

引用格式: 赵淑洁, 赵当丽, 黄媛媛, 等. 基于 PPP-B2b 改正产品的北斗实时精密星历精度分析[J]. 时间频率学报, 2023, 46(2): 141-149.

# 基于 PPP-B2b 改正产品的北斗实时精密星历精度分析

赵淑洁<sup>1,2</sup>, 赵当丽<sup>1</sup>, 黄媛媛<sup>1,2</sup>, 纪元法<sup>3</sup>

(1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 桂林电子科技大学 广西精密导航技术与应用重点实验室, 桂林 541004)

**摘要:** 实时改正产品对于北斗实时精密定位和定时至关重要, 北斗三号通过 PPP-B2b 信号播发实时轨道和钟差改正产品。为了验证 PPP-B2b 改正产品恢复的实时精密轨道和钟差的精度, 利用接收机获取的 PPP-B2b 实时轨道和钟差改正产品对广播星历和广播钟差进行改正, 然后以 GFZ 最终产品作为参考, 分析评估了北斗三号 MEO (medium Earth orbit) 卫星和 IGS0 (inclined geosynchronous orbit) 卫星实时精密产品的精度。试验结果表明: BDS-3 卫星  $R$  方向实时轨道误差 RMS 值优于 0.121 5 m,  $T$  方向误差 RMS 值优于 0.292 2 m,  $N$  方向误差 RMS 值优于 0.360 5 m, 三维 RMS 值优于 0.640 2 m; BDS-3 卫星实时钟差误差 RMS 值优于 1.619 2 ns, STD 值优于 0.092 0 ns。结果表明: PPP-B2b 实时改正产品基本可满足 BDS-3 实时高精度定位和定时的需求。

**关键词:** 北斗三号全球卫星导航系统; 实时改正产品; 广播星历; 精密轨道和钟差产品

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2023-02-0141-09

## Assessment of BDS real-time precise ephemeris based on PPP-B2b correction products

ZHAO Shu-jie<sup>1,2</sup>, ZHAO Dang-li<sup>1</sup>, HUANG Yuan-yuan<sup>1,2</sup>, JI Yuan-fa<sup>3</sup>

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Guangxi Key Laboratory of Precision Navigation Technology and Application, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** Real-time correction products are very important for Beidou real-time precise positioning and timing. Beidou-3 broadcasts real-time orbit and clock correction products through PPP-B2b signals. In order to verify the accuracy of the real-time precise orbit and clock error recovered by the PPP-B2b correction product,

the broadcast ephemeris and broadcast clock error were corrected using the PPP-B2b real-time orbit and clock error correction product obtained by the receiver. The final GFZ product was then used as the reference. The analysis evaluates the accuracy of the real-time precision products of the Beidou-3 MEO and IGSO satellites. The test results showed that the RMS value of the real-time orbital error in the radial direction of the BDS-3 satellite is better than 0.121 5 m, the RMS value of the along-track direction error is better than 0.292 2 m, the RMS value of the cross-track direction error is better than 0.360 5 m, and the three-dimensional RMS value is better than 0.640 2 m. The RMS value of Beidou-3 satellite real-time clock error is better than 1.619 2 ns. The results verified that the PPP-B2b real-time correction product can basically meet the needs of the BDS-3 real-time high-precision positioning and timing.

**Key words:** Beidou-3 Navigation Satellite System (BDS-3); real-time correction products; broadcast ephemeris; precise orbit and clock products

## 0 引言

北斗三号全球卫星导航系统 (BeiDou-3 Navigation Satellite System, BDS-3) 于 2020 年 7 月 31 日正式开通, 空间星座由 3 颗地球静止轨道 (geosynchronous Earth orbit, GEO) 卫星、3 颗倾斜地球同步轨道 (inclined geosynchronous orbit, IGSO) 卫星和 24 颗中圆地球轨道 (medium Earth orbit, MEO) 卫星组成。其中, PPP-B2b 信号通过北斗三号 GEO 卫星播发实时改正产品, 提供恢复精密轨道和钟差需要的改正参数, 为我国及周边地区用户提供精密定位服务<sup>[1-3]</sup>。采用实时轨道和钟差改正产品对北斗广播星历进行改正, 能够恢复出实时精密轨道和钟差, 这对于实现北斗实时高精度定位和定时至关重要。

