



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目：一种基于 BDT PPS 测量的 GNSS 时差监测与评估方法
作者：王宇谱, 刘经南, 胡彩波, 赵鹤, 刘峰宇, 李锡瑞, 郭思远
DOI: 10.13203/j.whugis20220651
收稿日期: 2022-10-04
网络首发日期: 2023-06-29
引用格式: 王宇谱, 刘经南, 胡彩波, 赵鹤, 刘峰宇, 李锡瑞, 郭思远. 一种基于 BDT PPS 测量的 GNSS 时差监测与评估方法[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20220651>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20220651

引用格式：

王宇谱, 刘经南, 胡彩波, 等. 一种基于BDT PPS测量的GNSS时差监测与评估方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20220651 (Wang Yupu, Liu Jingnan, Hu Caibo, et al. A GNSS Time Offset Monitoring and Evaluation Method Based on BDT PPS Measurement[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20220651)

一种基于 BDT PPS 测量的 GNSS 时差监测与评估方法

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 GNSS 时间基准之间的时间偏差 (GNSS 时差) 是多 GNSS 联合导航定位授时的前提和基础。为了提高 GNSS 时差监测的精度并改进现有时差监测模型存在时延修正不完全等不足, 本文提出一种基于 BDT 标准秒脉冲 (1 PPS) 信号测量的 GNSS 时差监测方法 (改进的 PPS 方法), 并设计了一种针对时差序列的评估分析策略。首先采用高性能设备构建时差监测硬件平台并进行时差监测链路的精确校准和修正, 然后通过 BDT 的闭合监测进一步优化未完全消除的系统误差, 最后基于相应的数据处理方法进行时差数据处理, 实现了实时高精度的 GNSS 时差监测; 此外, 构建了一种能够同时考虑时差数据的时频特性与精度特性的评估策略, 较为全面地分析了时差监测结果的性能。时差监测及其分析结果表明: 1) 改进的 PPS 方法得到的 BDT 与 GPST/GST/GLOT 之间的时差测量不确定度优于 3 纳秒, 其时差结果的精度比单点定位方法得到的时差结果的精度平均高出 4 倍; 2) 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; 3) 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; 秒脉冲信号; 误差改正; 时差评估

A GNSS Time Offset Monitoring and Evaluation Method Based on BDT 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 To determine and obtain the real-time system time offset between different global navigation satellite system time references (GNSS time offset) in real time is the premise and basis of multi-GNSS joint navigation, positioning and timing. In order to improve the accuracy of GNSS time offset monitoring and overcome the shortcomings of existing time difference monitoring models such as incomplete delay correction, we propose a GNSS time offset monitoring method (called the modified PPS method) based on a standard BeiDou Time (BDT) one pulse per second (1 PPS) signal measurement, and designs an evaluation and analysis strategy for the corresponding time offset data series. **Methods**

收稿日期: 2022-10-04

项目资助: 国家自然科学基金 (42104033)。

作者简介: 王宇谱, 博士, 工程师, 从事 GNSS 时频数据处理理论与方法研究。987834660@qq.com

Firstly, the hardware platform of time offset monitoring is built by assembling several high-performance equipment and the time offset monitoring link is accurately calibrated and corrected. Then, the system errors such as time delay are optimized through the closed monitoring of BDT. Finally, the time offset data is processed based on the designed data processing method. Thus, real-time and high-precision GNSS time offset monitoring is realized. In addition, an evaluation strategy that can consider both time-frequency characteristics and precision characteristics is constructed to comprehensively analyze the time offset monitoring results. Specifically, the accuracy of the time offset results and the variation between different GNSS time systems are analyzed by calculating the accuracy, drift rate, short-term stability (using modified Hadamard variance) of the time offset data series and the uncertainty of the corresponding fitting residual. **Results** The results of time offset monitoring and its corresponding analysis show that the uncertainty of time offset measurement between BDT and GPST/GST/GLOT obtained by the new method is better than 3 nanoseconds, and the accuracy of the new method is 4 times higher than that of the single point positioning method on average. The proposed strategy can consider the time-frequency characteristics and precision characteristics of the time offset results to achieve a more comprehensive system evaluation and analysis. **Conclusions** The modified PPS method can carry out reasonable and accurate calibration and correction of the time offset monitoring link, while the closed monitoring based on BDT can refine the systematic errors of the model and the designed data processing method can process the time offset data more accurately and reasonably. As a result, the method can realize real-time and high precision monitoring of GNSS time offset. Furthermore, the time offset results are evaluated and analyzed scientifically and effectively from different angles based on the proposed strategy. BDT keeps good consistency with other GNSS time references.

