

DOI:10.20079/j.issn.1001-893x.230909002

引用格式: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.[YANG J M, MA H J. Positioning and time transfer based on BDS-3 PPP-B2b[J]. Telecommunication Engineering, 2023, 63(12):1951-1957.]

# 基于“北斗”三号 PPP-B2b 的定位与时间传递\*

杨金明<sup>1,2,3</sup>, 马红皎<sup>1,3</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. 时间基准及应用重点实验室(中国科学院), 西安 710600)

**摘要:**随着“北斗”三号的建成以及通过 GEO 卫星进行播发的 PPP-B2b 信号的公布,“北斗”卫星的定位与定时精度再一次得到提升。为了研究 PPP-B2b 的定位精度以及时间传递性能,开展了对“北斗”三号的 PPP-B2b 相关实验。首先选取亚太地区的 6 个测站静态与动态精密单点定位 E (East)、N(North)、U(Up)方向上的误差分析,然后又选取了 NTSC 与 USUD 测站进行时间传递稳定度分析。定位结果表明,B1I/B3I 组合与 B1C/B2a 组合的 PPP-B2b 静态定位 E 方向、N 方向、U 方向 RMS 值分别在 4.58 cm, 5.34 cm, 2.2 cm 与 4.18 cm, 4.97 cm, 2.22 cm, B1I/B3I 组合与 B1C/B2a 组合的 PPP-B2b 动态定位 E 方向、N 方向、U 方向 RMS 值分别在 17.99 cm, 19.41 cm, 12.72 cm 与 22.47 cm, 21.61 cm, 15.11 cm, 两种组合表现出定位精度的一致性。PPP-B2b 零基线共钟的时间传递普遍在 1 ns 内波动,时间传递的 STD 为 0.203,  $10^5$  s 的稳定度达到了  $5.336 \times 10^{-15}$ ; PPP-B2b 长基线的时间传递普遍在 5 ns 内波动,时间传递的 STD 为 1.585,  $10^4$  s 稳达到了  $3.55 \times 10^{-14}$ 。因此, B2b 产品能够满足亚太地区厘米级定位以及纳秒级授时的要求。

**关键词:**“北斗”三号; PPP-B2b; 精密单点定位; 时间传递

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



中图分类号: TN967.1 文献标志码: A 文章编号: 1001-893X(2023)12-1951-07

## Positioning and Time Transfer Based on BDS-3 PPP-B2b

YANG Jinming<sup>1,2,3</sup>, MA Hongjiao<sup>1,3</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. Key Laboratory of Time Reference and Applications, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China)

**Abstract:** With the completion of BDS-3 and the announcement of the PPP-B2b signal broadcast through geostationary Earth orbit (GEO) satellites, the positioning and timing accuracy of Beidou satellites has once again been improved. In order to study the positioning accuracy and time transfer performance of PPP-B2B, the authors carry out PPP B2b related experiments on BDS-3. In experiments, six stations in the Asia-Pacific region are selected for static and dynamic precision single point positioning research, and then NTSC and USUD stations are selected for time transfer research. The positioning results show that the root mean square (RMS) values in East (E) direction, North (N) direction and Up (U) direction of PP-B2B static positioning of B1I/B3I combination and B1C/B2a combination are 4.58 cm, 5.34 2.2 cm and 4.18 cm, 4.97 cm, 2.22 cm, respectively. The RMS values of the B1I/B3I and B1C/B2a PP-B2B dynamic positioning in E direction, N direction and U direction are 17.99 cm, 19.41 cm, 12.72 cm and 22.47 cm, 21.61 cm, 15.11 cm, respectively. The two combinations show the consistency of positioning accuracy. The time transfer of PPP-B2B zero-base line common clock generally fluctuates within 1 ns, the STD of time transfer is 0.203, and the stability of 100 000 seconds reaches  $5.336 \times 10^{-15}$ . The time transfer of PPP-B2b long baseline generally fluctuates within 5 ns, the time transfer STD is 1.585, and the time transfer STD reaches  $3.55 \times 10^{-14}$  in 10 000 seconds. Therefore, B2b products can meet the requirements of centimeter-level positioning and nanosecond timing in the Asia-Pacific region.

