

引用格式: 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.

北斗 PPP 链路相对校准及分析

郭栋^{1,2}, 董绍武^{1,2}, 武文俊^{1,2}, 王威雄¹, 王翔¹, 宋会杰¹

(1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;
2. 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 100049)

摘要: 为促进北斗时间传递链路早日用于 UTC (Coordinated Universal Time) 的计算, 在中国科学院国家授时中心 (NTSC) 开展了 UTC (NTSC) 与 UTC (JATC) (Joint Atomic Time of China) 间北斗精密单点定位 (BDS PPP) 链路相对校准试验, 并以国际权度局 (BIPM) 公布的 GPS 精密单点定位 (GPS PPP) 链路结果为参考对其精度进行评估。试验结果表明, UTC (NTSC) 与 UTC (JATC) 间 BDS PPP 链路经校准后其时间比对结果与 BIPM GPS PPP 链路结果的峰值偏差不超过 0.2 ns, 满足 GNSS 时间传递的精度要求。

关键词: 北斗精密单点定位; GPS 精密单点定位; 时间比对; 相对校准

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2023-01-0001-07

Relative calibration and analysis of BDS PPP time link

GUO Dong^{1,2}, DONG Shao-wu^{1,2}, WU Wen-jun^{1,2},
WANG Wei-xiong¹, WANG Xiang¹, SONG Hui-jie¹

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
2. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to promote the BeiDou time transfer link to be used for UTC calculation as soon as possible, the relative calibration test of the BDS PPP link between the UTC(NTSC) and the UTC(JATC) was carried out in the National Time Service Center, and its accuracy was evaluated with reference to the GPS PPP link results published by the BIPM. The test results show that after the BDS PPP link between the UTC(NTSC) and the UTC(JATC) is calibrated, the peak deviation between the time comparison results and the BIPM GPS PPP link results is no more than 0.2 ns, satisfying the accuracy requirement of GNSS time transfer.

Key words: BDS precise point positioning (BDS PPP); GPS precise point positioning (GPS PPP); time comparison; relative calibration

0 引言

当前国际通用标准时间是协调世界时 (Coordinated Universal Time, UTC)。远距离高精度时间传递是计算 UTC 和国际原子时 (International Atomic Time, TAI) 的重要环节之一^[1-2]。目前参与 UTC/TAI 计算的守时实验室之间主要通过 GPS 精密单点定位 (GPS precise point positioning, GPS PPP)、GPS 全视

(GPS all-in-view, GPS AV) 和卫星双向时间传递 (two-way satellite time and frequency transfer, TWSTFT) 与 GPS PPP 组合 (combined smoothing of TWSTFT and GPS PPP, TWGPPP) 链路取得联系; 其中 GPS PPP 链路占时间传递链路总数的比重最高约 60%。随着各卫星导航系统的发展与完善, GNSS (Global Navigation Satellite System) 时间比对研究日趋活跃, 国际权度局 (BIPM) 已于 2020 年将 Galileo 系统作为 UTC 计算的备份时间传递链路, 同时也在对北斗系统的时间传递性能进行测试评估。

