DOI:10.13878/j.cnki.jnuist.2022.06.014

王紫薇[1]　黄观文[1]　杜石[1]　谢威[1]

陕西省北斗三号区域电离层 TEC 建模与精度评估

摘要

基于陕西省北斗地基增强监测站数据,利用 4 阶球谐函数建立了陕西区域电离层总电子含量(TEC)模型,生成区域 TEC 格网产品.实验结果表明:以欧洲定轨中心(CODE)全球电离层图(GIM)产品作为参考,利用 BDS-3 数据获得的陕西区域北斗电离层产品精度为 2.54 TECu,与 CODE 产品标称精度相当.在单频精密单点定位(SF-PPP)性能方面,BDS-3 区域电离层产品可以提升定位精度 35%,优于 CODE 全球电离层产品改正效果(27%).综合而言,BDS-3 单系统在区域电离层建模方面具备较为优异的性能水平.

关键词

电离层延迟;总电子含量(TEC);球谐函数;精密单点定位(PPP)

中图分类号 P228.4
文献标志码 A

收稿日期 2022-08-09
资助项目 国家自然科学基金(42127802);陕西省重点研发计划(2022ZDLSF07-12)

作者简介

王紫薇,女,博士生,研究方向为 GNSS 电离层建模.2021026016@chd.edu.cn

黄观文(通信作者),男,博士,教授,研究方向为卫星导航与大地测量.guanwen@chd.edu.cn

1 长安大学 地质工程与测绘学院,西安,710054

0 引言

电离层延迟误差是影响 GNSS 导航定位授时服务质量最重要的误差源之一,电离层总电子含量(TEC)作为研究电离层延迟误差的关键参数,对其精确建模是削弱或消除电离层延迟误差对用户定位影响的方法之一[1-2].近年来,国内外学者对电离层建模做了许多研究,例如:美国喷气推进实验室学者首次提出基于 GPS 原始观测数据确定电离层总电子含量的方法[3];柳景斌等[4]利用 GPS 数据建立中国区域电离层 TEC 球冠谐分析模型,并评估了该模型的精度和有效性;陈永贵[5]利用球谐函数建立中国区域电离层模型,针对测站数量对建模结果进行分析;Zhang 等[6]利用 GPS、BDS-2 观测数据分别对中国区域进行电离层建模,研究表明中低纬地区 BDS-2 观测数据建模精度较高;Ren 等[7]利用 GPS、GLONASS、BDS-2 数据采用不同组合对中国区域进行电离层建模,基于 BDS-2 观测数据建模结果与分别基于 GPS、GLONASS 结果相当,基于 GRC 组合观测数据明显提高建模精度;从建锋等[8]以及 Prakanrattana 等[9]分别基于球谐函数对我国山东、泰国进行区域电离层建模,通过单频精密单点定位验证其有效性;吴伟铨等[10]针对武汉地区进行 TEC 建模,建模方法分别采用 4×3 阶多项式模型、2 阶多项式模型、4 阶球谐函数模型,实验结果表明 4 阶球谐函数模型对电离层 TEC 建模效果最好.目前,利用球谐函数在区域电离层建模方面得到了准确验证,但是大多数区域电离层建模利用 GPS 观测数据或者多系统融合时仅利用 BDS-2 观测数据,基于 BDS-3 观测数据利用球谐函数进行区域电离层建模研究较少.

IGS 电离层工作小组(IAACs)以 CODE 分析中心为代表机构提供高精度的电离层延迟格网产品,标称精度为 2~8 TECu.目前 IAACs 各分析中心生成 GIM 产品采用 GPS 和 GLONASS 观测数据[11].随着 GNSS 技术的发展,若能将 BDS、Galileo 系统观测数据加入到电离层建模中,能够增加观测数量,提高电离层穿刺点的空间覆盖率以及改善电离层建模的准确性,多系统 GNSS 观测数据为高精度的电离层建模提供了可能.2020 年北斗三号全球卫星导航系统,即北斗三号(BDS-3)全面组网成功,正式向全球提供服务.BDS-3 由 24 颗中圆地球轨道(MEO)、3 颗倾斜地球同步轨道(IGSO)和 3 颗地球静止轨道(GEO)3 种不同轨道类型的卫星组成,因此在亚太地区服务有着独特的优势[12].由于目前基于 BDS-3 数据进行区域电离层建模的研究成

果较少,为了进一步分析北斗三号在亚太地区区域电离层建模能力,本文基于陕西省北斗地基增强网监测站 GNSS 观测数据,利用球谐函数进行陕西省区域电离层建模,同时对电离层建模生成的格网产品精度和服务性能进行分析.

