

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2022.02.017

北斗星基增强电离层模型精度评估与分析

郭美军, 范顺西, 范毅, 郑康, 翟伟

(西安航天天绘数据技术有限公司, 西安 710054)

摘要:针对如何有效地对北斗星基增强系统(SBAS)电离层在模型精度、模型时效性等方面进行综合评估,提出了一种修正的CODE格网模型,通过增加国内陆态网监测站观测数据,提升了CODE格网模型精度。以此模型为基准,利用2020年近一个月的数据分析了北斗区域格网电离层模型和北斗SBAS电离层模型的延迟误差、改正比例的变化以及在全球的覆盖范围,并从全球不同纬度带比较了北斗基本导航和星基增强电离层模型的精度。结果表明:修正的CODE模型精度符合评估要求,且与我国电离层实际变化情况更吻合,北斗区域格网电离层模型和北斗SBAS电离层模型精度相当,优于0.3m,改正比例均优于80%,但北斗SBAS电离层模型覆盖范围明显更大。

关键词:北斗导航系统;星基增强系统;北斗区域格网电离层模型;北斗SBAS电离层模型

中图分类号: V19

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2022)02-0137-09

Accuracy Evaluation and Analysis for BDSBAS Ionosphere Model

GUO Mei-jun, FAN Shun-xi, FAN Yi, ZHENG Kang, ZHAI Wei

(Xi'an Aerors Data Technology Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: Aiming at how to assess the Beidou satellite-based augmentation system(SBAS) ionospheric models in model accuracy, model timeliness and other aspects totally and effectively, this paper proposes a new method that evaluating the accuracy of Beidou SBAS ionosphere model based on the improved CODE model. The precision of CODE grid model can be improved by increasing the data of crustal movement observation network of China stations in China. Based on this model, the delay error, the change of correction ratio and the global coverage of Beidou regional grid ionospheric model and Beidou SBAS ionospheric model are analyzed by using the data of nearly one month in 2020, and the accuracies of Beidou ionospheric models from different global latitudes are analyzed. The results show that the accuracy of the modified code model meets the evaluation requirements, and is more consistent with the actual ionospheric changes in China, Beidou regional grid ionosphere model and Beidou SBAS ionosphere model have the same accuracy that is better than 0.3m, and the correction ratios are more than 80%; the coverage of the Beidou SBAS ionosphere model is significantly larger.

Key words: Beidou navigation system; Satellite-based augmentation system(SBAS); Beidou regional grid ionosphere model; Beidou SBAS ionosphere model

收稿日期: 2021-07-20; 修订日期: 2021-08-24

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(12073033)

作者简介: 郭美军(1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事 GNSS 电离层性能评估方面的研究。

0 引言

北斗卫星导航系统融合了基本服务与星基增强服务,2020 年我国北斗全球导航系统已正式运行并开始提供星基增强服务,主要为用户提供公开服务与授权服务。其中,公开服务为用户免费提供基本导航信息,而授权服务为授权用户提供差分和完好性等信息以提高其服务性能^[1-2]。星基增强服务是对原有卫星导航系统的一种增强服务,通过计算地面上有关全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System,GNSS)的完好性和修正数据,并使用地球同步轨道(Geosynchronous Orbit,GEO)卫星播送完好性、修正数据和变化的信号给星基增强系统(Satellite-Based Augmentation System,SBAS)用户,以提高导航系统的精度及完好性^[3]。电离层延迟是北斗 SBAS 实现过程中一项重要的误差来源,它对卫星导航定位带来的误差影响可以达到几米甚至几十米的误差范围^[4]。对于卫星导航系统进行单频定位授时的用户,需要精确改正电离层延迟。

对于可以接收到北斗 SBAS 信号的单频用户采用格网法计算电离层延迟,而不能接收到 SBAS 信号的单频用户则采用 BDSKlob 模型或 BDGIM 模型校正电离层延迟^[4]。我国北斗区域导航系统发播区域电离层模型参数,电离层模型参数每 2h 更新一次,北斗三号系统使用 BDGIM 模型改正全球范围内的电离层延迟^[5]。北斗同时提供亚太区域差分服务,发播亚太区域格网电离层信息参数,为用户提供更高更新频率以及更高精度的格网点电离层信息^[5]。

