

引用格式: 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.

北斗 PPP 高精度时间比对技术研究

张继海^{1,2,3}, 董绍武^{1,2,3,4}, 袁海波^{1,2,3}, 广伟^{1,2}, 宋会杰^{1,2}, 章宇^{1,2}

- (1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;
2. 中国科学院 时间频率基准重点实验室, 西安 710600;
3. 中国科学院大学, 北京 100049;
4. 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 101048)

摘要: 随着我国北斗卫星导航系统的建设和完善, 现已开始向全球用户提供高精度的定位、导航和授时服务。基于中国科学院国家授时中心和中国台湾中华电信两个守时实验室的 GNSS 时间比对系统, 本文开展了基于北斗精密单点定位 (PPP) 的高精度远距离时间比对技术研究; 并结合两个守时实验室的实测数据, 利用 IGS 国际多模 GNSS 实验工程 (MGEX) 提供的精密轨道和钟差产品开展了比对试验, 进而获得了两地钟差。试验结果表明, 北斗 PPP 解算的两地钟差与 GPS PPP 解算的两地钟差具有很好的一致性, 天稳达到了 10^{-15} 量级; 说明北斗可以实现纳秒级或亚纳秒级精度的时间比对与同步, 为北斗正式纳入协调世界时的计算提供了基础。

关键词: 北斗卫星导航系统; 高精度时间传递与比对; 精密单点定位; 协调世界时

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2020-04-0262-08

Study on BeiDou PPP high precision time comparison

ZHANG Ji-hai^{1,2,3}, DONG Shao-wu^{1,2,3,4}, YUAN Hai-bo^{1,2,3}, GUANG Wei^{1,2},

SONG Hui-jie^{1,2}, ZHANG Yu^{1,2}

- (1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
2. Key Laboratory of Time and frequency Primary Standards, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
4. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101048, China)

Abstract: With the development and perfection of China BeiDou navigation satellite system (BDS), it begins to provide high precision positioning, navigation and time (PNT) service for the global users. In this paper, it studied the high precision and long distance time comparison based on precise point positioning (PPP) and the GNSS international time comparison systems which are operated in the National Time Service Center (NTSC), CAS and Chunghwa Telecommunication Laboratories (TL). The time difference between the local time and IGST is calculated by using the observation data of the time keeping laboratories and the precise orbit and satellite clock products from MGEX of IGS, then to calculate the time difference between NTSC and TL. The

收稿日期: 2020-04-22; 接受日期: 2020-06-18

基金项目: 中国科学院“西部之光”人才培养计划“西部青年学者”B类资助项目(XAB2019B13); 中国科学院国家授时中心青年创新人才资助项目

results show that the estimated time difference by BDS PPP is consistent with the GPS PPP, the frequency stability is in 1×10^{-15} per day. It also indicates that the BDS can realize the accuracy of nanosecond or sub-nanosecond level's time compare, which provides a basis for the formal incorporation of BDS into the UTC calculation.

Key words: BeiDou navigation satellite system; high precision time transfer and comparison; precision point positioning (PPP); coordinated universal time

0 引言

实现高精度时间比对已成为现阶段诸多科学研究和技术发展不可或缺的必要条件。随着全球卫星导航系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 的发展, 基于导航卫星的远距离时间比对技术应用越来越广泛, 其主要包括共视 (common view, CV) 时间比对技术、精密单点定位 (precise point positioning, PPP) 时间比对技术、全视 (all in view, AV) 时间比对技术。GPS 共视时间比对技术自 20 世纪 80 年代开始被国际权度局 (Bureau International des Poids et Mesures, BIPM) 采用, 用于连接世界上各守时实验室的原子钟, 从而进行 UTC 的计算^[1-2]。多年来, 美国的 GPS 卫星导航系统由于其稳定可靠及高精度的特点, GPS 全视以及 PPP 时间比对技术是 BIPM 用于国际 UTC 建立的主要手段。为提高 UTC 的准确性、稳定性以及可靠性, 2009 年国际时间频率咨询委员会 (Consultative Committee for Time and Frequency, CCTF) 大会建议并鼓励多时间比对手段应用于 UTC 的计算。随着我国独立自主开发的北斗卫星导航系统的建设与走向全球化服务应用的推广, 其已初步具备了导航、定位、测速与授时服务能力^[3-4]。在 2017 年 6 月, 法国巴黎召开的第 21 届 CCTF 大会上, BIPM 及各国专家提出将北斗卫星导航系统时间比对技术应用于 UTC 计算的建议。因此, 依托我国国家时间基准系统 UTC (NTSC) 的平台, 开展基于远距离北斗 PPP 时间比对的研究具有重要的意义。这将进一步增强我国北斗卫星导航系统在国际导航领域中的影响力。

