

北斗 PPP-B2b 与 CNES 实时产品性能的比较与评估

姬生月*, 郑千里, 王振杰, 贺凯飞

(中国石油大学(华东)海洋与空间信息学院, 山东 青岛 266580)

摘要:为分析 PPP-B2b 的实际服务性能,采用为期 30 d 的 PPP-B2b 数据与国际全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)服务组织测站数据以及 2021 年 12 月 16 日的海上船载动态数据,进行了轨道与钟差的精度评估、实时精密单点定位(precise point positioning, PPP)的定位性能测试,并与采用法国国家太空中心(centre national d'etudes spatiales, CNES)存档产品 CNT 的相应结果进行比较。结果表明:PPP-B2b 服务的北斗三号系统(BeiDou navigation satellite system phase III, BDS-3)与全球定位系统(global positioning system, GPS)轨道的径向精度分别为 0.07 m、0.089 m,低于 CNT 0.041 m 和 0.025 m。而 BDS-3 的钟差精度为 0.029 m,与 GPS 钟差精度接近,优于 CNES BDS-3 的钟差精度 0.057 m。基于 PPP-B2b 服务的静态定位测试中,BDS-3 和 BDS-3 + GPS 平均收敛时间小于 20 min,优于单 GPS 系统,且收敛后精度更高。而在动态测试中,BDS-3 和 BDS-3 + GPS 组合东北天(north, east and up, NEU)方向均方根(root mean square, RMS)均优于 11 cm,单 GPS 优于 26 cm。在海上实际测试中,PPP-B2b 的 BDS-3 + GPS 组合 NEU 方向 RMS 分别为 0.028 m、0.074 m、0.081 m,收敛时间为 12.4 min。

关键词:PPP-B2b 服务;法国国家太空中心实时产品;实时精密单点定位;北斗三号系统

中图分类号:P228 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2024)06-113-10



论文
拓展

Comparison and evaluation of BeiDou PPP-B2b and CNES real-time products' performance

Ji Shengyue*, Zheng Qianli, Wang Zhenjie, He Kaifei

(College of Oceanography and Space Informatics, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: For analyzing PPP-B2b actual service performance, PPP-B2b data and International GNSS (global navigation satellite system) service data for a period of 30 days as well as offshore shipborne dynamic data on 16 December 2021 were used for evaluating orbit and clock offset accuracy and testing real-time PPP (precise point positioning) positioning performance. And compared with the corresponding results of CNT—archived products of CNES (centre national d'etudes spatiales, CNES). Results show that the radial accuracy of BDS-3 (BeiDou navigation satellite system phase III) and GPS (global positioning system) track of PPP-B2b service are 0.07 m and 0.089 m respectively, which are below CNT 0.041 m and 0.025 m. The clock offset accuracy of BDS-3 is 0.029 m, close to GPS clock offset, better than 0.057 m of CNES product accuracy. In the static positioning test based on PPP-B2b, BDS and BDS-3 + GPS average convergence time is less than 20 minutes, better than that of GPS, and the convergence accuracy is higher than GPS. In the dynamic test, the RMS value of BDS-3 and BDS-3 + GPS in the NEU (north, east and up) directions are better than 11 cm, GPS is better than 26 cm. In offshore positioning testing, the RMS value of BDS-3 + GPS of PPP-B2b in the NEU directions are 0.028 m, 0.074 m, 0.081 m, and the convergence time is 12.4 min.

Keywords: PPP-B2b service; CNES real-time product; real-time precise point positioning; BeiDou navigation satellite system phase III

2020 年 7 月 31 日,北斗三号系统正式开通服务,相较于北斗二号系统,北斗三号系统进一步提升性能^[1],扩展功能^[2],播发 5 个公开服务信

号用于提供服务^[3]。其中,北斗三号系统以 3 颗同步地球轨道卫星,通过 PPP-B2b 信号播发实时改正信息,实现在中国及周边地区的实时精密单

收稿日期:2022-07-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42074028);山东省自然科学基金资助项目(ZR2020MD042);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(18CX02064A)

*第一作者:姬生月(1974—),男,山东聊城人,副教授,博士,硕士生导师,E-mail:jidifferent@gmail.com

引用格式:姬生月,郑千里,王振杰,等.北斗 PPP-B2b 与 CNES 实时产品性能的比较与评估[J].国防科技大学学报,2024,46(6):113-122.

Citation:JI S Y, ZHENG Q L, WANG Z J, et al. Comparison and evaluation of BeiDou PPP-B2b and CNES real-time products' performance [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2024, 46(6): 113-122.

点定位^[4],标志着全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)的又一次重大突破,相较于国际 GNSS 服务组织(international GNSS service, IGS)的实时产品^[5-8], PPP-B2b 应用范围大大拓展。

PPP-B2b 信号相较于基于网络链路播发的 IGS 实时流数据,在服务范围与抗干扰方面更具优势。当前国内外学者对于 PPP-B2b 信号进行了初步的研究,如 Yang 等^[9]研究结果表明,以 PPP-B2b 水平方向达到 0.3 m,垂直方向达到 0.5 m 为收敛标准时,所需要的收敛时间通常小于 30 min,但总体精度逊色于 IGS 实时产品;Ren 等^[10]基于 PPP-B2b 数据进行评估,其轨道精度在径向、法向、切向三个方向分别在 0.07 m、0.3 m、0.3 m 左右,钟差的标准差(standard deviation, STD)误差值为 BDS-3 小于 0.18 ns、GPS 低于 0.15 ns;Nie 等^[11]基于 PPP-B2b 数据进行定位精度评估,得到了 PPP-B2b 静态精度的均方根误差(root mean square, RMS)在东北天(north, east and up, NEU)方向分别为 2.4 cm、1.6 cm、2.3 cm,动态精度的均方根(root mean square, RMS)误差分别为 8.1 cm、3.6 cm、8.0 cm。但目前的研究,多以短期为主(3~7 d),而对 PPP-B2b 中长期的定位性能研究较少;Xu 等^[12]基于 PPP-B2b 进行北斗双频组合 B1C/B2a 和 B1I/B3I 实时定位,其定位精度能够达到水平方向 11 cm,垂直方向 17 cm。同时也有部分学者^[13]将 PPP-B2b 产品与法国国家太空中心(centre national d'etudes spatiales, CNES)(以下简称为 CNT)产品进行比较,但北斗卫星部分只使用了 BDS-3。