国际 GNSS 服务(International GNSS Service,IGS)分析中心的 CODE 格网电离层精度较高,但是由于 CODE 是利用全球 IGS 站进行建模,中国区域的 IGS 站较少,因此,电离层产品在中国区域存在一定的系统偏差,一般在 2~3TECU 范围内^[6],对在中国区域直接使用电离层产品产生一定的影响。

本文利用 Bernese 软件,首先在 CODE 电离层建模的基础上,增加了 100 个监测站数据,重新生成了电离层格网产品,并以此为基准,实现对北斗星基增强电离层模型的精度进行评估^[6]。接着对北斗星基增强电离层模型进行了全面深入的分析,介绍了北斗星基增强电离层模型算法原理,并分析了北斗 SBAS 两种算法性能,最后用 2020 年 6 月数据在全球不同纬度范围内对北斗不同电离层模型精

度进行了比较分析^[7]。

1 基本算法

1.1 修正的 CODE 电离层模型

Bernese 软件具有球谐函数建模功能,本文利用 2020 年 6 月的 IGS 全球观测数据和中国 100 个监测站的数据,采用 15×15 阶球谐展开,每 2h 进行一次建模,时段划分为:00:00,2:00,……,24:00,每天共解算 13 组,然后由球谐系数生成全球电离层垂直总电子含量(Vertical Total Electron Content,VTEC)图^[6-7]。

1.2 北斗区域格网电离层模型

北斗区域格网电离层垂直延迟参数为 B1I 频点的电离层垂直延迟^[5],用距离表示,比例因子为 0.125,单位为 m,范围为 0~63.625m。63.750m 表示格网点未被监测到,63.875m 表示格网点不可用。格网点电离层信息的更新频率为 6min/次,电离层格网覆盖范围为东经 $70^\circ \sim 145^\circ$,北纬 $7.5^\circ \sim 55^\circ$,按经度 $5^\circ \times$ 纬度 2.5° 进行划分,形成 320 个格网点^[4-5]。用户需将格网点电离层改正数内插得到观测卫星穿刺点处的电离层改正数,以修正观测伪距^[8]。具体格网点编号参见北斗卫星导航接口控制文件^[9-10]。

当 IGP 编号小于或等于 160 时所对应的经纬度为

$$\begin{aligned} L &= 70 + \text{INT}((\text{IGP} - 1)/10) \times 5 \\ B &= 5 + (\text{IGP} - \text{INT}((\text{IGP} - 1)/10) \times 10) \times 5 \end{aligned} \quad (1)$$

当 IGP 编号大于 160 时所对应的经纬度为

$$\begin{aligned} L &= 70 + \text{INT}((\text{IGP} - 161)/10) \times 5 \\ B &= 2.5 + (\text{IGP} - 160 - \text{INT}((\text{IGP} - 161)/10) \times 10) \times 5 \end{aligned} \quad (2)$$

其中,INT(*)表示向下取整。

1.3 北斗 SBAS 电离层模型

北斗 SBAS 电离层垂直方向共有 9 个条带,条带号为 0~8,共计 1808 个格网点,以经纬度坐标给出,IGP 格网在赤道为 $5^\circ \times 5^\circ$,到南北纬 55° 处增加为 $10^\circ \times 10^\circ$,最后到南北纬 85° 的地方以 90° 的经差分隔,且南北半球在经度上相差 40° ,以保证每个带分布比较均匀^[11],如表 1 所示。IGP 格网点在低纬度地区密集,高纬度地区稀疏。水平方向共有 2 个条带,条带号为 9 和 10,共计 384 个格网点,以经纬

利用修正的 CODE 模型生成的格网电离层产品与 CODE 模型的格网电离层产品进行比较分析,

统计均方根结果如表 2 所示。从表 2 可以看出,修正的 CODE 模型的精度和 CODE 模型的精度基本相当,二者差值的均方根优于 2.0TECu,说明修正后的 CODE 模型生成的格网电离层产品具有较高的可靠性^[6]。

表 2 修正 CODE 模型 VTEC 相对 CODE 的精度(TECu)

Tab. 2 Precision of improve CODE model relative to CODE(TECu)

