



引文格式:王宇谱,刘经南,胡彩波,等.基于PPS测量的GNSS时差监测评估方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(12):2418-2427.DOI:10.13203/j.whugis20220651

Citation: WANG Yupu, LIU Jingnan, HU Caibo, et al. A GNSS Time Offset Monitoring and Evaluation Method Based on PPS Measurement[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(12): 2418-2427. DOI: 10.13203/j.whugis20220651

基于 PPS 测量的 GNSS 时差监测评估方法

王宇谱^{1,2} 刘经南² 胡彩波¹ 赵鹤¹ 刘峰宇¹ 李锡瑞³ 郭思远¹

¹ 北京卫星导航中心,北京,100094

² 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉,430079

³ 中国科学院上海天文台,上海,200030

摘要: 实时确定并获取不同的全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)时间基准之间的时间偏差,是多系统联合导航、定位与授时的基础。为提高 GNSS 时差监测精度,并改善现有模型中时延修正不完全等问题,提出一种基于标准秒脉冲(pulse per second, PPS)信号测量的 GNSS 时差监测方法,并设计了针对时差序列的评估分析策略。首先,通过高性能设备搭建时差监测硬件平台,对时差监测链路进行精确校准与修正;其次,利用空间信号与地面时频源信号的闭合监测,进一步消除未完全补偿的系统误差;最后,基于相应的数据处理方法开展时差计算,实现实时、高精度的 GNSS 时差监测。此外,构建了同时考虑时差数据的时频特性与精度特性的评估策略,从而更全面地分析时差监测结果的性能。时差监测及其分析结果表明,改进的 PPS 方法得到的北斗时(BeiDou time, BDT)与其他 GNSS 时间基准之间的时差测量不确定度优于 3 ns,其精度较单点定位方法获得的时差平均提升约 4 倍。所提时差评估策略能够顾及时差结果的时频特性、精度特性,实现更为全面系统评估分析,BDT 与其他 GNSS 时间基准保持了较好的一致性。

关键词: GNSS; 时间偏差监测; 秒脉冲; 误差改正; 时差评估

中图分类号: P228

文献标识码: A

收稿日期: 2023-10-04

DOI: 10.13203/j.whugis20220651

文章编号: 1671-8860(2025)12-2418-10

A GNSS Time Offset Monitoring and Evaluation Method Based on PPS Measurement

WANG Yupu^{1,2} LIU Jingnan² HU Caibo¹ ZHAO He¹ LIU Fengyu¹ LI Xirui³ GUO Siyuan¹

¹ Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China

² GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

³ Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

Abstract: Objectives: Real-time knowledge of the system time offsets between different global navigation satellite system (GNSS) time references is a prerequisite for multi-GNSS joint navigation, positioning, and timing. This study aims to improve the accuracy of time offset monitoring and overcome limitations of existing models, such as incomplete delay correction. **Methods:** A monitoring method utilizing a standard one pulse per second (PPS) signal is proposed. The process involves constructing a hardware platform with high-performance equipment and performing precise calibration of the monitoring link. Subsequently, systematic errors such as time delay are optimized through closed-loop monitoring based on ground-based time and frequency signal sources, and the time offset data are processed with a dedicated algorithm. Furthermore, an evaluation strategy integrating both time-frequency and precision characteristics is established. This strategy assesses the time offset results by calculating their accuracy, drift rate, and short-term stability, with the latter quantified by the modified hadamard variance, alongside the uncertainty of the corresponding fitting residuals. **Results:** The monitoring and analysis results demonstrate that the new

基金项目: 国家自然科学基金(42104033)。

第一作者: 王宇谱, 博士, 主要从事 GNSS 时频数据处理理论与方法研究。987834660@qq.com

method achieves a measurement uncertainty of better than 3 ns for the time offsets between other major GNSS system times. Its accuracy is, on average, four times higher than that of the single-point positioning method. The proposed evaluation strategy enables a comprehensive system analysis by considering both the time-frequency and precision characteristics of the results. **Conclusions:** The proposed framework, integrating the modified one PPS calibration, closed-loop monitoring between the received spatial signal and the corresponding ground-based time frequency signal, and a dedicated data processing algorithm, enables real-time, high-precision GNSS time offset monitoring. The accompanying evaluation strategy provides a scientific and effective means for multi-faceted result analysis. The results confirm that BDT maintains good consistency with other GNSS time references.

Key words: GNSS; time offset monitoring; pulse per second; error correction; time offset evaluation

北斗导航卫星系统(BeiDou satellite navigation system, BDS)自投入服务以来,以其优越性能得到了用户的广泛认可^[1-2]。其中,将BDS与其他全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)联合使用的多系统组合导航、定位与授时技术,已被证明能够取得更优性能^[3-4],成为当前研究热点和重要发展方向之一^[5-6]。然而,在多GNSS联合应用中,统一时间基准是必须解决的关键前提与基础,因为不同的卫星导航系统采用各自的时间系统。例如,BDS采用北斗时(BeiDou time, BDT);全球定位系统(global positioning system, GPS)采用GPS时(GPS time, GPST);GLONASS系统的时间系统为GLOT(GLONASS time);Galileo定位系统的时间系统为GST(Galileo system time)^[7]。因此,如何实时确定并获取不同GNSS时间基准之间的系统时间偏差,是基于多GNSS进行联合导航、定位与授时必须解决的问题;而确定各GNSS时间基准之间的相互关系或时差也就是GNSS时间互操作^[8],对多卫星导航系统的兼容互操作与组合导航具有重要的意义。

目前,国内外学者及相关机构在GNSS时差监测方面已取得一系列重要成果^[9-13]。综合分析现有方法,可将其归纳为3类:基于卫星双向传递技术或共视技术进行时间比对的直接比对法^[8,14]、GNSS空间信号法时差监测方法^[11-13,15]和基于高精度秒脉冲(pulse per second, PPS)测量的时差监测方法^[9-10,16]。这些方法各有优劣:第一类方法理论上具有最高的精度,最佳可到1 ns以内,但需在不同GNSS主控站之间建立专用链路,且涉及技术之外的安全协调等因素^[9,17],暂不具备推广使用的条件;第二类方法便于实现、应用最广,但得到的时差结果精度通常在5~10 ns,不同用户间差异较大,解算存在一定时延,且要求用户同时观测较多不同GNSS卫星^[11,14];第三