2017 年, 中国科学院国家授时中心与德国联邦技术物理研究所 (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB)、瑞典国家计术研究院 (Technical Research Institutes of Sweden, RI.SE 或 SP)、比利时国家天文台 (Royal Observatory of Belgium, ORB) 等国际主要守时实验室率先开展了北斗长基线亚欧共视时间比对, 并取得了良好的比对结果^[5]。目前, 由于欧洲能观测到的北斗卫星数目较少, 在中国上空能够观测到较多的北斗卫星。因此, 基于现有的技术资源, 选择了能够观测北斗卫星较多的中国科学院国家授时中心 (NTSC) 以及台湾地区中华电信 (TL) 两个守时实验室, 开展基于北斗 2 号信号体制下的北斗 PPP 高精度远距离时间比对技术研究, 并对两地比对的结果进行了分析与评估。该实验的完成为我国北斗参与 UTC 的归算提供了可靠的技术参考。

1 北斗 PPP 时间比对原理

通常 GNSS 精密单点定位数学模型, 又称为观测模型, 它可表述为导航卫星观测数据和位置参数的数学关系。常用的模型包括消电离层组合模型, UofC 模型, Phase-Connected 模型, 星间单差模型和时星差模型^[6]等。在本文中使用传统的北斗无电离层组合模型。

PPP 时间比对技术是通过在不同的两个守时实验室放置的北斗接收机, 外接本地标准的 1 PPS 和 5/10 MHz 信号, 如图 1 所示, 接收机通过接收所有能观测到的北斗卫星空间信号, 利用 IGS 发布的精密钟差和轨道等产品, 以 IGS 的系统时间 IGST 为公共参考时间, 计算得到本地时 UTC(k) 与 IGST 的偏差,

进而对两站进行差分即可得到 $UTC(k_1) - UTC(k_2)$ 。

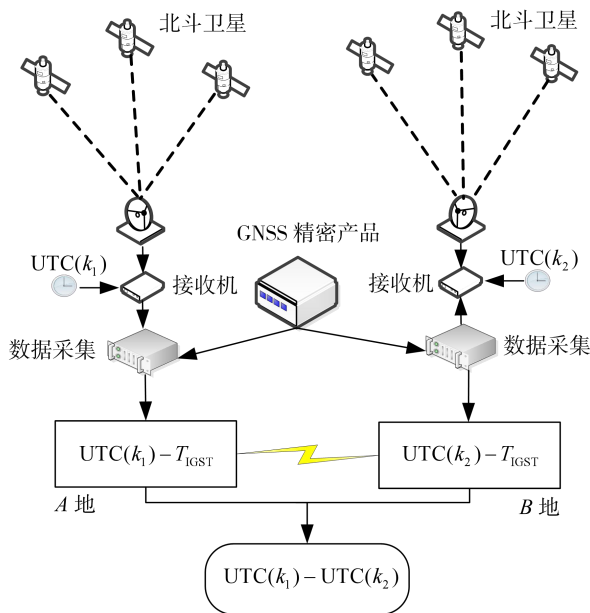


图 1 北斗 PPP 时间比对原理

根据图 1 所示，基于北斗载波相位时间比对方法可以描述为：设 A 地的参考时间为 $UTC(k_1)$ ， B 地的参考时间为 $UTC(k_2)$ ，统一的时间参考为 T_{IGST} 。

$$\Delta t_A = UTC(k_1) - T_{IGST}, \quad (1)$$

$$\Delta t_B = UTC(k_2) - T_{IGST}. \quad (2)$$

式 (1) 和 (2) 相减即可得到两地的时间偏差：

$$\Delta t_A - \Delta t_B = UTC(k_1) - T_{IGST} - UTC(k_2) + T_{IGST} = \Delta t_{AB}. \quad (3)$$

