

引用格式:陈是,刘娅,郭萌,等.顾及 DCB/OSB 的北斗三号实时 PPP 授时性能分析[J].时间频率学报, 2025,48(3):188-198.

顾及 DCB/OSB 的北斗三号实时 PPP 授时性能分析

陈是^{1,2,3}, 刘娅^{1,2,3}, 郭萌^{1,2,3}, 张慧君^{1,2,3}, 李孝辉^{1,2,3},
张吉峰^{4,5}, 封博卿^{4,5}

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;

4.国家铁路智能运输系统工程技术研究中心,北京 100081;

5.中国铁道科学研究院集团有限公司电子计算技术研究所,北京 100081

摘要:卫星差分码偏差产品能有效提升 GNSS PPP 授时性能。研究 PPP-B2b 播发的码间偏差(DCB)改正数、状态空间表述(SSR)产品中播发的绝对信号偏差(OSB)改正数对北斗三号B1C+B2a 双频消电离层组合下的实时精密单点定位(PPP)单向授时以及时间比对的影响,实验结果表明,使用 DCB/OSB 改正后,PPP-B2b、CAS0 和 WHU0 的单向授时标准差(STD)分别从 1.94 ns、0.90 ns 和 0.91 ns 提升至 0.41 ns、0.56 ns 和 0.41 ns,峰峰值从 6.36 ns、4.11 ns 和 3.41 ns 提升至 1.87 ns、3.17 ns 和 1.83 ns,万秒稳定度从 9.54×10^{-14} 、 7.55×10^{-14} 和 6.35×10^{-14} 提升至 2.21×10^{-14} 、 3.75×10^{-14} 和 2.38×10^{-14} 。短基线条件下,不修正 DCB/OSB 的单向授时结果呈现周期性波动,经过两台并址运行设备的站间差分之后可以消除周期性波动,所以 DCB/OSB 修正与否对时间比对的影响不明显,此时的 STD 均小于 0.3 ns。

关键词:北斗三号卫星导航系统;码间偏差改正数;PPP 单向授时;PPP 时间比对

DOI:10.13875/j.issn.1674-0637.2025-03-0188-11

Performance analysis of real-time PPP timing of BDS-3 using DCB/OSB

CHEN Shi^{1,2,3}, LIU Ya^{1,2,3}, GUO Meng^{1,2,3}, ZHANG Hui-jun^{1,2,3}, LI Xiao-hui^{1,2,3},
ZHANG Ji-feng^{4,5}, FENG Bo-qing^{4,5}

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;

4.National Research Center of Railway Intelligence Transportation System Engineering Technology, Beijing 100081, China;

5.Institute of Computing Technologies, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China

Abstract: Satellite differential code bias products can effectively improve GNSS PPP timing performance. In this paper, we analyzed the effects of the differential code bias (DCB) corrections broadcast

收稿日期:2025-01-12;接受日期:2025-02-25

基金项目:中国科学院“西部之光-西部交叉团队”重点实验室专项基金(xbzg-zdsys-202120);中国铁道科学研究院院基金(2022YJ244)

by PPP-B2b and the observable-specific bias (OSB) corrections in the state-space representation (SSR) products on the real-time precision point positioning (PPP) one-way timing and time transfer under the dual-frequency ionosphere-free combination model of the BDS-3 B1C + B2a. The experimental results showed that the standard deviation (STD) of one-way timing in PPP-B2b, CAS0, and WHU0 were increased from 1.94 ns, 0.90 ns, and 0.91 ns to 0.41 ns, 0.56 ns and 0.41 ns, the peak-to-peak values improved from 6.36 ns, 4.11 ns and 3.41 ns to 1.87 ns, 3.17 ns and 1.83 ns, and the 10 000 s ADEV of the one-way timing were improved from 9.54×10^{-14} , 7.55×10^{-14} and 6.35×10^{-14} to 2.21×10^{-14} , 3.57×10^{-14} and 2.38×10^{-14} . Under the short baseline condition, the one-way timing of the two concurrent receivers without the DCB/OSB correction showed periodic fluctuations, which could be eliminated after the inter-station differencing, so the effect of DCB/OSB correction on the time transfer results was not obvious, and the STDs at this time were all less than 0.3 ns.

Keywords: BDS-3; differential code bias; PPP one-way timing; PPP time transfer

北斗卫星导航系统于 2020 年正式提供全球服务,其中北斗三号(BDS-3)除了北斗二号(BDS-2)具有的 B1I 和 B3I 频点外,新增了 B1C 和 B2a 频点,为卫星定位导航授时提供了更多的频段选择。由于不同频段对应的北斗卫星的卫星端硬件延迟偏差不同,当使用不同频段组合进行 PPP (precise point positioning) 卫星授时分析的时候,如果不考虑码偏差,PPP 授时(包括单向授时及时间比对)性能会受到影响。

卫星端的码偏差产品按时效性可以分为事后产品和实时产品。事后产品包括 IGS (International GNSS Service) 中心提供的高精度事后差分码偏差 (differential code bias, DCB) 产品,以及各个 GNSS (Global Navigation Satellite System) 中心提供的同类型产品^[1];实时产品包括两类,一类通过卫星播发,包括广播星历中播发的时间群延迟 (time group delay, TGD) 产品以及北斗 GEO (geosynchronous orbit) 卫星播发的 PPP-B2b 改正数中的码间偏差 DCB (differential code bias) 改正数产品,另一类为 GNSS 分析中心播发的实时的绝对信号偏差 (observable-specific bias, OSB) 产品,这类产品通常是在 DCB 估值的基础上进行无电离层钟差基准约束之后得到的。

文献[2]分析了中国科学院 (Chinese Academy of Sciences, CAS) 和德国宇航中心 (German Aerospace Center, DLR) 发播的 DCB 产品,结果表明两家分析中心提供的 GPS (Global Positioning System) 和北斗卫星频间偏差的月稳定度分别小于 0.08 ns 和 1.12 ns。文献[3-4]的结果说明基于 DCB/OSB 的 PPP 定位精度相比不使用 DCB/OSB

的定位精度和收敛时间均有一定的提升。文献[5]介绍了北斗 DCB 对于北斗三号双频 PPP 时间传递的影响,DCB 修正在提升时间传递长稳方面效果更为明显。

目前来看,针对 DCB/OSB 的研究主要集中在对事后产品性能和 PPP 定位以及时间传递性能的分析,鲜有研究针对 DCB/OSB 产品对实时 PPP 授时性能影响。本文针对不同类型的 DCB/OSB 产品在北斗实时 PPP 单向授时以及时间比对方面的影响进行研究,利用北斗 GEO 卫星播发的实时 PPP-B2b DCB 产品以及中国科学院精密测量科学与技术研究院 (CAS) 和武汉大学 (WHU) 播发的实时 OSB 产品,对北斗三号 B1C+B2a 双频消电离层模型进行实时 PPP 授时实验,最后分析 DCB/OSB 产品对单向授时和时间比对的影响。