类方法得到的时差结果精度通常在5 ns左右,普遍优于第二类方法^[16]且方法原理简单易于实现、可实时监测,但也存在系统误差难以完全校准、依赖外部参考信号及较多辅助设备等局限^[9]。进一步分析发现,现有研究仍存在以下不足:一是所获时差监测结果的精度仍有提升空间;二是时差监测多集中于GPS与Galileo、GPS与BDS之间,缺乏对BDS与GPS、GLONASS、Galileo之间时差的全面系统监测与分析;三是尚未建立充分有效的时差监测结果评估体系。为此,本文提出一种基于BDT标准PPS信号测量的GNSS时差监测方法,通过精确校准硬件链路,并结合空间信号与地面时频源信号的闭合监测以优化系统误差,实现了更高精度的实时时差监测;同时,设计了兼顾时频特性与精度特性的评估策略,对时差结果进行了全面系统的分析与评价。

1 理论和算法

1.1 基于标准 PPS 信号的 GNSS 时差监测模型

本文方法主要原理是以地面时频源的高精度10 MHz频率信号为多频GNSS共视接收机提供参考信号。对于一般用户,常用的铷原子钟经过卫星导航系统空间信号同步后,可提供与地面时频源信号保持较好一致性的时频参考^[18]。基于接收机的多GNSS观测数据通过解算伪距和载波相位观测方程复现输出BDS/GPS/GLONASS/Galileo对应时间基准的标准PPS信号,并将其与BDT标准PPS信号进行实时时差比对监测。本文方法具体的操作流程主要包括:

1)GNSS时差监测平台的搭建与硬件设备时延校准改正。采用高性能的Septentrio PolaRX 5TR型多模授时接收机及其配套天线,具体为测距精度厘米量级、码测量精度亚纳秒量级、相位测量精度皮秒量级^[19]、测量精度达到皮秒量级的

SR620时间间隔计数器^[20]、高质量的信号线缆。利用地面BDT时频源和时差监测工作站,搭建如图1所示的GNSS时差监测平台。其中,接收机、计数器、线缆等相关硬件设备均经过了精确的标校,例如,接收机天线的时延标定在微波暗室中完成,时延值为十几纳秒;接收机使用的天线电缆时延通过地面时频系统标准PPS信号通过线缆前后的多次时差测量值精确测定,时延值大约为150 ns。这些时延值在时差监测过程均进行了相应的扣除和改正,接收机的GPS/BDS/Galileo不同频点信号也经过了国家计量科学研究院依据《全球导航卫星系统(GNSS)接收机(时间测量型)校准规范》^[21]进行零基线共钟测量比对钟差结果实现精确标校,其时延绝对值为十几纳秒,相关改正在接收机的配置中进行设置和改正。

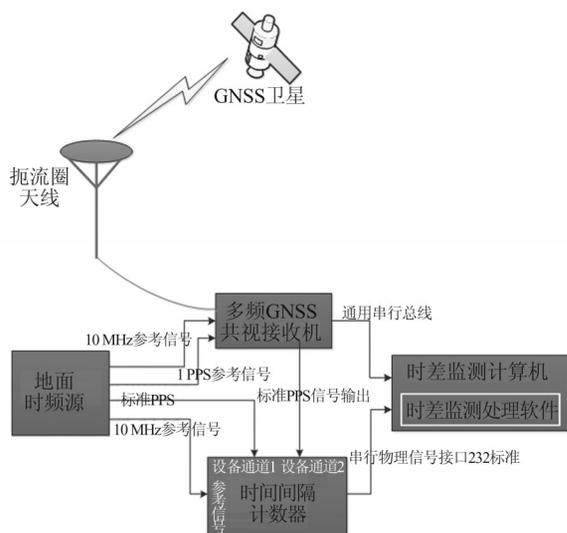


图1 GNSS时差监测平台架构

Fig. 1 Structure of GNSS Time Offset Monitoring Platform

2)空间信号解算及其误差改正。接收机复现输出的不同GNSS时间基准的标准PPS信号是基于双频无线电层组合伪距观测量^[9,22]解算得到的。其中,放置接收机天线的点位精确坐标已知,且精度优于2 cm。基于此可以提高求解方程自由度而降低钟差解算误差;接收机工作过程中开启星基增强系统(satellite-based augmentation system, SBAS)定位模式^[19]并使用载波相位平滑伪距^[23]功能,分别进一步修正卫星星历误差、卫星钟差误差和降低伪距测量噪声;采用Saastamoinen模型^[24]进行对流层误差改正,对接收机设置合理的标记偏移参数来改正天线相位中心偏差,采取扼流圈天线并将其置于空旷楼顶来抑制多径效应;相对论效应等其他误差改正采用相

应的模型进行改正^[24]。

3)通过接收机接收到的空间信号与对应的地面时频源信号的闭环监测,进一步改正残余误差。首先修正接收机复现的标准PPS信号与GNSS系统真实标准PPS信号之间的离散误差,图2为修正该误差的示意图,其中 T_m 表示计数器测得的时差值, D 表示接收机离散误差,其在GNSS系统时间前时为正,可从接收机数据码流中获取), T_r 表示真实的时差量,且 $T_r = T_m - D$ 。然后将接收机解算复现的标准PPS信号与地面时频源信号标准PPS信号进行比对,实现空间信号与对应的地面时频源信号的闭环监测。基于闭环监测中两种标准PPS信号的差值与差异,进一步校准和修正接收机与时差监测链路的时延等系统误差。最后,实时监测BDT与其他GNSS时间基准的时差值。

