

DOI:10.13203/j.whugis20150758



文章编号:1671-8860(2017)010-1468-06

GPT2w 模型检验以及对流层模型的参数互融

滑中豪^{1,2} 柳林涛² 梁星辉²

1 中国科学院大学,北京,100049

2 中国科学院测量与地球物理研究所大地测量与地球动力学国家重点实验室,湖北 武汉,430077

摘要:各种对流层经验模型中,GPT2w 模型是目前标称精度最高的对流层经验模型,其在模型化对流层延迟的同时,也提供具体的模型化气象元素。以 USNO 的 ZTD 产品检验模型 ZTD 精度;以 IGRA 发布的大气廓线数据,对模型加权平均温度 T_m 、水汽直减率 λ 的精度进行验证。计算发现,模型加权平均温度 T_m 具有 -2.56K 的系统偏差,改正该偏差后,模型 ZTD 对比 USNO 偏差从 -1.38 mm 提升至 -0.3 mm;还验证了模型水汽直减率 λ 的两种获取方式具有很好的一致性。提出以测站气压 P 、测站温度 t 、测站相对湿度 hr 为实测气象元素,以校正后的 T_m 、高精度的 λ 为经验气象元素,作为对流层延迟模型输入参数的互融方法。该互融方法计算 ZHD、ZWD 经验模型分别采用目前最优的 Saast 静力学延迟模型和 Askne & Nordius 湿延迟模型。以 USNO 发布的 340 个 IGS 跟踪站的对流层延迟数据作为参考,该互融方法较直接气象元素法、校正后的 GPT2w 模型均有显著精度提升。在不可获取气象数据的前提下,校正后的 GPT2w 模型具有很高的先验精度;若可获取近实时气象数据(如自动气象站),则推荐采用新的参数互融模型。

关键词:GPT2w 模型;天顶对流层延迟;加权平均温度;实测气象元素

中图法分类号:P228

文献标志码:A

空间大地测量中,电磁波信号到达接收机之前,电磁波信号传输经过中性大气层,信号受到大气折射的影响,发生路径弯曲和时间延迟。其中路径弯曲的影响,被流体静力学延迟投影函数所吸收^[1];时间延迟表现为中性大气层延迟。中性大气层延迟,通常统称为对流层延迟,在天顶方向引起误差大约为 2.3 m,低高度角时可达 20 m,是导航定位过程中不可忽视的误差^[2]。

一般将信号传播路径上的斜向对流层延迟通过投影函数投影到天顶方向,即为天顶对流层延迟(zenith tropospheric delay,ZTD)。因对流层中水汽与大气分子极性不同,为方便研究,将天顶对流层延迟(ZTD)分为天顶静力学延迟(zenith hydrostatic delay,ZHD)和天顶湿延迟(zenith wet delay,ZWD)^[2-4]:

$$ZTD = ZHD + ZWD \quad (1)$$

再采用投影函数,将天顶方向大气延迟投影到斜径方向,用以提高实时导航与定位解算过程中对流层延迟参数的初始精度。由于目前水平梯度模型格网空间分辨率不高,投影函数一般不考

虑水平梯度对斜径方向对流层延迟的影响。本文只对天顶延迟的模型化精度做出分析,不考虑斜径方向模型化影响。

为模型化该天顶对流层延迟,学者们定性、定量分析电磁波信号的在大气中的传输原理,基于实测气象数据建立的数学关系式,称作对流层延迟模型^[3-4]。对各气象元素进行再分析,基于多年实测气象元素引入经验气象元素的全球格网,作为对流层延迟模型建立的输入参数;或对全球对流层延迟格网数据再分析,直接建立无气象元素输入的对流层模型,称作对流层经验模型^[5-9]。

文献[5-6]基于美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction,NCEP)气象数据建立 TropGrid2 模型和 IGGtrop 模型;文献[7-9]基于欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts,ECMWF)的再分析(ECMWF Re-Analysis,ERA-Interim)气象数据建立 GPT2w 模型和 ITG 模型。以全球分布的 IGS(international GNSS service)跟踪站天顶对流层延迟数据作为

