

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108281

北斗三号非差组合载波相位时间比对性能分析*

张继海^{1,2,3}, 董绍武^{1,2,3,4}, 袁海波^{1,2,3}, 广伟^{1,3}, 马佳慧^{1,2}

(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. 中国科学院时间频率基准重点实验室 西安 710600; 4. 中国科学院大学天文与空间科学学院 北京 100049)

摘要:北斗三号全球系统已开始为全球用户提供稳定可靠的高精度定位、导航与授时服务。本文基于我国国家标准时间频率 UTC (NTSC) 系统,开展北斗三号非差组合载波相位时间比对性能分析,通过实测数据开展研究并试验了北斗三号非差组合载波相位时间比对在零基线与长基线时间比对的性能,并在此基础上开展北斗三号与 GPS 融合载波相位时间比对试验。结果表明,零基线比对中,两接收机共钟比时钟差的标准偏差优于 0.3 ns;长基线比对中,利用北斗三号非差组合载波相位时间比对以及融合载波相位时间比对获得的亚欧两守时实验室之间的比时钟差与国际权度局基于 GPS 时间比对链路获得的钟差具有较好的一致性,钟差的频率稳定度和时间稳定度与国际权度局发布的结果基本一致,且残差的均方根均优于 0.25 ns,试验结果满足亚纳秒量级的时间比对应用需求。

关键词:北斗三号全球卫星导航系统;多路径噪声;非差组合;载波相位时间比对

中图分类号: TH714 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

The performance analysis of BeiDou-3 undifferenced combined carrier phase time comparison

Zhang Jihai^{1, 2, 3}, Dong Shaowu^{1, 2, 3, 4}, Yuan Haibo^{1, 2, 3}, Guang Wei^{1, 3}, Ma Jiahui^{1, 2}

(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 Lab of Time-frequency Standard of the Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China; 4. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: BeiDou navigation satellite system (BDS-3) has begun to provide stable high precision positioning, navigation and timing service for global users. In this paper, based on China's time reference system of UTC (NTSC), the performance analysis of BDS-3 undifferenced combined carrier phase time comparison is carried out. The performance of BDS-3 undifferenced combined carrier phase time comparison in zero and long baseline, and the BDS-3 and GPS fusion carrier phase time comparison are carried out and studied by using data of BDS-3. Results show that the standard deviation of zero baseline and common clock comparison between two receivers is smaller than 0.3 ns. For the long baseline time, the time difference between the Asia-Europe two time keeping laboratories by using BDS-3 undifferenced combined carrier phase time comparison, and the fusion carrier phase time comparison have a good consistency with the results released by International Bureau of Weights and Measures (BIPM) with GPS link. The frequency stability and time stability of result are basically the same as BIPM, and the root mean square of the residual is smaller than 0.25 ns. Experimental results meet the application requirements for sub-nanosecond time comparison.

Keywords: BeiDou navigation satellite system (BDS-3); multipath noise; undifferenced combined; carrier phase time comparison

收稿日期: 2021-07-22 Received Date: 2021-07-22

* 基金项目: 中国科学院国家授时中心“青年创新人才”(NTSC 青创 201804)、中国科学院西部之光青年学者 B 类(XAB2019B13)、国家自然科学基金(11773030)项目资助

0 引 言

利用全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)的时间比对技术始于 20 世纪 80 年代,作为最早的全球卫星导航系统, GPS 卫星共视(common view, CV)方法由于采用伪距观测值,且算法简单易于实现等特点成为当时主要的时间比对技术,并被国际权度局(international bureau of weights and measures, BIPM)用于全球守时实验室之间的日常时间比对以及国际原子时(international atomic time, TAI)的计算^[1-2]。随着国际 GNSS 服务中心(international GNSS service, IGS)的发展,其提供的 GPS 精密轨道和钟差等产品性能越来越高,可支持用户开展高精度的定位、导航与授时(positioning, navigation and timing, PNT)方面的研究。2004 年, Jiang 和 Petit 在基于 IGS 发布的精密卫星钟差和轨道基础上,提出了 GPS 全视(all in view, AV)时间比对方法,与 CV 时间传递方法不同, AV 时间比对方法由于不受观测站地理位置的限制,利用测站伪距观测值将测站的时间信息统一到 IGS 时间上,进而完成与实现两地的时间比对,并得到了国际上的广泛认可, 2006 年 9 月国际时间频率咨询委员会(consultative committee for time and frequency, CCTF)正式决定用全视方法替代共视方法,在 BIPM 发布的第 225 期 Circular T 公报上,实现并利用 GPS 全视时间比对方法用于 TAI 的计算^[3]。由于技术的更新以及数据处理算法的改进,为了进一步提升时间比对的链路性能,在 GPS 全视算法的基础上提出了利用 GPS 载波相位时间比对技术,由于载波相位观测值较伪距观测值的精度高于近两个量级, GPS 载波相位时间比对方法得到了广泛应用与发展。在 2009 年 9 月, BIPM 正式利用 GPS 载波相位时间比对方法开展各守时实验室之间时间比对,并用于每月 TAI 的计算。目前,在全球 80 多个守时实验室中,超过 50 个守时实验室主要通过 GPS 载波相位时间比对方法向国际溯源^[4],为 BIPM 每月 TAI 的计算做出贡献。

随着全球卫星导航系统的建设与发展,为提高 TAI 计算的可靠性和稳定性, 2009 年 CCTF 大会建议利用多种时间比对手段与方法用于 TAI 计算,以提高其结果的准确性和可靠性。目前,随着我国北斗卫星导航系统的发展以及在 2020 年 6 月 23 日北斗三号最后一颗全球组网卫星的成功发射,标志着北斗三号全球系统的建设完成,其系统包括 3 颗地球静止轨道卫星, 24 颗中圆地球轨道卫星以及 3 颗倾斜地球同步轨道卫星^[5]。2020 年 7 月 31 日,北斗全球卫星导航系统正式为用户提供全天候实时、高精度的 PNT 服务。在 2017 年第 21 届 CCTF 大会上, BIPM 以及国际时频领域的学者