**Key words:** BDS-3; PPP-B2b; precise point positioning; time transfer

\* 收稿日期: 2023-09-09; 修回日期: 2023-11-09  
通信作者: 马红皎

## 0 引言

精密单点定位<sup>[1]</sup> (Precise Point Positioning, PPP)是一种通过单台全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS)接收机接收载波相位观测值和伪距观测值,利用精密产品、模型和经验公式修正误差,采用最小二乘、卡尔曼滤波等方法,从而确定高精度绝对坐标信息的定位技术。Zumberge 等人<sup>[2]</sup>最先进行 PPP 研究,获得了水平方向 1 cm、高程方向 2 cm 的静态定位精度,而 PPP-B2b 就是在 PPP 的基础上将分析中心的精密产品替换为 B2b 精密产品。

IGS(International GNSS Service)在过去主要提供了具有一定滞后性的精密钟差和轨道产品,这限制了 PPP 的研究工作主要集中在事后处理中。然而,为了获得尽可能短延迟的精密产品,IGS 在 2007 年启动了实时实验计划 (Real-Time Pilot Project, RTPP),并于 2013 年正式提供了 NTRIP 协议传输和 RTCM 编码的实时数据流服务,这使得用户能够实时免费地获取用于精密单点定位所需的改正数产品<sup>[3]</sup>。

但 NTRIP 协议以通信网络为基础,这使得网络环境受限的场所无法应用,而 PPP-B2b 信号则是通过星基播发改正信息,解决了 PPP 过于依赖通信网络的问题,目前 PPP-B2b 信号可以为 59 颗卫星提供改正电文信息,其中,为“北斗”导航卫星系统中 C19~C46 (C31 除外)共 27 颗提供改正信息,为 GPS 中 G01~G32 共 32 颗卫星提供包括卫星轨道、卫星钟差和码间偏差在内的卫星改正信息。

目前,GPS、BDS-3 的 PPP-B2b 增强信息可用性分别为 91.5% 和 97.5%<sup>[3-4]</sup>。黄伦文等人<sup>[5]</sup>利用“北斗”三号 PPP-B2b 信号,分析了北斗单系统 PPP 定位精度,静态定位 N (North)、E (East)、U (Up) 方向定位精度 RMS (Root Mean Square) 可达 2 cm 以内,动态定位精度 N、E 方向上的 RMS 达到 3.6 cm 和 6.0 cm, U 方向上达到了 12.2 cm。韩晓红等人<sup>[6]</sup>验证了 PPP-B2b 信号可以用于亚太地区纳秒级时间传递。因为以往的研究都是基于 PPP-B2b 数据采集进行事后验证,为此基于 RTKLIB 二次开发了一款上位机软件进行 PPP-B2b 的实时研究,在进行实时解算的同时也拥有事后解算功能。本文基于研究较少的“北斗”三号的最新频点 B1C、B2a 与 PPP-B2b 的时间传递性能进行分析,目的是为了验证本次开发的上位机软件的算法正确性,为以后集成度更高的解算方式做铺垫。

## 1 基本原理

### 1.1 时间传递原理

PPP-B2b 时间传递是通过两个不同的接收机,外接本地标准的 1PPS (PPS 是 Pulse Per Second 的缩写)和 10 MHz 信号,接收机通过接收所有能观测到的卫星信号,利用 GEO 播发的 PPP-B2b 信号进行卫星钟差和位置改正,选择公共参考时间计算得到本地时与参考时间的偏差,进而对两站进行差分即可得到两站时差<sup>[7]</sup>。

公式(1)和公式(2)给出了两地钟差的计算方法,然后使用公式(1)~(2)推导得到公式(3)。

$$\Delta t_A = T1 - T_{IGST}, \quad (1)$$

$$\Delta t_B = T2 - T_{IGST}, \quad (2)$$

$$\Delta t_A - \Delta t_B = T1 - T_{IGST} - T2 + T_{IGST} = \Delta t_{AB} \circ \quad (3)$$

式中:  $T1$  为 A 地的参考时间;  $T2$  为 B 地的参考时间;  $IGST$  为同一的参考时间;  $\Delta t$  为当地的接收机钟差;  $\Delta t_{AB}$  为两地的时间差。

### 1.2 观测方程

在精密单点定位时间比对中,接收机输出的本地伪距和载波相位观测方程可分别描述为

$$L_i = P + ct_r - cT_s + d_{trop} - d_{ion} + d_{mult,\rho_i} + \lambda_i N_i + \varepsilon_{\rho_i}, \quad (4)$$

$$\rho_i = P + ct_r - cT_s + d_{trop} + d_{ion} + d_{mult,\rho_i} + \varepsilon_{\rho_i} \circ \quad (5)$$

