

2020—2025 年北斗三号广播星历及 电离层模型性能研究

郝鑫宇¹ 何倩倩^{1,2} 颜博^{1,3} 刘蕾¹

1(中国电子科技集团公司第十五研究所 北京 100083)

2(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100191)

3(北京航空航天大学计算机学院 北京 100191)

摘要 北斗三号全球卫星导航系统(BDS-3)于2020年7月31日正式开通,其空间段服务能力是决定系统整体性能表现的重要因素.本文对广播轨道、广播钟差、空间信号测距误差、广播电离层精度的评估计算方法进行了分析,分别以GFZ(German Research Centre for Geosciences)和iGMAS(International GNSS Monitoring and Assessment System)的最终产品为参考基准,对系统从2020年正式开通至2025年的变化情况进行了评估分析.研究表明,BDS-3广播轨道精度呈现明显的卫星类型相关性,ME0卫星高于IGSO卫星,与GFZ产品和iGMAS产品相比,径向、切向、法向95%的RMS值均得到不同程度地改善;广播钟差误差与SISRE(Signal-In-Space Range Error)95%的RMS值则提升了分米级的精度;电离层模型误差方面,在评估周期内,Klobuchar模型的VTEC值分布范围相对较广,低VTEC区间BDGIM模型的频次分布更为集中;与CODE和iGMAS电离层产品相比,在太阳活动极小期的2020年BDGIM(Beidou Global Ionospheric Delay Correction Model)模型VTEC平均RMS值优于Klobuchar模型,而在太阳活动极大期的2025年两模型的VTEC平均RMS值均呈上升的趋势,且BDGIM模型的稳定性更强.

关键词 北斗三号卫星导航系统, 空间段, 广播轨道误差, 广播钟差误差, 广播电离层误差, 能力评估

中图分类号 P228

Research on the Performance of Beidou-3 Broadcast Ephemeris and Ionospheric Model from 2020 to 2025

HAO Xinyu¹ HE Qianqian^{1,2} YAN Bo^{1,3} LIU Lei¹

1(The 15th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100083)

2(School of Electronic Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191)

3(School of Computer Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191)

2025-06-27 收到原稿, 2025-10-16 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Abstract The BeiDou Navigation Satellite System (BDS-3) officially began providing global services on 31 July 2020. As the core component of satellite navigation systems, the space segment's service capability determines the overall system performance. This paper first introduces calculation and analysis methods for broadcast orbit errors, broadcast clock errors, Signal-in-space range error and broadcast ionospheric errors. Then, based on the final products of German Geosciences Research Centre (GFZ) and International Global Navigation Satellite System Monitoring and Assessment System (iGMAS), it conducts an evaluation of the changes in broadcast ephemeris accuracy and ionospheric model precision throughout a complete cycle from 2020 to 2025. Research shows that the BDS-3 broadcast orbit error shows a clear dependence on satellite type, with MEO satellites outperforming IGSO satellites. Compared with GFZ products, the 95% RMS of the radial, along-track and cross-track error falls from 0.104, 0.482, 0.589 m respectively in 2020 to 0.080, 0.351, 0.364 m respectively in 2025; and compared with iGMAS products, these data fall from 0.086, 0.386, 0.461 m respectively in 2020 to 0.073 m, 0.341 m, 0.350 m in 2025. Regarding broadcast clock error, based on GFZ products, the 95% RMS improves from 0.705 m in 2020 to 0.540 m in 2025; and based on iGMAS products, the 95% RMS in 2020 is 0.811 m and 0.640 m in 2025. The SISRE of MEO satellites is generally smaller than that of IGSO satellites, and the statistical accuracies of 95% RMS of SISRE in 2020 based on GFZ and iGMAS products reaches 0.705 m and 0.817 m, and in 2025 reaches 0.549 m and 0.645 m, respectively. In terms of ionospheric model errors, throughout the evaluation period, the Klobuchar model exhibited a relatively broad distribution range of VTEC values. The BDGIM model demonstrated a more concentrated frequency distribution in the low VTEC intervals, while the Klobuchar model showed a relatively dispersed distribution in the high VTEC intervals. Compared with CODE and IGMAS ionospheric products, during the solar minimum period (2020), the BDGIM model achieved average VTEC RMS values of 3.193, 6.240, 1.570 TECU and 3.176, 6.790, 1.480 TECU, respectively, while the Klobuchar model yielded 7.359, 35.440, 4.350 TECU and 7.367, 35.930, 4.140 TECU, respectively. During the solar maximum period (2025), the average VTEC RMS values increased to 11.481 TECU and 10.493 TECU, 22.211 TECU and 21.802 TECU, respectively. Based on CODE products as reference, the maximum and minimum VTEC RMS values for the Klobuchar model and BDGIM model were 34.500, 10.400 TECU and 35.330, 6.640 TECU, respectively. The corresponding data referenced against IGMAS products reached 33.810, 10.000 TECU and 35.950, 5.890 TECU, respectively. And the assessment results can provide support for BDS performance optimization.

Key words Beidou-3 satellite navigation system, Space segment, Broadcast orbit error, Broadcast clock error, Broadcast ionospheric error, Capability evaluation

0 引言

北斗三号卫星导航系统作为中国自主研制建设的全球导航卫星系统^[1], 于2020年7月31日正式投入运行, 包含24颗中圆地球轨道卫星(Middle Earth Orbit, MEO)、三颗地球静止轨道卫星(Geostationary Orbit, GEO)以及三颗倾斜地球同步轨道卫星(Inclined Geosynchronous Orbit, IGSO)。这些卫星共同构成了BDS-3的空间段^[2]。空间段服务能力指导航系统空间段支撑用户实现预期精度的定位、导航与授时(Positioning, Navigation and Timing, PNT)服

务的能力, 主要通过广播轨道误差、广播钟差误差以及广播电离层模型精度来衡量。

中国有研究对北斗三号卫星导航系统空间段服务能力涉及的核心指标进行了评估。文献[3]基于2019年8月前的数据对BDS-3可提供服务的18颗MEO卫星展开了短期的评估, 结果表明相较于2018年12月, 平均空间信号测距误差(Signal-in-Space Range Error, SISRE)得到显著改善, BDS-3的广播电离层模型精度优于BDS-2的广播电离层模型精度。文献[4]选取2019年1月至2019年8月的数据, 对BDS-3基本系统中的18颗MEO卫星的广播轨道精

度、广播钟差精度、SISRE 进行了评估, 结果表明, BDS-3 的三项精度均显著优于 BDS-2 同类卫星的对应精度. 文献 [5] 利用 2020 年 8 月 1 日至 2021 年 7 月 31 日共 1 年的广播星历数据, 对 GEO/IGSO/MEO 卫星的轨道精度、钟差精度和空间信号测距误差进行了评估, 得到了 GEO 卫星的空间信号精度相对最差的结论. 文献 [6] 选用 2024 年 3 月的前十天广播星历数据, 以武汉大学精密星历作为参考基准, 对 GEO/IGSO/MEO 卫星的轨道误差进行了评估. 文献 [7] 通过计算约 2 年的广播电离层误差数据, 对全球导航卫星系统 (GNSS, Global Navigation Satellite System) 的四种广播电离层模型进行了系统评估, 并探索了基于机器学习的模型误差预测方法来提升单频用户的定位可信度.

以上研究, 尽管在北斗三号卫星导航系统空间段服务能力评估方面取得了阶段性成果, 但未能覆盖自北斗三号系统全球服务开通后 (2020—2025 年) 相对较长的评估周期, 难以揭示系统性能的长期变化规律. 此外, 多数文献仅针对单一参数 (例如广播轨道或广播电离层误差) 展开分析, 缺乏对广播轨道误差、广播钟差误差、SISRE 及广播电离层误差的综合评估, 无法全面反映空间段服务能力的整体性能.

因此, 本文利用德国地学研究中心 (GFZ, German Research Centre for Geosciences) 和全球连续监测评估系统 (iGMAS, international Global Navigation Satellite System Monitoring and Assessment System) 的高精度 SP3 轨道与 CLK 钟差产品作为评估广播星历的基准, 以欧洲定轨中心 (CODE, Center for Orbit Determination in Europe) 和 iGMAS 的全球电离层图作为评估广播电离层参数的基准, 对 2020 年 8 月 1 日至 2025 年 4 月 10 日期间北斗三号卫星的广播轨道误差、广播钟差误差、SISRE 及广播电离层误差进行长期评估分析, 评估结果可为北斗卫星导航系统的性能优化、提升用户终端定位精度及增强系统设计提供一定的数据支撑. 表 1 给出了本文用到的轨道数据、钟差数据以及电离层数据的下载地址.

1 评估分析方法

1.1 广播轨道误差评估

广播轨道误差是指卫星的实际轨道位置与广播星历中提供的轨道参数之间的偏差. 这种偏差会导致

表 1 轨道数据、钟差数据及电离层数据下载链接
Table 1 Download links for orbit data, clock data and ionosphere data

Type	Download links
BRDM	ftp://igs.gnsswhu.cn/pub/gps/data/daily/
GFZ	ftp://ftp.gfz-potsdam.de/home/GNSS/products/mgex/
iGMAS	http://www.igmas.org/Product/TreePage/tree/cate_id/37.html
CODE	ftp://ftp.aiub.unibe.ch/CODE/

接收机在计算卫星位置时出现不准确的情况, 进而影响最终的定位结果.