也建议将北斗系统纳入每月 TAI 的计算并与其他导航系统形成冗余备份。因此,随着我国北斗三号全球系统的推广和应用、IGS 分析中心发布的北斗三号卫星的超快、快速和最终精密钟差和轨道等产品的完善,利用北斗三号载波相位远距离时间比对必将会成为未来 BIPM 开展守时实验室间高精度时间比对的主要方法之一,并与其他导航系统互为备份为 TAI 的计算以及全球用户提供服务。同时,依托目前国际兼容互操作技术发展,开展北斗三号与其他导航系统的融合共用会成为未来发展趋势,用户可以观测到更多的卫星,并选择观测仰角高的以及信号质量较好的卫星进行 PNT 解算,特别是在城市、森林以及峡谷等观测环境较差并且单一系统观测卫星数目不足的地方,多系统融合更能发挥出相对于单一系统的优势。

本文基于我国时间频率基准 UTC(NTSC)系统以及捷克国家时间频率基准 UTC(TP)系统,利用两个守时实验室时间比对系统中的 GNSS 时间传递型接收机的实测数据和 IGS 分析中心之一的德国波兹坦地学中心(GeoForschungsZentrum Potsdam, GFZ)发布的权威精密轨道以及钟差等产品,开展北斗三号载波相位时间比对试验,分别在信号的多路径噪声、零基线时间比对、长基线时间比对以及北斗三号与 GPS 融合载波相位时间比对试验,并与 BIPM 发布的两守时实验室之间 UTC(NTSC)与 UTC(TP)的比对钟差进行了对比与分析,进一步验证了北斗三号非差组合载波相位时间比对以及北斗三号与其他导航系统的融合载波相位时间比对的性能。

1 北斗非差组合载波相位时间比对方法

在基于北斗三号载波相位时间比对中,接收机输出的本地北斗三号非差伪距与载波相位观测模型方程可以表述为^[6]:

$$\begin{cases} P_i = \rho + cdt_r - cdT_s + \gamma_i \cdot I_1 + Mw \cdot ZWD + \\ \quad d_{mult/\rho_i} + \varepsilon_i \\ L_i = \rho + cdt_r - cdT_s - \gamma_i \cdot I_1 + Mw \cdot ZWD + \\ \quad d_{mult/\rho_i} + \lambda_i N_i + \zeta_i \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_i 为不同载波频率上的码伪距观测值(单位:m); L_i 为不同载波频率上的载波相位观测值(单位:m); ρ 为观测站到卫星的距离(单位:m); cdt_r 为接收机钟差修正项(单位:m); cdT_s 为星载原子钟的钟差修正项(单位:m); I_1 为频率 f_1 上对应的斜电离层时延(单位:m); γ_i 为频率相关电离层时延放大因子($\gamma_i = (f_1/f_i)^2$); Mw 为与卫星高度角有关的湿投影函数(单位:m); ZWD 为测站天顶方向的湿延迟(单位:m); d_{mult/ρ_i} , d_{mult/L_i} 为不同载波

信号上伪距和载波相位的多路径延迟(单位:m); $\lambda_i N_i$ 为载波相位整周模糊度(单位:m); ε_i 为伪距观测值的噪声(单位:m); ζ_i 为相位测值的噪声(单位:m)。

利用扩展卡尔曼滤波算法对参数进行估计,其观测方程和状态方程可以描述为^[7-8]:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_k = \mathbf{A}_{k,k-1} \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{Y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{v}_k \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{X}_k$ 为在时刻 k 的状态变量; $\mathbf{A}_{k,k-1}$ 为从时刻 $k-1$ 到时刻 k 的状态转移矩阵; $\mathbf{w}_k$ 为系统的噪声向量; $\mathbf{Y}_k$ 为在时刻 k 的观测向量; $\mathbf{H}_k$ 为在 k 时刻观测向量的系数矩阵; $\mathbf{v}_k$ 为观测噪声。

基于非差无电离层双频组合算法,假设在时刻 k 观测到 m 颗卫星,并建立观测方程,则误差方程可描述为:

$$\mathbf{V} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{X} - \mathbf{L} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{V}$ 为观测残差向量; $\mathbf{H}$ 为系数矩阵; $\mathbf{L}$ 为观测值减去计算值,状态向量 $\mathbf{X}$ 包括接收机天线的坐标的增量($\Delta x, \Delta y, \Delta z$)、 cdt_r 接收机钟差的修正量、 ZWD 天顶对流层湿分量、以及 $N_1, \dots, N_m$ 载波相位整周模糊度,可表述为:

$$\mathbf{X} = [\Delta x, \Delta y, \Delta z, cdt_r, ZWD, N_1, \dots, N_m] \quad (4)$$

系数矩阵 $\mathbf{H}$ 可描述为^[6, 9]:

$\mathbf{H} =$

$$\begin{bmatrix} a_{x_1} & a_{y_1} & a_{z_1} & 1 & Mw_1 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ a_{x_1} & a_{y_1} & a_{z_1} & 1 & Mw_1 & 1 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{x_k} & a_{y_k} & a_{z_k} & 1 & Mw_k & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ a_{x_k} & a_{y_k} & a_{z_k} & 1 & Mw_k & 0 & \cdots & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{x_m} & a_{y_m} & a_{z_m} & 1 & Mw_m & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ a_{x_m} & a_{y_m} & a_{z_m} & 1 & Mw_m & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: a_x, a_y 以及 a_z 为接收机至卫星连线的方向余弦,第 4 列为接收机钟差系数, Mw 为与卫星高度角有关的湿投影函数,第 5 列后的其他列数为模糊度参数的系数。