Keywords: GNSS; Time Offset Monitoring; Pulses Per Second; Error Correction; Time Offset Evaluation

北斗全球卫星导航系统 (BDS-3) 自开通服务以其优越的性能得到了用户的广泛认可^{[1][2]}。其中, 联合北斗卫星导航系统 (BDS) 与其他 GNSS 的多系统组合导航定位授时已被证明能够取得更好的结果^{[3][4]}, 是当前的研究热点和重要的发展方向之一^{[5][6]}。但是, 在多 GNSS 联合使用中, 统一时间基准是需要解决的一个重要前提和基准, 这是因为不同的卫星导航系统采用各自的时间系统。例如, BDS 的时间系统是 BDT, GPS 的时间系统是 GPST, GLONASS 的时间系统是 GLONASST (简记为 GLOT), Galileo 的时间系统是 GST^[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 (简称为时差) 是基于多 GNSS 联合导航定位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], 其对于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, 国内外学者和有关机构针对 GNSS 时差监测的相关研究已经取得了

一些显著的成果^[9-13], 并且分析已有成果可将常用的时差获取方式归为三类, 即利用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 PPS 测量的时差监测方法^{[9,10][16]}。这些方法各有优缺点: 第一类方法理论上具有最高的精度 (最佳可到 1 ns 以内) 但要求在不同 GNSS 主控站之间建立专用链路并需协调考虑技术之外的安全等多种其他因素^{[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) 在不同用户之间存在较大差异、解算过程存在一定的时延且要求用户观测不同 GNSS 卫星数量较多^{[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, 但难以校准系统误差且需外部参考信号及更多辅助设备^[9]。同时, 分析已有成果可知还存在不足: 一是获取的 GNSS 时差监测结果的精度仍然有限, 还需进一步提

高；二是时差监测主要集中在 GPS 和 Galileo、GPS 和 BDS 方面，缺少较为全面系统的 BDS 分别与 GPS、GLONASS 和 Galileo 之间的监测和分析；三是缺少针对时差监测结果较为充分有效的评估分析体系。基于此，本文提出一种基于 BDT 标准 PPS 信号测量的 GNSS 时差监测方法（称之为改进的 PPS 方法），通过精确校准硬件平台链路并通过 BDT 的闭合监测优化改进模型的系统误差，实现了更高精度的实时 GNSS 时差监测；同时设计能够综合考虑时频特性和精度特性的评估策略对时差结果进行了较为全面充分的分析评估。

1 理论和算法

1.1 一种基于BDT标准PPS信号的GNSS时差监测模型

改进的 PPS 方法主要原理是：以地面时频源的高精度 10MHz 频率信号为多频 GNSS 共视接收机提供参考信号（对于一般用户而言，通过对常用的铷原子钟基于 BDS 信号进行驯服后便可提供与 BDT 时频源具有较好一致性的时频信号^[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 1PPS 信号，并将其与 BDT 标准 1PPS 信号进行实时时差比对监测，具体的工作原理和流程如图 1 所示。与直接进行 GNSS 时互比，改进的 PPS 方法引入的误差源是与影响 GNSS 精密定位的误差源类似。关于这些误差源，已有大量的文献研究了其特性、影响及相应的改正措施，下文的操作流程第二步就主要是针对这些误差的改正。

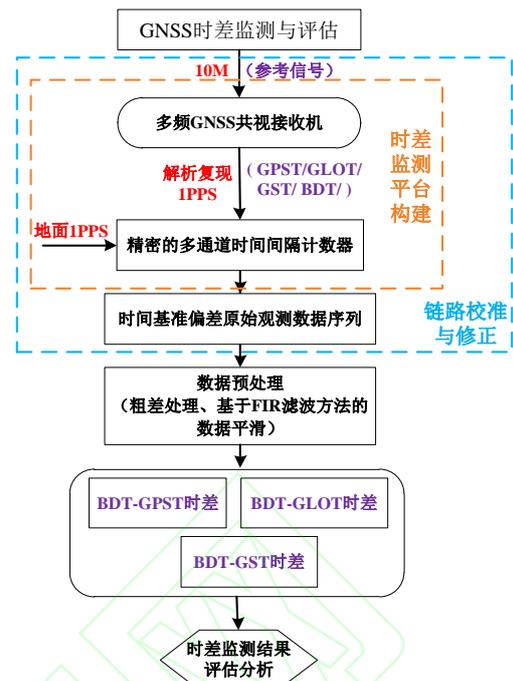


图 1 GNSS 时差监测与评估的原理和 workflow
Fig. 1 The principle and workflow of GNSS time offset monitoring and evaluation

改进的 PPS 方法具体的操作流程主要包括：

第一步，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（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 2 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，时延值大约在十几个纳秒左右；接收机使用的天线电缆时延通过地面时频系统标准 1 PPS 信号通过线缆前后的多次时差测量值精确测定，时延值在 150 ns 左右；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（时延绝对值在十几个纳秒左右），相关改正正在接收机的配置中进行设置和改正。

