

引文格式: 宋子远, 陈俊平, 张益泽, 等. BDS-3 B2b-PPP URA 评估 精化与播发方法[J]. 导航定位学报, 2024, 12(4): 58-67. (SONG Ziyuan, CHEN Junping, ZHANG Yize, et al. Methods of URA evaluation refinement and re-broadcast based on BDS-3 B2b-PPP service[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2024, 12(4): 58-67.) DOI:10.16547/j.cnki.10-1096.20240407.

# BDS-3 B2b-PPP URA 评估 精化与播发方法

宋子远<sup>1,2</sup>, 陈俊平<sup>1,3</sup>, 张益泽<sup>1,3</sup>, 唐文杰<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 100049;  
3. 上海市空间导航与定位技术重点实验室, 上海 200030)

**摘要:** 用户距离精度指数 (URAI) 作为导航系统定位服务完好性标识, 在提供卫星可用性信息的同时, 也反映了卫星的轨道钟差精度。本文提出将 B2b 电文中随轨道改正数播发的 URAI 信息恢复为用户距离精度 (URA), 并用于 B2b-PPP 的随机模型构建。对其进行定位性能评估, 发现 B2b 自身播发的 URA 精度较差。针对该问题, 利用分布在中国及周边区域的多个全球卫星导航系统 (GNSS) 监测站对 B2b 的 URA 参数进行重估计。实验结果表明: 精化后的 URA 能显著提升 B2b-PPP 的服务性能。相比于仅考虑观测噪声和高度角的随机模型, 使用精化后的 URA 作为随机模型, 动态和静态定位模式下的收敛时间提升分别达到 18.9%、14.5%; 收敛后定位精度提升分别达到 11.2%、8.9%。在此基础上, 进一步结合北斗卫星导航系统 (BDS) 短报文, 提出一种精化后 URA 的播发方法, 结合现有短报文通信效率进一步分析了精化 URA 的用户使用性能。

**关键词:** 北斗三号全球卫星导航系统 (BDS-3); B2b 精密单点定位 (B2b-PPP); 用户距离精度 (URA); 定位随机模型; BDS 短报文 (SMC)

中图分类号: P228 文献标志码: A 文章编号: 2095-4999(2024)04-0056-10

## Methods of URA evaluation refinement and re-broadcast based on BDS-3 B2b-PPP service

SONG Ziyuan<sup>1,2</sup>, CHEN Junping<sup>1,3</sup>, ZHANG Yize<sup>1,3</sup>, TANG Wenjie<sup>1,2</sup>

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;  
2. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;  
3. Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Positioning Techniques, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** The user range accuracy index (URAI) serves as an indicator of the integrity of positioning service systems, providing satellite availability information while also reflecting the accuracy of satellite orbit and clock corrections. This paper initially utilized the user range accuracy (URA) information broadcasted alongside orbit corrections in the BDS-3 B2b precise point positioning (B2b-PPP) service for positioning stochastic model establishment and evaluation. Statistical analysis demonstrated the relatively poor accuracy of URA broadcasted by BDS-3 B2b itself. Therefore, this study re-estimated the B2b URA parameters using multiple global navigation satellite system (GNSS) stations distributed in China and surrounding areas as monitoring stations. Positioning verification showed that refined URA significantly enhanced B2b-PPP service performance: using refined URA as part of the positioning stochastic model results in a 18.9% and 14.5% reduction in convergence time for dynamic and static positioning modes, respectively, and an improvement of 11.2% and 8.9% in post-convergence positioning accuracy.

收稿日期: 2024-03-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11673050); 国家重点研发计划项目 (2018YFB0504300); 上海张江国家自主创新示范区专项发展资金重大项目 (ZJ2018-ZD-009)。

第一作者简介: 宋子远 (1996—), 男, 山东淄博人, 博士研究生, 研究方向为 GNSS 精密定位数据处理。

通信作者简介: 陈俊平 (1980—), 男, 江西宜春人, 博士, 研究员, 研究方向为 GNSS 精密定轨定位、北斗地面运控信息处理技术。

Building upon this, the paper further proposed a refined URA broadcast method integrated with BDS short message communication (SMC) system. By utilizing practical short message communication devices, the study analyzed the impact of existing short message communication efficiency on the performance of refined URA.

**Keywords:** BeiDou-3 global navigation satellite system (BDS-3); B2b precise point positioning (B2b-PPP); user range accuracy (URA); positioning stochastic model; BDS short message communication (SMC)

## 0 引言

精密单点定位 (precise point positioning, PPP) 仅需一台接收机, 即可获得厘米级精度的用户位置信息。自 21 世纪以来, 因其用户易操作性和结果高精度受到了全球导航定位系统 (global navigation satellite system, GNSS) 领域广大学者的广泛关注<sup>[1-2]</sup>。自 2013 年国际 GNSS 服务组织 (International GNSS Service, IGS) 正式提出实时服务 (real-time service, RTS) 以来, 实时 PPP (real-time PPP, RT-PPP) 技术开始更多受到学者关注<sup>[3]</sup>。RT-PPP 依赖于广播星历及实时轨道、钟差改正等状态域参数 (state space representation, SSR)<sup>[4]</sup>, 按照国际海运事业无线电技术委员会 (Radio Technical Commission for Maritime Services, RTCM) 制定的格式标准<sup>[5]</sup>, 以 NTRIP (networked transport of RTCM via internet protocol) 协议进行网络播发<sup>[6]</sup>。RT-PPP 自问世以来已得到广泛利用, 为用户提供分米至厘米级位置服务<sup>[7-8]</sup>。

随着星基增强定位服务的不断发展, 许多卫星导航系统已将 RT-PPP 融入其公开服务中。如, 欧洲的伽利略高精度服务 (high accuracy service, HAS) 于 2023 年 1 月 24 日开始试运行, 致力于为全球用户提供水平和垂直精度分别为 0.2 和 0.4 m 的定位服务<sup>[9-10]</sup>。北斗卫星导航系统 (BeiDou navigation satellite system, BDS) 自完成北斗卫星导航 (区域) 系统即北斗二号 (BeiDou navigation satellite (regional) system, BDS-2) 建设以来, 开始为中国及周边地区用户提供分米级实时位置服务<sup>[11-13]</sup>。然而, 该增强服务仅对授权用户开放<sup>[14-15]</sup>。北斗三号全球卫星导航系统 (BeiDou-3 global navigation satellite system, BDS-3) 建成后, 公开的 RT-PPP 服务于 2021 年 7 月正式宣布上线。BDS-3 中 RT-PPP 的 SSR 改正数调制于 B2b 信号中, 由 BDS-3 地球同步轨道 (geostationary orbit, GEO) 卫星播发, 可为中国及周边地区用户提供分米至厘米级定位服务<sup>[16]</sup>。

