

引用格式: 郭萌, 张慧君, 陈是, 等. 基于北斗三号 PPP-B2b 改正信息的实时精密单点定位性能评估[J]. 时间频率学报, 2025, 48(2): 131-142.

基于北斗三号 PPP-B2b 改正信息的 实时精密单点定位性能评估

郭萌^{1,2,3}, 张慧君^{1,2,3}, 陈是^{1,2,3}, 李孝辉^{1,2,3}, 朱琳^{1,2,3}

1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;
2. 时间基准及应用重点实验室(中国科学院), 西安 710600;
3. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 北斗三号卫星导航系统发布的 PPP-B2b 信号可为用户提供公开免费的精密单点定位 (PPP) 服务。针对基于 PPP-B2b 改正信息的实时 PPP, 设计了 BDS-3 和 GPS 实时 PPP 数据处理方案, 搭建了北斗实时静态 PPP 性能评估实验平台, 开展了 B1C/B2a、B1I/B3I、L1/L2、B1C/B2a&L1/L2 和 B1I/B3I&L1/L2 5 种频率组合模式下的实时 PPP 实验。以 CSRS-PPP 定位结果作为参考基准, 使用扩展卡尔曼滤波进行参数估计, 对 PPP-B2b 的实时 PPP 定位性能进行了评估, 并与广播星历、WUM 产品的定位结果进行了对比。结果表明: 在 PPP-B2b 的 5 种模式中, B1C/B2a&L1/L2 的定位性能最优, 该模式下 PPP-B2b、WUM 产品的三维定位精度分别为 4.08、2.44 cm, 相比广播星历分别提升了 91.7%、93%。PPP-B2b 和 WUM 产品的定位精度均达到了厘米级, 收敛时间均在 30 min 内, 其中 PPP-B2b 的定位精度略低于 WUM 产品, 双系统的定位性能明显优于单系统。

关键词: PPP-B2b; 精密单点定位; 扩展卡尔曼滤波; 定位精度; 收敛时间

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2025-02-0131-12

Real-time precise point positioning performance evaluation based on BDS-3 PPP-B2b correction information

GUO Meng^{1,2,3}, ZHANG Hui-jun^{1,2,3}, CHEN Shi^{1,2,3}, LI Xiao-hui^{1,2,3}, ZHU Lin^{1,2,3}

1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
2. Key Laboratory of Time Reference and Applications, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The PPP-B2b signal published by the BeiDou-3 Satellite Navigation System can provide users with public and free precise point positioning (PPP) service. For the real-time PPP based on PPP-B2b correction information, BDS-3 and GPS real-time PPP data processing schemes were designed, and an experimental platform for real-time static PPP performance evaluation in BeiDou was built. Real-time PPP experiments were carried out in B1C/B2a, B1I/B3I, L1/L2, B1C/B2a&L1/L2 and B1I/B3I&L1/L2 frequency combination modes.

收稿日期: 2024-08-16; 接受日期: 2024-10-21

基金项目: 国家重大科技基础设施高精度地基授时系统

Taking the CSRS-PPP positioning results as a reference, the real-time PPP performance of the PPP-B2b was evaluated using extended Kalman filtering for parameter estimation, and compared with the positioning results of the broadcast ephemeris and the WUM product. The results show that among the five modes of PPP-B2b, the B1C/B2a&L1/L2 has the best positioning performance, and the three-dimensional positioning accuracy of PPP-B2b and the WUM product is 4.08 cm, 2.44 cm, which is 91.7% and 93% higher than that of the broadcast ephemeris, respectively. The positioning accuracy of PPP-B2b and the WUM product both reach the centimeter level, and the convergence time is within 30 min, in which the positioning accuracy of the PPP-B2b is slightly lower than that of the WUM product, and the positioning performance of the dual system is significantly better than that of the single system.

Key words: PPP-B2b; precise point positioning; extend Kalman filtering; positioning accuracy; convergence time

2020 年 7 月 31 日, 北斗三号全球卫星导航系统 (BeiDou-3 Navigation Satellite System, BDS-3) 正式开通服务^[1], 为用户提供定位导航授时、星基增强、精密单点定位 (precise point positioning, PPP)、国际搜救、短报文通信等服务^[2]。目前, BDS-3 提供 B1C、B2a、B1I、B3I、B2b 5 种公开服务信号^[3], 其中 B2b 信号共有两种, 分别为导航定位授时服务 (radio navigation satellite service, RNSS) B2b 信号和 PPP 服务 B2b 信号。RNSS 服务 B2b 信号由中圆地球轨道 (medium earth orbit, MEO) 卫星和倾斜地球同步轨道 (inclined geosynchronous orbit, IGSO) 卫星播发, 提供基本导航服务; PPP 服务 B2b 信号由地球静止轨道 (geostationary earth orbit, GEO) 卫星播发^[4], 向中国及周边地区提供 PPP 服务。

传统的精密单点定位需要通过获取精密卫星轨道和钟差等产品实现。精密产品一般由国际 GNSS (Global Navigation Satellite System) 服务组织 (International GNSS Service, IGS)、全球连续监测评估系统 (international GNSS Monitoring and Assessment System, iGMAS) 等机构通过网络播发^[5-8], 过于依赖通信网络。而北斗 PPP-B2b 服务通过 3 颗 GEO 卫星向用户播发轨道、钟差和码间偏差 (differential code bias, DCB) 改正信息^[9], 不受网络限制。用户仅需接收卫星端的信号, 根据接收到的观测数据、广播星历和实时 PPP-B2b 电文, 参考 PPP-B2b 信号接口文件改正轨道、钟差和码间偏差, 即可实现北斗实时 PPP, 对远洋区域^[10-12]、无人区等无网络区域的资源勘测有重要意义。与传统商业 PPP 相比,

PPP-B2b 可为用户提供公开免费的服务, 降低了使用成本, 而且可以获得实时 PPP 定位和定时解。

目前对北斗三号 PPP-B2b 定位服务的研究主要是针对 BDS-3 单系统以及使用事后仿实时的处理方式进行定位解算, 在 BDS-3 和 GPS (Global Positioning System) 双系统定位以及实时定位解算方面的相关研究较少。何旭蕾等^[13]对 PPP-B2b 信号进行解析并使用研发的接收机对其定位精度进行评估, 结果表明, PPP 解算的 E、N、U 方向的定位精度分别为 0.45、0.31、0.80 m。Liu 等^[14]针对 PPP-B2b 信号, 提出了一种新的调制方法, 并进行了定位解算。结果表明, BDS-3 系统中, PPP 解算的水平、垂直方向的定位精度分别优于 0.15、0.3 m。该研究仅针对 BDS-3 系统, 并未对 BDS-3 和 GPS 双系统的定位性能进行研究。Yang 等^[15]基于 BDS-3 B1C/B2a 频率组合模式对 PPP-B2b 服务的定位性能进行了评估。结果表明, 在 BDS-3 B1C/B2a 频率组合模式下, 静态 PPP 解算的水平、垂直方向的定位精度分别优于 0.3、0.5 m, 收敛时间少于 30 min。该研究仅针对 BDS-3 B1C/B2a 模式, 并未对 BDS-3 其他频率组合模式的定位性能进行研究。较多学者^[16-22]使用中国及周边地区测站的观测数据进行定位, 并分析北斗三号 PPP-B2b 信号的定位精度, 结果表明, PPP-B2b 的定位精度可达到静态厘米级、动态分米级。这些研究中采用的均是事后仿实时的处理方式进行定位解算, 并未进行实时定位解算。