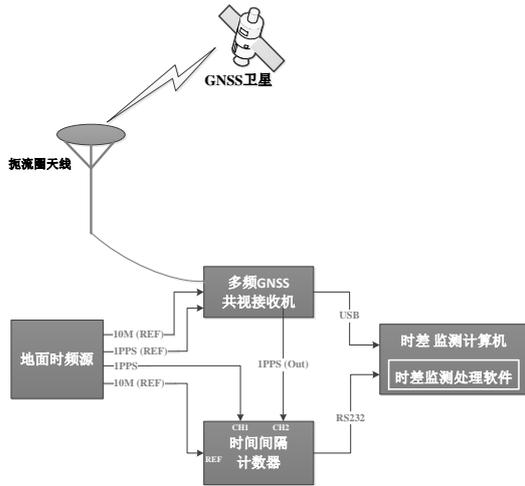


图2 本文所设计的GNSS时差监测平台架构图
Fig. 2 The proposed structure chart of GNSS time offset monitoring platform

第二步，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1PPS信号是基于双频无电离层组合伪距观测测量^[9,13]解算得到的。其中，放置接收机天线的点位精确坐标（精度优于2cm）已知，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SBAS定位模式^[19]并使用载波相位平滑伪距^[22]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^[23]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^[23]。

第三步，通过BDT的闭环监测进一步改正残余误差。首先修正接收机复现的1PPS信号与GNSS系统真实1PPS信号之间的离散误差，图3给出了该误差的修正示意图。图中 T_m 表示计数器测得的时差值， D 表示接收机离散误差（GNSS系统时间在前时为正，可从接收机数据码流中获取）， T_r 表示真实的时差量，则可知 $T_r = T_m - D$ 。然后再将接收机解算复现的BDT 1PPS信号与地面BDT标准1PPS信号进行比对实现BDT的闭环监测，通过对比和分析闭环监测中两种1PPS信号的差值与差异，基于此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。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是能够用于其他GNSS的修正的，这是因为对于同一台接收机，不论接收的哪种GNSS信号，都存在共同的未扣除干净的系统误差，包括设备硬件时延等。在进行BDT的闭环监测之后，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，不论是对于哪种GNSS的修正。

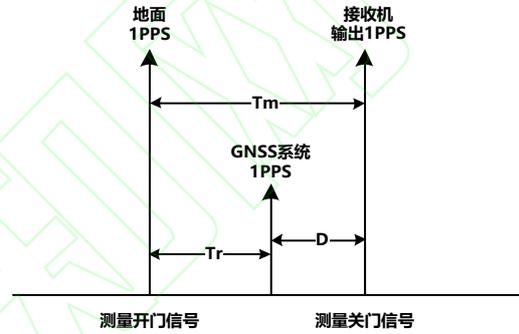


图3 离散误差修正示意图
Fig. 3 The schematic diagram of discrete error correction

第四步，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秒，因此使用处理效率高的MAD方法^[24]进行粗差探测，其中该方法的参数取值为5，剔除探测出的粗差数据（不超过数据总量的0.05%）之后进行线性插值即可得到去除粗差后的连续时差序列。另一方面是数据的平滑滤波，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与未完全扣除的传播路径误差的影响，以及测量过程其他不可避免的噪声和出现的一些数据跳变等情况，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][25]}进行时差数据的平滑滤波处理。

至此，得到基于改进的PPS方法的

GNSS 时差监测结果。

1.2 一种综合多指标的GNSS时差结果评估分析策略

为了从不同角度对改进的 PPS 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, 一方面分析时差结果的精度, 另一方面分析不同 GNSS 系统时间基准之间的变化差异等。其中, 准确度、漂移率^[26]的计算公式分别为:

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

$$\text{其中, } \bar{t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i, \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i;$$

$$Index_{Drift} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} (y_i - \bar{y})(t_i - \bar{t})}{\sum_{i=1}^{N-1} (t_i - \bar{t})^2} \quad (2)$$

$$\text{其中, } y_i = \left| \frac{x_{i+1} - x_i}{\tau_0} \right|, \bar{t} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} t_i,$$

$$\bar{y} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} y_i。$$

式中, x_i 表示 t_i 时刻的时差值 ($i=1, 2, \dots, N$; N 为时差数据的个数), y_i 表示 t_i 时刻时差结果对应的频率值, τ_0 为相邻时差数据的采样间隔。

需要说明的是, 不确定度指标是对于相同时间段所有的时差数据分别同时基于一次多项式和二次多项式进行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^[26]结果, 这是因为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情况和受噪声影响情况, 并且在 GNSS 系统播发的导航电文中的时差参数同样是基于一次多项式或者二次多项式拟合得到; 此外, 将改进的

PPS 方法时差监测结果与单点定位方法得到的时差结果进行对比, 进一步验证改进的 PPS 方法的优效性。最后, 综合时差数据序列的“内部”分析和“外部”对比, 实现对 GNSS 时差结果较为全面准确的综合评估。本文所设计的时差综合评估分析策略如图 4 所示。