利用图 1 所示的本地接收机通过接收北斗空间信号，使用北斗 B1 和 B2 频点上的伪距和相位观测值，其观测方程可表示如下：

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

式 (3) 中： ρ_i 为 B_i 频率上的码伪距观测值； L_i 为 B_i 频率上的相位观测值； P 为站星距； ct_r 是接收机钟差改正项，为接收机时间与 BDS 系统时间之间的偏差； cT_s 是卫星钟差改正项，为卫星时间与 BDS 系统时之间的偏差； d_{trop} 是对流层附加延迟，为信号通过对流层大气而引起的附加偏差； d_{ion} 是电离层附加时延，为信号通过电离层而引起的附加偏差； d_{mult,ρ_i} 为不同伪距观测值上所引起多路径延迟， d_{mult,ϕ_i} 为不同载波信号上所引起多路径延迟； $\lambda_i N_i$ 为相位整周模糊度； ε_{ρ_i} 为北斗 B_i 频点伪距观测值引入的观测误差， ε_{ϕ_i} 为北斗 B_i 频点相位观测值引入的观测误差。它们的单位均为 m。 c 为光速：299 792 458 m/s。

由于数据处理中使用德国波茨坦地学研究中心 (Geo Forschung Zentrum Potsdam, GFZ) 提供的精密轨道和钟差产品 (其轨道优于 2.5 cm, 钟差优于 75 ps)，卫星的轨道误差和星钟误差可以被很好地消除，使用双频无电离层组合观测值可以消除大部分电离层时延，因此式 (4) 观测模型可以表述为伪距和相位无电离层组合观测值模型^[7-9]：

$$\rho_{IF} = \frac{f_1^2 \rho_1 - f_2^2 \rho_2}{f_1^2 - f_2^2} = P + c(t_r - T_s) + d_{trop} + d_{mult,\rho_i} + \varepsilon_{\rho_{IF}}, \quad (5)$$

$$L_{IF} = \frac{f_1^2 L_1 - f_2^2 L_2}{f_1^2 - f_2^2} = P + c(t_r - T_s) + d_{\text{trop}} + \lambda_w N_w + d_{\text{mult}, \phi} + \varepsilon_{\phi IF}, \quad (6)$$

式(5)和(6)中, f_1 与 f_2 分别为B1I和B2I信号的载波频率, $\lambda_w N_w$ 为组合观测值的整周末知数。 ρ_{IF} , L_{IF} 分别是伪距和相位组合观测值。

利用IGS等国际权威机构发布的北斗卫星精密轨道和钟差等产品。通过PPP算法,首先需要对观测数据的质量进行检验,包括剔除不健康卫星,周跳的探测,利用相位平滑伪距提高伪距观测的质量等;其次对精密轨道和钟差产品插值到采样时刻,最后利用扩展卡尔曼滤波对接收机天线位置以及本地时相对于IGST的偏差等参数进行估计。

在北斗PPP数据处理中,相对于其他卫星导航系统而言,北斗具有自身的特点。由于北斗采用了3种轨道卫星组合的混合星座,包括地球同步轨道(geosynchronous earth orbit, GEO)卫星、中地球轨道(medium earth orbit, MEO)卫星以及倾斜地球同步轨道(inclined Geosynchronous satellite orbit, IGSO)卫星组成,与其他卫星导航系统相比高轨卫星更多,抗遮挡能力强,尤其低纬度地区性能特点更为明显。

表1为北斗PPP观测模型及数据处理模型使用的修正方法。

表1 数据处理模型

内容	修正模型
观测数据	伪距及相位观测文件
采样间隔	30 s
信号选择	BDS B1、B2 频点
卫星轨道	GFZ 发布的轨道产品
卫星钟差	GFZ 发布的钟差产品
卫星相位中心	igs14_2045.atx 原始文件
天线相位缠绕	模型修正
电离层时延	双频无电离层组合
对流层时延	Saastamoinen+随机游走模型 ^[10-12]
截止高度角	10°
接收机钟差模型	白噪声
接收机位置模型	静态
相对论效应	模型修正
潮汐修正	模型修正 ^[13]
结果计算	扩展卡尔曼滤波估计 ^[14-15]