表 1 给出了北斗观测值和误差模型修正方法。如表 1 所示的模型修正算法,可解算出接收机钟差等参数。北斗三号载波相位时间比对方法可描述为:设 A 地的本地参考时间为 $Re fT1$, B 地的本地参考时间为 $Re fT2$, IGS 分析中西统一的参考时间为 $IGST$ 。

$$\Delta t_A = Re fT1 - IGST \quad (6)$$

$$\Delta t_B = Re fT2 - IGST \quad (7)$$

式(6)减式(7)即可得到两地的时间偏差:

$$\Delta t_A - \Delta t_B = Re fT1 - IGST - Re fT2 + IGST = \Delta t_{AB} \quad (8)$$

表 1 数据处理模型

Table 1 The data processing model

内容	修正模型
观测数据	相位及伪距观测值
采样间隔/s	30
信号选择	北斗 B1、B3 频点
卫星轨道	GFZ 发布的轨道产品 ^[9-10]
卫星钟差	GFZ 发布的钟差产品
卫星相位中心	igs14_2086.atx
电离层时延	双频无电离层组合
对流层时延	UNB3m 模型+随机游走模型 ^[11]
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
固体潮修正	模型修正
结果计算	扩展卡尔曼滤波估计 ^[7, 12]

2 测试及分析评估

基于我国时间基准 UTC (NTSC) 系统以及捷克国家时间基准 UTC (TP) 系统,利用两守时实验室 2021 年 4 月 11 日~2021 年 4 月 17 日 (MJD:59315~59321) 的北斗三号 B1I 和 B3I 频点非差组合观测数据以及 GFZ 发布的北斗三号卫星精密轨道和钟差产品,开展北斗三号卫星载波相位时间比对应用研究。分别在观测信号的码多径、零基线时间比对、长基线时间比对以及北斗三号与 GPS 融合时间比对方面进行了试验和分析。

如表 2 所示为各守时实验室的接收机及所配套天线的信息,两个守时实验室所配备的接收机均为 BIPM 所推荐的国际上用于开展高精度时间比对的高性能主流接收机,为开展实验提供了充分条件。

表 2 实验室所用的接收机

Table 2 The receivers used in the lab

实验室	接收机编号	接收机类型	天线类型
NTSC	NTP5	POLARX5TR PRO	SEPCHOKE_MC
	NTP6	JAVAD TRE_3	SEPCHOKE_MC
TP	TP02	JAVAD TRE_3	NOV850

2.1 多路径误差

在 GNSS 的测量中,卫星发射的信号经过测站周围物体的反射后被接收机天线所接收,这种反射后的信号

(反射波)将和卫星直接发射的信号(直接波)产生干涉,从而使观测值包含噪声并偏离真实值,进而产生多路径误差。同时,在北斗二号系统相关的研究表明,轨道类型、频率、仰角等因素都会影响北斗卫星信号的码偏差,而这些偏差会使得码和相位观测值发散超过 1 m。因此,在北斗的高精度时间比对中,这些偏差会导致几个纳秒的变化^[13]。多路径可以通过单个频率上的伪距观测值以及双频载波相位观测值形成多路径组合观测值进行评估与分析,其表达式可以描述为^[8, 14]:

$$MP_j = M_j - \frac{f_j^2 + f_i^2}{f_j^2 - f_i^2} \cdot \tilde{m}_j + \frac{2f_i^2}{f_j^2 - f_i^2} \cdot \tilde{m}_i + B_j + \varepsilon_j \quad (9)$$

式中: i 和 j 分别为载波频率标识位; MP 为码多路径组合; f 为载波频率; M 为码多路径误差; $\tilde{m}$ 为载波多路径误差; B 为包含模糊度项以及硬件时延; ε 为观测值噪声。

如图 1 所示为 2021 年 4 月 11 日国家授时中心全天可视范围内观测到的所有北斗三号卫星 B1I 和 B3I 频点采样间隔为 300 s 的多路径噪声情况。可以看出,在低仰角范围内 B1I 频点的多路径噪声基本保持在 ± 2 m 以内,在高仰角范围内以及 B3I 频点的多路径噪声大部分保持在 ± 1 m 以内。

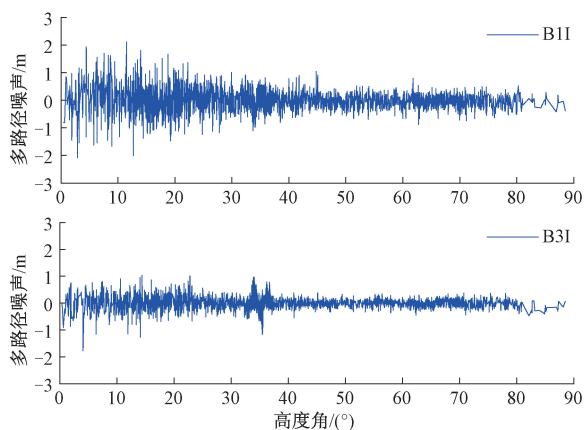


图 1 北斗三号 B1I 和 B3I 频点多径噪声

Fig. 1 The multipath noise of BDS-3 at B1I and B3I

如图 2 所示为北斗两频点多径噪声的分布图,从图 2 中可以看出北斗三号 B1I 频点和 B3I 频点的多路径噪声呈正态分布,且两频点的多路径噪声大部分采样点集中在 ± 0.5 m 以内,进而可以看出实验中接收机所外接的扼流圈天线可以抑制大部分的多径噪声,提高了观测值的精度。