基于以上研究, 为了评估 PPP-B2b 改正信息的实时 PPP 定位性能, 本文利用双频无电离层组合

伪距和相位观测值, 结合实时获取的北斗 PPP-B2b 改正信息, 通过扩展卡尔曼滤波进行 BDS-3 单系统、GPS 单系统、BDS-3 和 GPS 双系统的实时 PPP 定位解算, 并分析北斗 PPP-B2b 信号的实时定位性能。

1 基于 PPP-B2b 的精密单点定位模型与数据处理

1.1 基于 PPP-B2b 改正信息的实时 PPP 模型

PPP-B2b 精密单点定位将双频接收机的伪距和载波相位观测值作为输入, 采用双频非差观测值进行无电离层组合, 消除一阶电离层延迟误差, 再结合 PPP-B2b 精密卫星轨道、钟差和码间偏差改正信息以及准确的误差模型, 计算出精密的接收机坐标和钟差。具体观测方程如式 (1) 所示:

$$\left\{ \begin{array}{l} P = \alpha \cdot P_i - \beta \cdot P_j = \\ \quad \rho + c \cdot dt_r - c \cdot (dT^s - \frac{C_0}{c}) + \\ \quad B_r - B^s + \delta_{\text{trop}} + \varepsilon_p \\ L = \alpha \cdot L_i - \beta \cdot L_j = \\ \quad \rho + c \cdot dt_r - c \cdot (dT^s - \frac{C_0}{c}) + \\ \quad b_r - b^s + \delta_{\text{trop}} + \lambda_{\text{IF}} N_{\text{IF}} + \varepsilon_L \end{array} \right. \quad (1)$$

式 (1) 中: P 表示双频伪距 P_i 和 P_j 的无电离层组合 (i 、 j 是不同的频点, P_i 、 P_j 是不同频率伪距观测值); L 表示双频载波相位 L_i 和 L_j 的无电离层组合 (L_i 、 L_j 是不同频率载波相位观测值); α 、 β 均表示系数, 其中 $\alpha = \frac{f_i^2}{f_i^2 - f_j^2}$, $\beta = \frac{f_j^2}{f_i^2 - f_j^2}$

(f_i 、 f_j 是不同频点对应的频率); c 表示光速; ρ 表示星地几何距离, 计算方法为 $\rho = \sqrt{(x^s - \delta x - x)^2 + (y^s - \delta y - y)^2 + (z^s - \delta z - z)^2}$; 其中 (x^s, y^s, z^s) 为卫星位置, $(\delta x, \delta y, \delta z)$ 为 PPP-B2b 信号播发的卫星位置的改正信息, (x, y, z) 为接收机位置; dt_r 表示接收机钟差; dT^s 表示卫星钟差; C_0 表示 PPP-B2b 信号播发的卫星钟差的改正信息; B_r 、 B^s 分别表示双频组合接收机、卫星的伪距硬件偏差; b_r 、 b^s 分别表示双频组合接

收机、卫星的载波相位硬件偏差; δ_{trop} 表示对流层延迟; λ_{IF} 表示双频组合的载波相位波长; N_{IF} 表示双频组合的模糊度; ε_p 、 ε_L 分别表示双频组合伪距、双频组合载波相位观测噪声; 其中, B_r 、 b_r 在接收机钟差中计算, 模糊度采用浮点解时 b^s 在模糊度中计算, B^s 由 PPP-B2b 播发的卫星码间偏差进行计算, 计算公式为 $B^s = \frac{\gamma d_i - d_j}{\gamma - 1}$, 式中 $\gamma = \frac{f_i^2}{f_j^2}$,

d_i 、 d_j 是卫星不同频率的伪距硬件偏差。

1.2 BDS-3 PPP-B2b 实时改正信息计算方法

PPP-B2b 信号通过 3 颗 GEO 卫星 (PRN 为 59、60、61) 播发 BDS-3 和其他全球卫星导航系统的卫星轨道、钟差和码间偏差改正信息, 具体改正算法如下。

1.2.1 卫星轨道改正

利用北斗 PPP-B2b 轨道改正信息计算 BDS、GPS 精密轨道的实质是在广播星历计算出的卫星位置向量 X_{brdc} 的基础上, 利用轨道改正信息 δO 恢复出精密轨道 X_{orb} 。轨道改正公式如式 (2) 所示:

$$X_{\text{orb}} = X_{\text{brdc}} - \delta X \quad (2)$$

式 (2) 中: X_{orb} 为改正后的卫星位置, X_{brdc} 由广播星历计算的卫星位置, δX 为卫星位置改正信息。其计算公式如式 (3) 所示:

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta X = [e_{\text{rad}} \ e_{\text{alo}} \ e_{\text{cro}}] \cdot \delta O \\ e_{\text{rad}} = \frac{X_{\text{brdc}}}{|X_{\text{brdc}}|} \\ e_{\text{cro}} = \frac{X_{\text{brdc}} \times \dot{X}_{\text{brdc}}}{|X_{\text{brdc}} \times \dot{X}_{\text{brdc}}|} \\ e_{\text{alo}} = e_{\text{cro}} \times e_{\text{rad}} \end{array} \right. \quad (3)$$

式 (3) 中: $\{e_{\text{rad}}, e_{\text{alo}}, e_{\text{cro}}\}$ 为径向、切向、法向单位矢量, δO 代表径向、切向和法向的三维轨道改正向量, $\dot{X}_{\text{brdc}}$ 为广播星历中卫星速度矢量。

1.2.2 卫星钟差改正

精密卫星钟差由广播星历卫星钟差和 PPP-B2b 电文中获得的钟差改正信息联合计算, 计算方法如式 (4) 所示:

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

式(4)中: t_{brdc} 为广播星历卫星钟差, C_0 为钟差改正信息, c 为光速, t_{sat} 为改正后的精密卫星钟差。

1.2.3 卫星码间偏差改正

码间偏差是观测值中与信号跟踪模式关联的偏差,该偏差是由于各卫星跟踪模式不同而产生的硬件延迟^[22]。为了使各信号同步处理,需要在处理各频率信号前消除该偏差,改正算法如下:

$$\tilde{P}_{\text{sig}} = P_{\text{sig}} - d_{\text{sig}} \quad (5)$$

式(5)中: $\tilde{P}_{\text{sig}}$ 为修正后的信号观测值, P_{sig} 为接收机直接捕获到的信号观测值, d_{sig} 为该信号的码间偏差。