时间传递链路中设备硬件时延对时间比对结果有很大的影响, 为确保 GNSS 时间传递链路的精度和长期稳定性, 需要对链路两端所用接收机的硬件时延进行定期校准。接收机硬件时延校准是测定从其天线相位中心到本地信号参考点间的各项硬件时延, 其值与卫星信号频率有关, 主要包括本地信号参考点到接收机内部参考点间的时延 (reference delay, REF DLY), 卫星信号在接收机和天线内部的电路时延 (internal delay, INT DLY) 和天线线缆内部的信号群时延 (cable delay, CAB DLY)^[3-4]。接收机硬件时延校准方式分为直接校准和相对校准。美国海军研究实验室和法国航天局利用不同型号的设备 (卫星模拟器、矢量网络分析仪) 和方法对 GPS 信号在接收机和天线内部的时延分别进行直接校准, 其结果具有良好的一致性, 相差不超过 1 ns^[5]。目前各守时实验室的接收机主要还是通过 BIPM 和区域测量组织 (Regional Metrology Organizations, RMO) 采用相对校准的方式测定其各项硬件时延^[6]。近些年国内外学者对接收机北斗信号时延的校准的研究相对较少, 校准结果尚未得到 BIPM 认可。本文利用自主开发的 GPS/BDS PPP 软件和未校准的多模接收机在中国科学院国家授时中心 (NTSC) 开展了 BDS PPP 链路相对校准试验, 通过相对校准可间接求得国家授时中心保持的 UTC (NTSC) 与 UTC (JATC) (Joint Atomic Time of China) 间 BDS PPP 链路两端接收机 BDS B1I&B3I 信号总时延 (total delay, TOT DLY) 之差, 进而得到 UTC (NTSC) 与 UTC (JATC) 的绝对偏差。以 BIPM 公布的 GPS PPP 链路的时间比对结果为参考对所求时差结果的精度进行评估。

1 BDS PPP 链路相对校准原理

两台未校准北斗信号时延的接收机可根据 GNSS 共钟比对的原理求得其北斗信号总时延之差。若将两守时实验室待校准接收机与同一移动站的北斗信号总时延的差值互差, 则可间接求得两地参考时间的绝对时差。以 BDS PPP 链路为例, 其相对校准过程如下:

① 如图 1 所示, 选一台多模接收机 R_T 作为移动站, 将其置于守时实验室 A 与待校准接收机 R_A 均接入本地时频参考 UTC (A) 的频率信号并进行同步观测。利用 PPP 方法分别对两台接收机观测的北斗数据处理解得接收机钟差。第 i 个历元求解的钟差值可写成如下形式:

$$T_{R_A, i} = \text{UTC}(A) - T_{\text{ref}} + D_{R_A, i} \circ \quad (1)$$

$$T_{R_T, i} = \text{UTC}(A) - T_{\text{ref}} + D_{R_T, i} \circ \quad (2)$$

式 (1) 和 (2) 中, $T_{R_A, i}$ 、 $T_{R_T, i}$ 为用 PPP 方法分别处理 R_A 和 R_T 接收机在第 i 个历元的北斗观测数据解算的钟差; $D_{R_A, i}$ 、 $D_{R_T, i}$ 分别为第 i 个历元 R_A 和 R_T 接收机的 BDS 信号总时延。 T_{ref} 为 IGS (International GNSS Service) 各分析中心定义的参考钟。两式相减可获得第 i 个历元 R_A 与 R_T 接收机 BDS 信号的总时延之差。

$$D_{R_A, i} - D_{R_T, i} = T_{R_A, i} - T_{R_T, i} \circ \quad (3)$$

② 将移动站 R_T 及其天线和连接线缆移至守时实验室 B 与待校准接收机 R_B 均接入本地时频参考 UTC (B) 产生的频率信号并进行同步观测, 则可求得第 j 个历元 R_B 与 R_T 接收机 BDS 信号的总时延之差。