式中:  $\rho$  为伪距观测值;  $L$  为相位观测值;  $P$  为站星距;  $ct_r$  为接收机钟差改正项;  $cT_s$  为卫星钟差改正项;  $d_{trop}$  为对流层附加延迟;  $d_{ion}$  为电离层附加时延;  $d_{mult,\rho_i}$  为不同伪距观测值上所引起的多路径延迟;  $\varepsilon$  为伪距观测值和相位观测值引入的观测误差;  $\lambda N$  为相位整周模糊度。

### 1.3 PPP-B2b 电文与广播星历匹配方法

TYPE1 卫星掩码:通过观察电文得知 TYPE1 每个历元播发内容一致,每个历元的 IOD SSR、IODP 与卫星掩码都是相同的,故默认为固定内容。

TYPE2 轨道改正数:通过观察电文得知每个历元的 IOD SSR 都为 1,所以默认不变, SatSlot 按照 RTKLIB 中的卫星号重新编写, PPP-B2b 电文中的 IODN 与 LNAV/CNAV1 导航电文中的 IODC 一致时可以使用 PPP-B2b 改正数,否则不加入 B2b 改正数。径向改正数、切向改正数、法向改正数分别乘以对应的比例因子后才能使用。

TYPE3 码间偏差改正数:对于 CNAV1 来说, PPP-B2b 信号与跟踪模式与广播星历中 CODE 相同的情况下进行码间偏差修正; PPP-B2b 目前没有播

发 GPS 的码间偏差改正数,所以不需要修正。

TYPE4 钟差改正数;IOD SSR 和 IODP 不变,默认为固定值。按照 RTKLIB 中卫星的编号方式给 PPP-B2b 每个历元中的钟差改正数对应一个卫星号,当 TYPE2 和 TYPE4 的 IODCor 一致时使用 B2b 改正数,并且需要乘以比例因子。

图 1 表示 PPP-B2b 电文中每个类型改正数中的信息,红框中的内容表示需要不同类型改正数进行相互关联<sup>[9]</sup>。

Type1 卫星掩码	IOD SSR	IODP		
Type2 轨道改正数	IOD SSR		IODN	IOD Corr
Type3 码间偏差改正数	IOD SSR			
Type4 钟差改正数	IOD SSR	IODP		IOD Corr
广播星历 CNAV1/LNAV			IODN	

图 1 PPP-B2b 电文对应规则

## 2 PPP-B2b 改正算法

### 2.1 卫星码间偏差修正

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,其修正算法为

$$\tilde{l}_{\text{sig}} = l_{\text{sig}} - \text{DCB}_{\text{sig}} \quad (6)$$

式中: $\tilde{l}_{\text{sig}}$  为 sig 信号修正后的观测值; $l_{\text{sig}}$  为 sig 信号接收机直接捕获的观测值; $\text{DCB}_{\text{sig}}$  为对应该信号的码间偏差。

### 2.2 卫星轨道改正

轨道改正信息包括的参数为轨道改正向量  $\delta\mathbf{O}$  在径向、切向和法向的分量。轨道改正值用于计算卫星位置改正向量  $\delta\mathbf{X}$ ,同时还要联合利用广播星历计算出的卫星位置向量  $\mathbf{X}_{\text{broadcast}}$ 。改正的计算公

式为

$$\mathbf{X}_{\text{orbit}} = \mathbf{X}_{\text{broadcast}} - \delta\mathbf{X} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{X}_{\text{orbit}}$  为改正后更精确的卫星位置; $\mathbf{X}_{\text{broadcast}}$  是由广播星历计算出的卫星位置; $\delta\mathbf{X}$  表示卫星轨道改正,

$$\mathbf{e}_{\text{radial}} = \frac{\mathbf{r}}{|\mathbf{r}|}, \quad (8)$$

$$\mathbf{e}_{\text{cross}} = \frac{\mathbf{r} \times \dot{\mathbf{r}}}{|\mathbf{r} \times \dot{\mathbf{r}}|}, \quad (9)$$

$$\mathbf{e}_{\text{along}} = \mathbf{e}_{\text{cross}} \times \mathbf{e}_{\text{radial}}, \quad (10)$$

$$\delta\mathbf{X} = [\mathbf{e}_{\text{radial}} \ \mathbf{e}_{\text{along}} \ \mathbf{e}_{\text{cross}}] \cdot \delta\mathbf{O} \quad (11)$$

