

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508591

北斗时频传递接收机内延迟校准方法的实验研究*

李雨峰¹ 梁坤^{1,2} 余油^{1,3} 陈俞任¹ 巴晓辉^{1,2}(1. 北京交通大学自动化与智能学院 北京 100044; 2. 先进轨道交通自主运行全国重点实验室 北京 100044;
3. 华为技术有限公司武汉研究所 武汉 430200)

摘要: 全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)时频传递接收机广泛应用于诸多重要领域的时间同步系统及节点中,其内延迟的精密校准是实现高精度时频传递的重要保证。针对纳秒量级的时频传递需求,开展北斗时频传递接收机绝对与差分校准方法的实验研究。首先,比较分析分步、整体绝对校准和差分校准方法原理及差异性,基于GNSS暗室环境和共钟差场景分别设计实施方案。实验中依托由时频信号分配及模拟、暗室环境、精密测量、被校系统等搭建的校准比对系统和智能化校准验证软件,开展不同类型北斗时频传递接收机在B1I、B1C、B2a、B3I及L1 C/A频点内延迟的校准比对实验,评估测量不确定度并分析各校准方法。实验结果表明,分步、整体和差分校准方法的测量不确定度分别优于0.71、0.98和1.27 ns,各频点内延迟校准值吻合在3种校准方法的不确定度范围内,验证了校准比对实验的有效性及其整体绝对校准方法的优越性,形成亚纳秒不确定度水平的时频信号校准能力。

关键词: GNSS时频传递;绝对校准;差分校准;不确定度

中图分类号: TN965.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 535.1030

Experimental study on internal delay calibration methods of Beidou time-frequency transfer receiver

Li Yufeng¹ Liang Kun^{1,2} Yu Tian^{1,3} Chen Yuren¹ Ba Xiaohui^{1,2}

(1. School of Automation and Intelligence, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Rail Autonomous Operation, Beijing 100044, China; 3. Wuhan Research Institute of Huawei Technology Co., Ltd., Wuhan 430200, China)

Abstract: The GNSS time-frequency transfer receiver is widely used in time synchronization systems and nodes across various critical fields, where precise calibration of internal delay is essential for achieving high-accuracy time-frequency transfer. To address nanosecond-level time-frequency transfer requirements, experimental research is conducted on absolute and differential calibration methods for BeiDou time-frequency transfer receivers. First, the principles and differences of step-by-step, integrity absolute, and differential calibration methods are compared and analyzed. Based on GNSS anechoic chamber and common-clock-difference scenery, implementation plans are designed accordingly. Calibration comparison experiments are conducted for different types of BeiDou time-frequency transfer receivers at B1I, B1C, B2a, B3I, and L1 C/A to evaluate measurement uncertainty and analyze various calibration methods. The experimental results demonstrated that the measurement uncertainties of the step-by-step, integrity, and differential calibration methods are better than 0.71, 0.98 and 1.27 ns, respectively. The delay calibration values within each frequency point are consistent within the uncertainty ranges of the three calibration methods, verifying the effectiveness of the calibration comparison experiment and the superiority of the integrity absolute calibration method, forming a time-frequency signal calibration capability with sub-nanosecond uncertainty levels.

Keywords: GNSS time-frequency transfer; absolute calibration; differential calibration; uncertainty

收稿日期: 2025-07-22 Received Date: 2025-07-22

* 基金项目: 国家自然科学基金(12473072)、烟台市重大科技创新工程项目(2024ZDCX002)、泰山产业领军人才(tsex202408155)资助

0 引言

精准时频量值传递是时频领域最基础的工作之一,它是全球导航卫星系统时间(global navigation satellite system time, GNSST)和协调世界时(coordinated universal time, UTC)长期监测的关键环节^[1-2]。GNSS时频传递方法因具备应用成本低、覆盖范围广及较高的传递和同步精度等特点,已成为国际上远程时频传递和溯源最主要的手段^[3-4],在金融、电信、电力、铁路与航天等领域得到广泛应用^[5]。金融系统中,一些重要股票交易中心配备了美国国家标准技术研究所(national institute of standards and technology, NIST)研制的主备两台共视驯服时钟,可复现与UTC(NIST)偏差保持在 ± 10 ns以内的精准时间^[6]。GNSS时频传递接收机与导航定位接收机均具有接收GNSS信号、提取导航电文和伪距、载波相位测量、处理导航电文和计算定位结果等功能,主要区别在于前者将多台GNSS时频传递接收机分别同步至本地参考时间频率标准,通过解算接收机同时段伪距、载波相位观测数据来得到多站参考时间频率标准与GNSS系统时间之差,其间单差为多站参考时间频率标准的比对结果,即时间频率传递结果。

GNSS时频传递接收机通常由GNSS接收天线、接收机主机和天线馈线线缆3部分组成。当GNSS真实信号经过GNSS时频传递接收机时,由其本身所引起的信号时间延迟统称为GNSS时频传递接收机内延迟,其精密校准是实现GNSS时频传递的必要前提。国内现行的接收机计量技术规范多见于导航定位、微弱信号测量和电磁测量接收机校准。JJG 1200-2023和JJF 1942-2021规范了导航定位接收机静态、动态定位误差及速度、加速度误差等校准项目;JJF 1173-2018和JJF 1146-2006分别规范了微弱信号测量接收机的调频、调相和电磁测量接收机的抗扰性、脉冲响应、6 dB带宽等校准项目。针对GNSS时频传递接收机,只有JJF 1403-2013规范了差分校准场景中内延迟的校准。

目前内延迟存在3种精密校准方法:基于GNSS真实信号的差分校准、基于GNSS模拟器信号的分步绝对校准和整体绝对校准。差分校准方法由Petit等^[7]于2000年提出,国际计量局(international bureau of weights and measures, BIPM)将其规范化,并提出“BIPM校准体系”,用于差分校准全球范围内生成UTC的GNSS时频传递接收机内延迟。中国计量科学研究院(national institute of metrology, NIM)与德国物理技术研究院(physikalisch technische bundesanstalt, PTB)合作差分校准NIM-PTB亚欧时频传递链路,内延迟测量不确定度约为2 ns^[8-9]。分步绝对校准方法由法国空间研究中心