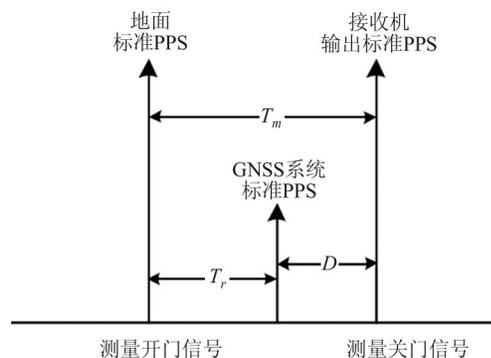


图2 离散误差修正示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of Discrete Error Correction

需要说明的是,在本文中闭环监测是为了相对精确地校准时差监测中存在的系统性偏差。通过闭环监测来修正和优化的系统偏差,在排除不同信号频点延迟差异的基础上能够用于其他GNSS的修正。这是因为对于同一台接收机,不论接收的哪种GNSS信号,都存在共同且未被完全扣除的系统误差,包括设备硬件时延等。在进行闭环监测之后,能够一定程度上消除未扣除干净的系统性误差,这对于精确修正接收机自身的硬件和软件时延都是有益的。

4)时差数据的预处理。一方面是粗差的处理,考虑到本文实时时差监测结果的采样间隔为1 s,因此使用处理效率高的中位数方法^[25]进行粗差探测。该方法的参数取值为5,剔除探测出的不超过数据总量的0.05%粗差数据后进行线性插值,即可得到去除粗差后的连续时差序列。另一方面是数据平滑滤波,虽然在获取时差数据的过程中进行了各种误差改正并且处理了粗差,但

受导航卫星星载原子钟的稳定性、未完全扣除的传播路径误差以及测量过程其他不可避免的噪声和数据跳变等情况影响,还需通过数据的平滑滤波来进一步抑制噪声的影响。考虑到 GNSS 时差数据序列受多种噪声的叠加影响而非白噪声^[8-9],因此使用在原子钟时间数据处理领域较常用的 FIR 滤波^[9,26]进行时差数据的平滑滤波处理。

全文的工作原理和流程如图 3 所示。与 GNSS 时间直接互比方法不同,本文方法所涉及的误差源与影响 GNSS 精密定位的误差源相似。针对这些误差源,已有大量文献对其特性、影响及相应改正方法开展了深入研究,上文所述的数据预处理步骤即主要用于对这些误差进行改正。经上述处理后,最终得到基于本文方法的 GNSS 时差监测结果。

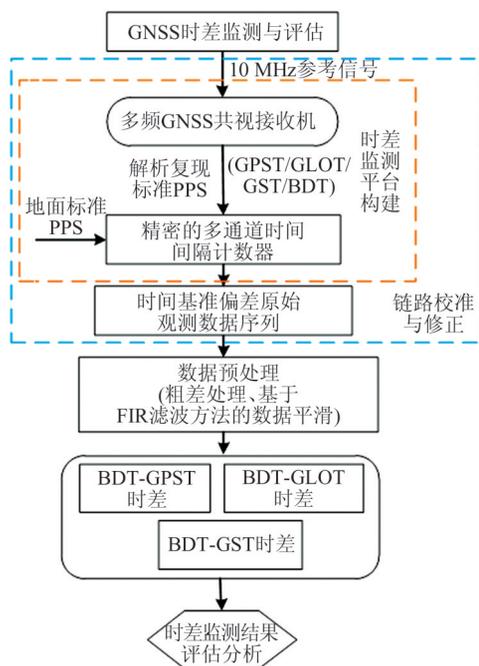


图 3 GNSS 时差监测与评估的原理和工作流程
Fig. 3 Principle and Workflow of GNSS Time Offset Monitoring and Evaluation

1.2 综合多指标的 GNSS 时差结果评估分析策略

为从不同角度对本文方法得到时差结果进行评估,本文通过计算时差数据序列的准确度、漂移率、短期稳定度(采用修正哈达玛方差)以及拟合残差不确定度等指标,来分析时差结果的精度以及不同 GNSS 系统时间基准之间的变化差异等。其中,准确度^[27]的计算式为:

$$E_{Acc} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(t_i - \bar{t})}{\sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2} \quad (1)$$

式中, E_{Acc} 为准确度; t_i 为第 i 个时刻值; x_i 为 t_i 时刻对应的时差值; \bar{t} 、 \bar{x} 分别为 N 个时刻、时差值的平均值。

漂移率^[27]计算式为:

$$\begin{cases} E_{Drift} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} (y_i - \bar{y})(t_i - \bar{t})}{\sum_{i=1}^{N-1} (t_i - \bar{t})^2} \\ y_i = \left| \frac{x_{i+1} - x_i}{\tau_0} \right| \end{cases} \quad (2)$$

式中, E_{Drift} 为漂移率; y_i 为 t_i 时刻时差值对应的频率值; τ_0 为相邻时差数据的时间间隔; \bar{y} 为 $N-1$ 个频率值的平均值。

不确定度指标是对相同时间段内所有的差数据分别进行一次多项式和二次多项式拟合,得到时差数据的拟合残差,然后计算对应拟合残差序列的 A 类不确定度^[27]结果。在提取时差数据序列的趋势项之后,剩余的残差结果更能表征时差结果的波动和受噪声影响情况,并且 GNSS 的导航电文里的时差参数同样是基于一次多项或者二次多项式拟合得到。此外,将本文方法与单点定位方法得到的时差结果进行对比,进一步验证本文方法的有效性。最后,综合时差数据序列的内部分析和外部比对,实现对 GNSS 时差结果较为全面准确的综合评估。本文设计的时差综合评估分析策略如图 4 所示。

