DOI:10.14075/j.jgg.2024.10.482

文章编号:1671-5942(2025)10-1020-06

精密单点定位中对流层延迟不同映射模型分析

张亚豪[1]　温　强[1]

1　中国科学院精密测量科学与技术创新研究院大地测量与地球动力学国家重点实验室,武汉市徐东大街 340 号,430077

摘　要:基于全球 77 个 GNSS 测站观测数据,系统评估 4 种对流层延迟映射函数模型(GMF、NMF、VMF1、VMF3)的全球适用性及其对精密单点定位(PPP)精度的影响。采用 PRIDE PPP-AR 软件处理获得各测站天顶对流层延迟(ZTD),以欧洲定轨中心(CODE)发布的 ZTD 产品为基准,结合地理分区(低/中/高纬度、陆地/海洋、海拔梯度)开展模型性能对比分析。结果表明,现有对流层延迟映射函数模型在低纬度、低海拔、海洋区域精度较差,VMF 系列映射函数模型在应对海拔、纬度变化引起的差异时表现较好,GMF 和 VMF 系列映射函数模型对海洋测站改正效果比较显著;U 方向定位精度方面,GMF、VMF3、NMF 映射函数模型分别在低纬度、中纬度、高纬度表现最好,GMF 和 VMF 系列映射函数模型在全球范围内 PPP 数据处理中效果较优。

关键词:GNSS;精密单点定位;天顶对流层延迟;映射函数模型;全球适用性

中图分类号:P228　　**文献标识码**:A

GNSS 信号在传播过程中,受对流层延迟影响出现路径弯曲和速度衰减,使 GNSS 观测值中含有天顶对流层延迟(ZTD)。在精密单点定位(PPP)处理中通常是将模型估计的天顶静力学延迟(ZHD)作为先验值,将天顶湿延迟(ZWD)作为参数进行估计,并通过映射函数模型投影到信号传播路径上去。对流层延迟作为影响 GNSS 信号传播的关键因素之一,不仅对定位精度构成挑战,还蕴含了底层大气圈丰富的水汽信息。因此,高精度对流层延迟映射函数对于精密定位和 GNSS 大气水汽反演具有重要意义[1]。

映射函数模型由早期简略三角函数形式逐渐向高精度动态映射函数模型发展,目前应用较为广泛的映射函数模型有全球投影函数(GMF)、尼尔映射函数(NMF)、维也纳映射函数 1(VMF1)、维也纳映射函数 3(VMF3)等。对流层延迟映射函数模型存在系统误差,对不同模型进行性能评估有助于高精度映射函数模型的建立[2]。对流层延迟映射函数模型不仅对高度角具有敏感性,还受到水汽、温度等环境参数的影响,虽然已有研究集中探讨了单一环境因素对 ZTD 先验模型的影响,但针对多重环境因素对映射函数的评估研究相对较少[3-6]。本文以全球范围内 77 个测站的观测值数据为例,从不同海拔、纬度、地理位置的角度出发,聚焦多重环境因素对映射函数的使用效果,基于当前现有的大地测量数据处理框架,深入探究不同对流层映射函数模型在不同地理区域的适应性问题。

1　方法与数据

1.1　PPP 无电离层组合观测模型

双频无电离层组合模型能够消除电离层延迟一阶项,由于高阶项对于定位影响较小,可以忽略不计,因此该方法可以极大削弱电离层延迟对于 GNSS 观测值的影响,是 PPP 中常用的一种组合形式[7],其表达式为:

$$\begin{cases} L_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{s}} = \dfrac{f_1^2}{f_1^2-f_2^2}L_{\mathrm{r},1}^{\mathrm{s}} - \dfrac{f_2^2}{f_1^2-f_2^2}L_{\mathrm{r},2}^{\mathrm{s}} = \\ \quad \rho_{\mathrm{s}}^{\mathrm{r}} + c(\mathrm{d}t_{\mathrm{r}} - \mathrm{d}t^{\mathrm{s}}) + \mathrm{Trop}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s}} + \\ \quad \lambda_{\mathrm{IF}}(B_{\mathrm{r,IF}} - B_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{s}}) + N_{\mathrm{r,IF}}^{\mathrm{s}} + \varepsilon_{L_{\mathrm{IF}}} \\ P_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{s}} = \dfrac{f_1^2}{f_1^2-f_2^2}P_{\mathrm{r},1}^{\mathrm{s}} - \dfrac{f_2^2}{f_1^2-f_2^2}P_{\mathrm{r},2}^{\mathrm{s}} = \\ \quad \rho_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s}} + \mathrm{c}(\mathrm{d}t_{\mathrm{r}} - \mathrm{d}t^{\mathrm{s}}) + \mathrm{Trop}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s}} + \\ \quad b_{\mathrm{r,IF}} - b_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{s}} + \varepsilon_{P_{\mathrm{IF}}} \end{cases} \tag{1}$$

式中,s、r 和 IF 分别为卫星、接收机和无电离层组合值;$L_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{s}}$ 和 $P_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{s}}$ 分别为载波相位观测值和伪距观测值,单位 m;$\rho_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s}}$ 为卫星 s 到接收机 r 的几何距离;c 为光速;$\mathrm{d}t_{\mathrm{r}}$、$\mathrm{d}t^{\mathrm{s}}$、$B_{\mathrm{r,IF}}$、$B_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{s}}$ 分别为接收机钟

收稿日期:2024-10-23

项目来源:国家自然科学基金(42025401)。

第一作者简介:张亚豪,硕士生,主要研究方向为精密单点定位,E-mail:zyhcas@163.com。

通讯作者:温强,博士,助理研究员,主要研究方向为精密单点定位,E-mail:wenqiang@apm.ac.cn。

差、卫星钟差、接收机和卫星的载波相位硬件延迟;$\mathrm{Trop}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s}}$ 为对流层斜路径延迟;$N_{\mathrm{r,IF}}^{\mathrm{s}}$ 为无电离层组合模糊度;$b_{\mathrm{r,IF}}$ 和 $b_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{s}}$ 分别为接收机端和卫星端的硬件延迟;$\varepsilon_{L_{\mathrm{IF}}}$ 和 $\varepsilon_{P_{\mathrm{IF}}}$ 分别为载波相位和伪距的观测噪声。

1.2　PPP-ZTD 基本原理

对流层斜路径延迟可以表示为[8]:

$$\mathrm{Trop}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s}} = M_h \cdot \mathrm{ZHD} + M_w \cdot \mathrm{ZWD} \tag{2}$$

式中,ZHD 和 ZWD 分别为天顶方向的静力学延迟和湿延迟;M_h 和 M_w 分别为静力学延迟和湿延迟的映射函数。此时,天顶方向的对流层延迟可以表达为:

$$\mathrm{ZTD} = \mathrm{ZHD} + \mathrm{ZWD} \tag{3}$$

在 GNSS 数据解算过程中,通常是根据先验对流层模型得到天顶静力学延迟的初值,然后将天顶湿延迟作为待求参数进行估计,最后将 ZHD 和 ZWD 之和作为 ZTD 的估计结果。

1.3　常用对流层延迟映射函数模型

GMF、NMF、VMF1、VMF3 模型均是连分式映射函数模型[9-11],区别在于静力学延迟和湿延迟系数求取方面存在差异。具体计算公式为:

$$M_i = \frac{1+\dfrac{a_i}{1+\dfrac{b_i}{1+c_i}}}{\sin e+\dfrac{a_i}{\sin e+\dfrac{b_i}{\sin e+c_i}}} + \vartheta h_i \quad (i = h, w) \tag{4}$$

式中,M_i 与式(2)中含义一致,分别为静力学延迟和湿延迟的映射函数模型;a_i、b_i、c_i 为映射函数前的系数。为方便表述,将静力学延迟系数和湿延迟系数分别记为 $A_h(a_h、b_h、c_h)$和 $A_w(a_w、b_w、c_w)$。e 表示卫星高度角,$\vartheta h_w = 0$,ϑh_h 为静力学延迟异常值,具体计算公式为:

$$\vartheta h_d = 10^{-3}\left[\frac{1}{\sin e}-\frac{1+\dfrac{ah}{1+\dfrac{bh}{1+ch}}}{\sin e+\dfrac{ah}{\sin e+\dfrac{bh}{\sin e+ch}}}\right]h_r \tag{5}$$

