

DOI:10.13203/j.whugis20210238



文章编号:1671-8860(2021)12-1881-08

新一代实时对流层映射函数精度及PPP性能评估

周要宗¹ 楼益栋¹ 张卫星¹ 白景娜¹ 张镇驿¹

1 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉,430079

摘要:采用射线追踪方法计算的斜路径总延迟(slant total delay,STD)作为参考,首先评估了最新一代实时对流层映射函数GPT3(global pressure and temperature 3)、格网VMF3-FC(forecast Vienna mapping function 3)和站处VMF3-FC的STD建模精度,然后将3种映射函数用于北斗三号(BDS3)精密单点定位(precise point positioning,PPP),系统比较了3种映射函数计算的PPP坐标精度。结果表明,站处VMF3-FC 30°高度角时STD精度为2.3 cm,BDS3 PPP高程精度为9.8 mm,整体表现最优,推荐在有站处产品的IGS(international GNSS service)站处使用该映射函数产品;格网VMF3-FC 30°高度角STD精度为2.6 cm,BDS3 PPP高程精度为10.2 mm,整体表现次之,在无站处产品的情况下推荐使用;GPT3 30°高度角STD精度为7.0 cm,BDS3 PPP高程精度为10.5 mm,整体表现最差,但其可内嵌在定位软件中,在无需下载外部产品的情况下推荐使用。

关键词:实时映射函数;VMF3-FC;GPT3;BDS3-PPP

中图分类号:P228

文献标志码:A

对流层延迟是全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)定位中的主要误差源之一,通常在GNSS数据处理中需要利用映射函数来实现对流层天顶延迟(zenith path delay,ZPD)、斜路径延迟(slant path delay,SPD)间的相互投影转换、改正和估计,因此映射函数对于GNSS数据处理非常重要^[1]。过去20多年来,学者们围绕映射函数建模做了大量研究工作^[1-8],发布了一系列经典映射函数模型产品,如NMF(Niell mapping function)模型、GMF(global mapping function)/GPT(global pressure and temperature)系列模型和VMF(Vienna mapping function)系列产品^[4-8]。

也有学者对映射函数建模精度及GNSS参数估计性能进行了深入细致的评估^[9-16]。文献[13]采用射线追踪方法计算的斜路径总延迟(slant total delay,STD)为参考,评估了NMF、GMF、GPT2、VMF1和UNB-VMF1(University of New Brunswick's VMF1)模型产品的精度,发现映射

函数产品VMF1和UNB-VMF1的建模精度要显著优于映射函数经验模型NMF、GMF和GPT2。文献[14-15]进一步比较了采用GMF和VMF1的精密单点定位(precise point positioning,PPP)坐标重复性,发现采用VMF1映射函数可显著提升PPP高程的重复性。文献[16]则分析了采用GPT2、GPT2w和VMF1-FC(forecast VMF1)的实时精密单点定位(precise point positioning,PPP)性能,发现相较经验映射函数模型GPT2和GPT2w,采用VMF1-FC可显著提高PPP天顶总延迟(zenith total delay,ZTD)和高程的实时估计精度。

近年来,维也纳工业大学在其第一代(GMF/VMF1/VMF1-FC)和第二代(GPT2/GPT2w/VMF2)映射函数基础上,发布了建模方法更为严密的第三代映射函数产品VMF3和经验模型GPT3^[17]。VMF3包括事后产品VMF3-EI(re-analysis VMF3)、超快产品VMF3-OP(operational VMF3)和预报产品VMF3-FC(forecast VMF3)

收稿日期:2021-05-15

项目资助:国家重点研发计划(2016YFB0501802);国家自然科学基金(41774036,41804023,41961144015);中央高校基本科研业务费专项资金(2042020kf0020)。

第一作者:周要宗,博士生,研究方向为GNSS对流层延迟建模及应用。zhouyaozong@whu.edu.cn

通讯作者:楼益栋,博士,教授。ydlou@whu.edu.cn

(<https://vmf.geo.tuwien.ac.at/>)。新一代映射函数GPT3和VMF3-FC可用于实时GNSS定位和ZTD估计,对其建模精度及北斗/GNSS PPP性能进行评估具有重要意义。

本文以欧洲中尺度天气预报中心(European centre for medium-range weather forecasts, ECMWF)第五代再分析产品(the fifth-generation ECMWF reanalysis, ERA5)射线追踪计算的STD为参考,来比较评估实时映射函数GPT3、格网VMF3-FC和站处VMF3-FC的STD建模精度,并从坐标重复性、坐标精度和ZTD精度3个方面评估3种映射函数的北斗三号(BDS3)和全球定位系统(global positioning system, GPS)PPP性能。

1 实时映射函数模型产品

1.1 GPT3模型

GPT3是一个综合的经验模型,考虑了经验参数的年和半年周期变化,模型水平分辨率有1.0°和5.0°两种^[17]。GPT3中的经验映射函数系数(a_h 和 a_w)是由VMF3-EI映射函数系数经时空拟合建模得到的,因此与其保持高度一致。GPT3在实际使用中需要利用高度改正公式将静力学映射函数由海平面处归化到目标高度。