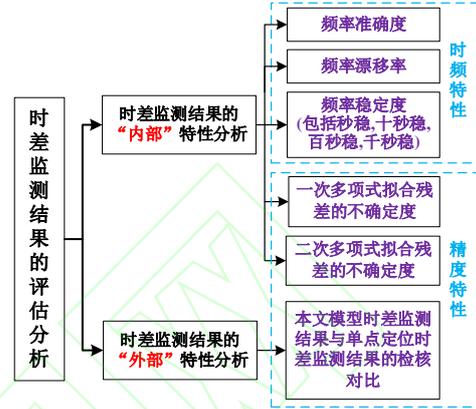


图 4 GNSS 时差结果的评估分析策略流程图
Fig. 4 Process strategy diagram for evaluation and analysis of GNSS time offset results

2 实验分析

在获取实时时差监测数据时, 一方面基于改进的 PPS 方法得到 BDT 与 GPST、GST、GLOT 的时差结果, 另一方面基于接收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。需要说明的是, 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 1PPS 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 到 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与文中所用时间段的数据进行实验和分析所得结果及其结论具较好的有一致性, 考虑本文时差监测数据采样率为 1 秒的高采样率特性和为了便于图形展示, 所以下文的实验及其分析基于上述一周的观测数据验证改进的 PPS 方法特性。

2.1 改进的 PPS 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”特性分析基于改进的 PPS 方法得到的 GNSS 时差数

据。图 5~7 分别给出了 BDT-GPST、BDT-GST、BDT-GLOT 的实时监测结果及其预处理结果，图中的相位即为时差，对应的频率是相邻时差值的一次差分结果。从图中结果可以看出，BDT 与 GPST 的时间偏差变化范围主要保持在 -5~5 纳秒之间，对应的原始频率序列变化相对稳定、标准差优于 1.6；BDT 与 GST 的时间偏差的变化范围主要保持在 -4~4 纳秒之间，对应的原始频率序列变化相对稳定、标准差优于 1.4；由于接收机的 GLONASS 系统各频点未能计量校

准，图 7 中 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 25~40 纳秒之间，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；同时考虑 BDT 与 GPST、GST 之间的时差变化范围，可以认为 GLONASS 时间基准与其他三个 GNSS 系统时间基准的一致性要差一些。最后，为了定量的对比图中时差结果，表 1 给出了对应结果的统计值。

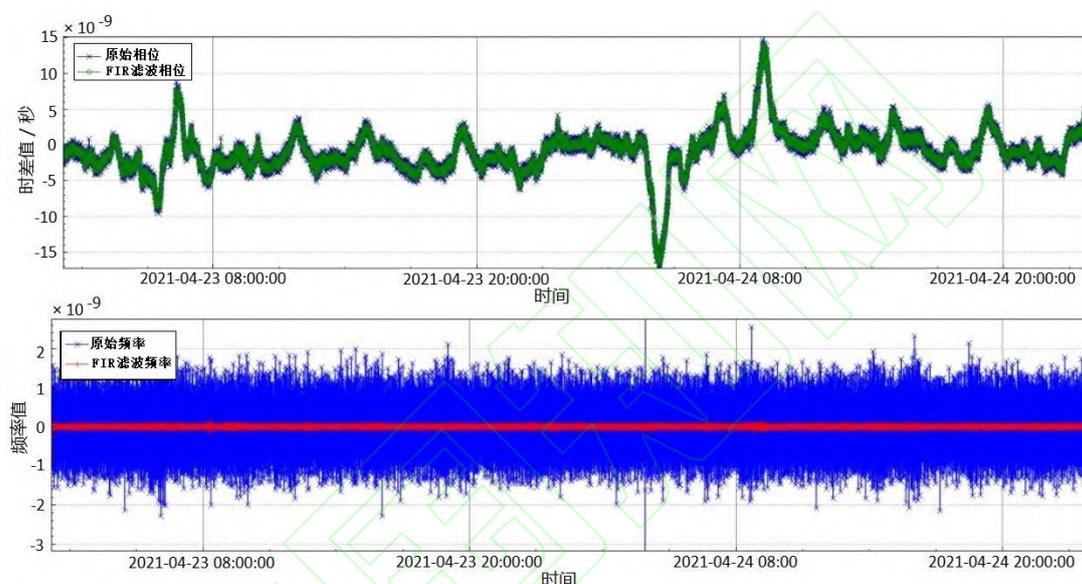


图 5 BDT-GPST 的时差（相位）及其对应频率
Fig. 5 The time offset (phase) of BDT-GPST and its corresponding frequency