广播轨道误差可采用激光测距 (Satellite Laser Ranging, SLR) 技术 [8], 或广播轨道与精密星历产品的差值来计算, 本文选择后者进行评估. 评估思路为: 将广播星历计算得到的卫星位置与精密星历提供的卫星位置做差, 求解出卫星的三维轨道差, 并将其转换至轨道坐标系的三个方向分量 (Radial 径向、Along-track 切向、Cross-track 法向) 中. 具体的转换公式如下:

$$\mathbf{e}_{\text{radial}} = \frac{\mathbf{r}_{\text{sat}}}{|\mathbf{r}_{\text{sat}}|}, \quad (1)$$

$$\mathbf{e}_{\text{cross-track}} = \frac{\mathbf{r}_{\text{sat}} \times \mathbf{v}_{\text{sat}}}{|\mathbf{r}_{\text{sat}} \times \mathbf{v}_{\text{sat}}|}, \quad (2)$$

$$\mathbf{e}_{\text{along-track}} = \mathbf{e}_{\text{cross-track}} \times \mathbf{e}_{\text{radial}}, \quad (3)$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{e}_{\text{radial}} \cdot \Delta \mathbf{r}, \quad (4)$$

$$\mathbf{A} = \mathbf{e}_{\text{along-track}} \cdot \Delta \mathbf{r}, \quad (5)$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{e}_{\text{cross-track}} \cdot \Delta \mathbf{r}. \quad (6)$$

其中, $\mathbf{r}_{\text{sat}}$ 和 $\mathbf{v}_{\text{sat}}$ 分别表示由广播星历计算得到的卫星质心位置向量和卫星速度向量; $\mathbf{e}_{\text{radial}}$, $\mathbf{e}_{\text{along-track}}$, $\mathbf{e}_{\text{cross-track}}$ 分别为卫星轨道 $\mathbf{R}$, $\mathbf{A}$, $\mathbf{C}$ 单位向量; $\Delta \mathbf{r}$ 为广播星历与精密星历的位置误差向量; $\mathbf{R}$, $\mathbf{A}$, $\mathbf{C}$ 分别为轨道坐标系下的广播轨道误差.

广播轨道误差评估时需考虑时空基准统一和卫星天线相位中心改正的问题. BDS 广播星历计算的卫星位置坐标基于北斗坐标系 (Beidou Coordinate System, BDCS) 参考框架. BDCS 采用与 2000 中国大地坐标系 (China Geodetic Coordinate System 2000, CGCS2000) 一致的参考椭球参数, 并与国际地球参考框架 (International Terrestrial Reference Frame, ITRF) 保持基准对准, 而其精密星历则直接

以 ITRF 作为参考框架^[9]. 两者的差异约为 4.0 cm, 对于广播星历的精度而言可忽略不计^[10], 因此本文不考虑其之间的坐标转换.

在 BDS 中, 利用广播星历与精密星历计算得到的卫星的位置分别为卫星天线相位中心和卫星重心, 因此在计算轨道误差前, 需要改正由卫星天线相位中心不同而导致的误差^[11].

卫星天线相位中心误差改正主要包含天线相位中心偏移 (Phase Center Offset, PCO) 与相位中心变化两部分 (Phase Center Variation, PCV). 相关研究表明^[12], PCV 改正量的量级对广播轨道误差的影响较小, 因此可忽略不计, 本文仅针对 PCO 误差开展改正分析.

对接收机和卫星 PCO 改正, 其一般可以表达为局部坐标系下的矢量, 即

$$\Delta \mathbf{r}_{\text{pco}} = (\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k})^T \cdot |\Delta \mathbf{r}_{\text{pco}}| = \mathbf{r}_{\text{ant}} - \mathbf{r}_{\text{ref}}. \quad (7)$$

其中, $(\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k})^T$ 为星固系下卫星三轴指向的单位向量或测站地方坐标系下北方向、东方向以及高程方向单位向量; $\mathbf{r}_{\text{ant}}$ 和 $\mathbf{r}_{\text{ref}}$ 分别代表天线相位中心与质心矢量.

此外, 精密星历与广播星历的时间系统不同, GFZ 精密星历产品基于 GPST, iGMAS 精密星历产品则基于 BDT, 北斗广播星历采用 BDT, 因此, 在计算广播轨道误差时, 两者之间的时间系统需进行统一.

1.2 广播钟差误差评估

广播钟差误差是指利用广播星历中的钟差参数计算的卫星钟时间偏差与真实钟差之间的差异. 由于卫星钟的稳定性并非完美无缺, 其时间的微小偏差在信号传播过程中会被放大, 从而对接收机计算卫星信号传播时间产生影响, 进而导致定位误差.

针对广播钟差误差, 本文采用后处理精密钟差产品作为评估基准^[13], 通过二者比较的方法求得广播钟差精度.

在进行广播钟差误差评估时, 需注意频率基准差异的问题, BDS-3 广播钟差以 B3 I 频点为频率基准, 而精密钟差产品采用 B1 I/B3 I 无电离层组合作为统一基准, 因此需通过群延迟 (Timing Group Delay, TGD) 参数对设备时延偏差进行频点基准转换, 修正公式如下:

$$\Delta t_{\text{corrected}} = \Delta t_{\text{broadcast}} + \tau \cdot \frac{f_{\text{B3I}}^2}{f_{\text{B1I}}^2 - f_{\text{B3I}}^2}. \quad (8)$$

其中, $\Delta t_{\text{broadcast}}$ 表示广播星历钟差; f_{B1I}^2 , f_{B3I}^2 分别表

示 B1I 和 B3I 频点频率数值的平方; τ 表示两信号之间卫星播发的群延迟参数; $\Delta t_{\text{corrected}}$ 为修正后的广播钟差.

卫星导航系统官方提供的 PCO 与精密星历采用的 PCO 存在不一致情况, 这种不一致性会对钟差评估产生一定程度的影响. 从相关研究可知^[14], z 方向的差异基本会被钟差所吸收, 所以应当将 z 方向的差异予以扣除^[15]. 其表达式为

$$\delta_{\text{pco}}^z = \delta_{\text{pco}}^{z\text{-official}} - \delta_{\text{pco}}^{z\text{-precise}}, \quad (9)$$

$$\Delta t = \frac{\delta_{\text{pco}}^z}{c}, \quad (10)$$

$$\Delta t_{\text{CLK}} = \Delta t_{\text{corrected}} - \Delta t_{\text{pre}} + \Delta t. \quad (11)$$

其中, $\delta_{\text{pco}}^{z\text{-official}}$ 为官方 PCO 的 z 分量值, $\delta_{\text{pco}}^{z\text{-precise}}$ 为精密星历采用的 z 分量值, Δt 为天线相位中心径向偏差钟差修正项, c 为真空中的光速, Δt_{pre} 为精密钟差, Δt_{CLK} 为修正后的误差.

由于广播钟差与精密钟差间存在时标基准偏差, 因此无法通过直接作差的方式评估卫星钟差误差, 而应采用二次差法比较. 即在广播钟差和精密钟差作一次差后, 减去历元所有卫星作一次差的平均值, 从而消除由基准差异对卫星钟差的影响^[16], 有

$$t_{\text{CLK}}^{\text{final}} = \left(\Delta t_{\text{CLK}} - \frac{\sum_{i=1}^n \Delta t_{\text{CLK}}}{n} \right) \cdot c. \quad (12)$$

其中, n 为卫星星座包含的卫星数量, $t_{\text{CLK}}^{\text{final}}$ 为求得的广播钟差误差值.

1.3 SISRE 评估

SISRE 是评估卫星导航系统空间段服务能力的重要指标, 反映了广播星历精度对于用户测距的影响. 其计算式如下:

$$\varphi_{\text{SISRE}} = \sqrt{(\alpha R - c \Delta t_{\text{CLK}})^2 + (A^2 + C^2) / \beta}. \quad (13)$$

其中, 北斗卫星导航系统 GEO 卫星、IGSO 卫星的 α 和 β 取值分别为 0.99, 127; MEO 卫星的 α 和 β 取值分别为 0.98, 54^[17].

1.4 广播电离层误差评估

在卫星导航系统中, 电离层延迟是影响定位精度的主要误差源之一. 电离层是地球上空 50 km 至 1000 km 高度的电离气体层, 其电子密度变化会导致 GNSS 信号传播路径发生弯曲与延迟. 广播电离层误差引起的导航定位误差可达几米甚至几百米. 因此, 采用有效

的广播电离层误差评估技术至关重要, 这不仅有助于提高卫星导航定位的准确性, 还能进一步提升 GNSS 的综合性能^[18].