1 实时 PPP 授时原理

北斗卫星的单频伪距与载波相位观测方程可以写成^[6]:

$$\begin{cases} P^i = \rho^i + c \cdot \Delta t^i - c \cdot \Delta t_r + \Delta t_{\text{trop}}^i + \Delta t_{\text{iono}}^i + \epsilon(P^i) \\ L^i = \rho^i + c \cdot \Delta t^i - c \cdot \Delta t_r + \Delta t_{\text{trop}}^i - \Delta t_{\text{iono}}^i + \lambda_i N^i + \epsilon(L^i) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, P^i 与 L^i 为卫星号为 i 的伪距和载波相位观测值, ρ^i 为星地几何距离, c 为光速, Δt^i 为卫星钟差, Δt_r 为本地接收机钟差, Δt_{trop}^i 为斜向对流层延迟, Δt_{iono}^i 为斜向电离层延迟, N^i 表示载波相位整周模糊度, $\epsilon(P^i)$ 与 $\epsilon(L^i)$ 表示伪距和载波相位的噪声和硬件延迟误差等。

本文使用 B1C+B2a 双频消电离层模型进行授

时实验,探究 DCB 和 OSB 两种码间偏差改正数对单向授时以及时间比对性能的影响。双频消电离层组合的公式如下:

$$\begin{cases} P_{\text{IF}}^i = \frac{\lambda P_1^i - P_2^i}{\lambda - 1} = \rho^i + c \cdot \Delta t^i - c \cdot \Delta t_r + \Delta t_{\text{trop}}^i + \epsilon(P_{\text{IF}}^i) \\ L_{\text{IF}}^i = \frac{\lambda L_1^i - L_2^i}{\lambda - 1} = \rho^i + c \cdot \Delta t^i - c \cdot \Delta t_r + \Delta t_{\text{trop}}^i + \lambda_{\text{IF}} N_{\text{IF}}^i + \epsilon(L_{\text{IF}}^i) \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, P_{IF}^i 与 L_{IF}^i 为双频消电离层模型下的伪距观测值和载波相位观测值, P_1^i 与 P_2^i 分别为两个频段的伪距观测值, L_1^i 与 L_2^i 分别为两个频段的载波相位观测值, $\lambda = f_1^2/f_2^2$, f_1 与 f_2 分别为两个频段的载波频率, λ_{IF} 为双频消电离层模型波长, N_{IF}^i 为消电离层浮点模糊度, $\epsilon(P_{\text{IF}}^i)$ 与 $\epsilon(L_{\text{IF}}^i)$ 为伪距和载波相位的测量噪声,其余参数定义与式(1)保持一致。

1) 基于实时产品的 PPP 单向授时及 PPP 站间时间比对原理

基于 SSR/PPP-B2b 的 PPP 单向授时是利用接收机获取卫星导航系统 GNSST 的时间,具体原理图见图 1^[7-8]。接收机同时观测多颗北斗三号卫星,并将可视卫星的伪距、载波相位观测值以及广播星历参数输出给实时 PPP 处理软件。实时 PPP 处理软件计算广播卫星位置并利用 GEO 卫星播发的实时 PPP-B2b 改正数以及 WHU/CAS 播发的实时精密 SSR(state-space representation)改正数将其恢复成精密卫星位置和卫星钟差,然后使用伪距和载波相位观测值对传输路径的各项误差进行修正并

进行实时 PPP 解算与参数估计,计算得到单接收机的 PPP 单向授时结果,即本地接收机时钟和卫星导航系统的钟差 $t_A - t_{\text{GNSST}}$ 与 $t_B - t_{\text{GNSST}}$ 。 $t_A - t_{\text{GNSST}}$ 或者 $t_B - t_{\text{GNSST}}$ 为 PPP 单向授时结果,可以表征本地时钟与卫星导航系统 GNSST 的授时偏差^[9]。

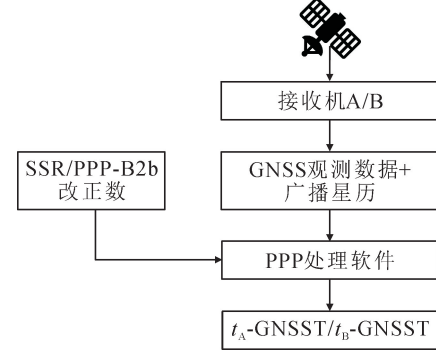


图 1 基于 SSR/PPP-B2b 的实时 PPP 单向授时原理图

基于实时 PPP 的站间时间比对原理图见图 2^[10]。单接收机 PPP 解算的过程与单向授时的过程相同,主要区别为是否利用本地用于站间时间比对的参考时钟信号,在得到两个接收机单向授时结果 $t_A - t_{\text{GNSST}}$ 与 $t_B - t_{\text{GNSST}}$ 的同时,通过将接收机输出的 1 PPS 信号与本地标准时间 UTC(k) 的 1 PPS 信号送至时间间隔计数器,可以得到接收机时钟和本地参考时钟的差值,分别为 t_{tic1} 和 t_{tic2} ,公式为:

$$\begin{cases} t_{\text{tic1}} = t_{\text{ref1}} - t_A \\ t_{\text{tic2}} = t_{\text{ref2}} - t_B \end{cases} \quad (3)$$

时间比对结果可以表示为^[11-12]

$$t_{\text{ref1}} - t_{\text{ref2}} = t_{\text{tic1}} - t_{\text{tic2}} + t_A - t_B \quad (4)$$