式中,h_r 为测站正高(单位 m),$ah=2.53\times10^{-5}$,$bh=5.49\times10^{-3}$,$ch=1.14\times10^{-3}$。

1.4　数据来源及解算策略

选取全球高、中、低纬度 77 个测站作为实验站(图 1),测站时间跨度为 2023-03-01—31,观测数据从武汉大学 IGS 分析中心网站中下载。PPP 处理参数设置见表 1。

表 1　参数设置

Tab. 1　Parameter settings

模型/参数	参数设置
PPP 模型	无电离层组合模型
解算模式	静态
采样间隔	30 s
精密轨道和钟差产品	WHU 精密轨道/钟差
参数估计方法	基于最小二乘的消元法
对流层延迟先验模型	Saastamoninen
对流层延迟残差	随机游走模型(STO)
截止高度角	7°
对流层映射函数	GMF/NMF/VMF1/VMF3
梯度估计间隔	12 h

采用武汉大学开源软件 PRIDE PPP-AR 进行 PPP 处理[12],数据采样间隔为 30 s,精密星历、钟差、相位偏差和姿态产品均采用武汉大学分析中心(WHU)提供的快速精密产品(ftp://igs.gnsswhu.cn/pub/whu/phasebias)。为了获取天顶对流层延迟,采用 GPT3 模型提供的大气参数,用 Saastamoninen 模型估算 ZHD 和 ZWD 先验值。对于 ZWD 残余误差,使用随机游走模型估计,然后分别使用 4 种映射函数模型将估计的 ZHD 和 ZWD 映射至斜路径方向参与 PPP 处理,最后将 ZHD 和 ZWD 先验值与估算得到的 ZWD 残差相加得到 ZTD。以 CODE 发布的小时分辨率的 ZTD 产品作为参考真值[13],分析不同映射函数在不同地区的差异特征。

采用 RMSE 和 bias 进行精度比较:

$$\mathrm{bias} = \sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x}) \tag{6}$$

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i)^2}{n-1}} \tag{7}$$

式中,n 为样本数据的总量;$x_1, x_2 \cdots x_n$ 和 $y_1, y_2 \cdots y_n$ 分别为观测值和真值;$\bar{x}$ 为观测值的平均值。

2　结果与分析

2.1　不同环境下对流层映射函数性能对比

为探究不同地理环境下 PPP-ZTD 之间的估计差异,评估对流层映射函数模型的选择对 ZTD 估计结果的影响,以全球范围内 77 个 MGEX 测站观测数据为例,将采用不同模型得到的对流层延迟与 CODE 分析中心发布的 ZTD 产品进行比较,结果见图 1 和表 2。

从图 1 发现,所有模型估计 ZTD 的 RMSE 均在 4.5 mm 左右,且不同模型在不同地区的精度不同。在南极和亚洲的东北部 NMF 模型估计效果较差,相比于 GMF 和 VMF 系列映射函数模型存在 2 mm 左右的偏差。在欧洲和北美洲,4

种映射函数模型估计效果相当，能够达到 3 mm 的偏差。表 2 给出了图 1 中 RMSE>8 mm 的一些测站的信息，结合图 1 和表 2 可以发现，偏差较大的测站存在于低纬度地区，集中在赤道左右，并且都处于沿海位置，初步推测这些测站估计 ZTD 性能较差是因为赤道地区上空气流变化频繁，无法准确估计对流层延迟。鉴于以上结果，本文将从海拔、纬度、海陆环境 3 个角度具体分析不同地理环境下不同映射函数模型的估计性能。