1.2 VMF3-FC产品

VMF3-FC是以ECMWF 24 h预报数值天气模型(numerical weather model, NWM)射线追踪计算的SPD为输入,采用和事后VMF3-EI一致的建模方法得到的,可细分为格网VMF3-FC产品(grid-wise VMF3-FC,以下记为VMF3-FC-G)和站处VMF3-FC产品(site-wise VMF3-FC,以下记为VMF3-FC-S)^[8,17]。

VMF3-FC-G产品是在1.0°/5.0°的格网点处进行建模,然后以6 h时间分辨率(每天0时、6时、12时、24时)和1.0°/5.0°水平分辨率发布海平面处的映射函数系数(a_h 和 a_w)和地表处的天顶静力学延迟(zenith hydrostatic delay, ZHD)、天顶湿延迟(zenith wet delay, ZWD)。在实际使用中需要使用线性插值从产品时刻内插到具体时刻,使用双线性插值从产品格网点内插到特定水平位置,使用相应的高度改正公式将映射函数系数和天顶延迟归算至特定高度。

VMF3-FC-S产品则是直接在测站位置处进行建模,直接得到测站处6 h时间分辨率的映射函数系数(a_h 和 a_w)和天顶延迟(ZHD和ZWD)。

相对于VMF3-FC-G,VMF3-FC-S在使用过程中仅需要简单的时间线性插值,避免了因水平双线性插值和垂直高度改正而导致的精度损失。

2 实时映射函数精度评估

2.1 评估方法

映射函数模型产品精度通常由STD建模精度来表征^[17],因此需要先基于3种实时映射函数模型产品计算STD。从维也纳工业大学大地测量与地理信息系官网分别下载GPT3模型(1°分辨率)、VMF3-FC-G产品(1°分辨率)和VMF3-FC-S产品,产品覆盖2020年4个季节,每个季节10天(冬季:01-11—01-20,春季:04-11—04-20,夏季:07-11—07-20,秋季:10-11—10-20)。

计算全球33个IGS(international GNSS service)MGEX(multi-GNSS experiment)站处(见图1)、8个高度角方向(3°、5°、7°、10°、15°、30°、70°和90°)的STD^[17],公式为:

$$\text{STD} = mf_h \cdot \text{ZHD} + mf_w \cdot \text{ZWD} \quad (1)$$

式中, mf_h 和 mf_w 分别表示静力学和湿映射函数,可分别由静力学(a_h, b_h, c_h)和湿映射函数系数(a_w, b_w, c_w)及高度角 ϵ 为输入计算得到^[17]:

$$mf_h = \frac{1 + \frac{a_h}{1 + \frac{b_h}{1 + c_h}}}{\sin \epsilon + \frac{a_h}{\sin \epsilon + \frac{b_h}{\sin \epsilon + c_h}}} + h_{\text{corr}} \quad (2)$$

$$mf_w = \frac{1 + \frac{a_w}{1 + \frac{b_w}{1 + c_w}}}{\sin \epsilon + \frac{a_w}{\sin \epsilon + \frac{b_w}{\sin \epsilon + c_w}}} \quad (3)$$

式中, h_{corr} 为高度改正项^[4]; a_h, a_w 系数可由GPT3模型、VMF3-FC-G产品和VMF3-FC-S产品得到; b_h, c_h, b_w, c_w 系数则取自经验的球谐级数^[17]。VMF3-FC-G和VMF3-FC-S产品能够直接提供式(1)中STD计算所需的ZHD和ZWD,而GPT3模型的ZHD和ZWD则分别利用萨斯塔莫宁(Saastamoinen, SAAS)模型^[18]和文献[19]模型,以GPT3的温度 T 、气压 p 和水汽压 e 为输入参数计算得到。