自 BDS-3 提供精密单点定位服务 (B2b-PPP) 以来, 已经有许多学者对其性能进行了相关研究。

文献[17]评估了 B2b 的轨道和钟差精度, B2b 精密定位服务中北斗三号中圆轨道 (medium Earth orbit, MEO) 卫星的轨道精度在径向、切向和法向分别达到了 6.8、33.4 和 36.6 cm, 而其钟差精度达到 0.12 ns。文献[18]将 BDS-3 PPP-B2b 实时产品与法国空间研究中心 (Centre National d'Etudes Spatiales, CNES) 提供的实时产品进行了对比, 表明 B2b-PPP 服务性能与 CNES RTS 基本一致。文献[19]对 B2b-PPP 服务的长期稳定性进行了验证。文献[20-21]进一步评估了不同场景下 B2b-PPP 动态实时定位的精度。文献[22]通过对 B2b-PPP 施加外部高精度电离层约束来进一步提升其定位性能。通过众多学者的研究, 目前 B2b-PPP 基本能在 20 min 内实现三维误差小于 0.3 m 的实时动态定位。

B2b-PPP 播发的改正数除了轨道、钟差及卫星伪距码偏差 (differential code bias, DCB) 参数外, 还包括用户距离精度指数 (user range accuracy index, URAI)。URAI 由用户精度等级和用户精度指数 2 个部分构成, 用户可根据这 2 个参数恢复卫星的用户距离精度 (user range accuracy, URA)<sup>[16]</sup>。URA 作为定位服务系统的完好性标识, 在提供卫星可用性信息的同时, 其数值本身也反映了卫星的轨道钟差精度, 可被用于用户定位时随机模型的构建<sup>[23]</sup>。然而, 目前尚未有文章对 B2b 中播发的 URA 参数进行进一步研究。因此本文首次提出将 B2b 中播发的 URA 参数用于 B2b-PPP 的随机模型, 通过定位验证, 发现 B2b 系统自身播发 URA 精度较差, 无法满足 B2b-PPP 随机模型的优化。在此基础上, 本文提出了一种 URA 精化方法, 利用多个 IGS 监测站对 B2b URA 进行重估计。本文通过定位验证证明了优化 URA 的有效性, 并进一步设计了一种联合 BDS 短报文通信 (short message communication, SMC) 系统对精化 URA 进行编码、播发的方法。

## 1 B2b-PPP 改正数与函数模型介绍

### 1.1 BDS B2b 精密定位改正数与使用方法

BDS B2b 精密定位服务改正数由卫星掩

码、卫星轨道改正、卫星 URA、卫星钟差改正及卫星 DCB 构成, 5 种改正数目前共分 4 种类

型通过 B2b 信号向用户播发, 各类型信息如表 1 所示。

表 1 BDS-3 B2b 精密定位服务改正数信息

类型	播发信息	支持系统	播发频率	有效时长
1	卫星掩码	GPS+BDS-3	48	—
2	卫星轨道改正和 URAI	GPS+BDS-3	48	96
3	卫星伪距码偏差改正	BDS-3	48	86 400
4	卫星钟差改正	GPS+BDS-3	6	12

卫星掩码需要在对 B2b 精密改正信息解码时匹配钟差改正数使用; 轨道、钟差改正数需要配合广播星历使用。其中, 使用改正数恢复卫星精密坐标的公式可表示为

$$\mathbf{X}_{\text{prec}}^s = \mathbf{X}_{\text{brd}}^s - \boldsymbol{\delta}_{\text{ECEF}}^s \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{X}_{\text{prec}}^s$  为恢复后的卫星 s 精密坐标;  $\mathbf{X}_{\text{brd}}^s$  为使用广播星历计算的卫星 s 的坐标;  $\boldsymbol{\delta}_{\text{ECEF}}^s$  为地心地固 (Earth-center-Earth-fixed, ECEF) 坐标框架下卫星 s 的 B2b 轨道改正数。

而原始 B2b 轨道改正数播发时是基于卫星坐标系的, 因此需要对其进行卫星轨道坐标系至 ECEF 坐标系的转换, 转换关系可表示为

$$\boldsymbol{\delta}_{\text{ECEF}}^s = [\mathbf{e}_r, \mathbf{e}_a, \mathbf{e}_c] \cdot \boldsymbol{\delta}^s \quad (2)$$

其中,

$$\begin{cases} \mathbf{e}_a = \mathbf{e}_c \cdot \mathbf{e}_r \\ \mathbf{e}_c = \frac{\mathbf{r} \cdot \dot{\mathbf{r}}}{|\mathbf{r} \cdot \dot{\mathbf{r}}|} \\ \mathbf{e}_r = \frac{\dot{\mathbf{r}}}{|\dot{\mathbf{r}}|} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{e}_r$ 、 $\mathbf{e}_a$ 、 $\mathbf{e}_c$  分别为卫星坐标系下径向、切向、法向的方向向量;  $\boldsymbol{\delta}^s$  为 B2b 播发的基于轨道坐标系的改正数;  $\mathbf{r}$  和  $\dot{\mathbf{r}}$  分别代表卫星在 ECEF 坐标系下的位置和速度向量, 可通过广播星历计算。

B2b 改正数中 URAI 通过用户精度等级  $I_{\text{class}}$  及用户精度指数  $I_{\text{value}}$  2 个参数, 连同轨道改正数下播给用户, 用户端恢复卫星 URA  $I_{\text{URA}}$  的公式可表达为

$$I_{\text{URA}} = 3^{I_{\text{class}}} (1 + 0.25 \times I_{\text{value}}) - 1 \quad (4)$$