北斗二号沿用 Klobuchar 模型并进行改进, 更改了电离层薄层高度与更新电离层播发参数时间间隔, 在亚太地区中低纬度表现优异^[19], 但南半球因数据对称性假设导致精度下降. 北斗三号系统则采用 BDG-IM 模型, 通过球谐函数建模与动态参数更新机制, 实现了全球电离层延迟的高精度修正^[20], 根据不同球谐系数对电离层电子总含量 (Total Electron Content, TEC) 计算贡献的大小, 将球谐函数系数分为播发参数和非播发参数两类. 电离层延迟计算公式如下:

$$\psi_{\text{brdc}}^{\text{ion}} = \lambda_{\text{MF}} \times \frac{40.28 \times 10^{16}}{f^2} \times \left(A_0 + \sum_{i=1}^9 \alpha_i A_i \right). \quad (14)$$

其中, $\psi_{\text{brdc}}^{\text{ion}}$ 为电离层延迟改正数值, λ_{MF} 为投影函数, f 为当前信号对应的载波频率, A_0 为由用户端根据非播发参数计算的基础电离层延迟预报值, α_i 为导航电文播发的 BDGIM 电离层模型参数, A_i 为由穿刺点位置和观测时刻计算得到的基函数数值.

本文采用 BDGIM 经验模型进行广播电离层误差估算, 以 CODE 提供的全球电离层图为精密电离层模型. 通过在全球范围内按指定间隔均匀划分格网, 分别从精密模型与 BDGIM 模型中读取每个格网点中心点对应的电离层延迟, 通过两者作差, 得到广播电离层误差.

从 CODE 提供的全球电离层图中提取相应的格网点的电离层总电子含量 (VTEC) 后, 将其转换为精密电离层延迟, 即

$$\psi_{\text{pre}}^{\text{ion}} = \frac{40.28 \times 10^{16} \gamma}{f^2}. \quad (15)$$

其中, $\psi_{\text{pre}}^{\text{ion}}$ 为精密电离层延迟, f 为信号频率, γ 为 VTEC 值. 因此, 广播电离层误差计算公式为

$$\psi_{\text{ion}} = \psi_{\text{brdc}}^{\text{ion}} - \psi_{\text{pre}}^{\text{ion}}. \quad (16)$$

2 结果分析

2.1 广播星历精度

分别以 GFZ 产品、iGMAS 产品数据为基准, 评估了 2020—2025 年的广播轨道误差、广播钟差误差、SISRE. 图 1 和图 2 给出了 BDS-3 在 2020 年和 2025 年以 GFZ 产品为基准的对应数据的概率分布情

况. 而图 3 和图 4 给出了 BDS-3 在 2020 年和 2025 年以 iGMAS 产品为基准的对应数据的概率分布情况.

由图 1~4 可知, 相比 2020 年, BDS-3 在 2025 年的各项数据精度得到了显著提升. 四类误差均近似服从正态分布, 但在分布特征和变化趋势上存在明显差异. 2020—2025 年径向误差的分布曲线峰值提高, 分布范围有一定的缩小, 且其概率密度曲线分布最为陡峭、集中, 误差值始终保持最小. 这主要源于地面观测站对于径向分量的波动更加敏感, 导致其监测精

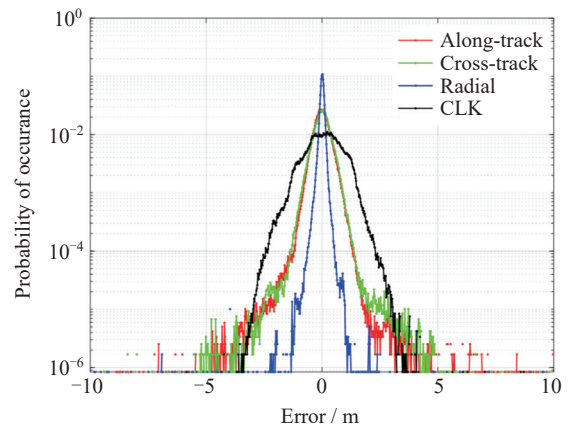


图 1 以 GFZ 产品为基准, BDS-3 在 2020 年的径向、切向、法向轨道误差及钟差误差概率分布

Fig. 1 Radial, along-track and cross-track orbit error, clock error probability distribution plot of BDS-3, based on GFZ products in 2020

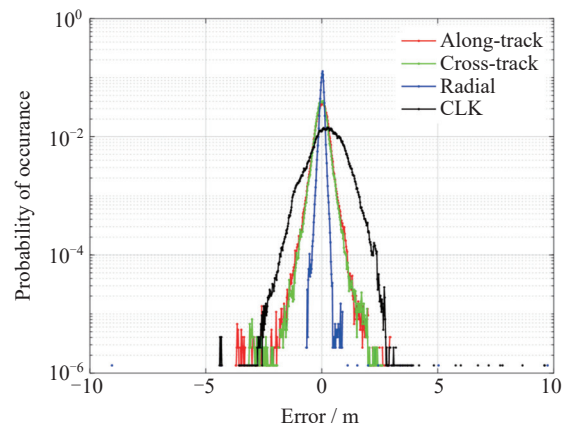


图 2 以 GFZ 产品为基准, BDS-3 在 2025 年的径向、切向、法向轨道误差及钟差误差概率分布

Fig. 2 Radial, along-track and cross-track orbit error, clock error probability distribution plot of BDS-3, based on GFZ products in 2025

度与改正能力更高. 在评估周期内, 法向误差的分布范围虽有所收窄, 但由于地面观测的几何构型对垂直于轨道平面的分量分辨力较差, 其成为轨道误差中分布范围相对较大的一类. 切向误差介于径向和法向误差之间, 其在评估期内的变化趋势与法向误差接近, 尾部误差出现的概率显著降低. 由图分析可知, 以两个参考产品为基准的三个方向的轨道误差分布情况基本相似. 钟差误差表现了与径向误差类似的改善趋

势, 2020 年以 iGMAS 产品为基准的钟差误差的分布范围大于以 GFZ 产品为基准的钟差误差, 主要是跟踪站覆盖不足、系统切换过渡期波动等因素导致的, 随着星钟稳定性和精度的提升, 2025 年其分布曲线更加集中, 误差范围进一步缩小.

为了定量分析 BDS-3 不同类型卫星之间的广播星历轨道及钟差精度等信息, 本文统计了 BDS-3 在评估周期内的对应误差. 图 5 和图 6 分别给出了评估

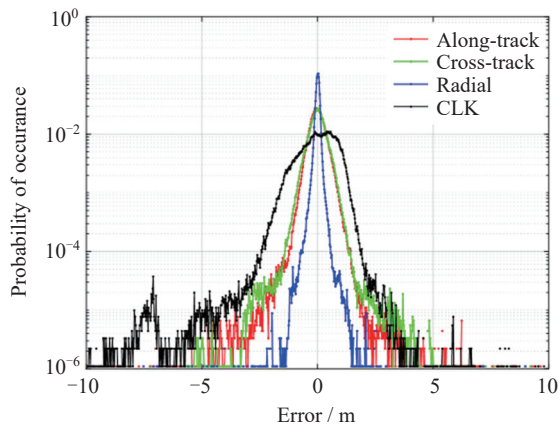


图 3 以 iGMAS 产品为基准, BDS-3 在 2020 年的径向、切向、法向轨道误差及钟差误差概率分布

Fig. 3 Radial, along-track and cross-track orbit error, clock error probability distribution plot of BDS-3, based on iGMAS products in 2020

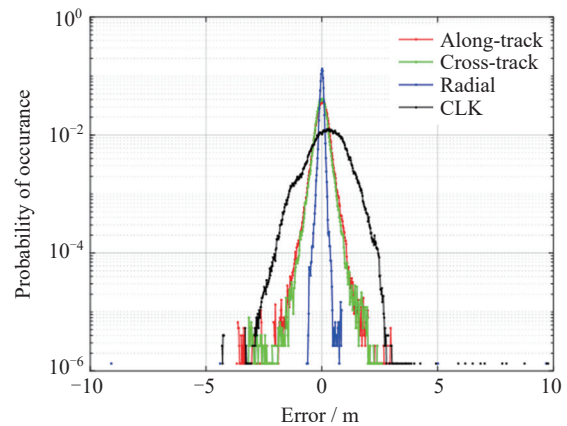


图 4 以 iGMAS 产品为基准, BDS-3 在 2025 年的径向、切向、法向轨道误差及钟差误差概率分布

Fig. 4 Radial, along-track and cross-track orbit error, clock error probability distribution plot of BDS-3, based on iGMAS products in 2025