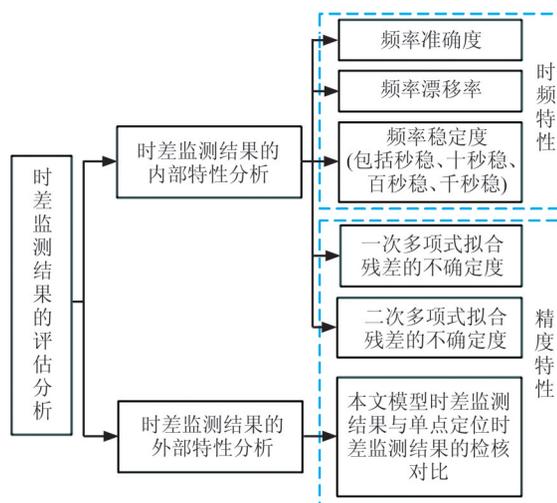


图 4 GNSS 时差结果的评估分析策略流程图
Fig. 4 Process Strategy Diagram for Evaluation and Analysis of GNSS Time Offset Results

2 实验分析

在获取实时时差监测数据的过程中,一方面

基于本文方法得到了BDT与GPST、GST、GLOT之间的时差结果,另一方面是基于接收机的观测数据文件采用误差修正后的单点定位方法^[16]解算对应时间段的时差结果。本文用于时差监测的接收机只有两台,而每台接收机一次只能输出一个系统的标准PPS信号,所以BDT与其他GNSS时间基准的时差值是在不同时间段得到,具体的时差监测时间跨度为2021-04-23—2021-04-29。此外,因为基于本文时差监测平台获取的半年时差数据,虽然基于本时差监测平台获取的半年期时差数据与本文所用时段数据的实验结果及结论具有较好的一致性,但考虑到本文时差监测数据具有1 s采样率的高频特性,并便于图形展示与分析,下文将基于上述7 d的观测数据来验证本文方法的性能与特点。

2.1 本文方法得到的BDT与GPST/GST/GLOT时差结果分析

首先从时差监测结果的内部特性分析本文方法得到的GNSS时差数据。图5~图7分别为

BDT-GPST、BDT-GST、BDT-GLOT的实时监测结果及其预处理结果,图中相位为时差,对应频率是相邻时差值的一次差分结果。

由图5可以看出,BDT与GPST的时差变化范围主要保持在 $-5\sim 5$ ns之间,对应的原始频率序列变化相对稳定、标准差优于1.6 ns;由图6可以看出,BDT与GST的时差的变化范围主要保持在 $-4\sim 4$ ns之间,对应的原始频率序列变化相对稳定、标准差优于1.4 ns。由于接收机的GLONASS系统各频点未能计量校准;由图7可以看出,BDT与GLOT的时间偏差存在未完全扣除的系统误差,两者的时差变化范围主要保持在 $25\sim 40$ ns之间,波动范围变化较大,但其对应的原始频率序列变化却相对稳定、标准差优于1.4 ns。同时考虑BDT与GPST、GST之间的时差变化范围,可以认为GLONASS与其他3个GNSS系统时间基准的一致性要差一些。最后,为了定量对比图5~图7的时差结果,表1给出了相应的统计值。

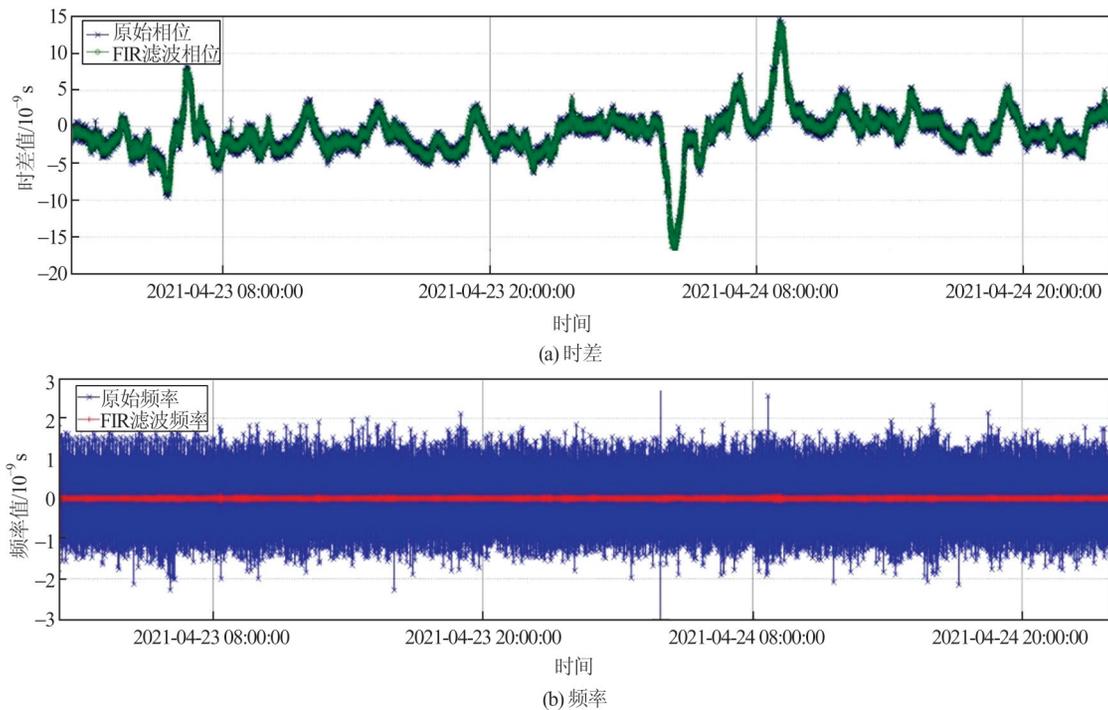


图5 BDT-GPST的时差及其对应频率

Fig. 5 Time Offset of BDT-GPST and Its Corresponding Frequency

由表1可以看出,在频率准确度方面,BDT-GST略优于BDT-GPST,两者差异较小,而BDT-GLOT相对最差,这在一定程度上说明GPST与GST的性能优于GLOT;在漂移率方面,BDT-GLOT明显较差,其数值较BDT-GPST和BDT-GST低一个数量级,既印证了