本文以德国地学研究中心(helmholtz-centre potsdam-German research centre for geosciences, GFZ)的最终精密星历(GBM 产品)为参考,将 2021 年 7 月 6 日至 8 月 4 日共 30 d PPP-B2b 产品的轨道与钟差精度以及 CNT 的轨道与钟差精度,进行评估和比较;然后利用 IGS 测站数据,以 CNT 为对比,利用 30 d 的实测数据对基于 PPP-B2b 信号的精密单点定位(precise point positioning, PPP)服务性能进行了测试和精度分析。考虑到在实际应用中, CNT 还可以接收 BDS-2 的卫星, CNT 的 PPP 将使用所有其能接收到的北斗卫星,而非仅使用 BDS-3。

1 实时精密星历与钟差

1.1 卫星精密轨道改正

北斗三号系统能够通过 PPP-B2b 信号播发状态空间表示(state space representation, SSR)方法的改正信息,因此可以实现实时 PPP。在使用者接收 PPP-B2b 信号后,根据中国卫星导航系统管理办公室提供的接口控制文件解码后,即可得到实时的 SSR 信息^[14]。然后,将广播星历利用 SSR 信息改正,就能够提高轨道和钟差的精度。其中,在计算实时精密产品时, GPS 系统卫星使用 LNAV1 广播星历,而北斗三号系统卫星则采用 CNAV1 广播星历。SSR 信息改正广播星历公式如下^[15-16]。

首先根据改正信息计算 t 时刻卫星位置改正向量 δ :

$$\delta = \begin{bmatrix} \delta_r \\ \delta_a \\ \delta_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_r \\ d_a \\ d_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_r \\ v_a \\ v_c \end{bmatrix} (t - t_0) \quad (1)$$

其中, d_r 、 d_a 、 d_c 均为 t_0 时刻卫星位置改正向量, v_r 、 v_a 、 v_c 为 t_0 时刻卫星速度改正向量。而由广播星历可以算得 t 时刻卫星位置向量 r , 卫星速度向量 v 。则可以将改正向量 δ 从卫星轨道坐标系转换到地心地固坐标系,得到 δ_{xyz} :

$$e_a = \frac{v}{|v|} \cdot e_c = \frac{r \times v}{|r \times v|} \cdot e_r = e_a \times e_c \quad (2)$$

$$\delta_{xyz} = [e_r \quad e_a \quad e_c] \cdot \delta \quad (3)$$

其中, $[e_r \quad e_a \quad e_c]$ 为转换矩阵。最后如式(4)所示,可得到 t 时刻改正后的卫星位置向量,即

$$r_{SSR} = r + \delta_{xyz} \quad (4)$$

另外, PPP-B2b 提供的改正信息的参考中心为卫星相位中心,而 CNT 产品和 GBM 产品则为卫星质心。因此, PPP-B2b 轨道还需要进行卫星天线相位偏差(phase center offset, PCO)改正,转为卫星质心^[11],即:

$$r_{APC} = r_{CoM} + A \cdot dr_{pco} \quad (5)$$

其中, r_{APC} 为天线相位中心位置矢量, r_{CoM} 为卫星质心的位置矢量, A 为卫星姿态矩阵, dr_{pco} 为卫星天线相位的偏差矢量。

1.2 卫星精密钟差改正

PPP-B2b 提供的卫星钟差改正是相对于广播星历卫星钟差参数的改正参数,可通过下式获得改正后的卫星钟差^[14-15]:

$$t_{sat} = t_{brdc} - \frac{C_0}{c} \quad (6)$$

式中, c 是光速, t_{sat} 是改正后的卫星钟差参数, t_{brdc} 是广播星历卫星钟差参数, C_0 是 PPP-B2b 提供的钟差改正数。

2 实时精密星历精度评估

2.1 评估方法

对于精密轨道产品, 将 PPP-B2b 产品和 CNES CNT 产品分别与 GFZ 的 GBM 产品比较, 然后将比较的结果转换到轨道坐标系上, 用径向 (radial)、切向 (along)、法向 (cross) 表示。

对于精密钟差产品, 与轨道相比, 由于硬件延迟和 GNSS 特定的时间尺度的不同, 两种不同类型的精密钟差产品不能直接对比。考虑到硬件延迟是卫星跟踪模式的不同造成的, 因此, 需要使用相应的差分码偏差校正 (differential code bias, DCB), 其修正算法见下式^[9,11]:

$$\tilde{l}_{\text{sig}} = l_{\text{sig}} - \text{DCB}_{\text{sig}} \quad (7)$$

其中, \tilde{l}_{sig} 为信号修正后的观测值, l_{sig} 为接收机获得的观测值, DCB_{sig} 为对应信号的码间偏差。同时, 由于基准钟的不同, 一个星座的所有卫星会存在一个系统偏差, 因此通常采用双差法来减小这一误差。双差法就是通过选择一颗参考卫星或同一个星座中卫星的平均值来纠正每个历元计算出的误差^[13]:

$$\begin{aligned} \nabla \Delta C_{a,b}^s &= (C_a^s - \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M C_a^i) - (C_b^s - \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M C_b^i) \\ &= (C_a^s - C_b^s) - \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (C_a^i - C_b^i) \end{aligned} \quad (8)$$

其中: $\nabla \Delta C_{a,b}^s$ 为双差值; $C_a^s - C_b^s$ 为卫星 s 的精密产品 a 与精密产品 b 的单差值, 文中 a 为 PPP-B2b 或 CNT, b 为最终精密星历 GBM 产品; $\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M C_a^i$ 、 $\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M C_b^i$ 分别为 a 、 b 产品当前历元卫星的平均值, M 为当前历元卫星数。另外, PPP-B2b 只能提供中国及周边区域内的卫星, 而卫星相对于区域 GNSS 网上升或下降会使得卫星的双差值不连续。因此, 在评估钟差时, 还采用了文献[13]的方法对双差值进行平滑。

此外, 式(9)、式(10)分别为 RMS 和 STD 的计算公式, 其中 N 为历元数, X_i 为某一历元数据, μ 为平均值。分别计算每天的 RMS 和 STD, 并求两者 30 d 的平均值, 即为平均 RMS 和 STD。