目前, 已有多位学者对实时改正产品进行了研究。文献[4]研究了基于国际 GNSS 服务组织 (International GNSS Service, IGS) 实时数据流的实时卫星轨道和钟差产品恢复算法, 并对恢复出的精密产品质量进行了评估; 文献[5]至[8]研究了基于 SSR (state space representation) 改正产品恢复出的实时精密轨道和钟差精度并进行了分析, 并以此为基础开展了实时精密单点定位试验; 文献[9]研究了北斗三号实时轨道改正产品的生成和恢复算法, 统计分析了状态空间表示信息在有效期内的精度损失; 文献[10]介绍了 B2b 信号的电文结构和信息类型, 并且分析了基于 B2b 信号的定位精度结果; 文献[11]评估了基于 PPP-B2b 信号的轨道及钟差精度, 分析了基于北斗三号 PPP-B2b 改正产品的 B1I+B3I、B1C+B2a 信号组合的定位精度、站心坐标系下方向的收敛情况; 文献[12]采用不同测站的观测数据, 分析了基于 PPP-B2b 改正产品的静态和动态精密单点定位精度。同时, 北斗广播星历对导航定位有重要作用, 多位学者对北斗广播星历的精度也进行了分析评估。文献[13]分析了北斗二号 (BDS-2) 广播星历的轨道误差, 结果显示 GEO 卫星径向 RMS (root mean square) 优于 2 m, MEO 和 IGSO 卫星径向 RMS 一般优于 0.5 m, 三维 RMS 均优于 5 m, 轨道精度与 GPS 相当; 文献[14]针对 BDS-2 的 GEO、MEO 与 IGSO 三类卫星, 分别评估了其广播轨道精度, 结果表明 BDS-2 卫星广播轨道精度优于 3 m, MEO、IGSO 卫星轨道误差小于 GEO 卫星。文献[15]对 BDS-3 广播星历精度进行了评估, 结果表明 BDS-3 的轨道误差 RMS 基本优于 1.0 m, 其中径向精度高于切向和法向, 轨道精度均优于同类型 BDS-2 卫星。

为了分析评估利用 PPP-B2b 改正产品恢复出的 BDS-3 实时精密轨道和钟差的精度, 本文首先利用比利时 Septentrio PoloRax5TR 型接收机获取 BDS-3 广播星历和 PPP-B2b 改正产品, 然后利用改正算法对广播轨道和钟差进行改正, 恢复得到实时精密轨道及钟差产品。然后, 以德国波茨坦地学研究中心 (Helmholtz-Centre Potsdam-German Research Center for Geosciences, GFZ) 提供的精密轨道和钟差产品

(事后最终产品)作为参考,对恢复出的 BDS-3 实时精密产品精度进行评估,分析实时轨道和钟差的误差。

## 1 BDS-3 实时精密轨道和钟差恢复

为了利用 PPP-B2b 实时改正产品恢复出 BDS-3 实时精密轨道和钟差,首先需要采用测站接收机获取 BDS-3 广播星历和编码的 PPP-B2b 改正产品,然后计算 BDS-3 卫星广播轨道和广播钟差,并对改正产品进行解码,最后采用实时改正算法对广播轨道和广播钟差分别进行改正。对 BDS-3 广播轨道和钟差进行改正时,首先需要利用广播星历中的 18 个星历参数分别计算 BDS-3 MEO 和 IGSO 卫星在北斗坐标系(BeiDou Coordinate System, BDCS)中的实时位置和速度。由于 BDS-3 和 GFZ 精密产品的系统时间、坐标系均不相同,在对数据进行处理时,需要统一时空基准。

### 1.1 时空基准的统一

对参考时间的统一,由于 BDS-3 广播星历基于北斗时(BeiDou time, BDT),GFZ 最终产品则基于 GPS 系统时间(Global Positioning System time, GPST),BDT 和 GPST 相差 14 s,本文将参考时间统一到 GPST,具体转换公式如式(1)所示:

$$\begin{cases} t_w^B = t_w^G - 1356 \\ t_s^B = t_s^G - 14 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: $t_w^B$ 、 $t_w^G$ 分别为 BDS 周和 GPS 周; $t_s^B$ 、 $t_s^G$ 分别为 BDS 周内秒和 GPS 周内秒。同时,由于广播星历和精密星历基准钟不同,存在系统误差。评估 BDS-3 卫星实时钟差时,以所有 BDS-3 卫星钟差的平均值作为参考基准,将单个卫星的实时钟差与基准钟差作一次差,消除系统误差后,再与 GFZ 最终精密钟差作二次差<sup>[6]</sup>。