如图 3 所示,选取高度角大于 10° 的北斗三号 B1I 和 B3I 多路径噪声的均方根 (root mean square, RMS), 其不同角度范围内多路径噪声的 RMS 值均优于 0.7 m。B1I 和 B3I 频点多路径噪声的 RMS 平均值分别为 0.315 2 m 以及 0.189 2 m。可以看出,由于 B1I 和 B3I 均采用

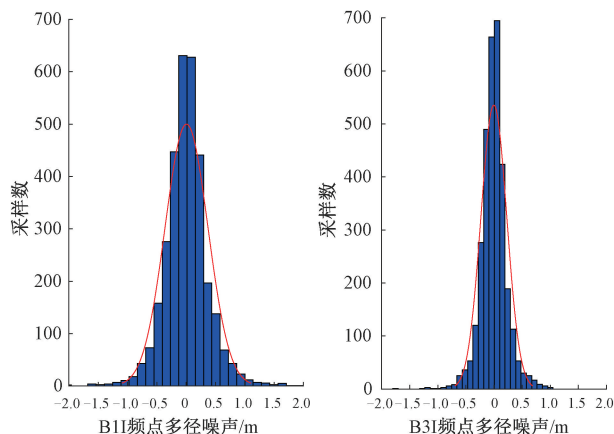


图 2 北斗三号 B1I 和 B3I 频点多径噪声分布

Fig. 2 The distribution of multipath noise with BDS-3 B1I and B3I

BPSK 调制方式,且 B3I 的带宽为 20.46 MHz 相对于 B1I 的带宽 4.092 MHz 具有更宽的带宽,其多径信号在接收端不易重叠,且对多径分辨率能力更强,进而对于多径的抑制具有更好的效果。因此,北斗三号 B3I 频点对多径噪声的扼制要优于 B1I 频点。

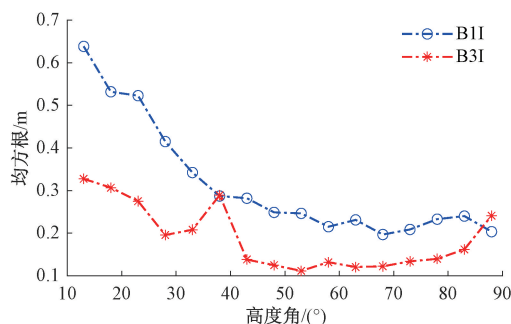


图 3 北斗三号 B1I 和 B3I 频点多径噪声的均方根

Fig. 3 The RMS of multipath noise with BDS-3 B1I and B3I

2.2 北斗三号零基线时间比对

零基线时间比对实验中,两台接收机天线的距离小于 5 m,并且两台接收机外接相同的时间和频率源。其原理如图 4 所示的两台接收机的连接^[15-16],为了评估北斗三号短基线载波相位时间比对性能,开展了共钟时差 (common clock difference, CCD) 比对实验。这种方法可以减少相同频率源带来的噪声影响,仅包含了相关硬件的时延。同时,此方法也是 BIPM 开展全球守时实验室时间比对链路相对校准的常用技术。

如图 5 所示,利用国家授时中心的 NTP5 和 NTP6 两台接收机输出 300 s 采样间隔的 GPS、BDS-2 以及 BDS-3 载波相位零基线 CCD 比对时差结果。可以看出零基线 CCD 结果大部分保持在 ± 0.5 ns 以内。

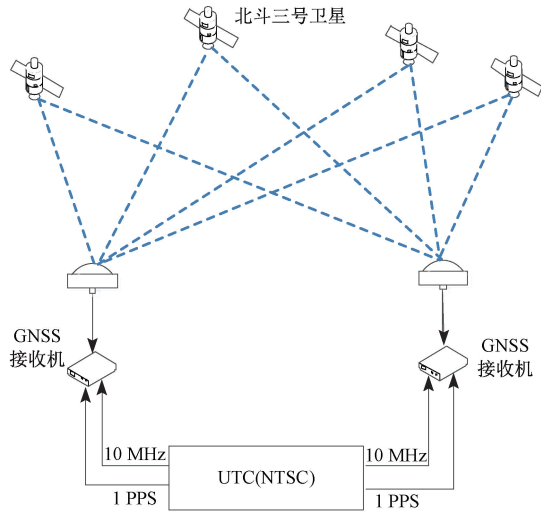


图 4 共钟时间比对原理

Fig. 4 The principle of common clock difference

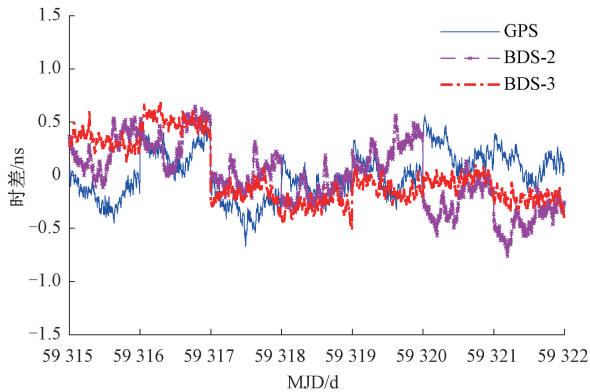


图 5 BDS-3 零基线 CCD 时间比对

Fig. 5 The CCD of zero-baseline time comparison by using BDS-3

表 3 所示,基于 GPS、BDS-2 以及 BDS-3 载波相位零基线 CCD 的标准偏差 (standard deviation, STD) 均优于 0.3 ns,且均满足 BIPM 开展全球守时实验室间校准的不确定度要求。同时,由于 BDS-3 全球系统提高了观测站可见北斗的卫星数目,改善了卫星空间分布结构,且 BDS-3 卫星配备了比 BDS-2 更好的星载原子钟,其 B1I 和 B3I 频点的信噪比优于 BDS-2^[17]。因此,BDS-3 相对于 BDS-2 零基线比对结果有所提高。