在北斗精密单点定位中常用的参数估计方法有扩展卡尔曼滤波、序贯最小二乘法等。本文采用扩展卡尔曼滤波方法对接收机天线坐标增量、接收机钟差、对流层天顶延迟、整周模糊度进行估计。如果接收机同时接收到 n 颗卫星,则未知参数的个数为 $n+5$,则状态向量如式(7)所示。

$$\mathbf{X} = [x \ y \ z \ t_r \ d_{\text{trop}} \ N_1 \ \cdots \ N_n]^T. \quad (7)$$

精密单点定位滤波初值的设置包括待估参数初值、协方差矩阵初值、状态噪声和观测噪声初值的设置。其中接收机位置以及钟差信息可利用最小二乘法计算得到;初始协方差矩阵以及状态协方差阵的初始值选取为经验值;接收机位置初始噪声为0.01 m,接收机钟差初始噪声为0.03 m。

2 结果分析

本文利用20190416/0418(MJD: 58 589~58 591)的北斗B1和B2频点的原始伪距与相位观测数据,

开展国家授时中心 (NTSC) 与中华电信 (TL) 基于北斗 PPP 高精度时间比对的相关研究, 两守时实验室均为国际权度局重要的 UTC 计算参与单位, 且每月为 UTC 的归算做出了重要的贡献。基于第 1 节所介绍的基本原理及算法编制了北斗 PPP 数据处理软件, 并开展相关的时间比对实验研究、数据处理和结果分析。参考信号是本地 UTC(k) 信号, 两个实验室均采用主动型氢原子钟作为主钟, 其主要指标为 $1.5 \times 10^{-13}/1 \text{ s}$, $2.0 \times 10^{-15}/100 \text{ s}$, 因此在时间比对链路短期性能分析时, 原子钟本身的影响相对于链路噪声可以忽略。表 2 给出了两守时实验室所使用的接收机及相关信息。

表 2 实验室所用的接收机信息

实验室	接收机类型	天线类型	参考信号
NTSC	SEPT POLARX4TR	SEPCHOKE_MC	UTC (NTSC)
TL	SEPT POLARX4TR	ASH701945C_M	UTC (TL)

2.1 观测卫星数

图 2 和图 3 分别为两个守时实验室 2019-04-16 全天时所能观测到的北斗卫星。通过以下两图可以看出在同一时刻下, 两地观测到的北斗及 GPS 卫星基本保持在 10 颗左右, 其中 NTSC 观测到的北斗卫星相对较多。同时, NTSC 计算得到的 TDOP 值优于 2, TL 计算的 TDOP 值小于 4。