此外, 使用 B2b 钟差对钟差进行精密改正公式可表达为

$$C_{\text{prec}}^s = C_{\text{BRD}} - \frac{\delta_c}{c} \quad (5)$$

式中:  $C_{\text{BRD}}$  使用广播星历计算得到的卫星钟差;  $\delta_c$  表示 B2b 的钟差改正数;  $c$  为光速。

## 1.2 BDS B2b 定位函数模型与随机模型

为了验证 B2b 精密定位服务性能, 本文定位模型使用传统双频消电离层组合, 其函数模型可写为

$$\begin{cases} P_{\text{IF},r}^s = \rho_r^s + c(t_{r,\text{IF}} - t_{\text{IF}}^s) + M_r^s d_{\text{trop},r} + (B_{\text{IF},r} - B_{\text{IF}}^s) + \varepsilon(P_{\text{IF},r}^s) \\ \Phi_{\text{IF},r}^s = \rho_r^s + c(t_{r,\text{IF}} - t_{\text{IF}}^s) + M_r^s d_{\text{trop},r} + (b_{\text{IF},r} - b_{\text{IF}}^s) + \\ \lambda_{\text{IF}} N_{\text{IF}}^s + \varepsilon(\Phi_{\text{IF},r}^s) \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $P_{\text{IF},r}^s$  和  $\Phi_{\text{IF},r}^s$  分别表示无电离层组合的伪距和相位观测值;  $\rho_r^s$  表示卫星到接收机的几何距离;  $t_{r,\text{IF}}$  和  $t_{\text{IF}}^s$  分别表示无电离层组合中的接收机钟差和卫星钟差, 需要说明的是, 此处  $\rho_r^s$  和  $t_{\text{IF}}^s$  计算时使用了 B2b 轨道钟差进行了改正;  $d_{\text{trop},r}$  和  $M_r^s$  分别代表天顶对流层延迟和投影系数;  $B_{\text{IF},r}$  和  $B_{\text{IF}}^s$  分别代表了接收机和卫星的无电离层组合硬件延迟;  $b_{\text{IF},r}$  和  $b_{\text{IF}}^s$  则为各自的相位无电离层组合硬件延迟;  $N_{\text{IF}}^s$  和  $\lambda_{\text{IF}}$  分别表示无电离层组合的相位模糊度及其波长;  $\varepsilon(P_{\text{IF},r}^s)$  和  $\varepsilon(\Phi_{\text{IF},r}^s)$  分别代表了伪距和相位无电离层组合观测值的观测噪声。在参数重组后, 上式可进一步表达为

$$\begin{cases} P_{\text{IF},r}^s = \rho_r^s + c(\bar{t}_{r,\text{IF}} - t_{\text{IF}}^s) + M_r^s d_{\text{trop},r} - B_{\text{IF}}^s + \varepsilon(P_{\text{IF},r}^s) \\ \Phi_{\text{IF},r}^s = \rho_r^s + c(\bar{t}_{r,\text{IF}} - t_{\text{IF}}^s) + M_r^s d_{\text{trop},r} + \bar{N}_{\text{IF}}^s + \varepsilon(\Phi_{\text{IF},r}^s) \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\bar{t}_{r,\text{IF}} = t_{r,\text{IF}} + B_{\text{IF},r}$ ;  $\bar{N}_{\text{IF}}^s = \lambda_{\text{IF}} N_{\text{IF}}^s + b_{\text{IF},r} - b_{\text{IF}}^s - B_{\text{IF},r}$ 。

考虑到 B2b 支持 BDS-3 与全球定位系统 (global positioning system, GPS) 双系统, 在参数

估计时, 待估参数向量  $\mathbf{d}_x$  可以表达为

$$\mathbf{d}_x = [\overline{\mathbf{A}}_r, \overline{\tau}_{r,IF}, \overline{d}_{trop,r}, \overline{\mathbf{N}}_{IF}^s, d_{ISB}] \quad (8)$$

式中:  $\overline{\mathbf{A}}_r$  为位置向量;  $\overline{\tau}_{r,IF}$  为参数重组后的接收机钟差;  $\overline{d}_{trop,r}$  为天顶对流层湿延迟;  $\overline{\mathbf{N}}_{IF}^s$  为参数重组后的电离层组合浮点模糊度向量;  $d_{ISB}$  为 GPS 和 BDS-3 的系统间偏差 (inter system bias, ISB); 本文中 ISB 在卡尔曼滤波中作为白噪声进行估计, 对于 GPS 系统使用 L1/L2 频点, BDS-3 系统使用 B1/B3 频点。其中 GPS 系统使用 LNAV 广播星历, 无须进行 DCB 改正; 由于 BDS-3 钟差基准为 B3I, 而 B2b 改正数匹配的 B-CNAV1 导航电文中时间群延迟 (time group delay, TGD) 改正是基于 B1C 和 B2a 频点, 此时在使用 B1I/B3I 进行双频定位时则需要使用 B2b type 3 类型播发的 DCB 进行码偏差改正。

上述函数模型对应的随机模型可表达为

$$\sigma^{s^2} = \sigma_{noise}^{s^2} + \sigma_{orb}^2 + \sigma_{clk}^2 + \sigma_{trop}^2 + \sigma_{ION}^2 \quad (9)$$

式中:  $\sigma^{s^2}$  为卫星  $s$  的观测值方差;  $\sigma_{orb}$ 、 $\sigma_{clk}$ 、 $\sigma_{trop}$  和  $\sigma_{ION}$  分别为轨道、钟差、对流层和电离层的改正误差, 因轨道和钟差先验精度未知,  $\sigma_{orb}$ 、 $\sigma_{clk}$  数值皆设置为 0; 除此之外对流层进行参数估计, 且无电离层组合消除了电离层延迟的一阶项, 因此  $\sigma_{trop}$  和  $\sigma_{ION}$  在默认状态下同样为 0;  $\sigma_{noise}^s$  为观测噪声与高度角中误差因子, 其计算公式可以表示为

$$\sigma_{noise}^s = \sigma_{obs} \cdot \varphi = \sigma_{obs} \cdot \left( 0.5 + \frac{0.5}{\sin(A_{ele})} \right) \quad (10)$$

式中:  $\sigma_{obs}$  为观测值噪声, 对于原始伪距观测值  $\sigma_{obs}$  一般可设置为 0.3 m, 原始相位观测值则设置为 0.003 m, 当使用双频无电离层组合时会放大观测噪声;  $A_{ele}$  代表卫星  $s$  的高度角;  $\varphi$  为高度角相关的系数因子。

因此在不使用卫星 URA 定权的情况下, 用户定位随机模型可表达为

$$\sigma^s = \sigma_{obs} \cdot \left( 0.5 + \frac{0.5}{\sin(A_{ele})} \right) \quad (11)$$

