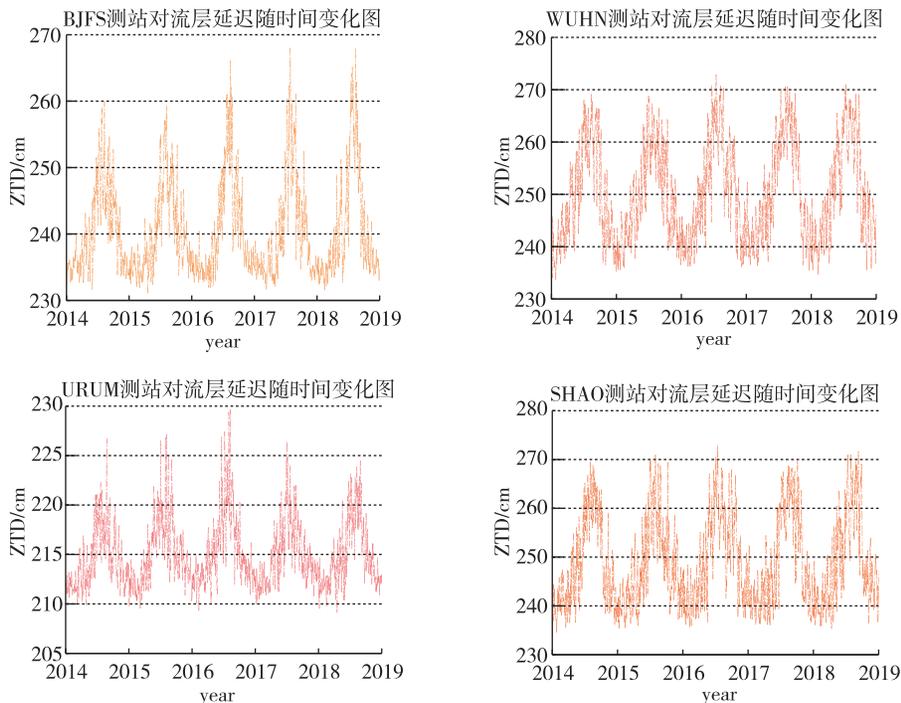


图3 探空测站对流层延迟随时间变化图

Fig. 3 Tropospheric delay with time in radiosonde stations

由图3可知,探空测站对流层延迟变化趋势可用三角函数进行较好的拟合,ZTD在一年中的变化具有明显的季节性,在气温高的季节较气温低的季节有明显的提升。这导致了許多对流层误差模型精度不稳定,难以做到精确化。因此,研究实测GNSS数据提供的对流层延迟的精度非常必要。

3 评估GNSS精密单点定位ZTD的精度

本文共选取中国地区4个探空测站的数据来评估利用GNSS精密单点定位技术估算ZTD的精度,并采用偏差(Bias)、均方差(Rms)、平均值

(Mean)、最大值(Max)和最小值(Min)五种指标来评价其精度。

为了分析实测ZTD的偏差,本文分别求出了4个测站GNSS估算的ZTD与探空测站估算的ZTD之差。限于篇幅,文中仅给出了BJFS测站和URUM测站的ZTD偏差序列DZTD,如图4所示。

从图4中可以看出,BJFS测站偏差分布呈现季节性变化,全年变化较为平稳;URUM测站在2017年缺失了部分数据,其偏差分布规律总体与BJFS测站一致。但BJFS测站与URUM测站的ZTD偏差有部分超过5cm。为了探究该情况出现的原因,