北斗广播星历采用的坐标系统为 BDCS 坐标系,GFZ 发布的精密星历采用 IGS14 坐标参考系,坐标框架之间的差异对于广播轨道误差的影响很小,本文暂不考虑这两种坐标框架不同导致的误差。轨道误差通常在轨道坐标系下描述,因此需要将实时精密轨道和精密星历的差值转换到径向、切向、法向 3 个方向。如图 1 为轨道坐标系示意图。

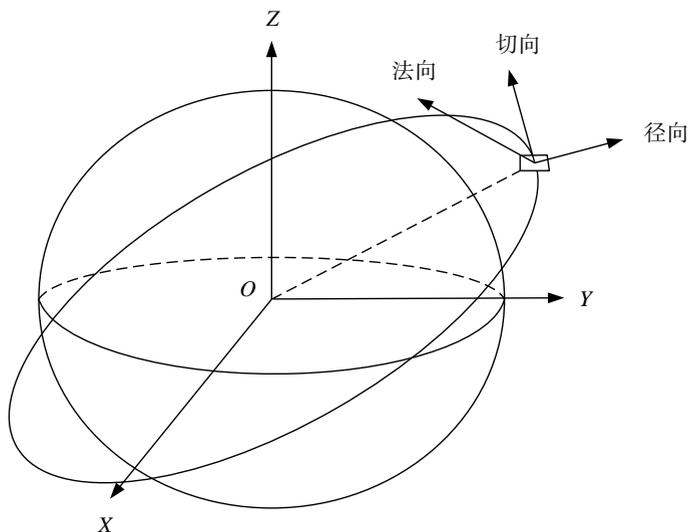


图1 轨道坐标系示意图

## 1.2 计算卫星位置和速度

BDS-3 广播星历通过卫星实时播发, 其中包含卫星的星历参数、钟差参数等电文信息, 并且北斗广播星历参数类型与 GPS 相同, 根据 CNAV1 导航电文的 ICD 文件<sup>[17]</sup>所提供的计算方法, 可以得到任意时刻卫星在 BDCS 坐标系下的实时位置。在卫星位置计算方法的基础上对时间求导即可得到卫星的速度<sup>[18]</sup>。

北斗二号系统采用 16 参数广播星历模型, 而北斗三号系统在全球新体制信号上采用了 18 参数广播星历模型。18 参数广播星历模型增加了长半轴变化率  $\dot{A}$  和卫星平均角速度与计算值之差的变化率  $\Delta\dot{n}_0$ , 优化了长半轴和卫星平均角速度的计算方法, 更加符合卫星的运动规律<sup>[19]</sup>。以 C12、C25 卫星为例, 图 2 显示了利用广播星历模型计算得到的 MEO 卫星位置。

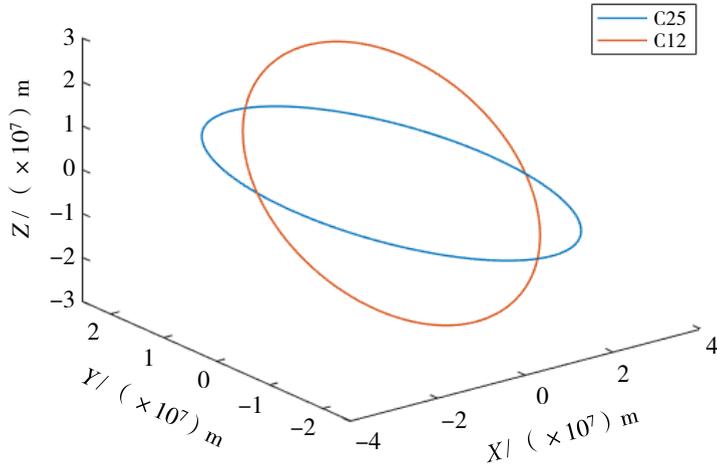


图 2 MEO 卫星 C12、C25 轨道图

## 1.3 实时轨道和钟差改正方法

利用 PPP-B2b 改正产品对北斗广播星历计算的卫星位置和卫星钟差进行改正。改正时, 需要将广播星历中包含的星历数据龄期 (issue of data, IOD) 与轨道改正信息中的 IODN 相匹配。接下来介绍利用 PPP-B2b 改正产品对卫星轨道和钟差进行改正的方法。