## 2 BDS B2b URA 评估、精化与播发方法

本文在原有 B2b-PPP 定位随机模型的基础上, 利用 B2b 中播发的 URA 参数进行随机模型构建,

评估其精度与 PPP 定位性能。在此基础上进一步提出一种 URA 优化估计策略, 通过多种粗差探测方法获得各颗卫星的 URA 并再次用于定位验证。同时, 根据优化 URA 的数值分布特点, 结合 BDS 短报文链路进一步提出一种有效的优化 URA 播发策略, 考虑短报文通信延迟、数据丢包等情况进一步验证了该播发方式的可行性、可靠性。总体研究流程如图 1 所示。

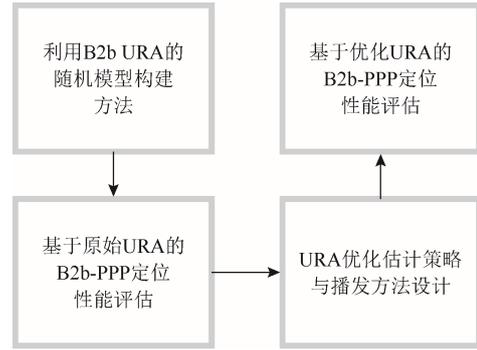


图 1 基于 BDS-3 B2b URA 的研究流程

### 2.1 B2b URA 随机模型与定位精度评估

一般对于伪距单点定位 (standard point positioning, SPP), URA 一般通过伪距残差计算得到<sup>[24]</sup>; 而本文中对于 B2b-PPP, URA 参数  $\sigma_{URA}^s$  需要由相位残差统计得到, 其数值反映了卫星  $s$  的轨道、钟差误差、相位噪声及其他未模型化偏差对该测站对卫星径向的影响, 因此将其用于定位随机模型构建时, 第  $s$  颗卫星伪距观测值随机模型依旧通过式(11)计算, 而相位观测值的随机模型可以表达为

$$\sigma^s = \sigma_{URA}^s \cdot \varphi = \sigma_{URA}^s \cdot \left( 0.5 + \frac{0.5}{\sin(A_{ele})} \right) \quad (12)$$

为了对 URA 定权方法进行性能验证, 首先选取了 7 个 IGS 测站连续一周的观测数据来分别进行动、静态定位解算, 此处使用未考虑 URA 的定权方法用作对比。本文中, 数据采样率为 30 s, 动态和静态模式下的水平和高程收敛阈值皆分别设置为 0.2 和 0.3 m, 收敛条件判定为连续 10 个历元定位误差小于上述阈值。如图 2 所示为 WUH2 测站一天的动态定位误差时间序列。由图 2 可知, 相比于仅考虑观测噪声和高度角的定权方式, 使用 URA 定权的定位解算精度反而降低。对所有测站定位结果进行统计, 统计结果如表 2 所示。由表 2 可知, 不论是静态还是动态模式下, 使用 URA 定权的收敛时间都显著增大。如图 3 所示为 B2b 播

发的多天 URA 时间序列。由图 3 可知, BDS-3 卫星 URA 普遍小于 GPS, 与卫星实际轨道钟差精度关系一致<sup>[19]</sup>。然而 B2b 播发的 URA 数值中很大一部分比例在 0.1 m 以上, 对于 GPS 卫星最大接近 0.7 m, 其数值相比 B2b 实际径向轨道钟差精度偏大<sup>[17]</sup>, 未真实反映轨道钟差误差对用户定位的影响; 且受播发带宽限制, 各卫星 URA 值区分度较低。在随机模型中, 原始伪距和相位观测值的观测

噪声分别设置为 0.3 和 0.003 m。因此, URA 较大的数值会导致相位观测值的相对权重大幅减小, 造成 B2b-PPP 收敛时间的显著增加。据此可知 B2b 自身播发的 URA 本身只反映 B2b 中不同卫星的轨道误差精度关系, 可用于卫星完好性判断, 但不适用于 B2b-PPP 随机模型。据此, 本文进一步提出了可同时用于完好性判断和随机模型构建的 B2b URA 计算方法。

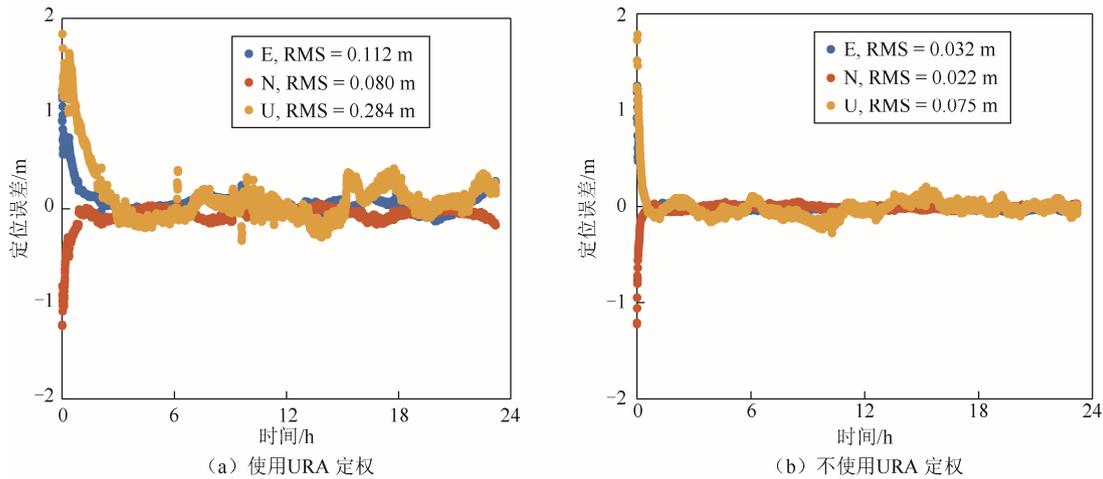


图 2 分别采用、不采用原始播发 URA 定权单站单天动态定位误差时间序列对比 (测站 WUH2, 2023 年年积日 318)

表 2 使用/不使用 B2b 自身播发 URA 定权定位性能统计

定位模式	动态		静态	
	收敛精度/m	收敛时间/min	收敛精度/m	收敛时间/min
URA 定权	0.20	117.0	0.05	90.0
非 URA 定权	0.08	20.3	0.04	18.1