表 3 零基线 CCD 的标准偏差

Table 3 The STD of zero baseline CCD ns

参数	GPS	BDS-2	BDS-3
STD	0.219 7	0.299 1	0.284 3

2.3 北斗三号长基线时间比对

利用载波的高精度相位时间比对方法是目前国际上进行远距离两地时间比对的常用方法,同时也是 BIPM 每

月联合国际上守时实验室之间开展 TAI 计算的主用方法之一。目前,随着北斗三号全球系统的建设完成,基于北斗三号载波相位时间传递与比对技术应用也越来越广。

如图 6 所示,为利用 BDS-3 载波相位时间比对方法获得 UTC(NTSC)与 UTC(TP)两守时实验室时间比对结果。扣除系统差后经过 BDS-3 载波相位时间比对方法获得的两守时实验室之间的钟差与 BIPM 发布的结果吻合度较好,具有较好的一致性,且两守时实验室之间的时差主要保持在 25 ns 以内(为了能够直观的看出对比结果,将基于 BDS-3 系统的两地比对钟差相对于 BIPM 发布的两地比对钟差结果向下平移了 2 ns,平移后的钟差在时间比对方面不影响两地比对钟差的稳定度以及不确定度等)。

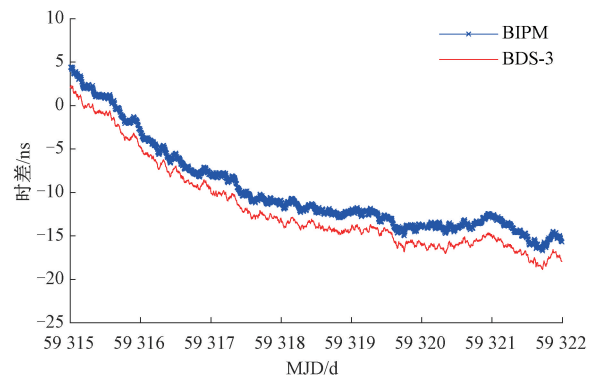


图 6 BDS-3 载波相位时间比对方法获得的 UTC(NTSC)-UTC(TP)

Fig. 6 The UTC(NTSC)-UTC(TP) by BDS-3 carrier phase time comparison

如图 7 所示,以 BIPM 发布的结果作为参考,利用 BDS-3 载波相位时间比对方法获得 UTC(NTSC)-UTC(TP)的时差相对于 BIPM 发布结果的残差在 ± 0.5 ns 以内,且残差 RMS 为 0.247 6 ns。

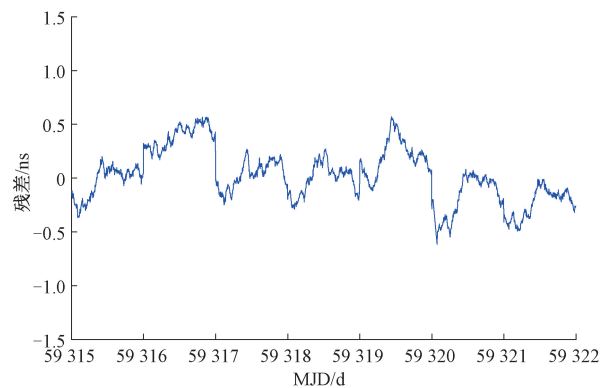


图 7 BDS-3 载波相位时间比对钟差相对于 BIPM 的残差

Fig. 7 The residual of BDS-3 carrier phase time comparison relative to BIPM

如图 8 所示,利用 BDS-3 载波相位时间比对方法获得的两守时实验室之间的比对钟差的频率稳定度(用于表征频率标准的频率稳定度—Allan deviation, ADEV)与时间稳定度(时间方差的平方根—time deviation, TDEV)具有较好的一致性,且在同一量级。进而说明了利用 BDS-3 载波相位时间比对链路可以真实的反应出两守时实验室之间的时间比对的频率稳定度和同步精度。

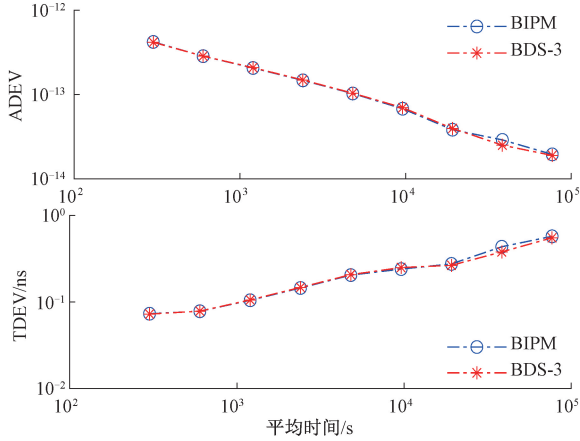


图 8 UTC(NTSC)-UTC(TP)的频率稳定度以及时间稳定度
Fig. 8 The ADEV and TDEV of UTC (NTSC)-UTC (TP)

2.4 北斗三号与 GPS 融合载波相位时间比对

对于 GPS 与北斗单系统而言,其观测方程如式(1)所示,接收机钟差项通过解算获得的本地时与导航系统时的偏差可描述为:

$$\Delta t_r^G = t_r - t_G \quad (10)$$

$$\Delta t_r^C = t_r - t_C \quad (11)$$

式中:G 代表 GPS 系统;C 代表北斗系统。

在多系统融合 PPP 时间比对算法中,对于利用不同导航系统解算的接收机钟差项,可统一到相同的系统上,实现多系统 PPP 融合时间比对。本文以 GPS 系统为例,将参考北斗系统时间解算的接收机钟差统一到以归算到 GPS 系统时间的接收机钟差,其方程可表述为^[6, 18-19]:

$$\Delta t_r^C = t_r - t_C = (t_r - t_G) + (t_G - t_C) = \Delta t_r^G + ISB_{GC} \quad (12)$$