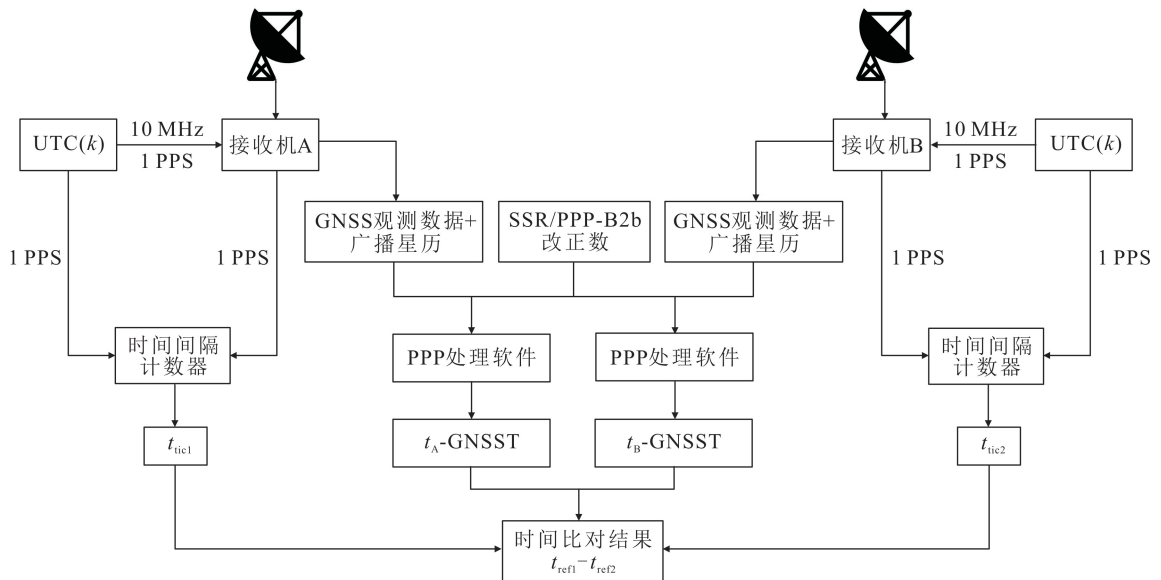


图 2 实时 PPP 时间比对原理图

2) DCB/OSB 实时产品使用方法

本文探究 DCB/OSB 对 PPP 单向授时和时间比对的影响^[13-14],分别使用 PPP-B2b 改正数与 SSR 改正数进行实时 PPP 时间比对实验,由于轨道改正数和钟差改正数不是本文研究的重点,所以本文不介绍使用方法。下面介绍 DCB/OSB 的使用方法。

PPP-B2b 精密单点定位服务播发的改正数以 B3I 单频信号作为参考频点,通过北斗三号的三颗 GEO 卫星播发各个频点的 DCB 码间偏差改正数,在使用不同频段的信号的时候,首先需要在伪距观测值上修正码间偏差,以实现信号的同步处理,修正公式为

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

式(5)中, P_{sig} 表示修正前的 sig 信号伪距观测值, D_{sig} 表示 PPP-B2b 播发的 sig 信号相对于基准 B3I 信号的码间偏差改正数, \tilde{P}_{sig} 表示修正后的伪距观测值。B1C+B2a 双频消电离层伪距观测值公式可以写为^[15]

$$\tilde{P}_{\text{B1C-B2a}} = \frac{\gamma_{\text{B1C-B2a}} P_{\text{B1C}} - P_{\text{B2a}}}{\gamma_{\text{B1C-B2a}} - 1} - \frac{\gamma_{\text{B1C-B2a}} D_{\text{B1C}} - D_{\text{B2a}}}{\gamma_{\text{B1C-B2a}} - 1} \quad (6)$$

式(6)中, P_{B1C} 以及 P_{B2a} 为各个频段的伪距观测值, D_{B1C} 和 D_{B2a} 为 B1C 和 B2a 频段的码间偏差改正数, $\gamma_{\text{B1C-B2a}} = f_{\text{B1C}}^2 / f_{\text{B2a}}^2$, 其中 f_{B1C} 和 f_{B2a} 为载波中心频率。

如果不使用 DCB 改正,式(6)可以写作

$$P_{\text{B1C-B2a}} = \frac{\gamma_{\text{B1C-B2a}} P_{\text{B1C}} - P_{\text{B2a}}}{\gamma_{\text{B1C-B2a}} - 1} \quad (7)$$

式(7)中, $P_{\text{B1C-B2a}}$ 为未使用 DCB 修正的双频伪距观测值。

武汉大学和精密测量院均可以通过实时 SSR

数据流向用户播发 OSB 改正数,分别通过 OSBC00WHU1 和 SSR00CAS0 挂载点播发。这两个挂载点播发的改正数参考频段为 B1I+B3I 双频消电离层^[16-17]。OSB 改正数对伪距的修正公式如下:

$$\tilde{P}_{\text{sig}} = P_{\text{sig}} - O_{\text{sig}} \quad (8)$$

式(8)中, O_{sig} 表示 SSR 播发的 sig 信号相对于基准 B1I-B3I 信号的 OSB 改正数。经过 OSB 改正的 B1C+B2a 双频消电离层的伪距观测值公式可以写为

$$\tilde{P}_{\text{B1C-B2a}} = \frac{\gamma_{\text{B1C-B2a}} P_{\text{B1C}} - P_{\text{B2a}}}{\gamma_{\text{B1C-B2a}} - 1} - \frac{\gamma_{\text{B1C-B2a}} O_{\text{B1C}} - O_{\text{B2a}}}{\gamma_{\text{B1C-B2a}} - 1} \quad (9)$$

式(9)中, O_{B1C} 和 O_{B2a} 为 B1C 和 B2a 频段的 OSB 改正数。无 OSB 改正的 B1C+B2a 双频消电离层伪距观测方程可以写成

$$P_{\text{B1C-B2a}} = \frac{\gamma_{\text{B1C-B2a}} P_{\text{B1C}} - P_{\text{B2a}}}{\gamma_{\text{B1C-B2a}} - 1} \quad (10)$$

2 实时 PPP 授时实验设计与结果分析

2.1 实验方案设计

实时 PPP 单向授时及时间比对测试系统组成如图 3 所示。两台接收机均使用 Septentrio 公司的 Mosaic-T, 天线使用 CM100 天线, 天线安装位置的直线距离约为 5 m; 部署于上位机的 PPP 实时处理软件采集观测值和广播星历, 同时获取 GEO 卫星播发的 PPP-B2b 改正数或者是通过网络获取 WHU/CAS 播发的实时精密 SSR 改正数, 对广播卫星位置和卫星钟差进行改正, 然后进行 PPP 解算, 获得 PPP 单向授时结果和时间比对结果。