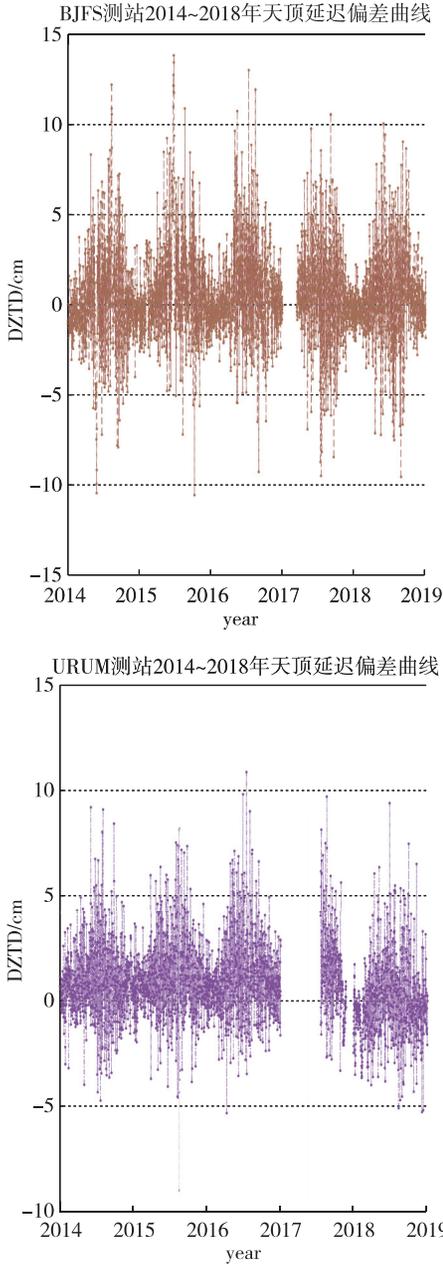


图 4 GNSS 测站 2014—2018 年天顶延迟偏差曲线
 Fig. 4 Zenith delay deviation curve for GNSS measurement stations in 2014-2018

绘制 BJFS 测站和 URUM 测站的 ZTD 偏差与测站的高程差的对比图如图 5 所示。

从图 5 中可以看出,ZTD 偏差与测站的高度差具有一定的相关性。在一定范围内,将 GNSS 的气象观测值作为起始数据可以弥合探空测站的数据;但当测站的高度差过大时,将 GNSS 的气象观测值作为起始数据则不能完全代替探空测站的数据。为了进一步探究这种现象出现的原因,绘制 ZTD 偏差和探空测站最大高度的对比图如图 6 所示。

从图 6 可以看出,ZTD 偏差与探空测站可观测

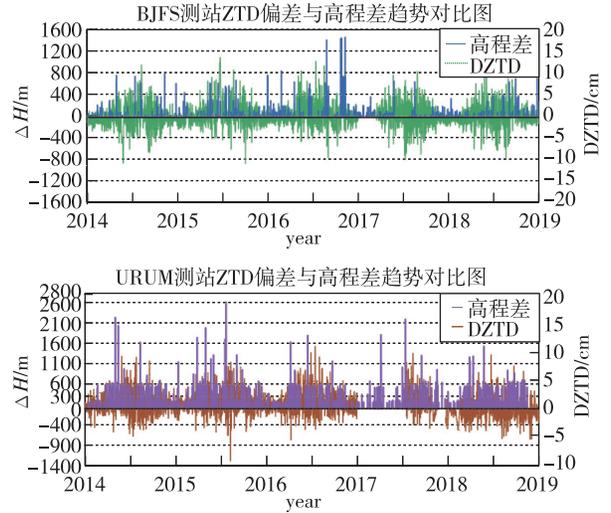


图 5 ZTD 偏差与高程差趋势对比图
 Fig. 5 Comparison of ZTD deviation and elevation difference trend

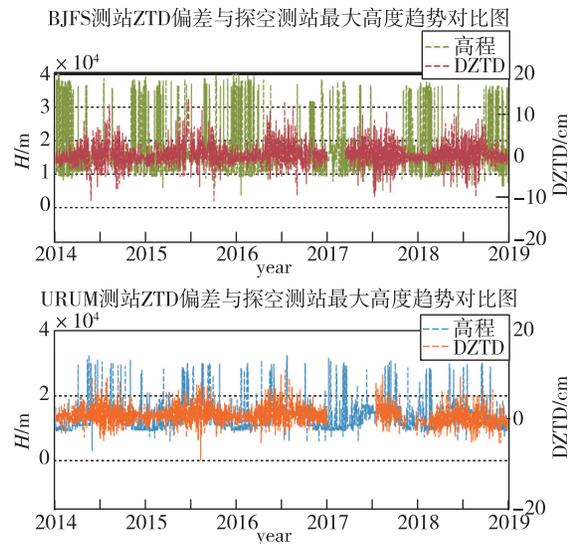


图 6 ZTD 偏差与探空测站最大高度趋势对比图
 Fig. 6 Comparison of ZTD deviation and maximum elevation trend by radiosonde station

的最大高度也具有一定的相关性。由于探空数据中缺失对流层顶以上的观测数据,但对流层顶以上高度水汽值可以忽略不计,故本文利用 Saastamoinen 干延迟模型估算探空产品对流层顶以上的 ZTD 以弥补探空观测值的不足。尽管 Saastamoinen 干模型精度很高,但本身也存在一定的误差,尤其在较高的大气层上利用 Saastamoinen 干模型估算 ZTD 的精度还有待进一步研究。

为分析 GNSS 精密单点定位技术获得 ZTD 的精度,分别统计了 4 个 IGS 测站与探空测站估算 ZTD 的偏差及其他指标如表 2 所示。

表2 探空测站获得的 ZTD 与 GNSS 估算的 ZTD 之间偏差的统计值

Tab. 2 Statistical value of deviation between ZTD obtained by radiosonde station and ZTD estimated by GNSS cm