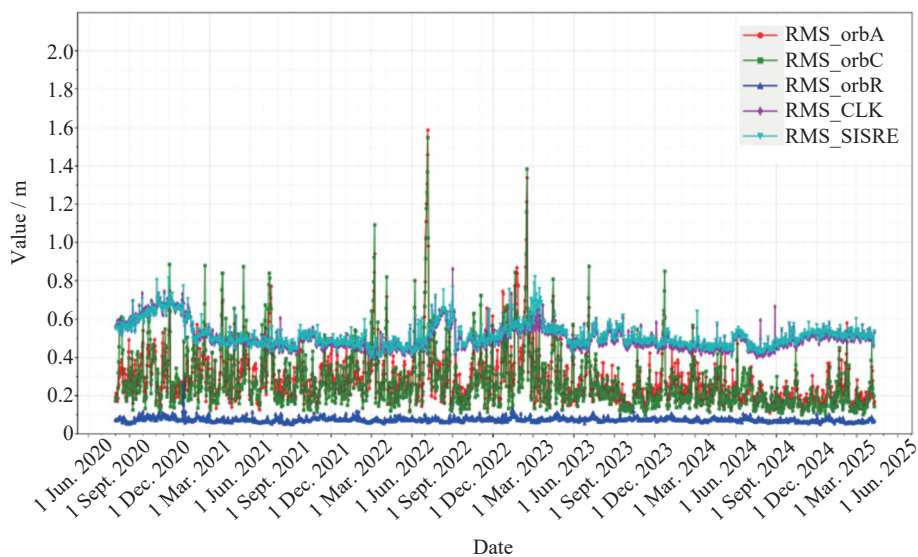


图 5 以 GFZ 产品为基准的 BDS-3 径向、切向、法向轨道误差、钟差误差及 SISRE RMS 变化

Fig. 5 RMS variation of BDS-3 radial, along-track, cross-track orbital errors, clock error, and SISRE with GFZ products as reference

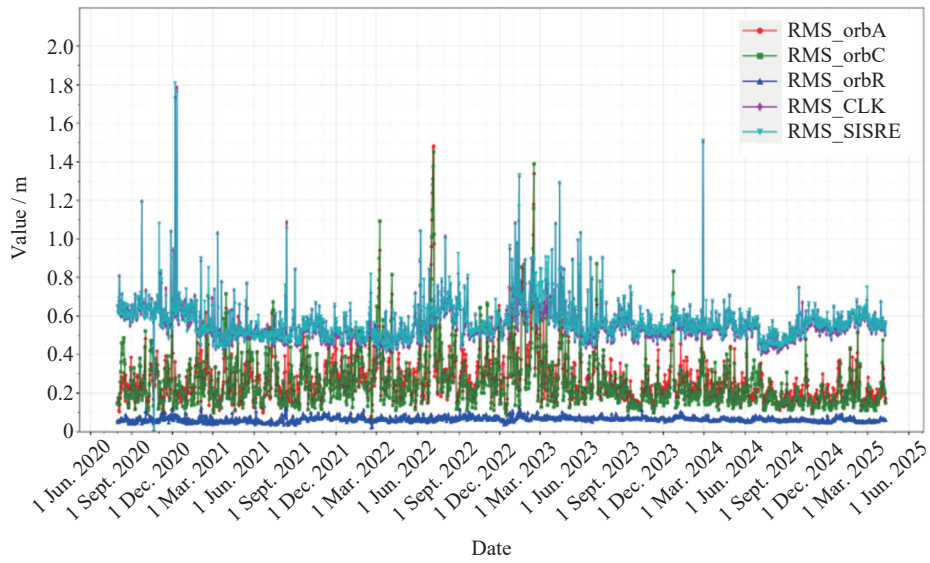


图6 以 iGMAS 产品为基准的 BDS-3 径向、切向、法向轨道误差、钟差误差及 SISRE RMS 变化

Fig. 6 RMS variation of BDS-3 radial, along-track, cross-track orbital errors, clock error, and SISRE with iGMAS products as reference

周期内以 GFZ 和 iGMAS 产品为基准的轨道误差、钟差误差与 SISRE 的 RMS 变化。各项数据呈现波动性的同时, 对应精度均逐渐得到改善, 与两种产品对比的各项数据 RMS 值变化情况基本相同, 其中轨道径向误差变化相对平缓, 切向、法向误差振幅较大, 钟差误差与 SISRE 呈现高度一致性, 说明钟差误差是制约 SISRE 改善的重要因素。图 7~10 为以两种产品为基准的 BDS-3 2020 年与 2025 年的轨道误差、钟差误差及 SISRE 的统计图, 表 2 和表 3 则分别给出了以两种产品为基准的 2020—2025 年 BDS-3 轨道径向、切向、法向误差, 钟差误差及 SISRE 的 RMS 的 95% 统计值。BDS-3 采用卫星星间链路技术显著改善了广播轨道性能^[21], 2020 年以 GFZ 产品和 iGMAS 产品为基准的 BDS-3 卫星的广播星历轨道 95% 径向误差的 RMS 值分别为 0.104 m 和 0.086 m, 其中, C38~C40 卫星的对应误差要明显高于其他卫星, 原因是 IGSO 卫星星下点长期在赤道附近呈 8 字形摆动, 导致监测站观测视角单一, 几何构型较弱。2020—2025 年轨道径向精度较为平稳, 基本在 0.07~0.1 m, 轨道切向和法向精度在 2024 年和 2025 年提升较为明显, 由 0.4~0.6 m 提升至 0.35 m。BDS-3 的轨道切向误差和法向误差表现出类似的分布特征, 2020 年, 切向误差 68% RMS 统计精度 (1σ , 68% 置信度) 优于 0.37 m, 以两种产品为参考的 95% RMS

统计精度 (2σ , 95% 置信度) 分别为 0.482 m 和 0.386 m; 法向误差 68% RMS 统计精度优于 0.38 m, 95% RMS 统计精度分别为 0.589 m 和 0.461 m。在本文评估周期内, 两项误差的统计值均呈现一定程度的缩小趋势。到 2025 年, 以 GFZ 产品、iGMAS 产品为基准的切向误差 95% RMS 统计精度分别达到 0.351 m 和 0.341 m; 法向误差 95% RMS 统计精度分别达到 0.364 m, 0.350 m。IGSO 卫星的对应数据的统计精度同样差于 MEO 卫星。

BDS-3 卫星搭载了氢原子钟和更高精度的铷原子钟, 广播钟差误差值显著降低, 并且氢钟的卫星钟差相对最优^[22], 钟差精度起伏相对较大, 基本在 0.5~0.8 m 之间。BDS-3 在 2020 年以 GFZ 产品、iGMAS 产品为基准的对应数据 95% RMS 统计精度分别为 0.705 m 和 0.811 m, 68% RMS 统计精度优于 0.7 m。2025 年以两种产品为参考的 95% RMS 统计精度分别提升至 0.540 m 和 0.640 m, 部分卫星的统计精度出现不降反增的现象 (例如 C35 卫星), 具体原因需后续进一步分析。

在评估周期内, MEO 卫星的 SISRE 要普遍小于 IGSO 卫星, 但 SISRE 受到钟差误差的影响较大^[23], 这导致部分 MEO 卫星 (例如 C42) SISRE 大于 IGSO 卫星。2020—2025 年 SISRE 的变化量级在厘米级, 95% RMS 统计精度基本在 0.55~0.8 m, 以

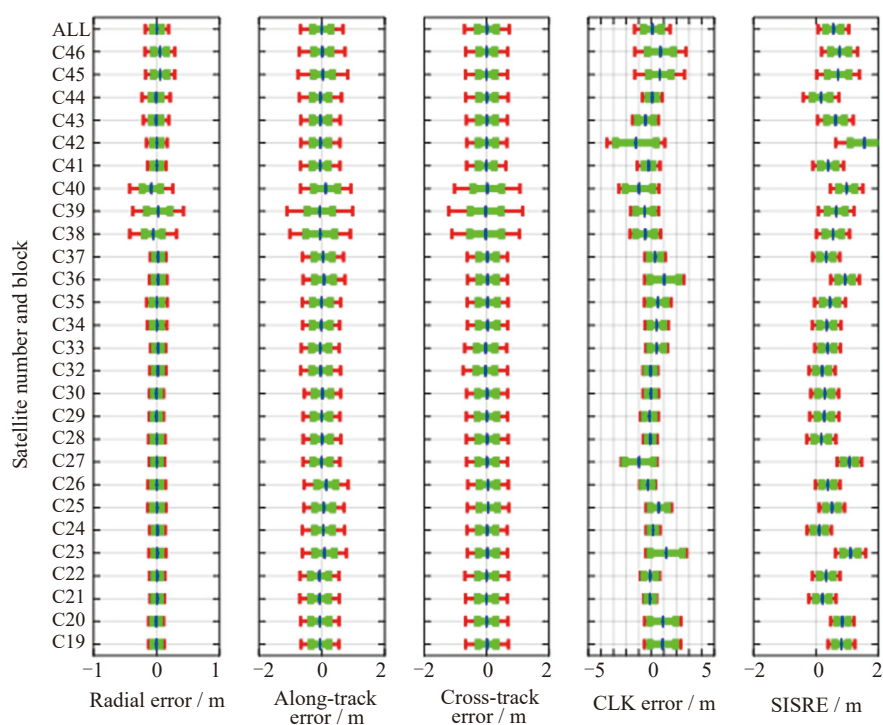


图 7 以 GFZ 产品为基准, BDS-3 在 2020 年的径向、切向、法向轨道误差、钟差误差及 SISRE 统计

Fig. 7 Statistical plot of BDS-3 radial, along-track and cross-track orbit errors, clock errors and SISRE based on GFZ products in 2020