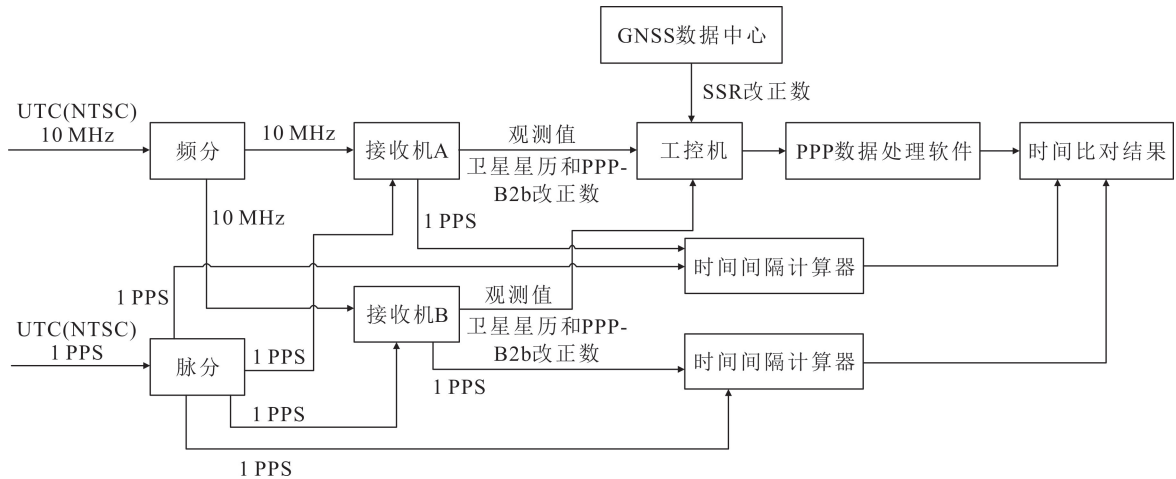


图3 PPP 时间比对硬件连接示意图

为了测试 DCB/OSB 对北斗三号实时 PPP 单向授时和时间比对的影响,共设计了 6 组实验,实验组别如表 1 所示。

表 1 北斗 B1C+B2a PPP 单向授时及时间比对数据组别

实验组别序号	改正数数据源	挂载点	改正数类型
1	北斗 GEO 卫星	PPP-B2b	轨道+钟差
2			轨道+钟差+DCB
3	武汉大学 GNSS 数据中心 (ntrip.gnsslab.cn)	SSRC00CAS0	轨道+钟差
4			轨道+钟差+OSB
5			轨道+钟差
6			轨道+钟差+OSB

数据处理策略见表 2,精密卫星位置和卫星钟差由不同类型的改正数改正广播星历得到,电离层延迟一阶误差项通过双频消电离层模型消除,对流层延迟误差使用天顶对流层估计模型进行修正,载波相位模糊度作为未知数进行估计,PPP 解算过程中使用卡尔曼滤波进行参数估计。

表 2 PPP-B2b/SSR 解算数据处理策略

项目	策略项目
PPP 解算模型	双频消电离层
数据采样间隔	1 s
卫星截止高度角	10°
信号频点	北斗 B1C+B2a
天线相位缠绕	模型改正
固体潮与海洋潮汐	模型改正
相对论效应	模型改正
地球自转	模型改正
天线相位中心偏差	igs20.atx
对流层延迟模型	天顶对流层干延迟估计模型
参数估计模型	扩展卡尔曼滤波
接收机坐标估计	常数
接收机钟差估计	白噪声估计
模糊度	浮点解
改正数	PPP-B2b/SSR
SSR 挂载点	SSRC00WHU0+OSBC00WHU1
	SSRC00CAS0

由于本文进行的是静态的授时性能实验,实验开始前对天线位置参数进行了测定,使接收机在位置参数固定配置下运行,待估参数包括本地接收机钟差 Δt_r ,对流层延迟 Δt_{trop} 以及 n 颗卫星的载波相位浮点模糊度 $N_1 \sim N_n$,待估参数见式(11):

$$X = [\underbrace{\Delta t_r}_{\text{接收机钟差}}, \underbrace{\Delta t_{\text{trop}}}_{\text{对流层延迟}}, \underbrace{N_1, \dots, N_n}_{\text{浮点模糊度}}]。 \quad (11)$$

2.2 测试结果及分析

测试时间为 2024 年 11 月 20 日至 2024 年 11 月

23 日,共持续 4 d。

1) 顾及 DCB/OSB 的 PPP 单向授时性能分析

DCB/OSB 直接作用于 PPP 单向授时。图 4 至图 6 为 11 月 23 日其中一台接收机的 PPP 伪距残差分布,不同的颜色区分不同卫星,从图中可以看出,不使用 DCB/OSB 的各颗卫星 PPP 伪距残差分布差异较大,而使用 DCB/OSB 后伪距残差分布基本在零值附近,证明了 DCB/OSB 改正伪距偏差上的正确性^[18]。