$$D_{R_B, j} - D_{R_T, j} = T_{R_B, j} - T_{R_T, j} \circ \quad (4)$$

式 (4) 中各参数含义与上面相同。

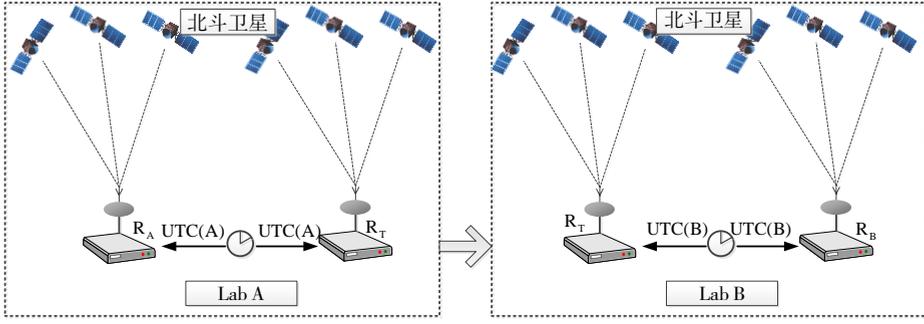


图 1 BDS PPP 链路相对校准原理

③ 计算 R_A 与 R_B 接收机 BDS 信号总时延之差。因为两次同步观测时间间隔较短，故可认为所用接收机 BDS 信号的总时延保持不变。但由于受观测噪声、大气延迟误差等随机误差的影响，导致用 PPP 求解的各接收机钟差随时间有微小的差异，则 R_A 与 R_B 接收机 BDS 信号的总时延之差可表示为

$$D_{R_A} - D_{R_B} = \sum_{n=1}^N (T_{R_A,n} - T_{R_T,n}) / N - \sum_{m=1}^M (T_{R_B,m} - T_{R_T,m}) / M \quad (5)$$

式(5)中， $T_{R_A,n}$ 、 $T_{R_T,n}$ 分别表示在①同步观测时段内接收机 R_A 和 R_T 第 n 个历元的钟差， $T_{R_B,m}$ 、 $T_{R_T,m}$ 分别表示在②同步观测时段内接收机 R_B 和 R_T 第 m 个历元的钟差， N 、 M 为各观测时段总历元数。

④ 计算 A、B 两地参考时间的时差。由于位于 A、B 两地的接收机 R_A 和 R_B 在整个观测过程中均保持同步观测，故在第 k 个历元其钟差可分别表示为：

$$T_{R_A,k} = \text{UTC}(A) - T_{\text{ref}} + D_{R_A} \quad (6)$$

$$T_{R_B,k} = \text{UTC}(B) - T_{\text{ref}} + D_{R_B} \quad (7)$$

将式(6)和(7)相减并将式(5)计算的结果代入式(8)后即可求得第 k 个历元 A、B 两地参考时间的时差，即：

$$(\text{UTC}(A) - \text{UTC}(B))_k = T_{R_A,k} - T_{R_B,k} - (D_{R_A} - D_{R_B}) \quad (8)$$

2 BDS PPP 链路相对校准

2.1 GPS/BDS PPP 软件评估

采用 GPS PPP 方法进行高精度时间传递其链路噪声相比共视和全视方法较小，因此为提高北斗链路校准的精度，开发了 GPS/BDS PPP 软件并对其可靠性进行验证。分别选用德国技术物理研究院 (PTB) 和捷克光电研究院 (TP) 接有本地参考信号的多模多频接收机 PT13 和 TP02，其观测数据的采样间隔均为 30 s，接收机的具体配置信息见表 1。选取 2020-12-19/12-22 (简化儒略日 MJD: 59 202~59 205) 间 PT13 和 TP02 接收机的 RINEX 观测文件，用 GPS/BDS PPP 软件分别对 GPS 和 BDS 的双频载波和伪距观测值处理进而求得两地参考时间的钟差，如图 2 所示。表 2 给出了 PPP 软件在数据处理过程中采用的模型及策略。以 BIPM 公布的 GPS PPP 结果作为参考对时间比对结果进行评估。