收稿日期:2016-05-16

项目资助:国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ120045);国家自然科学基金(41304023)

第一作者:滑中豪,硕士生,从事 GNSS 精密数据处理以及 GNSS 气象学研究。sucfay@gmail.com

通讯作者:柳林涛,研究员。llt@asch.whigg.ac.cn

精度验证的数据源,在 IGS 站点进行天顶延迟精度对比,标称精度均达到偏差小于 5 mm、均方差小于 40 mm^[5-9]。此外,文献[7]运用 ray-tracing 法^[10]分析 ECMWF 气象数据,对 GPT2w 模型进行全球格网点天顶对流层延迟精度分析,其精度表现为偏差 2 mm、均方差 39 mm,是目前精度最高的模型。

上述各主要经验模型中,GPT2w 模型是精度最高、引入经验气象元素建立且完全公开发布的对流层延迟模型。作为 GPT 系列的最新产品,该模型引入新的气象参数水汽直减率 λ 以改善 ZWD 模型精度;采用目前模型化精度最高的 Saastamoinen ZHD 模型和 Askne & Nordius ZWD 模型^[8],且对比 IGS 数据和依据 ray-tracing 法的计算数据均具有最高的模型化对流层延迟精度^[7];同时该模型提供一些不便直接测量的重要气象元素经验值(加权平均温度 T_m 、水汽直减率 λ),是精密计算 ZWD 不可或缺的数据;但提供一些其他经验气象元素(如测站气压 P 、测站温度 t 、测站水汽压 e),只在长时间段具有很高的统计精度,具体到实时计算,模型化数据常与实际气象状况出入很大。

本文就 GPT2w 模型的对流层延迟精度、主要经验气象元素精度进行验证,并引入实测气象数据,提出经验模型与实测气象数据的互相融通。如果完全基于实测气象数据得到对流层延迟信息,由于一些气象元素不易获取(如 T_m 、 λ),只能采用模型简单、精度低对流层延迟模型,如 Saastamoinen ZWD 模型;完全基于模型化的平滑经验气象元素得到对流层延迟信息,丢失了实时气象元素的细节信息,缺少时效性,如 GPT2w 模型。本文提出互融方案,将高精度的经验气象元素和富有时效性的实测气象元素,作为精密对流层延迟模型的输入参数,从而改善现有对流层延迟解决方案的问题。

1 对流层延迟模型分析

这里 ZHD 模型选用目前最常用、理论推导精密的 Saastamoinen 模型^[3],ZWD 模型选用结构完善、精度较高的 Askne & Nordius 模型^[4]:

$$\text{ZHD} =$$

$$\frac{0.002\ 276\ 8P}{1 - 0.002\ 66\cos(2 \cdot lat) - 0.28 \times 10^{-6} \cdot h_s} \quad (2)$$

$$\text{ZWD} = 10^{-6} (k'_2 + k_3/T_m) \frac{R_d}{(\lambda + 1)g_m} e \quad (3)$$

式中, lat 为测站地理纬度; h_s 为测站大地高; g_m 为全球平均重力加速度; k'_2 、 k_3 以及 R_d 均为模型中的经验常数。两模型中参与计算的气象元素为测站压强 P 、测站水汽压 e ^[1]、加权平均温度 T_m ^[2] 与水汽直减率 λ 。

其中测站水汽压 e 、加权平均温度 T_m 与气象元素的关系为:

$$e = \frac{hr}{100} 6.107\ 8 \cdot \exp\left(\frac{17.1 \cdot t}{235 + t}\right) \quad (4)$$