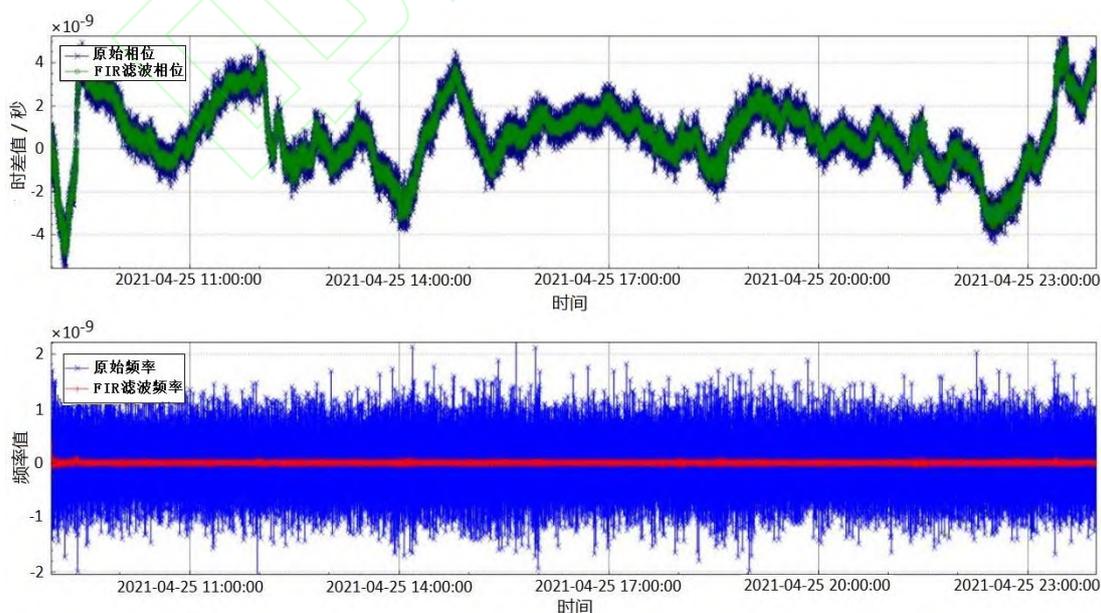


图 6 BDT-GST 的时差（相位）及其对应频率
Fig. 6 The time offset (phase) of BDT-GST and its corresponding frequency

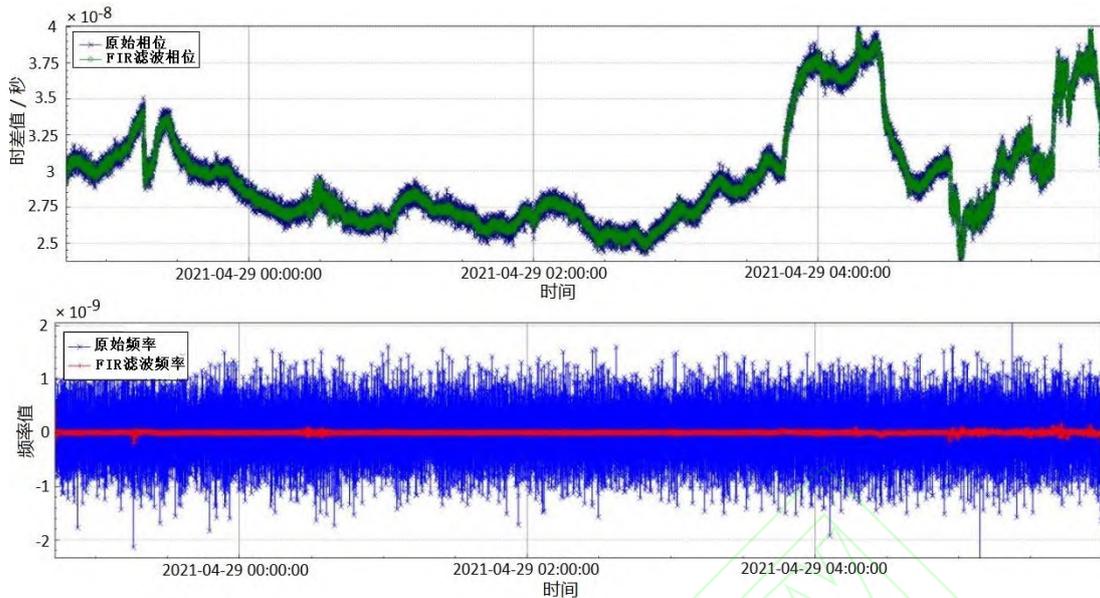


图 7 BDT-GLOT 的时差（相位）及其对应频率
Fig. 7 The time offset (phase) of BDT-GLOT and its corresponding frequency

表 1 时差监测结果对应的统计值
Tab. 1 Statistics corresponding to the time offset monitoring results

评估项	评估结果		
	BDT-GPST	BDT-GST	BDT-GLOT
准确度	1.04×10^{-11}	9.91×10^{-12}	1.30×10^{-11}
漂移率	9.89×10^{-19}	4.22×10^{-18}	2.92×10^{-17}
稳定度	秒稳	6.78×10^{-11}	6.65×10^{-11}
	十秒稳	2.27×10^{-11}	2.22×10^{-11}
	百秒稳	2.09×10^{-12}	1.88×10^{-12}
	千秒稳	1.51×10^{-12}	8.68×10^{-13}
一次多项式拟合残差的不确定度 (ns)	2.85	1.53	3.30
二次多项式拟合残差的不确定度 (ns)	2.85	1.53	2.84