表 1 接收机配置信息

实验室	接收机编号	接收机类型	天线类型
PTB	PT13	POLARX5TR	LEIAR25.R4
TP	TP02	GTR55	NOV850

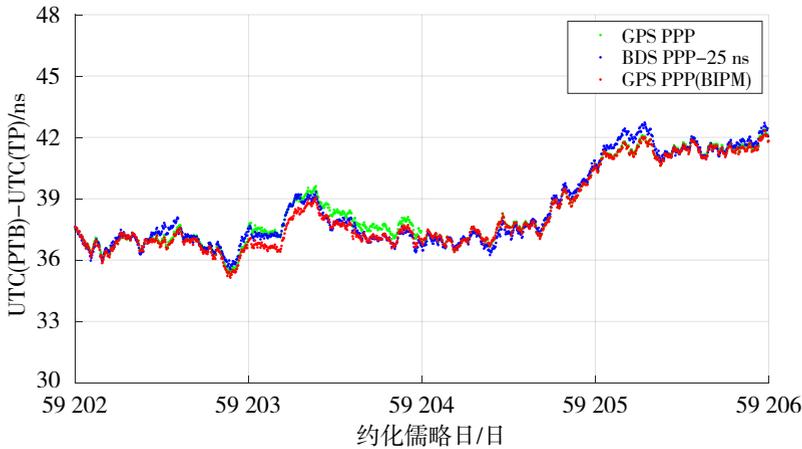


图 2 PTB 与 TP 间 PPP 时间比对结果

表 2 GPS/BDS 观测数据处理模型及策略

内容	模型及策略
观测模型	传统模型 ^[7-9]
观测信号	GPS L1、L2; BDS B1I、B3I
卫星轨道、钟差	WUM 发布的精密产品
电离层	双频无电离层组合
对流层	模型+随机游走噪声
截止高度角	5°
接收机钟差	白噪声
海洋潮汐模型	FES2004
参数估计	加权最小二乘

由图 2 可以看出,用开发软件计算的 GPS 和 BDS PPP 链路的时间比对结果与 BIPM 公布的 GPS PPP 结果的一致性较好。由于 BDS 链路未校准,其时间比对结果中存在明显的系统偏差,但根据第 2 节可知这并不影响 BDS PPP 链路相对校准的结果。以 BIPM GPS PPP 链路比对结果为参考,在整个观测时段内 GPS 和 BDS PPP 链路结果相对 BIPM GPS PPP 链路的均方根值 (Root Mean Square, RMS) 分别为 0.29 ns 和 25.17 ns,可认为 GPS/BDS PPP 软件的处理结果可靠。

2.2 BDS PPP 链路相对校准结果分析

国家授时中心长期负责国家标准时间 UTC (NTSC) 的产生、保持与发播,同时承担着我国综合原子时 (JATC) 系统的建立与保持,是参与 UTC/TAI 计算的重要守时实验室之一。本次试验使用的 5 台多模接收机均来自国家授时中心,各卫星系统的信号时延均未校准,具体配置信息见表 3。其中将 NT02、NT03 和 NT05 接收机接入 UTC (NTSC) 时频参考信号,JA02 接入 UTC (JATC) 时频参考信号。

为了验证上述 BDS 链路相对校准方法的可行性,以校准链路的共钟比对 (common clock difference, CCD) 结果为 0 作为参考对该方法进行评估。选用 NT02、NT03 和 NT05 接收机在 2021-06-10/06-15 (MJD: 59 375~59 380) 的 RINEX 观测文件,并利用开发的 PPP 软件分别对各接收机的 BDS 观测数据处理求解钟差。图 3 给出了任意两台接收机间 BDS PPP 链路的共钟比对结果。

表 3 接收机配置信息

接收机编号	接收机类型	天线类型
NT02	GTR55	JAVAD TRE_3
NT03	GTR55	NOV850
NT05	POLARX5TR	SEPCHOKE_B3E6
NT06	POLARX5TR	SEPCHOKE_B3E6
JA02	GTR55	NOV850