时段	153d	154d	155d	156d	157d
1	1.45	1.31	1.76	1.27	1.18
2	1.43	1.42	1.70	1.56	1.42
3	1.74	1.72	1.73	1.69	1.40
4	1.54	1.42	1.93	1.63	1.47
5	1.34	1.26	1.71	1.39	1.48
6	1.15	1.65	1.98	1.50	1.51
7	1.29	1.73	1.68	1.68	1.64
8	1.61	1.48	1.78	1.29	1.26
9	1.56	1.15	1.65	1.84	1.53
10	1.33	1.74	1.88	1.36	1.61
11	1.28	1.44	1.81	1.44	1.28
12	1.64	1.60	1.94	1.37	1.49
13	1.31	1.57	1.50	1.69	1.55

3.1.2 国内监测站精度检核

修正的 CODE 电离层格网通过内插可计算出对应穿刺点处的垂直方向电子含量,利用电离层投影函数将垂直方向电子含量转换到站星视线方向上的电子含量,进而可以得到电离层延迟量。通过比较国内监测站的实测值与格网电离层模型值之间的差异,实现对修正 CODE 电离层格网产品在中国区域的精度检核^[6]。

本文选取国内 9 个陆态网监测站进行精度检核,所选测站参与了模型建模,参与建模的测站精度反映了模型的精度,所选测站分别为 gspl、scgy、chun、zhnz、tain、hecd、kmin、ziwz、wush,统计修正的 CODE 电离层模型、CODE 电离层模型相对测站实测电离层的 RMS 结果,如图 4 所示。

从图 4 可以看出,每个测站多天的修正 CODE 模型 RMS 值均优于 CODE 模型,修正的 CODE 模型在中国区域更切合实际,与国内实际电离层情况吻合更好,因此修正的 CODE 模型在国内区域更有优势^[6]。

3.2 星基增强电离层模型性能分析

以 2020 年 6 月北斗区域格网电离层信息以及

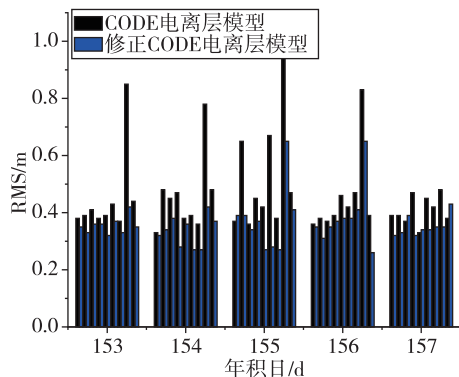


图 4 国内监测站检核模型格网的 RMS

Fig. 4 RMS of improve CODE and CODE at internal stations

北斗 SBAS 电离层为待评估值,以修正后的 CODE 格网电离层产品为基准,从电离层延迟误差精度、改正率以及格网点电离层垂直延迟改正数误差指数(GIVEI)三方面,在亚太区域的覆盖性对星基增强电离层性能进行了分析^[5]。从监测评估中心获得预处理后的北斗区域格网电离层和北斗 SBAS 电离层数据,根据此数据可计算电离层的待评估值,从 IGS 网站可下载格网基准电离层文件^[5]。

3.2.1 电离层 GIVEI 覆盖性分析

格网点电离层垂直延迟改正数误差(Grid Ionospheric Vertical Error, GIVE)用于描述格网点电离层延迟改正的精度^[3],保证服务区内所有用户的安全,并对电离层异常影响及时做出反应^[23-24],该值过小会影响系统完好性,过大会影响系统的可用性和连续性,一般以一定概率的置信上限表示。

GIVE 值以 GIVEI 表征,GIVEI 取值范围为 0~15。北斗区域格网电离层 GIVEI 与 GIVE 的关系如表 3 所示。

北斗 SBAS 电离层 GIVEI 与 GIVE 的关系如表 4 所示。

北斗区域格网电离层 GIVEI 值是由 iGMAS 监测评估中心提供的各测站预处理综合后的数据,北斗 SBAS 电离层 GIVEI 值是由解码星基增强接收机电文数据获得。北斗区域格网电离层 GIVEI 值每 5min 一组,北斗 SBAS 电离层 GIVEI 值每 6min 一组,本文将 2020 年 6 月整月所有格网点的 GIVEI 进行平均,利用 GIVEI 均值画出北斗导航星基增强服务范围内电离层延迟误差改正的精度,如图 5 和图 6 所示。

表 3 北斗区域格网电离层 GIVEI 定义表^[8-10]

