

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2006234

# GNSS 多系统 PPP 融合时间比对方法研究\*

张继海<sup>1,2,3</sup>,董绍武<sup>1,2,3,4</sup>,袁海波<sup>1,2,3</sup>,广 伟<sup>2,3</sup>,白杉杉<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院大学 北京 100049; 2. 中国科学院国家授时中心 西安 710600;

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:**随着全球导航卫星系统(GNSS)的建设和完善,多系统融合时间比对成为未来发展的趋势。基于中国科学院国家授时中心、捷克无线电工程和电子学院以及瑞典国家计量研究院 3 个国际重要守时实验室的时间基准系统中四系统 GNSS 接收机伪距与载波相位观数据,以及国际 GNSS 服务中心发布的多系统精密轨道和钟差等数据,开展 GNSS 多系统 PPP 融合时间比对方法研究。试验结果表明,GNSS 多系统 PPP 融合可以有效增加可用卫星的数目,相对于单系统卫星观测数量提高了 2 倍以上,减少了多径误差以及观测高度角较低所带来的观测噪声等影响,改善观测站的卫星分布对于接收机钟差参数的影响,提高时间比对的稳定性和可靠性。在长基线时间比对的稳定度方面,GNSS 多系统 PPP 融合技术解算的两地钟差的稳定度方面要优于单系统,对基于北斗、格洛纳斯以及伽利略系统的单系统 PPP 比对有较明显的提高,且提高在 5% 以上。

**关键词:**全球导航卫星系统;精密单点定位;GNSS 多系统融合;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

## Study on multi-system GNSS data fusion technology in PPP time comparison

Zhang Jihai<sup>1,2,3</sup>, Dong Shaowu<sup>1,2,3,4</sup>, Yuan Haibo<sup>1,2,3</sup>, Guang Wei<sup>2,3</sup>, Bai Shanshan<sup>1,2,3</sup>

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2. National Time Service Center, CAS, Xi'an 710600, 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, UCAS, Beijing 100049, China)

**Abstract:** With the construction of global navigation satellite system (GNSS), the technology of multi-system fusion time comparison has become the developing trend in the field of timekeeping. In this study, the data of GNSS receivers are utilized, which are from the time keeping laboratories of National Time Service Center of Chinese Academy of Sciences, Institute of Photonics and Electronics Academy of Sciences of the Czech Republic, and SP Technical Research Institute of Sweden. Based on the multi-system measurements data and the precision products clock, orbit downloaded from the international GNSS service center, the multi-system GNSS data fusion technology in PPP time comparison is studied. Experimental results show that the multi-system fusion technology can increase the number of available satellites. Compared with the single system, the number of observed satellites is doubled. The effects of multipath error and observation noise are reduced, which are caused by observation altitude angel. The influence of receiver clock error is suppressed, which can be used to improve the stability and reliability of time comparison. With the multi-system GNSS fusion technology in the long baseline time comparison, the stability results are better than of the any single system. Compared with BDS, GLONASS and Galileo, the stability is increased by at least 5%.

**Keywords:** global navigation satellite system (GNSS); precise point positioning; GNSS multi-system fusion; carrier phase time comparison

收稿日期:2020-04-01 Received Date:2020-04-01

\* 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

基于全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)的高精度时间传递与比对技术被国际上的守时实验室广泛应用。目前,全球四大卫星导航系统中,美国的全球定位系统(global positioning system, GPS)由于其建设较早,且具有全球上百个跟踪站提供的卫星监测数据进行支撑,同时国际 GNSS 服务(international GNSS service, IGS)分析中心多年来一直提供 GPS 高精度数据处理所需的相关的产品,使得 GPS 已经成为广大用户使用率最高的卫星导航系统。当前国际权度局(BIPM)每月计算的协调世界时(coordinated universal time, UTC)中,全球 80 多个在 BIPM 注册的守时实验中有 50 个守时实验室利用 GPS PPP 方法实现其保持的协调世界时 UTC(k)(k 为守时实验室的缩写)向国际 UTC 溯源<sup>[1-2]</sup>。

随着 GNSS 技术的发展,全球卫星导航系统也在发生着技术的更新与变化。目前,GPS 发射的 BLOCK IIF 系列卫星使用了现代化 L5 频段的信号;俄罗斯的格洛纳斯(GLONASS)卫星导航系统信号将使用码分多址(CDMA)技术来代替之前的频分多址(FDMA);中国的北斗卫星导航系统(BDS)已经经过了中国区域(北斗一号)服务阶段、中国及亚太地区(北斗二号)服务阶段,全球基本服务阶段(北斗三号基本系统),现已在快速推进全球完整系统(北斗三号全球系统)的建设,计划到 2020 年将建成包含 3 颗地球同步轨道(GEO)卫星,24 颗中圆地球轨道(MEO)卫星以及 3 颗倾斜地球同步轨道(IGSO)卫星的全球卫星导航系统,为全球用户提供高质量的 PNT 服务;欧盟的伽利略(Galileo)卫星导航系统已具备了早期的运行能力(EOC),并预计在 2019 年具备完全运行能力(FOC),计划于 2020 年将全部 30 颗卫星发射完毕,其中包含 24 颗工作卫星和 6 颗备份卫星<sup>[3-4]</sup>。虽然目前世界上正在建设以及发展的卫星导航技术开始为用户提供高精度导航,定位与授时(positioning, navigation and timing, PNT)服务。在基于单卫星导航系统的时间比对中,由于可见卫星数、观测数据质量等因素无法确保高精度时间比对连续性、稳定性和可靠性,在 2019 年 7 月 12 日 5 时 50 分(北京时间)后 Galileo 彻底中断服务,在经过 117 h 的等待后于 2019 年 7 月 17 日 3 时(北京时间)Galileo 系统恢复服务,但与其他 3 个导航系统相比,Galileo 卫星导航系统仍存在部分卫星导航电文缺失现象。为提高国际标准时间的准确性、稳定性以及可靠性,2009 年国际时间国际频率咨询委员会(CCTF)大会建议并鼓励多时间比对手段应用于国际 UTC 的计算。2009 年 12 月 BIPM 发布的第 263 期国际

