



### 基于BDS-3/GPS的RTK/B2b-PPP融合切换定位技术

黄洪, 高旺, 缪巍巍, 滕玲, 董方云, 潘树国

#### RTK/B2b-PPP fusion switching positioning technology based on BDS-3/GPS

HUANG Hong, GAO Wang, MIAO Weiwei, TENG Ling, DONG Fangyun, and PAN Shuguo

引用本文:

黄洪, 高旺, 缪巍巍, 等. 基于BDS-3/GPS的RTK/B2b-PPP融合切换定位技术[J]. *全球定位系统*, 2023, 48(4): 57-62. DOI: [10.12265/j.gnss.2023065](https://doi.org/10.12265/j.gnss.2023065)

HUANG Hong, GAO Wang, MIAO Weiwei, et al. RTK/B2b-PPP fusion switching positioning technology based on BDS-3/GPS[J]. *Gnss World of China*, 2023, 48(4): 57-62. DOI: [10.12265/j.gnss.2023065](https://doi.org/10.12265/j.gnss.2023065)

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.gnss.2023065>

#### 您可能感兴趣的其他文章

##### Articles you may be interested in

#### [北斗三号精密单点定位精度分析研究](#)

BDS-3 precision analysis of precise point positioning

*全球定位系统*. 2021, 46(2): 37-43

#### [北斗三号三频组合观测值特性分析研究](#)

Research on the Model of BDS-3 Triple-Frequency Carrier-Phase Combination Observations

*全球定位系统*. 2018, 43(5): 1-8

#### [BDS-2 / BDS-3 / QZSS组合短基线相对定位精度分析](#)

Relative positioning accuracy analysis of BDS-2 / BDS-3 / QZSS combination short baseline

*全球定位系统*. 2020, 45(5): 57-61

#### [BDS-3卫星对BDS全球定位性能提升分析](#)

Analysis on the improvement of BDS-3 satellite to BDS global positioning service

*全球定位系统*. 2019, 44(6): 35-45

#### [北斗二号对北斗三号伪距单点定位精度影响分析](#)

Analysis of the influence of BDS-2 constellation on BDS-3 pseudo-range single point positioning accuracy

*全球定位系统*. 2021, 46(2): 44-48

#### [北极地区BDS-3伪距单点定位精度分析](#)

Accuracy analysis of BDS-3 pseudo-range single-point positioning in the Arctic

*全球定位系统*. 2020, 45(4): 114-118



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.12265/j.gnss.2023065

# 基于 BDS-3/GPS 的 RTK/B2b-PPP 融合切换定位技术

黄洪<sup>1</sup>, 高旺<sup>1</sup>, 缪巍巍<sup>2</sup>, 滕玲<sup>3</sup>, 董方云<sup>3</sup>, 潘树国<sup>1</sup>

(1. 东南大学仪器科学与工程学院, 南京 210096; 2. 国网江苏省电力公司信息通信分公司, 南京 210024;  
3. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

**摘要:** 针对远海、沙漠等网络实时动态 (real-time kinematic, RTK) 载波相位差分技术通讯信号容易中断的应用场景, 提出了一种基于北斗三号 (BeiDou-3 Navigation Satellite System, BDS-3)/GPS 双系统的 RTK/B2b-PPP 融合切换定位技术. 充分利用网络 RTK 收敛快、定位精度高和 B2b-PPP 单站定位、覆盖范围广的特点, 将网络 RTK 获取的高精度位置坐标作为先验信息, 与 B2b-PPP 融合以辅助 B2b-PPP 快速收敛. 通过分时段多组数据的采样分析, 结果表明: RTK 固定解与 B2b-PPP 融合定位精度在东 (east, E)、北 (north, N)、天顶 (up, U) 方向分别为 2.57 cm、0.90 cm、2.83 cm, 较独立 B2b-PPP 定位大幅提高; RTK 固定解与 B2b-PPP 融合 1 s 后, 便可帮助 B2b-PPP 瞬时收敛, RTK 中断后初期精度达到厘米级, 0.5 h 后逐渐过渡到 B2b-PPP 独立定位精度水平, 表明 B2b-PPP 可作为网络 RTK 的有效补充手段, 在 RTK 差分中断后, 能够有效维持高精度定位水平.