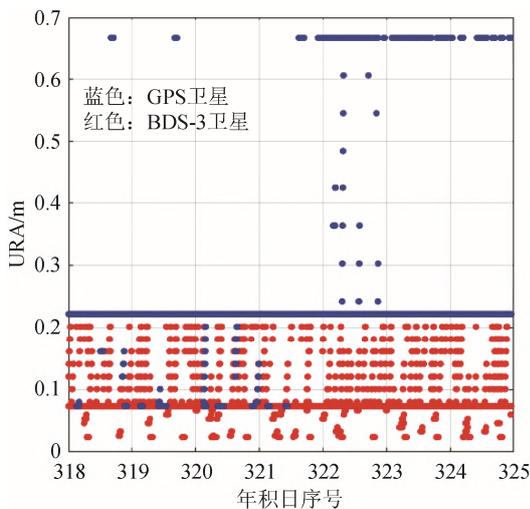


图 3 B2b 播发 URA 多天时间序列 (2023 年年积日 318—324)

## 2.2 B2b URA 优化估计策略

基于 B2b 自身播发的 URA 精度较差的现状, 本文提出一种基于 B2b 产品的 URA 优化方法, 使 URA 本身不改变 B2b 轨道钟差精度, 但可为用户提供更准确的轨道钟差误差信息。通过使用 IGS 分布于中国及其周边区域的多个监测站数据, 实时重估计 B2b 产品中各卫星 URA。如图 4 所示为本文进行 URA 优化估计和定位性能的测站, 其中, 红色三角标注了服务端 11 个 URA 优化估计基准站的位置与站名, 蓝色圆点测站作为用户站进行定位性能评估, 本文使用 2023 年年积日 318—324 共 7 d 的数据进行实验。本节首先介绍 URA 的计算方法, 并进一步详细介绍 URA 估计过程中的解算策略。

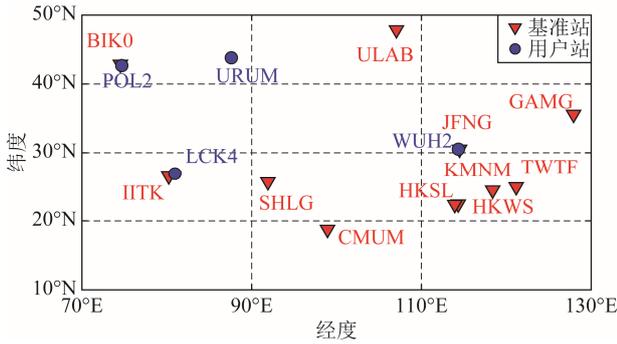


图 4 IGS 测站分布

URA 表征监测站相位残差的精度指标, 可表示为

$$I_{\text{URA}_j^s} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \bar{V}_{j,r}^{s2}}{n}} \quad (13)$$

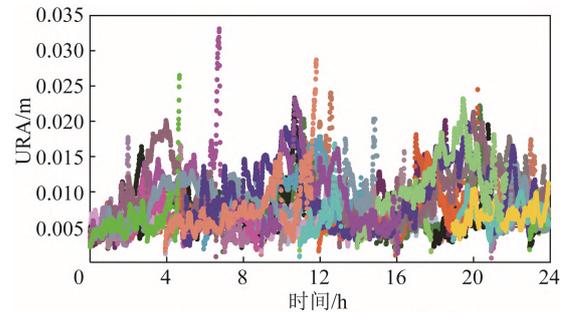
式中:  $I_{\text{URA}_j^s}$  为卫星  $s$  在  $j$  频点的 URA 值, 本文中用户端采用双频消电离层组合模型, 因此本节估计 IF 频点 URA;  $\bar{V}_{j,r}^s$  为测站  $r$  对卫星  $s$  在  $j$  频点的相位验后残差;  $n$  为卫星  $s$  在当前历元的验后残差样本数, 由拟合样本数以及观测到该卫星的测站数量决定。

为了估算 B2b 各卫星 URA, 首先从 IGS 提供的精密坐标文件 (solution independent exchange format, SINEX) 获取各监测站精确坐标。利用实时接收的 BDS B2b 轨道钟差改正数及各监测站的实时观测数据, 对各站逐历元进行固定站坐标的双频消电离层组合卡尔曼滤波解算。此时待估参数包括接收机钟差, 天顶对流层湿延迟及各卫星消电离层组合模糊度; 为提高 URA 估计精度, 在系统端初始化时对各历元验后残差进行累计, 直到建立 30 个历元的验后残差样本后开始进行 URA 估计, 并将其作为滑动窗口依次估计最新历元的各卫星 URA 值。

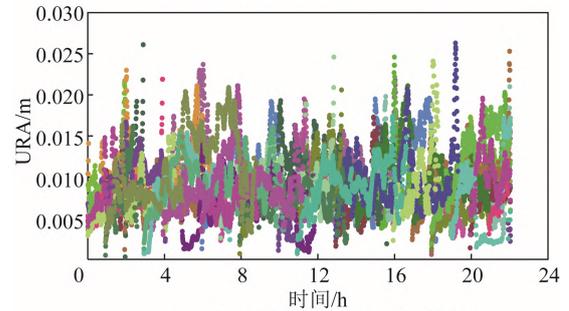
需要特别说明的是, 本文在进行 URA 估计时一共有 2 次粗差探测与样本过滤流程来对 URA 计算进行质量控制。第一次是在计算 URA 之前对统计样本量进行筛选: 1) 删掉卫星高度角小于  $15^\circ$  时的相位残差, 避免较大的相位观测值噪声或多路径效应污染样本; 2) 监测站实时滤波解算中进行验后粗差探测和剔除过程中, 被踢掉的卫星验后残差不参与 URA 统计值计算。第二次是在计算完所有卫星 URA 时, 对该卫星是否可用进行评价: 1) 统计样本中, 超过 3 个监测站连续对某一颗卫

星验后粗差检测未通过的, 认为该卫星轨道钟差存在精度问题, 标记该卫星不可用; 2) 对于 URA 超过 3 倍中误差 ( $\leq 99.7\%$ ) 的值, 认为是粗差, 标记该卫星不可用。3 倍中误差可通过多站多天解算的 URA 统计得到。