从表1中结果可以看出：频率准确度方面，BDT-GST优于BDT-GPST但两者差异较小，BDT-GLOT相对最差，一定程度上说明GPST和GST优于GLOT；漂移率方面，BDT-GLOT相对最差，比其他两个时差监测的结果低了一个数量级，这既说明了GPST和GST优于GLOT，还说明了GLOT存在较为显著的频率漂移，后面时差结果的拟合残差能进一步验证漂移的存在。稳定度方面，三种时差结果基本相当，BDT-GST相对最好，一定程度上说明GPST、GST、GLOT的短期稳定性基本相当，而GST的短期稳定度相对最好。综合不同时差结果的时频特性结果可知，BDT与其他GNSS时间基准保持了较好的一致性。虽然文中的BDT并不是绝对的无

误差的真值，并且利用得到的数据评价GST、GPST和GLOT的性能并不一定完全准确，但基于时差数据通过计算相应的准确度、稳定度和漂移率指标却是能够表征不同GNSS系统时间之间的一致性，也是能够一定程度上反映GST、GPST和GLOT的性能，至少在时差结果的表现上是这样的，即使这些评价结果不具有实际意义。

此外，根据表1结果还可知：BDT与其他GNSS系统时间基准偏差的不确定度(1σ)处在1~3纳秒之间，具体而言，BDT与GPST的时差不确定度为2.85纳秒，BDT与GST的时差不确定度为1.53纳秒，BDT与GLOT的时差不确定度为3.3纳秒（一次残差）和2.84纳秒（二次残差）；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则受一定二次项的影响, 这与监测时段内GLOT存在较为明显的漂移有关。

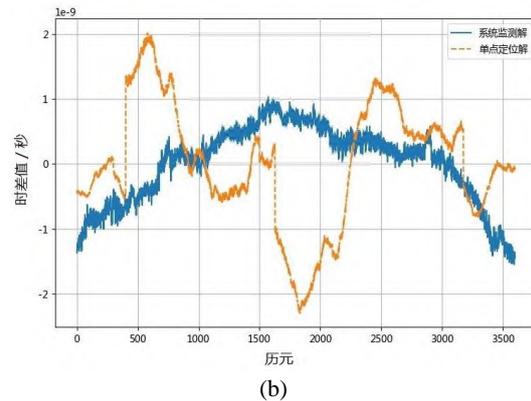
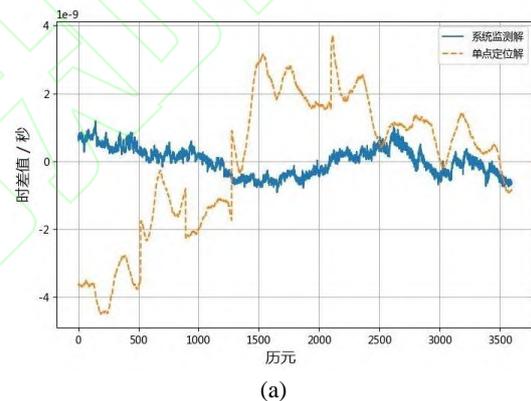
同时综合时差监测数据的图表结果可知, 基于改进的PPS方法能够得到相对较高精度的实时时差监测结果, 特别是BDT与其他GNSS系统时间基准的时差监测不确定度基本能够保持在3纳秒以内; 与引言中涉及的现有GNSS时差监测结果进行对比, 不论是时差监测结果的精度还是测量的不确定, 改进的PPS方法均相对较好且总体精度改善显著。改进的PPS方法能够得到高精度的时差监测结果的主要原因一方面时差监测链路经过了相对精确的校准和误差改正并且基于BDT的闭环监测进一步优化了系统误差和模型处理策略, 另一方面本文所提数据处理方法和评估策略能够更加准确合理的进行时差数据的处理和评估。

2.2 改进的PPS方法的时差结果与单点定位方法的时差结果对比分析

为了进一步验证改进的 PPS 方法效果及其时差监测结果的精度, 将其得到的 GNSS 时差监测结果与基于预处理后的伪距观测值组成观测方程进行单点定位得到的 GNSS 时差结果进行对比分析。其中, 在基于单点定位解算时差中, 采用精密星历和精密钟差对卫星轨道误差和卫星钟差进行改正, 采用双频无电离层组合消除电离层误差, 采用 Saastamoinen 模型改正对流层误差等^[16]。对比两种方法的原理和策略, 其不同点在于: 一是改进方法采用相位平滑伪距, 单点定位方法仅采用伪距; 二是改进方法采用 SBAS 星历, 单点定位方法采用精密星历 (来自于 IGS 武汉大学分析中心的超快速星历); 三是改进方法通过 BDT 的闭环监测进一步改正残余误差, 而单点定位方法没有; 四是改进方法对时差数据进行了平滑滤波处理, 而单点定位方法没有。