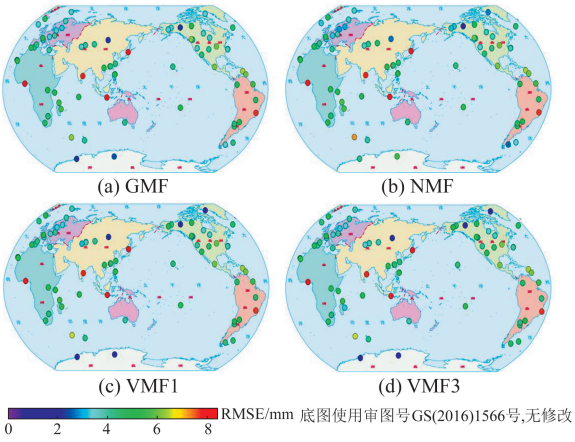


图 1 不同映射函数模型估计 PPP-ZTD 的 RMSE 空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of RMSE for PPP-ZTD estimated by different mapping function models

表 2 偏差较大的测站分布（RMSE>8 mm）

Tab. 2 Distribution of stations with large deviations (RMSE>8 mm)

测站名	经度/(°)	纬度/(°)	大地高/m
CHPG	−45.00	−22.68	566.66
JOG2	110.37	−7.76	174.78
USUD	138.36	36.13	1509.03
ACRG	−0.21	5.64	83.79
IISC	77.57	13.02	844.12

2.1.1 不同海拔处映射函数对比

海拔的变化直接影响着大气的压力和温度，随着海拔的升高，大气变得稀薄，气压降低，湿度减少，温度降低，这些因素都影响着映射函数的精度。

选取在相近纬度下具有较大高差跨度的测站，并将其分为 2 组进行分析，第 1 组是位于赤道附近的 BOGT(2 576.7 m)、NKLG(31.4 m)和 DGAR(−64.7 m)，第 2 组是位于 40°N 附近的 GODE(14.5 m)、EBRE(107.3 m)和 TASH(439.7 m)。统计分析时以 VMF3 得到的结果为基准，计算其与其他映射函数之间的差异，结果见图 2(y 轴表示其他映射函数与 VMF3 估计对流层延迟的差异，单位 mm，x 轴表示处理 GNSS 数据的时间刻度，e1、e2 分别表示设计的 2 组实验，图 4(d)由于数据缺失并未绘制完整)。表 3 给出了实验测站相比于 ZTD 真值的 RMSE。

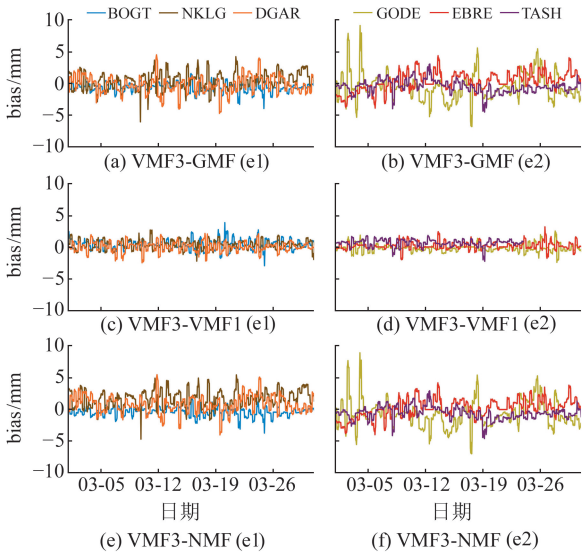


图 2 不同映射函数估计对流层延迟差异

Fig. 2 Differences in tropospheric delay estimation using different mapping functions

由图 2 可知，VMF3 与 VMF1 模型之间相关性最好，差异在±2 mm 之内，GMF 模型的效果次之，NMF 模型偏差稍大，但也能够达到±10 mm 之内。在图 4(a)、4(c)、4(e)中，BOGT 测站海拔最高，每种映射函数之间的符合程度最好，NKLG 与 DGAR 测站海拔较为接近，所以产生的结果类似。在图 4(b)、4(d)、4(f)中，GODE 作为地理位置最低的测站，不同映射函数之间对于对流层延迟的估计性能差异较大，达到 10 mm。