(national centre for space studies, CNES)于2005年提出^[10]。CNES引入GNSS模拟器代替矢量网络分析仪标定GNSS接收天线延迟^[11],后续不断完善各不确定度来源与评估,内延迟测量不确定度可达1 ns^[12]。欧空局(european space agency, ESA)加入对GNSS模拟器通道偏差、接收机主机参数及热灵敏度系统的探讨,内延迟测量不确定度0.73~1.47 ns^[13]。印度空间研究组织在印度星座导航系统(navigation with Indian constellation, NAVIC)部分频点上发现并验证了多普勒碰撞现象在校准中对接收机测量的影响^[14]。Uhrich等^[15]在分步绝对校准方法中基于GNSS模拟器和软件定义无线电(software-defined radio, SDR)接收机来测量GNSS模拟器秒脉冲输入信号与GNSS模拟信号伪码翻转点间延迟,提高GNSS模拟器测量不确定度水平。上述差分及分步校准工作中均存在一定的内延迟测量不确定度数值及区间偏大,前者主要来源于差分中无法完全消除的GNSS真实信号误差项及分步中接收机3部分单独校准的不确定度来源,后者主要来源于未精确构建的不确定度模型。2019年,ESA与CNES在对同一接收机的验证实验中甚至出现部分频点的校准值偏差超出内延迟测量不确定度区间^[16]。整体绝对校准方法由北京交通大学时间实验室梁坤等^[17]于2023年提出,针对北斗时频传递接收机TL07 B11及L1 C/A频点开展整体与分步绝对校准验证实验与不确定度评估分析,其中整体绝对校准方法B11及L1 C/A频点内延迟测量不确定度为0.80 ns,优于分步绝对校准1.00 ns。

在此基础上,本文针对绝对与差分校准方法优越性开展实验研究,相应设计校准比对系统,并基于多类型北斗时频传递接收机B11、B1C、B2a、B3I和L1 C/A频点开展校准比对实验。依据3种校准方法下各频点内延迟校准值的吻合情况及测量不确定度水平分别验证校准比对实验的有效性及校准方法的优越性。

1 校准方法比对及分析

GNSS时频传递接收机内延迟构成如图1所示。GNSS时频传递接收机内延迟包含GNSS接收天线延迟 t_a 、天线馈线线缆延迟 t_c 、短连接线线缆延迟 t_d 、接收机主机延迟 t_r 、接收机内参考延迟 t_o (接收机内部时基信号同步至秒脉冲输出(pulse per second, PPS)时,其与外部时基参考PPS in间产生的延迟)以及外参考延迟 t_p (外部时基参考输入PPS in到外部参考时标归算零点产生的延迟,通常为同轴连接线延迟值)。上述可合并为3项,分别为硬件延迟 $t_{hardware}$ 、线缆延迟 t_{cable} 和参考延迟 t_{ref} ,如式(1)~(3)所示。

$$t_{hardware} = t_a + t_r \quad (1)$$

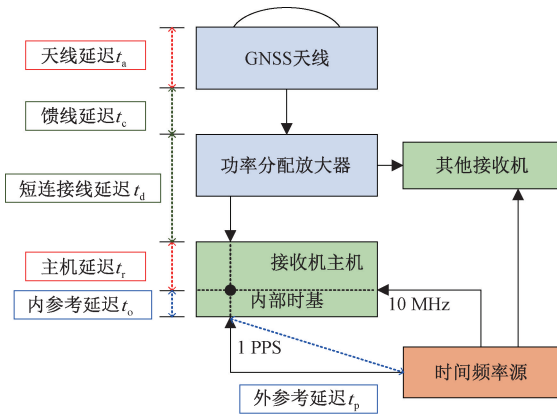


图 1 GNSS 时频传递接收机内延迟构成

Fig. 1 Hardware delay composition of GNSS time-frequency transfer receiver

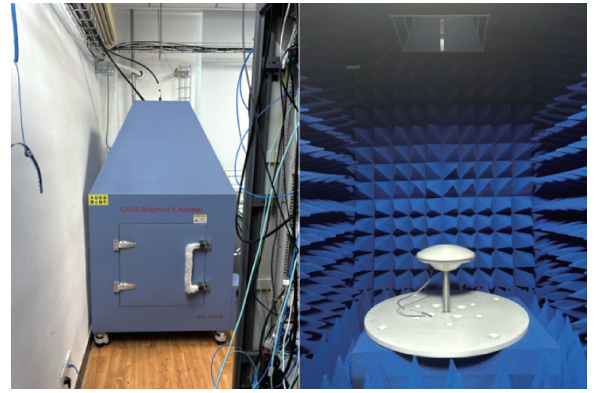


图 2 GNSS 微波暗室

Fig. 2 Microwave anechoic chamber

$$t_{cable} = t_c + t_d \quad (2)$$

$$t_{ref} = t_0 + t_p \quad (3)$$

经过各项延迟的精密校准与补偿,通过式(4)得出精确的卫星钟差,形成 GNSS 精密时频传递基础。

$$\overline{P}_{f_i} = P_{f_i} - c(t_{hardware}(f_i) + t_{cable} - t_{ref}) \quad (4)$$

式中: f_i 代表不同 GNSS 频点; \overline{P}_{f_i} 为经精密延迟校准值补偿后的伪距观测值; P_{f_i} 为原始伪距观测值; c 为空气中的光速。

1.1 绝对校准方法

为避免杂波及多径效应干扰等误差项来源,绝对校准实验均基于严格的暗室环境开展。

微波暗室如图 2 所示,其在 1.1~1.7 GHz 频段具有良好的屏蔽性能,具备一维转台,可用于常规 GNSS 测试及校准活动。微波暗室环境为 GNSS 时频传递接收机校准提供全电波屏蔽环境,有效缓解环境杂波干扰并抑制密闭环境中可能产生的多径效应,保证射频传输路径各项延迟已知可控。