### 1.3.1 实时轨道改正

实时轨道改正参数包括卫星轨道坐标系下轨道改正向量  $\delta\mathbf{O}$  在径向、切向和法向的分量。通过卫星位置改正的计算方法式 (2) 结合广播星历计算出的卫星位置及速度, 可以得到卫星位置改正向量  $\delta\mathbf{X}$ 。

$$\begin{cases} \mathbf{e}_{\text{rad}} = \frac{\mathbf{X}_{\text{broc}}}{|\mathbf{X}_{\text{broc}}|} \\ \mathbf{e}_{\text{cro}} = \frac{\mathbf{X}_{\text{broc}} \times \mathbf{V}_{\text{broc}}}{|\mathbf{X}_{\text{broc}} \times \mathbf{V}_{\text{broc}}|} \\ \mathbf{e}_{\text{alo}} = \mathbf{e}_{\text{cro}} \times \mathbf{e}_{\text{rad}} \\ \delta\mathbf{X} = [\mathbf{e}_{\text{rad}} \quad \mathbf{e}_{\text{alo}} \quad \mathbf{e}_{\text{cro}}] \cdot \delta\mathbf{O} \end{cases} \quad (2)$$

式 (2) 中:  $\mathbf{V}_{\text{broc}}$  为广播星历计算得到的卫星速度向量;  $\mathbf{e}_i$  为方向单位向量;  $i = \{\text{rad}, \text{alo}, \text{cro}\}$  分别对应径向、切向、法向;  $\delta\mathbf{O}$  为 PPP-B2b 信息中获得的轨道改正向量。

利用公式 (3) 即可对广播星历计算得到的卫星位置  $\mathbf{X}_{\text{broc}}$  进行改正, 得到改正后的卫星位置  $\mathbf{X}_{\text{orb}}$ 。

$$\mathbf{X}_{\text{orb}} = \mathbf{X}_{\text{broc}} - \delta \mathbf{X}。 \quad (3)$$

### 1.3.2 实时钟差改正

钟差改正电文解算得到的参数是相对于广播星历钟差的改正参数。实时钟差改正方法如式 (4) 所示:

$$t_{\text{sat}} = t_{\text{broc}} - \frac{C_0}{c}。 \quad (4)$$

式 (4) 中:  $t_{\text{sat}}$  为改正得到的卫星钟差;  $t_{\text{broc}}$  为广播星历计算得到的卫星钟差;  $c$  为光速;  $C_0$  为 PPP-B2b 电文中获得的钟差改正参数。

## 2 实时轨道和钟差产品精度分析

本文采用接收机实际接收的 BDS-3 广播星历数据和 PPP-B2b 改正产品, 进行实时精密轨道和钟差改正, 并以 IGS 分析中心 GFZ 提供的 5 min 采样间隔的事后精密轨道及钟差产品作为参考值。将实时精密产品与事后最终产品做差, 得出实时精密轨道在径向 ( $R$  方向)、切向 ( $T$  方向) 和法向 ( $N$  方向) 的误差以及实时钟差误差, 以误差的平均值和均方根差 (root mean square, RMS) 为统计指标进行统计分析, 最终给出实时轨道和钟差产品的精度评估结果, 流程如图 3 所示。