Tab. 3 GIVEI definition table of Beidou regional grid ionosphere

GIVEI 编码	GIVE(m,99.9%)
0	0.3
1	0.6
2	0.9
3	1.2
4	1.5
5	1.8
6	2.1
7	2.4
8	2.7
9	3.0
10	3.6
11	4.5
12	6.0
13	9.0
14	15.0
15	45.0

GIVEI	GIVE/m	$\sigma_{\text{GIVE}}^2/\text{m}^2$
0	0.3	0.0084
1	0.6	0.0333
2	0.9	0.0749
3	1.2	0.1331
4	1.5	0.2079
5	1.8	0.2994
6	2.1	0.4075
7	2.4	0.5322
8	2.7	0.6735
9	3.0	0.8315
10	3.6	1.1974
11	4.5	1.8709
12	6.0	3.3260
13	15.0	20.7870
14	45.0	187.0826
15	未被监测	未被监测

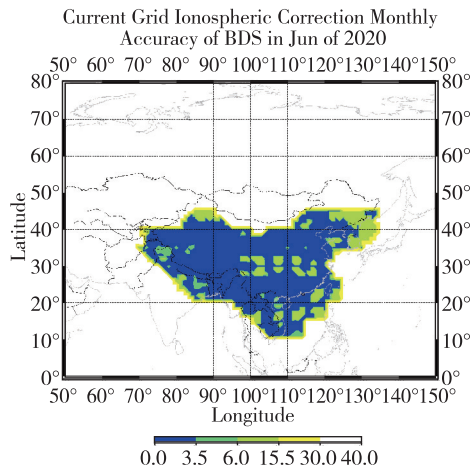


图 5 北斗区域格网电离层的 GIVEI 月平均结果

Fig. 5 Monthly average GIVEI results of Beidou regional grid ionosphere

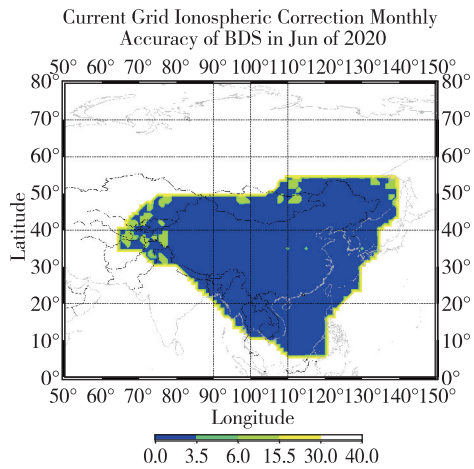


图 6 北斗 SBAS 电离层 GIVEI 月平均结果

Fig. 6 Monthly average GIVEI results of Beidou SBAS ionosphere

从图中可以得出：

- 1)北斗区域格网电离层覆盖了除东北和南海的中国区域,大部分覆盖区域内 GIVEI 在 3.5 以内,即 1.3m 以内,中国内陆部分区域和东北出现 GIVEI 在 6 以上,覆盖区域内格网点电离层延迟改正的精度明显不连续。
- 2)北斗 SBAS 电离层覆盖区域包含了整个中国区域,格网点电离层延迟改正精度连续且 GIVEI 值基本在 3 以内,不论从覆盖范围还是精度水平,北斗 SBAS 电离层都比北斗区域格网电离层更好。

3.2.2 电离层服务性能覆盖性分析

图 7~图 10 所示分别为 2020 年 6 月北斗区域

差分格网电离层、北斗 SBAS 电离层的延迟误差和改正比例月评估结果^[5]。

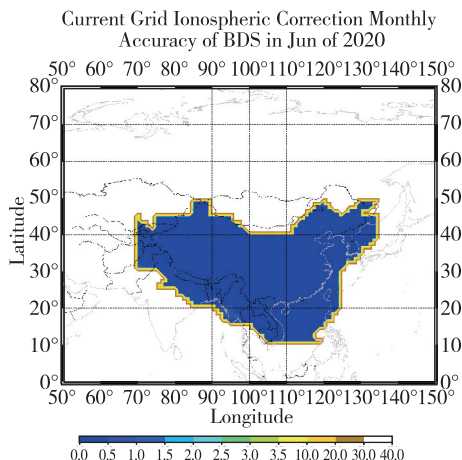


图 7 北斗区域格网电离层延迟误差月评估结果

Fig. 7 Monthly evaluation results of Beidou regional grid ionospheric delay error