GPST与GST优于GLOT,也反映出GLOT存在较为明显的频率漂移,后续时差结果的拟合残差将进一步证实这一漂移现象。在稳定度方面,3种时差结果整体相当,其中BDT-GST相对最优,这表明GPST、GST与GLOT的短期稳定性较为接近,而GST的短期稳定度略具优势。综合

各时差结果的时频特性可知, BDT 与 GPST/GST 时差结果在一次及二次多项式拟合残差的不确定度总体保持在 3 ns 以内, 且二者的准确度与稳定度差异较小。这说明 BDT 与其他 GNSS 时间基准之间具有较好的一致性。需要说明的是, 文中 BDT 并非真值, 基于所得数据对 GPST、

GST 和 GLOT 的性能评价未必完全精确, 但通过时差数据计算准确度、稳定度及漂移率等指标, 能够有效反映不同 GNSS 系统时间之间的一致性, 至少在一定程度上可以体现 GST、GPST 与 GLOT 的性能特征。

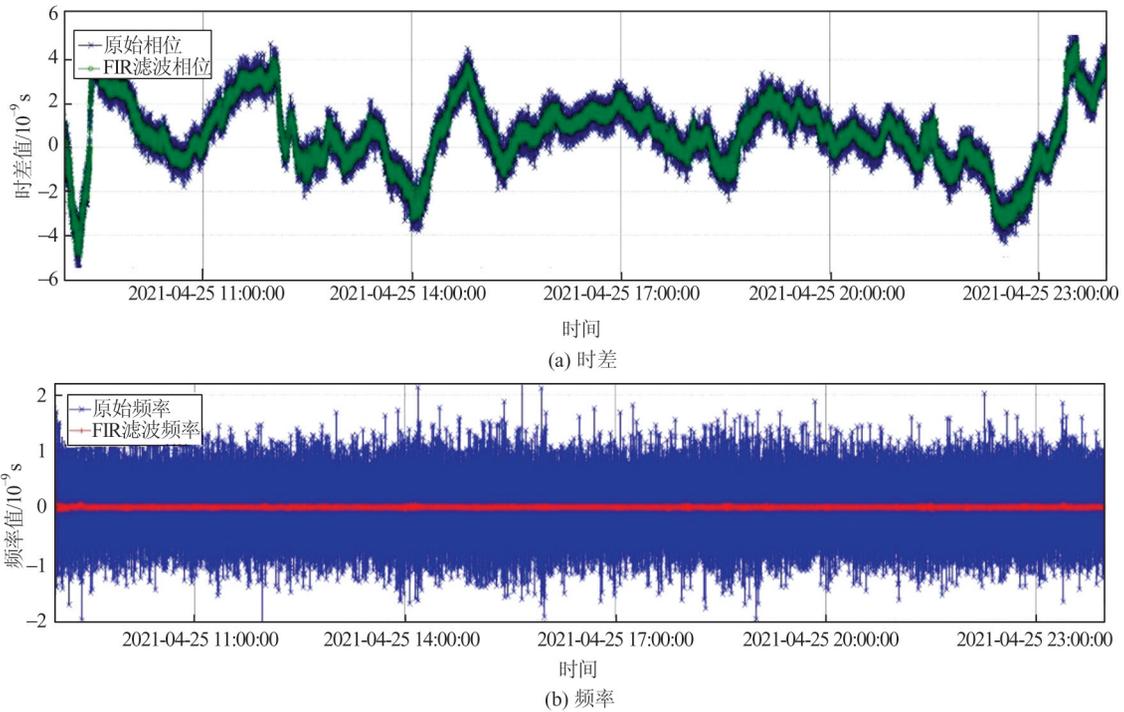


图 6 BDT-GST 的时差及其对应频率

Fig. 6 Time Offset of BDT-GST and Its Corresponding Frequency

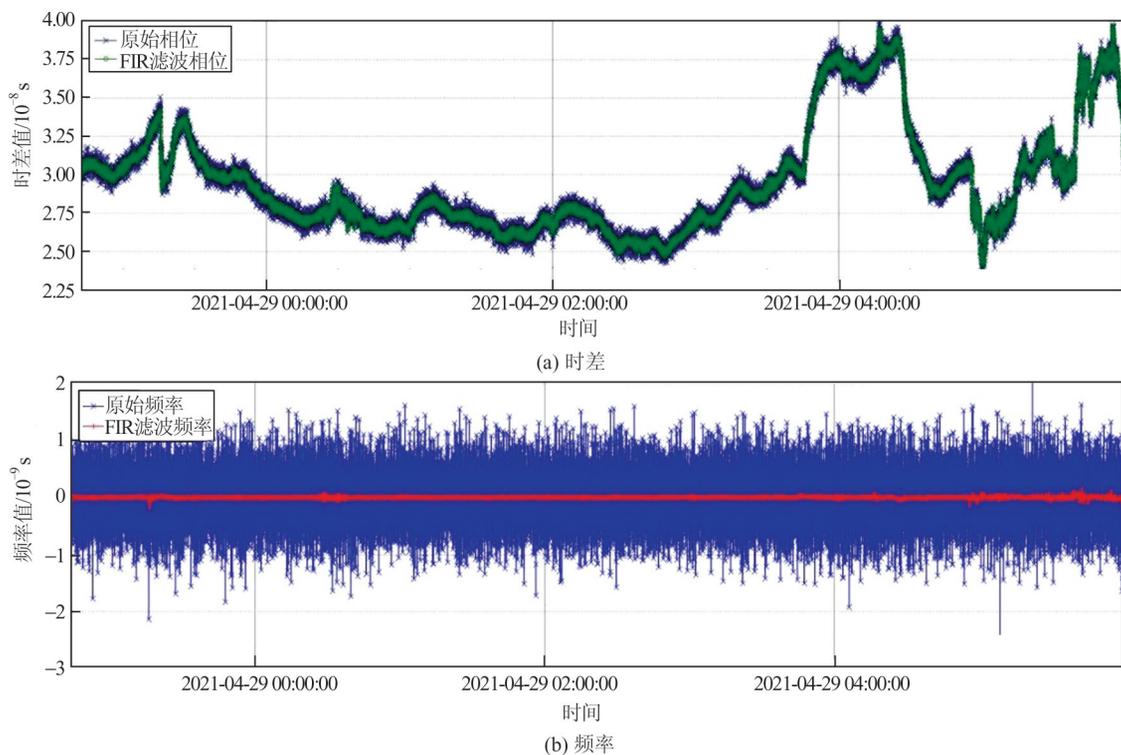


图 7 BDT-GLOT 的时差及其对应频率

Fig. 7 Time Offset of BDT-GLOT and Its Corresponding Frequency

表1 时差监测结果对应的统计值

Table 1 Statistics Corresponding to Time Offset Monitoring Results

时差类型	准确度/ 10^{-11}	漂移率/ 10^{-18}	稳定度			一次多项式	二次多项式	
			秒稳/ 10^{-11}	十秒稳/ 10^{-11}	百秒稳/ 10^{-12}	千秒稳/ 10^{-12}	拟合残差的 不确定度/ns	拟合残差的 不确定度/ns
BDT-GPST	1.04	0.99	6.78	2.27	2.09	1.51	2.85	2.85
BDT-GST	0.99	4.22	6.65	2.22	1.88	0.87	1.53	1.53
BDT-GLOT	1.30	29.20	6.71	2.46	4.59	1.55	3.30	2.84