式中: ISB_{GC} 为 GPS 系统与北斗系统间的偏差,其表达式为^[20]:

$$ISB_{GC} = d^{G,C} + \Lambda^{G,C} \quad (13)$$

式中: $d^{G,C}$ 为北斗卫星钟差与 GPS 卫星钟差所对应不同的时间基准引入的时差,与接收机无关; $\Lambda^{G,C}$ 为接收机对应的北斗与 GPS 相关硬件时延的差异。

因此,依据式(1)和(12),GPS 与北斗融合载波相位时间比对的观测方程如式(14)和(15)所示。

$$\begin{cases} P_i^G = \rho_i^G + cdt_r^G - cdT_s^G + Mw^G ZWD + \\ \gamma_i^G I_1^G + \varepsilon_i^G \\ P_i^C = \rho_i^C + cdt_r^G + cISB_r^{GC} - cdT_s^C + \\ Mw^C ZWD + \gamma_i^C I_1^C + \varepsilon_i^C \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} L_i^G = \rho_i^G + cdt_r^G - cdT_s^G + Mw^G ZWD - \\ \gamma_i^G I_1^G + \lambda_f^G N_i^G + \zeta_i^G \\ L_i^C = \rho_i^C + cdt_r^G + cISB_r^{GC} - cdT_s^C + \\ Mw^C ZWD - \gamma_i^C I_1^C + \lambda_f^C N_i^C + \zeta_i^C \end{cases} \quad (15)$$

模型的待估参数向量 X 可表述为:

$$X = [\Delta x, \Delta y, \Delta z, dt_r^G, ISB_r^{GC}, ZWD, N^{Gn}, N^{Cm}]^T \quad (16)$$

在式(16)中, n 为 GPS 卫星的观测个数, m 为 BDS-3 卫星的观测个数。由于每颗卫星对应有两个观测值,对于在每个历元共有 $(2n + 2m)$ 个观测方程,则对应式(3)中的系数矩阵 H 为^[8]:

$$H = \begin{bmatrix} a_{x1G} & a_{y1G} & a_{z1G} & 10 & Mw_{1G} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{x2nG} & a_{y2nG} & a_{z2nG} & 10 & Mw_{2nG} & \cdots \\ a_{x1C} & a_{y1C} & a_{z1C} & 11 & Mw_{1C} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{x2mC} & a_{y2mC} & a_{z2mC} & 11 & Mw_{2mC} & \cdots \end{bmatrix} \quad (17)$$

与式(5)类似,其中第五列为 GPS-BDS 系统时间差系数。

基于 GPS 和 BDS-3 两系统的观测数据,图 9 为一天内不同时段在国家授时中心可视范围内所观测到的卫星数目情况。

如图 9 所示,为 2021 年 4 月 11 日在国家授时中心观测的 BDS-3 以及 GPS 卫星数目。可以看出,GPS 卫星相对 BDS-3 卫星的数目较少,这是由于在中国上空可观测到更多的 BDS 卫星,但两系统在同一时刻均能观测到 6 颗以上的卫星。两系统总共观测到的卫星数目大部分在 20~25 颗之间,明显优于单系统所观测到的卫星数量,提高了用户对卫星的可选择性。

如图 10 所示,为多系统融合载波相位时间比对方法获得的 UTC(NTSC)与 UTC(TP)的时间比对钟差。从图 10 中可以看出,利用融合载波相位时间比对的两地钟差与 BIPM 发布的结果具有较好的一致性,且两地钟差保持在 25 ns 内波动,与图 6 类似,为了能够直观看出对比结果,将融合得到的两地比对钟差相对于 BIPM 发布的两地比对钟差向下平移了 2 ns。

如图 11 所示,以 BIPM 发布的两地钟差为参考,北斗三号和 GPS 融合载波相位时间比对钟差相对于 BIPM 发布结果的残差基本保持在 ± 0.5 ns 内,其残差的 RMS 为 0.247 1 ns。