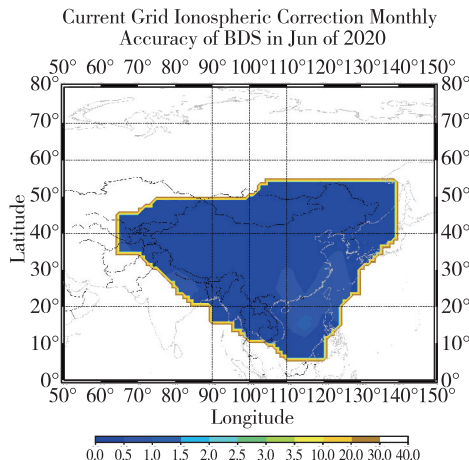


图 8 北斗 SBAS 电离层延迟误差月评估结果

Fig. 8 Monthly evaluation results of Beidou SBAS ionospheric delay error

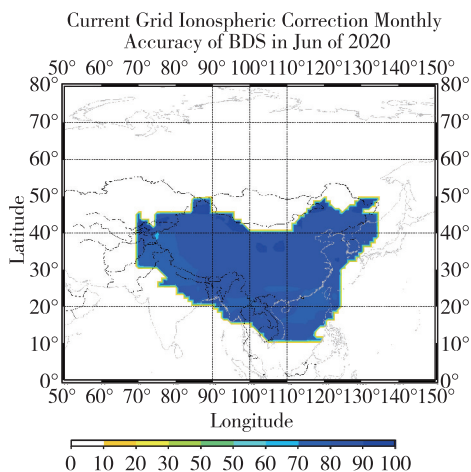


图 9 北斗区域格网电离层改正比例月评估结果

Fig. 9 Monthly assessment results of Beidou regional grid ionospheric correction ratio

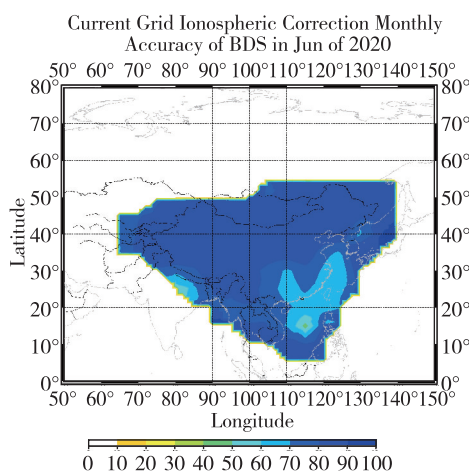


图 10 北斗 SBAS 电离层改正比例月评估结果

Fig. 10 Monthly assessment results of Beidou SBAS ionospheric correction ratio

从电离层延迟误差和改正比例的长期评估结果图中可以看出,北斗区域格网电离层延迟误差基本覆盖了除东北和南海的全域,电离层延迟误差精度优于 0.5m;北斗 SBAS 电离层除了覆盖中国全部区域还覆盖了蒙古和西亚部分区域,电离层延迟误差精度在陆地区域优于 0.5m,在南海区域稍差,精度约为 1m。北斗区域格网电离层改正比例大部分优于 70%,北斗 SBAS 电离层改正比例在陆地区域优于 80%,在南海区域较低,维持在 60%左右。这主要受测站分布影响,导致该地区数据质量较差。

3.3 电离层模型精度综合分析

为进一步分析时间和空间对北斗电离层模型性能的影响,利用 2020 年 6 月电离层模型性能评估结果数据,按照南半球高纬度、南半球中纬度、南半球低纬度、北半球高纬度、北半球中纬度、北半球低纬度、中国区域(经度 70°~145°,纬度 7.5°~55°)、全球范围,以 5°×2.5°的间隔划分网格,计算每个格网点在白天(地方时 8:00~20:00)和夜晚(地方时 20:00~次日 8:00)时段的模型改正比例和均方根^[5]。并将北斗区域电离层模型、北斗 SBAS 电离

层模型与北斗基本导航的 BDGIM 模型、BDSKlob 模型进行比较。统计结果如表 5 所示。

表 5 BDGIM、BDSKlob、北斗区域格网电离层和北斗 SBAS 电离层模型性能统计
Tab. 5 Performance statistics of BDGIM、BDSKlob、BD regional grid ion and bdsbas ion models