ERA5是ECMWF发布的最新一代再分析产品,理论上其气象参数精度要显著优于VMF3-FC产品建模所采用的ECMWF预报NWM产品,

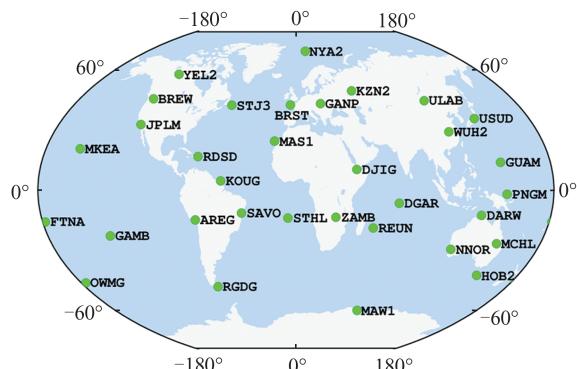


图 1 IGS MGEX 站点分布

Fig.1 Distribution of Selected IGS MGEX Stations

基于 ERA5 射线追踪可以获得更高精度的对流层延迟(以 GNSS ZTD 为参考的 ERA5 射线追踪 ZTD 全球统计精度可达 11.0 mm^[20])。因此,基于 ERA5 采用射线追踪方法计算参考 STD。选用全球覆盖的 ERA5 气压层产品(时间分辨率为 6 h, 水平分辨率为 1.0°, 产品格式为 GRIB, 气压层数为 37, 选用参数包括位势、温度和比湿^[21], 每个产品大小约 13.8 MB)。利用美国国家环境预报中心官网(<http://www.cpc.ncep.noaa.gov>)提供的 wgrib 工具将 GRIB 格式转换为二进制, 再通过二进制文件的直接读取来实现 ERA5 气象参数的快速获取, 通过 ERA5(0~42 km)和美国标准大气模型(COESA 1976)(42~84 km)的组合使用来实现气象参数的中性大气层完整覆盖^[22]。分别使用文献[23]和文献[24]中公式, 将 ERA5 位势转换为椭球高, 将 ERA5 比湿转换为水汽压。使用文献[25]推荐的垂直大气分层方法来实现大气细化分层。利用线性、指数和指数内插方法分别将温度、气压和水汽压参数从等压层内插到各垂直细化高度层^[22]。利用式(4), 以温度、气压和水汽压为输入, 来实现总折射率 n 的计算^[26]:

$$n = 1 + \left(k_1 \frac{P}{T} + k'_1 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \right) \times 10^{-6} \quad (4)$$

式中, k_1 、 k'_1 和 k_3 取值分别为 77.689 0 K/hPa、22.974 2 K/hPa 和 375 463 K²/hPa^[20,27]; T (K)、 P (hPa) 和 e (hPa) 分别为温度、总气压和水汽压。选用文献[20,22]介绍的二维分段线性射线追踪方法确定射线传播路径, 计算 ZTD 和 STD^[28]:

$$\begin{cases} \text{ZTD} = \sum_{i=1}^{k-1} [(n_i - 1) \Delta h_i] \\ \text{STD} = \sum_{i=1}^{k-1} [(n_i - 1) s_i] + g_{\text{bend}} \\ g_{\text{bend}} = \sum_{i=1}^{k-1} [s_i - \cos(\epsilon_i - \epsilon_k) s_i] \end{cases} \quad (5)$$

式中, k 表示高度层层数; n_i 为第 i 层和第 $i+1$ 层的总折射率均值; Δh_i 为第 i 层和第 $i+1$ 层的高差; s_i 表示夹在第 i 层和第 $i+1$ 层间的射线路径长度; g_{bend} 为几何弯曲项; ϵ_i 表示第 i 层射线路径的高度角; ϵ_k 为第 k 层(即射线穿出层)射线路径的高度角。

从 ECMWF 下载相应时段的 ERA5 气压层产品, 采用前述的 STD 计算方法, 利用开源的射线追踪软件 RADIATE (<https://github.com/TUW-VieVS/RADIATE>), 计算相应 33 个 IGS MGEX 站处的 8 个高度角方向(3°、5°、7°、10°、15°、30°、70° 和 90°)和 16 个方位角(0°~337.5°, 间隔为 22.5°)的 STD, 然后将同一高度角、不同方位角下的 STD 取平均, 得到相应高度角下的参考 STD。

2.2 评估结果

以射线追踪计算的 STD 为参考, 对 GPT3 模型、VMF3-FC-G 产品和 VMF3-FC-S 产品计算的 STD 进行了评估, 统计不同高度角下选定测站在整个评估时段内的斜路径总延迟差值均方根(root mean square, RMS), 如表 1 所示。

从表 1 可知, 3 种模型产品斜路径总延迟建模 RMS 均与高度角强相关, 随高度角增大, 建模 RMS 显著减小。不同高度角下, VMF3-FC-S 产品的斜路径总延迟建模 RMS 均明显小于 VMF3-FC-G 产品。就 3°、30° 和 90° 高度角而言, VMF3-FC-S 产品的 RMS 分别为 17.2、2.3 和 1.1 cm, 而 VMF3-FC-G 产品的 RMS 分别为 20.4、2.6 和 1.3 cm。相比之下, GPT3 模型的 STD 建模 RMS 明显偏大, 就 3°、30° 和 90° 高度角而言, 其 RMS 分别为 53.7、7.0 和 3.5 cm, 约是 VMF3-FC-S 和 VMF3-FC-G 产品的 2~3 倍。因此, 3 种模型产品中, VMF3-FC-S 产品精度最优, VMF3-FC-G 产品精度次之, 而 GPT3 模型精度最差。

表 1 3 种映射函数的斜路径总延迟建模 RMS 统计/cm

Tab.1 Statistical Slant Total Delay RMS for Three Mapping Functions/cm

模型产品	高度角							
	3°	5°	7°	10°	15°	30°	70°	90°
GPT3	53.7	36.3	27.1	19.6	13.3	7.0	3.7	3.5
VMF3-FC-G	20.4	13.8	10.2	7.4	5.0	2.6	1.4	1.3
VMF3-FC-S	17.2	11.7	8.7	6.3	4.3	2.3	1.2	1.1