**关键词:** 实时动态 (RTK); B2b-PPP; 北斗三号 (BDS-3)/GPS 组合; 融合切换; 收敛时间

**中图分类号:** P228.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-9268(2023)04-0057-06

## 0 引言

地基增强系统目前主要应用网络实时动态 (real-time kinematic, RTK) 载波相位差分技术. 利用北斗地面基准站网采集观测数据, 通过数据专线将数据发送到数据处理中心, 数据处理中心对观测数据进行处理、加工, 生成广域增强、区域增强、后处理服务产品, 通过网络播发给用户, 提供分米级、厘米级、后处理毫米级的位置服务<sup>[1-2]</sup>.

星基增强高精度定位目前主要应用的技术为非差精密单点定位 (precise point positioning, PPP). 2020 年 7 月, 北斗三号 (BeiDou-3 Navigation Satellite System, BDS-3) 圆满建成, BDS-3 新启用 3 个导航信号 B1C、B2a 和 B2b, 其提供的 PPP 服务便是以 PPP-B2b 信号作为数据播发通道, 通过 BDS-3 的三颗地球同步轨道 (geosynchronous orbit, GEO) 卫星为我国及周边地区播发钟差、差分码偏差 (differential code bias, DCB)、轨道等改正数, 为用户提供公开、免费的高精度定位服务<sup>[3]</sup>.

网络 RTK 具有收敛速度快、定位精度高等优点, 但是其提供的位置服务并发用户数量少、依赖于稳定的网络传输、覆盖区域具有局限性, 在山区、远海、沙漠等弱通讯信号环境下难以连续使用. 而 B2b-PPP 技术不依赖于地面通信网络, 基本覆盖全球范围且不限用户终端数量, 但其需要约 20 min 的收敛时间<sup>[4]</sup>, 无法提供实时高精度位置服务. 为此, 本文提供一种星地融合定位技术, 进行 RTK/B2b-PPP 无缝切换, 实现优势互补, 达到连续精密定位效果.

## 1 原理与方法

本文依据 PPP-B2b 信号接口控制文件 (ICD) 对接收机板卡获取的 PPP-B2b 原始电文进行识别和解码. 在原 GPS/BDS-3 双系统非差非组合 PPP 的基础上, 使用 PPP-B2b 改正数代替精密星历和精密钟差. 同时, 将 RTK 获取的高精度位置坐标作为先验信息, 与 B2b-PPP 融合, 并对其融合定位效果与帮助 B2b-PPP 快速收敛的最小融合时间进行评估. 基本流程如图 1 所示.

收稿日期: 2023-03-28

资助项目: 国家电网公司总部科技项目 (5700-202218439A-2-0-ZN)

通信作者: 高旺 E-mail: gaow@seu.edu.cn

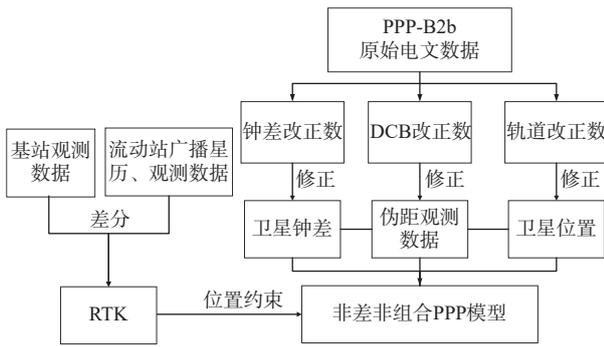


图 1 RTK/B2b-PPP 融合定位基本流程

### 1.1 非差非组合 PPP 模型

基于非差非组合观测值的 PPP 模型较传统的无电离层组合 PPP 模型避免了线性组合带来的噪声放大以及参数消除过程中导致的观测信息或者约束信息无法充分利用<sup>[5]</sup>。定位模型中,主要采用伪距和载波相位两种观测值,根据 GNSS 导航定位的几何原理和各类误差观测源,其观测方程可表示为:

$$P_{r,j}^{s,Q} = \rho_r^{s,Q} + cdt_r - cdt_r^{s,Q} + Td_r^{s,Q} + Mw_r^{s,Q} \cdot Tw_r + \gamma_j \cdot I_{r,1}^{s,Q} + \varepsilon_{others} \quad (1)$$

$$L_{r,j}^{s,Q} = \rho_{r,j}^{s,Q} + cdt_r - cdt_r^{s,Q} + Td_r^{s,Q} + Mw_r^{s,Q} \cdot Tw_r - \gamma_j \cdot I_{r,1}^{s,Q} + \lambda_j^{s,Q} \cdot N_j^{s,Q} + \varepsilon_{others} \quad (2)$$