表 3 不同海拔对流层延迟结果统计

Tab. 3 Statistics of tropospheric delay results at different altitudes

测站名	海拔/m	RMSE/mm			
		GMF	NMF	VMF1	VMF3
BOGT	2 576.7	4.96	4.85	4.55	4.59
NKLG	31.4	6.11	6.27	6.01	6.01
DGAR	−64.7	5.05	5.32	4.83	4.79
TASH	439.7	6.12	6.42	4.14	5.24
EBRE	107.3	3.98	4.04	3.86	3.84
GODE	14.5	6.00	6.31	4.89	4.72

从表 3 可以发现，海拔较高的测站，如 BOGT 测站，4 种模型结果相当。对于海拔较低的测站，如 GODE 测站，VMF 系列模型效果明显优于 GMF 和 NMF 模型，表明 VMF 系列映射函数模型在应对海拔变化引起的环境差异时表现更优。

综上所述，测站之间海拔高度的差异会导致不同映射函数之间的改正量存在差异。当测站处于高海拔位置时，无论使用哪种映射函数，都具有较高的稳定性，且各组结果之间的差异较小；当测站所处的海拔越低，各组对流层映射函数得到的对流层延迟差异越大，此时 VMF 系列映射函数模型明显优于 GMF 和 NMF 映射函数模型。在 4 种对流层映射函数中，NMF 与 VMF3 模型的

差异普遍最大,极值差大于 10 mm,而 VMF1 与 VMF3 模型差异最小,极值差小于 3 mm。

2.1.2　不同纬度区域映射函数对比

为探究映射函数在不同纬度之间的变化关系,以 CODE 的 ZTD 产品作为参考真值计算得到 RMSE,并按照测站所在的纬度进行分类统计,分析不同纬度下不同模型估计 ZTD 结果的准确性,结果见表 4。

表 4　不同纬度对流层延迟结果统计

Tab. 4　Statistics of tropospheric delay results at different latitudes

纬度	测站数	bias/mm				RMSE/mm			
		GMF	NMF	VMF1	VMF3	GMF	NMF	VMF1	VMF3
$\|E\|\leqslant 30°$	29	−0.12	−0.39	−0.33	−0.11	5.80	5.82	5.80	5.72
$30°<\|E\|\leqslant 60°$	36	0.77	1.26	0.29	0.30	4.35	4.42	4.46	4.46
$\|E\|>60°$	12	0.67	0.98	0.66	0.60	3.60	3.91	3.67	3.67
$0°<\|E\|\leqslant 90°$	77	0.43	0.61	0.12	0.21	4.83	4.91	4.88	4.85

从表 4 可以发现,所有模型估计出 ZTD 的 RMSE 差异不大,均在 4 mm 左右,NMF 模型估计效果较差,与 GMF 和 VMF 系列映射函数模型存在 1 mm 左右的偏差。此外,RMSE 与纬度具有较强的相关性,低纬度测站 RMSE 较高,高纬度测站 RMSE 较低。图 3 为不同映射函数模型估计的对流层延迟 RMSE 随纬度的变化情况,图中 x 轴表示纬度,y 轴表示不同映射函数下估计 ZTD 的 RMSE,不同颜色的点表示纬度的不同。

从图 3 可以看出,在低纬度地区中,极值区域并不是出现在赤道附近,而是集中于南北纬 20°附近,这是因为:1)该地区受到大气环流作用导致水汽变化频繁,对流层延迟估计误差变大;2)该纬度地区绝大部分位于海面上,测站较少,无法对映射函数模型进行准确建模。在低高纬度地区使用不同映射函数模型得到的 RMSE 结果较为相似,而在中纬度地区,VMF 系列映射函数模型明显要优于 NMF 映射函数模型。说明即使是目前已经较成熟的 VMF3 映射函数模型对某些特殊地形或者复杂环境信号的对流层斜路径改正效果依旧不够准确,但是 GMF、VMF1、VMF3 这些模型已经能够满足全球区域大部分环境下的对流层延迟改正,并得到较为准确的结果。