式中: $\mathbf{r} = \mathbf{X}_{\text{broadcast}}$  为广播星历卫星位置矢量; $\dot{\mathbf{r}} = \dot{\mathbf{X}}_{\text{broadcast}}$  为广播星历卫星速度矢量; $\mathbf{e}_i$  为方向单位矢量, $i = \{\text{radial}, \text{along}, \text{cross}\}$  分别对应径向、切向、法向; $\delta\mathbf{O}$  为 PPP 信息中获得的轨道改正矢量,顺序为径向、切向、法向分量。

### 2.3 卫星钟差改正

钟差改正电文包括的参数是相对于广播星历钟差的改正参数。该改正参数的计算方法为<sup>[10]</sup>

$$t_{\text{satellite}} = t_{\text{broadcast}} - \frac{C_0}{c} \quad (12)$$

式中: $t_{\text{broadcast}}$  为广播星历计算得到的卫星钟差参数; $t_{\text{satellite}}$  为经过钟差改正电文改正得到的卫星钟差; $c$  为光速; $C_0$  为 PPP-B2b 电文中获得的钟差改正参数。

## 3 实验与分析

### 3.1 实验设计

实验选取 6 个亚太地区 IGMAS/IGS 观测站分别进行基于 BDS-3 的 PPP-B2b 的静态精密单点定位分析。使用司南 K803 接收机接收并保存 GEO 卫星所播发的 2023 年年积日为第 80~89 天的 PPP-B2b 原始二进制电文,并根据《精密单点定位服务信号 PPP-B2b》文件进行二进制电文解码。实验采用 BDS-3 B1I/B3I 无电离层组合和 BDS-3 B1C/B2a 无电离层组合两组,各个实验测站的详细信息如表 1 所示。

表 1 定位研究的测站信息

测站名称	测站类别	接收机型号	天线型号	外部时钟
GAMG	IGS	Sept Polarx5TR	LEIAR25. R4 LEIT	INTERNAL
GUA1	IGMAS	MGR_iGMAS	Geodetic-GNSS	RUBIDIUM
JFNG	IGS	TRIMBLE ALLOY	TRM59800. 00	INTERNAL
SHA1	IGMAS	Unicore UB4B0	NOV750. R4 NOV5	RUBIDIUM
USUD	IGS	Sept Polarx5	AOAD/M_T JPLA	H-MASER
XIA6	NTSC	Sept Polarx5TR	SEPCHOKE_B3E6	UTC(NTSC)

利用“北斗”三号 PPP-B2b 进行 B1I/B3I 组合的时间传递研究,采用中国科学院国家授时中心的 XIA6 和 SE22 两个测站与日本 USUD 测站的接收机数据。表 2 列出了参与 PPP-B2b 时间传递的 GNSS 接收机信息, XIA6 和 SE22 是 NTSC 实验室共原子钟共天线的 GNSS 接收机测站, XIA6 和 SE22 均接在本地 UTC ( $k$ ), USUD 接在本地氢钟。实验采用 2023 年第 80~89 天共 10 天的观测数据以及 PPP-B2b 电文,利用 BDS B1I/B3I 无电离层组合 PPP-B2b 进行时间传递研究<sup>[11]</sup>。

表 2 时间传递测站信息

测站	接收机类型	天线型号	外部时钟
XIA6	SEPT POLARX5TR	SEPCHOKE_B3E6	UTC(NTSC)
SE22	SEPT POLARX5TR	SEPCHOKE_B3E6	UTC(NTSC)
USUD	Sept Polarx5	AOAD/M_T JPLA	H-MASER

### 3.2 PPP-B2b 处理策略

PPP-B2b 的处理策略如表 3 所示,精密的卫星位置和卫星钟差通过 PPP-B2b 产品修正通过导航电文计算出的卫星位置和卫星钟差获得。电离层延迟使用双频无电离层组合来消除电离层影响,并且使用扩展卡尔曼滤波来进行参数估计,使用 IGS14.atx 来消除天线所带来的硬件时延影响。