1 电离层建模方法

利用观测区域内测站 GNSS 双频观测数据,采用双频载波相位平滑伪距法计算电离层 TEC 值,联合求解出 TEC 值与球谐函数,解算出待估球谐函数模型系数,建立区域电离层 TEC 模型.

双频载波相位平滑伪距方法计算高精度 TEC 值可以表示为

$$\mathrm{STEC} = \frac{f_1^2 f_2^2}{40.28(f_1^2 - f_2^2)}\left\{\left[(L_1 - L_2) + \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}(P_2 - P_1) - (L_1 - L_2)\right] + c(B_{\mathrm{DC,r}} + B_{\mathrm{DC}}^{\mathrm{s}})\right\}, \tag{1}$$

其中,f 为载波相位的频率,N 为历元数,P_1 和 P_2 分别为频率 1 和频率 2 的伪距观测值,L_1 和 L_2 分别为频率 1 和频率 2 的载波相位观测值,$B_{\mathrm{DC,r}}$和 $B_{\mathrm{DC}}^{\mathrm{s}}$分别为接收机和卫星的差分码偏差,$c$ 表示光速.

将总电子含量 STEC 转换到与高度角无关的天顶方向的 VTEC,可以更好地反映测站上空的电离层总体特征,采用的投影函数[13]为

$$F(z) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R_e}{R_e + H}\sin(\alpha \cdot z)\right)^2}}, \tag{2}$$

其中:z 是测站方向的天顶距;R_e 表示地球的平均半径,$R_e = 637\ 1$ km;H 为电离层单层高度,一般取值为 506.7 km;α 为天顶距系数,$\alpha = 0.978\ 2$.

本文选取三角投影函数模型,进行单层电离层建模,电离层观测方程可以表示为

$$\mathrm{VTEC} = \frac{1}{40.28} \cdot \cos Z \cdot \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}\left\{\left[(L_1 - L_2) + \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}(P_2 - P_1) - (L_1 - L_2)\right] + c(B_{\mathrm{DC,r}} + B_{\mathrm{DC}}^{\mathrm{s}})\right\}. \tag{3}$$

球谐函数模型是精确描述电离层变化较为理想的数学模型之一,并已广泛应用于区域及全球电离层建模,能较好地反映总电子含量的时空分布变化.球谐函数是目前公认的一种有效的电离层建模方法,被大部分 IGS 分析中心采用.VTEC 球谐函数模型表达式为

$$\mathrm{VTEC}(\beta, s) = \sum_{n=0}^{n_{\max}}\sum_{m=0}^{n}\tilde{P}_{nm}(\sin\beta) \cdot (a_{nm}\cos(ms) + b_{nm}\sin(ms)), \tag{4}$$

其中:VTEC 单位为 TECu,1 TECu = 10^{16}个电子/m^2;β 为穿刺点处的地磁纬度;s 为穿刺点日固地磁坐标系下的日固经度;$n_{\max}$ 为球谐函数展开式的最高阶数;m 为球谐展开式的次数;a_{nm},b_{nm}为待估的球谐模型系数;$\tilde{P}_{nm}(\sin\beta) = N_{nm}P_{nm}$为正规化的 n 阶 m 次缔合勒让德函数.

将式(3)和式(4)联立,利用最小二乘方法求解球谐函数模型系数 a_{nm},b_{nm},然后将区域电离层模型产品按照标准 IONEX 格式输出即可.

2 实验分析

2.1 数据获取及处理策略

为了评估 BDS-3(以下简称 BDS)、GPS、GLONASS、Galileo 观测数据的电离层建模性能,选取时间为 2021 年第 310 天~第 330 天的 42 个(图 1 中蓝色圆点所示测站)陕西省北斗地基增强监测站进行电离层建模,3 个监测站(图 1 中红色星号所示测站)进行验证,分别进行基于 BDS(C)、BDS+GPS(GC)、BDS+GPS+GLONASS+Galileo(GCRE)观测数据的电离层建模,建模区域大小为 31.5°~40°N,105°~112.5°E,观测数据的采样间隔为 30 s,时间分辨率 2 h,空间分辨率 1°×1°,采用 4 阶球谐函数进行区域电离层拟合[14].