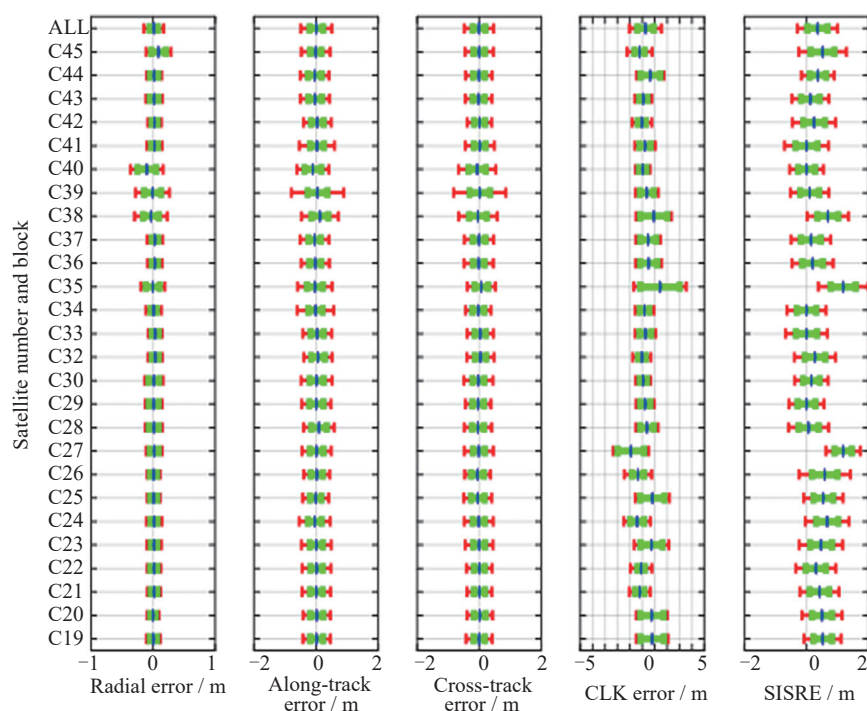


图 8 以 GFZ 产品为基准, BDS-3 在 2025 年的径向、切向、法向轨道误差、钟差误差及 SISRE 统计

Fig. 8 Statistical plot of BDS-3 radial, along-track and cross-track orbit errors, clock errors and SISRE based on GFZ products in 2025

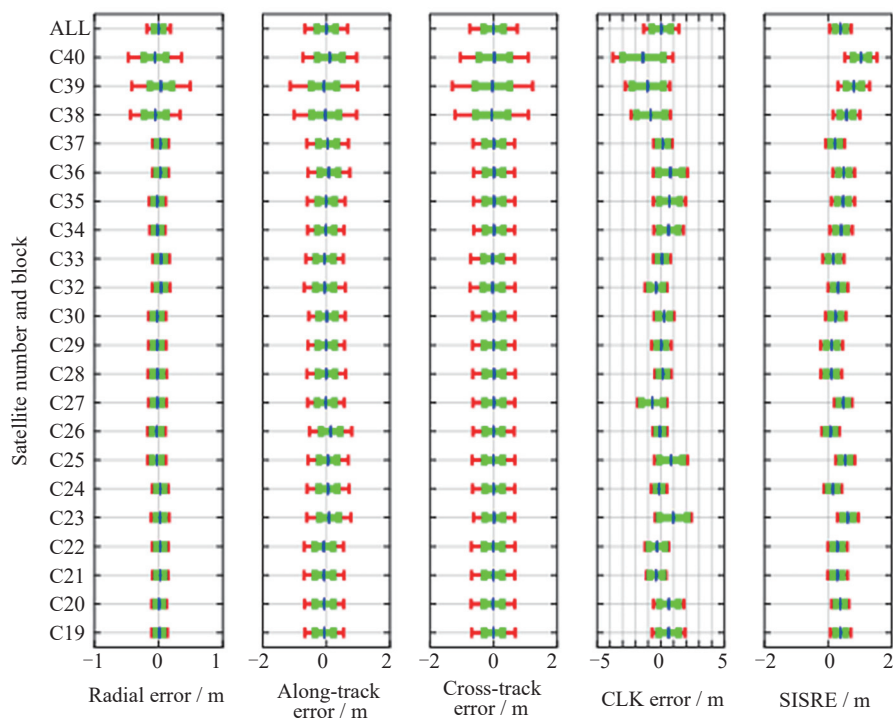


图 9 以 iGMAS 产品为基准, BDS-3 在 2020 年的径向、切向、法向轨道误差、钟差误差及 SISRE 统计

Fig. 9 Statistical plot of BDS-3 radial, along-track and cross-track orbit errors, clock errors and SISRE based on iGMAS products in 2020

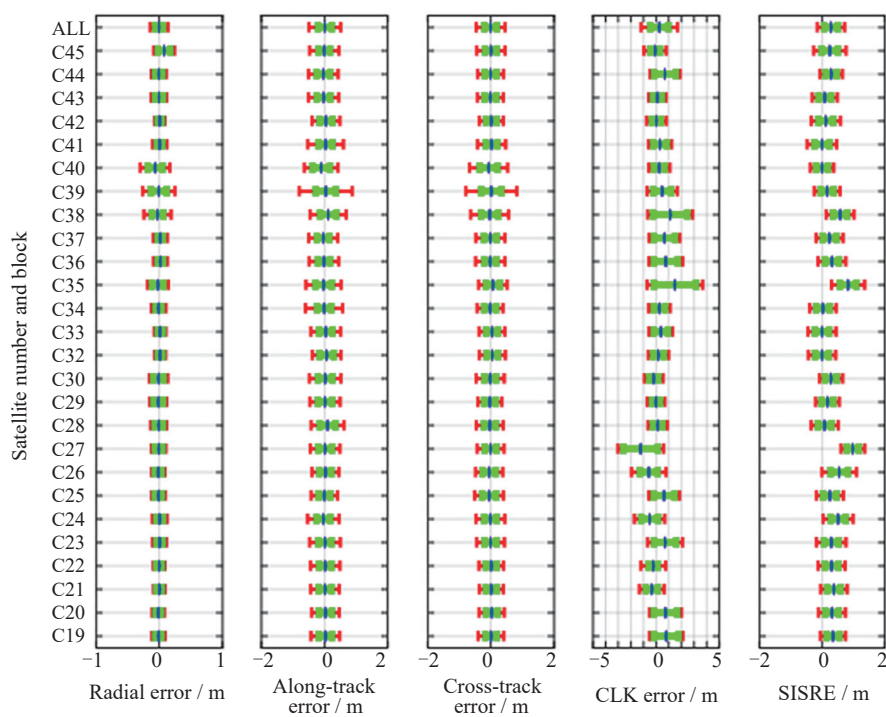


图 10 以 iGMAS 产品为基准, BDS-3 在 2025 年的径向、切向、法向轨道误差、钟差误差及 SISRE 统计

Fig. 10 Statistical plot of BDS-3 radial, along-track, cross-track orbit errors, clock errors and SISRE based on iGMAS products in 2025

GFZ 和 iGMAS 产品为参考的 RMS 值分别由 2020 年的 0.705 m 和 0.817 m, 改善至 2025 年的 0.549 m 和 0.645 m.

2.2 电离层模型精度

以 CODE 和 iGMAS 提供的 IONEX 格式全球电离层格网 (Global Ionosphere Map, GIM) 产品作为参考, 统计了 BDS-2 Klobuchar 模型与 BDS-3 BDGIM 模型在南北纬 87.5°(间隔 2.5°), 东西经 180° (间隔 5°) 之间, 针对每个评估时刻, 计算所有格网点与 CODE 产品或 iGMAS 产品的差值, 并统计其 RMS 值, 每天 24 个评估时刻的 RMS 值取均值, 每天得到 1 个 RMS 值. 该数据代表了广播电离层模型与 CODE 或 iGMAS 的 GIM 产品的电离层延迟的

近似程度.