由表1还可以看出,BDT与其他GNSS系统时间基准偏差的不确定度为 1σ 时,处在1~3 ns之间,具体而言,BDT与GPST的时差不确定度为2.85 ns,BDT与GST的时差不确定度为1.53 ns,BDT与GLOT的时差不确定度为一次残差3.3 ns和二次残差2.84 ns。同时根据不同拟合残差的结果可知,BDT-GPST和BDT-GST主要表现为一次线性模型,BDT-GLOT则受一定二次项影响,这与监测时段内GLOT存在较为明显的漂移有关。

综上所述,本文方法能够获得精度较高的实时时差监测结果,尤其BDT与其他GNSS系统时间基准的时差监测不确定度基本保持在3 ns以内。与文献[9]中现有GNSS时差监测结果相比,无论从时差监测精度还是测量不确定度来看,本文方法均表现更优,整体精度提升显著。这一高精度结果主要得益于以下两方面原因:一是时差监测链路经过了较为精确的校准与误差改正,并基于BDT的闭合监测进一步优化了系统误差及模型处理策略;二是本文所采用的数据处理方法与评估策略能够更准确、合理地对时差数据进行处理与评价。

2.2 本文方法与单点定位方法的时差结果分析

为进一步验证本文方法的有效性及时差监

测结果的精度,将本文方法获得的GNSS时差监测结果与基于预处理后的伪距观测值、通过单点定位观测方程解算得到的GNSS时差结果进行对比分析。在单点定位解算时差过程中,采用精密星历与精密钟差改正卫星轨道和卫星钟误差,使用双频无电离层组合消除电离层延迟,并利用Saastamoinen模型修正对流层误差等^[16]。对比两种方法的原理和策略,其不同点为:(1)本文方法采用载波相位平滑伪距,而单点定位方法仅使用原始伪距;(2)本文采用星基增强系统星历,单点定位方法则使用来自武汉大学分析中心的超快速精密星历;(3)本文通过闭合监测进一步修正残余系统误差,单点定位方法未进行该步骤;(4)本文对时差数据进行了平滑滤波处理,单点定位方法未作类似处理。

设计监测时长为1 h,采样周期为1 s,同时获取BDT-GPST、BDT-GST、BDT-GLOT的时差数据,两种方法的时差对比结果如图8所示。由图8可以看出,不论是时差监测结果的精度还是时差序列的变化范围,本文方法的系统监测解结果均优于单点定位模型的单点定位解结果。

此外,单点定位方法的结果中多次出现不连续跳变,表明受接收机观测噪声及多路径等因素影响,直接基于伪距进行单点定位求解时,多种不

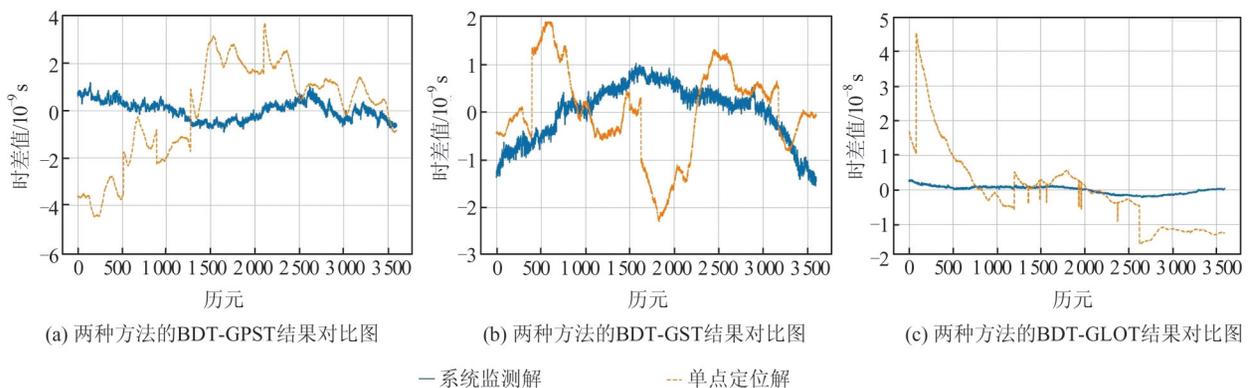


图8 两种方法的BDT-GPST、BDT-GST、BDT-GLOT结果对比图

Fig. 8 Comparison Results of BDT-GPST, BDT-GST and BDT-GLOT Between the Two Methods