如图 5 所示为系统端计算得到的 BDS-3 和 GPS 时长一天的优化 URA 时间序列图中不同颜色表示不同卫星。与图 3 相比, 可以看出精化后的 URA 时间序列值域分布明显小于原始 URA 时间序列。其值域分布无论是 BDS-3 还是 GPS 卫星皆为厘米级, 且绝大部分在 2 cm 以内。



(a) BDS-3 卫星精化 URA 时间序列



(b) GPS 卫星精化 URA 时间序列

图 5 优化 URA 单天时间序列 (2023 年年积日 319)

### 2.3 基于 BDS 短报文的精化 URA 播发方法

在系统端进行 URA 优化估计后, 可选择通过网络进行播发, 亦可通过 BDS 短报文通信设备进行数据播发。前者具有更佳的通信效率和传输频率; 而后者可摆脱对互联网的依赖, 在海洋、沙漠等特殊地区保持精化 URA 参数的获取能力。本节以 BDS-3 全球短报文通信 (global short message communication, GSMC) 为例, 设计了一种精化 URA 编码与播发方式。

首先对历元时间信息以信息头形式进行编码, 具体信息包括历元的参考时刻 (GPS 周+GPS 周内秒), 及该历元包含的 URA 卫星总数。报头各参数编码信息如表 3 所示。

表3 信息头编码格式设计

信息头	BDS周	BDS周内秒	卫星数	总计
值域	0~4 095	0~1 048 575	0~63	
精度	1	1	1	
有效值 (十进制)	0~4 095	0~604 800	0~63	
大小/bit	12	20	6	38

在此基础上,对单颗卫星须播发信息进行进一步编码规定。单颗卫星须播发内容包括:系统标识、卫星号及卫星URA。其中URA精度设置为0.1 mm,范围为0~17.8 mm。其中,系统号0、1、2分别表示GPS、Galileo、BDS系统。特别地,当播发值为17.8 mm时,为系统端标记该卫星不可用。单颗卫星具体编码设计信息如表4所示。

综上所述,使用GSMC单次播发编码格式如图6所示,其中报头占46bits,单颗卫星信息占16 bits,按

照此编码方式,单次通信最多可播发30颗卫星的URA信息,满足B2b当前GPS+BDS-3卫星的使用需求。

使用BDS短报文进行优化的B2b URA播发,其优点在于摆脱了对网络信号的依赖,使用GSMC可为全球任意地区用户提供精化URA信息;而其与网络播发相比也存在着卫星端数据丢包频繁、通信时延较长等问题,该问题将影响用户端对优化URA的使用。本文将在3.2节就短报文通信效率进行进一步分析。

表4 单颗卫星信息编码格式设计

单颗卫星信息	系统编号	卫星PRN	卫星URA/mm	总计
值域	0~3	0~63	0~25.6	
精度	1	1	0.1	
有效值(十进制)	0~2	1~63	0~17.8	
大小/bit	2	6	8	16

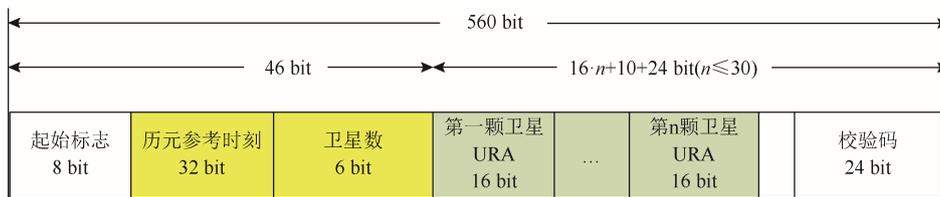


图6 单历元编码格式

### 3 精化B2b URA定位与短报文播发性能评估

#### 3.1 基于精化URA的B2b-PPP定位性能评估

本节将精化后的URA再次用于随机模型并进行定位验证,且与仅使用高度角和观测值精度定

权方式的定位模式进行对比,2种定位模式的数据处理策略如表5所示。需要说明的是,考虑到系统端估计URA前期需要收敛过程,为保证统计结果的可靠性,本节在系统端连续运行1h后再进行用户端B2b-PPP定位性能统计。

表5 B2b-PPP定位数据处理策略

处理策略	优化URA定权B2b-PPP	不使用URA定权B2b-PPP
观测值	GPS: L1+L2 BDS-3: B1+B3	GPS: L1+L2 BDS-3: B1+B3
采样率/s	30	30
轨道钟差	GPS:LNAV+B2b改正数 BDS-3:CNAV-1+B2b改正数	GPS:LNAV+B2b改正数 BDS-3:CNAV-1+B2b改正数
截止高度角/(°)	10	10
滤波方式	卡尔曼滤波	卡尔曼滤波

(续)

处理策略	优化 URA 定权 B2b-PPP	不使用 URA 定权 B2b-PPP
	干延迟: 萨斯塔莫宁	干延迟: 萨斯塔莫宁
对流层延迟	湿延迟: 随机游走 ( $1 \text{ cm/h}^{\frac{1}{2}}$ ) 投影函数: VMF <sup>[25]</sup>	湿延迟: 随机游走 ( $1 \text{ cm/h}^{\frac{1}{2}}$ ) 投影函数: VMF <sup>[25]</sup>
随机模型	URA 与高度角综合定权	观测噪声与高度角综合定权
电离层延迟	双频消电离层组合	双频消电离层组合
系统间偏差	白噪声估计	白噪声估计
卫星伪距硬件延迟	GPS: 无须修正 BDS-3: 使用 B2b 硬件延迟偏差信息修正	GPS: 无须修正 BDS-3: 使用 B2b 硬件延迟偏差信息修正

如图 7 所示为分别使用 2 种不同定权方法的单天解算误差序列。从单天统计值中能看出使用优化后的 URA 定权方式能明显增加动态定位在 3 个方向的统计精度, 其中对 E 方向和 U 方向提升较为明显。