设计监测时长为 1 小时, 采样周期为 1 秒, 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。从图中结果可以看出, 不论是时差监测结果的精度还是时差序列

的变化范围, 改进的 PPS 方法结果 (系统监测解) 均优于单点定位模型的结果 (单点定位解)。此外, 从图中还可以发现, 单点定位方法的结果中, 多次出现不连续的跳变情况, 说明受接收机观测量稳定性的影响, 直接伪距单点定位求解时, 多种不稳定因素均被吸收到接收机钟差里面, 导致单点定位解稳定性和连续性都比较差。同时, 从图 8 (a) 和(b)可以看到, 改进方法的结果也存在类似的跳变, 只是没有单点定位方法变化没那么显著, 这也正是载波相位平滑伪距观测量较纯伪距观测量的优势体现。此外, 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体制, 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。



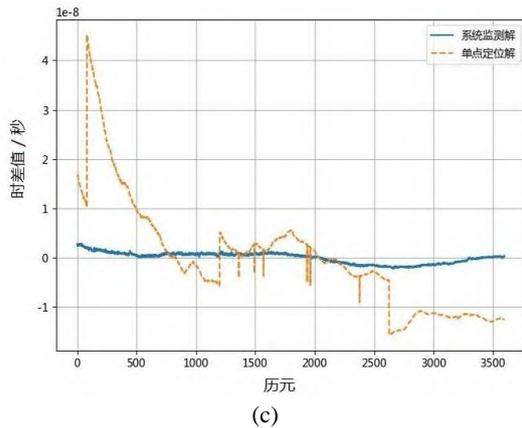


图 8 (a)、(b)、(c)分别为两种方法的 BDT-GPST、BDT-GST、BDT-GLOT 结果对比图

Fig. 8 Comparison results of BDT-GPST, BDT-GST and BDT-GLOT between the two methods corresponding to (a), (b) and (c)

最后，分别计算两种方法获得 BDT-GPST、BDT-GST、BDT-GLOT 的一次

表 2 两种模型时差结果的统计值对比表

Tab. 2 Statistical comparison table of time offset results respect to two models

时差类型	改进的 PPS 方法解(ns)	单点定位解 (ns)	两种模型的精度比
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 结论

实时获取不同 GNSS 时间基准之间的系统时间偏差是实现多 GNSS 融合导航定位授时的前提和关键。为了进一步完善 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，同时为了科学有效的评估分析时差监测结果的质量和不同 GNSS 时间基准的性能，本文提出一种基于北斗时标准秒脉冲信号测量的 GNSS 时差监测方法和时差性能评估策略。GNSS 时差监测结果及其性能分析表明：

(1) 由于改进的 PPS 方法能够对时差监测链路进行合理精确的校准和改正，同时基于 BDT 的闭合监测能够精化模型的系统误差并且所设计的数据处理方法能够对时差数据进行更加准确合理的处理，使得本文得到的 BDT 与 GPST/GST 之间的时差能够保持在 -5~5 纳秒之间，而 BDT 与 GPST/GST/GLOT 之间的时差所对应的原始频率序列变化相对稳定、标准差优于 1.6，实现了 GNSS 时差的实时高精度监测。

多项式模型拟合残差的 A 类不确定度，结果如表 2 所示。从表 2 中的结果可知，改进的 PPS 方法监测得到的时差结果明显优于通过单点定位解算得到的时差结果，平均精度高出 5 倍以上；特别是对于 BDT 与 GLOT 时差结果，改进的 PPS 方法较单点定位方法的精度提高了 8.68 倍；并且本文设计的各种误差校准策略提高了求解精度并降低了时差结果的不确定度，进一步验证了改进的 PPS 方法的优越性。其中，对于本文试验结果所体现出的改进方法提升显著主要是载波相位平滑伪距的贡献。

(2) BDT 与 GPST/GST/GLOT 之间时差的测量不确定度优于 3 纳秒，具体分别为 BDT 与 GPST 的时差不确定度为 2.85 纳秒，BDT 与 GST 的时差不确定度为 1.53 纳秒，BDT 与 GLOT 的时差不确定度为 3.3 纳秒（一次残差）和 2.84 纳秒（二次残差）；该结果优于现有公开报道的 GNSS 时差监测结果，并且相较于常用基于伪距单点定位获得的时差结果，改进的 PPS 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 9 倍左右。

(3) BDT 与其他 GNSS 时间基准具有较好的一致性；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，从而实现了对于时差监测结果更为全面系统的分析。

参考文献 (References)

- [1] Yang Y, Liu L, Li J, et al. Featured services and performance of BDS-3[J]. Science Bulletin, 2021, 66(20): 2135-2143