2.2 VTEC 精度分析

2.2.1 与事后 GIM 产品对比

利用前文所述的方法分别基于 C、GC、GCRE 对 2021 年年积日 310~330 天的观测数据进行解算,建立陕西省区域电离层模型.为进一步分析电离层模型的精度,以 CODE 分析中心发布的 GIM 为参考,图 2—4 给出了 2021 年年积日 325 天 02、06、10、14、18、22 共 6 个时刻分别基于 C、GC、GCRE 得到的陕西区域电离层 VTEC 分布与 CODE GIM 的残差,可以看出所有模型在不同时刻的电离层 TEC 与 CODE GIM 产品的差异都在±3.5 TECu 以内,在陕西中部与 CODE GIM 有很好的一致性,差值在±1 TECu 以内,所有模型建模结果在与 CODE GIM 最大的差异主要是西北、东南的边缘地区,最大偏差分别达到 2.8 和 3.5 TECu,主要原因是西北、东南边缘地区测站较少,导致电离层穿刺点(IPP)分布较为稀疏,以至于

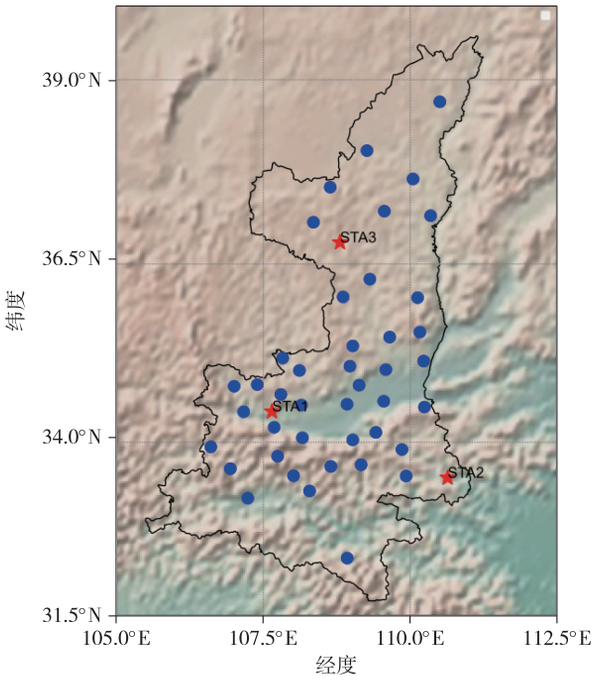

图 1　测站分布

Fig. 1　Distribution of monitoring stations

反演的电离层精度相对较低.从图 4 可以看出,四系统建模相对于单系统、双系统建模,在区域边缘地带残差明显减小,进一步改善了区域边缘地带建模精度,在 UTC 06:00(当地时间 14 时)时,残差变大,此时太阳活动比较剧烈,影响电离层的电子密度.

为了验证本文基于 C、GC、GCRE 系统的电离层建模结果的可靠性,采用 Bias 和 RMS 评估精度.其公式[15]可表示如下:

$$\begin{cases} \mathrm{Bias} = \dfrac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\mathrm{VTEC}_{g,i} - \mathrm{VTEC}_{0,i}), \\ \mathrm{RMS} = \sqrt{\dfrac{\sum_{i=1}^{n}(\mathrm{VTEC}_{g,i} - \mathrm{VTEC}_{0,i})^2}{n}}, \end{cases} \tag{5}$$

式中,$\mathrm{VTEC}_{g,i}$为利用 GIMs 计算的第 i 个 VTEC 观测值,则 $\mathrm{VTEC}_{0,i}$为第 i 个 VTEC 参考值,n 为参与检核的 VTEC 观测值数量.

以 CODE_GIM 作为参考值,统计了 2021 年年积日 310~330 天本文 3 种系统组合的陕西区域电离层模型的 Bias 和 RMS,其结果如表 1 所示.