		BDSKlob		BDGIM		BD Reg Grid Ion		BDSBAS Ion	
		RMS	Per	RMS	Per	RMS	Per	RMS	Per
North HL	D	1.66	65.78	0.43	69.72	—	—	—	—
	N	0.95	57.70	0.43	63.94	—	—	—	—
	A	1.31	61.40	0.43	66.83	—	—	—	—
North ML	D	0.46	79.07	0.33	83.34	0.31	87.32	0.30	87.10
	N	0.55	60.26	0.22	82.85	0.26	83.90	0.27	82.45
	A	0.51	69.67	0.28	83.09	0.28	85.61	0.28	84.78
North LL	D	0.50	82.63	0.30	90.46	0.50	84.49	0.59	81.64
	N	0.78	45.74	0.25	76.84	0.28	77.35	0.45	65.51
	A	0.64	64.18	0.27	83.65	0.39	80.78	0.52	73.57
North	D	0.83	77.09	0.35	81.84	0.39	86.01	0.39	85.34
	N	0.75	54.39	0.29	75.17	0.27	80.97	0.33	76.97
	A	0.79	65.74	0.32	78.51	0.33	83.49	0.36	81.16
South HL	D	3.04	—	0.46	49.44	—	—	—	—
	N	2.06	—	0.29	52.84	—	—	—	—
	A	2.55	—	0.38	51.14	—	—	—	—
South ML	D	1.46	20.37	0.34	62.41	—	—	—	—
	N	1.27	25.22	0.30	58.57	—	—	—	—
	A	1.36	22.79	0.32	60.49	—	—	—	—
South LL	D	1.37	49.13	0.30	83.52	—	—	—	—
	N	1.07	30.13	0.26	67.94	—	—	—	—
	A	1.22	39.63	0.28	75.73	—	—	—	—
South	D	1.95	38.70	0.37	67.31	—	—	—	—
	N	1.46	29.19	0.29	60.77	—	—	—	—
	A	1.71	33.94	0.33	64.04	—	—	—	—
China	D	0.43	83.42	0.29	88.46	0.39	86.01	0.39	85.37
	N	0.65	54.84	0.20	82.96	0.27	80.97	0.33	77.01
	A	0.54	69.13	0.24	85.71	0.33	83.49	0.36	81.19
World	D	1.41	65.69	0.36	74.83	—	—	—	—
	N	1.11	48.74	0.29	68.29	—	—	—	—
	A	1.26	57.22	0.32	71.56	—	—	—	—

注^[5]:表中 RMS 值单位为 m;North、South 分别代表北半球和南半球;HL、ML、LL 分别代表高纬度、中纬度和低纬度;China 代表中国区域(纬度 7.5°~55°,经度 70°~145°),World 代表全球范围;D、N、A 分别代表白天、夜晚和全天时段。

从表 5 和图 11、图 12 中可以得出以下结论:

1)BDSKlob 模型北半球优于南半球,中国区域优于全球区域,电离层延迟误差和改正比例在北半球分别为 0.79m、65.74%,南半球分别为 1.71m、33.94%,中国区域分别为 0.54m、69.13%,全球区域分别为 1.26m、57.22%;

2)BDGIM 模型北半球优于南半球,中低纬度优于高纬度,中国区域最优,电离层延迟误差以及改正比例在中国区域和全球区域分别可达 0.24m、0.32m 以及 85.71%、71.56%;

3)北斗星基增强 2 个电离层模型只在中国区域提供服务,北斗区域格网电离层和北斗 SBAS 电离层

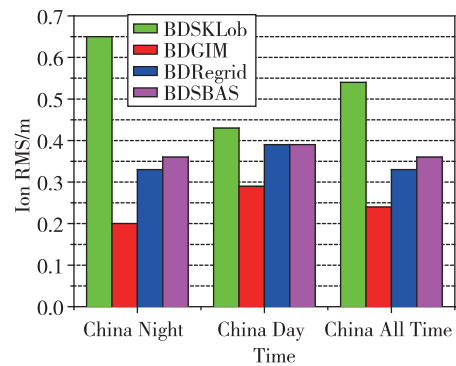


图 11 不同时间段中国区域北斗各电离模型精度结果

Fig. 11 Accuracy results of Beidou ionization model in different time periods in China area