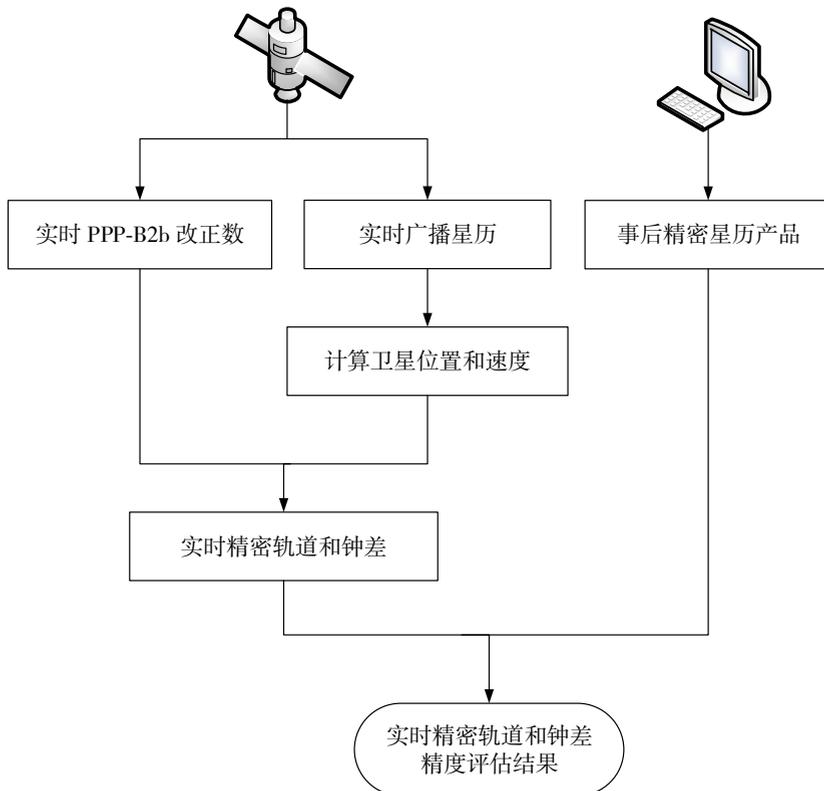


图 3 实时精密星历精度评估流程

PPP-B2b 信号改正产品中, 轨道改正数的历元时间间隔为 48 s, 钟差改正数的历元时间间隔为 6 s。本文解码获取的 PPP-B2b 改正产品并不连续, 部分历元的改正数为空值, 如图 4 为解码得到的 2021 年 10 月 8 日的 PPP-B2b 轨道改正数 1 天统计图, 图 5 为钟差改正数 1 天统计图。其中部分相邻历元的改

正数相同, 当轨道改正数和钟差改正数的版本号不同时, 其值会呈现小幅度的跳变。轨道改正数在  $-0.1 \sim 0.2$  m 的范围内变化, 钟差改正参数在  $1 \sim 2$  ns 的范围内变化, 其变化范围与 PPP-B2b 信号接口控制文件<sup>[3]</sup>中提供的改正数范围吻合, 能够用于恢复实时广播轨道和广播钟差。