1) 整体绝对校准方法

整体绝对校准把 GNSS 时频传递接收机(接收机主机、GNSS 接收天线和天线馈线线缆)看成一个整体来校准,原理如图 3 所示。

在总体系统延迟 t_g 可测的 GNSS 模拟信号实验环境下,可将 t_g 细分为 4 部分:GNSS 时频传递接收机整体校准值 t_{int} 、GNSS 信号模拟器延迟 t_{sim} 、射频发射路径延迟 t_{RFpath} 以及参考延迟 t_{ref} 。根据补偿关系, t_{int} 由式(5)计算得到。

$$t_{int} = t_g - t_{sim} - t_{RFpath} + t_{ref} \quad (5)$$

式中: t_g 通过伪距观测值解算得到,如式(6)和(7)所示。

$$t_g^i = \frac{\sum_{i=0}^m \frac{p_{rx}^i - p_{sim}^i}{c}}{m} \quad (6)$$

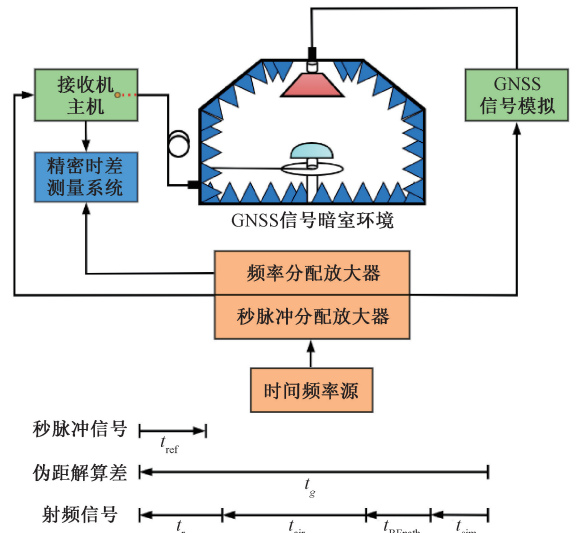


图 3 整体绝对校准原理

Fig. 3 Principle of the integrity calibration

$$t_g = \frac{\sum_{i=0}^n p_{sim}^i}{n} \quad (7)$$

式中: p_{rx}^i 为 GNSS 接收机主机在射频传输路径中 t 时刻卫星 i 的伪距观测值; p_{sim}^i 为 GNSS 模拟器场景中对应时刻卫星 i 的伪距播发值; c 为空气中的光速; m 为 GNSS 模拟器场景持续时间; n 为 GNSS 模拟器场景中卫星总个数,对所有卫星的接收机-模拟器伪距差值求平均即得到 t_g 。

t_{sim} 通过采样输入至接收机主机的 1PPS 信号和 GNSS 射频输出信号,并经相干解调算法后处理得到; t_{ref} 通过“差分思想”两次测量 1PPS 信号延迟差得到; t_{RFpath} 利用三天线法校准原理,在 GNSS 微波暗室中布置两个校准实验场景,分别解算接收机主机-模拟器伪距差值,并补偿其他相应延迟项得到,如式(8)所示。校准场景按照实验顺序分别命名为直连场景和喇叭天线收发

场景。

$$t_a = \frac{t_{g3} - t_{g1} - t_{air}}{2} \quad (8)$$

式中： t_{g1} 和 t_{g2} 分别定义为直连场景和喇叭天线收发场景中接收机主机-模拟器伪距差值； t_{air} 定义为 GNSS 射频信号从发射天线相位中心到接收天线相位中心的延迟。

整体绝对校准中接收机内延迟测量不确定度来源包括接收机主机延迟校准、GNSS 模拟器延迟校准、接收机参考延迟校准及射频发射路径延迟校准。

2) 分步绝对校准方法

分步绝对校准即针对接收机主机延迟 t_r 、GNSS 接收天线延迟 t_a 及天线馈线线缆延迟 t_c 单独校准,原理如图 4 所示。GNSS 时频传递接收机分步绝对校准值 t_{sep} 由式(9)计算得到。

$$t_{sep} = t_r + t_a - t_c \quad (9)$$

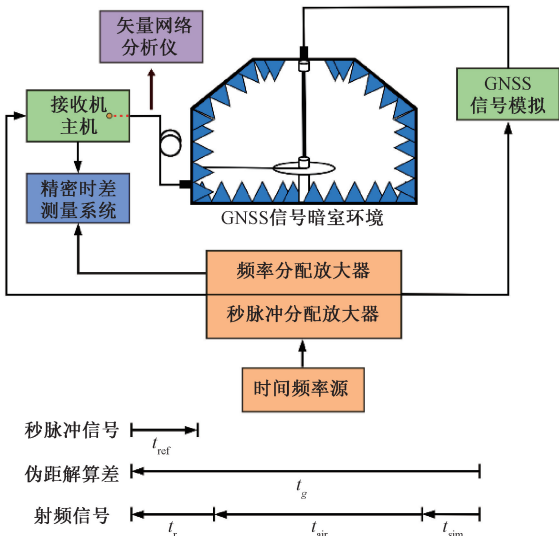


图4 分步绝对校准原理

Fig. 4 Principle of the step-by-step calibration

在总体系统延迟 t_g 可测的 GNSS 模拟信号实验环境下,可将 t_g 细分为 3 部分:GNSS 信号模拟器延迟 t_{sim} 、接收机主机延迟 t_r 以及参考延迟 t_{ref} 。根据补偿关系,可由式(10)计算得到 t_r 。

$$t_r = t_g - t_{sim} + t_{ref} \quad (10)$$

t_g 、 t_{sim} 、 t_{ref} 、 t_a 及 t_c 的校准原理分别参照整体绝对校准中总体系统延迟、GNSS 模拟器延迟、接收机参考延迟及射频发射路径延迟部分。 t_c 通过矢量网络分析仪测量 GNSS L2 频段 (1.16 ~ 1.31 GHz) 和 L1 频段 (1.52 ~ 1.62 GHz) 的群时延平均值得到。