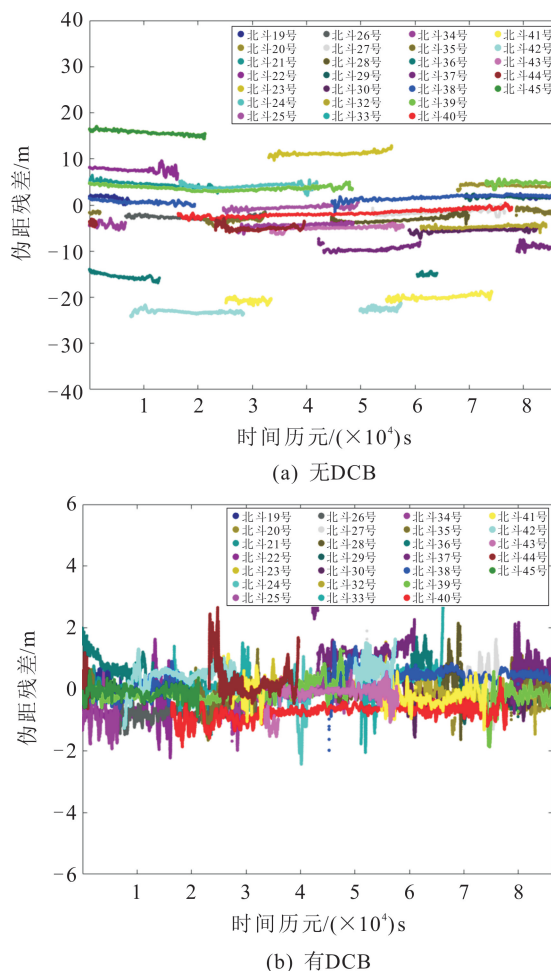


图 4 PPP-B2b 改正数有无 DCB 的伪距残差分布

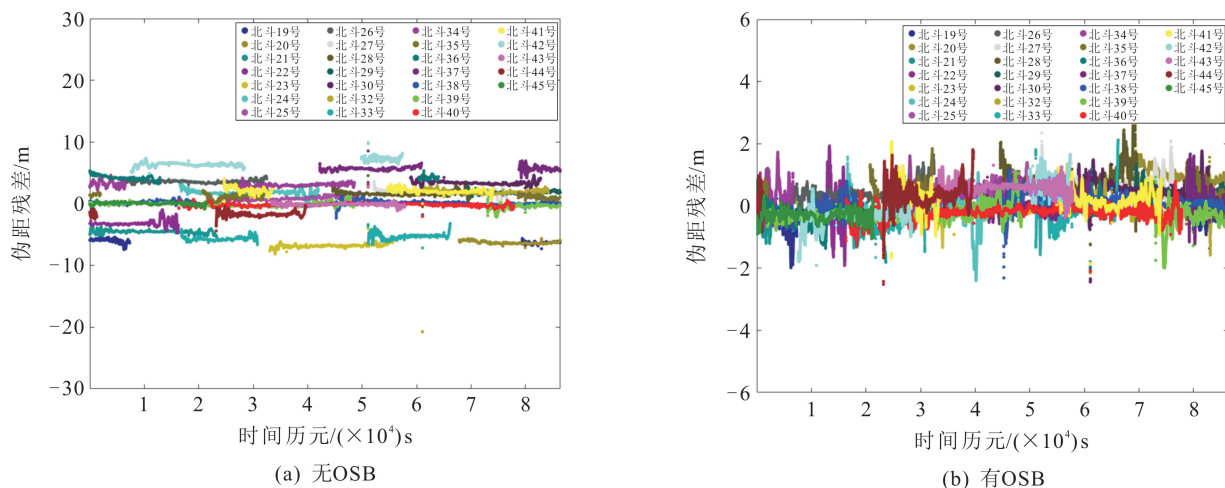


图5 CAS0改正数有无 OSB 的伪距残差分布

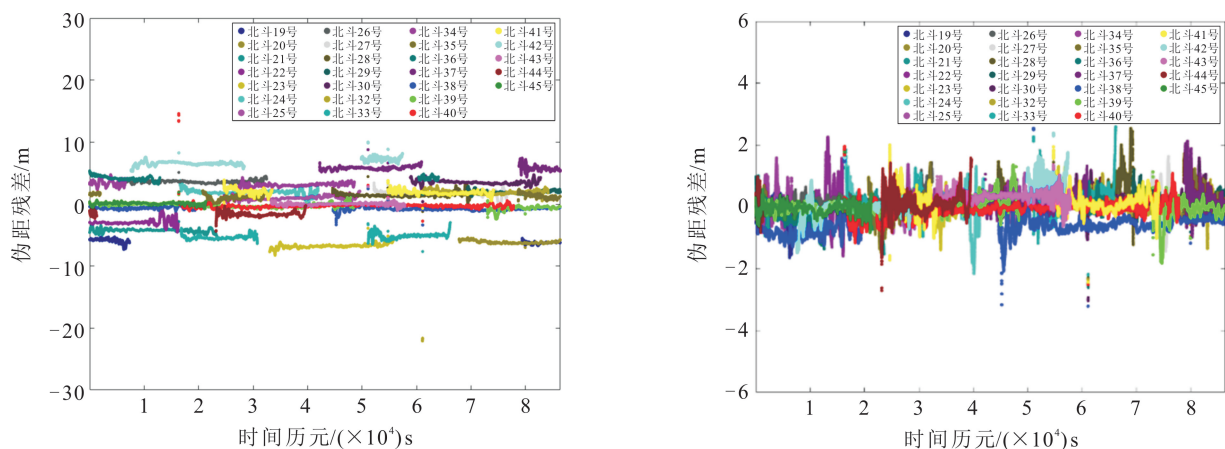


图6 WHU0改正数有无 OSB 的伪距残差分布

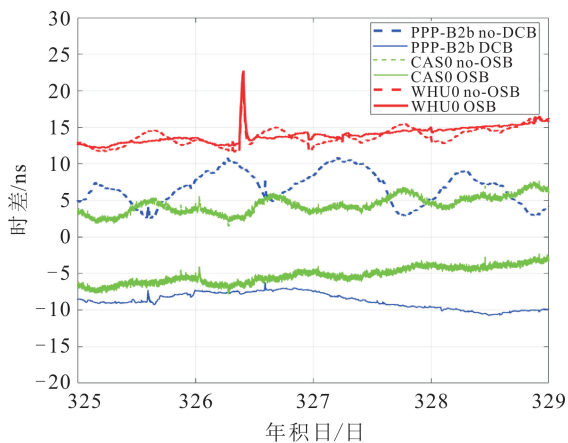


图7 PPP-B2b/SSR 的 B1C+B2a 有无 DCB/OSB 单向授时结果

对比、分析 3 种改正数的有无 DCB/OSB 时 PPP 单向授时的结果,由于未对设备时延和线缆时延进行标校,时间偏差结果含有设备及线缆时延影响,为方便对比不同改正数来源对授时偏差的影响,使用改正 DCB/OSB 的 3 种授时偏差的均值作为时延修正量对偏差进行补偿,处理后测试结果见

图 7,单向授时的 STD 和峰峰值汇总见表 3。由结果可以看出,在相同条件下测试,3 种数据源不使用 DCB/OSB 的单向授时结果呈现更明显的周期性波动,而使用 DCB/OSB 的单向授时结果更加平稳;不同改正数的 DCB/OSB 单向授时结果存在差异,PPP-B2b 单向授时结果与 CAS0 差异为 $-0.15 \sim 7.95$ ns,与 WHU0 差异为 $19.69 \sim 26.57$ ns,此差异可能是因为不同产品的卫星钟差改正数的基准以及卫星钟差的估计精度差异导致的;而从 STD 和峰峰值结果来看,DCB/OSB 能有效改善单向授时的周期性波动情况,单向授时结果更稳定。用户在使用不同类型的实时产品进行 PPP 单向授时的时候,需要考虑不同产品的差异而导致的单向授时精度和稳定性差异,但是 DCB/OSB 的修正是必须的。对于图 7 的 WHU0 单向授时结果出现跳变,排查对应时间段的原始数据发现,在这段时间内,某一颗卫星刚进入视野并且对应的改正数超出有效期,而 PPP 解算并没有剔除该星,导致该卫星的伪距残差较大,进而导致单向授时结果出现跳变。此时跳

变结果为异常值,并且存在随机性,因此 WHU0 挂载点 11 月 21 日单天的有 DCB 单向授时峰峰值为 10.37 ns,反而大于无 DCB 单向授时峰峰值 10.13 ns,具体可见表 3,此时的异常峰峰值结果不能作为评

估单向授时的指标。在对几天结果进行平均分析的时候,剔除了异常值当天的数据,而采用正常三天的数据平均处理,这能防止异常值对结果分析的影响。

表 3 PPP-B2b/SSR 的 PPP 单向授时 STD 和峰峰值汇总 单位:ns

日期	基于 PPP-B2b 改正参数的单向授时				基于 CAS0 改正参数的单向授时				基于 WHU0 改正参数的单向授时			
	STD		峰峰值		STD		峰峰值		STD		峰峰值	
	DCB	无 DCB	DCB	无 DCB	OSB	无 OSB	OSB	无 OSB	OSB	无 OSB	OSB	无 OSB
11 月 20 日	0.46	1.40	2.09	5.30	0.55	0.84	3.26	3.61	0.44	0.86	1.61	2.96
11 月 21 日	0.21	1.60	1.71	6.05	0.66	0.99	3.75	4.73	1.42	1.49	10.37	10.13
11 月 22 日	0.67	2.88	2.42	7.97	0.59	0.90	3.03	3.82	0.35	0.83	1.73	3.36
11 月 23 日	0.28	1.88	1.26	6.10	0.42	0.89	2.63	4.28	0.45	1.02	2.15	3.91
结果平均 (除去异常)	0.41	1.94	1.87	6.36	0.56	0.90	3.17	4.11	0.41	0.91	1.83	3.41

使用 Allan 偏差(Allan Deviation, ADEV)评估频率稳定度^[19-20]。由于 WHU0 单向授时结果出现跳变,使用稳定运行的后 100 000 s 数据计算 3 种方式的单向授时 ADEV, ADEV 结果见图 8 至图 10, 结果汇总表见表 4,由结果可以看出,DCB/OSB 能