表 3 误差项与处理模型

误差项	处理模型
精密星历与钟差	PPP-B2b 精密轨道与钟差
电离层延迟	双频无电离层组合
对流层时延	ZTD 估计
观测值	B1C/B2a, B1I/B3I 码伪距和载波相位
截止高度角/(°)	15
固体潮修正	IERS 2010
天线相位中心	IGS14.atx
参数估计	扩展卡尔曼滤波
接收机位置模型	静态模型
接收机钟差模型	白噪声
观测值采样间隔/s	30

实验研究中数据以天为单位,进行两种组合的静态 PPP-B2b 定位解算。由于精密单点定位方法需要一定的收敛时间,所以对参与定位每天的数据均去掉收敛时间对应的解算结果。

### 3.3 实验结果

#### 3.3.1 PPP-B2b 静态定位

图 2 为测站静态解算历元的平均卫星数。这 6

个测站每历元参与 PPP-B2b 计算的 BDS 卫星数平均为 7.85 颗。在 6 个测站中 USUD 观测站卫星数目最少,这也导致 PPP-B2b 定位效果可能会差一些。

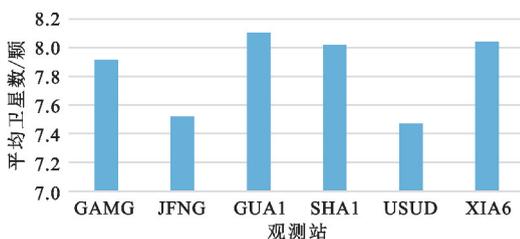


图 2 可见卫星数

以 2023 年第 80 天 GAMG 站为例,图 3 和图 4 给出了在 E、N、U 方向的静态定位随时间变化的结果,由上至下分别为 B1I/B3I 组合和 B1C/B2a 组合 E、N、U 方向误差序列。为了更直观地看出收敛后的定位效果,图中省略了半个小时的收敛过程,计算 B1I/B3I 组合静态 PPP-B2b 定位收敛后的 N、E、U 方向误差 RMS 分别<sup>[12]</sup>为 0.064 m, 0.077 m, 0.021 m, B1C/B2a 组合 N、E、U 方向误差 RMS 分别为 0.029 m, 0.04 m, 0.013 m。GAMG 站在静态 PPP-B2b 定位收敛后, B1I/B3I 组合和 B1C/B2a 组合的定位误差均在  $\pm 0.06$  m 内波动。

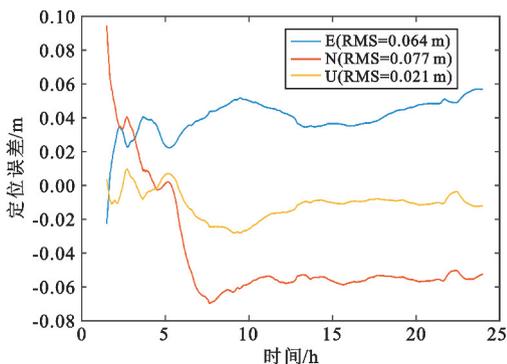


图 3 GAMG 测站 B1I/B3I 组合静态定位结果

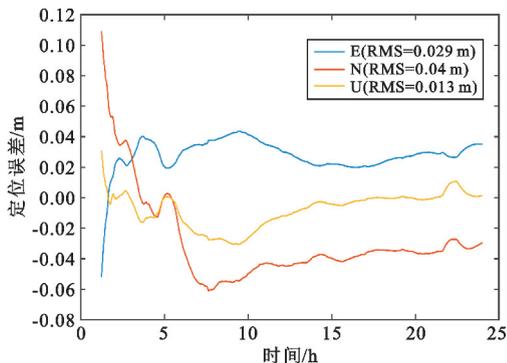


图 4 GAMG 测站 B1C/B2a 组合静态定位结果

表 4 列出了 6 个 IGS 测站静态 PPP-B2b E、N、U 方向的误差 RMS 值,坐标的 RMS 值能反映解算的坐标集中各点与均值之间的差异程度。由于 GUA1、SHA1 和 JFNG 这 3 个测站的观测数据缺少 B1C/B2a 两个频点的观测值,所以在 B1C/B2a 无电离层组合的动、静态定位误差只计算了 GAMG、USUD 和 XIA6 这 3 个测站。