稳定因素被吸收至接收机钟差中,导致其解算结果的稳定性与连续性较差。同时,从图 8(a)和图 8(b)可以看出,尽管本文方法的结果也存在类似跳变,但其幅度明显小于单点定位方法,体现了载波相位平滑伪距相较于原始伪距观测量的优势。另外,GLOT 的单点定位时差结果波动明显大于 GPST 和 GST,尤其是通过单点定位求解时,这是由于 GLONASS 采用了频分多址的信号制,不同卫星频率不同,在求解过程中接收机时延难以统一校准或吸收,接收机时延的偏差统体一反应到求解结果上,因此其对应的时差波动较 GPS 和 Galileo 更大。

分别计算两种方法获得 BDT-GPST、BDT-GST、BDT-GLOT 的一次多项式模型拟合残差的 A 类不确定度,结果如表 2 所示。由表 2 可以看出,本文方法监测得到的时差结果精度显著优于单点定位解算结果,平均提升约 4 倍。特别是对于 BDT 与 GLOT 时差结果,本文方法较单点定位方法的精度提高约 7 倍。本文设计的各种误差校准策略提高了求解精度、降低时差结果的不确定度,这一提升主要是载波相位平滑伪距的贡献,进一步验证了本文方法的有效性。

表 2 两种模型时差结果的统计值对比

Table 2 Statistical Comparison of Time Offset Results Respect to Two Models

时差类型	本文方法/ns	单点定位解/ns	精度比
BDT-GPST	0.38	1.55	1:4.08
BDT-GST	0.59	0.93	1:1.58
BDT-GLOT	0.73	6.34	1:8.68
平均值	0.57	2.94	1:5.16

3 结 语

实时获取不同 GNSS 时间基准之间的系统时差是实现多 GNSS 融合导航定位授时的前提和关键。为进一步完善 BDT 与其他 GNSS 时间基准之间的时差监测模型并提高时差监测结果的精度,同时科学有效地评估分析时差监测结果的质量和不同 GNSS 时间基准的性能,本文提出一种基于 BDT 标准 PPS 测量的 GNSS 时差监测方法和时差性能评估策略,其性能分析表明:

1) 由于本文方法对时差监测链路进行合理精确的校准和改正,能够精化模型的系统误差。设计的数据处理方法能够对时差数据进行准确合理的处理,使得本文得到的 BDT 与 GPST/

GST 之间的时差能够保持在 $-5\sim 5$ ns 之间,而 BDT 与 GPST/GST/GLOT 之间时差对应的原始频率序列变化相对稳定、标准差优于 1.6 ns,实现了 GNSS 时差的实时高精度监测。

2) BDT 与 GPST/GST/GLOT 之间时差的测量不确定度优于 3 ns,具体分别为 BDT-GPST 时差不确定度为 2.85 ns, BDT-GST 的时差不确定度为 1.53 ns, BDT-GLOT 时差一次、二次多项式拟合残差的不确定度分别为 3.30 ns、2.84 ns。该结果优于文献[9]中 GNSS 时差监测结果,且相较于常用基于伪距单点定位获得的时差结果,本文方法的 BDT 与 GPST 时差结果的精度最高提高 4 倍左右, BDT 与 GST 时差结果的精度最高提高近 1 倍, BDT 与 GLOT 时差结果的精度最高提高 7 倍左右。

3) 本文所提的时差评估策略能够顾及时差结果的时频特性与精度特性,从而实现对时差监测结果更为全面系统的分析。

参 考 文 献

- [1] YANG Y X, LIU L, LI J L, et al. Featured Services and Performance of BDS-3 [J]. *Science Bulletin*, 2021, 66(20): 2135-2143.
- [2] 李秀龙, 曾仕声, 王学硕, 等. 一种用于北斗实时相位多路径抑制的非模型误差修正估计方法[J]. *测绘地理信息*, 2025, 50(6): 35-41.
LI Xiulong, ZENG Shisheng, WANG Xueshuo, et al. An Unmodeled Error Correction Estimation Method for BeiDou Real-Time Phase Multipath Suppression [J]. *Journal of Geomatics*, 2025, 50(6): 35-41.
- [3] LI X X, GE M R, DAI X L, et al. Accuracy and Reliability of Multi-GNSS Real-Time Precise Positioning: GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo [J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(6): 607-635.
- [4] LI X, LI X X, JIANG Z H, et al. A Unified Model of GNSS Phase/Code Bias Calibration for PPP Ambiguity Resolution with GPS, BDS, Galileo and GLONASS Multi-frequency Observations [J]. *GPS Solutions*, 2022, 26(3): 84.
- [5] 杨元喜, 陆明泉, 韩春好. GNSS 互操作若干问题 [J]. *测绘学报*, 2016, 45(3): 253-259.
YANG Yuanxi, LU Mingquan, HAN Chunhao. Some Notes on Interoperability of GNSS [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(3): 253-259.
- [6] WANG A H, ZHANG Y Z, CHEN J P, et al. Improving the (Re-)Convergence of Multi-GNSS Real-