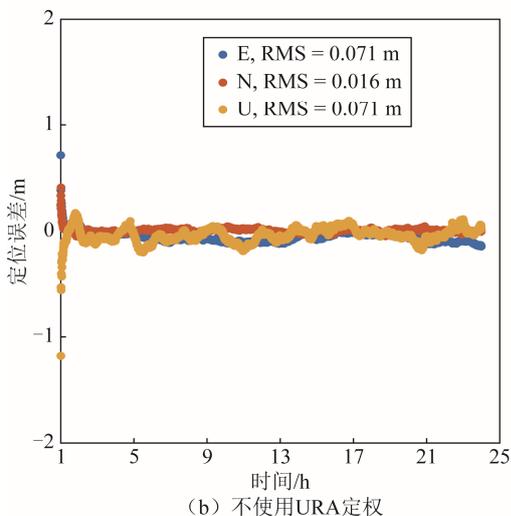
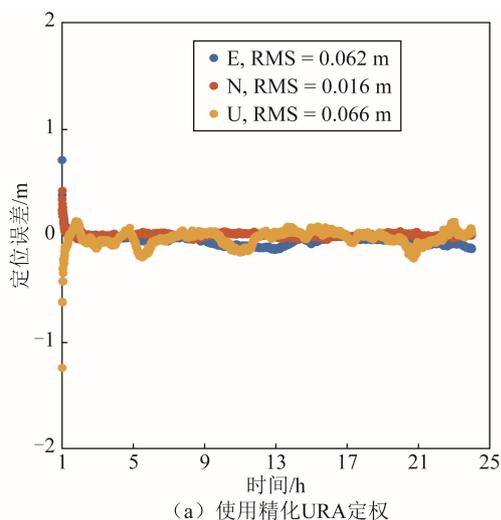


图 7 分别采用、不采用精化 URA 定权单站单天定位误差时间序列对比 (测站 URUM, 2023 年 年积日 319)

如图 8 所示为使用 2 种定权方法, 对所有测站前 0.5 h 收敛精度及收敛测站百分比的统计结果。由图 8 可知, 使用精化 URA 定权能有效增加用户使用 B2b-PPP 前期的收敛速度和定位性能。相对于不使用 URA 进行定权, 使用精化 URA 前半小时平均三维收敛精度提升超过 6 cm, 平均测站收敛百分比前 10 min 提升 50%, 前 15 min 提升 10%, 25 min 钟内 100%测站收敛。如表 6 所示为所有测站的统计结果。使用精化 URA 对 B2b-PPP 收敛时间提升明显, 动态定位收敛时间提升从 13.2 min 缩短至 10.7 min, 提升达 18.9%, 静态定位收敛时间提升 14.5%。由于 URA 提供了更准确的观测值随机模型和卫星完好性信息, 收敛精度也较之前有所提升, 动态和静态收敛精度分别提升了 11.2%和 8.9%。

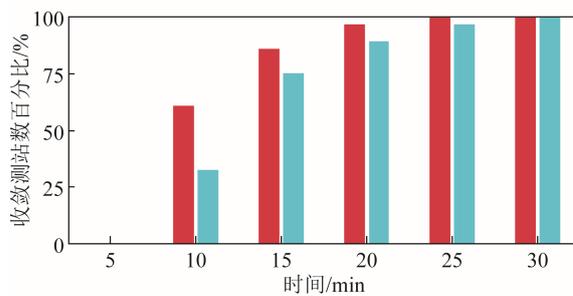
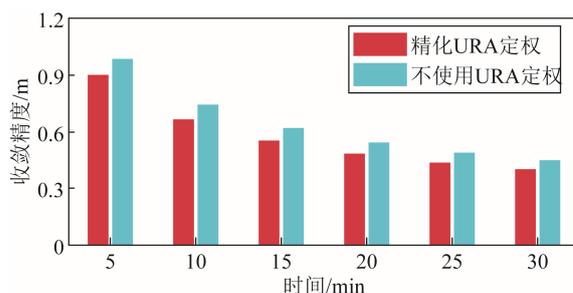


图 8 使用精化 URA 定权与不使用 URA 定权定位前期收敛精度、测站收敛百分比统计

表6 分别使用、不使用精化后 B2b URA 定权定位性能统计

定位模式	动态		静态	
	收敛精度/m	收敛时间/min	收敛精度/m	收敛时间/min
非 URA 定权	0.098	13.2	0.045	11.7
精化 URA 定权	0.087	10.7	0.041	10.0
提升百分比/%	11.2	18.9	8.9	14.5

### 3.2 精化 URA 性能受播发时延影响研究

进一步考虑 SMC 播发频率限制及传输中存在丢包现象可能会导致用户通过 GSMC 收到的 URA 在使用时存在时延问题<sup>[26]</sup>，本文对使用精化 URA 的定位精度随使用时延的影响进行进一步研究。

如图 9 所示为将系统端播发的 URA 分别延长 5~30 min 用户端的定位收敛时间和收敛精度统计。由图 9 可知，时延对用户定位时间影响较小，30 min 时延内收敛时间皆优于不使用 URA 定权策略的收敛时间，可能是由于短时间内各卫星权重比变化较小。相比之下，URA 时延对定位精度影响更为明显，时延超过 20 min 后，使用精化 URA 的精度将比不使用 URA 的定位精度更差，因此为

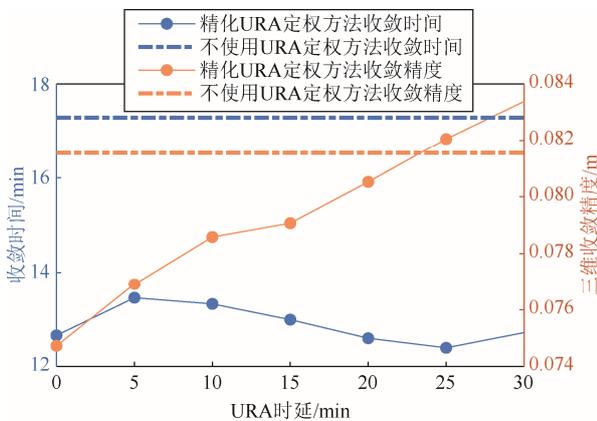


图9 使用精化 URA 定位精度与收敛时间随 URA 收敛时延的变化

保证用户精度，URA 的时延不宜超过 20 min。从文献[26]对短报文通信效率实测来看，超过 97% 的短报文通信丢包/中断连续时长不超过 5 min。因此使用短报文播发的精化 URA 可保证用户定位精度。