式中:  $L_{r,j}^{s,Q}$  为载波相位观测值; 上标 s、Q 表示卫星 PRN 号和卫星系统 (Q = GPS, BDS); 下标 r 和 j (j = 1, 2) 分别为接收机和观测值频段;  $\rho_r^{s,Q}$  为卫星和测站的几何距离; c 为真空中光速;  $dt_r$  为接收机钟差;  $dt_r^{s,Q}$  为卫星钟差;  $Td_r^{s,Q}$  为对流层干延迟;  $Mw_r^{s,Q}$  为与卫星高度角相关的湿延迟投影函数;  $Tw_r$  为测站的天顶湿延迟;  $\gamma_j$  为电离层延迟放大因子 ( $\gamma_j = (f_1^{s,Q}/f_j^{s,Q})^2$ );  $\lambda_j^{s,Q}$  为载波波长;  $N_j^{s,Q}$  为载波的整周模糊度;  $\varepsilon_{others}$  为其它误差延迟, 包括硬件延迟、多路径误差等<sup>[6]</sup>。

非差非组合 PPP 模型的状态向量可表示为

$$X = [x, y, z, dt_{GPS}, dt_{BDS}, Tw_r, I_{r,1}^{s,Q}, N_1^{s,Q}, N_2^{s,Q}] \quad (3)$$

本文采用双频 BDS-3/GPS 双系统非差非组合 PPP 模型, 采用的 PPP 模型信息与具体的误差处理策略如表 1 所示<sup>[7]</sup>。

表 1 非差非组合 PPP 模型信息与误差处理策略

模型信息/误差项	处理策略
选用频率	BDS-3; B1I、B3I; GPS: L1、L2
卫星钟差	PPP-B2b 钟差改正数
卫星轨道误差	PPP-B2b 轨道改正数
卫星硬件延迟	PPP-B2b DCB 改正数
卫星天线相位中心偏差	模型估计
电离层延迟	参数估计+随机游走
对流层延迟	参数估计+随机游走
地球自转效应	模型估计
相对论效应	模型估计
潮汐影响	模型估计
接收机钟差	参数估计+白噪声
接收机硬件延迟	包含在接收机钟差中估计
整周模糊度	参数估计+随机游走
周跳探测	MW+GF
截止高度角	10°

### 1.2 PPP-B2b 改正数

#### 1.2.1 PPP-B2b 信息类型

BDS-3 PPP-B2b 一共定义了 63 种信息类型<sup>[3]</sup>, 目前只播发信息类型 1 到信息类型 4, 具体如表 2 所示。

表 2 PPP-B2b 播发信息类型

信息类型(十进制)	信息内容
1	卫星掩码
2	卫星轨道改正数及用户测距精度指数
3	码间偏差改正数
4	卫星钟差改正数

信息使用数据版本号 (issue of data, IOD) 标识, 确保不同类型信息与广播星历匹配使用。版本号包括:

1) IOD SSR: 表示状态空间描述数据的版本号, 不同信息类型中的 IOD SSR 相同时, 数据可以匹配使用, 一般在系统端配置发生变化时才更新。

2) IODP: 表示卫星掩码的数据版本号。其在信息类型 1、4 中播发, 用于匹配卫星掩码与钟差改正数。

3) IODN: 表示 GNSS 下行信号播发的星钟、星历的数据版本号。在信息类型 2 中播发, 用于匹配广播星历和轨道改正数。

4) IOD Corr: 表示轨道改正数和钟差改正数的版本号, 用于匹配钟差和轨道改正数。

PPP-B2b 信号 I 支路播发的 4 种信息类型分别具有对应的“标称有效期”(如表 3 所示),超出“标称有效期”的信息将无法保证改正数的数据质量。

表 3 信息标称有效期

信息类型	信息内容	标称有效期/s
1	卫星掩码	-
2	卫星轨道改正数及用户测距精度指数	96
3	码间偏差改正数	86 400
4	卫星钟差改正数	12

考虑到改正数据的有效期以及标志位更新的滞后性,本文使用的改正数匹配策略如图 2 所示。

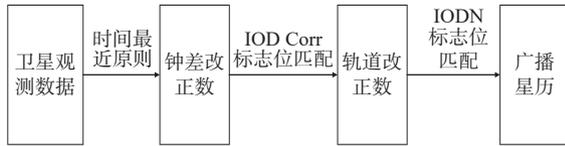


图 2 改正数匹配策略

### 1.2.2 PPP-B2b 轨道改正数

PPP-B2b 信号播发的轨道改正信息包括径向 ( $R$ )、切向 ( $T$ )、法向 ( $N$ ) 改正分量,当广播星历与改正数的 IODN 标志位相同时,便可进行修正,具体算法如式 (4),式中  $r$ 、 $\dot{r}$  为广播星历计算的卫星位置与速度;  $\delta O$  为 PPP-B2b 轨道改正向量;  $X_{orbit}$  为修正后的卫星位置。

$$\begin{cases} e_{radial} = \frac{r}{|r|} \\ e_{cross} = \frac{r \times \dot{r}}{|r \times \dot{r}|} \\ e_{along} = e_{cross} \times e_{radial} \\ \delta X = [e_{radial} e_{along} e_{cross}] \cdot \delta O \\ X_{orbit} = r - \delta X \end{cases} \quad (4)$$

### 1.2.3 PPP-B2b DCB 改正数

由于卫星跟踪模式的不同,各观测值都包含一个与信号跟踪模式相关的偏差。同步处理各频率各类信号时,需要首先消除该偏差,实现各类信号同步处理。PPP-B2b 播发的 DCB 改正数基于 B3I 频段,因此本文仅对 BDS-3 中 B1I 频段的伪距观测值进行修正如式 (5) 所示, GPS 卫星伪距观测值使用广播星历提供的群延迟 (time group delay, TGD) 修正。

$$\tilde{P}_{B1I} = P_{B1I} - DCB_{B1I} \quad (5)$$

式中:  $\tilde{P}_{B1I}$  为修正后的伪距观测值;  $P_{B1I}$  为原始伪距观

测值;  $DCB_{B1I}$  为 PPP-B2b 的 DCB 改正量。

### 1.2.4 PPP-B2b 钟差改正数

PPP-B2b 提供的钟差改正参数是基于广播星历的钟差改正数,改正方法为

$$t_s = t_b - \frac{C_0}{c} \quad (6)$$

式中:  $t_b$  为广播星历计算得到的卫星钟差;  $C_0$  为 PPP-B2b 提供的钟差改正数 (单位为 m);  $t_s$  为修正后的卫星钟差。

## 1.3 RTK 原理

载波相位 RTK 差分技术利用观测误差的时间和空间相关性,通过观测值进行差分,消除大部分观测误差,以提高定位精度。常用的差分方法有站间差分 and 星间差分。

### 1) 站间差分 (单差)

设某一历元,流动站 1 和参考站 2 同时跟踪卫星  $i$ ,将两台接收机的载波相位和伪距观测值分别作差,可得站间单差方程:

$$\Delta P_{1,2}^i = P_1^i - P_2^i = (\rho_1^i - \rho_2^i) + c(dt_1 - dt_2) + \Delta T_{1,2}^i + \Delta I_{1,2}^i + \Delta \varepsilon_{others1,2}^i \quad (7)$$

$$\Delta L_{1,2}^i = \Delta \rho_{1,2}^i + \Delta c dt_{1,2} + \lambda \Delta N_{1,2}^i + \Delta T_{1,2}^i + \Delta I_{1,2}^i + \Delta \varepsilon_{others1,2}^i \quad (8)$$