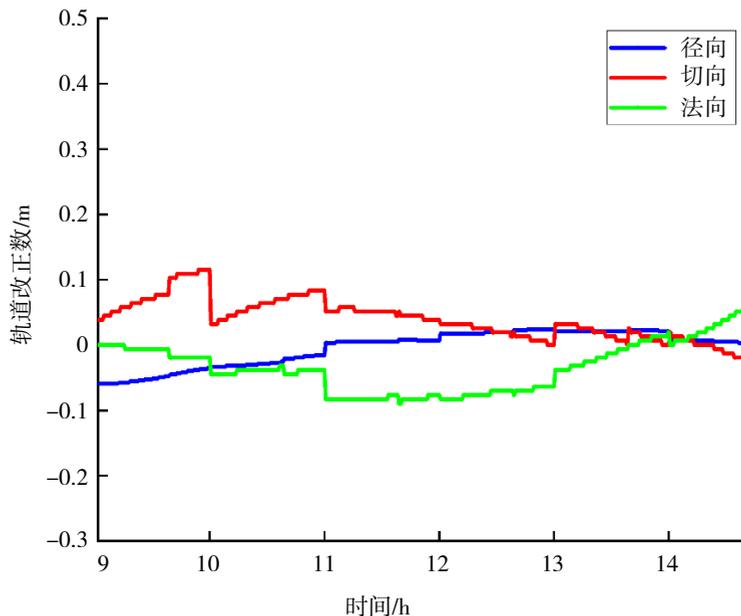


图 4 轨道改正数 1 天统计

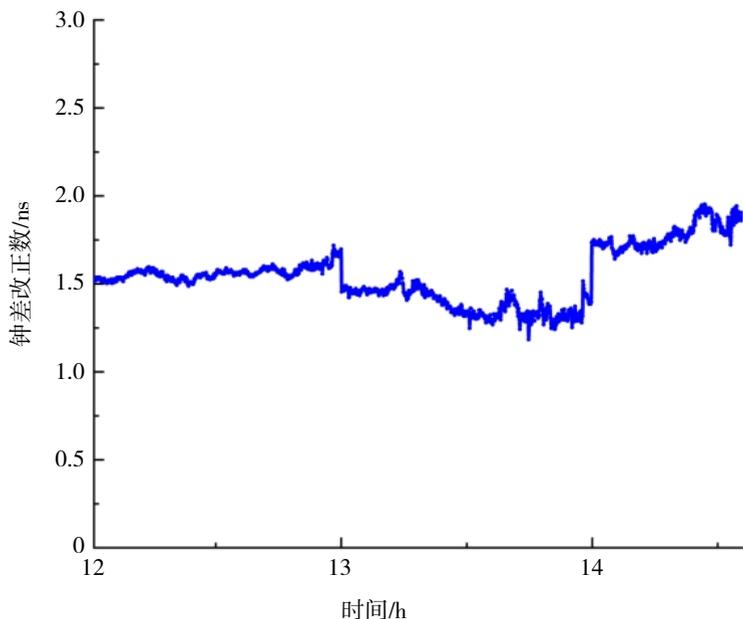


图 5 钟差改正数 1 天统计

GFZ 提供的最终精密星历产品的时间间隔为 5 min, 最终精密钟差产品的时间间隔为 30 s。本文恢复的实时精密产品的历元时间间隔与改正产品相同, 评估精度时只比较事后最终产品给定历元的卫星位置和钟差。

现选取 2021 年年积日 278 ~ 293 (共 15 天) 的 BDS-3 广播星历和 PPP-B2b 改正产品, 得出实时精密轨道和钟差产品, 以 GFZ 事后最终轨道和钟差产品为基准, 分析评估实时精密轨道和钟差产品的精

度，并给出 MEO 卫星 C26 和 IGSO 卫星 C39 在 2021 年年积日 278~282（共 5 天）的轨道和钟差误差 RMS 统计结果，如图 6 至 8 所示。

由图 6、图 7 可以看出，实时精密轨道产品的精度 RMS 值在 0.05~0.5 m 的范围内波动；MEO 卫星和 IGSO 卫星的轨道精度相当，没有表现出明显差异。其中，MEO 卫星 C26 轨道精度整体优于 0.395 6 m，IGSO 卫星 C39 轨道精度整体优于 0.443 2 m。在同种轨道下，不同方向也表现出不同的变化特性。卫星轨道径向精度总体优于切向和法向，主要是由于卫星观测过程对径向距离变化敏感度较高；IGSO 卫星和 MEO 卫星径向精度最高，其次为切向和法向，其中径向精度在 0.118 9 m 以内，切向精度在 0.361 5 m 以内，法向精度在 0.443 2 m 以内。