3 实时映射函数 PPP 性能评估

映射函数模型产品的 PPP 性能(包括坐标重复性、坐标精度和 ZTD 精度等)可以间接地反映

映射函数模型产品的精度,常应用于映射函数性能评估研究^[13-16]。GPS系统为成熟稳定的全球导航卫星系统^[29],而BDS3系统为新建全球导航卫星系统^[30],两卫星系统间存在差异。比较GPS和BDS3的PPP性能,评估映射函数选择对GPS和BDS3 PPP性能的影响具有重要实际意义。本文以PANDA(position and navigation data application)软件为模型产品验证软件平台,在图1所示的33个IGS MGEX站处比较3种实时映射函数模型产品的BDS3和GPS PPP性能。

3.1 PPP数据处理

PPP数据处理时段与前述相同,分为冬春夏秋4季,每个季节10 d,共计40 d。数据处理中所需的30 s观测文件从IGS官方FTP下载(<ftp://fgdc.cddis.eosdis.nasa.gov>),GBM(GeoForschungsZentrum MGEX)5 min轨道文件和30 s钟差文件从德国地学研究中心官方FTP(<ftp://ftp.gfz-potsdam.de>)下载,PPP数据处理策略如表2所示。

3.2 PPP坐标重复性

以前述BDS3和GPS PPP解算的40 d坐标时序为输入,分季节(冬春夏秋)进行重复性统计。用每个季节10 d的坐标时序减去相应的坐标均值(假定10 d内测站位置没有发生移动,10 d坐标均值即为坐标真值),得到该季节的坐标差值东-北-天(ENU)时序,统计每个季节和测站ENU时序的标准偏差作为该季节和测站的PPP坐标重复性。对每个季节33个测站的坐标重复性取平均,得到不同季节下的坐标重复性统计值,如表3所示。

由表3可知,BDS3 PPP坐标重复性比GPS差,而GPT3模型的BDS3和GPS PPP坐标重复性比VMF3-FC-G和VMF3-FC-S产品差,主要集中在高程方向上,且与季节相关,冬、春、夏、秋GPT3模型的GPS PPP高程重复性较VMF3-FC-S产品分别变差0.5、0.8、0.7、0.3 mm,变差幅度分别为12.2%、18.2%、17.5%、7.3%。VMF3-FC-S产品的GPS PPP坐标重复性较VMF3-FC-G产品略好,而其BDS3 PPP坐标重复性较VMF3-FC-G产品又略差,可能是受BDS3 PPP未建模误差(如相位中心变化)的影响。

进一步计算每个测站4个季节的高程重复性平均值,图2中给出了GPT3模型和VMF3-FC-G产品同VMF3-FC-S产品的高程重复性平均值差异空间分布。由图2可知,GPT3模型高程重复

性显著大于VMF3-FC-S产品,尤其是在北美洲STJ3站和南美洲南部RGDG站。这是因为在这两个测站处GPT3模型明显差于VMF3-FC-S产品,而VMF3-FC-G和VMF3-FC-S产品间的高程重复性基本无差异。总体上,VMF3-FC-S产品PPP坐标重复性略优于VMF3-FC-G产品,显著优于GPT3经验模型,但是坐标重复性差异远没模型产品精度差异显著,主要是由于3种实时映射函数的差异集中在低高度角(30°以下),而数据处理中采用高度角依赖的观测值加权策略,低高度角观测值的权重被削弱,抑制了3种模型产品的对流层STD建模差异^[14-15]。

表2 PPP数据处理策略^[29,31]
Tab.2 Data Processing Strategies for PPP^[29,31]

项目	处理策略
处理采样间隔/s	30
观测值	无电离层组合观测值: BDS3-B1I、B3I组合 GPS-L1、L2组合
截止高度角/(°)	3
高度角加权策略	$p = \begin{cases} 4\sin^2\epsilon, \epsilon \leq 30^\circ \\ 1, \epsilon > 30^\circ \end{cases}$
天线相位缠绕	改正
相位中心变化	igs14.atx
潮汐改正	固体潮、极潮、海洋潮
相对论效应	改正
先验 STD 1	ZHD: SAAS ^[18] + GPT3 ZWD: 文献[19]+ GPT3 映射函数: GPT3
先验 STD 2	ZHD 和 ZWD: VMF3-FC-G 映射函数: VMF3-FC-G
先验 STD 3	ZHD 和 ZWD: VMF3-FC-S 映射函数: VMF3-FC-S
卫星轨道	固定到GBM 5 min 产品
卫星钟差	固定到GBM 30 s 产品
湿映射函数1	GPT3
湿映射函数2	VMF3-FC-G
湿映射函数3	VMF3-FC-S
残余ZWD	分段常数(1 h)+段间随机游走($15 \text{ mm}/\sqrt{\text{h}}$)
梯度映射函数	$mf_w \cdot \cot \epsilon^{[32]}$
水平梯度	分段常数(12 h)+段间随机游走($10 \text{ mm}/\sqrt{\text{h}}$)
测站坐标	天常数
接收机钟差	白噪声
模糊度参数	固定