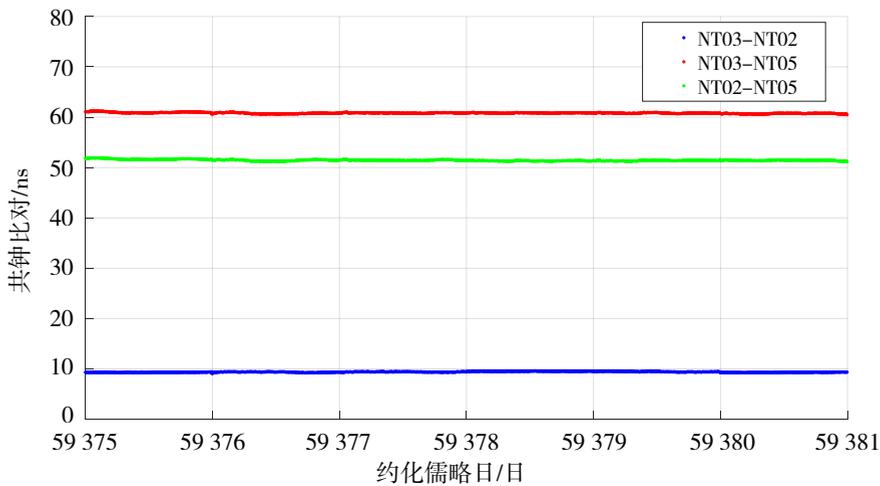


图 3 BDS PPP 链路共钟比对结果 (未校准)

由于各台接收机的北斗信号时延均未校准, 故 BDS PPP 链路共钟比对结果均不在 0 附近。假若将 NT05 设为移动站, 则根据公式(1)~(5)可求得 NT03 与 NT02 接收机 BDS 信号的总时延之差为 9.36 ns。图 4 已给出扣除 NT03 和 NT02 接收机 BDS 信号总时延之差后 BDS PPP 链路的共钟比对结果, 在 ± 0.2 ns 范围内, 相对参考值 0 的 RMS 约为 0.1 ns。

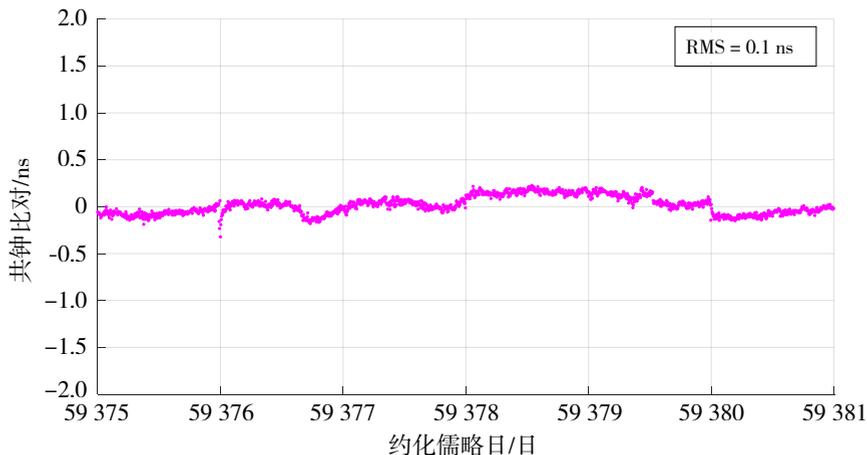


图 4 NT02 与 NT03 间 BDS PPP 链路的共钟比对结果 (校准后)

为进一步验证该校准方法的有效性, 以 BIPM 公布的 GPS PPP 结果为参考, 对 UTC (NTSC) 和 UTC (JATC) 间的 BDS PPP 链路相对校准后的时间比对结果进行评估。将 NT06 设为移动站, 先将其接入 UTC (NTSC) 时频参考信号与 NT03 进行同步观测, 然后再将 NT06 接入 UTC (JATC) 时频参考信号与 JA02 同步观测。整个观测过程中 NT06 的天线、线缆和时频参考信号线均保持不变以确保其各部分时延稳定。

图 5 和图 6 分别给出 NT06 与 NT03 和 NT06 与 JA02 间 BDS PPP 链路共钟比对结果, 由公式 (1) ~ (5) 可求得 NT03 与 JA02 间 BDS 信号的总时延之差为 83.53 ns 。图 7 给出了 UTC(NTSC) 与 UTC(JATC) 间 BDS PPP 链路相对校准后的时间比对结果, 其相对 BIPM 公布的 GPS PPP 结果的峰值残差在 $\pm 0.2 \text{ ns}$ 内, 如图 8 所示。