经过单差模型的处理,可完全消除卫星钟差,同时削弱卫星星历误差的影响,在短基线情况下,由于大气的相关性较强,电离层和对流层延迟也可基本消除。

### 2) 站间-星间差分 (双差)

在单差的基础上,再进行卫星间求差称为双差。站星双差可得伪距和载波方程:

$$\nabla \Delta P_{1,2}^{i,j} = \nabla \Delta \rho_{1,2}^{i,j} + \nabla \Delta T_{1,2}^{i,j} + \nabla \Delta I_{1,2}^{i,j} + \nabla \Delta \varepsilon_{others1,2}^{i,j} \quad (9)$$

$$\lambda \nabla \Delta L_{1,2}^{i,j} = \nabla \Delta \rho_{1,2}^{i,j} + \lambda \nabla \Delta N_{1,2}^{i,j} + \nabla \Delta T_{1,2}^{i,j} + \nabla \Delta I_{1,2}^{i,j} + \nabla \Delta \varepsilon_{others1,2}^{i,j} \quad (10)$$

在站间单差的基础上,站星双差又可完全消除接收机钟差<sup>[8]</sup>。通过联立求解式 (9) 和式 (10) 所示的伪距和载波双差观测方程,在固定载波模糊度后,即可获得高精度的 RTK 定位解。

## 1.4 RTK/B2b-PPP 融合与切换

为充分利用网络 RTK 的收敛时间快、定位精度高以及 PPP-B2b 的覆盖范围广、单站定位等特点,本文提出了一种 RTK/B2b-PPP 融合切换技术,当 RTK 正常工作时,用户使用 RTK 位置服务,同时通过 RTK

的位置坐标对 B2b-PPP 进行约束, 帮助 B2b-PPP 快速收敛. 而当 RTK 信号中断时, 用户使用 B2b-PPP 位置服务<sup>[9]</sup>. 总体融合切换系统框如图 3 所示.

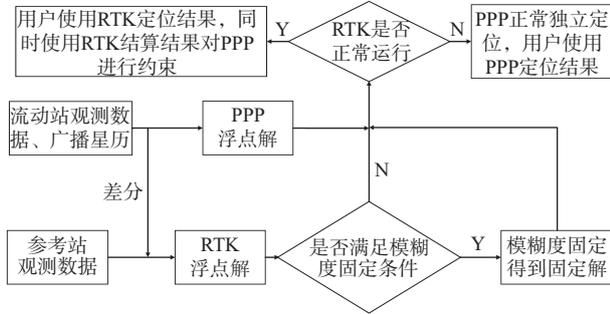


图 3 RTK/B2b-PPP 融合切换系统

RTK/B2b-PPP 融合定位采用 RTK 解算的位置坐标作为卡尔曼滤波器的观测信息, 构造新的观测向量和状态向量

$$\mathbf{L}_r = [x_r, y_r, z_r] \quad (11)$$

$$\mathbf{X}_r = \tilde{\mathbf{X}}_{\text{B2b}} \quad (12)$$

式中:  $x_r, y_r, z_r$  为 RTK 定位的位置坐标,  $\tilde{\mathbf{X}}_{\text{B2b}}$  为 B2b-PPP 滤波后的状态向量.

系数矩阵为

$$\mathbf{H}_r = (\mathbf{E}_{3 \times 3}, \mathbf{0}_{3 \times (3n+3)}) \quad (13)$$

式中:  $\mathbf{E}_{3 \times 3}$  为三阶单位矩阵;  $\mathbf{0}_{3 \times (3n+3)}$  为零矩阵;  $n$  为观测卫星数量.

RTK 定位解的协方差矩阵  $\mathbf{P}_r$  同时作为 B2b-PPP 坐标约束的协方差矩阵, 观测向量  $\mathbf{L}_r$  对应的观测噪声矩阵为

$$\mathbf{R}_r = \text{diag}(\sigma_{rx}^2, \sigma_{ry}^2, \sigma_{rz}^2) \quad (14)$$

式中,  $\sigma_{rx}^2, \sigma_{ry}^2, \sigma_{rz}^2$  为 RTK 解算的位置状态参数对应的方差.

经卡尔曼滤波后, B2b-PPP 状态向量中位置坐标、电离层延迟、模糊度等待估参数快速收敛, 即使下一历元 RTK 信号中断, 收敛后的电离层延迟, 模糊度等参数经历元间传递可帮助 B2b-PPP 获取高精度的定位结果, 以此实现 B2b-PPP 瞬时收敛.