测站名	Rms	Mean	Max	Min
BJFS	1.70	0.35	10.83	10.37
WUHN	2.49	1.18	15.53	-4.81
URUM	2.11	0.85	10.83	-9.09
SHAO	3.40	1.24	13.42	-12.84

表2分别记录了二者偏差的 Rms、Mean、Max 及 Min。从表2中可以看出,4个测站均方差均小于4cm,均值小于2cm,但最大值和最小值差异悬殊。为了分析偏差随季节的变化规律,下面进一步分析,以 BJFS 测站和 URUM 测站为例,计算2014—2018年每个月份偏差的均方差,结果如图7所示。

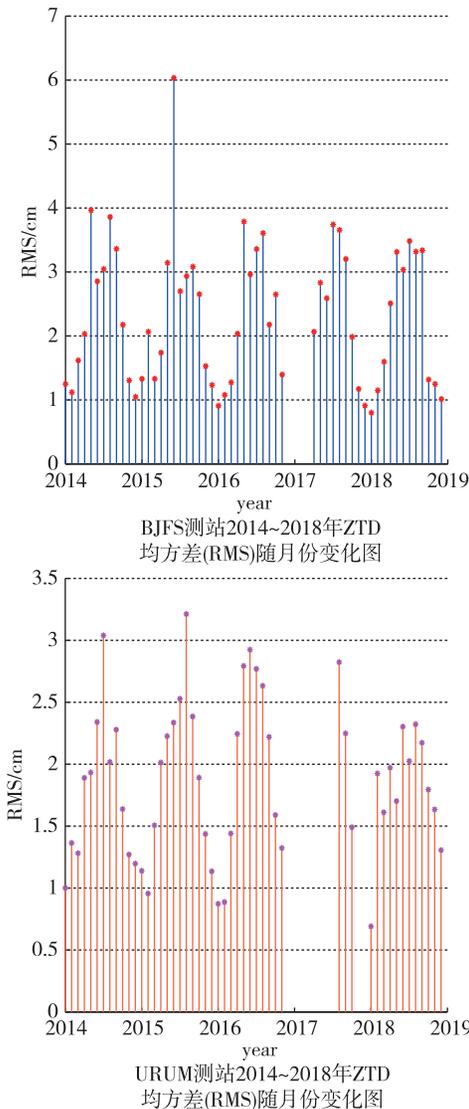


图7 ZTD 均方差(RMS)随月份变化图

Fig. 7 Variation of ZTD mean square error(RMS) with month

从图7可以看出,ZTD的季节性变化明显,夏秋季节 ZTD 的均方差明显高于春冬季节 ZTD 的均方差。这说明夏季空气中的水汽含量较多,GNSS 精密单点定位技术估算 ZTD 的精度受季节影响明显。

4 结论

本文将无线探空产品获得的 ZTD 作为真值评估 GNSS 精密单点定位获得的 ZTD 的精度,利用 GNSS 气象观测值来弥补探空测站与 GNSS 测站高程的不匹配。选取中国地区4个IGS观测值及其附近的探空测站2014—2018年的数据进行试算和分析,得到如下结论:

1)从精度分析结果来看,GNSS 测站实测天顶延迟与探空测站天顶延迟偏差的 Rms 值小于4cm;

2)从空间分布来看,SHAO 测站的 Rms 略大于其他测站的 Rms,这与上海沿海的地理环境有关;

3)从时间分布来看,GNSS 精密单点定位技术估算的 ZTD 精度受季节影响明显,春冬季节的解算结果精度优于夏秋季节的解算结果;

4)从数据处理来看,探空测站的数据精度与探空测站的测量垂直高程范围有关,另外,在较高的大气层上利用 Saastamoinen 干模型估算 ZTD 的精度还有待进一步的评估。

参考文献

- [1] Yu W, Ding X, Chen W, et al. Precise point positioning with mixed use of time-differenced and undifferenced carrier phase from multiple GNSS[J]. Journal of Geodesy, 2019, 93(6): 809-818.
- [2] Wang J, Wu Z, Semmling M, et al. Retrieving precipitable water vapor from shipborne multi-GNSS observations[J]. Geophysical Research Letters, 2019, 46(9): 5000-5008.
- [3] 焦明连. GNSS 气象探测技术及其应用[J]. 测绘科学, 2008, 33(S3): 149-150.
Jiao Minglian. GNSS meteorological detection technology and its application[J]. Surveying and Mapping Science, 2008, 33(S3): 149-150(in Chinese).
- [4] 徐宗秋, 于航, 向琦, 等. BDS 卫星天线相位偏差对 PPP 法估计 ZTD 的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2017, 36(4): 445-448.
Xu Zongqiu, Yu Hang, Xiang Qi, et al. BDS satellite antenna phase deviation's influence on PPP method to es-