$$T_m = \int_{h_s}^h \frac{e}{T} dh / \int_{h_s}^h \frac{e}{T^2} dh \quad (5)$$

$$T_m = a + bT_s \quad (6)$$

式(4)中,水汽压 e 是相对湿度 hr 、温度 t 的函数;式(5)为加权平均温度 T_m 的定义式,式中 e 、 T 为高度 h 处的水汽压、温度,其中 $T_s = 273.15 + t$,单位为 K 。依定义式(5)的加权平均温度可由探空气球测量得到的大气廓线求得;文献[2]基于美国 13 个无线电探空仪站得到的 8 718 个大气廓线,提出 T_m 与 t 的线性关系式(6),该模型对比大气廓线的精度为 $\pm 4.74K$;文献[11]根据加权平均温度和函数内积的定义,推导出 T_m 与 t 的非线性关系式,对比线性关系式表现精度一致;文献[12]通过比较分析发现,基于本地化探空数据的 T_m - t 单因素线性关系有足够高的精度,即式(6)使用时需要进行区域模型化;鉴于此,文献[13]在全球范围内提出了沿纬度带变化的 T_m - t 线性系数,并验证了该方案在全球比文献[2]中的模型具有更高的精度;此外 GPT2w 模型提供加权平均温度 T_m 的全球网格。

设 ZHD、ZWD 分别为 2 300 mm、200 mm,模型参与计算的气象参数为实测数据。依式(2),如果大气压强有 1% 的误差(约 10 hPa),引起 ZHD 误差约为 23 mm;分母约等于 1,如果先验测站先验高程 h_s 有 10 m 的误差,对分母的影响约为 0.28×10^{-5} ,对 ZHD 的精度几乎无影响。依据式(3),如果水汽压误差为 1%,即式(4)中 hr 有 1% 的误差,则 ZWD 误差为 2 mm。

此外,大气压强、水汽压、温度与高程均有很强的相关性,例如 10 m 的高程误差会引起大约 1.2 hPa 的大气压强误差^[14],从而引起 ZHD 误差约 2.5 mm。因此若采用模型气象元素计算对流层延迟,需有较高精度的高程先验值。

经验模型基于模型气象数据,在全球范围内具有很高的统计精度,但在具体站的具体时刻,气象数据常会有较大的误差,实用时引起更大的延迟误差。因此,为使对流层延迟模型发挥更好的

实时效果,这里倡议采用经验气象元素与实测气象元素相结合的互融方案。

2 模型精度

美国海军天文台(United States Naval Observatory, USNO)提供各 IGS 站自 2011 年起的对流层天顶路径延迟 ZPD 数据(ftp://maia.usno.navy.mil/GPS/tropo),该结果为 Bernese 5.0 的站点定位模块计算得到的后处理结果,时间分辨率为 300 s。这里选用 2014 年 USNO 发布的 IGS 站 ZTD 数据,验证 GPT2w 模型 ZTD 精度。为数据分析方便,GPT2w 模型值以 6 h 为间隔计算,同样 USNO 数据重采样间隔为 6 h。由于 USNO 发布的 ZTD 数据为原始数据,需要对其数据质量与数据完备性进行判断,这里删除 2014 年 ZTD 先验均误差年平均值大于 10 mm、有效观测时间少于 180 d 的测站,得到高数据质量、数据完备的测站 340 个。

计算发现,GPT2w 模型对比 USNO 的 ZTD 精度为:偏差-1.38 mm,均方差 36 mm。如图 1 所示,精度离散程度较大的测站(均方差大于 40 mm),主要位于水汽活跃的沿海地带,如澳大利亚地区、东北亚地区。

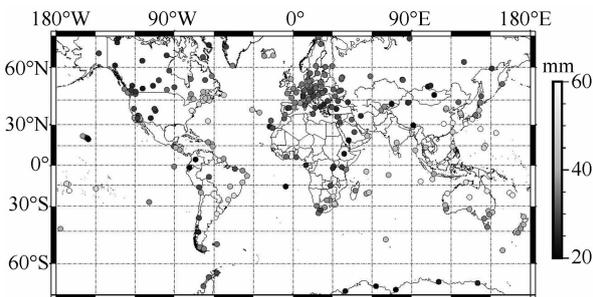


图1 2014年340个IGS站的模型对比USNO的ZTD精度(RMS)/mm

Fig. 1 The RMS Between the ZTD from GPT2w Blind Model and USNO for 340 IGS Sites During 2014/mm