3.3 PPP坐标外符合精度

同样以前述BDS3和GPS PPP解算的40 d坐标时序为输入,以IGS官方FTP下载相应GPS周的IGS SINEX(solution independent exchange

format) 坐标为参考, 来计算 PPP 坐标外符合精度, 结果如表 4 所示。

表 3 不同季节下 3 种映射函数的 BDS3 和 GPS PPP 坐标重复性/mm

Tab.3 BDS3 and GPS PPP Coordinate Repeatability for the Three Mapping Functions During Different Seasons/mm

季节	模型产品	BDS3 坐标重复性			GPS 坐标重复性		
		E	N	U	E	N	U
冬季	GPT3	3.5	2.3	6.4	1.7	1.7	4.6
	VMF3-FC-G	3.5	2.4	5.9	1.8	1.7	4.1
	VMF3-FC-S	3.6	2.4	6.0	1.7	1.7	4.1
春季	GPT3	2.5	1.9	5.9	1.6	1.3	5.2
	VMF3-FC-G	2.5	1.9	5.4	1.6	1.4	4.6
	VMF3-FC-S	2.5	1.9	5.4	1.6	1.3	4.4
夏季	GPT3	2.4	1.8	5.3	1.4	1.4	4.7
	VMF3-FC-G	2.4	1.8	4.6	1.4	1.3	4.0
	VMF3-FC-S	2.4	1.8	4.6	1.4	1.3	4.0
秋季	GPT3	2.6	1.8	5.0	1.5	1.3	4.4
	VMF3-FC-G	2.6	1.8	4.8	1.5	1.3	4.1
	VMF3-FC-S	2.6	1.8	4.8	1.5	1.2	4.1
平均	GPT3	2.8	2.0	5.7	1.5	1.4	4.7
	VMF3-FC-G	2.8	2.0	5.2	1.6	1.4	4.2
	VMF3-FC-S	2.8	2.0	5.2	1.5	1.4	4.2

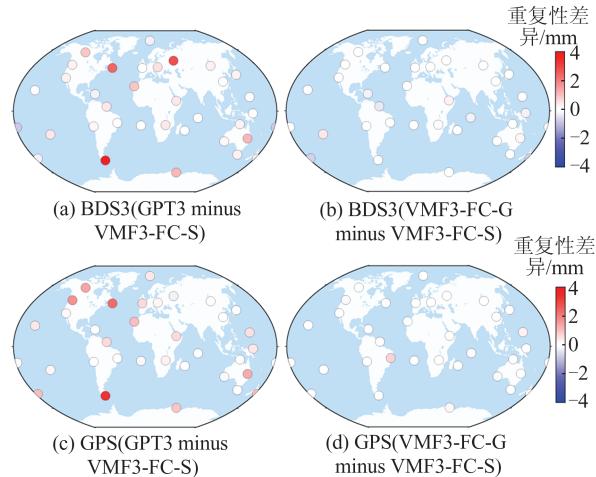


图 2 3 种映射函数的 BDS3 和 GPS PPP 高程重复性差异空间分布

Fig.2 Distribution of BDS3 and GPS PPP Height Repeatability Difference Between Three Mapping Functions

从表 4 可以看出, BDS3 PPP ENU 坐标精度 (5.5、4.0 和 10.5 mm) 比 GPS PPP 坐标精度 (2.6、2.9 和 6.3 mm) 差。GPT3 模型的 PPP 坐标精度比 VMF3-FC-G 和 VMF3-FC-S 产品差, 主要体现在高程方向上 (BDS3 由 10.5 mm 到 9.8 mm, GPS 由 6.3 mm 到 5.8 mm), 而 VMF3-FC-G 产品的 BDS3 PPP 高程精度比 VMF3-FC-S 产品差

(由 10.2 mm 到 9.8 mm)。

表 4 3 种映射函数 BDS3 和 GPS PPP 坐标外符合 RMS/mm

Tab.4 Statistical BDS3 and GPS PPP Coordinate Cross-Validated RMS for the Three Mapping Functions/mm

模型产品	BDS3 RMS			GPS RMS		
	E	N	U	E	N	U
GPT3	5.5	4.0	10.5	2.6	2.9	6.3
VMF3-FC-G	5.5	4.0	10.2	2.6	2.9	5.8
VMF3-FC-S	5.4	3.9	9.8	2.6	2.9	5.9