分步绝对校准中接收机内延迟测量不确定度来源包括接收机主机延迟校准、GNSS 模拟器延迟校准、接收机参考延迟校准、GNSS 接收天线校准及天线馈线线缆

校准。

1.2 差分校准方法

差分校准原理如图 5 所示,在已有精密校准的参考 GNSS 时频传递接收机前提下,将待校准时频传递接收机与参考时频传递接收机接入相同的外部时频源,构建共钟的时频传递链路。

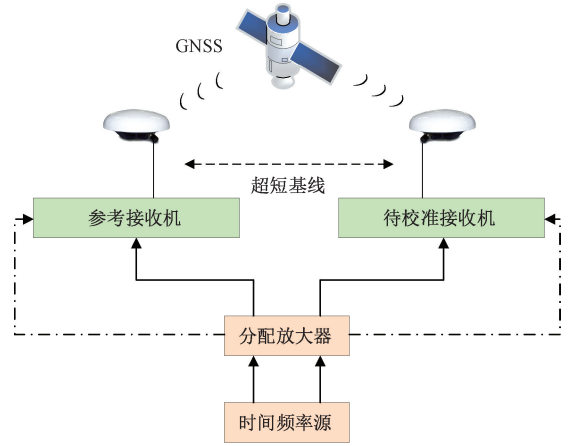


图5 差分校准原理

Fig. 5 Principle of the differential calibration

基于超短基线布站开展共钟差 (common clock difference, CCDi) 校准实验,解算得共钟时差 Δt_{CCDi} 。从时频传递接收机中获取 GNSS 通用时间传递标准 (common gnss generic time transfer standard, CGGTS) 数据文件以及与接收机无关的交换格式 (receiver independent exchange format, RINEX) 数据文件。经后处理,再对时频传递链路中的线缆延迟、参考延迟与参考接收机主机的硬件延迟进行相应补偿,得到待校准 GNSS 时频传递接收机内延迟的差分校准值 t_{dif} ,如式(11)所示。

$$t_{dif} = \Delta t_{CCDi} + (t_o + t_p - t_c - t_r)_{DUT} - (t_o + t_p - t_c - t_r)_{REF} \quad (11)$$

其中,下标 DUT 项为待校准接收机的相关延迟参数,下标 REF 项为参考接收机的相关延迟参数。

差分校准中接收机内延迟测量不确定度来源包括数据处理系统、参考与待校准接收机主机到参考时频源及天线馈线线缆校准。

1.3 比对分析

1) 绝对校准与差分校准的差异主要体现在校准原理及环境、各类因素对校准产生的影响及不确定度水平 3 个方面。

针对校准原理及环境,绝对校准以 GNSS 模拟器作为 GNSS 射频信号源,在关闭电离层、对流层等其他无关项误差后,通过解算接收机主机-模拟器伪距差及补偿其他部分延迟得到接收机延迟;差分校准将待校准与精密校准的接收机共同接入相同的外部时频源并接收 GNSS

真实信号开展 CCD 校准实验,通过解算共钟差及补偿其他部分延迟得到接收机延迟。

针对各类因素对校准产生的影响,除时间间隔计数器误差及伪距解算误差等共同因素外,绝对校准在测量 t_g 、 t_{sim} 与 t_{ref} 时还需考虑到 GNSS 射频输入和输出功率电平、热灵敏度、模拟器开关机特性和通道间偏差及接收机主机开关机特性等因素,并测量与验证各因素引入的不确定度大小。

其中,绝对校准不确定度可优于 1.0 ns,差分校准不确定度在 1.2~1.3 ns。

2) 分步绝对校准与整体绝对校准的差异主要体现在校准步骤及不确定度水平 2 个方面。

针对校准步骤,整体相比于分步省去了天线馈线线缆和 GNSS 接收天线的单独校准,简化了校准步骤。

针对不确定度水平,整体相比于分步消除了天线馈线线缆和 GNSS 接收天线校准引入的不确定度,新增了射频发射路径校准引入的不确定度,GNSS 接收天线校准和天线馈线线缆不确定度评估模型分步如图 6 和 7 所示。GNSS 接收天线校准引入的不确定度约在 0.46~0.51 ns,由天线馈线线缆校准引入的不确定度约在 0.49~0.53 ns,射频发射路径校准引入的不确定度约在 0.27~0.29 ns。整体相比于分步,不确定度水平可优化约 0.3 ns。

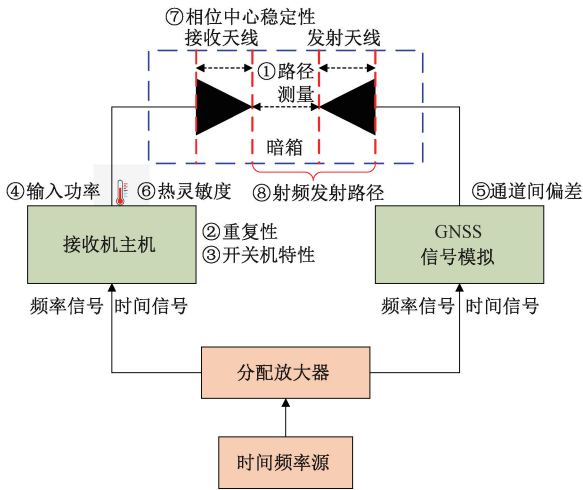


图 6 GNSS 接收天线校准不确定度评估模型
Fig. 6 Uncertainty evaluation model for GNSS receiving antenna calibration

3) 3 种校准方法的校准实施比对如表 1 所示。总的来说,相比于差分校准,绝对校准所需时间较短(约 1~2 d),测量不确定度较低,但因实施成本较高,并非所有实验室都具备绝对校准能力,因此绝对校准适用高精度需求、参考接收机校准等场景。差分校准所需时间较长(约 7~9 d),测量不确定度较高,但因其基于共钟差原

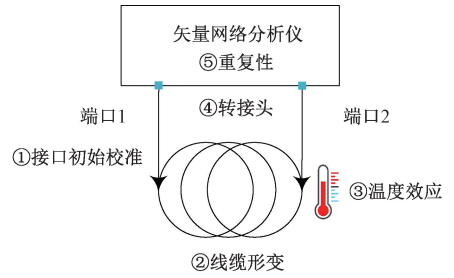


图 7 天线馈线线缆校准不确定度评估模型
Fig. 7 Uncertainty budget model for antenna feeder cable calibration