由于GPS广播星历的卫星钟差以P1/P2双频码伪距无电离层组合的虚拟电子相位中心为基准,本文使用的是C1/P2双频码伪距,因此GPS系统只需改正C1码相对于P1码的频内码间偏差,无需改正不同频率间的频间码间偏差。而BDS-3广播星历的卫星钟差以B3I信号作为基准,使用BDS-3其他频率的信号时需进行DCB改正,将其他频率信号的传播时延归算到B3I基准上^[23-24]。因为DCB改正信

息直接应用在伪距观测值上,且本文使用双频消电离层组合,所以可通过式(6)消除BDS-3不同频点信号的码间偏差。

$$\tilde{P} = \frac{\gamma P_i - P_j}{\gamma - 1} - \frac{\gamma d_i - d_j}{\gamma - 1} \quad (6)$$

式(6)中: $\gamma = \frac{f_i^2}{f_j^2}$, i 、 j 是不同的频点, f_i 、 f_j

是不同频点对应的频率, $\tilde{P}$ 为修正码间偏差后的双频组合伪距观测值, P_i 、 P_j 是不同频率的伪距观测值, d_i 、 d_j 是卫星不同频率的伪距硬件偏差。

1.3 基于PPP-B2b的实时PPP数据处理策略

本文以双频伪距和载波相位组合观测值、广播星历和PPP-B2b改正信息为输入,分别对BDS-3单系统、GPS单系统及BDS-3和GPS双系统实现实时PPP,采样间隔为1s。通过双频无电离层组合消除电离层延迟一阶项的影响,对流层延迟干分量使用Saastamoinen模型计算,湿分量作为待估参数进行估计。具体实时PPP数据处理策略如表1所示。

表1 基于PPP-B2b的实时PPP数据处理策略

参数	处理策略
GNSS系统	BDS-3单系统、GPS单系统、BDS-3&GPS双系统
频点	BDS-3: B1C/B2a、B1I/B3I; GPS: L1/L2
观测值	双频伪距和载波相位组合观测值
观测噪声	伪距: 相位比例 300:1
截止高度角	15°
采样间隔	1 s
卫星轨道	采用经PPP-B2b信息改正后的卫星轨道
卫星钟差	采用经PPP-B2b信息改正后的卫星钟差
码间偏差改正	GPS只需改正频内码间偏差
接收机钟差	待估参数
测站位置	待估参数
电离层延迟	双频伪距或载波相位组合消电离层
对流层延迟	干分量使用Saastamoinen模型改正、湿分量作为待估参数估计
相位缠绕	模型改正
模糊度	待估参数
参数估计方法	扩展卡尔曼滤波

需要求解的待估参数包括测站位置、接收机钟差、对流层延迟湿分量和模糊度 4 类, BDS-3 和 GPS 系统间偏差 ISB 在模糊度和接收机钟差中计算。常用的参数估计方法包括最小二乘法、极大似然估计、扩展卡尔曼滤波和粒子滤波等^[25]。由于扩展卡尔曼滤波采用递推算法, 计算过程中仅需保留上一时刻的数据, 数据存储量较小, 计算效率较高, 且精密单点定位的观测方程为非线性方程, 所以本文选用扩展卡尔曼滤波进行参数估计。

2 实时 PPP 性能评估实验

2.1 实验方案设计

为了评估北斗三号 PPP-B2b 改正信息的实时 PPP 定位性能, 搭建了如图 1 所示的北斗实时静态 PPP 定位性能评估实验平台。实验使用 Septentrio Mosaic-T 接收机和实时数据采集与处理软件实时获取、解析实时 PPP-B2b 改正信息、实时广播星历以及实时伪距、载波相位观测数据, 天线位于中国科学院国家授时中心综合楼四楼的楼顶, 接收机外接中国科学院国家授时中心产生和保持的 UTC (NTSC) 10 MHz 频率参考信号和 1 PPS 信号。

本实验主要包括 3 个模块: 实时 PPP-B2b 和广播星历定位模块、事后 WUM 产品定位模块以及定位评估模块。在实时定位模块中, 当获取到 3 类实时数据后, 随即实时计算卫星位置、钟差等参数。在此基础上, 实时修正电离层延迟、对流层延迟等误差, 并使用扩展卡尔曼滤波算法估计参数, 进而完成实时定位解算, 最终实时输出定位结果。PPP-B2b 和广播星历的定位解算流程大体一致, 区别在于 PPP-B2b 定位解算需在广播星历基础上, 对卫星位置、钟差和码间偏差进行 PPP-B2b 改正, 而广播星历定位解算无需此步骤。在 WUM 产品的事后静态 PPP 定位解算中, 首先需要通过网络从 WHU 分析中心下载事后精密轨道、钟差和 OSB 产品以及事后导航数据, 再结合接收机接收的伪距、载波相位观测数据, 对 WUM 产品进行定位解算。在 3 种产品分别进行定位解算后, 以 CSRS-PPP 定位结果为参考, 分别评估 PPP-B2b、广播星历以及 WUM 3 种产品的定位结果, 并进行对比。实验时间为 2024-08-23T13:14:05/2024-08-24T13:14:05, 采样间隔为 1 s。为了减弱周围环境中遮挡物对信号接收的影响, 实验中将截止高度角设置为 15°。

