0254-6124/2020/40(2)-242–08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

YAO Xiang, CHEN Mingjian, WANG Jianguang, CHEN Rui. Adaptability analysis of GPT2w model in high latitudes (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2020, **40**(2): 242-249. DOI:10.11728/cjss2020.02.242

高纬度地区 GPT2w 模型的适应性分析

姚 翔[1] 陈明剑[2] 王建光[2] 陈 锐[2]

1(63798 部队 西昌 615000)

2(信息工程大学地理空间信息学院 郑州 450001)

摘 要 GPT2w 模型是现有精度最高的天顶对流层模型, 但是应用在高纬度地区时存在较大误差. 为更好地保障卫星导航定位系统在高纬度地区的高精度应用, 评定了 GPT2w 模型在高纬度地区的精度, 获取天顶对流层湿延迟、干延迟和总延迟, 探讨了 GPT2w 模型改正对精密单点定位的影响. 试验结果表明: GPT2w 模型在高纬度地区的精度为厘米级, 优于其在中低纬度地区的精度; 南北极地区天顶对流层呈现明显季节变化特征和区域一致性特征, 夏季天顶对流层总延迟高于冬季, 北极地区天顶对流层湿延迟明显高于南极地区, 北极地区天顶对流层随季节的变化幅度大于南极地区. PPP 试验结果表明, GPT2w 模型能够有效改善定位精度, 适应高纬度地区的高精度定位需求.

关键词 GPT2w 模型, 天顶对流层湿延迟, 天顶对流层延迟, 精密单点定位

中图分类号 P 351, P 228.4

Adaptability Analysis of GPT2w Model in High Latitudes

YAO Xiang[1] CHEN Mingjian[2] WANG Jianguang[2] CHEN Rui[2]

1(*63798 PLA Troops, Xichang* 615000)

2(*Institute of Geography Spatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou* 450001)

Abstract The GPT2w model is the most accurate zenith tropospheric model in current, but there exists large error at high latitudes. In order to better ensure the high-precision application of satellite navigation and positioning system in high latitudes, the accuracy of GPT2w model in high latitudes is evaluated, and GPT2w model is used to obtain zenith tropospheric wet delay, dry delay and total delay, and the impact of GPT2w model correction on precise point positioning is explored. The test results show that the accuracy of GPT2w model in high latitudes is in the centimeter level, which is better than that in the middle and low latitudes. The zenith tropospheric delay in the Antarctic and Arctic regions has obvious seasonal variation characteristics and regional consistency characteristics. The total tropospheric delay in summer is higher than that in winter. The tropospheric delay in the Arctic region is significantly higher than that in the Antarctic region, and the zenith tropospheric

2018-12-07 收到原稿, 2019-07-23 收到修定稿

E-mail: yaoxiang30303@126.com

delay in the Arctic region varies with the seasons more than the Antarctic region. The PPP test results show that the GPT2w model can effectively improve the positioning accuracy and adapt to high-precision positioning in high latitudes.

Key words GPT2w model, Zenith wet delay, Zenith tropospheric delay, PPP

0 引言

对流层延迟误差是全球定位系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 导航定位的主要误差源. 卫星至接收机信号传播方向上的对流层斜延迟最大可以达到 20 m, 对应天顶方向上的对流层延迟约为 2.3 m[1]. 高精度导航定位服务需要高精度的对流层模型进行改正, 现有对流层模型主要包括实际气象参数模型和经验模型. 实际气象参数模型利用实际气象参数得到对流层延迟, 例如 Hopfield 和 Sasstamonien 等模型. 由于实际气象参数难以获取, 采用先验气象参数模型进行对流层延迟计算更为方便. 先验气象参数模型通过累积的高质量数据计算得到气象参数, 根据站点位置进行内插得到站点的气象参数, 例如 IGGtrop[2−4], GZTDs[5], UNB 系列 (UNB/UNB3m)[6,7], EGNOS[8] 以及 GPT 系列 (GPT/GPT2/GPT2w)[9−11] 等模型. IGGtrop 模型根据天顶对流层延迟 (Zenith Troposphere Delay, ZTD) 的时间和空间特性, 在不同纬度地区采用不同的模型改正策略, 其均方根 (Root Mean Square, RMS) 误差达到 4 cm[11]. GZTDs 是在 GZTD 基础上建立的全球天顶对流层延迟模型, 其原理简单而精度较高 [12]. UNB3 模型设置的南北极参数相同, 不能准确反映高纬度地区的对流层空间相关特性 [13]. GPT2 模型在全球范围内具有很高的精度和稳定性, 但是在南北半球高纬度地区精度较差 [14]. GPT2w (Global Pressure and Temperature 2 wet) 模型在 GPT2 模型基础上进行改进, 增加了水汽垂直减率和加权平均温度等气象参数 [15], 同时提供更加精确的参数. 其中, 加权平均温度通过长时间的经验数据计算得到, 使得模型具有更高的精度和稳定性. 文献 [16] 和 [17] 验证了 GPT2w 模型在全球的气象参数精度, 证明其具有较好的精度和稳定性, 结合实测气象参数进行模型改正得到了较好的结果. 文献 [16] 得出在南极 GPT2w 模型精度为厘米级且与全球其他地区精度相当的结论. 但是, 文献 [16] 未对南北极等高纬度地区 GPT2w 模型进行全面分析, 因此在南北极等高纬度地区 GPT2w 模型的适应性还需要进一步验证, 并且需要进一步探究模型改正后对精密单点定位 (Precise Point Positioning, PPP) 的影响. 本文通过研究 GPT2w 模型在南北极高纬度地区的精度, 分析其在南北极地区的适应性以及模型改正对 PPP 的影响.