时间公报上首次采用以及发布了俄罗斯 GLONASS 卫星共视时间比对结果。同时,在 2017 年第 21 届 CCTF 工作组会议上,BIPM 的专家也建议尽快将北斗时间比对技术用于国际 UTC 的计算中,并与其他卫星导航系统形成冗余备份<sup>[5]</sup>。因此,开展 GNSS 多系统 PPP 融合时间比对成为未来国际 UTC 计算发展的必然趋势,进而可以为用户提供更加稳定可靠的服务。2012 年,IGS 中心开始建立多系统 GNSS 实验工程(MGEX),以便尽早熟悉新的卫星导航系统,将各卫星导航系统纳入高精度 GNSS 建模、分析,并提供相应的精密产品等。经过几年的发展,目前 IGS 数据分析中心和相关的研究机构开始向全球用户提供各导航系统在轨卫星的超快、快速以及最终精密轨道、钟差等产品,为用户实现多系统 GNSS PPP 融合时间比对研究与应用创造了良好的基础。

本文立足于目前在轨的四大全球导航卫星系统以及 IGS 分析中心之一的德国波兹坦地学中心(GFZ)发布的精密卫星轨道以及钟差等产品,利用中国科学院国家授时中心(NTSC)、捷克无线电工程和电子学院(TP)以及瑞典国家计量研究院(SP)3 个守时实验室时间基准系统中 GNSS 接收机测量的四系统伪距与载波相位观测值,开展 GNSS 多系统 PPP 融合时间比对方法实验,并对两地钟差进行了分析与研究。

## 1 GNSS 多系统 PPP 融合算法基本原理

以本地守时实验室的 UTC(k)为参考信号,接收机通过接收四大导航系统的空间信号开展 GNSS PPP 融合时间比对研究,其原理如下。

本地卫星观测以及数据采集如图 1 所示,数据采集模块实时存储所观测到各导航系统卫星的伪距和载波相位观测值。因此一般原始观测方程可描述为<sup>[7-8]</sup>:

$$P_{r,f}^{s,Q} = \rho_r^{s,Q} + c(dt_r - dt^{s,Q}) + mZTD + \mu_f^Q I_{r,1}^Q + \varepsilon_f^{s,Q} \quad (1)$$

$$L_{r,f}^{s,Q} = \rho_r^{s,Q} + c(dt_r - dt^{s,Q}) + mZTD - \mu_f^Q I_{r,1}^Q + \lambda_f^{s,Q} N_{r,f}^{s,Q} + \zeta_f^{s,Q} \quad (2)$$

式中:  $P_{r,f}^{s,Q}$  和  $L_{r,f}^{s,Q}$  分别为接收机  $r$  接收到卫星  $s$  在频点  $f$  ( $f=1, 2$ ) 的伪距和相位观测值,  $m$ ; 上标  $Q$  为对应各导航卫星系统(G 是 GPS 系统, R 是 GLONASS 系统, C 是北斗系统, E 是伽利略系统);  $\rho_r^{s,Q}$  为真实站星之间的距离,  $m$ ;  $dt_r$  和  $dt^{s,Q}$  分别为接收机钟差以及卫星钟差,  $s$ ;  $m$  为与卫星高度角有关的投影函数;  $ZTD$  为测站天顶反向上的对流层延迟,  $m$ ;  $I_{r,1}^Q$  为频率  $f_1$  上对应的斜电离层延迟,  $m$ ;  $\mu_f^Q$  为频率相关的电离层延迟放大因子 ( $\mu_f^Q = (\lambda_f^{s,Q}/\lambda_1^Q)^2$ ), 其中  $\lambda_f^{s,Q}$  为频率  $f$  的波长,  $m$ ;  $\lambda_f^{s,Q} N_{r,f}^{s,Q}$  为整

周模糊度,周; $\varepsilon_f^{s,Q}$  和  $\zeta_f^{s,Q}$  为伪距以及载波相位的多路径效应、观测噪声以及其他误差, m。

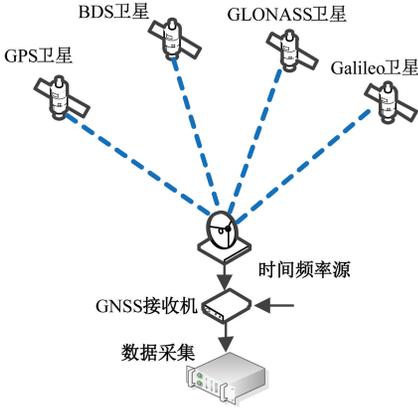


图 1 GNSS 空间信号接收法

Fig.1 The method of GNSS space signal receiver

通常在双频数据处理中,利用非差双频无电离层组合来减小一阶电离层带来的延迟,其表达式<sup>[9]</sup>如下。

$$\begin{cases} L_{r,f}^{s,G} = \mathbf{v}_r^{s,G} \mathbf{x} + cd\bar{t}_r^G + m_r^{s,G} ZTD - \mu_f^G \bar{T}_{r,1}^{s,G} + \lambda_r^{s,G} \bar{N}_{r,f}^{s,G} + \zeta_{r,f}^{s,G} \\ L_{r,f}^{s,R} = \mathbf{v}_r^{s,R} \mathbf{x} + cd\bar{t}_r^G + cISB_r^R + m_r^{s,R} ZTD - \mu_f^R \bar{T}_{r,1}^{s,R} + \lambda_r^{s,R} \bar{N}_{r,f}^{s,R} + \zeta_{r,f}^{s,R} \\ L_{r,f}^{s,C} = \mathbf{v}_r^{s,C} \mathbf{x} + cd\bar{t}_r^G + cISB_r^C + m_r^{s,C} ZTD - \mu_f^C \bar{T}_{r,1}^{s,C} + \lambda_r^{s,C} \bar{N}_{r,f}^{s,C} + \zeta_{r,f}^{s,C} \\ L_{r,f}^{s,E} = \mathbf{v}_r^{s,E} \mathbf{x} + cd\bar{t}_r^G + cISB_r^E + m_r^{s,E} ZTD - \mu_f^E \bar{T}_{r,1}^{s,E} + \lambda_r^{s,E} \bar{N}_{r,f}^{s,E} + \zeta_{r,f}^{s,E} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{v}_r^{s,Q}$  为方向余弦;  $\mathbf{x}$  为相对于初始坐标的三维增量;  $cd\bar{t}_r^G$  为重新参数化后的接收机钟差;  $\bar{T}_{r,1}^{s,Q}$  为电离层延迟,包含卫星与接收机的差分码偏差 (differential code bias, DCB) 等时延之和;  $\bar{N}_{r,f}^{s,Q}$  为载波相位整周模糊度参数,包含整周模糊度  $N_{r,f}^{s,Q}$ 、卫星和接收机相位硬件时延以及差分码偏差等相关的代数和;  $ISB_r^Q$  为系统间偏差<sup>[12-13]</sup>。