表 4 静态定位误差 RMS

观测站	单位:cm					
	B1I+B3I			B1C+B2a		
	E	N	U	E	N	U
GAMG	4.334	6.798	2.275	2.312	3.715	1.534
GUA1	6.043	3.756	2.254			
JFNG	4.293	5.689	1.831			
SHA1	1.971	2.591	1.576			
USUD	5.025	7.142	3.546	5.819	7.040	3.580
XIA6	5.831	6.114	1.739	4.423	4.171	1.550

从表 4 可知,B1I/B3I 和 B1C/B2a 两种组合 E 方向的定位误差 RMS 大部分集中于 4 cm 和 5 cm 之间,U 方向的定位误差 RMS 优于 E 方向和 N 方向的定位误差 RMS,大部分集中于 1 cm 和 2 cm 之间。从定位误差 RMS 来看,定位效果最好的是 SHA1 测站;由于观测卫星数目的原因,USUD 测站定位精度不如其他测站<sup>[13]</sup>。

“北斗”三号系统 B1I/B3I 组合的 PPP-B2b 静态定位 E、N、U 方向 RMS 值分别为 4.58 cm, 5.34 cm, 2.2 cm, B1C/B2a 组合的 PPP-B2b 静态定位 E、N、U 方向 RMS 值分别为 4.18 cm, 4.97 cm, 2.22 cm, 两种组合表现出定位精度的一致性。

在多路径干扰、钟差误差、接收机性能等条件不变的情况下,较大的频率差异使得电离层引起的相位延迟差异更明显,从而提供更准确的电离层延迟估计,这有助于消除电离层引起的定位误差。而 B1C(1 575.420 MHz)与 B2a(1 176.450 MHz)的频率相差 398.970 MHz, B1I(1 561.098 MHz)与 B3I(1 268.520 MHz)的频率相差 292.578 MHz,从理论上来说 B1C+B2a 组合的定位结果要更优一些,从表 4 中也可以看出 B1C+B2a 双频无电离层组合的定位结果的确优于 B1I+B3I 组合。

### 3.3.2 PPP-B2b 动态定位

动态定位扩展了精密单点定位的应用范围,使

其能够实现对移动接收机的实时高精度定位,如车辆导航、飞行器导航和移动测量等领域。在动态定位中,通过引入运动模型和滤波算法,精密单点定位能够考虑接收机的运动状态,从而实现对接收机位置和速度的连续估计,提供更准确和稳定的定位结果<sup>[14]</sup>。

表 5 列出了 6 个 IGS 测站动态 PPP-B2b E、N、U 方向的误差 RMS 值,可以看出, B1I/B3I 和 B1C/B2a 两种组合 E 方向和 N 方向的定位误差 RMS 大部分集中于 10 cm 和 20 cm 之间,U 方向的定位误差 RMS 大部分集中于 5 cm 和 15 cm 之间,仍然优于 E 方向和 N 方向的定位误差 RMS。

表 5 动态定位误差 RMS

观测站	单位:cm					
	B1I+B3I			B1C+B2a		
	E	N	U	E	N	U
GAMG	12.013	11.202	6.465	14.607	10.691	7.796
GUA1	21.221	26.952	17.408			
JFNG	14.783	10.674	7.041			
SHA1	14.815	9.939	9.835			
USUD	18.475	27.173	17.05	18.133	17.534	13.815
XIA6	26.635	30.553	18.578	34.685	36.623	23.728

“北斗”三号系统 B1I/B3I 组合的 PPP-B2b 动态定位 E、N、U 方向 RMS 值分别为 17.99 cm, 19.41 cm, 12.72 cm, B1C/B2a 组合的 PPP-B2b 动态定位 E、N、U 方向 RMS 值分别为 22.47 cm, 21.61 cm, 15.11 cm, 在不同方向与不同频点组合的定位误差上,PPP-B2b 动态定位与静态定位表现出较高的一致性<sup>[15]</sup>。

### 3.3.3 PPP-B2b 时间传递

图 5 展示的是 XIA6、SE22 零基线共钟的 B1I/B3I 双频无电离层组合 PPP-B2b 时间传递结果。连续天零基线共钟可以反映接收机噪声和产品时间传递的不确定性,接收机硬件延迟未被修正,时间传递的结果均存在一定的系统差。从图 5 中可以看出,PPP-B2b 的时间传递噪声均在 1 ns 内波动,时间传递的 STD 为 0.203。由于 XIA6 设置了接收机内部延迟自动校准,而 SE22 未设置,导致两接收机间 B1I/B3I 双频无电离层组合零基线时间传递结果存在约 23 ns 的常数偏差<sup>[6]</sup>。