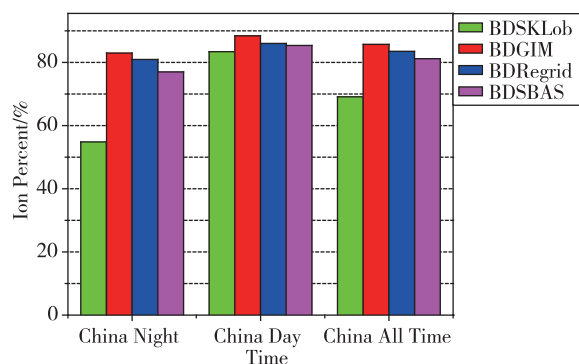


图 12 不同时间段中国区域北斗电离模型改正比例结果

Fig. 12 Correction ratio results of Beidou ionization model in different time periods in China area

模型的精度和改正比例基本相当,分别为 0.33m、0.36m 和 83.49%、81.19%;

4) 北斗星基增强电离层模型精度稍差于 BDGIM 电离层模型,BDGIM 电离层模型精度有一定的周期性,2020 年 6 月正处于夏季,而 BDGIM 模型电离层正好是夏季精度最优。

4 结论

北斗星基增强 2 个电离层模型覆盖范围主要在亚太地区,北斗区域电离层模型能够覆盖中国大部分地区,北斗 SBAS 电离层模型完全覆盖了中国区域,北斗星基增强电离层模型精度可达 0.3m,改正比例可达 80%以上。从 6 月份统计结果看,北斗星基增强电离层模型精度比 BDGIM 模型稍差,但随着未来北斗 SBAS 正式对外服务,将有更多的观测数据加入解算,北斗星基增强电离层模型精度将会进一步提升。

由于本文仅收集了 2020 年电离层平静期一个月的北斗 SBAS 数据,初步给出了星基增强电离层性能评估结果,结论不具有普遍性。后期将收集更长时段的电离层数据,对电离层在风暴期和平静期全面比较展开进一步研究。

参考文献

[1] 陈俊平,胡一帆,张益泽,等. 北斗星基增强系统性能提升初步评估[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(7): 1075-1082.
Chen Junping, Hu Yifan, Zhang Yize, et al. Preliminary evaluation of performance of BeiDou satellite-based augmentation system[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(7): 1075-1082 (in Chinese).

[2] 陈俊平,杨赛男,周建华,等. 综合伪距相位观测得北斗导航系统广域差分模型[J]. 测绘学报, 2017, 46(5): 537-546.
Chen Junping, Yang Sainan, Zhou Jianhua, et al. A pseudo-range and phase combined sbas differential correction model[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(5): 537-546(in Chinese).
[3] 于耕,彭沫. BD 星基增强系统格网电离层延迟算法[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(22): 323-327.
Yu Geng, Peng Mo. Grid ionospheric delay algorithm of BD satellite-based augmentation system [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(22): 323-327(in Chinese).
[4] 于耕,曲歌. 北斗格网电离层模型格网点计算方法研究[J]. 航天电子技术, 2017, 43(6): 15-18.
Yu Geng, Qu Ge. The research of IGP algorithms for grid ionospheric model correction in BDS[J]. Aerospace Electronic Technology, 2017, 43(6): 15-18(in Chinese).
[5] 丁毅涛,郭美军. 北斗电离层模型精度分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2021, 41(2): 13-21.
Ding Yitao, Guo Meijun. Accuracy analysis of Beidou ionosphere model[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2021, 41(2): 13-21(in Chinese).
[6] 程娜,贾小林. 改进 CODE GIM 的 GNSS 广播电离层模型评估方法[J]. 测绘科学, 2019, 44(4): 1-7.
Cheng Na, Jia Xiaolin. A precision assessment method of broadcast ionospheric model of GNSS based on improved CODE model[J]. Science of Surveying and Mapping, 2019, 44(4): 1-7(in Chinese).
[7] 程娜,贾小林. 基于改进 CODE 模型的北斗广播电离层模型精度评估[C]// 第五届中国卫星导航学术年会, 2014.
Cheng Na, Jia Xiaolin. Precision assessment of broadcast ionospheric model of COMPASS system based on improved CODE model[C]// Proceedings of 5th China Satellite Navigation Conference, 2014(in Chinese).
[8] 邹波. GPS/BDS 组合系统单点定位及精度分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
Zou Bo. Analysis on accuracy of combined GPS/BDS single point positioning[M]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015(in Chinese).
[9] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件: 公开服务信号 B1C(1.0)[Z]. 2012.
China Satellite Navigation Office. ICD B, BeiDou navigation satellite system signal in space interface control document-open service signals B1C(Version 1.0)[Z]. 2012