1 GPT2w 数学模型和原理

GPT2w 模型利用 2001 至 2010 年 10 年高质量的 ERA-Interim 数据进行建模, 可使用 1°×1° 和 5°×5° 两种分辨率数据, 空间分辨率的提升和改进能够提高模型精度和稳定性. 相比 GPT2 模型, 增加了加权平均温度和水汽垂直减率, 其表达式分别为

$$T_{\mathrm{m}}=\frac{\int_H^{\infty} e/T\,\mathrm{d}z}{\int_H^{\infty} e/T^2\,\mathrm{d}z}, \tag{1}$$

$$e=e_{\mathrm{s}}(P/P_{\mathrm{s}})^{\lambda+1}. \tag{2}$$

其中, T_{m} 为加权平均温度, T 为站点所处位置高度 H 处的温度 (K), P 为该高度处的气压, P_{s} 为地表气压, e 为该高度处的水汽压, e_{s} 为地表处的水汽压, λ 为水汽垂直递减率.

天顶对流层延迟由天顶干延迟 (Zenith Hydrostatic Delay, ZHD) 和天顶湿延迟 (Zenith Wet Delay, ZWD) 组成. 将 GPT2w 模型得到的加权平均温度和水汽垂直减率等气象参数输入到相应的天顶干延迟和天顶湿延迟模型中, 获取相应的延迟误差. 这里采用目前最精确的 Saastamoinen 模型 [18] 计算 ZHD (定义数学符号 D_{ZH}), 其表达式为

$$D_{\mathrm{ZH}}=2.227\,54\times P/g_{\mathrm{m}}, \tag{3}$$

$$g_{\mathrm{m}}=9.784\times[1.0-2.66\times10^{-3}\cos(2L)-2.8\times10^{-7}h]. \tag{4}$$

式中: D_{ZH} 表示天顶对流层干延迟误差; P 为站点所

处位置和高度处的大气压 (单位 MPa); L 为测站点的纬度; h 为测站所在位置的高程 (km); g_{m} 为重力常数.

将 GPT2w 模型计算得到的气象参数输入到 Askne 模型 [19], 计算得到天顶对流层湿延迟, 有

$$D_{\mathrm{ZW}} = 10^{-10} \times (k_2' + k_3/T_{\mathrm{m}}) \cdot \frac{R_{\mathrm{d}}}{(\lambda+1)g_{\mathrm{m}}} e_{\mathrm{s}}. \tag{5}$$

式中: T_{m} 为加权平均温度, e_{s} 为水汽压, g_{m} 为重力常数, $k_2' = 16.52 \times 10^4\,\mathrm{K \cdot MPa^{-1}}$, $k_3 = (3.776 \pm 0.004) \times 10^9\,\mathrm{K^2 \cdot MPa^{-1}}$, R_{d} 为干气体常量, D_{ZW} 表示天顶湿延迟 ZWD.

通过天顶干延迟和湿延迟误差, 进一步计算得到站点所在位置的天顶对流层延迟, 即

$$D_{\mathrm{ZT,GPT2w}} = D_{\mathrm{ZH}} + D_{\mathrm{ZW}}. \tag{6}$$

式中, $D_{\mathrm{ZT,GPT2w}}$ 表示采用 GPT2w 模型计算得到的天顶对流层总延迟 (Zenith Total Delay, ZTD).