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N X_i^2}{N}} \quad (9)$$

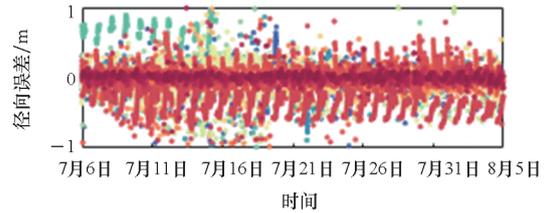
$$\text{STD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^2}{N}} \quad (10)$$

对于钟差 RMS 和 STD 来说, 钟差 RMS 的大小与两个星历的绝对偏差大小有直接关系, 这个绝对偏差与它们时间参考基准的不同有关, 而且这个绝对偏差在定位的时候会与模糊度融合到一起, 不影响定位精度, 因此, 钟差中影响最后定位结果的收敛精度是钟差的 STD。

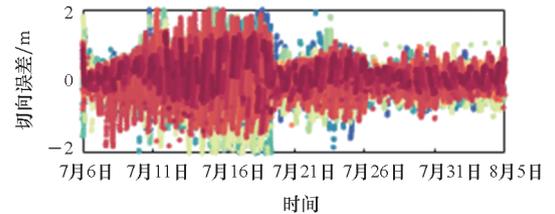
2.2 分析结果

为了对 PPP-B2b 长时期内的精度进行评估, 本文收集了 2021 年 7 月 6 日至 8 月 4 日共计 30 d PPP-B2b 信息并计算出相应的实时精密产品。

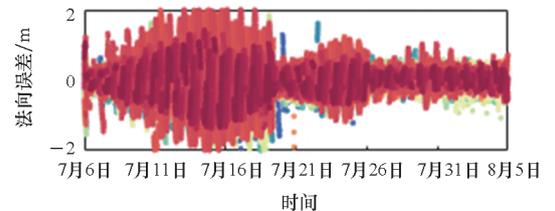
其时间序列如图 1(a)~(d)所示, 可以发现 PPP-B2b 产品的径向误差要优于切向和法向误差, 此外, 径向误差以及钟差波动呈现一定的规律性。另外, 以 2021 年 7 月 6 日 (年积日 187) 为例展示平滑前后结果, 如图 1(e)~(f)所示。可以看出, 平滑后的钟差序列被分割为许多小弧段, 分别计算同一卫星每条弧段的平均 RMS 和 STD, 然后求平均即为当天该卫星钟差平均 RMS 和 STD。



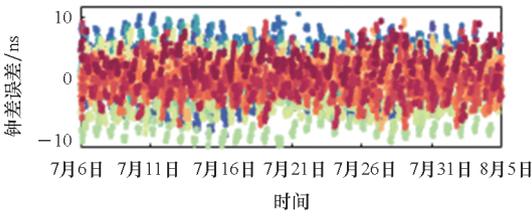
(a) 径向误差
(a) Radial error



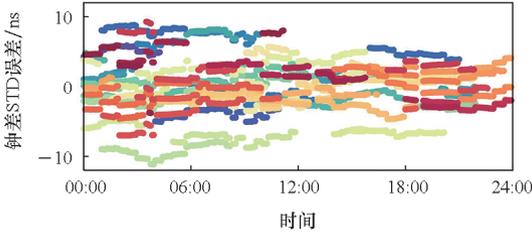
(b) 切向误差
(b) Along error



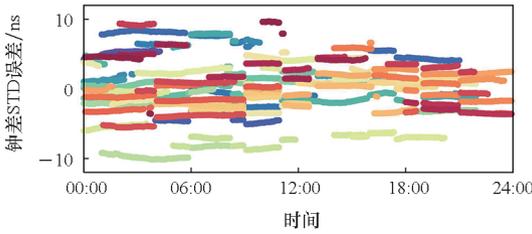
(c) 法向误差
(c) Cross error



(d) 钟差误差
(d) Clock offset error



(e) 钟差平滑前结果
(e) Clock offset before smoothing



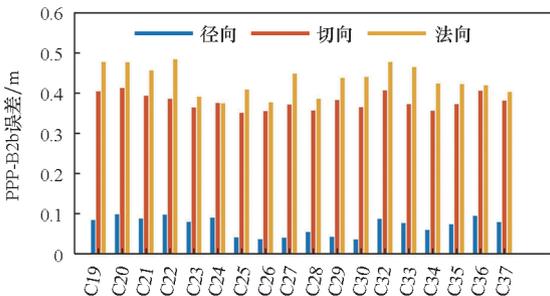
(f) 钟差平滑后结果
(f) Clock offset after smoothing

图 1 精密产品时间序列

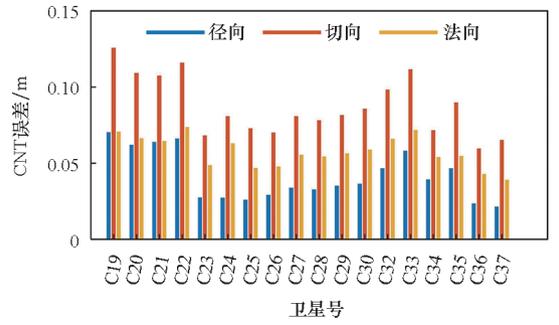
Fig. 1 Precision product time series

将 PPP-B2b 产品以及相同时间段内的 CNT 产品,分别与 GFZ 的最终精密星历 GBM 做比较。由于截至实验时间为止,CNT 中的 BDS-3 卫星有 C19 ~ C37,因此,在比较时 BDS-3 卫星也以 C19 ~ C37(C31 除外)为准。

图 2、图 3 所示为 PPP-B2b 产品以及 CNT 的轨道误差。从图中可知,在 PPP-B2b 的轨道误差中,径向精度最高,可达亚分米级,而法向和切向精度与径向相差较大; CNT 的轨道精度较