### 1.5 精度与收敛时间评估

本文采用两个 CGCS2000 坐标系下坐标真值已知的测站观测数据, 在统一参考框架下比较定位结果与坐标真值的互差结果, 利用式 (15) 将坐标误差转换到东 (east, E)、北 (north, N)、天顶 (up, U) 坐标系下, 得到在 E、N、U 三个方向上的误差分量

$$\begin{bmatrix} d_E \\ d_N \\ d_U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin L & \cos L & 0 \\ -\sin B \cos L & -\sin B \sin L & \cos B \\ \cos B \cos L & \cos B \sin L & \sin B \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中:  $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$  为 CGCS2000 参考系下的误差;  $B$  为测站的纬度;  $L$  为测站的经度;  $d_E, d_N, d_U$  为东北天参考系下的误差分量.

采用均方根误差 (root mean square error, RMSE) 作为定位偏差的统计指标, 误差计算公式为

$$x_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}} \quad (16)$$

式中:  $x_i$  为第  $i$  个历元的坐标误差分量;  $x_{\text{RMSE}}$  为各方向上的 RMSE<sup>[10]</sup>;

对于 B2b-PPP 收敛时间的评估, 本文采用判定策略为水平定位精度优于 0.3 m, 垂直定位精度优于 0.6 m, 且持续 5 min<sup>[4]</sup>.

## 2 结果与分析

本文通过事后数据解算对网络 RTK 与 B2b-PPP 融合切换算法进行验证. 采用 2023 年年积日 061 天高精度接收机板卡获取的 PPP-B2b 改正数据, 使用一组超短基线测站观测数据 (基线长度约 10 m, 历元间隔为 1 s) 以常规 RTK 模拟网络 RTK, 通过人为中断 RTK 解算模拟网络 RTK 信号中断. 采用北斗官网提供的 CNAV1 导航电文数据<sup>[11]</sup> 和 LNAV 导航电文数据. 其中 PPP-B2b 播发的掩码和轨道改正信息间隔为 48 s, 钟差改正信息间隔为 6 s; LNAV 导航电文数据历元间隔为 2 h; B1C 播发的星历参数历元间隔为 1 h; B2b-PPP 处理策略见表 1, RTK 采用传统双差模型, 使用频点、截止高度角同 B2b-PPP, 模糊度固定 Ratio 阈值为 2.

### 2.1 RTK/B2b-PPP 动态融合定位

随着多星座多频 GNSS 技术的发展, 目前网络 RTK 通常可快速获得固定解. 为验证 RTK 约束 B2b-PPP 后, B2b-PPP 是否可获得高精度定位结果, 本文对 RTK 与 B2b-PPP 融合定位精度进行评估. 图 4 为 2023 年年积日 061 天 04:00—09:00(UTC 时间) 连续 5 h RTK 固定解与 B2b-PPP 融合定位效果. B2b-PPP 在 E、N、U 三个方向上的定位误差分别为 13.62 cm、14.63 cm、20.40 cm, 收敛时间为 23 min 15 s; RTK 单历元便可固定, RTK 固定解在 E、N、U 三个方向上的定位误差分别为 2.57 cm、0.90 cm、2.83 cm; RTK/B2b-PPP 融合定位在 E、N、U 方向上的误差分别为 2.57 cm、

0.90 cm、2.83 cm. 由此可见 RTK/B2b-PPP 融合定位较独立 B2b-PPP 定位精度分别提高 81.1%、93.8%、86.1%, 同 RTK 固定解精度相当, 在 E、N、U 方向可达厘米级甚至毫米级精度.