- (in Chinese).
- [10] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件: 公开服务信号(2.1)[Z]. 2016. China Satellite Navigation Office. ICD B, BeiDou navigation satellite system signal in space interface control document-open service signals (Version 2.1)[Z]. 2016(in Chinese).
- [11] 刘翔, 张路, 王涛. MSAS 系统在中国区域服务性能评估与分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2020, 43(2): 139-146.
Liu Xiang, Zhang Lu, Wang Tao. Evaluation of MSAS system service performance in China region[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2020, 43(2): 139-146(in Chinese).
- [12] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件: 星基增强服务 BDSBAS-B1C(1.0)[Z]. 2020.
China Satellite Navigation Office. ICD B, BeiDou navigation satellite system signal in space interface control document-BDSBAS-B1C(1.0)[Z]. 2020(in Chinese).
- [13] 彭腾. 广播电离层模型性能评估及影响因素分析[D]. 西安: 长安大学, 2018.
Peng Teng. Performance evaluation and influence factors analysis of broadcast ionospheric model[D]. Xi'an: Changan University, 2018(in Chinese).
- [14] 周仁宇. 北斗试验卫星系统服务性能初步分析[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
Zhou Renyu. Preliminary analysis of the service performance of Beidou experimental satellite system[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018(in Chinese).
- [15] 陈秀德. 电离层延迟改正模型算法的研究与探讨[D]. 西安: 长安大学, 2017.
Chen Xiude. Research and discussion on algorithm of ionospheric delay correction model[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017(in Chinese).
- [16] 张强, 赵齐乐, 章红平, 等. 北斗卫星导航系统电离层模型精度的研究[C]// 第四届中国卫星导航学术年会, 2013.
Zhang Qiang, Zhao Qile, Zhang Hongping, et al. Research on BeiDou navigation satellite system ionospheric model accuracy[C]// Proceedings of 4th China Satellite Navigation Conference, 2013(in Chinese).
- [17] Yuan Y, Wang N, Li Z, et al. The BeiDou global broadcast ionospheric delay correction model (BDGIM) and its preliminary performance evaluation results[J]. Navigation, 2019, 66(1): 55-69.
- [18] 刘宸, 王威, 姜意, 等. BDS 格网点电离层信息性能评估[J]. 全球定位系统, 2019, 44(5): 85-90.
Liu Chen, Wang Wei, Jiang Yi, et al. A study on performance of ionospheric grid information of BDS[J]. GNSS World of China, 2019, 44(5): 85-90(in Chinese).
- [19] 任丹丹. 基于 kriging 算法的 WAAS 电离层延迟估算研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2020.
Ren Dandan. Research for WAAS ionospheric delay estimation based on kriging algorithm[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020(in Chinese).
- [20] 任丹丹, 伊萍. SBAS 电离层格网点延迟估算方法研究[C]// 第十一届中国卫星导航学术年会, 2020.
Ren Dandan, Yi Ping. Research on estimation method of ionospheric grid point delay for SBAS[C]// Proceedings of 11th China Satellite Navigation Conference, 2020(in Chinese).
- [21] 朱永兴, 谭述森, 任夏, 等. GNSS 全球广播电离层模型精度分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(5): 768-775.
Zhu Yongxing, Tan Shusen, Ren Xia, et al. Accuracy analysis of GNSS global broadcast ionospheric model[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(5): 768-775(in Chinese).
- [22] 毛悦, 朱永兴, 宋小勇. 全球系统广播电离层模型精度分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(9): 888-890.
Mao Yue, Zhu Yongxing, Song Xiaoyong. Accuracy analysis of broadcast ionosphere model of global navigation satellite system[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2020, 40(9): 888-890(in Chinese).
- [23] 牛飞. GNSS 完好性增强理论与方法研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2008.
Niu Fei. Theory and technique on GNSS integrity augment[D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2008(in Chinese).
- [24] 崔瑞云, 倪育德, 王琳琳, 等. 北斗卫星导航系统完好性参数研究[J]. 现代导航, 2015, 6(1): 17-22.
Cui Ruiyun, Ni Yude, Wang Linlin, et al. Research on integrity parameters of BeiDou satellite navigation system[J]. Modern Navigation, 2015, 6(1): 17-22(in Chinese).

(编辑: 李瑾)