表 1　陕西区域电离层模型与 CODE GIM 差值统计

Table 1　Differences between Shaanxi regional ionospheric model and CODE GIM　TECu

系统	RMS	Bias
C	2.57 [3.35,1.81]	2.13 [3.03,1.14]
GC	2.09 [3.38,1.23]	1.52 [2.89,0.39]
GCRE	1.76 [2.27,1.28]	0.10 [1.55,-1.37]

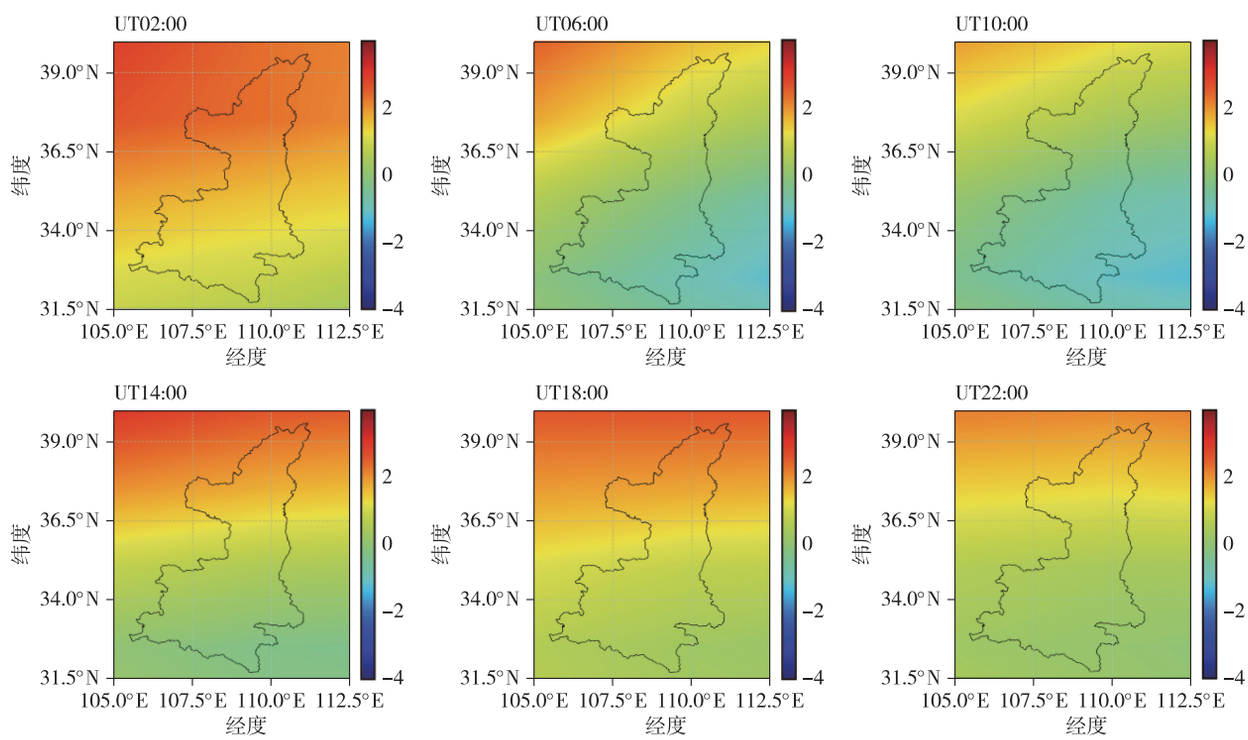

图 2　2021 年 DOY325 C 系统电离层 VTEC 与 CODE 电离层 VTEC 残差分布(unit:TECu)

Fig. 2　Distribution of ionospheric VTEC residuals between C system and CODE on DOY325,2021