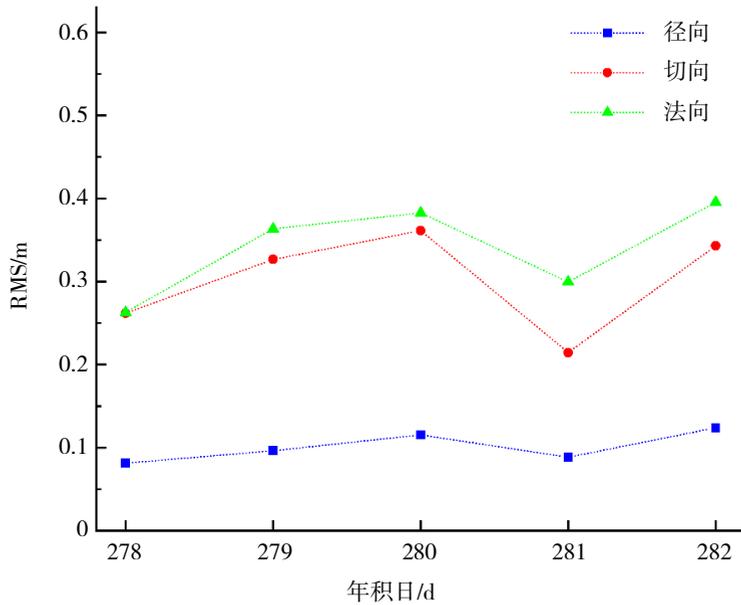


图 6 MEO C26 卫星轨道精度 5 天统计

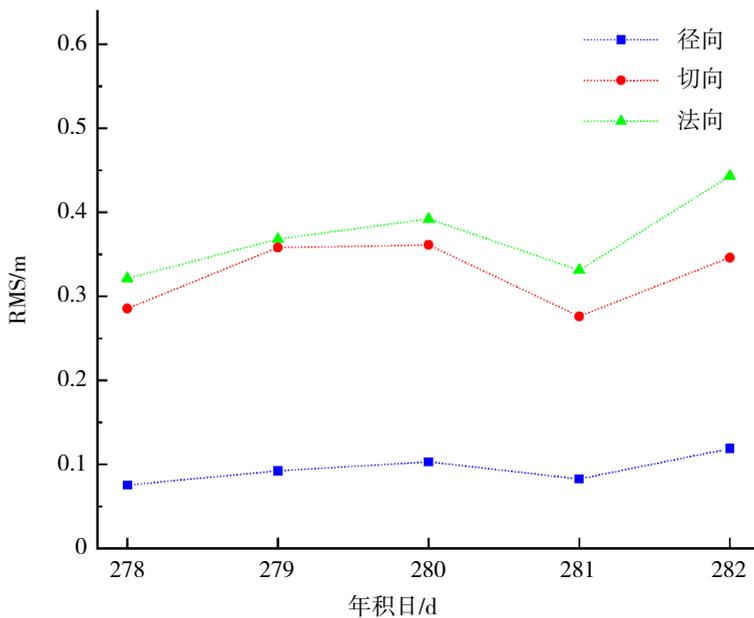


图 7 IGSO C39 卫星轨道精度 5 天统计

由图 8 可以看出,不同轨道类型与钟差残差变化没有明显相关性,并且不具备周期规律,实时钟差精度在 3 ns 以内波动;其中 MEO 卫星 C26 钟差误差 RMS 值优于 2.317 3 ns,IGSO 卫星 C39 钟差误差 RMS 值优于 1.963 1 ns。

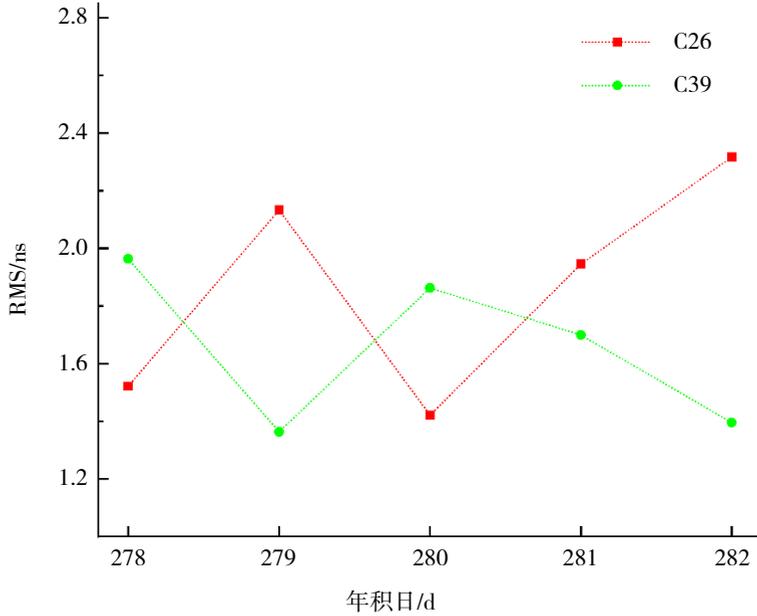


图 8 MEO、IGSO 卫星的钟差精度 5 天统计

为了进一步评估较长时间实时精密轨道和钟差的精度,表 1 给出了连续 15 天内两种卫星的实时精密轨道在  $R$ 、 $T$ 、 $N$  方向误差的均值和 RMS 值、卫星轨道三维 RMS 值以及钟差误差的 RMS 值和 STD 值。

表 1 BDS 实时精密轨道和钟差精度 15 天统计表

卫星号	轨道	径向误差		切向误差		法向误差		三维 RMS/m	钟差 RMS/ns	钟差 STD/ns
		均值/m	RMS/m	均值/m	RMS/m	均值/m	RMS/m			
C26	MEO	0.084 7	0.109 3	0.056 2	0.277 5	0.061 9	0.322 1	0.572 6	1.619 2	0.085 1
C39	IGSO	0.091 6	0.121 5	0.037 6	0.292 2	0.079 1	0.360 5	0.640 2	1.528 9	0.092 0

由表 1 可以看出,实时精密轨道  $R$  方向轨道误差均值优于 0.091 6 m,  $T$  方向轨道误差均值优于 0.056 2 m,  $N$  方向轨道误差均值优于 0.079 1 m; 3 个方向 RMS 值在 0.360 5 m 以内,  $R$  方向 RMS 值优于 0.121 5 m, 精度整体优于  $T$  方向和  $N$  方向,与图中结果一致。在卫星导航定位时,径向对定位精度的影响最大,切向和法向次之。MEO 卫星 3 个方向的轨道精度 RMS 值在 0.322 1 m 以内,其中径向精度最高为 0.109 3 m,三维 RMS 值为 0.572 6 m; IGSO 卫星 3 个方向的轨道精度 RMS 值在 0.360 5 m 以内,其中径向精度最高为 0.121 5 m,三维 RMS 值为 0.640 2 m。并且, MEO 卫星实时钟差误差 RMS 值为 1.6192 ns, STD 值为 0.085 1 ns; IGSO 卫星实时钟差误差 RMS 值为 1.5289 ns, STD 值为 0.092 0 ns。可以看出,15 天的实时精密轨道和钟差精度与 5 天的统计结果基本吻合,没有出现明显的精度差异。