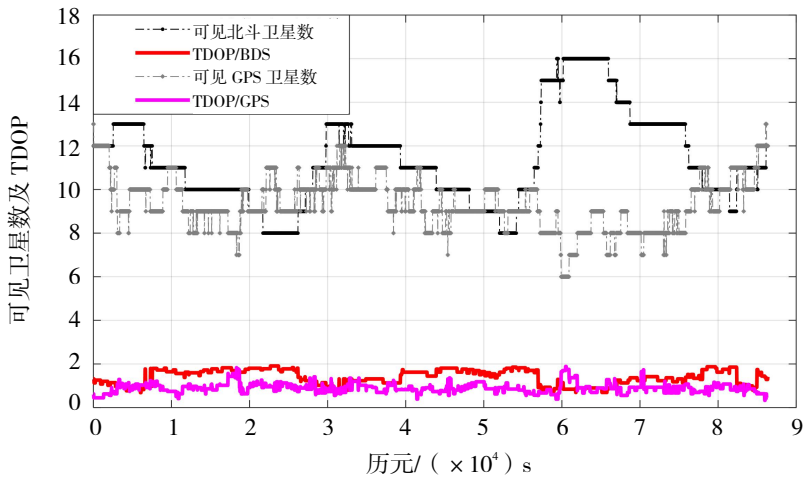


图 2 NTSC 上空可见北斗卫星数目和 DOP 值

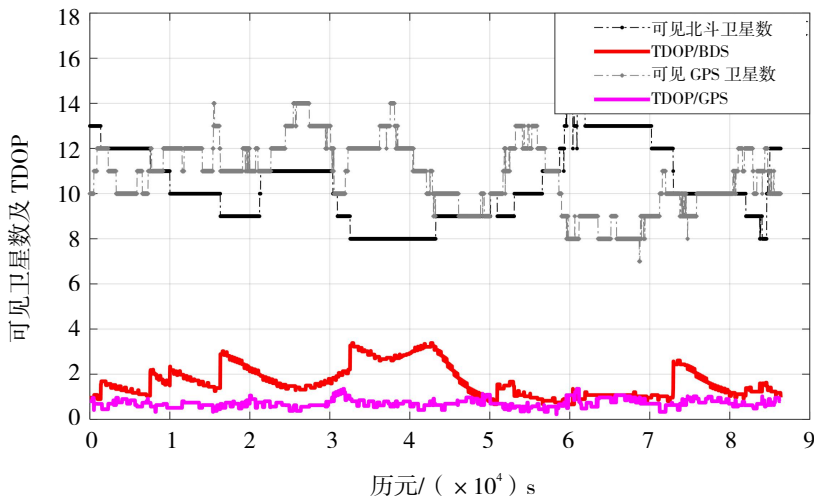


图 3 TL 上空可见北斗卫星数目和 DOP 值

2.2 北斗 PPP 高精度时间比对

利用 IGS 分析中心之一的 GFZ 提供的北斗精密轨道和精密钟差产品开展北斗 PPP 高精度远距离时间比对试验，其两地钟差比对结果如图 4 所示。

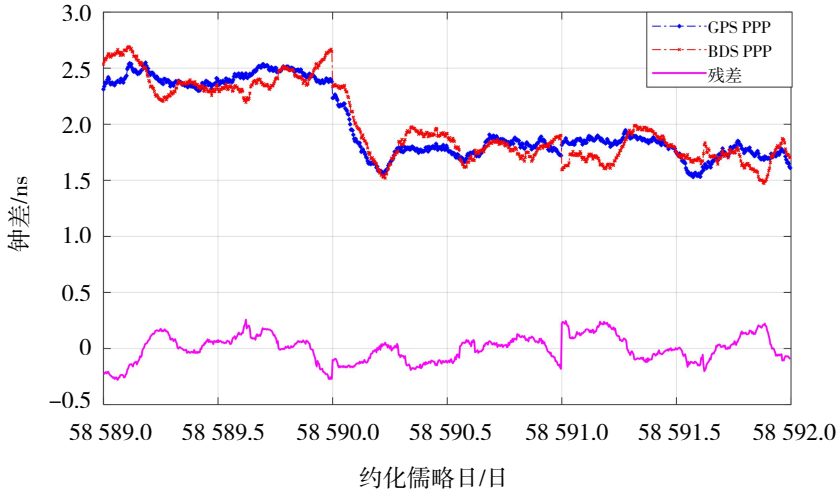


图 4 利用北斗和 GPS PPP 获得 UTC (NTSC) -UTC (TL)

图 4 为利用北斗 PPP 及 GPS PPP 获得的国家授时中心保持的 UTC (NTSC) 与中华电信保持的 UTC (TL) 两守时实验室间采样间隔为 300 s 的时差。由于北斗链路现暂时未经过直接校准，因此，利用 GPS 链路进行了相对校准。北斗系统目前处于建设阶段，相关的星座覆盖还不完全以及 IGS 等机构发布的精密轨道和钟差等产品还在不断地完善中，因此基于北斗 PPP 链路的两地时间比对结果相对于 GPS PPP 的结果存在一定的差距。通过图 4 可以看出两守时实验室之间的时间比对实验中，利用北斗链路和 GPS 链路获得两地时差波动均保持在 1 ns 以内，但通过北斗 PPP 链路计算的两地钟差波动明显大于通过 GPS PPP 链路计算的两地钟差，北斗 PPP 链路相对于 GPS PPP 链路的残差约为 ±0.5 ns，其残差的 STDEV 为 0.118 7 ns。图 5 和图 6 分别给出了通过北斗及 GPS PPP 链路获得的 UTC (NTSC) -UTC (TL) 两地钟差的稳定度 (ADEV) 和时间偏差 (TDEV)。