2 数据来源与算例分析

2.1 数据来源

南北极高纬度地区温度普遍较低, 常年冰雪覆盖. 南极地区 4−10 月为冬季, 11−3 月为夏季; 为冰原气候, 温度低、降水少、相对湿度小, 年平均降水量 30∼50 mm. 北极地区 4−10 月为夏季, 11−3 月为冬季; 为苔原气候, 温度低、降水少、相对湿度小, 年平均降水量 100∼250 mm. 2.2.1 节和 2.2.3 节中试验采用 2016 年 1 月第 1 周和 8 月第 1 周, 即年积日为 (Day of Year, DOY) 1−7 和 214−220 共 14 天的 IGS 观测数据, 计算 GPT2w 模型在高纬度地区的天顶对流层湿延迟、干延迟和总延迟 ZTD, 将计算得到的 ZTD 值与 IGS (International GNSS Service) 的 ZPD (Zenith Path Delay) 数据作差, 分析模型精度, 研究高纬度地区的对流层延迟特性.

此外, 研究了分别对 GPT2w 和 Sasstamoinen 进行模型改正对于 PPP 定位精度的影响. 2.2.2 节试验采用 2016 年 1 月 1 日至 2017 年 12 月 31 日两年的试验数据, 分析对流层延迟在高纬度地区的特征. IGS 的 ZPD 数据精度为 4 mm, 时间分辨率为 5 min, 将 IGS 的 ZPD 数据及 ITRF 计算的周解坐标作为参考值. 表 1 列出了开展试验的站点坐标, 其中 CAS1 和 OHI3 站点位于南极地区, KIRU 和 METG 站点位于北极地区.

2.2 算例分析

2.2.1 GPT2w 模型精度评价

首先以 IGS 的 ZPD 作为参考值, 对 GPT2w 模型精度进行评价. 采用 GPT2w 模型计算得到 CAS1, OHI3, METG 和 KIRU 站点在 2016 年 DOY 1−7 和 214−220 为期 2 周的天顶对流层延迟. 将计算结果与 IGS 的 ZPD 数据作差, 得到作差时间序列, 分别见图 1 和图 2. 试验所选数据属于对流层延迟变化大的季节, 能够用来评定 GPT2w 模型在极地地区的精度. 采用偏差 BIAS、标准差 STD 和均方根误差 RMS 对 GPT2w 模型进行精度评价, 统计结果见表 2.

图 1 和图 2 分别给出了 CAS1, OHI3, METG 和 KIRU 站点 GPT2w 模型与 IGS ZPD 产品作差时间序列. 由图 1 可知, 偏差振幅区间为 $[-20, 15]$, 图 2 可知偏差振幅区间为 $[-100, 60]$. 由表 2 中统计结果可以看出, 在北极站, 2006 年 DOY 1−7 的平均 RMS 达到 12.4339 mm, DOY 214−220 的平均 RMS 达到 5.8916 mm; 在南极站, 2006 年 DOY 1−7 的平均 RMS 达到 9.8166 mm, DOY 214−220 的平均 RMS 达到 5.7112 mm. 中低纬地区 GPT2w 模型精度约为 4 cm, 高纬度地区 GPT2w 模型也具有较好的精度, 因此其适用于极地的特殊环境.

2.2.2 天顶对流层干延迟、湿延迟和总延迟时间序列分析

2.2.1 节中试验验证了 GPT2w 模型在南北极地区具有较好的精度. 这里采用 GPT2w 模型对南北极高纬度地区的天顶湿延迟、干延迟和对流层延迟分别进行计算, 研究南北极地区天顶对流层延迟量的差异. 由于南北极地区气候特点, 其降水量比中低纬度

表 1 站点坐标

Table 1 Site coordinates

站点	经度	纬度	高程/m
CAS1	110°31′10.9″	−66°17′0.1″	22.5
OHI3	302°5′55″	−63°19′15.9″	32.6
KIRU	20°58′6.4″	67°51′26.5″	391
METG	24°23′3″	60°14′31.1″	59.7