利用上述原理及公式,GNSS 4 系统 PPP 融合数据处理所使用的模型如表 1 所示。

通过式(4)和(5)的观测方程以及表 1 中的各种相关误差模型修正及改正,利用非差组合多系统 PPP 算法估算出的 4 系统融合解算的结果参数向量  $X$ <sup>[19-20]</sup>。

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x} \quad cd\bar{t}_r^G \quad ISB_r^Q \quad ZTD \quad \bar{T}_{r,1}^{s,Q} \quad \bar{N}_{r,f}^{s,Q}]^T \quad (6)$$

GNSS 多系统融合 PPP 高精度载波相位时间比对原理<sup>[21-22]</sup>如图 2 所示。

图 2 中基于 GNSS 多系统 PPP 时间比对方法可描述为:设两地的时间频率参考源分别为  $RefT1$  和  $RefT2$ ,以 IGS 系统时间  $IGST$  为公共参考,则两地参考时间相对于  $IGST$  的时间偏差分别为:

$$\Delta t_1 = RefT1 - IGST \quad (7)$$

$$\Delta t_2 = RefT2 - IGST \quad (8)$$

式中:将式(7)与式(8)相减,可得到两地钟差,其中  $\Delta t_1$  和  $\Delta t_2$  分别为式(4)和(5)中的重新参数化后的接收机钟差。

$$\begin{cases} P_{r,IF} = \frac{f_1^2 P_{r,1} - f_2^2 P_{r,2}}{f_1^2 - f_2^2} \\ L_{r,IF} = \frac{f_1^2 L_{r,1} - f_2^2 L_{r,2}}{f_1^2 - f_2^2} \end{cases} \quad (3)$$

对于不同的单卫星导航系统解算的接收机钟差而言,均可表示相同的接收机内部参考时钟与其采用的 GNSS 单系统时间之差,因此在 GNSS 多系统 PPP 融合时间比对算法中,可通过对接收机钟差参数的统一,将基于不同的单卫星导航系统统一到相同的 GNSS 系统时间上,实现多系统 PPP 融合高精度远距离时间比对。本文以 GPS 的系统时间 GPST 作为公共参考时间,则式(1)~(3)可描述为<sup>[10-11]</sup>:

$$\begin{cases} P_{r,f}^{s,G} = \mathbf{v}_r^{s,G} \mathbf{x} + cd\bar{t}_r^G + m_r^{s,G} ZTD + \mu_f^G \bar{T}_{r,1}^{s,G} + \varepsilon_{r,f}^{s,G} \\ P_{r,f}^{s,R} = \mathbf{v}_r^{s,R} \mathbf{x} + cd\bar{t}_r^G + cISB_r^R + m_r^{s,R} ZTD + \mu_f^R \bar{T}_{r,1}^{s,R} + \varepsilon_{r,f}^{s,R} \\ P_{r,f}^{s,C} = \mathbf{v}_r^{s,C} \mathbf{x} + cd\bar{t}_r^G + cISB_r^C + m_r^{s,C} ZTD + \mu_f^C \bar{T}_{r,1}^{s,C} + \varepsilon_{r,f}^{s,C} \\ P_{r,f}^{s,E} = \mathbf{v}_r^{s,E} \mathbf{x} + cd\bar{t}_r^G + cISB_r^E + m_r^{s,E} ZTD + \mu_f^E \bar{T}_{r,1}^{s,E} + \varepsilon_{r,f}^{s,E} \end{cases} \quad (4)$$

表 1 数据处理模型

Table 1 The data processing model

内容	修正模型
卫星星座	GPS+BDS+GLONASS+Galileo
观测数据	伪距及相位观测文件
采样间隔	30 s
信号选择	GPS/GLONASS:L1 和 L2; BDS: B1 和 B2; Galileo: E1 和 E5a
卫星轨道	GFZ 发布的轨道产品 <sup>[14]</sup>
卫星钟差	GFZ 发布的钟差产品
卫星相位中心	igs14_2045.atx
电离层时延	双频无电离层组合
对流层时延	萨斯塔莫宁模型 (Saastamoinen) + 随机游走模型 <sup>[15-16]</sup>
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
结果计算	扩展卡尔曼滤波估计 <sup>[17-18]</sup>

$$\Delta t_1 - \Delta t_2 = RefT1 - IGST - RefT2 + IGST = \Delta t_{12} \quad (9)$$