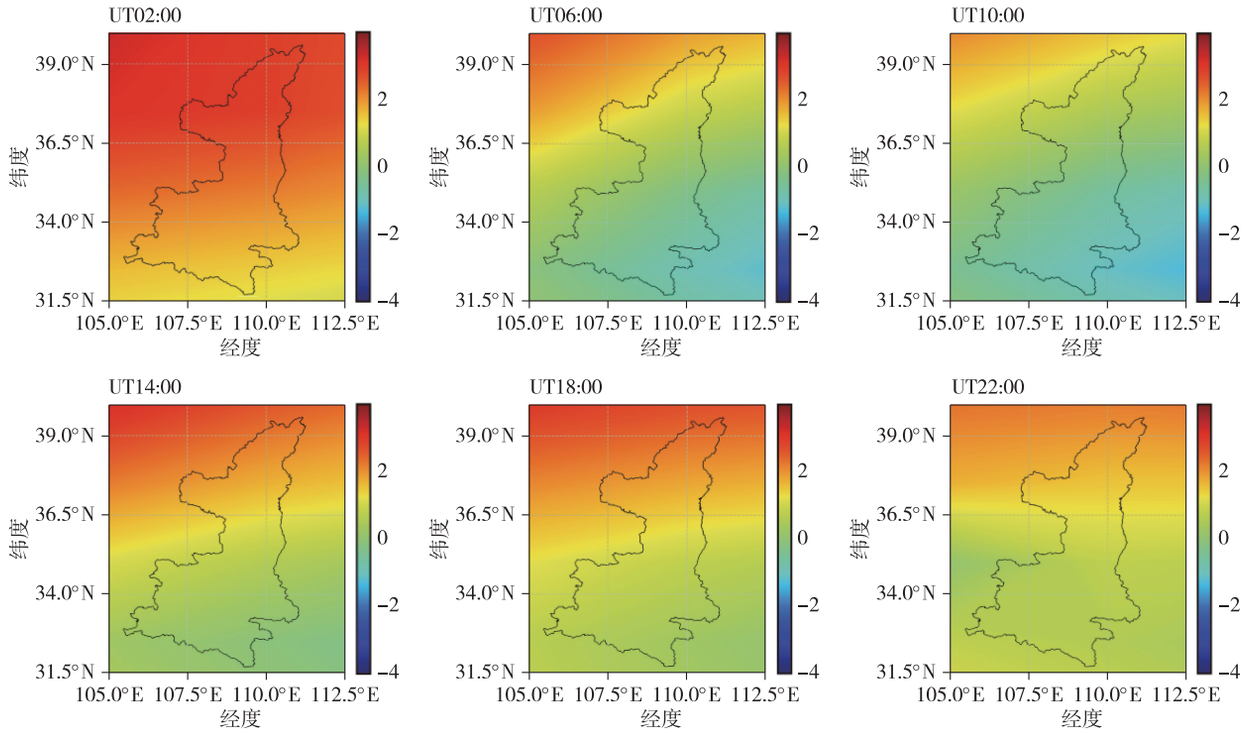

图 3　2021 年 DOY325 GC 系统电离层 VTEC 与 CODE 电离层 VTEC 残差分布(unit:TECu)

Fig. 3　Distribution of ionospheric VTEC residuals between GC system and CODE GIM on DOY325,2021