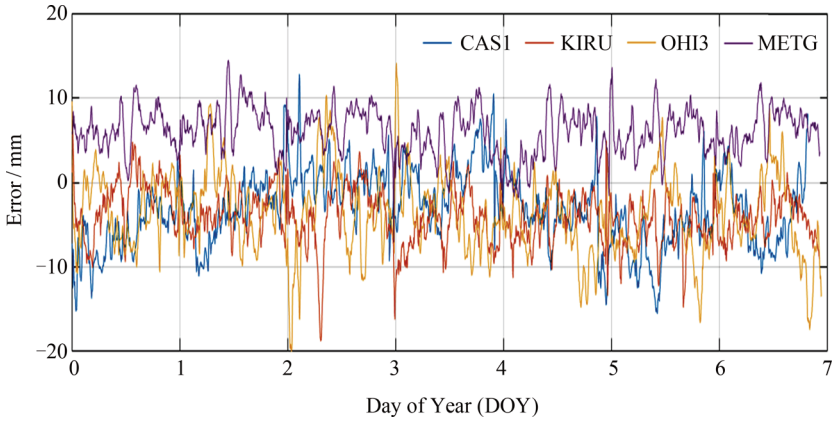

图 1　2006 年 DOY 1—7 GPT2w 模型与 IGS ZPD 数据作差

Fig. 1　Difference between GPT2w model and IGS ZPD products for DOY 1—7 in 2006

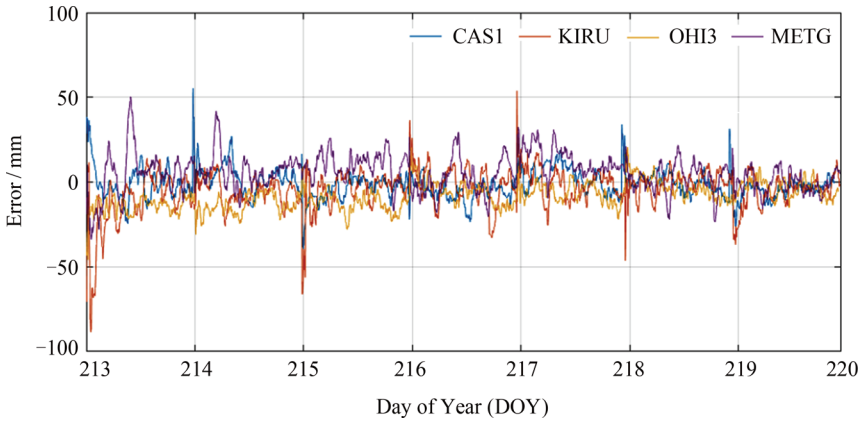

图 2　2006 年 DOY 214—220GPT2w 模型与 IGS ZPD 数据作差

Fig. 2　Difference between GPT2w model and IGS ZPD products for DOY 214—220 in 2006

表 2　GPT2w 模型 BIAS, STD 和 RMS 结果统计

Table 2　Statistics of BIAS, STD and RMS results of GPT2w model

站点名称	DOY 1—7			DOY 214—220		
	BIAS/mm	STD/mm	RMS/mm	BIAS/mm	STD/mm	RMS/mm
CAS1	−3.1877	4.4021	5.4347	−1.3070	8.4622	8.5604
KIRU	−4.1077	3.1379	5.1686	−4.3789	12.0320	12.8012
OHI3	−3.6585	4.7413	5.9878	−8.2636	7.3721	11.0728
METG	6.0379	2.7015	6.6145	5.5100	10.8115	12.0666

地区低, Askne 模型能够较精确地计算出对流层湿延迟, 采用 GPT2w 模型处理高纬度地区的 GPS 观测数据, 分析高纬度地区干湿延迟量级以及总天顶延迟量 (见表 3). 利用 2016 年 1 月 1 日至 2017 年 12 月 31 日两年数据, 得天顶对流层湿分量见图 3, 干分量见图 4, 总延迟量见图 5.

图 3 中给出了南极 CAS1 和 OHI3、北极 KIRU 和 METG 四个站点的两年湿延迟分量. 从图 3 可以看出, 计算得到的湿延迟分量存在明显的季节性变化和周期性变化. 在极地地区, 南极地区 4—10 月为冬季, 11—3 月为夏季, 北极与之相反. 北极地区季节性变化特征更明显, METG 站点 7 月份湿延迟分量最

表 3 湿延迟、干延迟和天顶对流层延迟平均值统计

Table 3 Statistics of average value of ZWD, ZHD and ZTD

站点名称	ZWD/mm	ZHD/mm	ZTD/mm
CAS1	30.5	2228.4	2257.6
KIRU	73.9	2194.7	2262.0
OHI3	94.2	2248.0	2294.7
METG	47.7	2291.0	2377.0