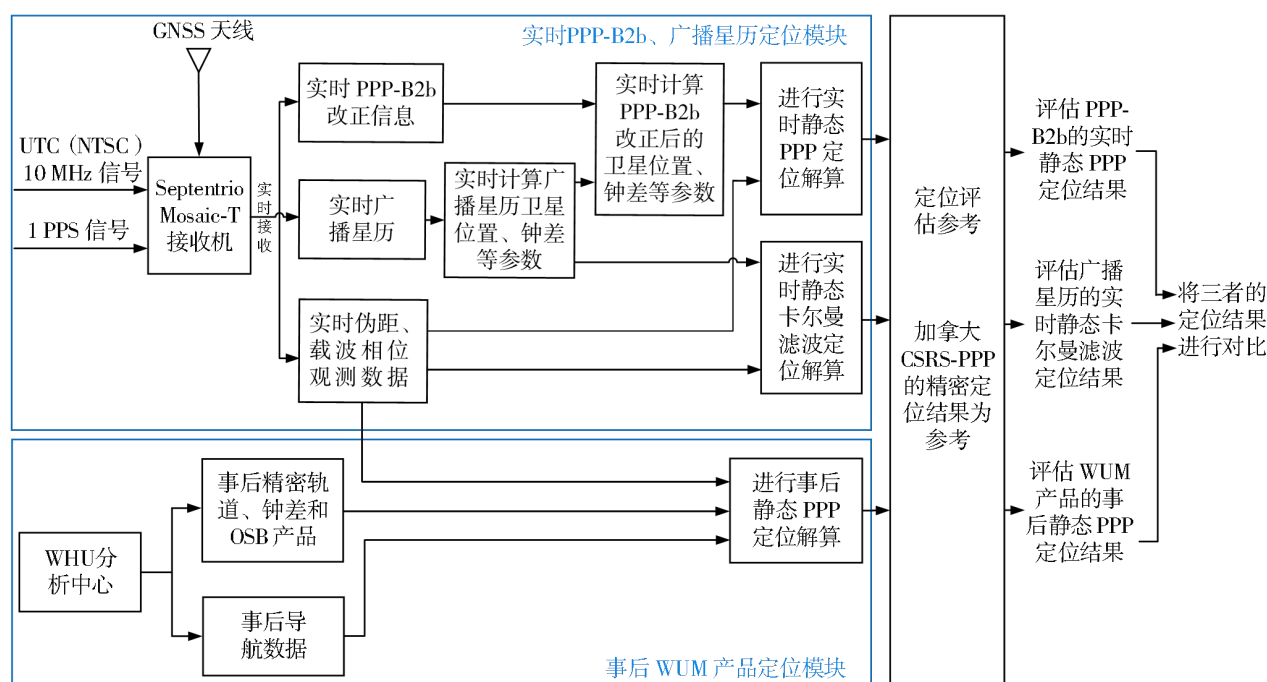


图 1 北斗实时静态 PPP 定位性能评估实验平台

2.2 定位精度评估方法

在对定位精度进行评估时,首先需要选择参考基准和事后精密产品。由于加拿大 CSRS-PPP 在线 PPP 服务系统的定位精度可达到毫米级,且在 3 min 内可获取定位结果,所以参考基准选择 CSRS-PPP 的定位结果。与 CODE (欧洲定轨中心)、GFZ (德国地学研究中心)、IAC (俄罗斯信息分析中心)、SHAO (中国科学院上海天文台) 分析中心提供的精密产品相比, WUM 可

提供更高的定位精度和更快的收敛速度^[26],所以事后精密产品选择武汉大学 IGS 分析中心提供的最终精密产品 (WUM)。具体评估方法如下。

① 以加拿大 CSRS-PPP 在线 PPP 服务系统的定位结果作为参考基准。

② 分别将广播星历、PPP-B2b、WUM 3 种产品定位结果与参考基准 (CSRS-PPP 定位结果) 进行互差,再分别计算对应的均方根值 (RMS),作为各自定位精度的统计结果。计算方法如下:

$$(x_{\text{广播星历}})_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(x_{\text{广播星历}})_i - x_0]^2}{n}} = \sqrt{\frac{[(x_{\text{广播星历}})_1 - x_0]^2 + [(x_{\text{广播星历}})_2 - x_0]^2 + \cdots + [(x_{\text{广播星历}})_n - x_0]^2}{n}}, \quad (7)$$

$$(x_{\text{PPP-B2b}})_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(x_{\text{PPP-B2b}})_i - x_0]^2}{n}} = \sqrt{\frac{[(x_{\text{PPP-B2b}})_1 - x_0]^2 + [(x_{\text{PPP-B2b}})_2 - x_0]^2 + \cdots + [(x_{\text{PPP-B2b}})_n - x_0]^2}{n}}, \quad (8)$$

$$(x_{\text{WUM}})_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(x_{\text{WUM}})_i - x_0]^2}{n}} = \sqrt{\frac{[(x_{\text{WUM}})_1 - x_0]^2 + [(x_{\text{WUM}})_2 - x_0]^2 + \cdots + [(x_{\text{WUM}})_n - x_0]^2}{n}}。 \quad (9)$$

式 (7) 至 (9) 中: $(x_{\text{广播星历}})_i$ 、 $(x_{\text{PPP-B2b}})_i$ 、 $(x_{\text{WUM}})_i$ 分别为广播星历、PPP-B2b、WUM 产品第 i 个历元的 PPP 结果, x_0 为参考基准, $(x_{\text{广播星历}})_{\text{RMS}}$ 、 $(x_{\text{PPP-B2b}})_{\text{RMS}}$ 、 $(x_{\text{WUM}})_{\text{RMS}}$ 分别为广播星历、PPP-B2b、WUM 产品与参考基准互差后的定位精度。

③ 最后将广播星历、PPP-B2b 以及 WUM 3 种产品的定位精度进行对比。

在使用 WUM 产品进行 PPP 解算时,由于 WUM 产品以 B1I/B3I 双频组合和 L1/L2 双频组合为基准,所以 B1C/B2a 双频组合模式进行 PPP 解算时需使用 OSB 产品改正。OSB 产品和 DCB 产品都是对卫星码间偏差进行改正,OSB 是绝对码间偏差,DCB 是差分码间偏差。

2.3 定位结果评估

2.3.1 各模式定位精度评估

图 2 至图 6 分别展示了 B1C/B2a、B1I/B3I、L1/L2、B1C/B2a&L1/L2 和 B1I/B3I&L1/L2 5 种频率组合模式中广播星历、PPP-B2b 和 WUM 3 种产品的定位精度。表 2 统计了各模式在 E、N、U 3 个方向以及三维 (3D) 方向上对应的定位精度。图 7 将各模式的定位精度进行了对比,其中 PPP-B2b

和 WUM 产品定位精度的对比如图 8 所示。

结合表 2、图 7 和图 8 可知,5 种频率组合模式中,广播星历的定位精度达到了分米级,而 PPP-B2b 和 WUM 产品各方向的定位精度均达到了厘米级,与广播星历相比定位精度均显著提升,其中 PPP-B2b 的定位精度略低于 WUM 产品。除了 L1/L2 模式外,其他频率组合模式中 PPP-B2b 和 WUM 产品的三维定位精度均小于 5 cm,3 个方向中 N 方向定位精度最高,基本在 1 cm 以内。

在 PPP-B2b、WUM 两种产品与参考基准互差后的三维定位精度中,单系统中 B1C/B2a 模式的定位精度最高; B1I/B3I 模式的定位精度略低于 B1C/B2a 模式,这是因为 B1I/B3I 双频组合的噪声放大系数较大,抗噪声性能较差;与单系统相比,双系统的定位精度更高,这与双系统的可用卫星数增加和卫星的空间几何分布较好有关;5 种频率组合模式中, B1C/B2a&L1/L2 模式的定位精度最高, PPP-B2b、WUM 两种产品 PPP 与参考基准互差后的三维定位精度为 4.08、3.44 cm,该模式下广播星历与参考基准互差后的三维定位精度为 49.12 cm,与广播星历相比, PPP-B2b、WUM 产品的三维定位精度分别提升了 91.7%、93%。