理,无需中断待测接收机正常测量,所需校准环境较为基础,更适用大规模校准值传递。

表 1 分步、整体与差分校准实施比对

Table 1 Comparison of specific steps for step-by-step, integrity, and differential calibration

具体校准步骤	分步	整体	差分
使用场景	微波暗室	微波暗室	共钟
系统设计复杂度	复杂	复杂	基础
操作复杂度	复杂	复杂	基础
单次校准时间/d	2	2	7~9

2 校准比对系统与原理

2.1 校准比对系统硬件搭建

根据 GNSS 时频传递接收机校准延迟所需的各部分实验环境,设计由时频信号分配、信号模拟、暗室环境、精密测量、数据解算处理和被校系统各部分组成的校准比对系统,如图 8 所示。



图 8 校准比对系统

Fig. 8 Calibration comparison system

校准比对系统框架如图 9 所示,时频信号源模块配备多类高稳时钟,包括可溯源至 UTC 的时频源、低相位噪声晶体振荡器等,为校准系统提供连续、稳定的时间与频率信号输出。时频信号分配模块配备频率/秒脉冲分

配放大器,将时频信号分配放大至多路,支撑校准系统中信号模拟、被校时频传递装置及精密测量等多模块多通道同源信号输入需求。GNSS 模拟系统支持北斗 B1I、B1C、B2a 和 B3I 频点和 GPSL1 C/A 频点标准模拟信号场景。

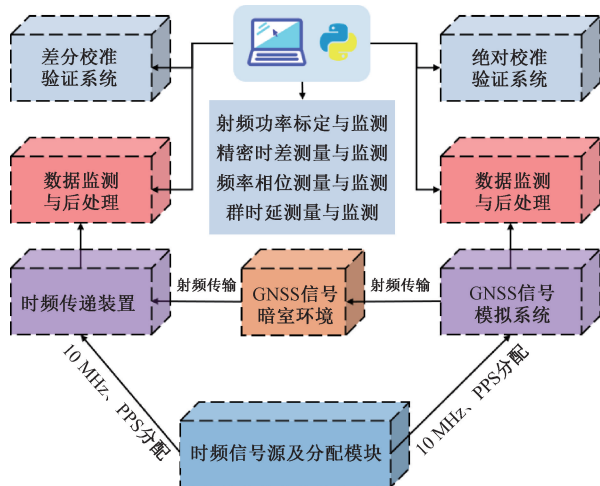


图 9 校准比对系统框架

Fig. 9 Calibration comparison system framework

2.2 校准比对原理

针对绝对与差分校准方法的比对原理如图 10 所示,基于北斗时频传递接收机内延迟开展分步、整体与差分校准实验,并根据不确定度来源模型评估各校准方法不确定度 A 类及 B 类细则,最终通过测量不确定度交叉验证各校准值正确性并分析各校准方法。分步与整体校准基于伪距观测值和其他时延测量值补偿得到内延迟校准值,差分校准基于共钟差解算值和其它时延测量值补偿得到内延迟校准值。当基于 3 种校准方法得到的内延迟校准值均能吻合在各校准方法评估的不确定度范围内时,则能证明接收机该频点下内延迟校准值的正确性及校准比对原理的有效性。

2.3 校准比对系统软件实现

自主编写配套于校准系统的智能化校准验证软件,基于 Python 编程语言实现,图形用户界面利用 PyQt 实现。其包括数据监测与后处理模块、差分校准验证模块、绝对校准验证模块以及 4 项重要量值标定、测量与监测模块。

数据监测与后处理模块针对 GNSS 模拟器及待校准时频传递接收机原始观测数据,在其用户界面配置接收机数据实时监测和后处理所需信息,可在本地实时显示并更新接收机主机-模拟器伪距差数据图像及相关异常分析,并在本地完成数据后处理。差分及绝对校准验证模块用于验证本地历史校准数据及现校准数据,并生成不确定度评估报告。4 项重要量值标定、测量与监测模

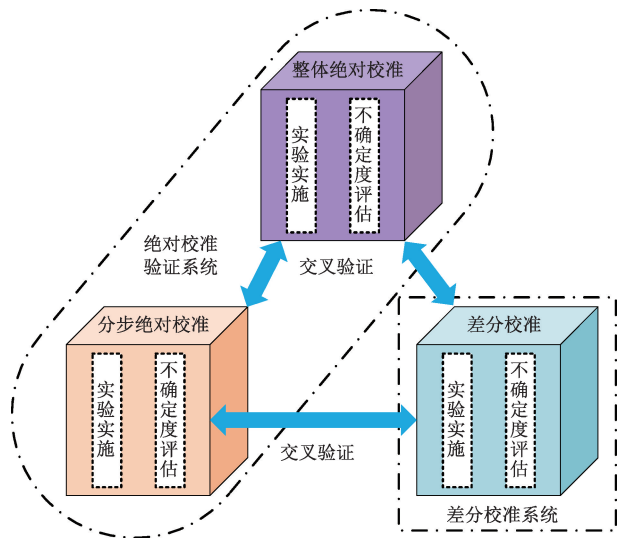


图 10 校准比对原理

Fig. 10 Calibration comparison principle

块用于信号功率、时间间隔等参数精密标定及测量,为构成校准实验的基础保障条件。软件部分模块如图 11 和 12 所示。

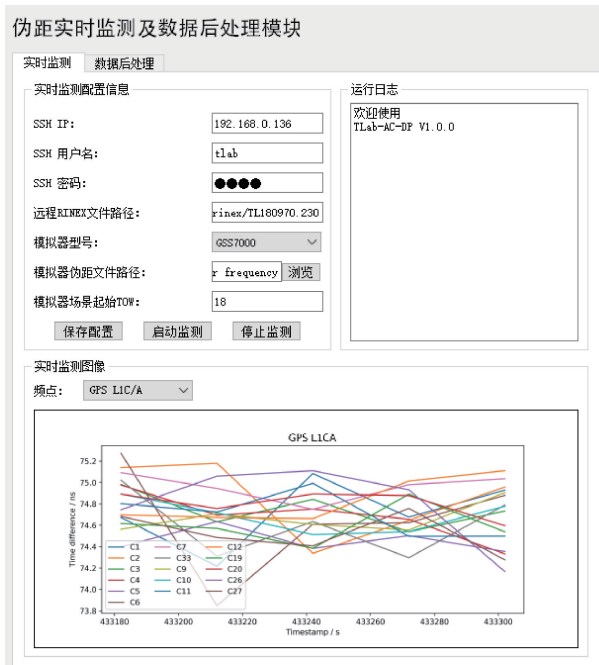


图 11 接收机-模拟器伪距差实时监测与后处理模块

Fig. 11 Real time monitoring and post processing module for receiver master-simulator pseudorange difference