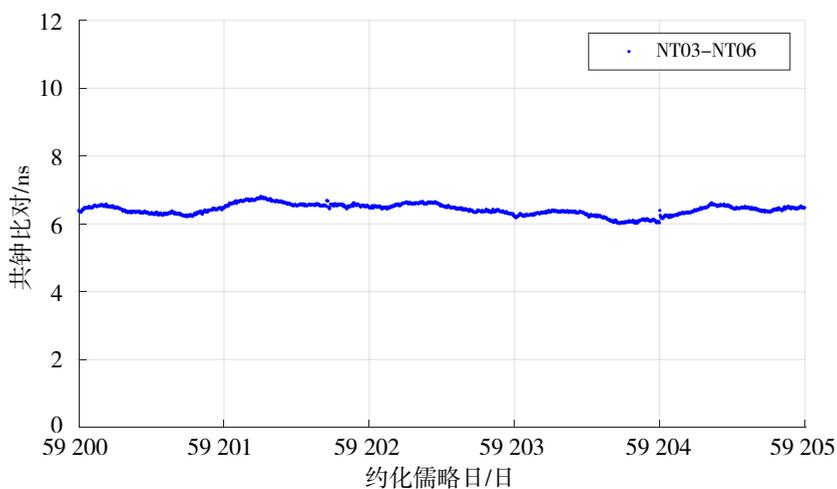


图 5 NT03 与 NT06 间 BDS PPP 链路的共钟比对结果 (未校准)

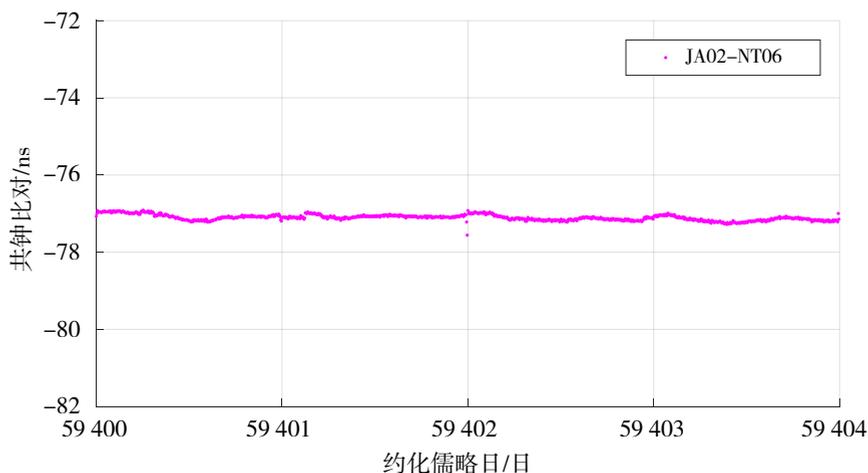


图 6 JA02 与 NT06 间 BDS PPP 链路的共钟比对结果 (未校准)