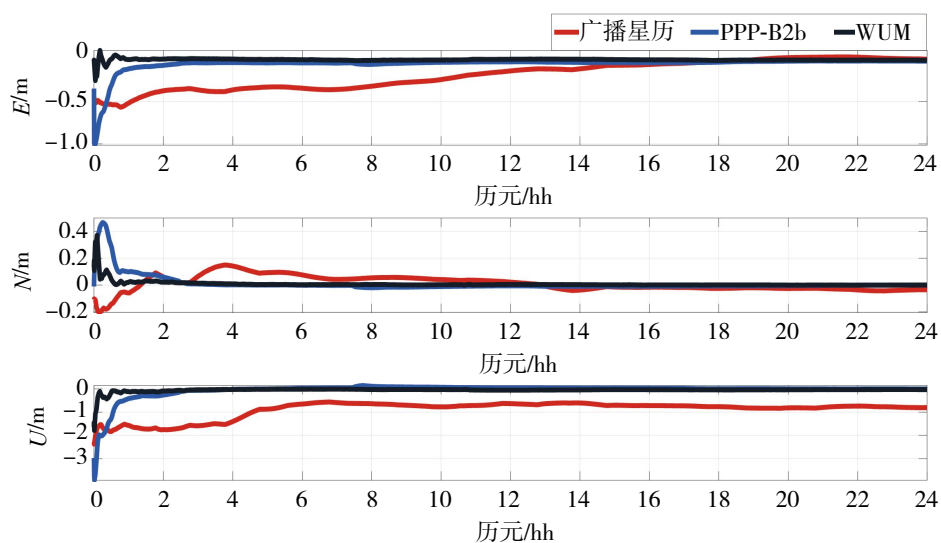


图2 B1C/B2a 模式广播星历、PPP-B2b、WUM 产品的定位精度对比图

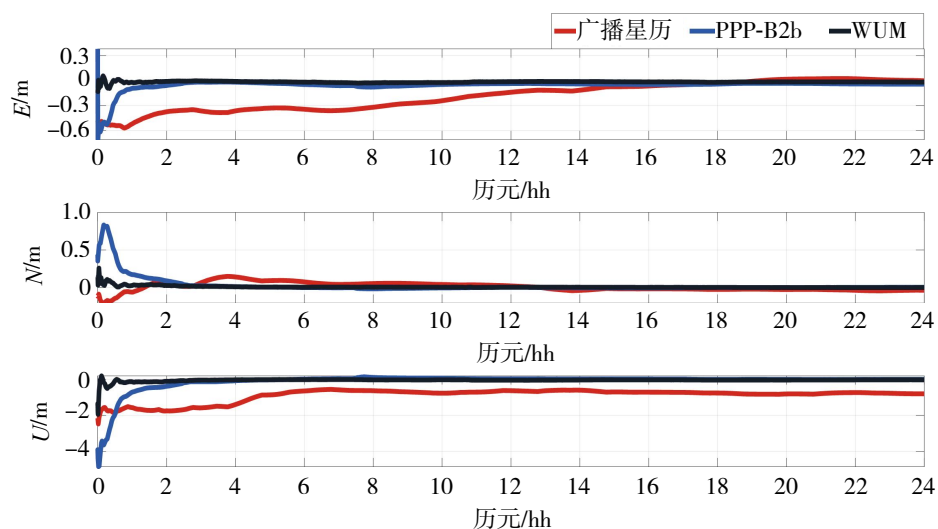


图3 B1I/B3I 模式广播星历、PPP-B2b、WUM 产品的定位精度对比图

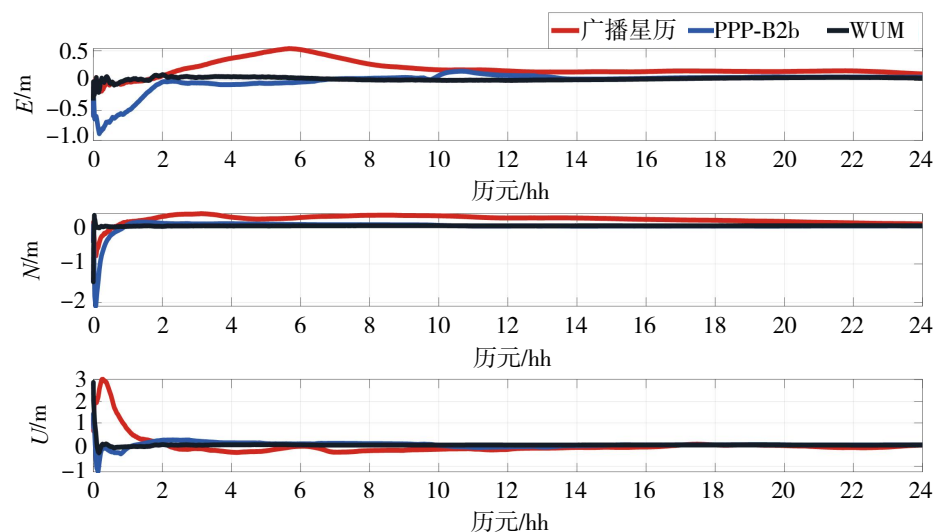


图4 L1/L2 模式广播星历、PPP-B2b、WUM 产品的定位精度对比图

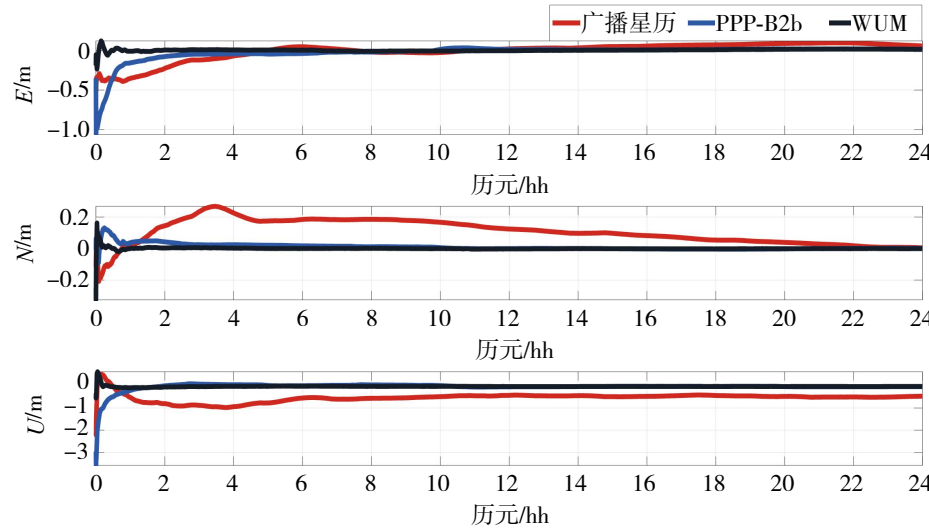


图 5 B1C/B2a&L1/L2 模式广播星历、PPP-B2b、WUM 产品的定位精度对比图

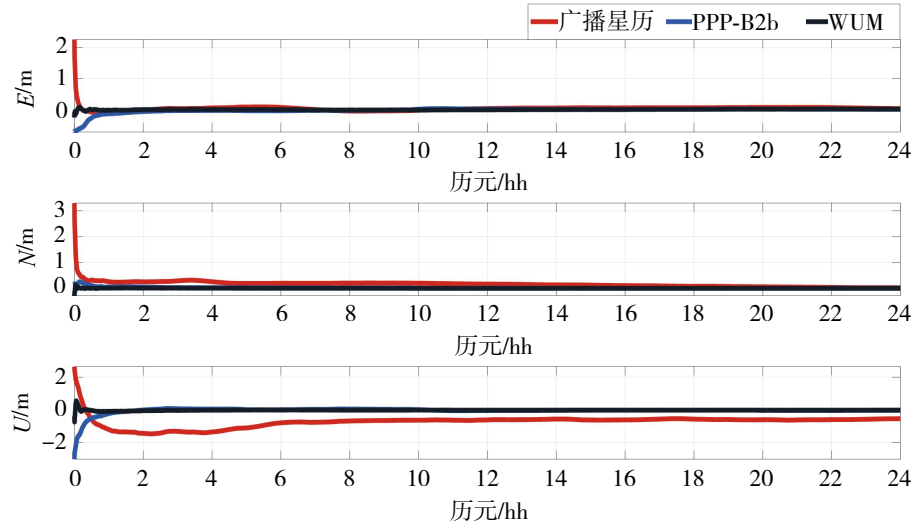


图 6 B1I/B3I&L1/L2 模式广播星历、PPP-B2b、WUM 产品的定位精度对比图

表 2 5 种模式广播星历、PPP-B2b、WUM 产品的定位精度

频率组合模式	定位模式	定位精度/cm			
		E	N	U	3D
BDS-3 B1C/B2a	广播星历	10.34	3.14	76.31	77.07
	PPP-B2b	3.23	0.69	3.24	4.64
	WUM	1.55	0.21	3.14	3.51
BDS-3 B1I/B3I	广播星历	10.32	3.14	76.29	77.05
	PPP-B2b	3.96	0.56	2.47	4.70
	WUM	1.96	0.32	3.30	3.85
GPS L1/L2	广播星历	13.75	14.58	12.47	23.6
	PPP-B2b	6.08	1.01	4.61	7.70
	WUM	3.32	0.24	1.50	3.65

续表 2

频率组合模式	定位模式	定位精度/cm			
		E	N	U	3D