图 11~12 分别给出了 2020—2025 年期间, 基于 CODE 产品和 iGMAS 产品的 BDS Klobuchar 模型与 BDGIM 模型 VTEC RMS 直方统计图. 从统计结果可以看出, BDS Klobuchar 模型的 VTEC 值分布范围相对较广, 两种模型在以不同产品为参考基准的 VTEC 值的分布规律基本一致, 且均呈现出随着 VTEC 值增加, 频次逐渐减少的趋势. 在低 VTEC 区间 (以 CODE 产品为基准: 小于 14.31 TECU; 以 iGMAS 产品为基准: 13.05 TECU), BDGIM 模型表现出更为集中的频次分布, 频次高于 BDS Klobuchar 模型, 说明 BDGIM 模型在中低电离层活动强度条件下具有更好的拟合效果. 而在高 VTEC 值区间 (大于

表 2 以 GFZ 产品为基准, BDS-3 在 2020—2025 年的轨道误差、钟差误差、SISRE RMS 95% 统计精度
Table 2 BDS-3 orbit error, clock error and SISRE RMS 95% statistical precision based on GFZ products in 2020—2025

Year	R/m	A/m	C/m	CLK/m	SISRE/m
2020	0.104	0.482	0.589	0.705	0.705
2021	0.096	0.502	0.601	0.572	0.580
2022	0.094	0.614	0.657	0.623	0.636
2023	0.097	0.645	0.631	0.584	0.668
2024	0.087	0.354	0.337	0.530	0.542
2025	0.080	0.351	0.364	0.540	0.549

表 3 以 iGMAS 产品为基准, BDS-3 在 2020—2025 年的轨道误差、钟差误差、SISRE 的 RMS 95% 统计精度
Table 3 BDS-3 orbit error, clock error and SISRE RMS 95% statistical precision based on iGMAS products in 2020—2025

Year	R/m	A/m	C/m	CLK/m	SISRE/m
2020	0.086	0.386	0.461	0.811	0.817
2021	0.086	0.456	0.505	0.662	0.666
2022	0.087	0.592	0.649	0.716	0.738
2023	0.086	0.635	0.647	0.846	0.883
2024	0.078	0.354	0.331	0.622	0.625
2025	0.073	0.341	0.350	0.640	0.645

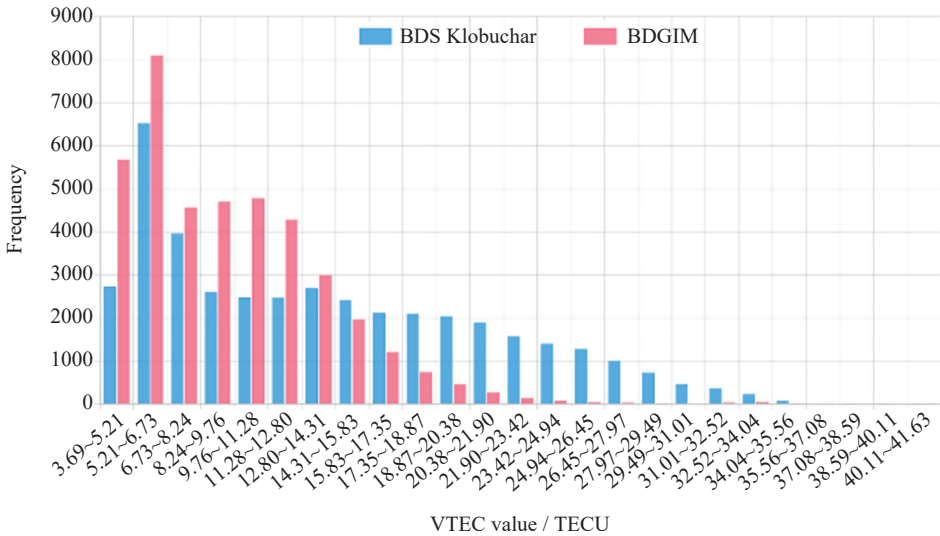


图 11 以 CODE 产品为基准, 2020—2025 年的 BDS Klobuchar 模型与 BDGIM 模型 VTEC RMS 直方图
Fig. 11 BDS Klobuchar model and BDGIM model VTEC RMS histogram based on CODE products from 2020 to 2025

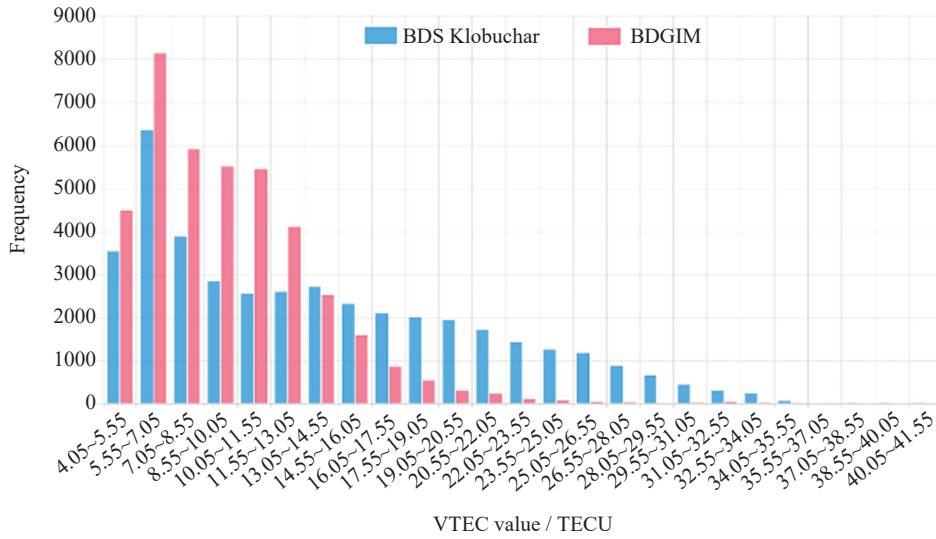


图 12 以 iGMAS 产品为基准, 2020—2025 年的 BDS Klobuchar 模型与 BDGIM 模型 VTEC RMS 直方图

Fig. 12 BDS Klobuchar model and BDGIM model VTEC RMS histogram based on iGMAS products from 2020 to 2025

20 TECU), 两模型均表现为频次较低, 但 BDS Klobuchar 模型的误差分布较为平缓, 频次更为分散, 表明其对高电离层活动条件的适应性略逊于 BDGIM 模型^[24].

由于太阳活动强度直接制约着电离层的演化特征, 进而影响电离层误差. 因此, 本文结合能表征太阳活动强度的 $F_{10.7}$ 太阳活动指数^[25], 对两种北斗广播电离层模型精度展开分析. 图 13 为以 CODE 产品为基准的 2020—2025 年 BDS Klobuchar 模型的 VTEC RMS 序列图, 图 14 为以 iGMAS 产品为基准的 2020—2025 年 BDS Klobuchar 模型的 VTEC RMS 序列图, 图 15 为以 CODE 产品为基准的 2020—2025 年 BDGIM 模型的 VTEC RMS 序列图, 图 16 为以 iGMAS 产品为基准的 2020—2025 年 BDGIM 模型的 VTEC RMS 序列图. $F_{10.7}$ 指数与 VTEC RMS 具有强相关性, 2020—2021 年, 太阳活动处于极小期, 太阳黑子数与极紫外辐射强度均降至周期最低值, $F_{10.7}$ 指数长期稳定在 65~75 太阳流量单位 (solar flux unit, sfu) 的较低水平, 由表 4 与表 5 数据得知, 以两种产品为基准的 BDS Klobuchar 模型、BDGIM 模型的 VTEC 平均、最大、最小 RMS 值非常接近, 基本小于 1 TECU. 此外, BDS Klobuchar 模型的 VTEC RMS 值起伏波动相对较大^[26]. 2020 年以 CODE 产品和 iGMAS 产品为基准的 BDS Klobuchar 模型的 VTEC 平均、最大、最小 RMS 值分别为

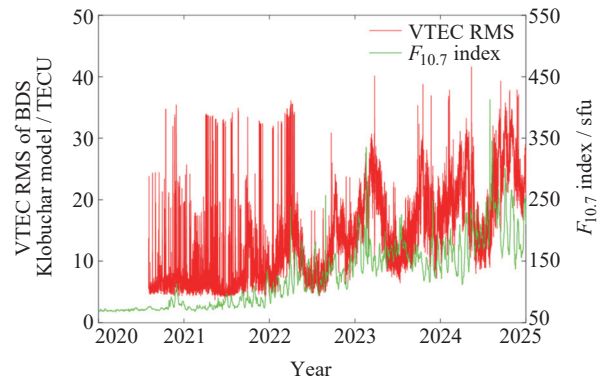


图 13 以 CODE 产品为基准的 2020—2025 年 BDS Klobuchar 模型 VTEC RMS 序列

Fig. 13 BDS Klobuchar model VTEC RMS sequential diagram from 2020 to 2025 based on CODE products

7.359, 35.440, 4.350 TECU 和 7.367, 35.930, 4.140 TECU; BDGIM 模型的对应值分别为 3.193, 6.240, 1.570 TECU 和 3.176, 6.790, 1.480 TECU, 这说明 BDGIM 电离层模型精度要明显优于 BDS-2 采用的 BDS Klobuchar 模型.