3 气象元素值与模型值

测站的气象观测元素有多种来源:IGS 提供各测站观测数据,也提供气象观测文件(ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gnss/data/daily/),即 m 文件,经检查多数测站 m 文件数据质量较差、完备性低;IGRA(Integrated Global Radiosonde Archive)连续发布全球分布的 1000 多个 WMO

(World Meteorological Organization)气象站的地面气象观测数据及探空气球得到的大气廓线数据(ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/igra/),数据质量高且数据丰富,由于观测设备限制,其数据分辨率一般为 12 h;GGOS(Global Geodetic Observing System)Atmosphere 提供全球 IGS 测站各主要气象元素数据(http://ggsatm.hg.tuwien.ac.at/delay/site/),其数据源为 ECWFMF 的数值数据,具有良好的可靠性与数据完备性,时间分辨率为 6 h。本文选用后两组数据进行精度检验。

依据延迟模型确定对流层延迟需要的输入气象元素为测站气压 P 、测站水汽压 e 、加权平均温度 T_m 和测站上空水汽直减率 λ 。其中测站气压 P 为方便实时测量的气象元素;测站水汽压 e 可由方便测量的测站温度 t 、相对湿度 hr 确定;加权平均温度 T_m 与测站气温 t 存在区域线性统计关系,或可直接由 GPT2w 模型提供,本文对这两种 T_m 对比气象数据做出比较;IGRA 提供丰富的大气廓线,可用于检验水汽直减率 λ 精度。

3.1 数据预处理

鉴于 GPT2w 模型构建时采用的 ERA-Interim,为 ECWFMF 2001~2010 年月平均廓线的再分析产品,因此,本文选用 2011~2014 年 GGOS 气象数据,在 340 个 IGS 站验证 GPT2w 模型化气象元素的精度,并用于实现参数互融方案。由于 WMO 气象站与 IGS 站至少相距 0.05° (约 5 km),即无并址,无法得到对流层延迟数据,因此不参与互融方案验证。

GGOS 气象数据为规则的产品数据,而 IGRA 的大气廓线数据为非规则的半成品数据。参与计算时,要求大气廓线分层为标准分层,分层依据为等压面:地表、1 000、925、850、750、500、400、300、250、200、150、100、70、50 hPa。在大气压为 100 hPa 时,分层高度大约为 15~16 km。为保证大气廓线的完整性,筛选大气廓线标准分层不少于 10 个、4 年内有效观测不少于 1 300 d、按经纬度全球均匀分布的探空气象站 200 个,验证 200 个气象站处 GPT2w 模型气象元素的精度。需要注意的是,气象数据用于计算时,其高程为位势高(geopotential height),而非大地高,需要进行大地水准面异常改正,改正模型为 EGM08^[15]。

3.2 测站地面数据

对比 2011~2014 年 340 个 IGS 站的 GGOS 气压、水汽压、测站温度与对应的模型值,对比

2011~2014 年 200 个气象站的气压、水汽压、测站温度与对应的模型值,全球对比精度如表 1 所示。表中显示,GPT2w 对比 GGOS 地面气象数据的精度,与对比 IGRA 地面气象数据精度相当,因此可认为 GGOS 地面气象数据可用于验证互融方案。

表 1 2011~2014 年全球 GPT2w 模型化气象元素精度

Tab.1 The Bias/RMS of the Blind Meteorological Elements in Global Scale During 2011~2014

数据源	气象元素					
	P_s /hPa		e_s /hPa		T_s /K	
	偏差	均方差	偏差	均方差	偏差	均方差
GGOS	0.27	5.91	0.25	2.50	0.005	3.69
IGRA	0.61	6.73	0.04	2.82	0.85	4.76