2.1.3　不同海陆环境下的映射函数对比

选取位于 30°S～30°N 的海洋和陆地部分测站进行分析(将位于海岸线 1 km 之内的测站认为是海洋测站)。对不同映射函数得到的 PPP-ZTD 结果差异的 RMSE 进行统计和分析,结果见图 4。可以看出,陆地测站估计精度优于海洋测站,RMSE 平均值分别约为 4 mm 和 7 mm。位于海洋附近的测站的解算结果受映射函数的影响较大,如 CZTG 测站。NLIB 测站位于美国艾奥瓦州,估计结果偏差较大,可能是因为艾奥瓦州在 2023-03 发生暴雨事件,水汽变化幅度较大,导致 ZTD 估计的结果误差较大。

综上可知,不同对流层映射函数模型在不同海拔、纬度、海陆环境下存在显著差异,且 GMF 和 VMF 系列映射函数模型在应对这些环境差异带来的影响时表现更好。

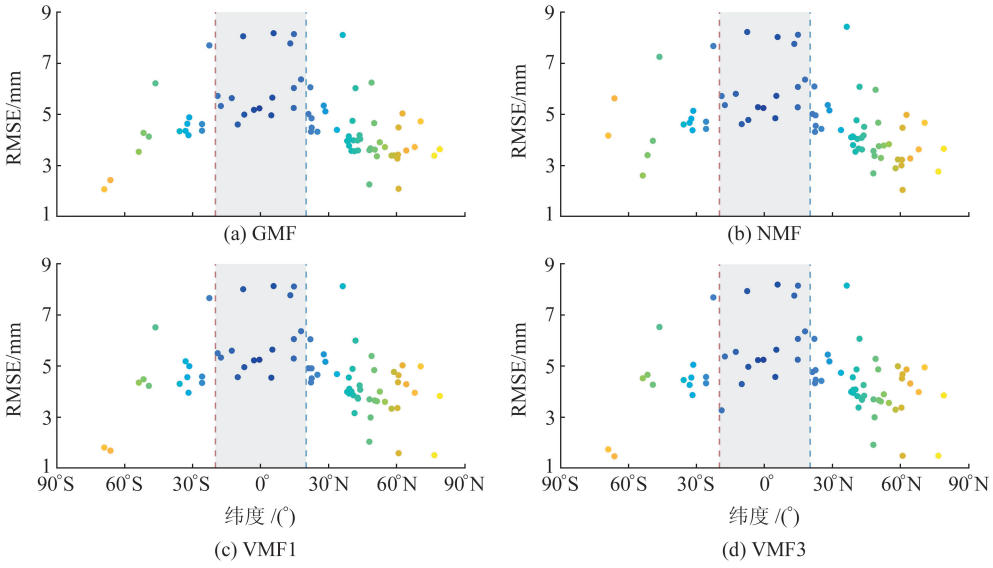


图 3　不同映射函数模型估计的对流层延迟 RMSE 随纬度的变化情况

Fig. 3　RMSE of ZTD estimated by different mapping function models varies with latitude