3 校准比对实验结果及分析

依托校准比对系统开展的北斗时频传递接收机的校准比对实验框架如图 13 所示。北斗时频传递接收机实

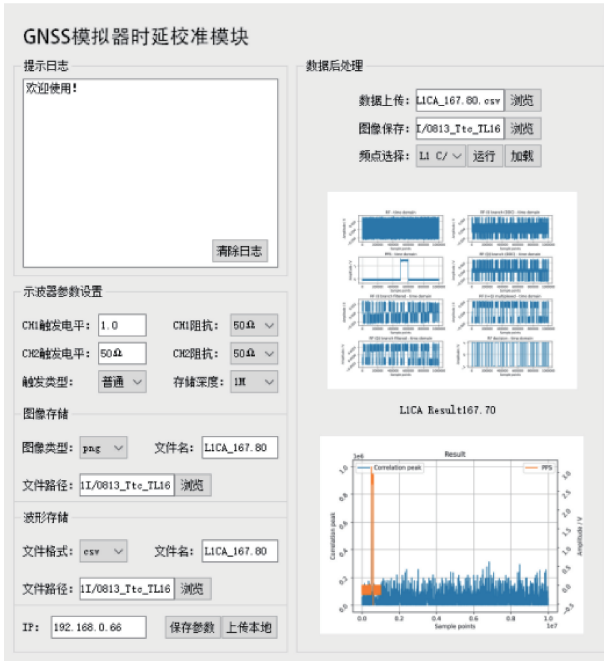


图 12 GNSS 模拟器时延校准模块

Fig. 12 GNSS simulator delay calibration module

物如图 14 所示。校准比对实验用到了多类型北斗时频传递接收机,代号名称分别为 DC01、DC02、TL16、GS01 和 GS10。

3.1 整体绝对校准实验

针对 TL16 的 GPS L1 C/A 频点基于校准比对系统开展的整体绝对校准实验展开介绍,实验中 GNSS 模拟器型号为 Spirent GSS7000。

1) 总体系统延迟 t_g 校准

因接收机主机易受 GNSS 模拟器射频输出功率电平影响,进而影响伪距解算情况,故实验中实时监测接收机主机-模拟器伪距差值。剔除实时监测中观测到的伪距差异异常解算的卫星,伪距差(数据间隔 30 s)如图 15 所示, t_g 为所有卫星解算伪距差的均值,L1 C/A 频点 t_g 校准值为 374.23 ns。

由 t_g 校准引入的标准不确定度 U_{RD} 评估结果为 0.34 ns,如表 2 所示。其中, U_{cha} 为 GNSS 模拟器通道间偏差引入的不确定度,为 t_g 中各通道解算结果的最大偏差,取为 0.028 ns,如图 15 所示; U_{tem} 为接收机主机热灵敏度引入的不确定度,参考文献[18]并结合实际温度变

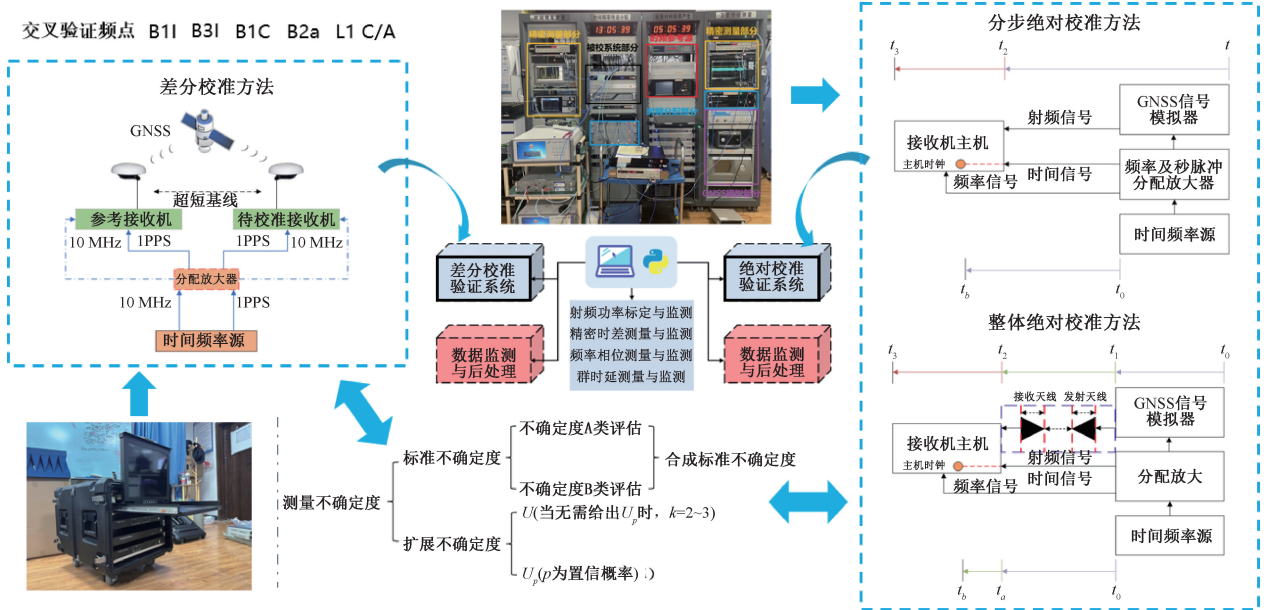


图 13 校准比对实验框架

Fig. 13 Calibration comparison experimental framework

化计算,取得保守值 0.192 ns; U_{swi} 为接收机主机开关机特性引入的不确定度,测试得到重启接收机主机前后的伪距最大偏差,取为 0.173 ns; U_{pow} 为射频信号输入功率电平引入的不确定度,参考 CNES 评估方法^[15]将射频功率调整至接近实际 GNSS 信号接收,接收机主机自动增益控制 (AGC) 保持在线性区域所给出的评估结果