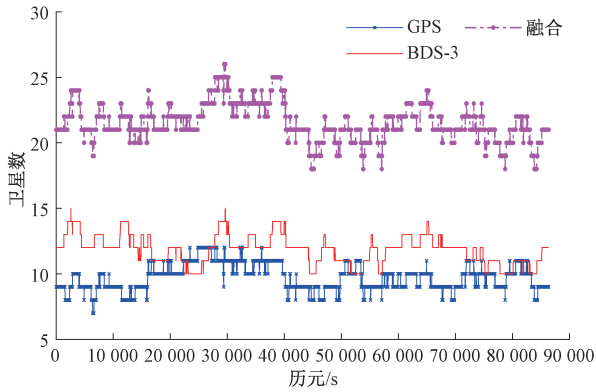


图 9 NTSC 可视范围内所观测到的卫星数

Fig. 9 The number of satellites observed at NTSC

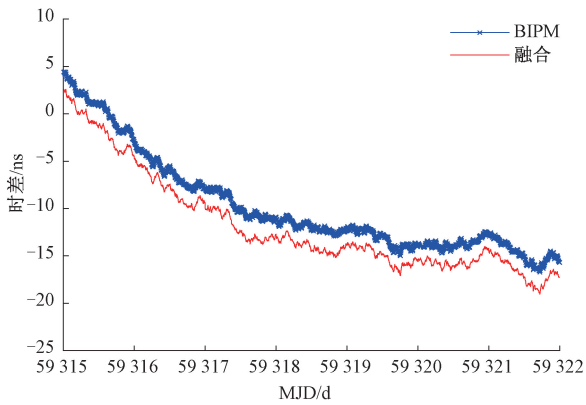


图 10 利用融合载波相位时间比对获得 UTC(NTSC) 与 UTC(TP) 的时差

Fig. 10 The UTC (NTSC)-UTC (TP) by using fusion carrier phase time comparison

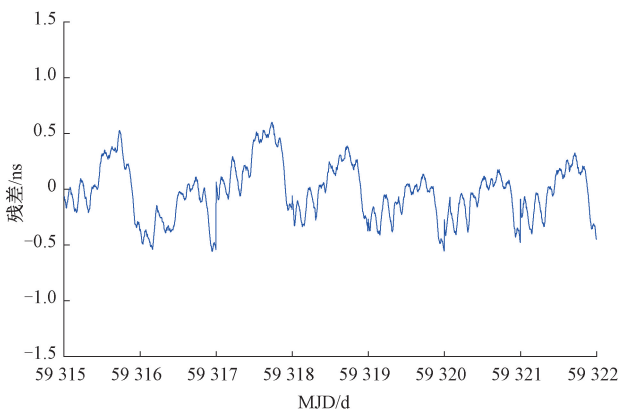


图 11 融合载波相位时间比对钟差相对于 BIPM 的残差

Fig. 11 The residual of fusion carrier phase time comparison relative to BIPM

如图 12 所示, GPS 与 BDS-3 融合载波相位时间比对获得的 UTC(NTSC)-UTC(TP) 的钟差与 BIPM 发布结果

钟差的频率稳定度和时间稳定度具有较好的一致性, 且保持在同一量级。融合方法也能够用于开展高精度时间比对, 且提供更多的卫星供用户选择。

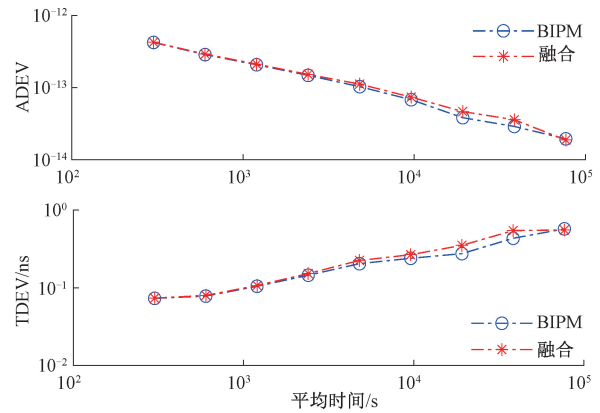


图 12 利用融合载波相位时间比对获得两地钟差的频率稳定度和时间稳定度

Fig. 12 The ADEV and TDEV of UTC (NTSC)-UTC (TP) by using fusion carrier phase time comparison

3 结 论

本文利用国家时间频率基准 UTC(NTSC) 系统中的多模多频时间传递型接收机捕获跟踪的 BDS-3 卫星, 通过非差实测数据, 开展 BDS-3 非差组合载波相位时间比对, 并对比分析与验证了实验结果。

文中首先分析了开展 BDS-3 载波相位时间比对所用的 B1I 和 B3I 频点的多路径噪声, 两频点的噪声在多数情况下处于 ± 0.5 m 以内, 且 B1I 和 B3I 频点多径噪声的 RMS 分别为 0.315 2 m 以及 0.189 2 m, 可以看出利用扼流圈天线可以抑制大部分的多径噪声影响, 提高了观测数据的精度。其次, 利用 BDS-3 载波相位时间比对方法分别应用在零基线共钟时间比对及长基线时间比对中, 实验结果表明, 在零基线共钟时间比对中, 利用 BDS-3 载波相位时间比对获得的两接收机钟差的标准偏差优于 0.3 ns, 比 BDS-2 有较大提高, 因此该方法可满足 BIPM 开展全球守时实验室间相对校准不确定度的要求。在长基线时间比对中, 基于 BDS-3 非差组合载波相位时间比对, 以及 BDS-3 与 GPS 融合载波相位时间比对获得的 UTC(NTSC) 与 UTC(TP) 的比对钟差与 BIPM 发布的两守时实验室的比对钟差具有较好的一致性, 且相对于 BIPM 发布钟差的残差保持在 ± 0.5 ns 以内, 其残差的 RMS 分别为 0.247 6 ns 和 0.247 1 ns。同时, 两实验室比对钟差的频率稳定度以及时间稳定度与 BIPM 发布的结果在同一量级。实验结果进一步说明了基于 BDS-3 载波相位时间比对链路以及 BDS-3 与其他导航系统融合载波

相位时间比对可用于开展长基线高精度时间比对,并能够真实反映出两守时实验室间的比对钟差。

目前,随着 IGS 分析中心提供的 BDS-3 精密产品不断完善,这也将进一步推动北斗系统在高精度时间比对中的应用,特别是未来被 BIPM 用于开展国际原子时的计算。同时,依托 GNSS 兼容互操作的发展,促进 BDS-3 与其他导航系统的融合共用,更好的为用户提供高质量的 PNT 服务。