BDS-3 B1C/B2a&GPS L1/L2	广播星历	5.21	8.08	48.17	49.12
	PPP-B2b	1.49	0.36	3.78	4.08
	WUM	1.01	0.13	2.22	2.44
BDS-3 B1I/B3I&GPS L1/L2	广播星历	4.29	10.28	60.68	61.70
	PPP-B2b	1.19	0.46	4.15	4.35
	WUM	1.03	0.14	2.31	2.53

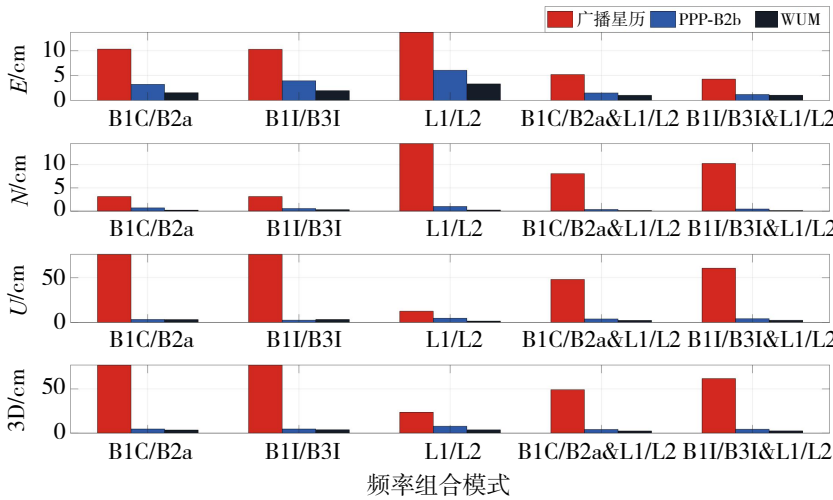


图 7 5 种模式广播星历、PPP-B2b、WUM 产品的定位精度对比图

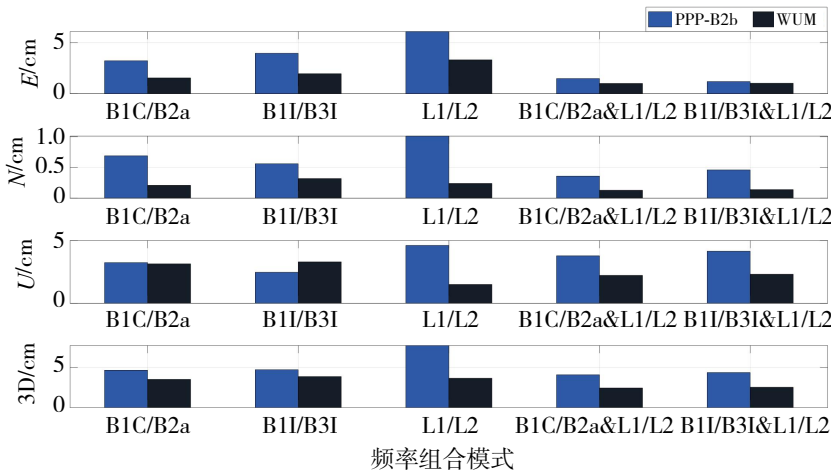


图 8 5 种模式 PPP-B2b、WUM 产品的定位精度对比图

2.3.2 各模式收敛时间评估

根据北斗卫星导航系统公开服务性能规范（3.0 版）文件，收敛时间的定义为满足定位精度且至少持续 5 min 的条件下，第一次满足该条件的时

间。实时 PPP 收敛精度标准为：单系统满足水平方向、垂直方向的定位精度分别不超过 0.3、0.6 m；

双系统满足水平方向、垂直方向的定位精度分别不超过 0.2、0.4 m。表 3 统计了 5 种频率组合模式中广播星历、PPP-B2b 和 WUM 3 种产品分别与参考基准互差后的定位结果的收敛时间，对比如图 9，图 10 展示了 5 种频率组合模式的可视卫星数和 PDOP（position dilution of precision）值。

结合表 3 和图 9 可知，5 种频率组合模式中，PPP-B2b 和 WUM 产品的收敛时间均在 30 min 内，与广播星历相比收敛时间明显缩短，其中 PPP-B2b 的收敛时间较长，这是因为 PPP-B2b 改正信息中的卫星钟差常数偏差比 WUM 产品大，在 PPP 解算时该偏差会被伪距残差所吸收，导致收敛时间较长。在 PPP-B2b 的实时静态 PPP 收敛时间中，单