提高 3 种方式的万秒稳定度。由图 7 可以看出, PPP-B2b 的 DCB 更能有效改善单向授时结果的周期性波动情况,所以 PPP-B2b 的 DCB 相比于 CAS0 和 WHU0 的 OSB 对万秒稳定度提升更为明显。

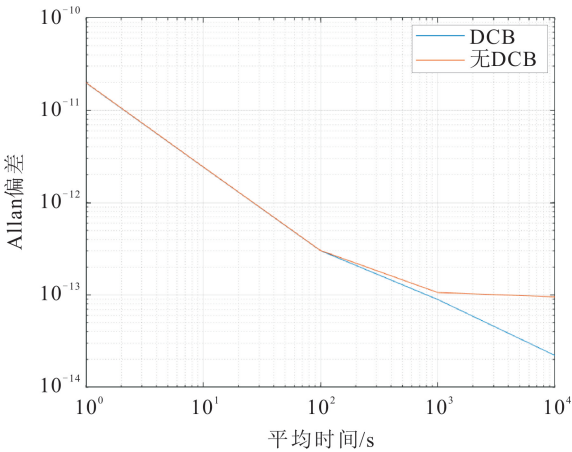


图 8 PPP-B2b 有无 DCB 的单向授时 ADEV

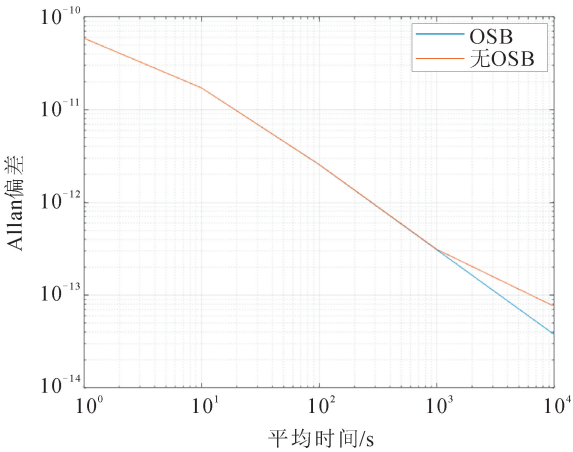


图 9 CAS0 有无 OSB 的单向授时 ADEV

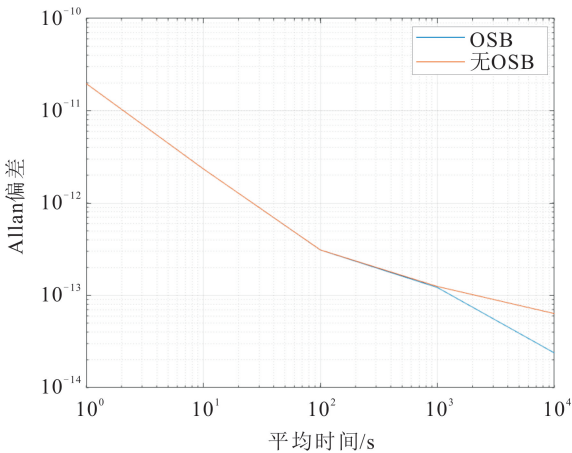


图 10 WHU0 改正数有无 OSB 的单向授时 ADEV

表 4 PPP-B2b/SSR 的 PPP 单向授时 ADEV 汇总

采样间隔/s	基于 PPP-B2b 改正参数的 单向授时 Allan Deviation		基于 CAS0 改正参数的 单向授时 Allan Deviation		基于 WHU0 改正参数的 单向授时 Allan Deviation	
	有 DCB	无 DCB	有 OSB	无 OSB	有 OSB	无 OSB
1	1.98×10^{-11}	1.99×10^{-11}	5.90×10^{-11}	5.90×10^{-11}	1.97×10^{-11}	1.97×10^{-11}
10	2.43×10^{-12}	2.44×10^{-12}	1.72×10^{-11}	1.72×10^{-11}	2.35×10^{-12}	2.35×10^{-12}
100	3.02×10^{-13}	3.03×10^{-13}	2.56×10^{-12}	2.57×10^{-12}	3.10×10^{-13}	3.11×10^{-13}
1 000	8.93×10^{-14}	1.06×10^{-13}	3.09×10^{-13}	3.12×10^{-13}	1.22×10^{-13}	1.25×10^{-13}
10 000	2.21×10^{-14}	9.54×10^{-14}	3.75×10^{-14}	7.55×10^{-14}	2.38×10^{-14}	6.35×10^{-14}

2) 站间时间比对结果分析

两台接收机均接入 UTC(NTSC)主钟信号,作为站间时间比对的被测信号,因为被测信号同源,因此时差测量结果主要反映本系统的站间时间比对能力。站间 PPP 时间比对结果可以通过 PPP 解算的两台接收机钟差(即具有外部参考的单向授

时)互差计算得到。为便于对比 3 种产品的影响差异,使用 DCB/OSB 的 3 种时间比对测试组合的结果均值作为两台设备站间比对的相对时延值,在数据处理时予以补偿最终得到的时间比对结果见图 11 至图 13,PPP-B2b/SSR 的站间时间比对的 STD 结果见表 5。