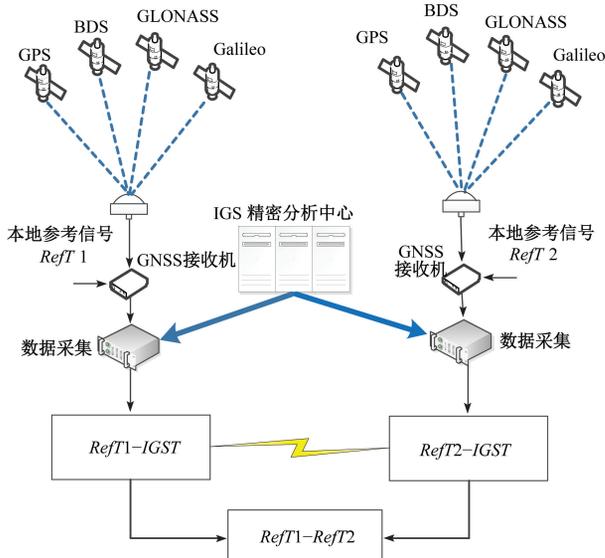


图2 GNSS PPP 时间比对原理

Fig.2 The principle of GNSS PPP time comparison

### 2 测试与试验评估

为了验证 GNSS PPP 融合载波相位时间比对的性能,构建长基线时间比对链路,并利用 3 个守时实验室 (NTSC,TP 以及 SP) 2019 年 11 月 7 日~2019 年 11 月 16 日 (MJD:58 794~58 803) 的 30 s 采样间隔的 GNSS 观测数据,开展 GNSS 多系统 PPP 融合时间比对方法实验。GNSS 接收机外接守时实验室主钟输出的 1PPS 和 5/10 MHz 信号,实验室环境适宜,温度和湿度长期控制在一定范围内。同时,利用 GFZ 发布的多系统精密轨道和钟差等产品,基于第 1 节所介绍的原理和算法开发了相关的数据处理软件,利用此软件进行了相关的 GNSS 多系统 PPP 融合时间比对实验及数据处理,并对初步结果进行了验证与分析。

本次试验中,长基线时间比对的距离横跨亚欧大陆,其中 NTSC 与 TP 的距离约为 7 058 km,NTSC 与 SP 的距离约为 6 827 km。表 2 所示为各守时实验室所用的时间传递型接收机及天线类型。

表 2 守时实验室使用的接收机

Table 2 The receiver used in time keeping laboratories

实验室	时间频率源	接收机类型	天线类型
NTSC	UTC (NTSC)	SEPT POLARX4TR	SEPCHOKE_MC
TP	UTC (TP)	GTR55	NOV850
SP	UTC (SP)	SEPT POLARX5TR	LEIAR25.R4

由表 2 可以看出,3 个守时实验室均配备有高性能的时间传递型接收机以及天线,且接收机外接的本地主

钟信号均为高性能的氢钟。

### 2.1 可见卫星数及 TDOP

融合 GNSS 多系统 PPP 高精度时间比对最为明显的优势在于可以增加可视范围内的卫星数目,增强时间比对的稳定性。图 3~5 所示为各守时实验室所观测到的 GNSS 多系统以及单系统在 2019 年 11 月 7 日不同历元间的卫星数对比。

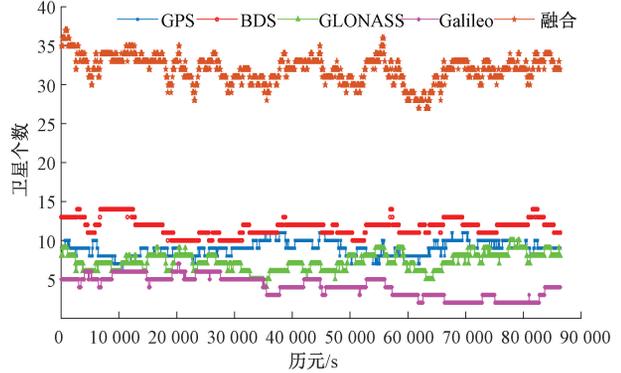


图3 NTSC 观测的卫星数

Fig.3 The number of satellites observed at NTSC

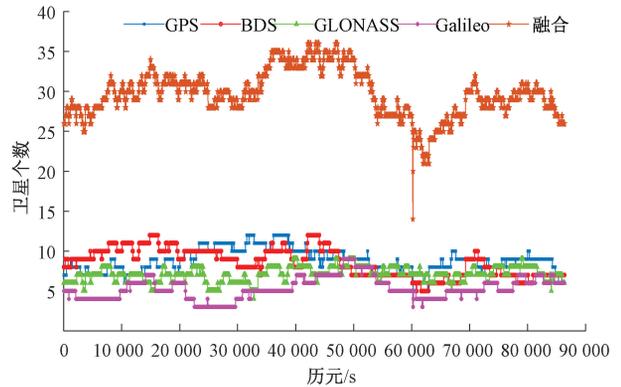


图4 TP 观测的卫星数

Fig.4 The number of satellites observed at TP

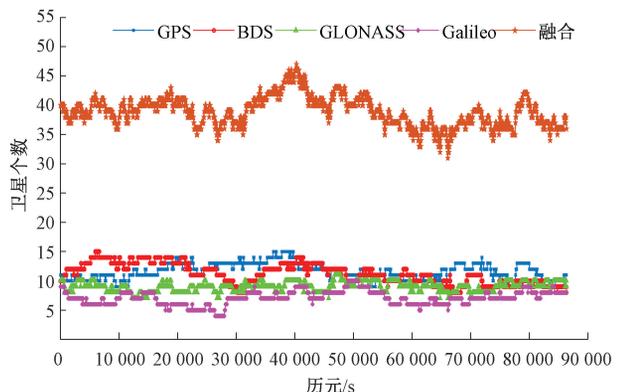


图5 SP 观测的卫星数

Fig.5 The number of satellites observed at SP

由图 3~5 所示 3 个观测站在本地所观测到的 GNSS 多系统以及单系统卫星数目可以明显看出,GNSS 多系统融合载波相位时间比对中的可见卫星数目明显优于单系统,且比单系统卫星数目多出了两倍有余。GNSS 多系统融合增加了观测站在可视范围内的卫星数目,减少了观测站由于观测卫星高度角较低所带来的测量噪声等影响,提高了伪距以及载波相位观测数据的质量。

在基于 GNSS 的高精度时间比对中,本地接收机钟差是实现远距离高精度时间比对的重要解算参数。其中,GNSS 卫星的观测数据和空间分布对于接收机钟差的影响可以用钟差精度因子 (time dilution of precision, TDOP) 表示。TDOP 值越小,其接收机钟差参数的估计精度越高。图 6~8 所示分别为 3 个守时实验室 2019 年 11 月 7 日全天所观测到的卫星多系统以及单系统解算的本地 TDOP 值对比。