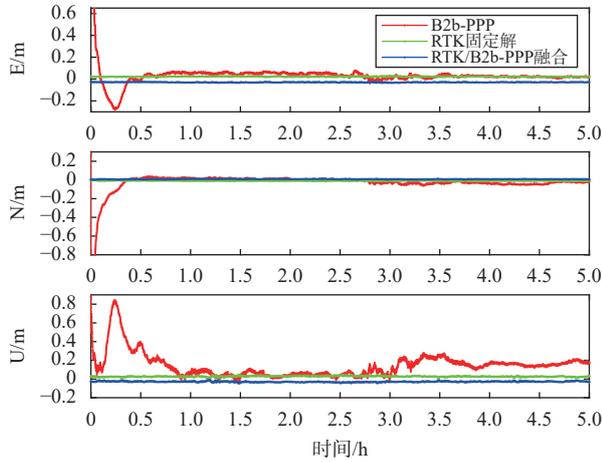


图4 RTK 固定解/B2b-PPP 融合动态定位

## 2.2 RTK/B2b-PPP 动态切换定位

为验证 RTK 约束 B2b-PPP 后中断, B2b-PPP 定位结果是否会发散的问题. 本文将 RTK 固定解与 B2b-PPP 融合  $n$  s 后断开, 由 B2b-PPP 独立定位, 评估 B2b-PPP 定位精度; 同时对定位精度和帮助 B2b-PPP 快速收敛的最小约束时间  $n_{\min}$  统计分析.

### 2.2.1 RTK 固定解与 B2b-PPP 融合 1 s 后切换

图 5 为连续 5 h RTK 固定解与 B2b-PPP 融合 1 s 后切换定位效果. 其中, RTK/B2b-PPP 融合 1 s 切换定位在 E、N、U 方向上的定位误差分别为 2.93 cm、2.55 cm、13.41 cm. 较独立 B2b-PPP 定位精度分别提高 78.5%、82.6%、34.3%. 此外, 在 RTK 固定解约束 B2b-PPP 1 s 后, B2b-PPP 便可收敛, 并在约 30 min 逐渐过渡到独立定位精度.

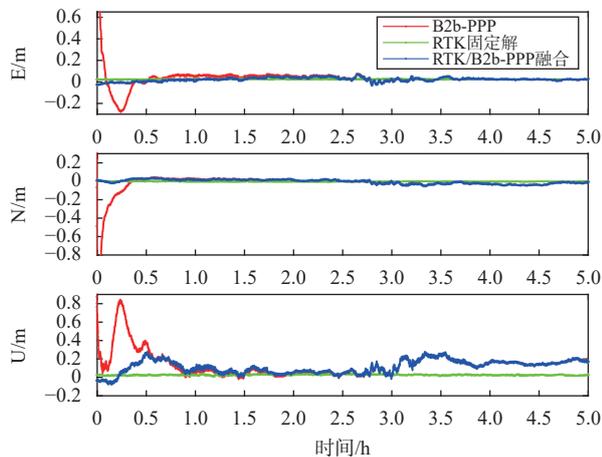


图5 RTK 固定解与 B2b-PPP 融合 1 s 切换动态定位

### 2.2.2 最小融合时间 $n_{\min}$

当约束时间足够长时, RTK 固定解可帮助 B2b-PPP 快速收敛, 为研究其最小约束时间  $n_{\min}$ , 本文将 2023 年年积日为 061 天的 24 h 观测数据分时段计算  $n_{\min}$ , 2 h 为一个时段, 数据采样间隔为 1 s. 12 次实验结果表明, RTK 固定解约束 B2b-PPP 1 s 后, 便可帮助其瞬时收敛.

## 3 结束语

本文通过理论阐述与实验论证, 探究了 BDS-3/GPS 双系统 B2b-PPP 与 RTK 融合切换技术. 对 2023 年年积日为 061 天观测数据进行分析, 其中 B2b-PPP 在 E、N、U 三个方向上的定位误差分别为 13.62 cm、14.63 cm、20.40 cm, 收敛时间为 23 min 15 s; RTK 固定解/B2b-PPP 融合定位在 E、N、U 方向上的误差分别为 2.57 cm、0.90 cm、2.83 cm, 精度大幅提高, 与 RTK 固定解精度相当. 此外, 当 RTK 固定解与 B2b-PPP 融合 1 s 后, B2b-PPP 便可瞬时收敛. 此时, 即使 RTK 信号中断, 用户也可使用 B2b-PPP 提供的高精度位置服务. 本研究为事后数据模拟解算, 为后面实时 RTK/B2b-PPP 切换技术提供参考.