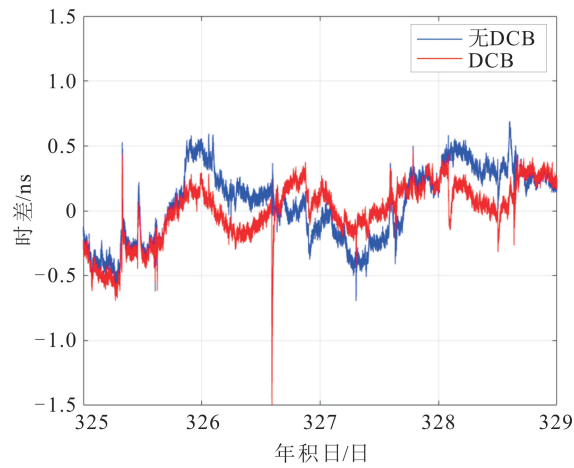


图 11 PPP-B2b 有无 DCB 的时间比对结果

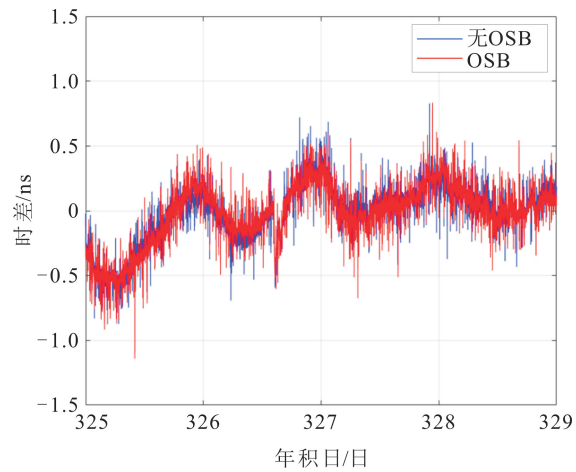


图 12 CAS0 有无 OSB 的时间比对结果

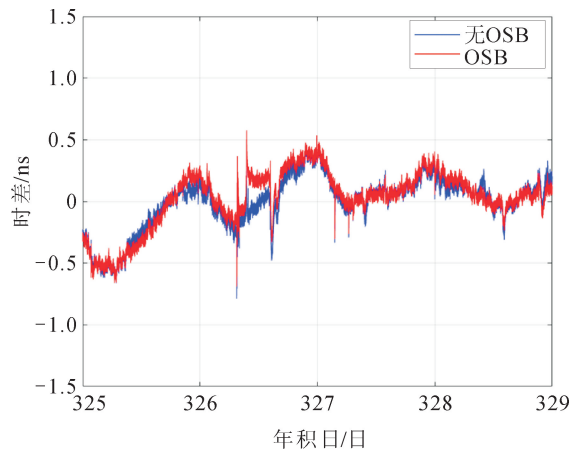


图 13 WHU0 有无 OSB 的时间比对结果

表 5 PPP-B2b/SSR 的站间时间比对结果 STD 汇总 单位:ns

日期	基于 PPP-B2b 改正参数的 时间比对 STD		基于 CAS0 改正参数的 时间比对 STD		基于 WHU0 改正参数的 时间比对 STD	
	DCB	无 DCB	OSB	无 OSB	OSB	无 OSB
11 月 20 日	0.24	0.30	0.26	0.24	0.26	0.23
11 月 21 日	0.17	0.16	0.18	0.19	0.17	0.19
11 月 22 日	0.14	0.23	0.12	0.12	0.12	0.11
11 月 23 日	0.13	0.10	0.09	0.09	0.10	0.09
4 天 STD 平均	0.17	0.20	0.16	0.16	0.16	0.15

由时间比对结果可以看出,使用 DCB/OSB 与否对时间比对结果影响较小,这是因为短基线条件下因 DCB/OSB 修正导致的单向授时周期性波动影响呈强相关特性,由 DCB/OSB 引起的单站授时结果周期性波动在站间差分之后得到了消除,所以 DCB/OSB 修正对经过站间差分处理的时间比对结果影响不明显。对于图 11 的 PPP-B2b 时间比对结果出现跳变,排查对应时间段的原始数据发现,在这段时间内,某一颗卫星刚进入视野并且对应的改正数未及时更新,导致该卫星的伪距残差较大,进而导致时间比对结果出现跳变;对于图 13 的 WHU0 时间比对结果出现不连续的情况,经排查后发现,由于某颗北斗卫星的 SSR 改正数超出有效期,使用超期的改正数会导致 PPP 解算接收机钟差出现异常跳变,影响时间比对结果;对于图 12 毛刺

噪声过大问题,这是因为在测试时间段内,获取到的 CAS0 挂载点实时卫星钟差改正数的噪声较大,相比于 PPP-B2b 和 WHU0 的钟差改正数不够平滑,所以影响 PPP 时间比对结果,在进行 PPP 解算后时间比对结果出现较多的毛刺。

为了消除异常值对结果的影响,使用测试稳定的后 100 000 s 数据进行分析,并计算时间比对 ADEV。图 14 至图 16 分别为 PPP-B2b、CAS0 和 WHU0 3 种类型改正数有无 DCB/OSB 的时间比对结果的 ADEV,表 6 为时间比对 ADEV 汇总。由结果可以看出,3 种方式有 DCB/OSB 的万秒 ADEV 相比与无 DCB/OSB 的 ADEV 提升并不明显,这是由于站间差分可以消除周期性波动的影响,导致使用 DCB/OSB 时间比对万秒 ADEV 没有明显的改善。