T_m 与 λ 首先验证 GPT2w 模型的 T_m 、 λ 精度。

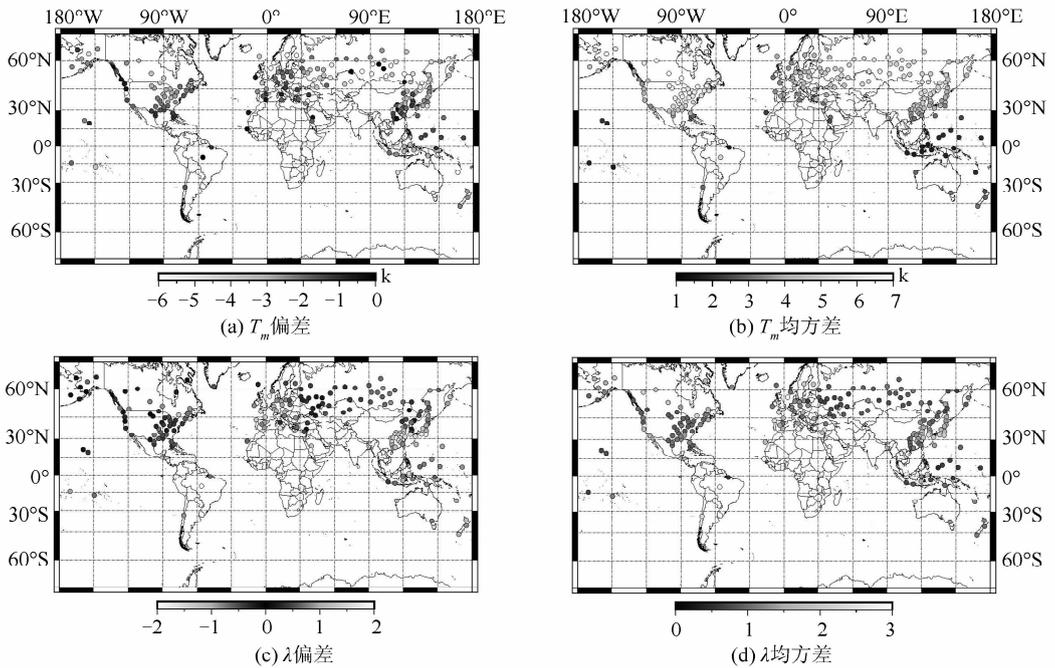


图 2 2011~2014 年 200 个气象站模型化 T_m 、 λ

Fig.2 The Bias and RMS for the Blind T_m 、 λ Over 200 WMO Sites During 2011~2014

由图 2 可知,经过数据预处理后,数据质量好、数据完备性高的 200 个 WMO 气象站,基本都位于北美沿海、东北亚沿海、东南亚群岛以及欧洲地区,在非洲、南美以及南亚地区高质量站较少。

通过 T_m 的偏差图(图 2(a)),发现 GPT2w 模型化 T_m 与实际值有系统偏差,计算结果为 -2.56 K;而模型 T_m 对比 GGOS 的 T_m 值,平均偏差为 0.21 K。为验证偏差来源,重复做 GPT2w 模型的精度验证。计算模型 ZTD 时,将式(3)中的 T_m 加上 -2.56 ,重新进行 GPT2w 模型 ZTD 的精度经验,新的计算结果为:偏差

GGOS 直接提供各 IGS 跟踪站的 T_m 值,IGRA 提供气象站上空的大气廓线。为计算气象站的 T_m ,将式(5)进行分层离散化:

$$T_m = \sum \frac{e_{si}}{T_i} \cdot \Delta h_i / \sum \frac{e_{si}}{T_i^2} \cdot \Delta h_i \quad (7)$$

式中, e_{si} 为第 i 层大气平均水汽压; T_i 为第 i 层大气平均温度; Δh_i 为第 i 层大气厚度。据此式,可由大气廓线计算气象站的 T_m 值作为真值。

文献[7-8]利用已经获得的 ZWD 格网,对式(3)求逆从而计算得到 λ 的值。本文采用 λ 与水汽压、大气压的简单关系式[4]:

$$e = e_s (P/P_s)^{\lambda+1} \quad (8)$$

以大气廓线数据为基础,据此式可求得各气象站处的 λ 。

-0.3 mm;均方差 36 mm,比 § 2 中的原始精度提高 1 mm。由此可知,GPT2w 模型构建时的 T_m 值存在系统偏差,为达到更好的精度需要进行精度校准。