2021 年各模型对应的 VTEC 平均 RMS 值均有所上升, 2022 年之后太阳活动进入加速增强阶段, $F_{10.7}$ 指数从 2022 年突破 100 sfu 开始持续增加, 至 2024 年接近 180 sfu, 导致两个模型的精度均有一定程度的降低, 以 CODE 产品为基准的

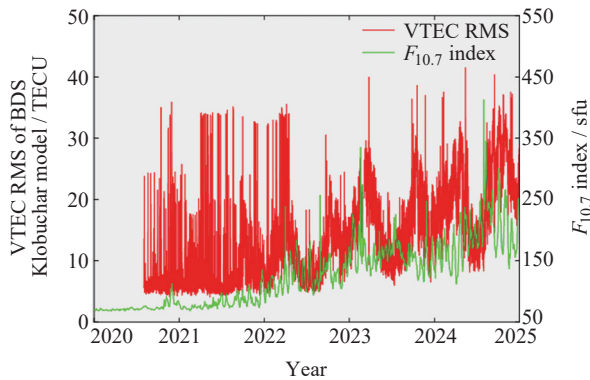


图 14 以 iGMAS 产品为基准的 2020—2025 年 BDS Klobuchar 模型 VTEC RMS 序列图

Fig. 14 BDS Klobuchar model VTEC RMS sequential diagram from 2020 to 2025 based on iGMAS products

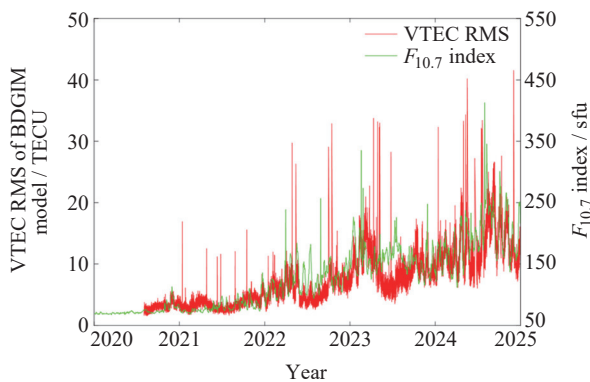


图 15 以 CODE 产品为基准的 2020—2025 年 BDGIM 模型 VTEC RMS 序列

Fig. 15 BDGIM model VTEC RMS sequential diagram from 2020 to 2025 based on CODE products

BDS Klobuchar 模型的 VTEC 平均 RMS 值由 2022 年的 11.096 TECU 攀升至 2024 年的 21.039 TECU, 而 BDGIM 电离层模型的表现相对更好, 由 2022 年的 5.923 TECU 上升到 2024 年的 12.025 TECU. 以 iGMAS 产品为基准的 BDS Klobuchar 模型和 BDGIM 模型 2024 年的 VTEC 平均 RMS 值分别上升至 20.759 TECU, 11.257 TECU. 此外, 以两种产品为基准的 VTEC 最大、最小 RMS 值也均呈现不同程度的增长, 且 BDGIM 模型的 VTEC 最大 RMS 值增幅相对最大, 约 9 TECU.

至 2025 年太阳活动极大期, $F_{10.7}$ 指数达到 190~210 sfu, 电离层扰动进入峰值阶段. 以 CODE 产

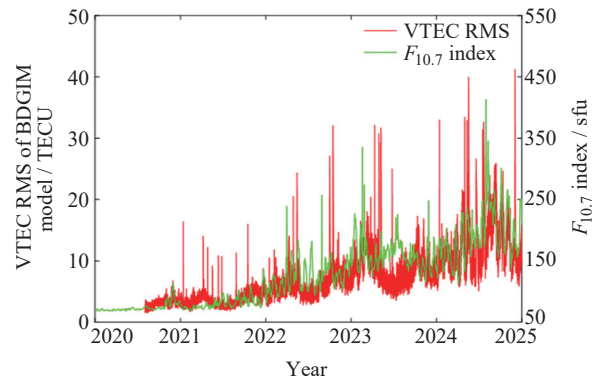


图 16 以 iGMAS 产品为基准的 2020—2025 年 BDGIM 模型 VTEC RMS 序列

Fig. 16 BDGIM model VTEC RMS sequential diagram from 2020 to 2025 based on iGMAS products

品为基准的 BDS Klobuchar 模型的 VTEC 平均、最大、最小 RMS 值达到 22.211, 34.500, 10.400 TECU, 而 BDGIM 模型通过全球实时数据同化与三频信号 (B1 C/B2 a/B3I) 融合技术, 动态修正电离层非线性扰动^[27], 因此受到的影响相对较小, 其 VTEC 平均、最大、最小 RMS 值分别为 11.481, 35.330, 6.640 TECU. 以 iGMAS 产品为基准的两项对应数据分别达到 21.802, 33.810, 10.000 TECU 和 10.493, 35.950, 5.890 TECU.

3 结论

评估分析了 BDS-3 的广播轨道误差、广播钟差误差、SISRE、广播电离层误差在 2020—2025 年完整周期内的变化情况, 结果如下.

(1) 广播轨道误差方面: BDS-3 卫星的广播轨道误差呈现卫星类型相关性, MEO 卫星优于 IGSO 卫星. 从 2020—2025 年, 以 GFZ 产品为基准, 广播轨道径向、切向、法向精度 95% RMS 值 (2σ , 95% 置信度) 分别由 2020 年的 0.104, 0.482, 0.589 m 提升至 2025 年的 0.080, 0.351, 0.364 m; 与 iGMAS 产品相比, 其相应值则由 2020 年的 0.086, 0.386, 0.461 m 提升至 0.073, 0.341, 0.350 m. 整体精度得到显著改善.

(2) 广播钟差误差方面: BDS-3 钟差误差值在评估周期内显著降低. 2020 年以 GFZ 产品为基准的 BDS-3 的广播钟差精度 95% RMS 值由 0.705 m 提升至 2025 年的 0.540 m; 与 iGMAS 产品相比, 其相

表 4 以 CODE 产品为基准的 2020—2025 年 BDS Klobuchar 和 BDGIM 模型 VTEC 平均、最大、最小 RMS
Table 4 Mean, max and min RMS of VTEC for BDS Klobuchar and BDGIM models
based on CODE products from 2020 to 2025

Year	BDS Klobuchar/TECU			BDGIM/TECU		
	mean	max	min	mean	max	min
2020	7.359	35.440	4.350	3.193	6.240	1.570
2021	7.420	34.940	3.690	3.545	16.900	1.660
2022	11.096	36.140	4.350	5.923	32.870	2.290
2023	16.626	40.150	6.420	9.337	33.740	3.520
2024	21.039	41.630	7.940	12.025	41.560	6.050
2025	22.211	34.500	10.400	11.481	35.330	6.640

表 5 以 iGMAS 产品为基准的 2020—2025 年 BDS Klobuchar 和 BDGIM 模型 VTEC 平均、最大、最小 RMS
Table 5 Mean, max and min RMS of VTEC for BDS Klobuchar and
BDGIM models based on iGMAS products from 2020 to 2025

Year	BDS Klobuchar/TECU			BDGIM/TECU		
	mean	max	min	mean	max	min
2020	7.367	35.930	4.140	3.176	6.790	1.480
2021	7.615	35.180	4.050	3.734	16.400	1.730
2022	10.951	35.590	4.640	5.956	32.030	2.490
2023	15.962	40.010	5.950	8.549	32.140	3.550
2024	20.759	41.550	8.120	11.257	41.210	5.090
2025	21.802	33.810	10.000	10.493	35.950	5.890

应值则由 2020 年的 0.811 m 达到 2025 年的 0.640 m. 其中搭载氢钟的卫星钟差相对最优, 但部分卫星 (例如 C35) 出现钟差稳定性下降现象, 可能与卫星钟老化有关.

(3) SISRE 方面: MEO 卫星的 SISRE 要普遍小于 IGSO 卫星, 评估周期内的 SISRE 变化量级在厘米级, 95%RMS 统计精度基本在 0.55~0.8 m, 以 GFZ 和 iGMAS 产品为基准的 2020 年 SISRE 95% RMS 统计精度分别为 0.705 m 和 0.817 m, 2025 年 SISRE 95% RMS 统计精度则分别提升至 0.549 m 和 0.645 m.

(4) 广播电离层误差方面: 2020—2025 年期间, 在低 VTEC 区间 BDGIM 模型表现出更为集中且高于 BDS Klobuchar 模型的频次分布; 在高 VTEC 区间, BDS Klobuchar 模型的分布较为分散. 2020 年太阳活动处于极小期, $F_{10.7}$ 指数处于较低水平, 电离层延迟误差较小, 以 CODE 和 iGMAS 产品

为基准, 2020 年 Klobuchar 模型 VTEC 平均、最大、最小 RMS 值分别为 7.359, 35.440, 4.350 TECU 和 7.367, 35.930, 4.140 TECU; BDGIM 模型分别为 3.193, 6.240, 1.570 TECU 和 3.176, 6.790, 1.480 TECU. 随着太阳活动逐渐活跃, 电离层误差呈现出一定程度的增加, 2025 年太阳活动达到极大期, 导致电离层延迟误差显著增大, VTEC 平均 RMS 数据分别增至 22.211 TECU 和 21.802 TECU, 11.481 TECU 和 10.493 TECU, 以 CODE 产品为参考的 Klobuchar 模型与 BDGIM 模型的 VTEC 最大、最小 RMS 值分别达到 34.500, 10.400 TECU 和 35.330, 6.640 TECU; 以 iGMAS 产品为基准的对应数据则分别为 33.810, 10.000 TECU 和 35.950, 5.890 TECU. 综合分析得出, BDGIM 模型比 BDS Klobuchar 模型表现出更好的抵抗能力.