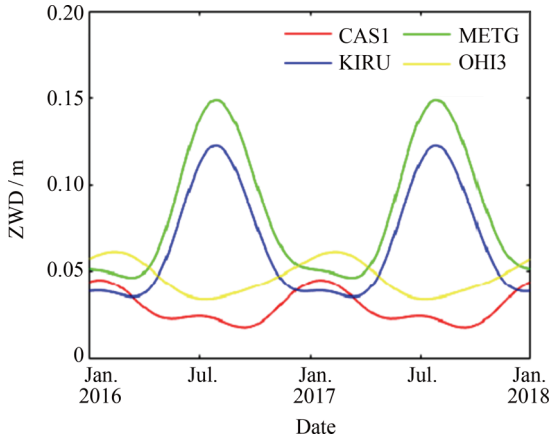

图 3 天顶对流层湿分量时间序列

Fig. 3 ZWD time series

高达到 0.15 m, KIRU 站点 7 月份湿延迟分量最高超过 0.1 m. 北极地区夏季湿延迟分量明显高于冬季湿延迟分量. 南极地区对流层湿分量季节性变化幅度小于北极地区, OHI3 站点对流层湿延迟分量最高达到 0.06 m, CAS1 站点湿延迟分量最高达到 0.045 m. 南极地区站点对流层湿延迟分量也表现出明显的季节性变化和周期性变化. 南北极地区站点湿分量表现出季节性变化趋势, 北极地区对流层湿延迟分量变化振幅高于南极地区, 原因在于北极地区夏季降水量和相对湿度高于南极地区. 但是北极地区内部站点之间的对流层湿延迟分量变化特征与南极地区具有较明显的一致性.

图 4 给出了南极 CAS1 和 OHI3、北极 KIRU 和 METG 四个站点两年的干延迟分量. 从图 4 中可以看出, 计算得到的干延迟分量存在明显的周期性变化, METG, CAS1 和 OHI3 站点的季节性变化相对图 5~7 中的湿延迟分量而言不是很明显. METG, KIRU, CAS1 和 OHI3 站点的季节性变化振幅不明

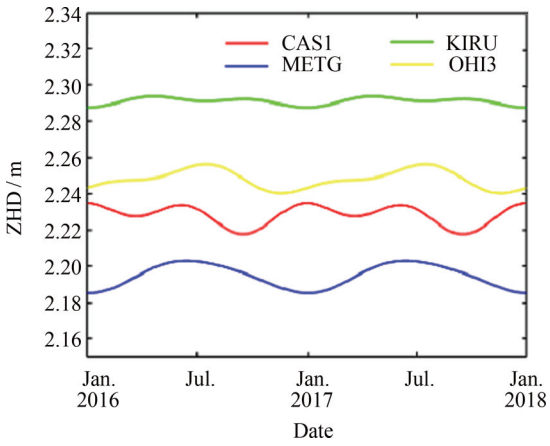

图 4 天顶对流层干分量时间序列

Fig. 4 ZHD time series

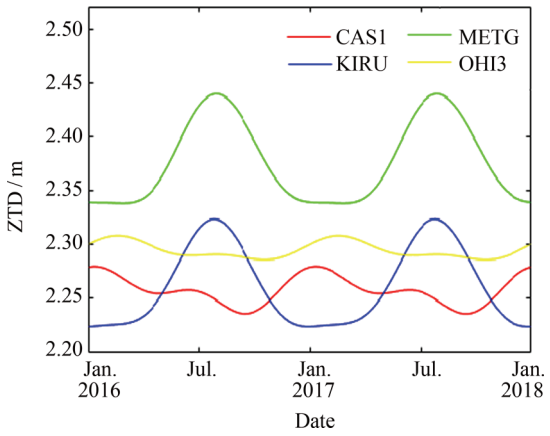

图 5 天顶对流层总延迟

Fig. 5 ZTD time series

显, 其中 KIRU 站点季节性变化最强, 但是天顶对流层干分量极值之差最大为 0.02 m, 其余站点天顶对流层干分量极值之差小于 0.02 m.

极地地区天顶对流层变化量随季节的变化具有相对稳定的趋势. 南极地区天顶对流层干延迟分量在 CAS1 和 OHI3 站点的变化范围为 2.22~2.26 m, 北极地区站点 METG 站点天顶对流层干分量的范围为 2.28~2.3 m, KIRU 站点天顶对流层延迟干分量范围为 2.18~2.21 m. METG 与 KIRU 站点天顶对流层干分量最大值之差约 0.1 m. 南极地区站点天顶对流层延迟干分量相差不大, 而北极两个站点相差较大. 主要原因在于北极 METG 站点位于北纬 60° 左右, KIRU 站点位于北纬 67° 左右, 而两站点天顶对流层延迟干分量的差异主要在于纬度位置. 南北极地区站点的天顶对流层干分量具有较稳定趋势.