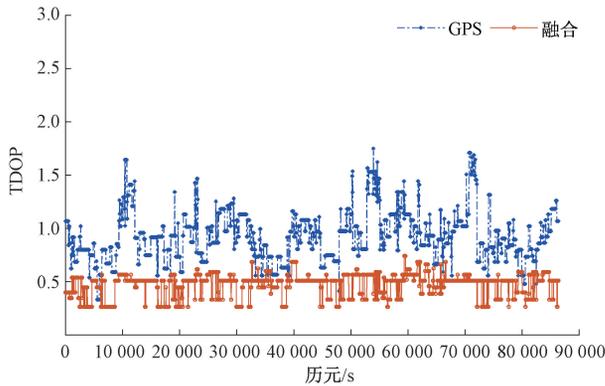


图 6 NTSC 单/多系统 TDOP 值

Fig.6 The TDOP of single/multi system at NTSC

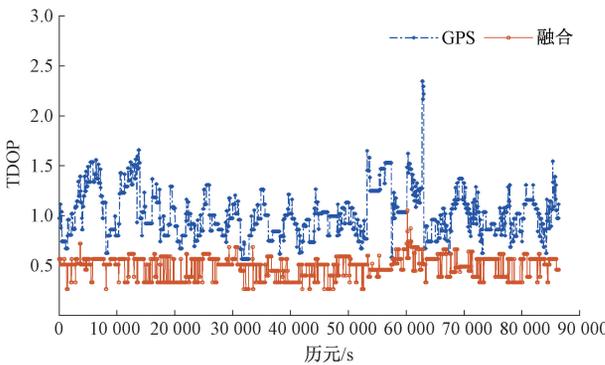


图 7 TP 单/多系统 TDOP 值

Fig.7 The TDOP of single/multi system at TP

图 6~8 所示 NTSC、TP 以及 SP 3 个观测站所观测到的多系统以及 GPS 单系统 TDOP 对比可以看出,GNSS 融合多系统的 TDOP 显著得到了改善,相对于 GPS 单系

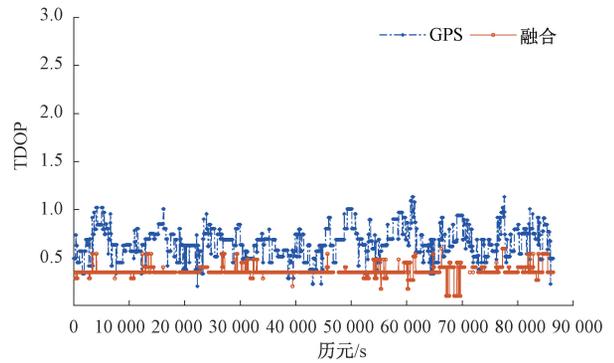


图 8 SP 单/多系统 TDOP 值

Fig.8 The TDOP of single/multi system at SP

统提高了 2 倍左右。因此,GNSS 融合多系统接收机钟差精度因子明显得到了改善。

### 2.2 GNSS PPP 融合高精度时间比对

利用 3 个守时实验室的观测数据开展 GNSS 多系统 PPP 融合高精度时间比对实验。

UTC (NTSC) 与 UTC (TP) 以及 UTC (NTSC) 与 UTC (SP) 分别利用单系统以及 GNSS 多系统融合 PPP 解算得到的两地比对钟差分别如图 9 和 10 所示,为了能够直观的看出对比结果,将单系统的两地比对钟差相对于融合比对的钟差进行了固定的平移,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。从图 9 和 10 中可以看出,基于 GPS、BDS、GLONASS 以及 Galileo 单系统 PPP 的两地时间比对钟差与多系统 PPP 融合所得到的两地钟差的趋势一致。且 GNSS 多系统融合 PPP 相对于单系统 PPP 具有显著的稳健性,特别在利用 BDS 单系统通过 PPP 获得 UTC (NTSC) 与 UTC (TP) 两地的钟差结果中尤为突出。

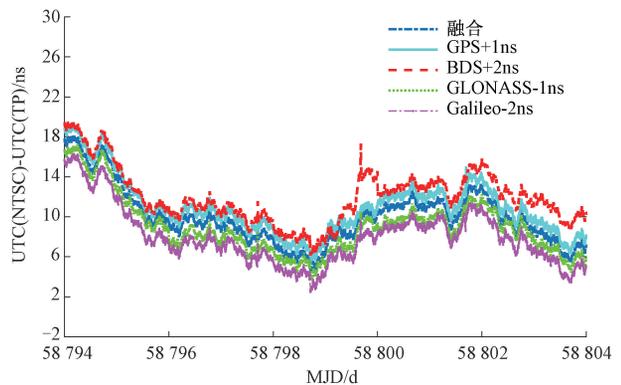


图 9 UTC(NTSC)-UTC(TP)钟差

Fig.9 The time difference between UTC (NTSC) and UTC (TP)

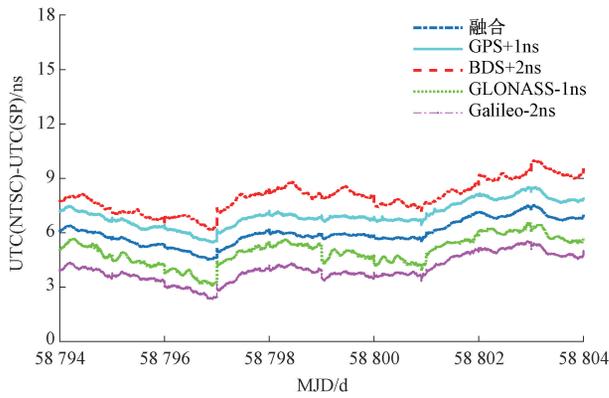


图 10 UTC(NTSC)-UTC(SP) 钟差

Fig.10 The time difference between UTC (NTSC) and UTC (SP)

图 11 和 12 所示为不同守时实验室间利用单系统以及多系统 PPP 融合时间比对钟差的频率稳定度。表 3 和 4 所示为从数值上分析了不同守时实验室间利用不同方法获得的时间比对钟差频率稳定度。