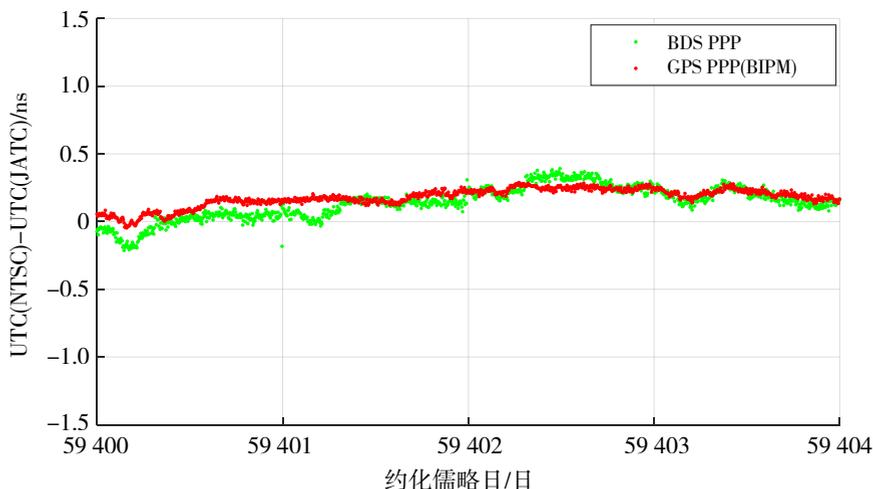


图 7 UTC(NTSC) 与 UTC(JATC) 间 BDS PPP 链路的时间比对结果 (校准后)

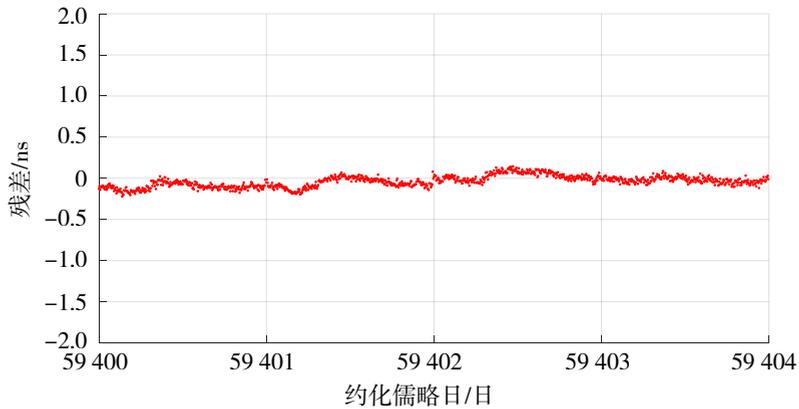


图 8 UTC (NTSC) 与 UTC (JATC) 间 BDS PPP 链路时间比对结果的残差

3 结语

本文利用自主开发的 GPS/BDS PPP 软件和多台未校准的 GNSS 多模接收机在国家授时中心开展了 BDS PPP 链路相对校准试验。UTC (NTSC) 与 UTC (JATC) 间 BDS PPP 链路相对校准后的时间比对结果与 BIPM 公布的 GPS PPP 链路比对结果基本一致, 峰值偏差不超过 0.2 ns, 满足 GNSS 时间传递的精度要求, 证明该校准方法具有可行性。

参考文献:

- [1] 武文俊, 广伟, 张继海, 等. 北斗亚欧共视时间比对试验[J]. 时间频率学报, 2018, 41(3): 200-205.
- [2] DELPORTE J, VALAT D, JUNIQUE T, et al. Progress on absolute calibrations of GNSS reception chains at CNES[C] // 2016 IEEE International Frequency Control Symposium (IFCS), New Orleans: IEEE, 2016.
- [3] 冯彬. 远程时间比对中的设备时延校准技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
- [4] DEFRAIGNE P, PETET G. CGGTTS-version 2E: an extended standard for GNSS time transfer[J]. Metrologia, 2015, 52(6): 1-22.
- [5] PROIA A, CIBIEL G, WHITE J, et al. Absolute calibration of GNSS time transfer systems: NRL and CNES techniques comparison[C] // 2011 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control and the European Frequency and Time Forum (FCS) Proceedings, San Francisco: IEEE, 2011.
- [6] BIPM. BIPM Guidelines for GNSS Equipment Calibration[K]. Paris: BIPM, 2021.
- [7] 陈康慷, 徐天河, 杨玉国, 等. iGMAS GNSS 钟差产品综合与评估[J]. 测绘学报, 2016, 45(S2): 46-53.
- [8] 赵兴旺, 王胜利, 刘超. GNSS 精密单点定位理论与方法[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2015: 90-108.
- [9] GUANG Wei, ZHANG Ji-hai, YUAN Hai-bo, et al. Analysis on the time transfer performance of BDS-3 signals[J]. Metrologia, 2020(57): 065023.