因为系统偏差不影响均方差,因此若将改正过的 T_m 作为 T_m 真值的均值, T_m 的 RMS 图(图 2(b))仍准确的描述 T_m 的精度信息。由该图可知, T_m 在中高纬度地区精度低于低纬度地区,这是因为中高纬度温差大,离散程度大,而低纬度地区相反[13]。

由图 2(c)、2(d)可知,模型化的 λ 与依据简单模型逆运算得到的 λ ,对比具有很高的精度,尤

其在沿海地区。模型化 λ 对比精度为:偏差0.63,均方差1.48,说明由简单模型逆运算得到的 λ 与文献[7-8]利用式(3)得到的 λ 具有一致性。

4 参数互融

至此,本文验证了GPT2w模型在全球具有很高的ZTD模型精度。计算验证模型化加权平均温度 T_m 、水汽直减率 λ 具有很高的精度,但 T_m 存在-2.56 K的系统偏差。对比发现GGOS的地面气象数据与IGRA地面气象数据有相同的精度,可以用于参数互融计算。

以USNO的ZTD产品为基准,对比GPT2w模型、直接气象元素模型、参数互融3种方案的精度。这里选择的直接气象模型为仅基于简单实测数据计算的Saastamoinen模型,其ZHD模型见式(2),ZWD模型^[3]见式(9)。

$$ZWD = 0.002\ 276\ 8 \cdot (1\ 255 + 0.05T) \frac{e}{T} \quad (9)$$

参数互融为:GGOS测站气象数据(用以代替实测数据)与改善的经验加权平均温度 T_m 、水汽直减率 λ 作为参数,模型选用式(2)、式(3)。

表2所示为GPT2w模型、直接气象元素模型、参数互融3种ZTD对比USNO精度。其中参数互融的计算方法,由于采用更好的模型公式及具有更好的输入参数,其精度表现显著优于其他两种模型。由于GGOS提供的气象参数为数值天气模型数据而非实测数据,因而这里的偏差精度小幅下降,而参数互融方法的实际计算精度应以实测气象数据为准。

表2 3种ZTD对比USNO数据的精度

Tab. 2 The Bias and RMS of the Difference Between the Three ZTD Methods and USNO ZTD

模型	ZTD/mm	
	偏差	均方差
GPT2w模型	-0.30	35.90
简单模型	4.50	28.67
参数互融	-0.77	27.20

5 结语

本文以USNO发布的全球分布的IGS跟踪站天顶对流层延迟数据、IGRA发布的气象站大气廓线数据以及GGOS的测站气象数据为数据源,对GPT2w模型精度,模型测站气象数据精

度,以及模型加权平均温度 T_m 、水汽直减率 λ 精度进行分析。发现 T_m 具有-2.56 K的系统偏差。改正该偏差后,模型ZTD精度提升1 mm。采用简单逆运算式(8)得到的水汽直减率 λ 与对式(3)进行逆运算得到的 λ 精度一致。

本文提出以测站气压 P 、测站温度 t 、测站相对湿度 hr 为实测气象元素,以校正后的 T_m 、高精度的 λ 为经验气象元素,作为对流层延迟模型输入参数的互融方法。该互融方法计算ZHD、ZWD经验模型分别采用目前最优的Saast静力学延迟模型和Askne & Nordius湿延迟模型。

在不可获取气象数据的前提下,校正后的GPT2w模型具有很高的先验精度;若可获取近实时气象数据(如VLBI站、备有自动气象站的GNSS观测),推荐采用新的参数互融模型。