由两守时实验室间的时间比对钟差频率稳定度可以看出,多系统 PPP 融合两地时间比对钟差的稳定度要优于单系统,尤其是相对于 BDS、GLONASS 以及 Galileo 系统。

利用多系统融合 PPP 获得的 UTC (NTSC)-UTC (TP) 以及 UTC (NTSC)-UTC (SP) 的钟差相对于单系统 PPP 比对的钟差稳定度提高百分比如图 13 和 14 所示。可以看出,在 UTC(NTSC) 与 UTC(TP) 以及 UTC(SP) 的

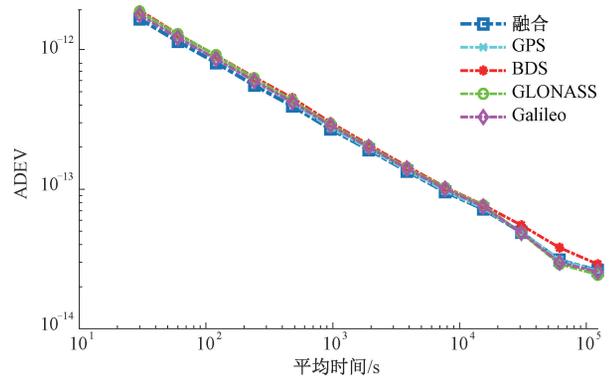


图 11 UTC(NTSC)-UTC(TP) 稳定度

Fig.11 The frequency stability of UTC (NTSC)-UTC (TP)

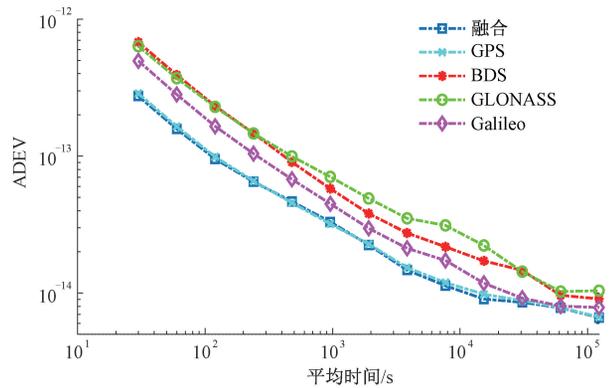


图 12 UTC(NTSC)-UTC(SP) 稳定度

Fig.12 The frequency stability of UTC (NTSC)-UTC (SP)

表 3 UTC(NTSC)-UTC(TP) 稳定度  
Table 3 The ADEV of UTC(NTSC)-UTC(TP)

Tau/s	融合	GPS	BDS	GLONASS	Galileo
30	$1.661 \times 10^{-12}$	$1.848 \times 10^{-12}$	$1.917 \times 10^{-12}$	$1.872 \times 10^{-12}$	$1.775 \times 10^{-12}$
60	$1.143 \times 10^{-12}$	$1.232 \times 10^{-12}$	$1.295 \times 10^{-12}$	$1.289 \times 10^{-12}$	$1.217 \times 10^{-12}$
120	$8.048 \times 10^{-13}$	$8.540 \times 10^{-13}$	$9.096 \times 10^{-13}$	$9.126 \times 10^{-13}$	$8.583 \times 10^{-13}$
240	$5.556 \times 10^{-13}$	$6.024 \times 10^{-13}$	$6.353 \times 10^{-13}$	$6.216 \times 10^{-13}$	$5.957 \times 10^{-13}$
480	$3.937 \times 10^{-13}$	$4.153 \times 10^{-13}$	$4.506 \times 10^{-13}$	$4.325 \times 10^{-13}$	$4.220 \times 10^{-13}$
960	$2.695 \times 10^{-13}$	$2.753 \times 10^{-13}$	$3.012 \times 10^{-13}$	$2.922 \times 10^{-13}$	$2.866 \times 10^{-13}$
1 920	$1.917 \times 10^{-13}$	$1.946 \times 10^{-13}$	$2.084 \times 10^{-13}$	$2.034 \times 10^{-13}$	$2.006 \times 10^{-13}$
3 840	$1.348 \times 10^{-13}$	$1.364 \times 10^{-13}$	$1.463 \times 10^{-13}$	$1.426 \times 10^{-13}$	$1.406 \times 10^{-13}$
7 680	$9.578 \times 10^{-14}$	$9.706 \times 10^{-14}$	$1.036 \times 10^{-13}$	$1.023 \times 10^{-13}$	$1.007 \times 10^{-13}$
15 360	$7.205 \times 10^{-14}$	$7.286 \times 10^{-14}$	$7.721 \times 10^{-14}$	$7.666 \times 10^{-14}$	$7.526 \times 10^{-14}$
30 720	$4.907 \times 10^{-14}$	$4.925 \times 10^{-14}$	$5.520 \times 10^{-14}$	$4.855 \times 10^{-14}$	$4.870 \times 10^{-14}$
61 440	$3.107 \times 10^{-14}$	$3.115 \times 10^{-14}$	$3.811 \times 10^{-14}$	$2.913 \times 10^{-14}$	$2.976 \times 10^{-14}$
122 880	$2.617 \times 10^{-14}$	$2.601 \times 10^{-14}$	$2.901 \times 10^{-14}$	$2.440 \times 10^{-14}$	$2.561 \times 10^{-14}$

表 4 UTC(NTSC)-UTC(SP) 稳定度  
Table 4 The ADEV of UTC(NTSC)-UTC(SP)