致谢 数据与产品由 iGMAS 产品综合与服务中心、IGS 武汉大学数据中心、德国地学研究中心、欧洲定轨中心提供.

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突。

参考文献

- [1] WANG Zhaohui, MA Xiaping, YAN Li, *et al.* Accuracy assessment of BDS-3 broadcast ephemeris[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2021(1): 59-65 (王朝辉, 马下平, 严丽, 等. 北斗三号全球卫星导航系统的广播星历精度评估[J]. 测绘通报, 2021(1): 59-65)
- [2] National Beidou Navigation Satellite Standardization Technical Committee of the People's Republic of China. Terminology for Beidou Navigation Satellite System (BDS): GB/T 39267-2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020: 3 (全国北斗卫星导航标准化技术委员会. 北斗卫星导航术语: GB/T 39267-2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020: 3)
- [3] YANG Y X, MAO Y, SUN B J. Basic performance and future developments of Beidou global navigation satellite system[J]. *Satellite Navigation*, 2020, 1(1): 1
- [4] XU Yangyin, YANG Yuanxi, ZENG Anmin, *et al.* Accuracy assessment of signal in space of BDS-3 global system[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2020, 40(10): 1000-1006 (许扬胤, 杨元喜, 曾安敏, 等. 北斗三号全球系统空间信号精度评估分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(10): 1000-1006)
- [5] LIU Dongliang, CHENG Fang, SHEN Pengli, *et al.* Accuracy assessment of BDS-3 satellite signal-in-space[J]. *GNSS World of China*, 2022, 47(2): 114-125 (刘东亮, 成芳, 沈朋礼, 等. 北斗三号全球卫星导航系统空间信号精度评估[J]. 全球定位系统, 2022, 47(2): 114-125)
- [6] CAI Yulin, WU Tangting, FAN Yanan, *et al.* Evaluation of orbital accuracy for BDS GEO/IGSO/MEO satellite broadcast ephemeris[J]. *Jiangxi Science*, 2024, 42(5): 1027-1033 (蔡玉林, 吴汤婷, 范亚楠, 等. 北斗 GEO/IGSO/MEO 卫星广播星历的轨道精度评估[J]. 江西科学, 2024, 42(5): 1027-1033)
- [7] BAO Renjie, TANG Chengpan, HU Xiaogong, *et al.* Study on the accuracy evaluation of BeiDou broadcast ionospheric model[J/OL]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2023: 1-14[2023-12-07]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0588> (鲍任杰, 唐成盼, 胡小工, 等. 北斗广播电离层模型精度评估研究[J/OL]. 北京航空航天大学学报, 2023: 1-14[2023-12-07]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0588>)
- [8] ZHANG H F, LONG M L, YANG H F, *et al.* Overview of satellite laser ranging for BeiDou navigation satellite system[J]. *Aerospace China*, 2020, 21(4): 31-41
- [9] China Satellite Navigation Office (CSNO). BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document Open Service Signal B1I(version 3.0)[EB/OL]. (2019-02-27)[2019-12-20]. <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfzx/201902/P020190227593621142475.pdf> (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 B1I(3.0 版)[EB/OL]. (2019-02-27)[2019-12-20]. <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfzx/201902/P020190227593621142475.pdf>)
- [10] 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 (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)
- [11] YAO Wenhao. Estimation of Multi-Frequency Differential Code Bias of Beidou-3 Satellite and Ionospheric Forecast[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022 (姚文豪. 北斗三号卫星多频差分码偏差估计与电离层预报[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022)
- [12] LIU Lu, GUO Jinyun, ZHOU Maosheng, *et al.* Accuracy analysis of GNSS broadcast ephemeris orbit and clock offset[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(7): 1122-1132 (刘路, 郭金运, 周茂盛, 等. GNSS 广播星历轨道和钟差精度分析[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2022, 47(7): 1122-1132)
- [13] ZHANG Rou. Research on BDS/GNSS Signal-in-Space User Range Evaluation Method[D]. Wuhan: Wuhan University, 2019 (张柔. 北斗/GNSS 空间信号精度评估方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2019)
- [14] WANG Haichun. Accuracy Assessment and Analysis of GNSS Signal in Space[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020. DOI: 10.26976/d.cnki.gchau.2020.002089 (王海春. GNSS 空间信号精度评估分析[D]. 西安: 长安大学, 2020. DOI: 10.26976/d.cnki.gchau.2020.002089)
- [15] ZHANG Rou, HU Zhigang, TAO Jun, *et al.* BDS signal-in-space user range error evaluation considering different antenna phase center offset models[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(6): 806-813 (张柔, 胡志刚, 陶钧, 等. 顾及不同天线相位中心改正模型的北斗空间信号精度评估方法[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2019, 44(6): 806-813)
- [16] MONTENBRUCK O, STEIGENBERGER P, HAUSCHILD A. Broadcast versus precise ephemerides: a multi-GNSS perspective[J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(2): 321-333
- [17] JING Xin, CHE Tongyu, ZHOU Shuhan, *et al.* Comparative analysis of broadcast ephemeris accuracy before and after the opening of BDS-3 system[J]. *GNSS World of China*, 2022, 47(4): 23-30 (景鑫, 车通宇, 周舒涵, 等. 北斗三号系统开通前后广播星历精度对比分析[J]. 全球定位系统, 2022, 47(4): 23-30)
- [18] HAN Xihao, ZHENG Shuaiyong, YANG Jianlei, *et al.* Status and development of the ionospheric error correction techniques in satellite navigation[J]. *GNSS World of China*, 2024, 49(2): 111-126 (韩喜豪, 郑帅勇, 杨建雷, 等. 卫星导航中电离层误差校正技术现状与发展[J]. 全球定位系统, 2024, 49(2): 111-126)
- [19] XU Longxia, LI Xiaohui, HE Lei. Performance analysis of BDS single frequency ionosphere model[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2020, 40(3): 341-348 (许龙霞, 李孝辉, 何雷. 北斗三号电离层模型性能分析[J]. 空间科学学报, 2020, 40(3): 341-348)

- [20] GUO Rui, HUANG Zhangyu, SUN Rui, *et al.* Applicability analysis of BDGIM model of BDS-3 system[J]. *Hydrographic Surveying And Charting*, 2021, **41**(4): 61-64,73 (郭睿, 黄张裕, 孙瑞, 等. 北斗三号 BDGIM 模型的适用性分析[J]. *海洋测绘*, 2021, **41**(4): 61-64,73)
- [21] FENG Laiping, MAO Yue, SONG Xiaoyong, *et al.* Analysis of the accuracy of Beidou combined orbit determination enhanced by LEO and ISL[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, **45**(S2): 109-115 (冯来平, 毛悦, 宋小勇, 等. 低轨卫星与星间链路增强的北斗卫星联合定轨精度分析[J]. *测绘学报*, 2016, **45**(S2): 109-115)
- [22] MAO Yue, SONG Xiaoyong, ZHANG Qinghua, *et al.* Performance evaluation and comparison of on-orbit satellite clocks for BDS-3[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2023, **52**(3): 349-356 (毛悦, 宋小勇, 张清华, 等. BDS-3 卫星钟在轨性能评估与分析[J]. *测绘学报*, 2023, **52**(3): 349-356)
- [23] QIAN Wenjin, ZHANG Lin, AN Lichao, *et al.* Analysis of signal-in-space range error for BDS-3 broadcast ephemeris[J]. *Geomatics World*, 2022, **29**(3): 86-90 (钱文进, 张琳, 安丽超, 等. 北斗三号广播星历空间信号测距误差分析[J]. *地理信息世界*, 2022, **29**(3): 86-90)
- [24] YANG C, GUO J, GENG T, *et al.* Assessment and comparison of broadcast ionospheric models: NTCM-BC, BDGIM, and Klobuchar[J]. *Remote Sensing*, 2020, **12**(7): 1215
- [25] LI Yongtao, LI Jianwen, DAI Taogao, *et al.* Influence of solar activity on ionospheric TEC change[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2018, **38**(6): 847-854 (李涌涛, 李建文, 代桃高, 等. 太阳活动对电离层 TEC 变化影响分析[J]. *空间科学学报*, 2018, **38**(6): 847-854)
- [26] DING Yitao, GUO Meijun, FAN Shunxi, *et al.* Accuracy evaluation of broadcast ionosphere model[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2022, **10**(1): 53-63 (丁毅涛, 郭美军, 范顺西, 等. 广播电离层模型精度评估分析[J]. *导航定位学报*, 2022, **10**(1): 53-63)
- [27] 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 (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)

作者简介



郝鑫宇(第一作者) 男, 2001 年 2 月出生于河北省遵化市, 现为中国电子科技集团公司第十五研究所硕士研究生。
E-mail: 1009734093@qq.com



何倩倩(通信作者) 女, 1990 年 6 月出生于新疆维吾尔自治区奇台县, 现为中国电子科技集团公司第十五研究所高级工程师, 北京航空航天大学博士研究生。
E-mail: heqq.90629@qq.com