### 3 结语

本文基于 PPP-B2b 信号的实时轨道和钟差改正产品, 对实时广播星历进行轨道和钟差修正, 得到实时精密产品, 然后计算与事后精密星历的差值, 得出实时精密轨道在  $R$ 、 $T$ 、 $N$  方向的卫星轨道误差以及实时钟差误差, 统计了 2021 年年积日 278~293 (共 15 天) 的北斗 IGSO 卫星和 MEO 卫星数据并进行分析, 结果显示: 实时精密轨道  $R$  方向误差的 RMS 值优于 0.121 5 m,  $T$  方向误差的 RMS 值优于 0.292 2 m,  $N$  方向误差的 RMS 值优于 0.360 5 m, 三维 RMS 值优于 0.640 2 m; 钟差误差 RMS 值优于 1.619 2 ns, STD 值优于 0.092 0 ns。结果表明, 利用 PPP-B2b 改正产品对 BDS-3 广播星历进行修正后, 能够为用户提供实时高精度定位和定时服务。

### 参考文献:

- [1] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统应用服务体系[Z]. 1.0 版. 2019.
- [2] 贺延伟, 贾小林, 刘家龙, 等. BDS-3 与 BDS-2 基本服务性能对比分析[J]. 导航定位学报, 2022, 10(1): 20-28.
- [3] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗系统空间信号接口控制文件 PPP-B2b[Z]. 1.0 版. 2020.
- [4] 王胜利, 王庆, 高旺, 等. IGS 实时产品质量分析及其在实时精密单点定位中的应用[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(S2): 365-369.
- [5] 刘志强, 王解先. 广播星历 SSR 改正的实时精密单点定位及精度分析[J]. 测绘科学, 2014, 39(1): 15-19+109.
- [6] 赖允斌, 赵春梅, 李子申. 不同星历下实时精密单点定位精度分析[J]. 测绘通报, 2015(8): 9-12.
- [7] 夏风雨, 叶世榕, 赵乐文, 等. 基于 SSR 改正的实时精密单点定位精度分析[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(3): 52-57.
- [8] 赵爽, 杨力, 郜尧. 基于 SSR 信息的 GPS 实时精密单点定位性能分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(9): 952-955.
- [9] 王乐, 解世超, 黄观文, 等. 北斗三号实时轨道改正数生成及服务性能分析[J]. 测绘地理信息, 2020, 45(4): 51-56.
- [10] 何旭蕾, 刘成, 陈颖, 等. 北斗三号卫星 B2b 信号解析[J]. 电子技术应用, 2020, 46(3): 1-4+13.
- [11] 宋伟伟, 赵新科, 楼益栋, 等. 北斗三号 PPP-B2b 服务性能评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(3): 1-11.
- [12] 黄伦文, 孟宪伟. 基于北斗 3 号 PPP-B2b 信号的精密单点定位精度分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2021, 41(5): 516-519.
- [13] 郭忠臣, 高井祥, 曹新运. 北斗广播星历轨道及钟差精度分析[J]. 煤炭技术, 2015, 34(7): 113-116.
- [14] 张晓旭, 陈国通, 张璞, 等. 基于 iGMAS 的 BDS 卫星广播轨道精度分析[J]. 无线电工程, 2018, 48(10): 827-830.
- [15] 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+98.
- [16] HUANG G, CUI B B, ZHANG Q, et al. An improved predicted model for BDS ultra-rapid satellite clock offsets[J]. Remote Sensing, 2018, 10(1): 60.
- [17] 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[Z]. 2.1 版. 2016.
- [18] 党亚民, 秘金钟, 成英燕. 全球导航卫星系统原理与应用[M]. 北京: 测绘出版社, 2007.
- [19] 辛洁, 陈茜, 郭睿, 等. 北斗三号与北斗二号基本导航电文参数比较[J]. 测绘科学, 2020, 45(4): 32-38.