Tau/s	融合	GPS	BDS	GLONASS	Galileo
30	$2.742 \times 10^{-13}$	$2.867 \times 10^{-13}$	$6.786 \times 10^{-13}$	$6.348 \times 10^{-13}$	$4.955 \times 10^{-13}$
60	$1.579 \times 10^{-13}$	$1.647 \times 10^{-13}$	$3.915 \times 10^{-13}$	$3.706 \times 10^{-13}$	$2.818 \times 10^{-13}$
120	$9.538 \times 10^{-14}$	$9.887 \times 10^{-14}$	$2.321 \times 10^{-13}$	$2.288 \times 10^{-13}$	$1.652 \times 10^{-13}$
240	$6.502 \times 10^{-14}$	$6.582 \times 10^{-14}$	$1.468 \times 10^{-13}$	$1.464 \times 10^{-13}$	$1.042 \times 10^{-13}$
480	$4.659 \times 10^{-14}$	$4.563 \times 10^{-14}$	$9.052 \times 10^{-14}$	$9.961 \times 10^{-14}$	$6.778 \times 10^{-14}$
960	$3.313 \times 10^{-14}$	$3.200 \times 10^{-14}$	$5.789 \times 10^{-14}$	$7.063 \times 10^{-14}$	$4.488 \times 10^{-14}$
1 920	$2.250 \times 10^{-14}$	$2.281 \times 10^{-14}$	$3.807 \times 10^{-14}$	$4.915 \times 10^{-14}$	$2.974 \times 10^{-14}$
3 840	$1.474 \times 10^{-14}$	$1.535 \times 10^{-14}$	$2.747 \times 10^{-14}$	$3.516 \times 10^{-14}$	$2.125 \times 10^{-14}$
7 680	$1.132 \times 10^{-14}$	$1.195 \times 10^{-14}$	$2.179 \times 10^{-14}$	$3.123 \times 10^{-14}$	$1.731 \times 10^{-14}$
15 360	$9.057 \times 10^{-15}$	$9.805 \times 10^{-15}$	$1.718 \times 10^{-14}$	$2.227 \times 10^{-14}$	$1.181 \times 10^{-14}$
30 720	$8.569 \times 10^{-15}$	$8.822 \times 10^{-15}$	$1.467 \times 10^{-14}$	$1.434 \times 10^{-14}$	$9.192 \times 10^{-15}$
61 440	$7.810 \times 10^{-15}$	$7.866 \times 10^{-15}$	$9.639 \times 10^{-15}$	$1.027 \times 10^{-14}$	$8.050 \times 10^{-15}$
122 880	$6.634 \times 10^{-15}$	$6.691 \times 10^{-15}$	$9.090 \times 10^{-15}$	$1.042 \times 10^{-14}$	$7.853 \times 10^{-15}$

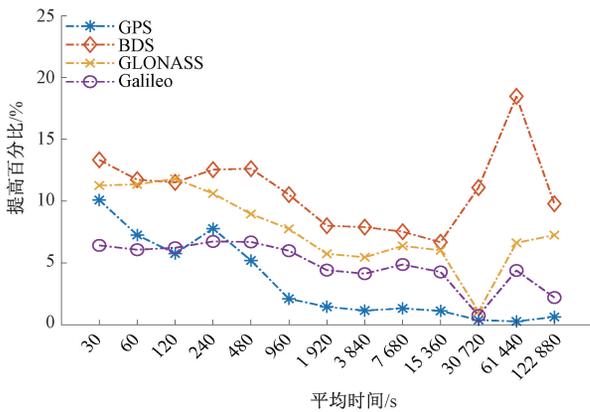


图 13 UTC(NTSC)-UTC(TP)多系统相对于单系统提高的百分比  
Fig.13 The improvement percent of UTC(NTSC)-UTC(TP) multi-system relative to single system

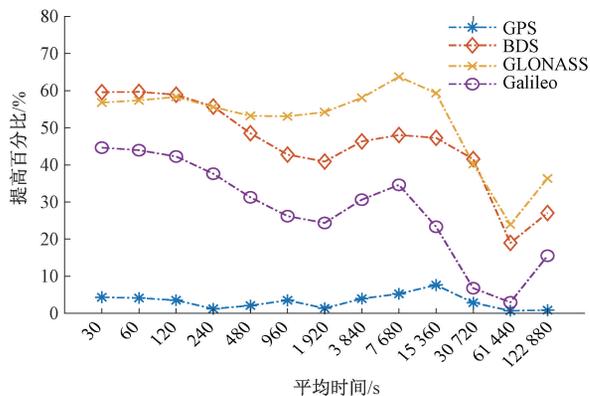


图 14 UTC(NTSC)-UTC(SP)多系统相对于单系统提高的百分比  
Fig.14 The improvement percent of UTC(NTSC)-UTC(SP) multi-system relative to single system

时间比对中,多系统融合两地 PPP 时间比对的钟差优于单系统 PPP 比对的结果。因此,基于多系统 PPP 融合时间比对技术可用于两地高精度时间比对,不仅能够不依赖于单一系统的时间比对链路,而且可以改善两地时间比对钟差的稳定度。

### 3 结 论

本文基于目前国际上的主要守时实验室 (NTSC, TP 以及 SP) 的时间比对系统中 GNSS 多系统采样间隔为 30 s 的伪距和载波相位观测数据,以及 GFZ 发布的精密轨道和钟差等产品,开展 GNSS 多系统 PPP 融合时间比对分析与实验研究,验证了本文提出的融合方法,对比了多系统融合与单系统 PPP 在时间比对方面的异同。

实验结果表明,融合 GNSS 载波相位时间传递方法可以有效增加可见的卫星数目,改善跟踪站观测的卫星分布对于接收机钟差参数影响,其对应的 TDOP 值也明显改善。利用 GNSS 多系统融合时间比对技术试验中,在 UTC(NTSC)与 UTC(TP)以及 UTC(NTSC)与 UTC(SP)的时间比对钟差稳定度方面,利用 GNSS 多系统 PPP 融合时间比对方法获得的 UTC(NTSC)与 UTC(TP)钟差稳定度除 GPS 单系统外,相对于其他 3 个系统提高约为 5% 以上;利用 GNSS 多系统 PPP 融合时间比对方法获得的 UTC(NTSC)与 UTC(SP)钟差稳定度除 GPS 单系统外,相对于其他 3 个系统提高在 10% 左右以上。通过以上实验结果表明,在基于 PPP 高精度时间比对方面,