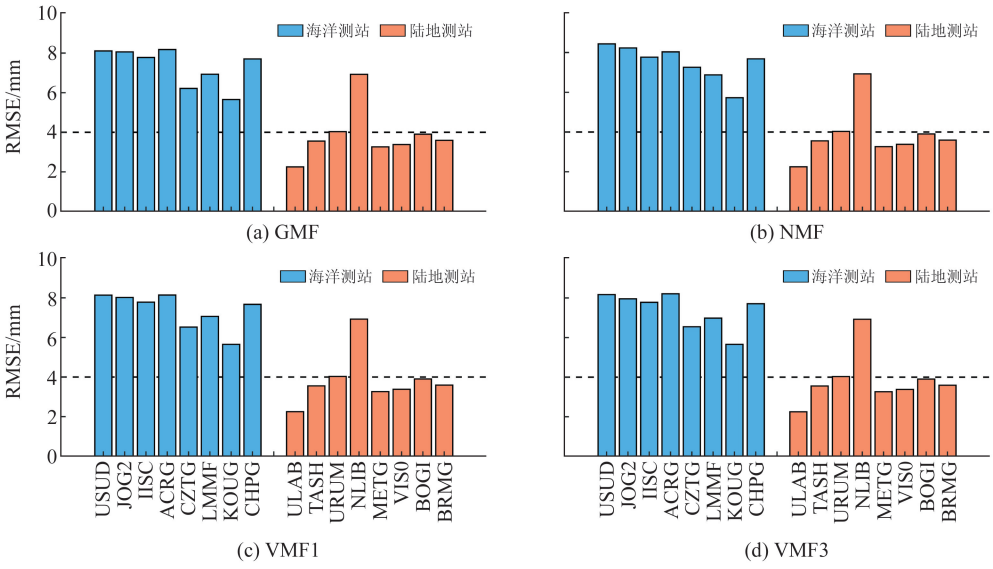


图 4 不同模型海洋和陆地测站 RMSE 统计

Fig. 4 RMSE statistics of ocean and land stations for different models

2.2 不同模型定位精度分析

对全球区域 77 个测站 2023-03-01—31(采样率为 30 s)的观测数据分别采用 4 种对流层映射函数模型进行模糊度固定解解算,然后利用 CODE 提供的 SINEX 文件中的测站坐标(视为真值),将 4 种模型下解算的空间直角坐标(X,Y,Z)转换为站心坐标(N,E,U),最后通过 RMSE 指标对 4 种模型进行比较,结果见表 5。由于对流层延迟对测站 U 方向的影响较为显著,因此以 U 方向为主要研究方向。

表 5 不同纬度 U 方向 RMSE 统计

Tab. 5 RMSE statistics of different latitudes in U direction

纬度	测站数	RMSE/mm			
		GMF	NMF	VMF1	VMF3
$\|E\|\leqslant 30°$	29	5.04	5.39	5.46	5.32
$30°<\|E\|\leqslant 60°$	36	6.12	6.33	5.87	5.80
$\|E\|>60°$	12	5.37	5.32	5.88	5.80
$0°<\|E\|\leqslant 90°$	77	5.60	5.82	5.72	5.62

表 5 给出了每种模型在不同纬度下 U 方向的 RMSE,可以发现,在低纬度地区,GMF 映射函数模型表现更好,相比于其他模型存在 0.3 mm 左右的差异;在中纬度地区,VMF 系列映射函数模型要明显优于 NMF 模型,大约存在 0.5 mm 左右的差异,在 VMF 系列映射函数模型中,VMF3 模型表现更好;在高纬度地区,NMF 映射函数模型表现效果最好。不同模型差异在亚 mm 级别,这也说明了不同模型之间稳定性基本一致。总体而言,GMF 和 VMF 模型略优于 NMF 模型。

3 结 语

1)海拔越高,测站上空对流层延迟越稳定,4 种模型之间的改正效果越相近。VMF 系列映射函数模型在低海拔地区表现效果比较好。随着纬度的降低,基于不同模型估计的 ZTD 精度降低,极值区域出现在南北纬 20°附近。VMF 系列映射函数模型在面对纬度变化导致的环境差异时表现效果比较好。海洋测站上空 ZTD 差异要明显大于陆地测站,此时 GMF 和 VMF 系列映射函数模型改正效果比较显著。

2)使用 1 个月的数据进行测站坐标精度对比,重点分析 U 方向的均方根误差。不同地区不同映射函数模型表现各有差异,在低纬度地区,GMF 模型表现最好,VMF3 模型更加适用于中纬度地区;在高纬度地区,NMF 模型表现最优。考虑到所有的实验测站,无论采用何种映射函数模型都可以达到 mm 级别的定位精度,GMF 和 VMF 模型略优于 NMF 模型。

参考文献

[1] 张克非,李浩博,王晓明,等. 地基 GNSS 大气水汽探测遥感研究进展和展望[J]. 测绘学报,2022,51(7):1172-1191(Zhang Kefei, Li Haobo, Wang Xiaoming, et al. Recent Progresses and Future Prospectives of Ground-Based GNSS Water Vapor Sounding[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(7): 1172-1191)

[2] 章迪. GNSS 对流层天顶延迟模型及映射函数研究[J]. 测绘学报,2022,51(9):1984(Zhang Di. The Study of the GNSS Tropospheric Zenith Delay Model and Mapping Function[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(9): 1984)