## 参考文献

- [1] 舒宝, 刘晖, 王利, 等. 区域参考站网支撑的 PPP 和 RTK 一体化服务及其性能 [J]. 测绘学报, 2022, 51(9): 1870-1880.
- [2] SHIN M Y, HAN Y H, GO J, et al. Satellite anomaly detection technique for Network RTK integrity monitoring [C]//Proceedings of the ION 2015 Pacific PNT Meeting, 2015: 165-168.
- [3] 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) [DB/OL]. (2020-08-03)[2022-08-25]. [http://www.beidou.gov.cn/yw/xwzx/202008/t20200803\\_20930.html](http://www.beidou.gov.cn/yw/xwzx/202008/t20200803_20930.html)
- [4] YANG Y X, DING Q, GAO W G, LI J L, et al. Principle and performance of BDSBAS and PPP-B2b of BDS-3[J]. Satellite navigation, 2022, 3(1): 1-9. DOI: 10.1186/s43020-022-00066-2
- [5] ZHANG J, ZHAO L, YANG F X, et al. Integrity monitoring for undifferenced and uncombined PPP under local environmental conditions[J]. Measurement science and technology, 2022, 33(6): 065010. DOI: 10.1088/1361-6501/ac4b12
- [6] ZHANG B C, CHEN Y C, YUAN Y B. PPP-RTK based on undifferenced and uncombined observations: theoretical and practical aspects[J]. Journal of geodesy, 2019, 93(8): 1011-

1024. DOI: [10.1007/s00190-018-1220-5](https://doi.org/10.1007/s00190-018-1220-5)
- [7] 周锋. 多系统 GNSS 非差非组合精密单点定位相关理论和  
方法研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2018.
- [8] 杜文选, 严超, 徐炜, 王涛. 基于 GPS/北斗网络 RTK 算法实  
现与结果分析 [J]. 全球定位系统, 2017, 42(6): 42-47.
- [9] ZHANG B C, TEUNISSEN P J G, ODIJK D. A novel un-  
differenced PPP-RTK concept[J]. Journal of navigation,  
2011(64): 180-191. DOI: [10.1017/s0373463311000361](https://doi.org/10.1017/s0373463311000361)
- [10] 姜蔚, 陈向东, 邢云剑, 等. 北斗三号 PPP-B2b 服务的卫星  
定轨精度评估 [J]. 全球定位系统, 2023, 48(1): 32-36.
- [11] 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 B2b(1.0 版)[DB/OL]. (2020-  
07)[2022-08-25]. [http://www.beidou.gov.cn/xt/gfzx/202008/  
P020200803362056878157.pdf](http://www.beidou.gov.cn/xt/gfzx/202008/P020200803362056878157.pdf)

### 作者简介

黄洪 (2001—), 男, 硕士, 研究方向为卫星导航  
高精度定位理论与方法.

高旺 (1989—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为卫  
星导航高精度定位理论与方法.

缪巍巍 (1968—), 男, 硕士, 教授级高级工程师,  
从事电力信息通信、电力物联网技术研究.

## RTK/B2b-PPP fusion switching positioning technology based on BDS-3/GPS

HUANG Hong<sup>1</sup>, GAO Wang<sup>1</sup>, MIAO Weiwei<sup>2</sup>, TENG Ling<sup>3</sup>, DONG Fangyun<sup>3</sup>, PAN Shuguo<sup>1</sup>

(1. School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Informa-  
tion and Telecommunication Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024,  
China; 3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that network real-time kinematic (RTK) communication signals are easy to be interrupted in the remote sea and desert, a switching technology of RTK/B2b-PPP fusion based on BeiDou-3 Navigation Satellite System (BDS-3)/GPS is proposed, which makes full use of the characteristics of fast convergence and high positioning accuracy of network RTK and wide coverage, single station positioning of B2b-PPP. The high-precision position coordinates obtained by network RTK are used as priori information and integrated with B2b-PPP to assist B2b-PPP converge fast. The results show that the positioning accuracy of RTK fixed solution and B2b-PPP fusion is 2.57 cm, 0.90 cm and 2.83 cm in the east (E), north (N) and up (U) directions, respectively, which is much higher than that of independent B2b-PPP positioning. In addition, after the fusion of RTK fixed solution and B2b-PPP for 1 s, it can help the instantaneous convergence of B2b-PPP. After the interruption of RTK, the initial accuracy reaches the level of cm, and gradually transitions to the independent positioning accuracy level of B2b-PPP after 0.5 h, indicating that B2b-PPP can be used as an effective means to supplement the network RTK. Can effectively maintain high precision positioning level.

**Keywords:** RTK; B2b-PPP; BDS-3/GPS combination; fusion switching; convergence time