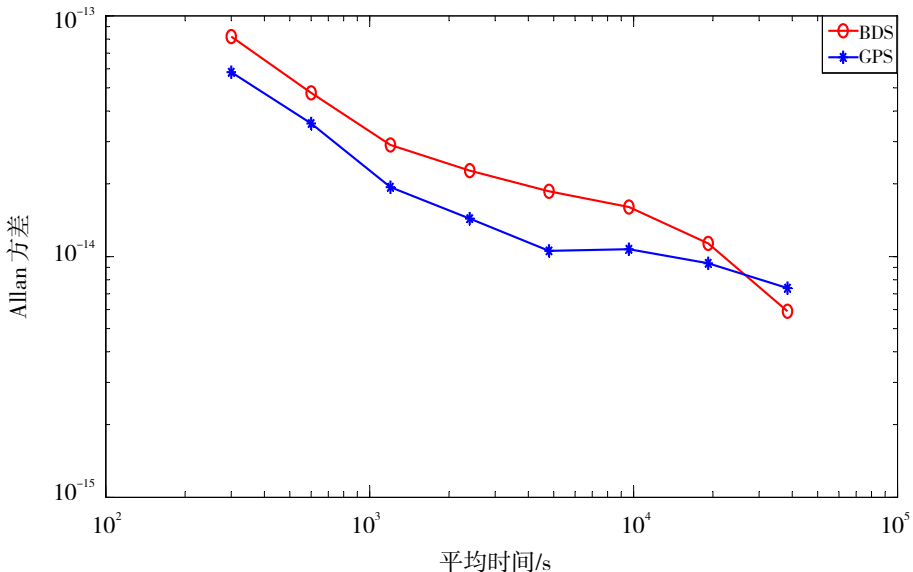


图 5 NTSC 与 TL PPP 时间比对 ADEV

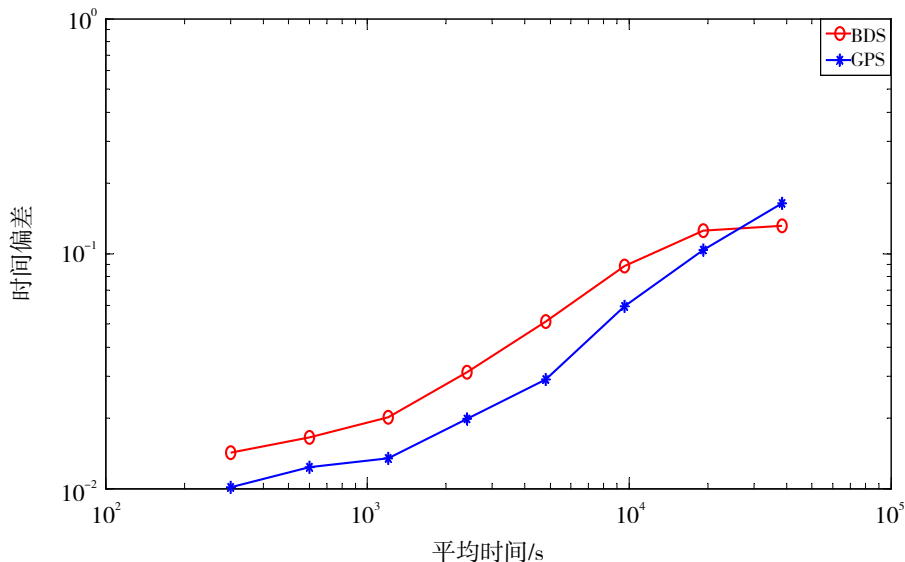


图 6 NTSC 与 TL PPP 时间比对 TDEV

表 3 中显示了利用北斗 PPP 及 GPS PPP 获得的两守时实验室时间比对的频率稳定度的具体量级。

表 3 UTC (NTSC) -UTC (TL) 频率稳定度/时间方差

τ/s	ADEV		TDEV	
	BDS	GPS	BDS	GPS
300	8.18×10^{-14}	5.82×10^{-14}	1.42×10^{-2}	1.01×10^{-2}
600	4.76×10^{-14}	3.55×10^{-14}	1.65×10^{-2}	1.23×10^{-2}
1 200	2.89×10^{-14}	1.94×10^{-14}	2.00×10^{-2}	1.34×10^{-2}
2 400	2.26×10^{-14}	1.43×10^{-14}	3.13×10^{-2}	1.98×10^{-2}
4 800	1.86×10^{-14}	1.05×10^{-14}	5.15×10^{-2}	2.92×10^{-2}
9 600	1.60×10^{-14}	1.07×10^{-14}	8.88×10^{-2}	5.94×10^{-2}
19 200	1.13×10^{-14}	9.33×10^{-15}	1.25×10^{-1}	1.03×10^{-1}
38 400	5.92×10^{-15}	7.36×10^{-15}	1.31×10^{-1}	1.63×10^{-1}