致谢:感谢GGOS Atmosphere提供IGS站气象数据,感谢IGRA提供的大气廓线数据,感谢USNO提供的IGS站高精度ZTD数据。

参 考 文 献

- [1] Böhm J, Schuh H. Atmospheric Effects in Space Geodesy[M]. Berlin: Springer, 2013
- [2] Bevis M, Businger S, Herring T, et al. GPS Meteorology Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(D14): 15 787-15 801
- [3] Saastamoinen J. Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging Satellites[J]. *The Use of Artificial Satellites for Geodesy*, 1972: 247-251
- [4] Askne J, Nordius H. Estimation of Tropospheric Delay for Microwaves from Surface Weather Data [J]. *Radio Science*, 1987, 22(3): 379-386
- [5] Schuler T. The Trop Grid2 Standard Tropospheric Correction Model [J]. *GPS Solutions*, 2014, 18 (1): 123-131
- [6] Li W, Yuan Y, Ou J, et al. New Versions of the BDS/GNSS Zenith Tropospheric Delay Model IG-Trop[J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(1): 73-80
- [7] Möller G, Weber R, Böhm J. Improved Troposphere Blind Models Based on Numerical Weather Data[J]. *Navigation*, 2014, 61(3): 203-211
- [8] 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

- [9] Yao Y, Xu C, Shi J, et al. ITG: A New Global GNSS Tropospheric Correction Model[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10273
- [10] Nafisi V, Madzak M, Böhm J, et al. Ray-traced Tropospheric Delays in VLBI Analysis[J]. *Radio Science*, 2012, 47(2): RS2020
- [11] Yao Yibin, Liu Jinhong, Zhang Bao, et al. Nonlinear Relationships Between the Surface Temperature and the Weighted Mean Temperature[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(1): 112-116(姚宜斌, 刘劲宏, 张豹, 等. 地表温度与加权平均温度的非线性关系[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(1): 112-116)
- [12] Wang Xiaoying, Dai Ziqiang, Cao Yunchang, et al. Weighted Mean Temperature T_m Statistical Analysis in Ground-based GPS in China[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(4): 412-416(王晓英, 戴仔强, 曹云昌, 等. 中国地区地基 GPS 加权平均温度 T_m 统计分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(4): 412-416)
- [13] Yao Y, Zhang B, Xu C, et al. Analysis of the Global T_m - T_s Correlation and Establishment of the Latitude-related Linear Model[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(19): 2 340-2 347
- [14] 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
- [15] Barthelmes F. Definition of Functionals of the Geopotential and Their Calculation from Spherical Harmonic Models: Theory and Formulas Used by the Calculation Service of the International Centre for Global Earth Models (ICGEM) [OL]. <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM>[J]. 2013

An Assessment of GPT2w Model and Fusion of a Troposphere Model with in Situ Data

HUA Zhonghao^{1, 2} LIU Lintao² LIANG Xinghui²

1 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2 State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

Abstract: GPT2w is used to estimate slant tropospheric delay, and considered the best empirical model based on its nominal accuracy. Besides the model value of ZHD, this model delivers a blind value for meteorological parameters. We used the database from USNO to validate the marked accuracy of the model, and data from IGRA to access the accuracy of the blind meteorological elements. A system bias from T_m was detected. After the correction of this bias, the bias of model ZTD against the USNO ZTD rose from -1.38 mm to -0.3 mm. This paper presents a fusion of blind model and the in situ data. The input parameters of this new method are in situ P , t and hr , the corrected blind T_m and λ . This method performs better than the modified GPT2w model because of the in situ data, better than the Saast model as it profits from a improved ZWD model. Without the in situ data, the modified GPT2w is a good choice. If with available in situ data, the fusion method is recommended.

Key words: GPT2w; zenith tropospheric delay; T_m ; in situ meteorological data

First author: HUA Zhonghao, postgraduate, specializes in the precise data analysis of GNSS and GNSS meteorology. E-mail: sucfay@gmail.com

Corresponding author: LIU Lintao, PhD, professor. E-mail: llt@asch.whigg.ac.cn

Foundation support: The Special Fund Protect of Major Scientific Instrument and Equipment Development, No. 2011YQ120045; the Natural Science Foundation of China, No. 41304023.