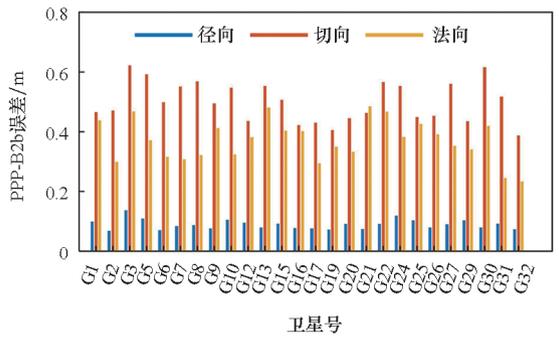
(a) PPP-B2b 误差
(a) PPP-B2b error



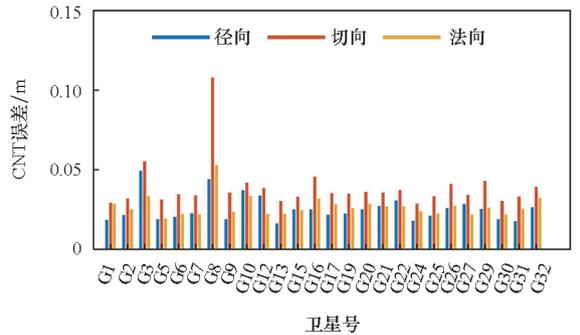
(b) CNT 误差
(b) CNT error

图 2 BDS-3 轨道误差

Fig. 2 Orbit error of BDS-3



(a) PPP-B2b 误差
(a) PPP-B2b error



(b) CNT 误差
(b) CNT error

图 3 GPS 轨道误差

Fig. 3 Orbit error of GPS

好,径向、法向、切向皆可到达厘米级。这可能与 PPP-B2b 产品仅使用了中国区域 GNSS 网络的观测结果,而 CNT 则使用全球 GNSS 网络有关。此外,表 1 是 30 d 精密轨道和精密钟差的平均值,考虑到轨道和钟差的耦合性,在评估钟差时,实验中还计算了扣除轨道径向误差之后的钟差误差,记为 $Clkred$ 。从表 1 中可以看出,BDS-3 的 PPP-B2b 径向的精度要比 GPS 的好一些,这与 PPP-B2b 的 BDS-3 应用了星间链路的额外观测有关^[13]。

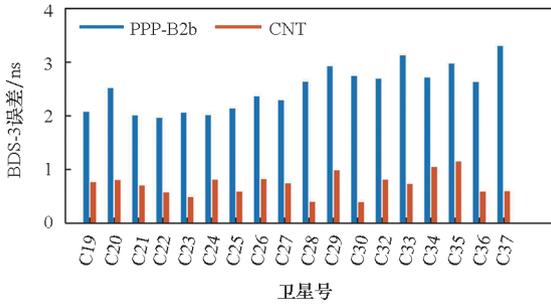
表 1 精密产品精度

Tab.1 Accuracy of precise product

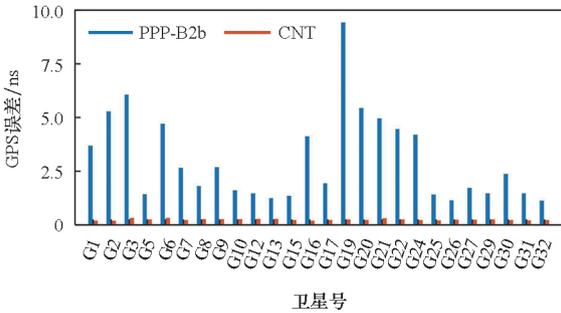
产品	系统	径向	切向	法向	钟差	钟差	$Clkred$	$Clkred$
					RMS	STD	RMS	STD
PPP-B2b	BDS-3	0.070	0.378	0.432	0.752	0.029	0.731	0.022
	GPS	0.089	0.500	0.371	0.913	0.028	0.883	0.020
CNT	BDS-3	0.041	0.087	0.058	0.216	0.057	0.204	0.037
	GPS	0.025	0.039	0.027	0.073	0.029	0.071	0.014

单位:m

图 4、图 5 是以 GBM 最终产品为参考的 PPP-B2b 产品和 CNT 钟差的 RMS 以及 STD 值;图 6 是 PPP-B2b 钟差的 RMS 和 STD 30 d 的变化情况。从图中可以发现,在 STD 方面,PPP-B2b 产