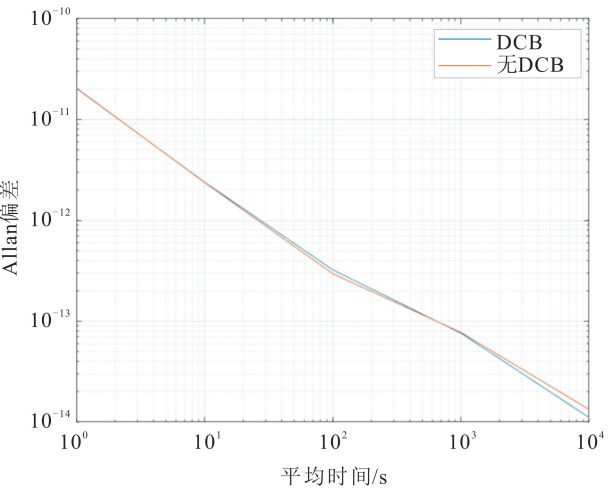


图 14 PPP-B2b 有无 DCB 的时间比对频率稳定度

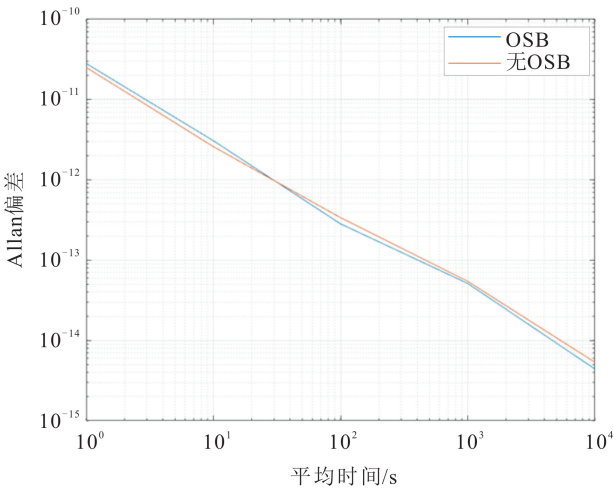


图 15 CAS0 有无 OSB 的时间比对频率稳定度

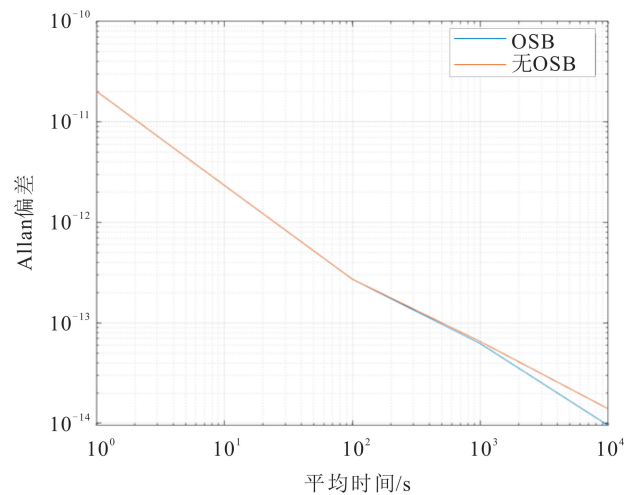


图 16 WHU0 有无 OSB 的时间比对频率稳定度

表 6 PPP-B2b/SSR 的时间比对结果 ADEV 汇总

采样间隔/s	PPP-B2b 时间比对 ADEV		CAS0 时间比对 ADEV		WHU0 时间比对 ADEV	
	有 DCB	无 DCB	有 OSB	无 OSB	有 OSB	无 OSB
1	2.04×10^{-11}	2.05×10^{-11}	2.82×10^{-11}	2.52×10^{-11}	2.03×10^{-11}	2.03×10^{-11}
10	2.39×10^{-12}	2.38×10^{-12}	3.07×10^{-12}	2.59×10^{-12}	2.34×10^{-12}	2.34×10^{-12}
100	3.23×10^{-13}	2.96×10^{-13}	2.83×10^{-13}	3.38×10^{-13}	2.72×10^{-13}	2.72×10^{-13}
1 000	7.61×10^{-14}	7.74×10^{-14}	5.12×10^{-14}	5.44×10^{-14}	6.22×10^{-14}	6.51×10^{-14}
10 000	1.11×10^{-14}	1.33×10^{-14}	4.40×10^{-15}	5.34×10^{-15}	9.49×10^{-15}	1.39×10^{-14}

3 结论

本文针对 PPP-B2b 播发的 DCB 改正数以及 WHU0 和 CAS0 播发的 OSB 改正数对顾及 DCB/OSB 的 PPP B1C+B2a 单向授时以及时间比对进行了实验,实验结果得到如下结论。

① DCB/OSB 对单向授时的影响较大,使用无 DCB/OSB 的 PPP 模型,单向授时结果会出现周期性的波动,而使用 DCB/OSB 能将 PPP-B2b、CAS0 以及 WHU0 3 种方式的单向授时 STD 分别从 1.94 ns、0.90 ns 和 0.91 ns 提升至 0.41 ns、0.56 ns 和 0.41 ns,峰峰值从 6.36 ns、4.11 ns 和 3.41 ns 提升到 1.87 ns、3.17 ns 和 1.83 ns,万秒稳定度从 9.54×10^{-14} 、 7.55×10^{-14} 和 6.35×10^{-14} 提升至 2.21×10^{-14} 、 3.75×10^{-14} 和 2.38×10^{-14} 。

② 进行了短基线共钟时间比对实验,因 DCB/OSB 修正导致的单向授时周期性波动影响呈强相关特性,站间差分几乎可以完全消除其影响,有无 DCB/OSB 的 PPP 时间比对 STD 均在 0.3 ns 以下,DCB/OSB 对时间比对万秒稳的提升并不明显,3 种

方式的 PPP 时间比对万秒稳从 1.33×10^{-14} 、 5.34×10^{-15} 和 1.39×10^{-14} 提升至 1.11×10^{-14} 、 4.40×10^{-15} 和 9.49×10^{-15} 。

③ 在利用北斗三号开展授时工作时,必须考虑各频点间的差异。PPP-B2b 播发的 DCB 在使用方式上与 CAS0/WHU0 播发的 OSB 类似,均通过在对伪距观测值上直接扣除相应频点的 DCB 改正数或 OSB 改正数来实现数据处理。PPP-B2b 具备显著优势,无需依赖网络即可实现亚纳秒级的实时授时性能,能够满足多样化的时间比对需求场景,为高精度时间比对领域提供了一种高效且实用的解决方案,具有广阔的应用前景。

参考文献:

[1] 李坤,王潜心,龚佑兴,等.基于 TGD/DCB 改正的 BDS 多频单点定位精度分析[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2021,44(5):685-690.
[2] 崔洁,陈俊平,王彬,等.基于 CAS 和 DLR 产品的卫星 DCB 特性分析[J].天文学进展,2022,40(3):429-440.
[3] 顾嘉琛,宋传峰,田坤俊,顾及 OSB 改正的 BDS-3 新频点精密单点定位精度分析[J].大地测量与地球动力

- 学,2023,43(1):18-22.
- [4] 刘宏辉,王潜心,余志浩,等.基于 DCB 和 OSB 产品的 GNSS 精密单点定位性能对比与分析[J].全球定位系统,2023,48(2):36-42.
- [5] QIN W J,GE Y L,ZHANG Z,et al.Enhancing BDS-3 precise time transfer with DCB modelling[J].Measurement,2021,174:108641.
- [6] 谢钢.GPS 原理与接收机设计[M].北京:电子工业出版社,2009:70-74.
- [7] 曾文帝,何力,刘娅.卫星单频近距离共视与双频单向授时站间同步性能分析[J].时间频率学报,2020,43(2):101-112.
- [8] WU M F, SUN B Q, WANG Y X, et al. Sub-nanosecond one-way real-time time service system based on UTC[J].GPS Solution,2021(25):44.
- [9] 朱琳,张慧君,李孝辉,等.北斗/GNSS 授时性能评估及结果比较分析[J].时间频率学报,2023,46(4):289-297.
- [10] 张杰,钟世明,韩金阳,等.基于 PPP 技术的实时时间频率传递方法性能评估[J].时间频率学报,2022,45(4):239-246.
- [11] CHEN R Q, LIU Y L, LI X L. A method of national standard time high precision remote reproduction[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2018,43(2):188-193.
- [12] 郭栋,董绍武,武文俊,等.北斗 PPP 链路相对校准及分析[J].时间频率学报,2023,46(1):1-7.
- [13] 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)[K].2020.
- [14] International GNSS Service(IGS) 2020 IGS State Space Representation(SSR) Format(Version 1.00)[K].2020.
- [15] GE Y L,DING S,QIN W J,et al.Performance of ionospheric-free PPP time transfer models with BDS-3 quad-frequency observations[J]. Measurement, 2020, 160:107836.
- [16] 陈晏,梁尔涛,赵阳阳,等.OSB 产品及其对精密单点定位影响分析[C]//第十三届中国卫星导航年会,北京:第十三届中国卫星导航年会会务组,2022.
- [17] 刘宏辉,王潜心,余志浩,等.基于 DCB 和 OSB 产品的 GNSS 精密单点定位性能对比与分析[J].全球定位系统,2023,48(2):36-42.
- [18] TANG J, LYU D, ZENG F, et al. Comprehensive analysis of PPP-B2b service and its impact on BDS-3/GPS real-time PPP time transfer[J].Remote Sensing, 2022,14(21):5366.
- [19] DAVID A,HELMUT H,PETER K,et al.Standard terminology for fundamental frequency and time metrology[C]//Proceedings of the 42nd Annual Frequency Control Symposium,1998:419-425.
- [20] LOMBARDI M.Fundamentals of Time and Frequency [M].Oxfordshire:The Mechatronics Handbook,2022.