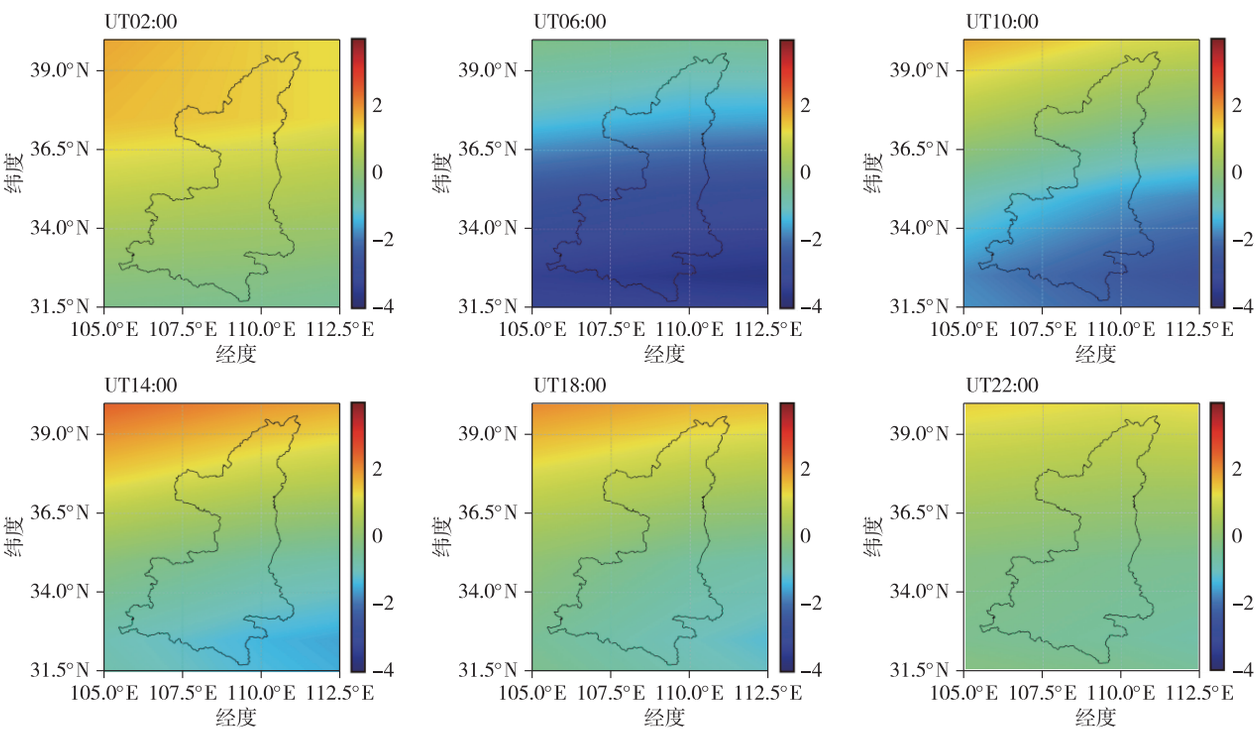

图 4　2021 年 DOY325 GCRE 系统电离层 VTEC 与 CODE 电离层 VTEC 残差分布(unit:TECu)

Fig. 4　Distribution of ionospheric VTEC residuals between GCRE system and CODE GIM on DOY325,2021

从表 1 中可以看出,基于 C、GC、GCRE 系统的建模结果相对于 CODE GIM 的 RMS 分别为 2.57、2.09、1.76 TECu,Bias 分别为 2.13、1.52、0.1 TECu.基于 GC、GCRE 的结果相对于基于 C 建模结果 RMS

分别提升 18.7%、31.5%,Bias 分别提升 28.6%、95.3%,可知基于 GCRE 的结果有明显提升,这是因为随着系统增加,观测数据增多,IPP 分布较为密集.随着多 GNSS 的快速发展,更多的 GNSS 观测数据用于电离层建模将成为趋势.

2.2.2 单频 PPP 性能测试

本文选取图 1 测站分布中未参与电离层建模的红色星号所示的 3 个测站 2021 年 DOY310~330 的观测数据,进行动态非差非组合单频精密单点定位(SF-PPP)实验,进行附加不同电离层约束的非差非组合模型情况下的 SF-PPP 定位结果,评估附加电离层约束算法对于提高 PPP 定位精度的影响.其中,电离层约束分别为 CODE_GIM,以及本文的 C_GIM、GC_GIM、GCRE_GIM.

将 3 个测站的定位结果分别与测站坐标真实值进行比较,得出 RMS 值如图 5 所示.从图 5 中可以看出,非差非组合模型中,3 个测站在 U 方向上精度均较低,在 E、N 方向上精度较高,这是因为电离层延迟主要影响定位的垂直方向精度.附加电离层约束后的非差非组合模型,3 个测站在 U 方向精度显著提高,在 N 和 E 方向上的精度也有一定程度的改善.其中,加入区域不同系统组合电离层模型约束时,3 个测站在 E 方向上的 RMS 在 0.2 m 左右,N 方向上的 RMS 在 0.1 m 左右,U 方向上的 RMS 小于 0.3 m.在 E 方向上,加入 CODE_GIM 进行约束的精度优于区域不同系统组合电离层模型约束;N、U 方向上加入区域不同组合电离层产品约束优于 CODE_GIM.总体上区域不同系统组合电离层模型约束的解算精度较 CODE_GIM 更高,说明加入区域电离层模型能使单频 PPP 精度得到提升.

为了进一步分析区域不同系统组合的电离层模型约束对于单频 PPP 的贡献,将 3 个测站的定位解算结果进行综合统计分析,结果如表 2 所示.表 2 给出了各个方向上的不同系统组合的电离层模型约束定位结果,以及将不进行电离层约束的定位结果作为参考,计算每一种电离层模型约束对定位精度的提升率(表中括号内数值).在 E 方向上,GCRE_GIM 结果提升率最高为 44%,CODE_GIM 次之,C_GIM、GC_GIM 提升率相当.在 N、U 方向上,GC_GIM 结果提升率最高为 39%,C_GIM、GCRE_GIM 次之.但是,3D 方向的解算精度则是加入 GCRE_GIM 约束最高,其次是 C_GIM、GC_GIM,两者提升率相当,同时 GCRE_GIM、GC_GIM、C_GIM 约束的解算精度提升率均优于 CODE_GIM.因此进一步说明加入区域电离层模型的定位结果优于加入 CODE 全球电离层模型,同时单 BDS 电离层建模在陕西地区可以达到较好的效果,定位解精度与多系统融合电离层产品贡献基本相当.