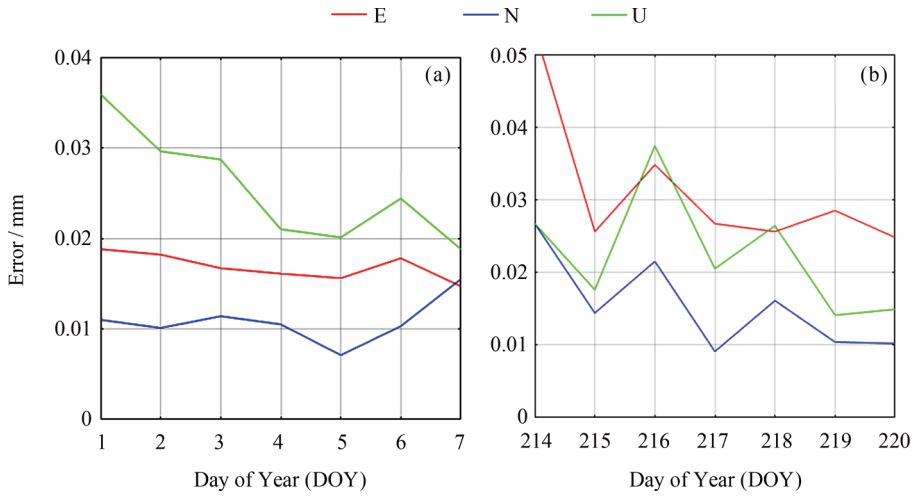

图 6　METG 站点 Sasstamoinen 模型改正后的 E, N 和 U 方向定位偏差时间序列

Fig. 6　E, N and U direction positioning deviation time series after correction of the Sasstamoinen model at the METG site

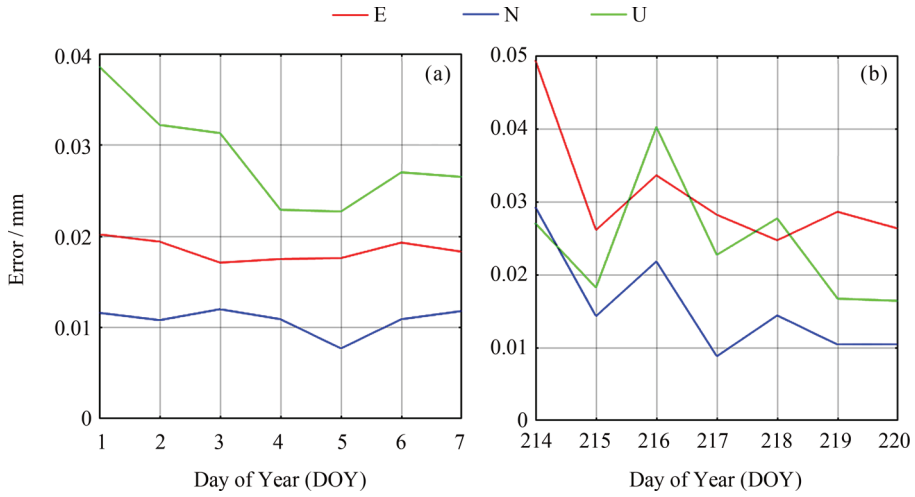

图 7　METG 站点 GPT2w 模型改正后的 E, N 和 U 方向定位偏差时间序列

Fig. 7　E, N and U direction positioning deviation time series after correction of the GPT2w model at the METG site

图 5 给出了南极 CAS1 和 OHI3、北极 KIRU 和 METG 四个站点两年的天顶对流层延迟时间序列. 从图 5 可以看出, METG 和 KIRU 站点天顶对流层延迟季节性和周期性特征明显, 变化趋势与对流层湿分量相同. 季节性特征方面: 北极地区 METG 站点 7 月份对流层延迟量达到峰值 2.44 m, 1 月份达到最小值 2.34 m; KIRU 站点 7 月份对流层延迟量峰值达到 2.33 m, 1 月份达到最小值 2.23 m. 南极地区对流层延迟相对于北极地区而言, 其对流层随时间变化更平缓, 季节性特征不明显. 但是南极地区站点夏季的对流层延迟高于冬季, CAS1 站点探测到的天顶对流层延迟波动范围为 2.23~2.28 m, OHI3 站点波动范围为 2.28~2.31 m. 北极地区站点的对流层延迟波动变化明显高于南极地区, 南极地区站点之间的对流层变化趋势与北极地区基本一致, 表现出极地地区对流层变化的区域特征性和一致性.