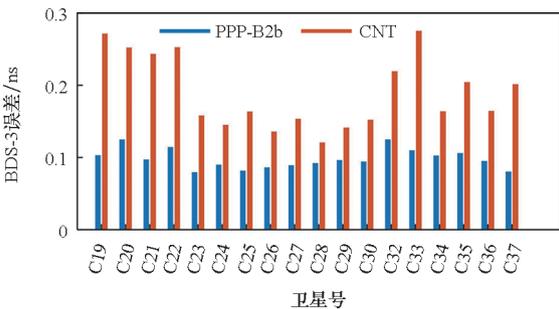
(a) BDS-3 误差
(a) BDS-3 error



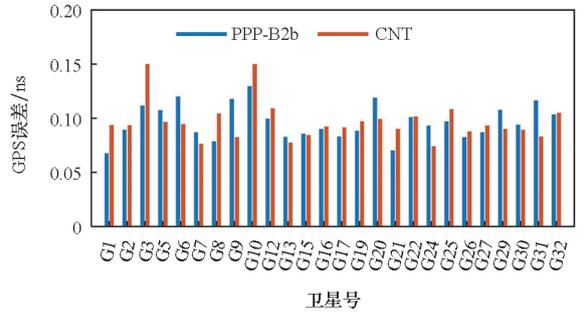
(b) GPS 误差
(b) GPS error

图 4 卫星钟差平均 RMS

Fig.4 Average RMS values of satellite clock offset errors



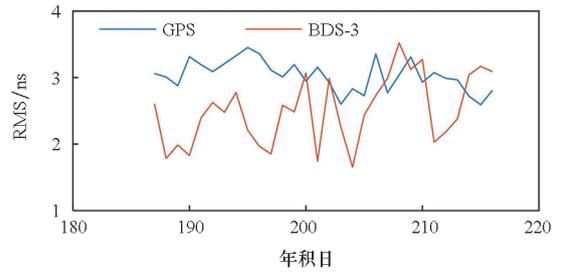
(a) BDS-3 误差
(a) BDS-3 error



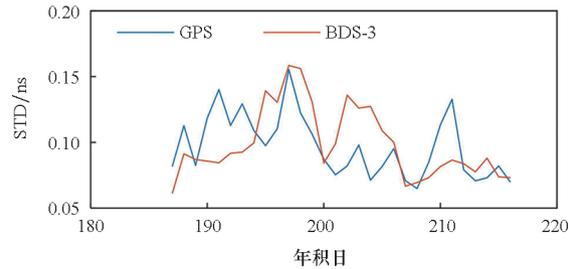
(b) GPS 误差
(b) GPS error

图 5 卫星钟差平均 STD 值

Fig.5 Average STD values of satellite clock offset errors



(a) RMS



(b) STD

图 6 PPP-B2b 钟差 RMS 和 STD 30 d 变化情况

Fig.6 30 days' change of PPP-B2b's clock offset errors RMS and STD values

品的 GPS 和 BDS-3 相接近,且与 CNT 的 GPS 均能达到 0.1 ns 的水平,而 CNT 的 BDS-3 要差一些,为 0.1 ~ 0.2 ns。而在 RMS 方面,CNT 的 GPS 和 BDS-3 均要小于 PPP-B2b 产品,而 PPP-B2b 产品 BDS-3 的 RMS 则要优于 GPS。此外,从表 1 可

以看出,钟差和 *Clkred* 结果接近,因此对于 PPP-B2b 来说,钟差对精度影响较大。

总的来说,BDS-3 的 PPP-B2b 产品的轨道精度要优于 GPS,但是两者的钟差 STD 精度接近。除 BDS-3 钟差 STD 外,其他均要比 CNT 稍差一些,但其径向精度能够达到亚分米级,钟差 STD 能够达到 0.1 ns 以内,满足实时定位的精度要求。

3 实时 PPP 精度评估

为了准确评估 PPP-B2b 和 CNT 在实际生产应用中的精度,使用实际能接收到的卫星进行 PPP 解算,因此,BDS 方面,CNT 使用了 C1 ~ C37, PPP-B2b 使用了 C19 ~ C46,GPS 方面使用的卫星相同。使用 IGS 的 JFNG 和 URUM 测站于 2021 年 7 月 6 日至 8 月 4 日共计 30 d 的数据以及 2021 年 12 月 16 日的海上实测数据,进行定位实验。实验分别采用静态 PPP 和动态 PPP 两种模式,其中,数据处理软件采用了 Net_Diff,参考坐标采用了 IGS 周解文件中提供的坐标。表 2 所示为实时动态 PPP 的处理策略。

表 2 处理策略
Tab. 2 Processing strategies

名称	策略
GNSS 系统	GPS、BDS
观测值类型	GPS; L1/L2; BDS; B1I/B3I
相位中心偏移/ 相位中心变化	IGS14. atx
采样间隔/s	30
截止高度角/(°)	10
观测模型	无电离层组合模型
对流层模型	Saastamoinen 模型 + 随机游走模型
模糊度	浮点解

3.1 静态 PPP 评估

在静态条件下,PPP-B2b 产品与 CNT 的 NEU 方向 30 d 的收敛时间和误差平均 RMS 如表 3 ~ 6 所示。收敛时间的定义^[2]为水平方向收敛至 0.3 m,垂直方向收敛至 0.6 m,连续 5 min 保持不变。定位精度则定义为收敛后最后 3 h 误差的平均 RMS。

表 3 JFNG 测站收敛时间
Tab. 3 Convergence time of JFNG

单位: min			
产品	系统	水平方向	垂直方向
PPP-B2b	BDS-3	10.06	3.11
	GPS	20.44	3.26
	BDS-3 + GPS	12.22	3.26
CNT	BDS	20.80	12.61
	GPS	2.91	2.59
	BDS + GPS	4.69	4.06

表 4 URUM 测站收敛时间
Tab. 4 Convergence time of URUM

单位: min			
产品	系统	水平方向	垂直方向
PPP-B2b	BDS-3	17.83	2.20
	GPS	28.80	4.91
	BDS-3 + GPS	18.38	2.56
CNT	BDS	19.15	3.33
	GPS	6.19	1.00
	BDS + GPS	3.44	1.15

表 5 JFNG 测站定位误差平均 RMS(静态)
Tab. 5 Positioning error's average RMS value of JFNG (static)

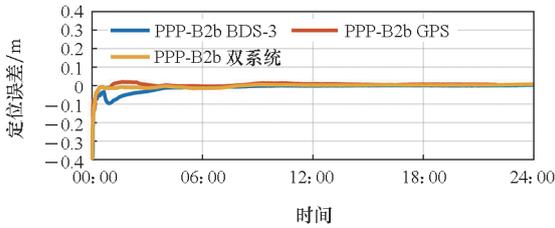
单位: m				
产品	系统	N 方向	E 方向	U 方向
PPP-B2b	BDS-3	0.006	0.025	0.036
	GPS	0.009	0.020	0.034
	BDS-3 + GPS	0.008	0.020	0.029
CNT	BDS	0.009	0.018	0.032
	GPS	0.004	0.005	0.013
	BDS + GPS	0.006	0.010	0.014

表 6 URUM 测站定位误差平均 RMS(静态)
Tab. 6 Positioning error's average RMS value of URUM (static)

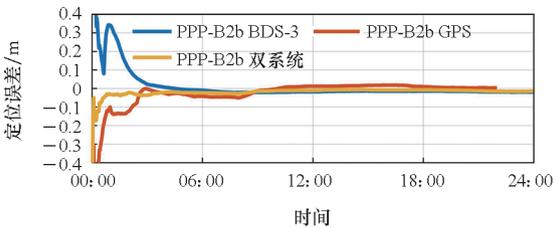
单位: m				
产品	系统	N 方向	E 方向	U 方向
PPP-B2b	BDS-3	0.018	0.018	0.044
	GPS	0.027	0.031	0.073
	BDS-3 + GPS	0.012	0.018	0.059
CNT	BDS	0.017	0.017	0.030
	GPS	0.005	0.008	0.009
	BDS + GPS	0.005	0.013	0.011

定位精度方面,对于 PPP-B2b 产品三种组合的 PPP 定位,N 方向和 E 方向精度都在 4 cm 以内,U 方向在 8 cm 以内。收敛时间方面,PPP-B2b 产品的 BDS-3 以及 BDS-3 + GPS 水平以及垂直方向收敛时间均在 20 min 以内,而 GPS 收敛时间则均在 30 min 以内。