图 3 进一步给出了 GPT3 模型、VMF3-FC-G 产品同 VMF3-FC-S 产品的高程精度差异空间分布。可以看出, GPT3 模型的高程精度明显差于 VMF3-FC-S 产品, 尤其是在南美洲南部 RGDG 站。VMF3-FC-G 产品 GPS 高程精度同 VMF3-FC-S 产品无明显差异, 而其 BDS3 高程精度在太平洋中北部 MKEA 站、大西洋西南部 RDSD 站和南极洲 MAW1 站处明显差于 VMF3-FC-S 产品, 因为在实验时段内 BDS3 可用观测数据量明显少于 GPS, 而在这 3 个测站处 VMF3-FC-S 产品显著优于 VMF3-FC-G 产品, 能够提供更高精度的先验对流层 STD 改正, 减弱参数估计对观测数据量的依赖, 提高 BDS3 PPP 坐标估计精度。

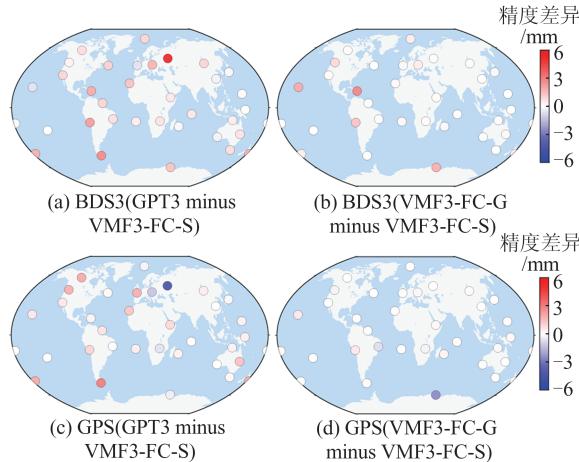


图 3 3 种映射函数的 BDS3 和 GPS PPP 高程精度差异空间分布

Fig.3 Distribution of BDS3 and GPS PPP Height Accuracy Differences Between the Three Mapping Functions

3.4 PPP ZTD 外符合精度

以 BDS3 和 GPS PPP 解算得到的 40 d ZTD 时序为输入, 以 IGS 官方 FTP 下载相应时段的 IGS 事后精密天顶延迟 (zenith path delay, ZPD) 为参考, 对 PPP ZTD 外符合精度进行统计, 统计结果如表 5 所示。

表5 3种映射函数BDS3和GPS PPP ZTD

外符合RMS统计/mm

Tab.5 Statistical BDS3 and GPS PPP ZTD Cross-Validated RMS for Three Mapping Functions/mm

模型产品	BDS3 RMS	GPS RMS
GPT3	8.5	7.4
VMF3-FC-G	8.6	7.4
VMF3-FC-S	8.6	7.4

从表5可知,BDS3 PPP ZTD精度(8.6 mm)比GPS PPP ZTD精度(7.4 mm)差。不同映射函数ZTD精度差异不明显,GPT3模型ZTD精度略优于VMF3-FC-G和VMF3-FC-S产品,这主要是因为参考IGS ZPD解算时所采用的映射函数为GMF,而GMF与GPT3同为经验模型,二者更为接近。

4 结语

最新一代实时映射函数GPT3和VMF3-FC(包括格网产品和站处产品)可应用于实时对流层延迟改正、北斗/GNSS定位和ZTD估计,对其建模精度和北斗/GNSS PPP性能进行定量化评估分析具有重要意义。本文对GPT3模型和VMF3-FC产品(格网和站处)的STD建模精度和PPP性能进行了系统比较评估,得出以下结论:

1)不同映射函数STD建模精度显著依赖于高度角。以ERA5射线追踪STD为参考,VMF3-FC站处产品3°和30°高度角STD建模精度分别为17.2 cm、2.3 cm,显著优于GPT3模型(53.7 cm和7.0 cm),略优于VMF3-FC格网产品(20.4 cm和2.6 cm)。

2)不同映射函数主要影响PPP高程坐标估计。以IGS SINEX坐标为参考,VMF3-FC站处产品BDS3和GPS PPP高程坐标精度分别为9.8 mm、5.9 mm,优于GPT3模型(10.5 mm和6.3 mm),略优于VMF3-FC格网产品(10.2 mm和5.8 mm)。

3)不同映射函数对PPP ZTD估计影响较小。以IGS ZPD产品为参考,VMF3-FC(站处和格网)产品和GPT3模型的ZTD精度近乎相同,约为8.6 mm(BDS3)和7.4 mm(GPS)。

4)VMF3-FC站处产品综合性能优于VMF3-FC格网产品,显著优于GPT3模型,建议按照VMF3-FC站处产品/VMF3-FC格网产品/GPT3模型的优先级顺序来进行实时映射函数的

选择。

本文仅在事后PPP中对VMF3-FC产品的性能进行了评估,后续还需定量化评估VMF3-FC产品的实时北斗/GNSS PPP性能。除VMF3-FC实时映射函数产品外,维也纳工业大学还发布了实时水平梯度产品GRAD-FC(forecast horizontal gradient),还需进一步评估分析VMF3-FC和GRAD-FC产品的总STD(同时包含各向同性和各向异性)建模精度和北斗/GNSS定位性能。