表 2 综合单频 PPP 定位精度及提升率

Table 2 Single-frequency PPP accuracies of integrated systems

系统组合	E/m	N/m	U/m	3D/m
NO_GIM	0.25	0.18	0.44	0.55
CODE_GIM	0.19(24%)	0.16(11%)	0.32(27%)	0.40(27%)
C_GIM	0.20(20%)	0.12(33%)	0.28(36%)	0.36(35%)
GC_GIM	0.20(20%)	0.11(39%)	0.27(39%)	0.36(35%)
GCRE_GIM	0.14(44%)	0.12(33%)	0.29(34%)	0.35(36%)

3 总结

本文基于 4 阶球谐函数模型,利用陕西省北斗地基增强网监测站数据建立了陕西区域电离层模型,并对模型精度和 SF-PPP 精度进行了实验分析.主要成果总结如下:

1)利用 BDS-3 单系统数据建立的陕西区域电离

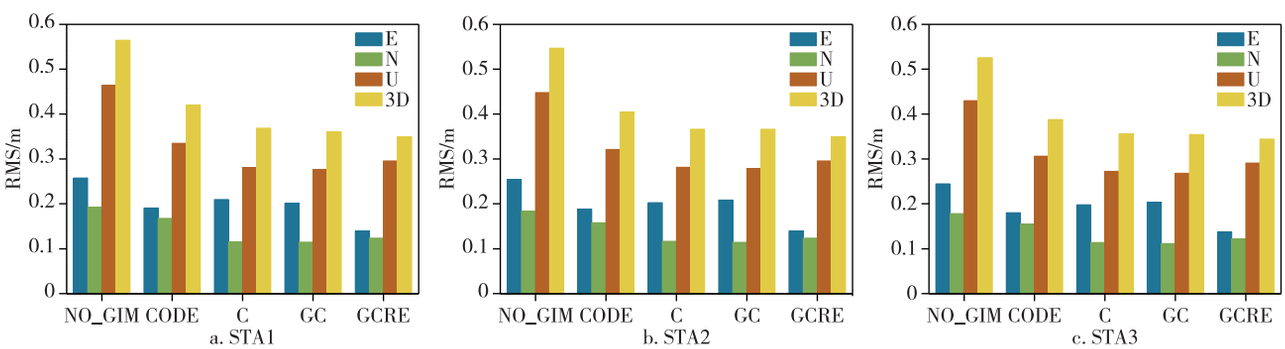

图 5 STA1、STA2、STA3 站基于不同电离层约束的单频 PPP 定位精度

Fig. 5 Single-frequency PPP positioning accuracies of STA1,STA2 and STA3 based on different ionospheric constraints

层模型符合电离层真实时空变化特征,与 CODE_GIM 产品进行对比,电离层模型精度为 2.57 TECu,二者精度基本相当.随着卫星数量增多,区域上空 IPP 分布密集,利用 GNSS 四系统数据获取的电离层模型精度显著提升,模型精度为 1.76 TECu.

2)在 SF-PPP 精度方面,加入区域电离层模型的定位结果优于加入 CODE 全球电离层模型定位结果.BDS-3 单系统区域电离层延迟产品可以提升单频定位精度 35%,与 GNSS 四系统区域电离层延迟产品的提升幅度(36%)相当,优于 CODE 全球电离层延迟产品提升效果(27%).

致谢:感谢陕西测绘地理信息局提供陕西省地基增强网观测数据以及 CODE 提供的电离层产品.

参考文献
References

[1] 袁运斌,霍星亮,张宝成.近年来我国 GNSS 电离层延迟精确建模及修正研究进展[J].测绘学报,2017,46(10):1364-1378
YUAN Yunbin, HUO Xingliang, ZHANG Baocheng. Research progress of precise models and correction for GNSS ionospheric delay in China over recent years[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2017,46(10):1364-1378

[2] Ren X D,Zhang X H,Xie W L,et al.Global ionospheric modelling using multi-GNSS:BeiDou,Galileo,GLONASS and GPS[J].Scientific Reports,2016,6:33499

[3] 魏传军.基于地基 GNSS 观测数据的电离层延迟改正研究[D].西安:长安大学,2014
WEI Chuanjun. Study of ionospheric delay correction based on GNSS observations[D].Xi'an:Chang'an University,2014