- [2] Cai Hongliang, Meng Yinan, Geng Changjiang, etc. BDS-3 performance assessment:PNT, SBAS, PPP, SMC and SAR[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(4): 427-435 (蔡洪亮,孟轶男,耿长江等.北斗三号全球导航卫星系统服务性能评估:定位导航授时、星基增强、精密单点定位、短报文通信与国际搜救[J]. *测绘学报*, 2021, 50(4): 427-435)
- [3] Li X, Ge M, Dai X, 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., Jiang, Z. 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] Yang Yuanxi, Lu Mingquan, Han Chunhao. Some notes on interoperability of GNSS[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(3): 253-259 (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)
- [6] Wang A, Zhang Y, Chen J, 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): 1-16
- [7] Jiao Wenhai, Zhang Huijun, Zhu Lin, etc. Assessment method and analysis of broadcast coordinated universal time offset error[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, 49(7): 805-815 (焦文海,张慧君,朱琳等.GNSS 广播协调世界时偏差误差评估方法与分析[J].*测绘学报*,2020, 49(7): 805-815)
- [8] Guang Wei. Research on key technologies of GNSS time interoperability[D]Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences(National Time Service Center), 2019 (广伟.GNSS 时间互操作关键技术研究[D].西安:中国科学院大学(国家授时中心),2019)
- [9] Zhang Qinghua, Sui Lifeng, Jia Xiaolin, etc. Using precise PPS measure for monitoring GNSS time offset[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(11): 1347-1351 (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)
- [10] Zhang H, Li X, Zhu L, et al. Research on GNSS system time offset monitoring and prediction[C]//China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2014 Proceedings: Volume I. Springer, Berlin, Heidelberg, 2014: 427-438
- [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] Zhang Jiejun, Chen Junping, Zhang Yize. Research and results analysis of methods of GNSS spatial signal time monitoring[J].*测绘通报*,2017(1): 26-29 (章洁君,陈俊平,张益泽.GNSS 空间信号时差监测方法与结果分析[J].*测绘通报*,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): 1-15
- [14] Wang S, Liu Y, Wang M, et al. Monitoring Assessment and Impact Analysis of BeiDou and GNSS Time Offset[C]//China Satellite Navigation Conference (CSNC 2021) Proceedings. Springer, Singapore, 2021: 142-157
- [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): 1-15
- [16] Sun Guang, Li Shuangqin, Guo Meijun, etc. 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 (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)
- [17] Yuan Haibo, Zhang Jihai,Guang Wei. The study

- on different methods of time offsets monitoring of GNSS[C]. Proceedings of the 9th China Satellite Navigation Conference-- S06 Time-space datum and time-frequency technology, Harbin, 2018 (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论文集——S06 时空基准与时频技术, 哈尔滨, 2018)
- [18] Wang Yajun, Zhang Lei, Gu Yang, et al. Development of BeiDou Timing Rubidium Frequency Standard Device Based on FPGA[J]. Acta Metrologica Sinica, 2020, 41(3): 359-362 (王亚军,张磊,谷扬,黄艳,康婷婷.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(03):359-362)
- [19] <https://www.septentrio.com/en/products/gnss-receivers/reference-receivers/polarx-5tr>.
- [20] <https://www.thinksrs.com/products/sr620.html>.
- [21] JJF 1403-2013, Calibration specification for GNSS receivers used in time measurement [S]. Chinese Technical Committee on Time and Frequency Measurement, 2013 (JJF 1403-2013, 全球导航卫星系统(GNSS)接收机(时间测量型)校准规范[S].全国时间频率计量技术委员会, 2013)
- [22] Kong Sijia, Liu Wenxiang, Hu Yini, ect. Monitoring and evaluation on GNSS system time offset with phase-smoothed pseudorange[J]. Navigation Positioning and Timing, 2018, 5(4): 76-82 (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)
- [23] Zhang Xue. Research on the accuracy improvement and assessment of GNSS system time offset monitoring [D]Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences(National Time Service Center), 2014 (张雪.GNSS 系统时间偏差监测精度改善及评估[D].西安:中国科学院大学(国家授时中心),2014)
- [24] 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+127 (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+127)
- [25] 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 (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.)
- [26] 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):11-21 (王宇谱,吕志平,李林阳等. GPS BLOCKIIF 星载原子钟长期性能分析[J].天文学报, 2017,58(3):11-21)

网络首发:

标题: 一种基于BDT PPS测量的GNSS时差监测与评估方法

作者: 王宇谱, 刘经南, 胡彩波, 赵鹤, 刘峰宇, 李锡瑞, 郭思远

DOI: 10.13203/j.whugis20220651

收稿日期: 2023-06-04

引用格式:

王宇谱, 刘经南, 胡彩波, 等. 一种基于BDT PPS测量的GNSS时差监测与评估方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20220651 (Wang Yupu, Liu Jingnan, Hu

Caibo, et al. A GNSS Time Offset Monitoring and Evaluation Method Based on BDT PPS Measurement[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20220651)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别，请以正式出版文件为准！

您感兴趣的其他相关论文：

四大GNSS广播星历精度评估与对比分析

张熙, 刘长建, 章繁, 吴庆, 胡小华

武汉大学学报（信息科学版），2022, 47(2): 208-218

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20190473>