致谢:本文实验所需的数据产品由IGS、GFZ、ECMWF和维也纳工业大学提供,数值计算得到武汉大学超级计算中心的计算支持和帮助,在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Zhang Di. The Study of the GNSS Tropospheric Zenith Delay Model and Mapping Function [D]. Wuhan: Wuhan University, 2017 (章迪. GNSS对流层天顶延迟模型及映射函数研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017)
- [2] Yan Haojian, Ping Jinsong, Chen Yi, et al. The Mapping Function of the Neutral Atmospheric Refraction[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1996, 25(1): 67-72 (严豪健, 平劲松, 陈义, 等. 中性大气折射的映射函数[J]. 测绘学报, 1996, 25(1): 67-72)
- [3] Fan Haopeng. Research on Key Technologies and Applications of the New-Generation Geodetic VLBI [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2018 (范昊鹏. 新一代大地测量VLBI关键技术及应用研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2018)
- [4] Niell A E. Global Mapping Functions for the Atmosphere Delay at Radio Wavelengths [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1996, 101(B2): 3 227-3 246
- [5] Boehm J, Niell A, Tregoning P, et al. Global Mapping Function (GMF): A New Empirical Mapping Function Based on Numerical Weather Model Data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(7): L07304
- [6] 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): 1 069-1 073
- [7] Boehm J, Werl B, Schuh H. Troposphere Mapping Functions for GPS and very Long Baseline Interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Operational Analysis Data [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*,

- 2006, 111(B2): B02406
- [8] Boehm J, Kouba J, Schuh H. Forecast Vienna Mapping Functions 1 for Real-Time Analysis of Space Geodetic Observations [J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(5): 397–401
- [9] Zhang Shuangcheng, Ye Shirong, Liu Jingnan, et al. Latest Progress of Dynamic Mapping Functions and Its Application to GNSS Retrieved Water-Vapor [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(3): 280–283 (张双成, 叶世榕, 刘经南, 等. 动态映射函数最新进展及其在GNSS遥感水汽中的应用研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(3): 280–283)
- [10] Guo Jiming, Zhang Di, Shi Junbo, et al. Using Ray-Tracing to Analyse the Precision of Three Classical Tropospheric Mapping Functions in China [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(2): 182–187 (郭际明, 章迪, 史俊波, 等. 利用射线追踪法分析三种典型对流层映射函数在中国区域的精度[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(2): 182–187)
- [11] Fan Haopeng, Sun Zhongmiao, Zhang Liping, et al. A Two-Step Estimation Method of Troposphere Delay with Consideration of Mapping Function Errors [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(3): 286–294 (范昊鹏, 孙中苗, 张丽萍, 等. 顾及映射函数误差的对流层延迟两步估计法[J]. 测绘学报, 2019, 48(3): 286–294)
- [12] Wang Zhaoyang, Lu Yongduo, Xing Zhe, et al. Research on Influence of Satellite Cut-off Elevation Angle, Tropospheric Mapping Function and Ocean Tide Model on Antarctica GNSS PPP [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2020, 40(12): 1 294–1 298 (王朝阳, 卢勇夺, 邢喆, 等. 卫星截止高度角、对流层映射函数和海潮模型对南极GNSS精密定位的影响分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(12): 1 294–1 298)
- [13] Urquhart L, Nievinski F G, Santos M C. Assessment of Troposphere Mapping Functions Using Three-Dimensional Ray-Tracing [J]. *GPS Solutions*, 2014, 18(3): 345–354
- [14] Kouba J. Testing of Global Pressure/Temperature (GPT) Model and Global Mapping Function (GMF) in GPS Analyses [J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(3/4): 199–208
- [15] Steigenberger P, Boehm J, Tesmer V. Comparison of GMF/GPT with VMF1/ECMWF and Implications for Atmospheric Loading [J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(10): 943–951
- [16] Yuan Y B, Holden L, Kealy A, et al. Assessment of Forecast Vienna Mapping Function 1 for Real-Time Tropospheric Delay Modeling in GNSS [J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(9): 1 501–1 514
- [17] Landskron D, Böhm J. VMF3/GPT3: Refined Discrete and Empirical Troposphere Mapping Functions [J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(4): 349–360
- [18] Saastamoinen J. Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging Satellites [M]//The Use of Artificial Satellites for Geodesy. Washington D C: American Geophysical Union, 2013: 247–251
- [19] Askne J, Nordius H. Estimation of Tropospheric Delay for Microwaves from Surface Weather Data [J]. *Radio Science*, 1987, 22(3): 379–386
- [20] Zhou Y Z, Lou Y D, Zhang W X, et al. Improved Performance of ERA5 in Global Tropospheric Delay Retrieval [J]. *Journal of Geodesy*, 2020, 94(10): 1–14
- [21] Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. The ERA5 Global Reanalysis [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, 146(730): 1 999–2 049
- [22] Hofmeister A. Determination of Path Delays in the Atmosphere for Geodetic VLBI by Means of Ray-tracing [D]. Vienna: Technische Universität Wien, 2016
- [23] Böhm J, Salstein D, Alizadeh M M, et al. Geodetic and Atmospheric Background [M]//Springer Atmospheric Sciences. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013: 1–33
- [24] Wallace J M, Hobbs P V. Atmospheric Thermodynamics [M]//Atmospheric Science. Amsterdam: Elsevier, 2006: 63–111
- [25] Rocken C, Sokolovskiy S, Johnson J M, et al. Improved Mapping of Tropospheric Delays [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2001, 18(7): 1 205–1 213
- [26] Nilsson T, Böhm J, Wijaya D D, et al. Path Delays in the Neutral Atmosphere [M]//Springer Atmospheric Sciences. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013: 73–136
- [27] Rüeger J M. Refractive Index Formulae for Radio Waves [C]// The FIG XXII International Congress, Washington D C, USA, 2002
- [28] Boehm J. Troposphärische Laufzeitverzögerungen in der VLBI [D]. Vienna: Technische Universität Wien, 2004
- [29] Wei Erhu, Liu Xuexi, Wang Lingxuan, et al. Analysis and Assessment of BDS/GPS Combined Precise Point Positioning Accuracy [J]. *Geomatics and In-*