## 4 结束语

本文评估了 BDS-3 B2b 精密定位服务中播发的 URA 参数作为定位随机模型参数的实际定位性能，通过实验证明了当前 B2b 播发的 URA 精度较差，不能满足精化 B2b-PPP 随机模型的需要。据此依据 B2b-PPP 的轨道钟差对 URA 提出了一套重估计和播发策略。URA 在精化后能有效提升 B2b-PPP 的服务性能，动态定位收敛时间提升从 13.2 min 缩短至 10.7 min，提升达 18.9%，静态定位收敛时间提升 14.5%。由于 URA 提供了更准确的观测值随机模型和卫星完好性信息，收敛精度也较之前有所提升，动态和静态收敛精度分别提升了 11.2% 和 8.9%。除此之外，本文以使用 BDS-3 全球短报文为例提出了一种优化后 URA 的编码与播发方式。在此基础上，针对短报文自身存在的丢包与数据时延，分析了精化 URA 随时延对定位精度的影响。实验证明，精化 URA 在现有短报文通信频率和丢包率下能够完整发挥其对 B2b-PPP 性能增强的作用。接下来，通过 BDS B2b 实现模糊度固定的精密单点定位 (PPP-AR)，进一步提升 B2b-PPP 定位性能将是下一步研究方向。

## 参考文献

- [1] MALYS S, JENSEN P A. Geodetic point positioning with GPS carrier beat phase data from the CASA UNO experiment[J]. Geophysical Research Letters, 1990, 17(5): 651-654.
- [2] KOUBA J, HÉROUX P. Precise point positioning using IGS orbit and clock products[J]. GPS Solutions, 2001, 5(2): 12-28.
- [3] CHEN Junping, LI Haojun, WU Bin, et al. Performance of real-time precise point positioning[J]. Marine Geodesy, 2013, 36(1): 98-108.
- [4] RTCM SC-104 SSR Working Group and IGS Real-Time Working Group. IGS state space representation (SSR) format version 1.00, 2020, Arlington, TX, USA[EB/OL]. [2024-01-05]. <https://files.igs.org/pub/data/format/>.
- [5] RTCM Special Committee. RTCM Standard 10403.3 differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) services-version 3. 2016. RTCM Special Committee No. 104, Arlington, TX, USA[EB/OL]. [2024-01-05].

- [https://ge0mlib.com/papers/Protocols/RTCM\\_SC-104\\_v3.1.pdf](https://ge0mlib.com/papers/Protocols/RTCM_SC-104_v3.1.pdf).
- [6] WEBER G, MERVART L, LUKES Z, et al. Real-time clock and orbit corrections for improved point positioning via NTRIP[C]// Proceedings of the 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2007). Fort Worth: ION, 2007: 1992-1998.
- [7] SHI Junbo, YUAN Xiuxiao, CAI Yang, et al. GPS real-time precise point positioning for aerial triangulation[J]. GPS Solutions, 2017, 21(2): 405-414.
- [8] WANG Ahao, ZHANG Yize, CHEN Junping, et al. Improving the (re-)convergence of multi-GNSS real-time precise point positioning through regional between-satellite single-differenced ionospheric augmentation[J]. GPS Solutions, 2022, 26(2): 39.
- [9] European GNSS Service Centre. Galileo high accuracy service definition document (HAS SDD) (Issue 1.0)[EB/OL]. [2024-01-06]. 2023. [https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/GalileoHAS-SDD\\_v1.0.pdf](https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/GalileoHAS-SDD_v1.0.pdf).
- [10] FERNANDEZ H I, CHAMORRO M A, CANCELA D S, et al. Galileo high accuracy service:Initial definition and performance[J]. GPS Solutions, 2022, 26(3): 65.
- [11] ZHANG Yize, KUBO Nobuaki, CHEN Junping, et al. Initial positioning assessment of BDS new satellites and new signals[J]. Remote Sensing, 2019, 11(11): 1320.
- [12] 王阿昊, 陈俊平, 张益泽, 等. 基于分区综合改正数的北斗卫星导航系统和 GPS 组合的动态精密单点定位[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(3): 447-455.
- [13] CHEN Junping, ZHANG Yize, YU chao, et al. Models and performance of SBAS and PPP of BDS[J]. Satellite Navigation, 2022, 3(1): 4.
- [14] CHEN Junping, WANG Ahao, ZHANG Yize, et al. BDS satellite-based augmentation service correction parameters and performance assessment[J]. Remote Sensing, 2020, 12(5): 766.
- [15] 陈俊平, 于超, 周建华, 等. 北斗二号/三号融合的分米级星基增强算法与性能分析[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2021, 51(1): 019507.
- [16] CSNO, BeiDou navigation satellite system signal in space interface control document open service signal B2b (Version 1.0)[EB/OL]. [2024-01-08]. 2020. <http://www.beidou.gov.cn/yw/gfgg/201712/W020171222590921042647.pdf>.
- [17] XU Yangyin, YANG Yuanxi, LI Jinlong. Performance evaluation of BDS-3 PPP-B2b precise point positioning service[J]. GPS Solutions, 2021, 25(4): 142.
- [18] TAO jun, LIU Jingnan, HU Zhigang, et al. Initial assessment of the BDS-3 PPP-B2b RTS compared with the CNES RTS[J]. GPS Solutions, 2021, 25(4): 131.
- [19] SUN Shuang, WANG Min, LIU Changjian, et al. Long-term performance analysis of BDS-3 precise point positioning (PPP-B2b) service[J]. GPS Solutions, 2023, 27(2): 69.
- [20] 肖鹏, 孙付平, 张伦东, 等. 北斗三号 PPP-B2b 服务实时动态定位性能分析[J]. 导航定位学报, 2023, 11(5): 21-28.
- [21] GENG Tao, LI Zhiqiang, XIE Xin, et al. Real-time ocean precise point positioning with BDS-3 service signal PPP-B2b[J]. Measurement, 2022, 203: 111911.
- [22] 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/OL]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023. (2023-07-14). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20230030>.
- [23] WANG Jian, LI Qihang, LIU Ruihua. Improvement of positioning accuracy with GNSS using user range accuracy and posterior variance model[C]// Proceedings of the 32nd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2019). Miami, Florida: ION, 2019: 1488-1495.
- [24] 杨赛男. 北斗分米级星基增强系统关键技术研究及精度评估[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- [25] BOEHM J, NIELL A, TREGONING P, et al. Global mapping function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(7): L07304.
- [26] SONG Ziyuan, CHEN Junping, ZHANG Yize, et al. Real-time multi-GNSS precise point positioning with ambiguity resolution based on the BDS-3 global short-message communication function[J]. GPS Solutions, 2023, 27(3): 136.