GNSS 多系统 PPP 融合时间比对不仅有助于两地时间比对精度的提升,而且可以减少对单一系统的依赖。同时,相对于单一系统构成的比对链路,多系统时间比对链路的可靠性得到很好的保障,特别是在观测站位于观测环境较差的森林、城市和峡谷中的需求更加迫切。

目前,随着 GNSS 的发展,特别是中国北斗系统的全球组网建设,这也将进一步推动中国北斗系统在国际导航领域与其他导航系统的融合共用。同时,GNSS 多系统 PPP 融合高精度时间比对也为参与国际标准时间 UTC 的计算提供了相关的技术支持。

**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、瑞典国家计量研究院提供的 GNSS 4 系统 RINEX 原始观测数据文件。

### 参考文献

- [ 1 ] BIPM. CIRCULAR T 384 [ R/OL ]. ( 2020-01-09 ) [ 2020-04-01 ]. <ftp://ftp2.bipm.org/pub/tai/Circular-T/cirt/cirt.384>.
- [ 2 ] PETIT G, HARMEGNIES A, MERCIER F, et al. The time stability of PPP links for TAI [ C ]. IEEE International Frequency Control and the European Frequency and Time Forum ( FCS ) Proceedings, 2011: 1-5.
- [ 3 ] HAN CH H, YANG Y X, CAI ZH W. BeiDou navigation satellite system and its time scales [ J ]. Metrologia, 2011, 48(4): 213-218.
- [ 4 ] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统发展报告(4.0 版) [ R/OL ]. ( 2019-12 ) [ 2020-04-01 ]. <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/201912/P020191227337020425733.pdf>. China Satellite Navigation Office. Development of the BeiDou navigation satellite system ( Version 4.0 ) [ R/OL ]. ( 2019-12 ) [ 2020-04-01 ]. <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/201912/P020191227337020425733.pdf>.
- [ 5 ] 张继海, 武文俊, 广伟, 等. 基于北斗共视的国际时间比对研究 [ J ]. 仪器仪表学报, 2018, 39(6): 96-103. ZHANG J H, WU W J, GUANG W, et al. Study of international common view time comparison by BeiDou [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(6): 96-103.
- [ 6 ] GUANG W, YUAN H B, DONG SH W, et al. The evaluation of BeiDou time transfer performance [ C ]. IEEE International Frequency Control Symposium, 2016: 1-4.
- [ 7 ] ZHANG P F, TU R, GAO Y P, et al. Study of time link calibration based on GPS carrier phase observation [ J ]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2018, 12 ( 11 ): 1330-1335.
- [ 8 ] GUANG W, ZHANG P F, YUAN H B, et al. The research on carrier phase time transfer of BeiDou navigation satellite system [ C ]. European Frequency and Time Forum, 2014: 113-117.
- [ 9 ] GUANG W, DONG SH W, WU W J, et al. Progress of BeiDou time transfer at NTSC [ J ]. Metrologia, 2018, 55(2): 175-187.
- [ 10 ] 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.
- [ 11 ] EL-MOWAFY A, DEO M, RIZOS C. On biases in precise point positioning with multi-constellation and multi-frequency GNSS data [ J ]. Measurement Science & Technology, 2016, 27(3): 1-14.
- [ 12 ] 张锡越, 赵春梅, 王权, 等. 多系统融合单频精密单点定位 [ J ]. 测绘科学, 2018, 43(3): 29-34. ZHANG X Y, ZHAO CH M, WANG Q, et al. Precise point positioning with multi-system fsion for single [ J ]. Science of Surveying and Mapping, 2018, 43(3): 29-34.
- [ 13 ] 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.
- [ 14 ] STEIGENBERGER P, HUGENTOBLER U, HAUSCHILD A, et al. Orbit and clock analysis of Compass GEO and IGS0 satellites [ J ]. Journal of Geodesy, 2013(87): 515-525.
- [ 15 ] 陈曦, 张中兆, 韩帅. 大气折射对跟踪天线指向的影响及修正方法 [ J ]. 电子测量与仪器学报, 2008, 23(8): 61-66. CHEN X, ZHANG ZH ZH, HAN SH. Influence and correction method of atmosphere refraction on tracking antenna direction [ J ]. Journal of Electronic Measurement And Instrumentation, 2008, 23(8): 61-66.
- [ 16 ] 闫志闯, 楼楠, 李靖. 对流层参数估计测率对 PPP 精度影响分析 [ J ]. 测绘工程, 2019, 28(1): 5-13. YAN ZH CH, LOU N, LI J. Influence of tropospheric

- delay parameters' estimation strategy on the precision of PPP[J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2019, 28(1): 5-13.
- [17] 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.  
SONG H J, DONG SH W, QU L L, et al. Research on clock difference prediction using adaptive Kalman filter based on Sage window[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(7):1809-1816.
- [18] 薛明喜,杨扬,张晨睿,等.基于自适应Kalman滤波的SAW测温数据纠错方法[J].*仪器仪表学报*, 2016, 37(12):2766-2773.  
XUE M X, YANG Y, ZHANG CH R, et al. Error correction method for SAW temperature measurement data based on adaptive Kalman filter[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*. 2016,37(12):2766-2773.
- [19] 张鹏飞,涂锐,高玉平,等.基于北斗的时间传递方法及其精度分析[J].*仪器仪表学报*, 2017, 38(11): 2700-2706.  
ZHANG P F, TU R, GAO Y P, et al. Beidou time transfer method and its accuracy[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(11):2700-2706.
- [20] PETIT G, KANJ A, LOYER S, et al.  $1 \times 10^{-16}$  frequency transfer by GPS PPP with integer ambiguity resolution[J]. *Metrologia*, 52, 301-309.
- [21] 广伟. GPS PPP 时间传递技术研究[D]. 西安:中国科学院国家授时中心, 2012.
- GUANG W. Study on time transfer technology using gps precise point positioning method [D]. Xi'an: National Time Service Center Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [22] GE Y L, ZHOU F, LIU T J, et al. Enhancing real-time precise point positioning time and frequency transfer with receiver clock modeling [J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(20): 1-14.

### 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, etc.