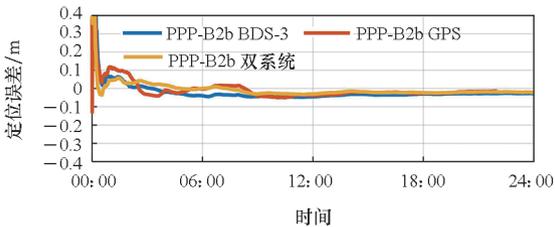
图 7、图 8 为测站 JFNG 在 2021 年 7 月 12 日的静态 PPP 结果。综合图和表中数据可以得到如下结论,在使用 PPP-B2b 产品时,与仅使用 GPS 定位相比,使用 BDS-3 定位的收敛时间有一定缩短,而双系统组合的定位精度和收敛时间与 BDS-3 定位精度接近。与使用 CNT 相比,PPP-B2b 产品静态模式下的精度与 CNT 的 BDS 精度相当,而 CNT 的 GPS 和 GPS + BDS 的收敛时间与定位精度都要比 PPP-B2b 产品的所有结果更优秀。文献[13]中 PPP-B2b 与 CNT 对应的 GPS + BDS-3 的静态 PPP 精度类似,然而,该部分长期评估结果表明,PPP-B2b 的 GPS + BDS-3 静态精度要逊色于 CNT GPS + BDS 的精度。



(a) N 方向误差
(a) Error in N direction

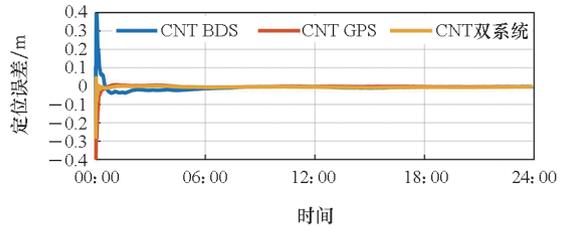


(b) E 方向误差
(b) Error in E direction

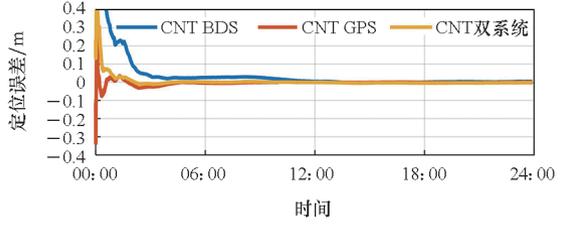


(c) U 方向误差
(c) Error in U direction

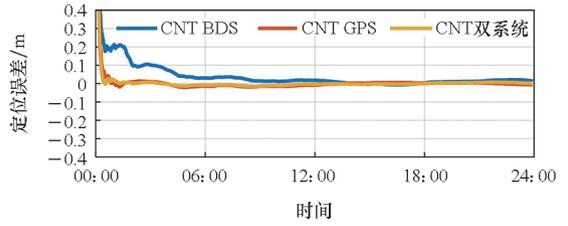
图 7 JFNG 测站 PPP-B2b 的静态 PPP
Fig. 7 PPP-B2b static PPP of JFNG



(a) N 方向误差
(a) Error in N direction



(b) E 方向误差
(b) Error in E direction



(c) U 方向误差
(c) Error in U direction

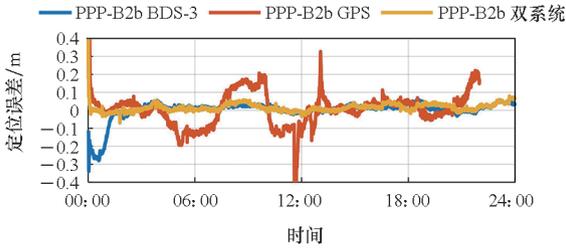
图 8 JFNG 测站 CNT 的静态 PPP
Fig. 8 CNT static PPP of JFNG

3.2 动态 PPP 评估

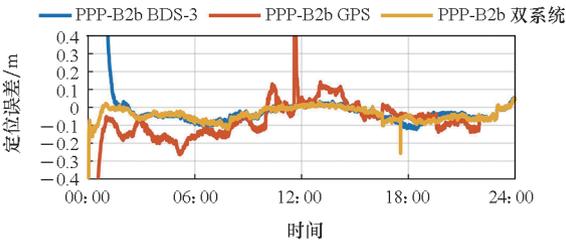
图 9、图 10 给出了以 JFNG 测站 2021 年 7 月 12 日 PPP-B2b 产品和 CNT 的 PPP 结果为例。由图 10 可以看出,PPP-B2b 产品在 NEU 方向上,BDS-3 的精度与 BDS-3 + GPS 精度相当,明显优于 GPS 的精度,其中当天的 RMS,BDS-3 为 0.022 m、0.064 m、0.051 m,GPS 为 0.103 m、0.155 m、0.346 m,BDS-3 + GPS 为 0.025 m、0.064 m、0.047 m。这是由于 PPP-B2b 产品的 GPS 系统平均卫星数仅 6.5 颗,而 CNT 产品的 GPS 平均卫星数为 8.4 颗,PPP-B2b 产品的 GPS 卫星数较少,因此其定位结果出现了跳点和中断,最终使得 PPP-B2b 产品的 GPS 系统定位精度较差。从图 9、图 10 可以看出,PPP-B2b 产品 BDS-3 的精度要好于 CNT 的 BDS 系统的精度,且 PPP-B2b 产品 BDS-3 的精度接近 CNT 的 GPS 系统的精度。

表 7、表 8 为 JFNG 和 URUM 测站 NEU 方向 30 d 的平均误差 RMS,可以看出,PPP-B2b 的单 BDS-3 以及 BDS-3 + GPS 组合在水平方向和垂直方向均能够达到厘米级定位,且双系统组合的定

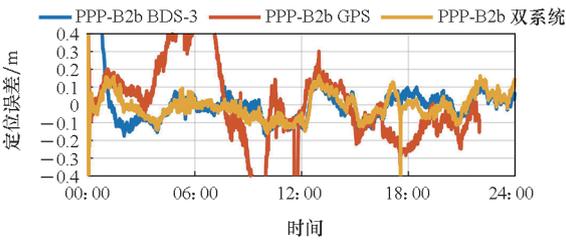
位精度要更高一些。但相比于 CNT 的单 GPS 定位,PPP-B2b 的单 BDS-3 以及双系统定位在三个方向上的精度都要逊色一些。