系统中 L1/L2 模式的收敛时间最长；双系统组合模式的收敛时间明显比单系统更短，5 种频率组合模式中，B1C/B2a& L1/L2 模式的收敛时间最短，PPP-B2b、WUM 产品的收敛时间分别为 18、3 min，该模式下广播星历的收敛时间为 342 min，与广播星历相比，PPP-B2b、WUM 产品的收敛时间分别缩短了 94.7%、99.1%。

表 3 5 种模式广播星历、PPP-B2b、WUM 产品的收敛时间、平均可视卫星数和 PDOP 值对比

频率组合模式	定位模式	收敛时间/min	平均可视卫星数 (收敛时间内)	平均 PDOP 值 (收敛时间内)
BDS-3 B1C/B2a	广播星历	379	10	1.74
	PPP-B2b	26		
	WUM	7		
BDS-3 B1I/B3I	广播星历	380	10	1.74
	PPP-B2b	27		
	WUM	3		
GPS L1/L2	广播星历	381	8	2.01
	PPP-B2b	30		
	WUM	5		
BDS-3 B1C/B2a&GPS L1/L2	广播星历	342	17.5	1.29
	PPP-B2b	18		
	WUM	3		
BDS-3 B1I/B3I&GPS L1/L2	广播星历	343	17.5	1.29
	PPP-B2b	19		
	WUM	1		

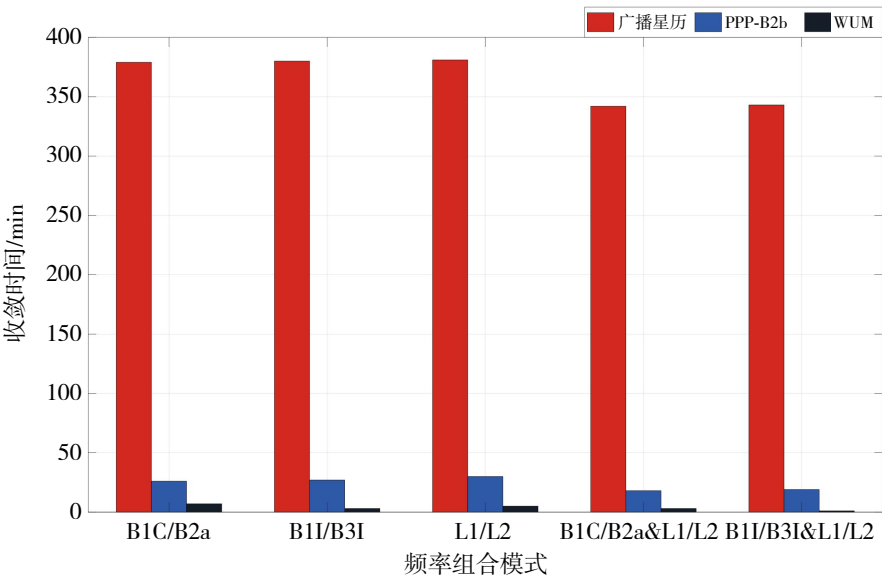


图 9 5 种模式广播星历、PPP-B2b、WUM 产品的收敛时间对比图

结合表 3 和图 10 可知，从开始定位到收敛过程中，单系统中 L1/L2 模式的可视卫星数最少，

PDOP 值最大, 卫星的空间几何分布情况最差, 所以收敛时间最长; 与单系统相比, 双系统组合模式的

可视卫星数明显增多, PDOP 值明显减小, 双系统的空间几何分布情况明显更优, 所以收敛时间更短。

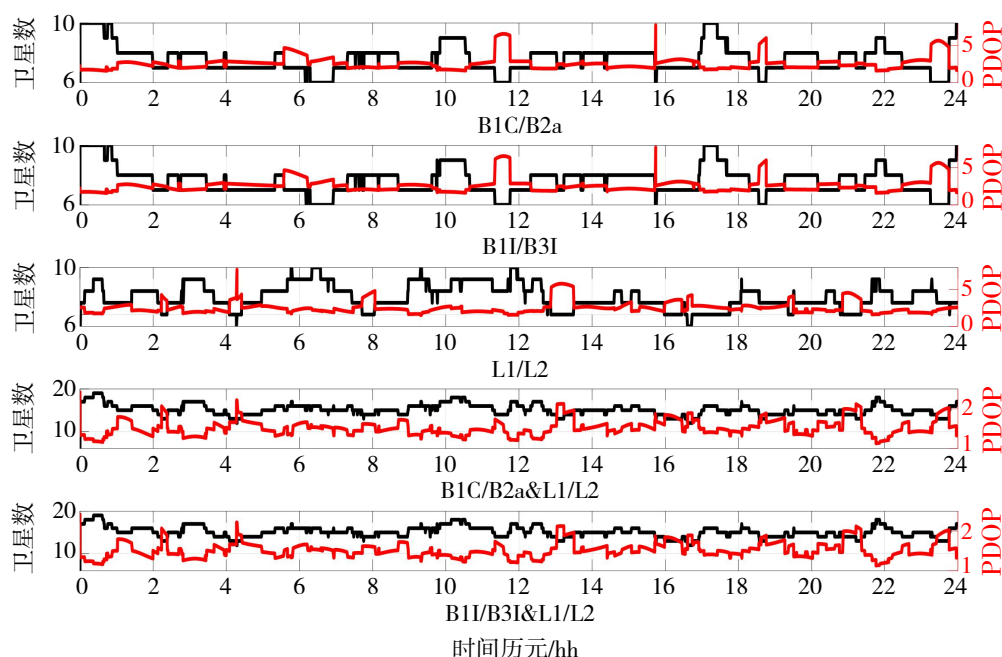


图 10 5 种不同频率组合模式的可视卫星数和 PDOP 值

3 结论

北斗三号为用户提供公开免费的 PPP-B2b 服务, 可实现实时高精度定位。本文开展了基于 PPP-B2b 改正信息的 BDS-3 和 GPS 实时 PPP 数据处理策略的研究, 在搭建的北斗实时静态 PPP 性能评估实验平台上, 对 B1C/B2a、B1I/B3I、L1/L2、B1C/B2a&L1/L2 和 B1I/B3I&L1/L2 5 种频率组合模式的 PPP-B2b 改正信息进行实时静态 PPP 解算。以加拿大 CSRS-PPP 定位结果作为参考基准, 对 PPP-B2b 改正信息的实时静态 PPP 的定位精度和收敛时间进行了全面评估, 并与广播星历、WUM 产品的定位结果进行了对比, 得到以下结论。