根据图 5, 图 6 和表 3 可以看出, 经过北斗 PPP 链路计算得到的 UTC (NTSC) -UTC (TL) 的稳定度与 GPS PPP 链路的稳定度基本保持在同一个量级。因此, 北斗 PPP 可以用于两地的高精度时间比对与授时服务。

3 结语

本文基于国家授时中心和中华电信两守时实验室保持的 UTC (NTSC) 与 UTC (TL), 利用多模 GNSS 测量型接收机, 通过使用北斗 B1、B2 频点的实测数据, 开展了北斗 PPP 高精度远距离时间比对试验。试验结果表明, 北斗 PPP 高精度时间比对与 GPS PPP 精度相当, 且天稳可达 10^{-15} 量级。通过以上分析可以表明, 现阶段北斗 PPP 用于远距离高精度时间比对的精度与 GPS PPP 在同一水平, 可作为 BIPM 用于国际时间比对并与其他卫星导航系统形成冗余备份, 这也进一步推动我国北斗卫星导航系统在高精度时间比对以及参与 UTC 的归算提供了技术参考。

参考文献:

- [1] PETET G, JIANG Z H. Precise point position for TAI computation[C]//2017 IEEE International Frequency Control Symposium, Geneva: Frequency Control Symposium, 2007 Joint with the 21st European Frequency and Time Forum, 2007: 395-398.
- [2] PENG H M, LIAO C S. GPS smoothed P3 code for time transfer[C]//18th European Frequency and Time Forum, Guildford: [s.n.], 2009: 137-141.
- [3] HAN Chun-hao, YANG Yuan-xi, CAI Zhi-wu. BeiDou navigation satellite system and its time scales[J]. Metrologia, 2011, 48(4): 213-218.
- [4] ZHANG Xiao-hong, WU Ming-kui, LIU Wang-ke, et al. Initial assessment of the COMPASS/BeiDou-3: new-generation navigation signals[J]. Journal of Geodesy, 2017(1): 1-16.
- [5] 武文俊. 北斗国际时间比对[C]//2017 全国时间频率学术会议, 西安: 2017 全国时间频率学术会议组委会, 2017.
- [6] 阮仁桂. GPS 非差相位精密单点定位研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2009.
- [7] YUAN Hai-bo, GUANG Wei, YANG Fan. Time service through BD GEO satellite[C]//2013 European Frequency and Time Forum & International Frequency Control Symposium (EFTF/IFC), Prague: Czech Republic, 2013: 496-500.
- [8] 程娜, 贾小林. 基于双频伪距组合评估北斗广播电离层精度[J]. 导航定位学报, 2015, 3(1): 74-77.
- [9] 万超. 基于 GPS 的双频电离层修正算法研究[J]. 科技信息, 2010(21): 439-440.
- [10] 朱峰. 卫星导航中的时间参数及其测试方法[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [11] 沈宁, 岳彩亚. BDS 地球静止轨道卫星信号的对流层延迟分析[J]. 全球定位系统, 2016, 41(6): 25-29.
- [12] 闫志闯, 楼楠, 李靖. 对流层参数估计侧率对 PPP 精度影响分析[J]. 测绘工程, 2019, 28(1): 5-13.
- [13] 赵红, 郭春喜, 程传录, 等. 利用改进的动态 PPP 技术建立中国香港区域海潮负荷位移模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(3): 354-363.
- [14] 韩萍, 桑威林, 石庆研. 一种新型非线性卡尔曼滤波方法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(3): 632-638.
- [15] 宋会杰, 董绍武, 屈俐俐, 等. 基于 Sage 窗的自适应 Kalman 滤波用于钟差预报研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(7): 1809-1816.