0.100 ns; U_{rep} 为 t_g 解算结果的最大标准差,取为 0.195 ns,如图 15 所示。

2) GNSS 模拟器延迟 t_{sim} 校准

GNSS 模拟器播发特定的单星零伪距场景下,多通道高速示波器单次触发并采集 1PPS 信号和 GNSS 射频输出信号,实验中高速示波器型号为 RIGOL DS70000。经



图 14 北斗时频传递接收机

Fig. 14 Beidou time-frequency transfer receiver

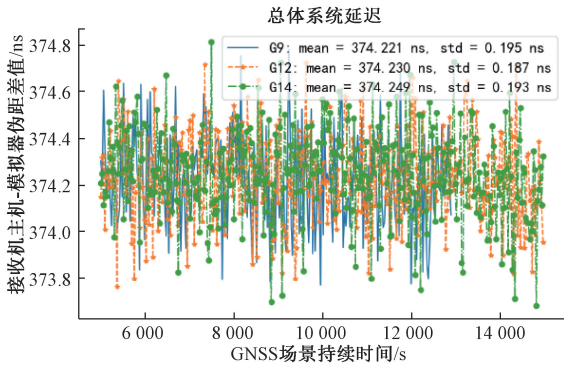


图 15 总体系统延迟

Fig. 15 Overall system delay

相干解调算法处理后得到 GPSL1 C/A 频点 t_{sim} 校准值为 167.700 ns。

表 2 t_g 校准不确定度评估

Table 2 Uncertainty budget for t_g calibration

来源	类型	值/ns
U_{cha}	B	0.028
U_{tem}	B	0.192
U_{swi}	B	0.173
U_{pow}	B	0.100
U_{rep}	A	0.195
U_{RD}		0.34

由 t_{sim} 校准引入的标准不确定度 U_{SD} 评估结果为 0.47 ns, 如表 3 所示。其中, $U_{res_simulator}$ 为示波器分辨率引入的不确定度, 参考其产品手册, 20 GSa/s 双通道采样率对应分辨率为 0.100 ns; $U_{swi_simulator}$ 为 GNSS 模拟器开关机特性引入的不确定度, 测试重启 GNSS 模拟器前后同一频点延迟校准值最大偏差, 取为 0.289 ns; $U_{pow_simulator}$ 为模拟器配置射频功率引入的不确定度, 参考文献 [19] 对该项不确定度估值, 取为 0.115 ns; $U_{rep_simulator}$ 为 t_{sim} 校准重复性引入的不确定度, 取为 0.275 ns。

表 3 t_{sim} 校准不确定度评估

Table 3 Uncertainty budget for t_{sim} calibration

来源	类型	值/ns
$U_{res_simulator}$	B	0.100
U_{tri}	B	0.200
$U_{swi_simulator}$	B	0.289
$U_{pow_simulator}$	B	0.115
$U_{rep_simulator}$	A	0.275
U_{SD}		0.47

3) 参考延迟 t_{ref} 校准

接收机参考延迟数据如图 16 所示, 实验中时间间隔计数器型号为 Stanford SR620, L1 C/A 频点 t_{ref} 校准值为 48.300 ns, 标准差为 0.077 ns。

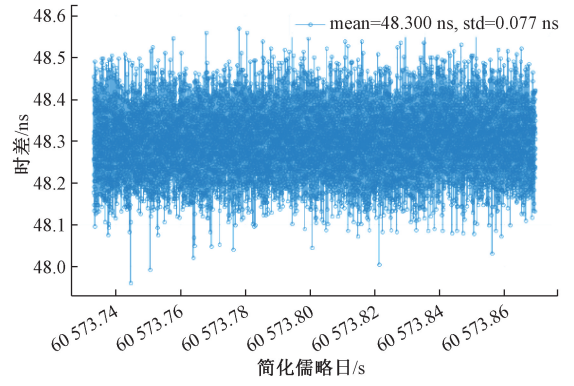


图 16 接收机参考延迟

Fig. 16 Reference delay of receiver

由 t_{ref} 校准引入的标准不确定度 U_{RFD} 评估结果为 0.14 ns, 如表 4 所示。其中, $U_{res_reference}$ 为时间间隔计数器分辨率误差引入的不确定度, 参考其产品手册及 ESA 评估方法 [13], 取为 0.100 ns; U_{rel} 为时间间隔计数器相对误差引入的不确定度, 参考其产品手册及 ESA 评估方法 [13], 取为 0.050 ns; $U_{rep_reference}$ 为 t_{ref} 校准重复性引入的不确定度, 取为 0.077 ns, 如图 17 所示。

表 4 t_{ref} 校准不确定度评估

Table 4 Uncertainty budget for t_{ref} calibration

来源	类型	值/ns
$U_{res_reference}$	B	0.100
U_{rel}	B	0.050
$U_{rep_reference}$	A	0.077
U_{OD}		0.14

4) 射频发射路径延迟 t_{RFpath} 校准

t_{RFpath} 分为喇叭天线延迟 t_h 和气隙传播延迟 t_{air2} , 由 GNSS 接收天线场景中接收机-模拟器伪距差值计算得到, L1 C/A 频点 t_{RFpath} 校准值为 3.240 ns。

由 t_{RFpath} 校准引入的标准不确定度 U_{RFD} 评估结果为 0.30 ns, 如表 5 所示。其中, U_{apc} 为天线相位中心稳定性

引入的不确定度,参考计量技术规范 JJF 1403-2013 校准实例评估方法,取为 0.020 ns;同评估原理, U_{pow} 、 U_{cha} 、 U_{tem} 分别取为 0.100、0.200 和 0.192 ns。