① 定位精度方面: 5 种频率组合模式中, 与广播星历相比, PPP-B2b 和 WUM 产品的定位精度均显著提升, 其中 PPP-B2b 的定位精度略低于 WUM 产品。除了 L1/L2 模式外, 其他模式中 PPP-B2b 和 WUM 产品的三维定位精度均小于 5 cm。在 PPP-B2b 的实时静态 PPP 中, 单系统中 B1C/B2a 模式的定位精度最高; B1I/B3I 模式定位精度略低于 B1C/B2a 模式; 双系统组合模式的定位精度高于单系统模式; 5 种频率组合模式中 B1C/B2a&L1/L2 模式的定

位精度最高, PPP-B2b、WUM 产品的三维定位精度分别为 4.08、3.44 cm, 与广播星历相比, 定位精度分别提升了 91.7%、93%。

② 收敛时间方面: 5 种频率组合模式中, PPP-B2b 和 WUM 产品的收敛时间均在 30 min 内, 双系统组合模式的收敛时间明显比单系统更短。在 PPP-B2b 的实时静态 PPP 中, B1C/B2a&L1/L2 模式的收敛时间最短, PPP-B2b、WUM 产品的收敛时间分别为 18、3 min, 与广播星历相比, 收敛时间分别缩短了 94.7%、99.1%。

综上所述, BDS-3 PPP-B2b 信号可为用户提供静态厘米级的实时 PPP 服务, 定位精度和收敛时间均明显优于广播星历。虽然与 WUM 产品的事后静态 PPP 相比, PPP-B2b 的实时定位性能仍有差距, 但 BDS-3 PPP-B2b 信号由接收机直接获取, 无需依赖网络, 更容易实现实时高精度定位。下一步将继续研究动态条件下 PPP-B2b 改正信息的实时 PPP 定位性能。

致谢

感谢国家科技基础条件平台—国家空间科学数据中心 (<http://www.nssde.ac.cn>) 提供的数据。

参考文献:

- [1] LIU C, YAO Z, WANG D, et al. Multiplexing modulation design optimization and quality evaluation of BDS-3 PPP service signal[J]. *Satellite Navigation*, 2022, 3(1): 47-59.
- [2] 蔡洪亮, 孟轶男, 耿长江, 等. 北斗三号全球导航卫星系统服务性能评估: 定位导航授时、星基增强、精密单点定位、短报文通信与国际搜救[J]. *测绘学报*, 2021, 50(4): 427-435.
- [3] YANG Y X, GAO W G, GUO S R, et al. Introduction to BeiDou-3 Navigation Satellite System[J]. *Navigation: Journal of the Institute of Navigation*, 2019, 66(1): 7-18.
- [4] YANG Y X, DING Q, GAO W G, et al. Principle and performance of BDSBAS and PPP-B2b of BDS-3[J]. *Satellite Navigation*, 2022, 3(1): 25-33.
- [5] 王天润, 袁德宝, 李允钊, 等. 不同 IGS 分析中心 BDS-3 实时精密轨道和钟差产品精度评估[J]. *大地测量与地球动力学*, 2024, 44(5): 461-467.
- [6] BANVILLE S, GENG J, LOYER S, et al. On the interoperability of IGS products for precise point positioning with ambiguity resolution[J]. *Journal of Geodesy*, 2020, 94(B3): 200-222.
- [7] 焦国强, 宋淑丽. 基于 PPP 的 iGMAS 综合产品应用测试[J]. *大地测量与地球动力学*, 2019, 39(11): 1171-1177.
- [8] SINAN B, HALIS M S. Sub-meter-level navigation with an enhanced multi-GNSS single-point positioning algorithm using iGMAS ultra-rapid products[J]. *Journal of Navigation*, 2023, 76(1): 133-151.
- [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精密单点定位服务信号 PPP-B2b (1.0 版)[EB/OL]. (2020-08-03) [2024-06-05]. <http://www.beidou.gov.cn/zt/xwfbh/jjcktqkxwfbh/gdxw6/202008/P020200803322412539295.pdf>.
- [10] 王翔, 聂志喜, 王振杰, 等. 北斗三号 PPP-B2b 服务的海洋实时精密单点定位性能评估[J]. *导航定位学报*, 2023, 11(4): 18-23.
- [11] GENG T, LI Z Q, XIE X, et al. Real-time ocean precise point positioning with BDS-3 service signal PPP-B2b[J]. *Measurement*, 2022(203): 111911.
- [12] YU D Y, LI H P, JI B, et al. Analysis of marine real-time PPP accuracy with the BDS-3 PPP-B2b service[J]. *Computers and Electrical Engineering*, 2025(123B): 110102.
- [13] 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.
- [14] LIU C, GAO W G, LIU T X, et al. Design and implementation of a BDS precise point positioning service[J]. *Navigation Journal of the Institute of Navigation*, 2020, 67(4): 875-891.
- [15] 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.
- [16] 郭斐, 周超, 吴子恒. 北斗三号 PPP-B2b 信号精度及精密单点定位性能评估[J]. *南京信息工程大学学报(自然科学版)*, 2022, 14(6): 658-666.
- [17] 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.
- [18] 包林鹏, 曾琪, 万丽华. BDS3/GPS PPP-B2b 定位收敛性能分析[J]. *南京信息工程大学学报(自然科学版)*, 2022, 14(6): 731-736.
- [19] 宋伟伟, 宋啟晟, 何倩倩, 等. 高精度电离层产品增强 PPP-B2b 定位性能分析[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2024, 49(9): 1517-1526.
- [20] XU Y, ZHAO P P, WANG J, et al. Performance assess of BDS-3 PPP-B2b signal service and its application in precipitable water vapor retrieval[R]. 2024.
- [21] DAI W J, QI Q P, LIN C, et al. Real-time uncombined PPP using BDS-3 PPP-B2b products with different multi-frequency integrations and refined stochastic model[J]. *Advances in Space Research*, 2024, 74(11): 7212-7225.
- [22] TAO J, ZHANG G J, CHEN G, et al. Real-time estimation of multi-frequency phase observable-specific bias for the BDS3 PPP-B2b service[J]. *GPS Solutions*, 2025, 29(1): 1-15.
- [23] 杜彦君, 贾小林, 姚顽强, 等. 卫星差分码偏差对北斗三号双频精密单点定位的影响[J]. *国防科技大学学报*, 2024, 46(1): 42-50.
- [24] 史俊波, 董新莹, 欧阳晨皓, 等. 基于北斗三号 PPP 服务的快速静态和低动态定位性能分析[J]. *大地测量与地球动力学*, 2023, 43(10): 997-1002.
- [25] 杨金明, 马红皎. 基于“北斗”三号 PPP-B2b 的定位与时间传递[J]. *电讯技术*, 2023, 63(12): 1951-1957.
- [26] 徐鑫哲, 何秀凤, 周峰, 等. 不同分析中心产品精密单点定位性能评估[J]. *导航定位学报*, 2024, 12(5): 9-18.