[4] 柳景斌,王泽民,王海军,等.利用球冠谐分析方法和 GPS 数据建立中国区域电离层 TEC 模型[J].武汉大学学报·信息科学版,2008,33(8):792-795,814
LIU Jingbin, WANG Zemin, WANG Haijun, et al. Modeling regional ionosphere using GPS measurements over China by spherical cap harmonic analysis methodology[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2008,33(8):792-795,814

[5] 陈永贵.中国区域电离层建模及其精度分析[J].导航定位学报,2021,9(2):104-108
CHEN Yonggui.Modeling and accuracy evaluation of ionosphere in China[J].Journal of Navigation and Positioning,2021,9(2):104-108

[6] Zhang R,Song W W,Yao Y B,et al.Modeling regional ionospheric delay with ground-based BeiDou and GPS observations in China[J].GPS Solutions,2015,19(4):649-658

[7] Ren X D,Chen J,Li X X,et al.Multi-GNSS contributions to differential code biases determination and regional ionospheric modeling in China[J].Advances in Space Research,2020,65(1):221-234

[8] 从建锋,刘智敏,陈汉林.山东区域电离层模型的建立及精度评估[J].测绘科学,2020,45(1):48-53
CONG Jianfeng, LIU Zhimin, CHEN Hanlin. Establishment and accuracy assessment of regional ionospheric model in Shandong province[J].Science of Surveying and Mapping,2020,45(1):48-53

[9] Prakanrattana K,Satirapod C.Comparative study of using different ionosphere models in Thailand for single-frequency GNSS users[J].Survey Review,2019,51(366):213-218

[10] 吴伟铨,周晨,禹智斌,等.基于 GNSS 的武汉区域电离层 TEC 建模[J].电波科学学报,2022,37(1):146-152,161
WU Weiquan,ZHOU Chen,YU Zhibin,et al.Modeling of ionospheric TEC around Wuhan based on GNSS[J].Chinese Journal of Radio Science, 2022, 37(1):146-152,161

[11] Roma-Dollase D,Hernández-Pajares M,Krankowski A,et al.Consistency of seven different GNSS global ionospheric mapping techniques during one solar cycle[J].Journal of Geodesy,2018,92(6):691-706

[12] 郭树人,蔡洪亮,孟轶男,等.北斗三号导航定位技术体制与服务性能[J].测绘学报,2019,48(7):810-821
GUO Shuren,CAI Hongliang,MENG Yinan,et al.BDS-3 RNSS technical characteristics and service performance[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(7):810-821

[13] 畅鑫,张伟.实时区域电离层 TEC 建模与单频 PPP 实验[J].大地测量与地球动力学,2013,33(5):39-43
CHANG Xin, ZHANG Wei. Real time regional ionospheric TEC modeling and single-frequency PPP experiment[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2013,33(5):39-43

[14] Li B F,Wang M M,Wang Y L,et al.Model assessment of GNSS-based regional TEC modeling:polynomial,trigonometric series, spherical harmonic and multi-surface function[J]. Acta Geodaetica et Geophysica, 2019, 54(3):333-357

[15] 刘丽霞.GNSS 高精度全球电离层建模研究[D].西安:西安科技大学,2021
LIU Lixia.Research on high-precision global ionospheric modeling based on GNSS[D].Xi'an:Xi'an University of Science and Technology,2021

Modeling and accuracy assessment of regional ionospheric TEC over Shaanxi province based on BDS-3

WANG Ziwei[1] HUANG Guanwen[1] DU Shi[1] XIE Wei[1]
1 School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054

Abstract Based on data from BeiDou ground-based augmentation monitoring station in Shaanxi province, a Shaanxi regional ionospheric total electron content(TEC) model is established using the fourth-order spherical harmonic function to generate regional TEC grid products. The experimental results show that the accuracy of the Shaanxi regional ionospheric products obtained from BDS-3 data is 2.54 TECu, which is comparable to the nominal accuracy of the Global Ionospheric Map(GIM) product of the Center for Orbit Determination(CODE). In terms of single frequency precise point positioning(SF-PPP) performance, the BDS-3 regional ionospheric product improves the positioning accuracy by 35%, which is better than the correction performance of the CODE global ionospheric product(27%). Overall, the BDS-3 single system has superior performance in regional ionospheric modeling.

Key words ionospheric delay; total electron content(TEC); spherical harmonic function; precise point positioning (PPP)