2.2.3　GPT2w 模型改正对 PPP 的影响

为了研究 GPT2w 模型改正后对 PPP 定位精度的影响, 这里采用 METG 站点 1 月和 8 月中连续 7 天的 GPS 观测数据进行 PPP 试验. 以 ITRF 坐标

作为参考, 分别对 Sasstamoinen 和 GPT2w 进行模型改正, 得到时间偏差序列. 图 6 和图 7 分别是 METG 站点的 RMS 统计结果, 其他三个站点的 RMS 平均值列于表 4. 精密单点定位的处理策略是: 采用无电离层组合载波相位和伪距观测量, 采样间隔为 30 s, 卫星截止高度角为 10°, 参数估计方法采用前向卡尔曼滤波, 卫星轨道误差、卫星钟差和地球自转误差改正采用 IGS 精密轨道、钟差和 ERP 产品, 卫星端、接收机端天线相位中心偏差采用 IGS 分析中心的 igs08.atx 文件进行改正, 对流层和天线相位缠绕误差采用模型改正的方法进行处理. 计算通过 GPSTK (GPS Tool Kit) 源码编程实现, 并对 Sasstamoinen 和 GPT2w 模型改正后的 PPP 均方根平均值进行统计, 其中, E, N, U 分别表示东、北、天方向, 统计结果见表 4.

图 6 和图 7 分别给出了对 Sasstamoinen 和 GPT2w 进行模型改正后 METG 站点的 E, N, U 方向定位偏差时间序列. 从图 6 可以知道, METG 站点 2006 年 DOY 214−220 的 E, N, U 方向的 RMS 平均值高于 DOY 1−7, 其中 E 方向定位误差较大. 从表 4 中可以看出: 模型改正后, Sasstamoinen 在 E 方向精度优于 3 cm, N 方向精度优于 4 cm, U 方向精度优于 5 cm; GPT2w 模型在 METG, CAS1, KIRU 和 OHI3 站点的 E 方向精度优于 2.5 cm, N 方向精度优于 3.5 cm, U 方向上精度优于 2.5 cm. 从表 4 中结果可知, 模型改正后 GPT2w 的 PPP 定位结果略优于 Sasstamoinen 的结果, 其能较好地适应高纬度地区的定位需求.

表 4 对 Sasstamoinen 和 GPT2w 进行模型改正后的 PPP 均方根平均值统计

Table 4 Statistics of PPP Root Mean Squares corrected by Sasstamoinen and GPT2w Models

站点名称	模型名称	均方根平均值/cm		
		E	N	U
METG	Sasstmoinen	2.485	1.34	2.615
	GPT2w	2.405	1.315	2.4
CAS1	Sasstmoinen	1.66	3.88	4.7
	GPT2w	1.49	3.13	3.38
KIRU	Sasstmoinen	1.89	0.68	1.56
	GPT2w	0.58	0.67	1.28
OHI3	Sasstmoinen	2.08	0.99	0.86
	GPT2w	2.07	0.97	0.77

3 结语

通过对高纬度地区站点 GPS 观测数据进行处理和分析, 验证了 GPT2w 在高纬度地区的精度, 计算得到天顶对流层湿延迟和总延迟量, 分析了模型改正对于 PPP 定位的影响, 得到结论如下.

(1) GPT2w 模型在高纬度地区具有较高的精度, 平均 RMS 小于 1.5 cm, 优于中低纬度地区的精度.

(2) 北极地区天顶对流层湿延迟随季节变化幅度高于南极地区, 而南极地区变化平缓. 其原因在于北极地区降水和相对湿度高于南极地区. 南北极对流层延迟表现出明显的季节性和周期性特征. 南极地区站点之间对流层随时间的变化趋势与北极地区基本一致, 表现出极地地区对流层变化的区域一致性.

(3) 模型改正后 GPT2w 的 PPP 定位的 E 方向精度优于 2.5 cm, N 方向优于 3.5 cm, U 方向优于 2.5 cm, 相比 Sasstamoinen 在精度上有小幅改善.