致谢:感谢德国波兹坦地学中心发布的多系统精密轨道和钟差等产品;以及捷克无线电工程和电子学院提供的 BDS-3 和 GPS 两系统 RINEX 观测数据。

参考文献

- [1] ALLAN D W, THOMAS C. Technical directives for standardization of GPS time receiver software [J]. *Metrologia*, 1994, 31 (1):69-79.
- [2] DEFRAIGNE P, PETET G. CGGTTS-Version 2E: An extended standard for GNSS time transfer [J]. *Metrologia*, 2015, 52 (6):1-22.
- [3] 江志恒. GPS 全视法时间传递回顾与展望[J]. 宇航计测技术, 2007(S1): 53-71.
JIANG ZH H. Review and perspective of GPS all in view time transfer [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2007(S1):53-71.
- [4] BIPM. CIRCULAR T 384 [EB/OL]. (2021-06-11) [2021-07-22]. <ftp://ftp2.bipm.org/pub/tai//Circular-T/cirt/cirt.401>.
- [5] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统公开服务性能规范(3.0 版) [EB/OL]. (2021-05) [2021-07-22]. <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfzx/202105/P020210526215541444683.pdf>
China Satellite Navigation Office. BeiDou navigation satellite system open service performance standard (Version 3.0) [EB/OL]. (2021-05) [2021-07-22]. <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfzx/202105/P020210526215541444683.pdf>
- [6] 周峰. 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.
ZHOU F. Theory and methodology of multi-GNSS undifferenced and uncombined precise point positioning [D]. Shanghai: East China Normal University, 2018.
- [7] 广伟. GPS PPP 时间传递技术研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2012.
GUANG W. Study on time transfer technology using GPS precise point positioning method [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [8] 刘春, 卫吉祥, 李维华, 等. 改进的自适应卡尔曼滤波在北斗伪距单点定位中的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(10): 142-148.
- LIU CH, WEI J X, LI W H, et al. Research on improved adaptive Kalman filter in BeiDou pseudorange single point positioning [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2020, 34 (10): 142-148.
- [9] 蔡昌盛. 多模 GNSS 融合精密单点定位理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
CAI CH SH. Theory and method of multi-GNSS integrated precise point positioning [M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [10] 陈演羽, 李延会, 黄飞江, 等. 基于混沌时间序列的 GPS 卫星钟差预测算法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(4):115-122.
CHEN Y Y, LI Y H, HUANG F J, et al. GPS satellite clock bias prediction algorithm based on chaotic time series [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(4):115-122.
- [11] 李丹丹, 许龙霞, 李博, 等. 空间信号误差对北斗单向授时的影响[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(10): 1673-1678.
LI D D, XU L X, LI B, et al. Impact of signal-in-space error on Beidou one-way timing [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2017, 31(10): 1673-1678.
- [12] 卢艳军, 陈雨荻, 张晓东, 等. 基于扩展 Kalman 滤波的姿态信息融合方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9): 281-288.
LU Y J, CHEN Y D, ZHANG X D, et al. Attitude information fusion method based on extended kalman filter [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(9): 281-288.
- [13] ZHANG X H, WU M K, LIU W K, et al. Initial assessment of the COMPASS/BeiDou-3: New-generation navigation signals [J]. *Journal of Geodesy*, 2017(1): 1-16.
- [14] HAUSCHILD A, MONTENBRUCK O, SLEEWAEGEN J, et al. Characterization of compass M-1 signals [J]. *GPS Solutions*, 2012, 16(1): 117-126.
- [15] JIANG Z, ARIAS F, BAUCH A, et al. Accurate time link calibration for UTC time transfer-status of the BIPM pilot study on the UTC time link calibration [C]. Neuchatel, Switzerland: European Frequency and Time Forum (EFTF), 2014.
- [16] JIANG Z H, CZUBL A, NAWROCKI J, et al. Towards accurate optical fibre time transfer in UTC [C]. Neuchatel, Switzerland: European Frequency and Time

Forum (EFTF), 2014.

- [17] 张宁. IGSO 新卫星对 BDS-3 伪距单点定位精度影响分析[J]. 地理信息世界, 2021, 28(1):113-117.
ZHANG N. The influence of IGSO new satellite on the pseudorange single point positioning accuracy of BDS-3[J]. GEOMATICS WORLD, 2021, 28 (1): 113-117.
- [18] EL-MOWAFY A, DEO M, RIZOS C. On biases in precise point positioning with multi-constellation and multi-frequency GNSS data [J]. Measurement Science and Technology, 2016:1-14.
- [19] PASCALE D, QUENTIN B. Combining GPS and GLONASS for time and frequency transfer [J]. Advances in Space Research, 2011,47(2):265-275.
- [20] 蒋军, 王晓旺, 原彬. 一种顾及系统间偏差的 GNSS 差分定位研究[J]. 现代导航, 2018, 10(5):313-320.
JIANG J, WANG X W, YUAN B. Research on inter-system bias for differential GNSS [J]. Modern Navigation, 2018, 10(5):313-320.

作者简介



张继海, 2014 年于中国科学院国家授时中心获得硕士学位, 现为中国科学院国家授时中心助理研究员, 在读博士生, 主要研究方向为高精度时间传递与 GNSS 时差监测。
E-mail: zhangntsc@126.com

Zhang Jihai received his M. Sc. degree

from National Time Service Center, CAS, in 2014. He is currently a research assistant and a Ph. D. candidate at National Time Service Center, CAS. His main research interests include high precision time transfer and GNSS time difference monitoring.



董绍武 (通信作者), 2007 年于中国科学院国家授时中心获得博士学位, 现为中国科学院国家授时中心研究员, 博士生导师, 主要研究方向为标准时间的产生与保持(守时)技术、GNSS 时间系统等。

E-mail: sdong@ntsc.ac.cn

Dong Shaowu (Corresponding author) received his Ph. D. degree from National Time Service Center, CAS, in 2007. He is currently a research fellow and a Ph. D. advisor at National Time Service Center, CAS. His main research interests include timekeeping techniques, GNSS time system, and etc.



袁海波, 2009 年于中国科学院国家授时中心获得博士学位, 现为中国科学院国家授时中心研究员, 博士生导师, 主要研究方向为原子时尺度算法、守时技术、GNSS 的时间传递技术以及时差监测。

E-mail: yuanhb@ntsc.ac.cn

Yuan Haibo received his Ph. D. degree from National Time Service Center, CAS, in 2009. He is currently a research fellow and a Ph. D. advisor at National Time Service Center, CAS. His main research interests include atomic time scale algorithm, time keeping, GNSS time transfer and time difference monitoring.