- formation Science of Wuhan University*, 2018, 43(11): 1 654–1 660 (魏二虎, 刘学习, 王凌轩, 等. BDS/GPS组合精密单点定位精度分析与评价[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(11): 1 654–1 660)
- [30] Cui Haomeng, Wang Jieyan, Wang Minghua, et al. Service Performance Assessment of BDS-3 Using Satellite Distribution Probability [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(6): 938–946 (崔浩猛, 王解先, 王明华, 等. 利用卫星分布概率对BDS-3性能的评估[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(6): 938–946)
- [31] Zhang Weixing. Water Vapor Retrieval, Variation Analysis and Applications over China Using Ground-Based GNSS and Multiple Data[D]. Wuhan: Wuhan University, 2016 (张卫星. 中国区域融合地基GNSS等多种资料水汽反演、变化分析及应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2016)
- [32] Bar-Sever Y E, Kroger P M, Borjesson J A. Estimating Horizontal Gradients of Tropospheric Path Delay with a Single GPS Receiver [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1998, 103(B3): 5 019–5 035

On the Accuracy and PPP Performance Evaluation of the Latest Generation of Real Time Tropospheric Mapping Function

ZHOU Yaozong¹ LOU Yidong¹ ZHANG Weixing¹ BAI Jingna¹ ZHANG Zhenyi¹

1 GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Objectives: Real-time tropospheric mapping functions can be used into real time global navigation satellite system (GNSS) parameter estimation and applications, and it is therefore of great significance to evaluate their modeling accuracy and precise point positioning (PPP) performance. Methods: In this paper, the slant total delay (STD) modeling accuracy of the latest generation of real time mapping functions, including global pressure and temperature 3 (GPT3), grid-wise forecast vienna mapping function 3 (VMF3-FC) and site-wise VMF3-FC, is evaluated by taking ray-traced STD as a reference, and the BDS3 PPP performance of the three mapping functions is analyzed on the coordinate accuracy. Results: The results show that the site-wise VMF3-FC persists the best performance with STD accuracy of 2.3 cm at the 30° elevation angle and BDS3 PPP height accuracy of 9.8 mm, and it is recommended to use at the international GNSS service(IGS) stations with the site-wise products. The performance of the grid-wise VMF3-FC is a little worse with the STD accuracy of 2.6 cm and height accuracy of 10.2 mm, and it is recommended as the backup of the site-wise VMF3-FC products. The GPT3 model has the worst performance with the STD accuracy of 7.0 cm and height accuracy of 10.5 mm, while it can be embedded into the positioning software, so it is recommended to use in the case of without the need of external products.

Key words: real-time mapping function; VMF3-FC; GPT3; BDS3-PPP

First author: ZHOU Yaozong, PhD candidate, specializes in GNSS tropospheric delay modeling and application. E-mail: zhouyaozong@whu.edu.cn

Corresponding author: LOU Yidong, PhD, professor. E-mail: ydlou@whu.edu.cn

Foundation support: The National Key Research and Development Program of China (2016YFB0501802); the National Natural Science Foundation of China (41774036, 41804023, 41961144015); the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2042020kf0020).

引文格式: ZHOU Yaozong, LOU Yidong, ZHANG Weixing, et al. On the Accuracy and PPP Performance Evaluation of the Latest Generation of Real-time Tropospheric Mapping Function[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(12): 1881–1888. DOI:10.13203/j.whugis20210238(周要宗, 楼益栋, 张卫星, 等. 新一代实时对流层映射函数精度及PPP性能评估[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(12):1881–1888.DOI:10.13203/j.whugis20210238)