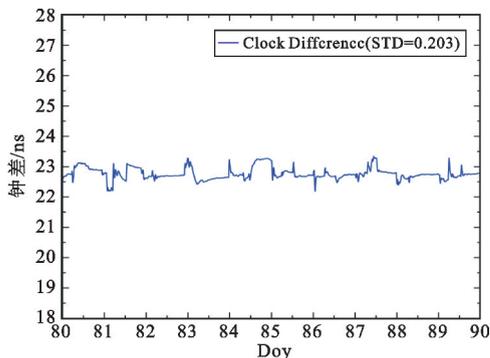


图 5 零基线时间传递结果

图 6 给出了通过“北斗”三号 B1I/B3I 双频无电离层组合获得的 XIA6-SE22 两台接收机钟差的稳定度, 零基线共钟的 PPP-B2b 时间传递  $10^5$  s 的稳定度达到了  $5.336 \times 10^{-15}$ 。

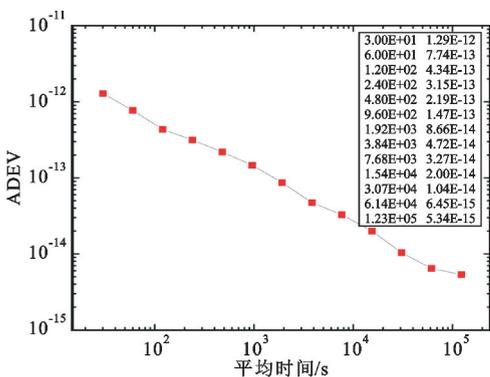


图 6 零基线时间传递稳定度

图 7 展示了 XIA6 和 USUD 两个测站 2023 年第 83~89 天 BDS-3 PPP-B2b 长基线时间传递结果。因为在 2023 年第 80~83 天 USUD 测站接收机外接钟源的输出频率有较大波动, 所以选择了 2023 年第 83~89 天的数据进行实验。XIA6 和 USUD 两个测站的基线长度为 3 000 km。从图 7 中可以看出, 利用“北斗”三号 B1I/B3I 双频无电离层组合获得的两地时差波动保持在 5 ns 以内, 时间传递的 STD 为 1.585。

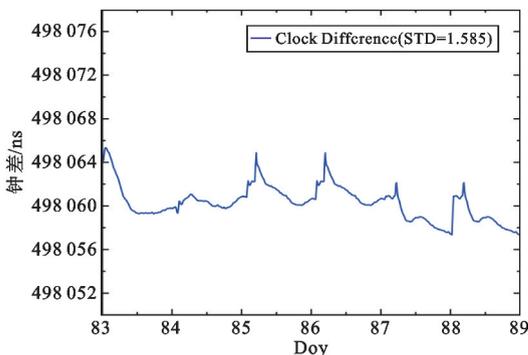


图 7 长基线时间传递结果

图 8 给出了通过“北斗”三号 B1I/B3I 双频无电离层组合获得的 XIA6-USUD 两地接收机钟差的稳定度。XIA6 和 USUD 两地的 PPP-B2b 时间传递  $10^4$  s 的稳定度达到了  $3.55 \times 10^{-14}$ , 可以满足亚太地区纳秒级时间传递的需求。