(a) N 方向误差
(a) Error in N direction

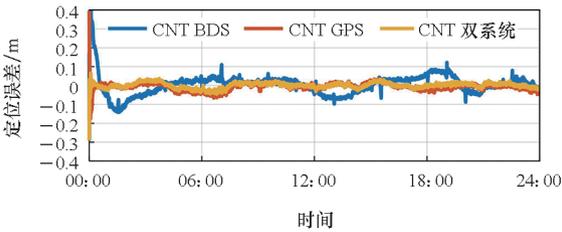


(b) E 方向误差
(b) Error in E direction

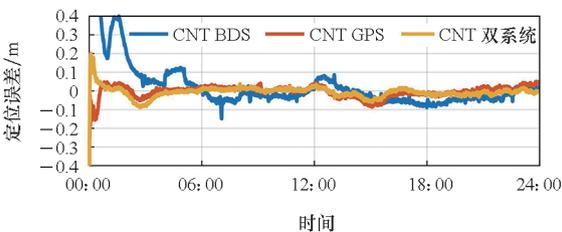


(c) U 方向误差
(c) Error in U direction

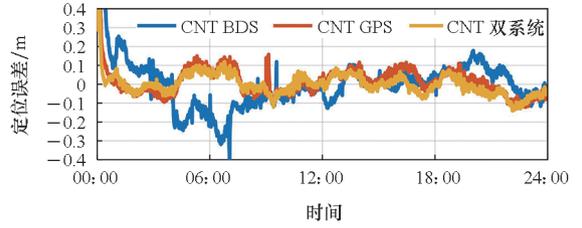
图 9 JFNG 测站 PPP-B2b 的动态 PPP
Fig. 9 Dynamic PPP of PPP-B2b in JFNG



(a) N 方向误差
(a) Error in N direction



(b) E 方向误差
(b) Error in E direction



(c) U 方向误差
(c) Error in U direction

图 10 JFNG 测站 CNT 的动态 PPP
Fig. 10 Dynamic PPP of CNT in JFNG

表 7 JFNG 测站定位误差平均 RMS(动态)
Tab. 7 Positioning error's average RMS value of JFNG (dynamic)

单位:m				
产品	系统	N 方向	E 方向	U 方向
PPP-B2b	BDS-3	0.029	0.083	0.094
	GPS	0.073	0.100	0.257
	BDS-3 + GPS	0.032	0.063	0.075
CNT	BDS	0.059	0.136	0.215
	GPS	0.020	0.018	0.062
	BDS + GPS	0.019	0.023	0.072

表 8 URUM 测站定位误差平均 RMS(动态)
Tab. 8 Positioning error's average RMS value of URUM(dynamic)

单位:m				
产品	系统	N 方向	E 方向	U 方向
PPP-B2b	BDS-3	0.046	0.059	0.110
	GPS	0.099	0.139	0.211
	BDS-3 + GPS	0.033	0.055	0.079
CNT	BDS	0.061	0.094	0.196
	GPS	0.027	0.021	0.052
	BDS + GPS	0.026	0.029	0.059

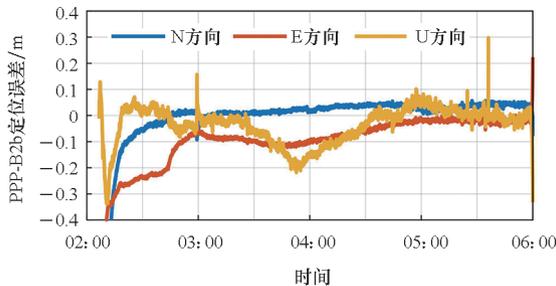
3.3 海上实测评估

为了评估实际使用中 PPP-B2b 的定位精度,在 2021 年 12 月 16 日的 02:16—06:00(GPS 时)进行了海上实测实验。在青岛市黄岛区唐岛湾岸边架设一台司南接收机,与潍坊火车站旁架设的一台天宝 ALLOY 接收机进行同步观测,基线长度约 128 km,此外,在唐岛湾海中以一台装有抑径圈的诺瓦泰 PP7 接收机进行船载实验,其中采样间隔为 1 s。

利用 Bernese5.2 软件对潍坊的测站进行 PPP,得到精确坐标;然后通过静态基线处理获得

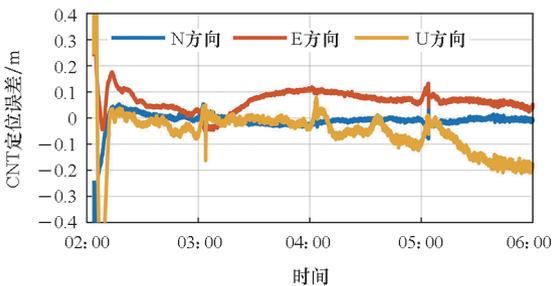
岸边测站的精确坐标;最后处理短基线获得海上船载数据固定模糊度后各历元的精确坐标。同时,海上船载数据分别采用动态 PPP,对 PPP-B2b 的 GPS + BDS-3 组合和 CNT 的 GPS + BDS 组合精度进行评估。

实验结果如图 11 所示,其中 PPP-B2b NEU 方向平均 RMS 分别为 0.028 m、0.074 m、0.081 m,收敛时间为 12.4 min;CNT NEU 方向平均 RMS 分别为 0.017 m、0.078 m、0.057 m,收敛时间为 4.7 min。可以看出,在实际使用中 PPP-B2b 的表现符合动态条件中的水平,其定位精度能达到厘米级,而收敛时间也能够 在 20 min 之内。但是,无论是水平和垂直方向精度,还是收敛时间,CNT 都要表现得比 PPP-B2b 优秀。



(a) PPP-B2b 定位误差

(a) PPP-B2b positioning error



(b) CNT 定位误差

(b) CNT positioning error

图 11 海上实测数据动态 PPP

Fig. 11 Dynamic PPP of data acquired in offshore

4 结论

本文通过对 PPP-B2b 产品的实时精密轨道和钟差以及实时动态 PPP 的评估,还有与 CNES CNT 产品的对比,来全面了解 PPP-B2b 提供服务的性能。

总的来说,得到了如下结论:

1) 精密轨道与钟差方面,PPP-B2b 产品的 BDS-3 和 GPS 在径向精度(0.07 m、0.089 m)能够达到亚分米级,两者钟差 STD 接近,且均能够在 0.1 ns 以内,满足实时精密定位要求。但与

CNES CNT 产品相比,其轨道误差相差较大,而 PPP-B2b 产品的 BDS-3 的钟差则要优于 CNES CNT 产品的 BDS-3 钟差。

2) PPP 定位方面,静态条件下,PPP-B2b 产品 BDS-3 及双系统组合 N 方向和 E 方向精度都在 4 cm 以内,U 方向在 8 cm 以内,且两者收敛时间都在 20 min 以内,和已有结果^[13]相比,在长期观测中,PPP-B2b 的 BDS-3 + GPS 要逊色于 CNT 的 BDS + GPS;动态条件下,其 BDS-3 和 BDS-3 + GPS 组合 NEU 方向精度均优于 11 cm,GPS 优于 26 cm。

3) 海上实验中,PPP-B2b 的 BDS-3 + GPS 组合 NEU 方向平均 RMS 分别为 0.028 m、0.074 m、0.081 m,达到了厘米级;而收敛时间为 12.4 min。这表明,PPP-B2b 产品的 BDS-3 和 BDS-3 + GPS 的定位精度能够达到厘米级,而 GPS 能够达到分米级。但与 CNES 相比,两种模式在水平和垂直方向的精度都相对较差。

总的来说,PPP-B2b 的性能满足实时动态 PPP 的要求,但与 CNES CNT 产品相比有一定差距。因此在能够获取 IGS 实时数据流时,应该优先使用 IGS 实时数据流。但在远海、部分山区等无法接收网络信号的偏远区域,能够使用 PPP-B2b 完成高精度动态定位,具有很强的应用性。

参考文献 (References)

- [1] 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.
XU Y Y, YANG Y X, ZENG A M, et al. Accuracy assessment of signal in space of BDS-3 global system[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2020, 40(10): 1000-1006. (in Chinese)
- [2] 中国卫星导航系统管理办公室.北斗导航系统公开服务性能规范(3.0版):BDS-OS-PS-3.0[S].北京:中国卫星导航系统管理办公室,2021.
China Satellite Navigation Office. BeiDou navigation satellite system open service performance standard (Version 3.0): BDS-OS-PS-3.0 [S]. Beijing: China Satellite Navigation Office, 2021. (in Chinese)
- [3] 朱恩慧,郭海荣,李金龙,等.基于 BDS-3 PPP-B2b 服务的实时 PPP 性能分析[J].大地测量与地球动力学,2022,42(6):616-621.
ZHU E H, GUO H R, LI J L, et al. Performance analysis of real-time PPP based on BDS-3 PPP-B2b service[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2022, 42(6): 616-621. (in Chinese)
- [4] 马会林,吴文坛,吴秀丽.亚太区域北斗三号对北斗二号精密单点定位的增强效果分析[J].测绘通报,2022(1):56-60.
MA H L, WU W T, WU X L. Performance analysis of BDS-

- 2 precise point positioning augmented by BDS-3 within the Asia-Pacific region[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2022(1): 56–60. (in Chinese)
- [5] 张小红, 李星星, 李盼. GNSS 精密单点定位技术及应用进展[J]. *测绘学报*, 2017, 46(10): 1399–1407.
ZHANG X H, LI X X, LI P. Review of GNSS PPP and its application[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1399–1407. (in Chinese)
- [6] ELSOBEIEY M, AL-HARBI S. Performance of real-time precise point positioning using IGS real-time service[J]. *GPS Solutions*, 2016, 20: 565–571.
- [7] HADAS T, BOSY J. IGS RTS precise orbits and clocks verification and quality degradation over time[J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(1): 93–105.
- [8] 欧阳晨皓, 史俊波, 黄永帅, 等. CNES 实时和存档卫星轨道/钟差产品对北斗 PPP 的影响分析[J]. *大地测量与地球动力学*, 2021, 41(3): 279–284.
OUYANG C H, SHI J B, HUANG Y S, et al. Impact analysis of CNES real-time and archival satellite orbit/clock offset products on BDS PPP[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2021, 41(3): 279–284. (in Chinese)
- [9] YANG Y X, LIU L, LI J L, et al. Featured services and performance of BDS-3[J]. *Science Bulletin*, 2021, 66(20): 2135–2143.
- [10] REN Z L, GONG H, PENG J, et al. Performance assessment of real-time precise point positioning using BDS PPP-B2b service signal[J]. *Advances in Space Research*, 2021, 68(8): 3242–3254.
- [11] NIE Z X, XU X F, WANG Z J, et al. Initial assessment of BDS PPP-B2b service: precision of orbit and clock corrections, and PPP performance[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(11): 2050.
- [12] XU Y Y, YANG Y X, LI J L. Performance evaluation of BDS-3 PPP-B2b precise point positioning service[J]. *GPS Solutions*, 2021, 25: 142.
- [13] TAO J, LIU J N, HU Z G, et al. Initial assessment of the BDS-3 PPP-B2b RTS compared with the CNES RTS[J]. *GPS Solutions*, 2021, 25(4): 131.
- [14] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗导航系统空间信号接口控制文件精密单点定位服务信号 PPP-B2b(1.0 版): BDS-SIS-ICD-PPP-B2b-Beta[S]. 北京: 中国卫星导航系统管理办公室, 2020.
China Satellite Navigation Office. BeiDou navigation satellite system signal in space interface control document precise point positioning service signal PPP-B2b (Version 1.0): BDS-SIS-ICD-PPP-B2b-Beta[S]. Beijing: China Satellite Navigation Office, 2020. (in Chinese)
- [15] 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.
LIU Z Q, WANG J X. Realization and analysis of real-time precise point positioning based on SSR broadcast ephemeris corrections[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2014, 39(1): 15–19, 109. (in Chinese)
- [16] 姬生月, 孙嘉文, 宋云记, 等. 基于北斗短报文的远海实时精密单点定位[J]. *国防科技大学学报*, 2021, 43(6): 74–84.
JI S Y, SUN J W, SONG Y J, et al. Ocean real-time precise point positioning based on BeiDou short-message communication[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2021, 43(6): 74–84. (in Chinese)