[3] 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(Zhou Yaozong, Lou Yidong, Zhang Weixing, et al. On the Accuracy and PPP Perform-

ance Evaluation of the Latest Generation of Real Time Tropospheric Mapping Function[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(12): 1881-1888)

[4] Qiu C, Wang X M, Li Z S, et al. The Performance of Different Mapping Functions and Gradient Models in the Determination of Slant Tropospheric Delay[J]. Remote Sensing, 2020, 12(1): 130

[5] 黄逸宇, 魏冠军, 任瑞. 对流层映射函数对 GNSS 反演可降水量的影响分析[J]. 全球定位系统, 2019, 44(2): 76-83(Huang Yiyu, Wei Guanjun, Ren Rui. Analysis of the Influence of Tropospheric Mapping Function on GNSS Inversion Precipitable Water Vapor[J]. GNSS World of China, 2019, 44(2): 76-83)

[6] Qu X C, Ding W W, Teferle F N, et al. Improved Height Correction Model for Hydrostatic Mapping Functions in GNSS Data Processing[J]. Journal of Geodesy, 2022, 96(12): 99

[7] Schüler T, Diessongo H, Poku-Gyamfi Y. Precise Ionosphere-Free Single-Frequency GNSS Positioning[J]. GPS Solutions, 2011, 15(2): 139-147

[8] 吕明慧. 基于 GNSS 精密定位的精化随机模型与对流层延迟应用研究[D]. 武汉: 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 2022(Lü Minghui. Research on Refined Stochastic Model and Tropospheric Delay Application Based on GNSS Precise Positioning[D]. Wuhan: Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, CEA, 2022)

[9] 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)

[10] Landskron D, Boehm J. VMF3/GPT3: Refined Discrete and Empirical Troposphere Mapping Functions[J]. Journal of Geodesy, 2018, 92(4): 349-360

[11] 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)

[12] Geng J H, Chen X Y, Pan Y X, et al. PRIDE PPP-AR: An Open-Source Software for GPS PPP Ambiguity Resolution[J]. GPS Solutions, 2019, 23(4)

[13] 冯鹏. GNSS 对流层误差模型研究及其气象学应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2021(Feng Peng. Research on GNSS Tropospheric Error Model and Its Meteorological Application [D]. Wuhan: Wuhan University, 2021)

Assessment of Different ZTD Mapping Functions for Precise Point Positioning

ZHANG Yahao[1]　*WEN Qiang*[1]

1　State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, CAS, 340 Xudong Street, Wuhan 430077, China

Abstract: Based on observation data from 77 GNSS stations worldwide, this study systematically evaluates the global applicability of four tropospheric delay mapping function models (GMF, NMF, VMF1, VMF3) and their impact on the accuracy of precise point positioning(PPP). The zenith tropospheric delay(ZTD) for each station was obtained using the PRIDE PPP-AR software. With the ZTD products released by the Center for Orbit Determination in Europe(CODE) as a reference, a comparative analysis of model performance was conducted across geographical zones(low/medium/high latitudes, land/ocean, and altitude gradients). The results indicate that the existing tropospheric delay mapping function models exhibit poorer accuracy in low-latitude, low-altitude, and oceanic regions. The VMF series mapping function models perform better in addressing differences arising from changes in altitude and latitude, and both the GMF and VMF series models show significant correction effects for oceanic stations. In terms of positioning accuracy in the U direction, the GMF, VMF3, and NMF mapping function models perform best in low-latitude, medium-latitude, and high-latitude regions, respectively. Overall, the GMF and VMF series mapping function models demonstrate superior performance in global PPP data processing.

Key words: GNSS; precise point positioning; zenith tropospheric delay; mapping function model; global applicability

Foundation support: National Natural Science Foundation of China, No. 42025401.

About the first author: ZHANG Yahao, postgraduate, majors in precise point positioning, E-mail: zyhcas@163.com.

Corresponding author: WEN Qiang, PhD, assistant researcher, majors in precise point positioning, E-mail: wenqiang@apm.ac.cn.