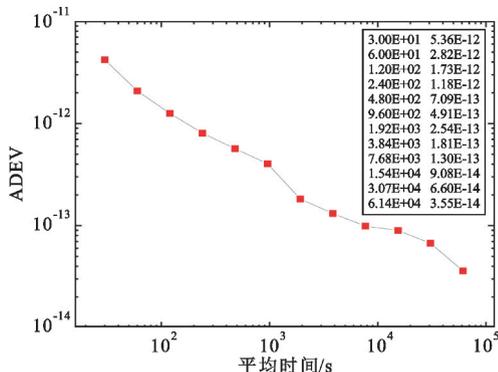


图 8 长基线时间传递稳定度

### 4 结束语

本文利用 2023 年年积日第 80~89 天的 PPP-B2b 电文、CNAV1 导航电文与亚太地区的测站的观测数据进行静态与动态定位分析以及 NTSC 和 USUD 测站的时间传递研究, 结果表明, B1I/B3I 组合与 B1C/B2a 组合的 PPP-B2b 静态定位达到厘米级, 动态定位达到分米级, 定位结果中两种组合表现出定位的精度的一致性; PPP-B2b 零基线共钟的时间传递普遍在 1 ns 内波动, 时间传递的 STD 为 0.203,  $10^5$  s 的稳定度达到了  $5.336 \times 10^{-15}$ , PPP-B2b 长基线的时间传递普遍在 5 ns 内波动, 时间传递的 STD 为 1.585,  $10^4$  s 稳达到了  $3.55 \times 10^{-14}$ 。

以上研究结果均来自基于 RTKLIB 二次开发的上位机软件, 研究结果表明定位精度在厘米级, 授时精度在纳秒级, 可用于农业、工业、军事等方面, 保证了算法的正确性, 为以后移植到集成度更高的芯片打下了基础。

后续应着重使用 PPP-B2b 信号恢复的精密星历进行扩展研究, 比如多系统融合精密单点定位以及相对定位等<sup>[16]</sup>。

### 参考文献:

[ 1 ] 矫殿成. 基于北斗三号 PPP-B2b 的实时精密单点定位研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院国家授时中心), 2022.  
 [ 2 ] ZUMBERGE J F, HEFLIN M B, JEFFERSON D C,

- et al. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1997, 102 (B3): 5005–5017.
- [ 3 ] XU Y, YANG Y, LI J. Performance evaluation of BDS-3 PPP-B2b precise point positioning service [J]. *GPS Solutions*, 2021, 25(4): 142–149.
- [ 4 ] TAO J, LIU J, HU Z, et al. Initial assessment of the BDS-3 PPP-B2b RTS compared with the CNES RTS [J]. *GPS Solutions*, 2021, 25: 1–16.
- [ 5 ] 黄伦文, 孟宏伟. 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.
- [ 6 ] 韩晓红, 孙保琪, 张喆, 等. 基于北斗三号 PPP-B2b 轨道的实时精密共视时间传递 [J]. *导航定位与授时*, 2023, 10(4): 103–111.
- [ 7 ] 张继海, 董绍武, 袁海波, 等. 北斗 PPP 高精度时间比对技术研究 [J]. *时间频率学报*, 2020, 43(4): 262–269.
- [ 8 ] 马祥泰, 史增凯, 钱昭勇, 等. 基于北斗卫星导航系统非组合精密单点定位算法的精密授时精度研究 [J]. *电子与信息学报*, 2022, 44(9): 3203–3211.
- [ 9 ] 蔡子睿, 方荣新, 胡冰燕, 等. 北斗三号 B2b 信号改正广播星历精度评估及 PPP 应用 [J]. *全球定位系统*, 2023, 48(1): 64–70.
- [ 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.
- [ 11 ] ZHANG R Z, HE Z M, MA L M, et al. Analysis of BDS-3 PPP-B2b positioning and time transfer service [EB/OL]. [2023-08-01]. <https://doi.org/10.3390/rs14122769>.
- [ 12 ] 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.
- [ 13 ] GE Y, WANG Q, WANG Y, et al. A new receiver clock model to enhance BDS-3 real-time PPP time transfer with the PPP-B2b service [J]. *Satellite Navigation*, 2023, 4(1): 1–12.
- [ 14 ] NIE Z, XU X, WANG Z, et al. Initial assessment of BDS PPP-B2b service: precision of orbit and clock corrections, and PPP performance [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(11): 2050–2065.
- [ 15 ] LIU Y, YANG C, ZHANG M. Comprehensive analyses of PPP-B2b performance in China and surrounding areas [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(3): 643–655.
- [ 16 ] 劳源基, 熊泽凯, 王靖君等. 一种“北斗”三号精密单点定位的三频模糊度解算方法 [J]. *电讯技术*, 2022, 62(4): 495–502.

#### 作者简介:

**杨金明** 男, 1999 年生于江苏徐州, 2021 年获学士学位, 现为硕士研究生, 主要研究方向为基于“北斗”三号 PPP-B2b 的定位与时间传递。

**马红皎** 男, 1973 年生于陕西合阳, 2009 年获博士学位, 现为高级工程师, 主要研究方向为时间频率导航。