- Time Precise Point Positioning Through Regional Between-Satellite Single-Differenced Ionospheric Augmentation [J]. *GPS Solutions*, 2022, 26(2): 39.
- [7] 章繁, 柴洪洲, 王敏, 等. 组合GPS/GLONASS三频观测值的非差非组合PPP模糊度快速固定[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(10): 1900-1910.
ZHANG Fan, CHAI Hongzhou, WANG Min, et al. Undifferenced and Uncombined PPP Ambiguity Resolution Combined with GPS/GLONASS Triple-Frequency Observations [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(10): 1900-1910.
- [8] 广伟. GNSS时间互操作关键技术研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院国家授时中心), 2019.
GUANG Wei. Research on Key Technologies of GNSS Time Interoper [D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences (National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences), 2019.
- [9] 张清华, 隋立芬, 贾小林, 等. 利用高精度PPS测量进行GPS-GLONASS时差监测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(11): 1347-1351.
ZHANG Qinghua, SUI Lifen, JIA Xiaolin, et al. Using Precise PPS Measure for Monitoring GNSS Time Offset [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(11): 1347-1351.
- [10] ZHANG H J, LI X H, ZHU L, et al. Research on GNSS System Time Offset Monitoring and Prediction [C]//China Satellite Navigation Conference (CSNC), Berlin, Germany, 2014.
- [11] HUANG G, ZHANG Q, FU W, et al. GPS/GLONASS Time Offset Monitoring Based on Combined Precise Point Positioning (PPP) Approach [J]. *Advances in Space Research*, 2015, 55(12): 2950-2960.
- [12] 章洁君, 陈俊平, 张益泽. GNSS空间信号法时差监测方法与结果分析[J]. 测绘通报, 2017(1): 26-29.
ZHANG Jiejun, CHEN Junping, ZHANG Yize. Research and Results Analysis of Methods of GNSS Spatial Signal Time Monitoring [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2017(1): 26-29.
- [13] DEFRAIGNE P, PINAT E, BERTRAND B. Impact of Galileo-to-GPS-Time-Offset Accuracy on Multi-GNSS Positioning and Timing [J]. *GPS Solutions*, 2021, 25(2): 45.
- [14] WANG S C, LIU Y, WANG M L, et al. Monitoring Assessment and Impact Analysis of BeiDou and GNSS Time Offset [C]//China Satellite Navigation Conference (CSNC 2021), Singapore, USA, 2021.
- [15] SESIA I, SIGNORILE G, THAI T T, et al. GNSS-to-GNSS Time Offsets: Study on the Broadcast of a Common Reference Time [J]. *GPS Solutions*, 2021, 25(2): 61.
- [16] 孙广, 李双钦, 郭美军, 等. 不同GNSS的单站时差监测评估[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(6): 80-85.
SUN Guang, LI Shuangqin, GUO Meijun, et al. Monitoring and Evaluation on the Single Station Time Offset on the GNSS Data of Difference [J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2017, 4(6): 80-85.
- [17] 袁海波, 张继海, 广伟. 不同GNSS时差监测方法研究[C]//第九届中国卫星导航学术年会, 中国, 哈尔滨, 2018.
YUAN Haibo, ZHANG Jihai, GUANG Wei. The Study on Different Methods of Time Offsets Monitoring of GNSS [C]// The 9th China Satellite Navigation Conference S06 Time-Space Datum and Time-Frequency Technology, Harbin, China, 2018.
- [18] 王亚军, 张磊, 谷扬, 等. 基于FPGA的北斗驯服铷原子频标装置的研制[J]. 计量学报, 2020, 41(3): 359-362.
WANG Yajun, ZHANG Lei, GU Yang, et al. Development of BeiDou Taming Rubidium Frequency Standard Device Based on FPGA [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2020, 41(3): 359-362.
- [19] 王誉铮, 周禧田. 司南电高层监测机精度分析[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(22): 7-10.
WANG Yuzheng, ZHOU Xitian. Accuracy Analysis of Sinan Ionospheric Monitoring Machine [J]. *Technology Innovation and Application*, 2023, 13(22): 7-10.
- [20] 张宇, 梁坤, 陈静, 等. 基于SR620时差测量系统的设计[J]. 计量科学与技术, 2021, 65(4): 26-29.
ZHANG Yu, LIANG Kun, CHEN Jing, et al. Design of SR620-Based Time Offset Measurement System [J]. *Metrology Science and Technology*, 2021, 65(4): 26-29.
- [21] JJF 1403-2013, 全球导航卫星系统接收机(时间测量型)校准规范[S]. 北京: 全国时间频率计量技术委员会, 2013.
JJF 1403-2013, Calibration Specification for GNSS Receivers Used in Time Measurement [S]. Beijing: Chinese Technical Committee on Time and Frequency Measurement, 2013.

- [22] 胡倬铭, 袁海军, 何秀凤, 等. MGEX 差分码偏差产品对 BDS-3 伪距单点定位的影响研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(5): 756-764.
HU Zhuoming, YUAN Haijun, HE Xiufeng, et al. Influence of MGEX Differential Code Bias Products on BDS-3 Pseudorange Single Point Positioning [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(5): 756-764.
- [23] 孔思嘉, 刘文祥, 胡旖旎, 等. 基于相位平滑伪距的 GNSS 时差监测评估[J]. 导航定位与授时, 2018, 5(4): 76-82.
KONG Sijia, LIU Wenxiang, HU Yini, et al. Monitoring and Evaluation on GNSS System Time Offset with Phase-Smoothed Pseudorange [J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2018, 5(4): 76-82.
- [24] 章繁, 柴洪洲, 王敏, 等. BDS-3 三频非差非组合 PPP 模糊度快速固定[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(4): 656-665.
ZHANG Fan, CHAI Hongzhou, WANG Min, et al. BDS-3 Triple-Frequency Undifferenced and Uncombined PPP Ambiguity Resolution[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(4): 656-665.
- [25] 王宇谱, 张胜利, 徐金锋, 等. 改进中位数方法的 BDS 卫星钟差数据预处理策略[J]. 测绘科学, 2019, 44(2): 109-115.
WANG Yupu, ZHANG Shengli, XU Jinfeng, et al. Data Preprocessing Strategy for BDS Satellite Clock Bias Data Based on an Improved Median Absolute Deviation Method [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2019, 44(2): 109-115.
- [26] 郭斐, 邱耀东, 王正涛. 基于 FIR 滤波的磁静期电离层-磁层磁场信号分离[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(6): 844-850.
GUO Fei, QIU Yaodong, WANG Zhengtao. Signal Separation of Ionospheric and Magnetospheric Magnetic Field During the Magnetic Quiet Period Based on FIR Filter[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(6): 844-850.
- [27] 王宇谱, 吕志平, 李林阳, 等. GPS BLOCK IIF 星载原子钟长期性能分析[J]. 天文学报, 2017, 58(3): 13-23.
WANG Yupu, LÜ Zhiping, LI Linyang, et al. Analysis of the Long-Term Performance of GPS BLOCK IIF Satellite Atomic Clocks[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2017, 58(3): 13-23.