参考文献

[1] LI Zhenhang, ZHANG Xiaohong. New Techniques and Precise Data Processing Methods of Satellite Navigation and Positioning [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2009 (李征航, 张小红. 卫星导航定位新技术及高精度数据处理方法 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2009)

[2] LI Wei, YUAN Yunbin, OU Jikun, *et al*. A new global zenith tropospheric delay model IGGtrop for GNSS applications [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2012, **57**(17): 2132-2139

[3] LI Wei, YUAN Yunbin, OU Jikun, *et al*. New versions of the BDS/GNSS zenith tropospheric delay model IGGtrop [J]. *J. Geodesy*, 2015, **89**(1): 73-80

[4] LI Wei ,YUAN Yunbin, OU Jikun, *et al*. IGGtrop_SH and IGGtrop_rH: two improved empirical tropospheric delay models based on vertical reduction functions [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2018, **56**(9): 1-13

[5] YAO Yibin, ZHANG Bao, YAN Feng, *et al*. Two new sophisticated models for tropospheric delay corrections [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2015, **58**(5): 1492-1501 (姚宜斌, 张豹, 严凤, 等. 两种精化的对流层延迟改正模型 [J]. 地球物理学报, 2015, **58**(5): 1492-1501)

[6] LEANDRO R F, SANTOS M C, LANGLEY R B. UNB neutral atmosphere models: development and performance. Proceedings of ION NTM 2006 [C]//The 2006 National Technical Meeting. Monterey: the Institute of

Navigation, 2006: 564-573

[7] LEANDRO R F, LANGLEY R B, SANTOS M C. UNB3m_pack: a neutral atmosphere delay package for radiometric space techniques [J]. *GPS Solut.*, 2008, **12**(1): 65-70

[8] PENNA N, DODSON A, CHEN W. Assessment of EGNOS tropospheric correction model [J]. *J. Navig.*, 2001, **54**(1): 37-55

[9] KOUBA J. Testing of Global Pressure/Temperature (GPT) model and Global Mapping Function (GMF) in GPS analyses [J]. *J. Geodesy*, 2009, **83**(3/4): 199-208

[10] LAGLER K, SCHINDELEGGER M, BÖHM J, *et al*. GPT2: empirical slant delay model for radio space geodetic techniques [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2013, **40**(6): 1069-1073

[11] ZHANG H, LI Wei, YUAN Yunbin, *et al*. Assessment of three tropospheric delay models (IGGtrop, EGNOS and UNB3m) based on precise point positioning in the Chinese region [J]. *Sensors*, 2016, **16**(1): 122

[12] YAO Yibin, HE Changyong, ZHANG Bao, *et al*. A new global zenith tropospheric model GZTD [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2013, **56**(7): 2218-2227 (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)

[13] CHEN W, GAO C, PAN S. Assessment of GPT2 empirical troposphere model and application analysis in precise point positioning [J]. *Lect. Notes Elect. Eng.*, 2014, **304**(2): 451-463

[14] YAO Yibin, CAO Na, XU Chaoling, *et al*. Accuracy assessment and analysis for GPT2 [J]. *Acta Geodaet. Cartograph. Sin.*, 2015, **44**(7): 726-733 (姚宜斌, 曹娜, 许超钤, 等. GPT2 模型的精度检验与分析 [J]. 测绘学报, 2015, **44**(7): 726-733)

[15] JOHANNES Böhm, GREGOR Möller, SCHINDELEGGER M, *et al*. Development of an improved empirical model for slant delays in the troposphere (GPT2w) [J]. *GPS Solut.*, 2015, **19**(3): 433-441

[16] HUA Zhonghao, LIU Lintao, LIANG Xinghui. An assessment of GPT2w model and fusion of a troposphere model with in situ data [J]. *Geomat. Inf. Sci. Wuhan Univ*, 2017, **42**(10): 1468-1473 (滑中豪, 柳林涛, 梁星辉. GPT2w 模型检验以及对流层模型的参数互融 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2017, **42**(10): 1468-1473)

[17] KONG Jian, YAO Yibin, WANG Zeming, *et al*. The accuracy analysis of GPT2w at antarctic area [J]. *Acta Geodaet. Cartograph. Sin.*, 2018, **10**: 1001-1595 (孔健, 姚宜斌, 王泽民, 等. GPT2w 模型在南极地区精度分析 [J]. 测绘学报, 2018, **10**: 1001-1595)

[18] SAASTAMOINEN J H . Atmospheric correction for the troposphere and the stratosphere in radio ranging satellites [J]. *Use Artif. Satell. Geod.*, 1972, **15**(6): 247-251

[19] ASKNE J, NORDIUS H. Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data [J]. *Radio Sci.*, 2016, **22**(3): 379-386