- imate ZTD[J]. Journal of Liaoning University of Engineering and Technology (Natural Science Edition), 2017, 36(4): 445-448(in Chinese).
- [5] Wang K, Khodabandeh A, Teunissen P J, et al. MSE-impact of PPP-RTK ZTD estimation strategies [J]. Advances in Space Research, 2018, 61(12): 2955-2971.
- [6] Shi H, Zhang R, Nie Z, et al. Research on variety characteristics of mainland China troposphere based on CMONOC[J]. Geodesy and Geodynamics, 2018, 9(5): 411-417.
- [7] 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.
- Huang Jinfang, Lou Yidong, Zhang Weixing, et al. Re-analysis of data to calculate the accuracy of tropospheric delay in China[J]. Surveying and Mapping Science, 2018, 43(5): 13-17(in Chinese).
- [8] Labib B, Yan J, Barriot J, et al. Monitoring zenithal total delays over the three different climatic zones from IGS GPS final products: a comparison between the use of the VMF1 and GMF mapping functions[J]. Geodesy and Geodynamics, 2019, 10(2): 93-99.
- [9] 张双成, 张鹏飞, 范鹏飞. GPS 对流层改正模型的最新进展及对比分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(2): 91-95.
- Zhang Shuangcheng, Zhang Pengfei, Fan Pengfei. Recent progress and comparative analysis of GPS tropospheric correction models[J]. Geodesy and Geodynamics, 2012, 32(2): 91-95(in Chinese).
- [10] 黄良珂, 刘立龙, 周淼, 等. 亚洲地区 EGNOS 天顶对流层延迟模型的精度评估[J]. 大地测量与地球动力学, 2013, 33(4): 128-132.
- Huang Liangke, Liu Lilong, Zhou Miao, et al. Accuracy evaluation of EGNOS zenith tropospheric delay model in Asia[J]. Geodesy and Geodynamics, 2013, 33(4): 128-132(in Chinese).
- [11] 尹恒毅, 郭春喜, 姚顽强, 等. 不同对流层天顶延迟模型在陕西地区的精度及适用性分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(4): 391-394.
- Yin Hengyi, Guo Chunxi, Yao Wanqiang, et al. Accuracy and applicability of different tropospheric zenith delay models in Shaanxi Province[J]. Geodesy and Geodynamics, 2020, 40(4): 391-394(in Chinese).
- [12] 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.
- Ma Zhiquan, Chen Qinming, Gao Dezheng. Accuracy analysis of ZTD and ZWD using ERA-Interim data in China[J]. Geodesy and Geodynamics, 2012, 32(2): 100-104(in Chinese).
- [13] 陈钦明, 宋淑丽, 朱文耀. 亚洲地区 ECWF/NCEP 资料计算 ZTD 的精度分析[J]. 地球物理学报, 2012, 55(5): 1541-1548.
- Chen Qinming, Song Shuli, Zhu Wenyao. Accuracy analysis of calculating ZTD from ECWF/NCEP data in Asia[J]. Journal of Geophysics, 2012, 55(5): 1541-1548.
- [14] Song S, Zhu W, Chen Q, et al. Establishment of a new tropospheric delay correction model over China area[J]. Science China-Physics Mechanics & Astronomy, 2011, 54(12): 2271-2283.
- [15] Ding M, Hu W. Erratum and addendum to the paper 'A new ZTD model based on permanent ground-based GNSS-ZTD data', Survey Review, 2016, 48(351): 385-391 [J]. Survey Review, 2019, 51(366): 280-287.
- [16] Isioye O A, Combrinck L, Botai J O, et al. Evaluation of spatial and temporal characteristics of GNSS-derived ZTD estimates in Nigeria[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2018, 132(3): 1099-1116.
- [17] 陈于, 陈刚, 赵遐龄, 等. IGS 精密星历和钟差对天顶对流层延迟精度的影响[J]. 测绘科学, 2014, 39(10): 13-16.
- Chen Yu, Chen Gang, Zhao Xialing, et al. The influence of IGS precise ephemeris and clock difference on the accuracy of zenith tropospheric delay [J]. Surveying and Mapping Science, 2014, 39(10): 13-16(in Chinese).
- [18] 陈振国, 唐龙江. BDS/GPS 组合天顶对流层延迟的精度分析[J]. 测绘工程, 2017, 26(9): 5-9.
- Chen Zhenguo, Tang Longjiang. Accuracy analysis of zenith tropospheric delay in BDS/GPS combination [J]. Surveying and Mapping Engineering, 2017, 26(9): 5-9(in Chinese).
- [19] Suparta W, Alhasa K M. Modeling of zenith path delay over Antarctica using an adaptive neuro fuzzy inference system technique[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(3): 1050-1064.
- [20] Kalita J, Rzepecka Z. Impact of the initial tropospheric zenith path delay on precise point positioning convergence during active conditions [J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(4): 045102.