表 5 t_{RFpath} 不确定度评估结果

Table 5 Uncertainty budget for t_{RFpath} calibration

来源	类型	值/ns
U_{ape}	B	0.020
U_{pow}	B	0.100
U_{cha}	B	0.200
U_{tem}	B	0.192
U_{RFD}		0.30

5) GNSS 时频传递接收机整体校准值

TL16 的 L1 C/A 频点内延迟整体校准值 t_{int} 为 251.59 ns,测量不确定度 U_{ID} 评估结果为 0.71 ns,如表 6 所示。

表 6 L1 C/A 频点整体校准值

Table 6 Integrity calibration result for L1 C/A (ns)

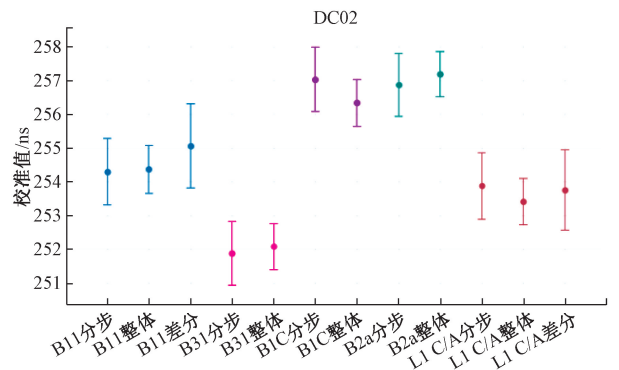
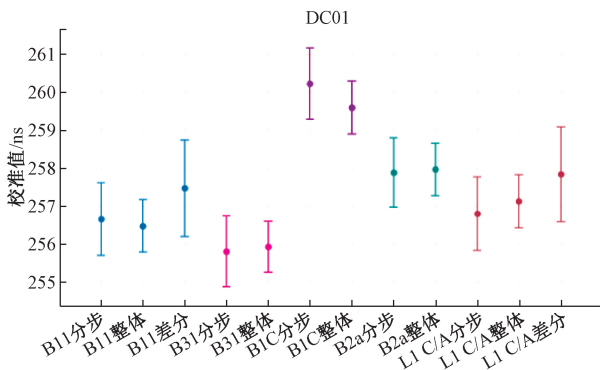
t_g	t_{sim}	t_{ref}	t_{RFpath}	t_{int}	U_{ID}
374.23	167.70	3.24	48.30	251.59	0.65

表 7 DC01、DC02、DC03、TL16 和 TL17 北斗全频点和 GPS L1 C/A 频点校准比对实验总体结果

Table 7 Overall results of the cross validation experiment between DC01, DC02, DC03, TL16, and TL17

for Beidou full frequency point and GPS L1 C/A

代号	校准类型	校准时间	B1I	B3I	B1C	B2a	L1 C/A
DC01	分步绝对校准	2024/09/17–2024/09/18	256.66(0.96)	255.81(0.93)	260.23(0.94)	257.89(0.92)	256.81(0.97)
	整体绝对校准	2024/09/19–2024/09/20	256.48(0.69)	255.93(0.67)	259.60(0.70)	257.97(0.69)	257.13(0.70)
	差分校准	2024/07/27–2024/08/04	257.47(1.27)	/	/	/	257.84(1.25)
DC02	分步绝对校准	2024/09/22–2024/09/23	254.30(0.98)	251.88(0.94)	257.03(0.95)	256.87(0.93)	253.87(0.98)
	整体绝对校准	2024/09/24–2024/09/25	254.37(0.71)	252.08(0.68)	256.33(0.70)	257.18(0.67)	253.41(0.69)
	差分校准	2024/07/27–2024/08/04	255.06(1.24)	/	/	/	253.75(1.19)
TL16	分步绝对校准	2024/10/14–2024/10/15	251.28(0.95)	254.35(0.93)	258.91(0.93)	257.55(0.92)	251.89(0.94)
	整体绝对校准	2024/10/16–2024/10/17	251.00(0.70)	254.22(0.68)	258.17(0.70)	257.41(0.67)	251.59(0.65)
	差分校准	2024/05/01–2024/05/08	251.31(1.25)	/	/	/	253.06(1.22)
GS01	分步绝对校准	2024/10/14–2024/10/15	198.79(0.92)	196.73(0.92)	/	/	209.05(0.92)
	整体绝对校准	2024/10/16–2024/10/17	198.95(0.68)	198.06(0.68)	/	/	208.75(0.67)
	差分校准	2024/05/01–2024/05/08	199.35(1.21)	/	/	/	209.41(1.24)
GS10	分步绝对校准	2024/08/20–2024/08/21	198.03(0.93)	197.46(0.93)	208.24(0.95)	207.88(0.94)	208.65(0.93)
	整体绝对校准	2024/08/22–2024/08/23	198.59(0.67)	196.17(0.67)	207.33(0.69)	208.01(0.71)	208.08(0.67)
	差分校准	2024/05/01–2024/05/08	199.10(1.19)	/	/	/	209.21(1.23)



(a) DC01和DC02内延迟校准值及不确定度区间
(a) DC01 and DC02 calibration results and uncertainty range

3.2 基于多类型接收机的校准比对实验及分析

DC01、DC02、DC03、TL16 和 TL17 基于校准比对系统和 3 种校准方法开展的校准比对实验总体情况如表 7 所示,其中括号外数值为该频点内延迟校准值,括号内数值为内延迟测量不确定度。所有校准值及不确定度区间如图 17 所示,对于 5 台北斗时频传递接收机的各频点,3 种校准方法得到的内延迟校准值均能互相吻合在不确定度范围内。

校准比对实验包括 B1I、B3I、B1C、B2a 和 L1 C/A 共 5 个频点,其中 B3I、B1C 和 B2a 频点只有分步和整体绝对校准值,GS01 未进行 B1C 与 B2a 的校准。在绝对校准与差分校准互相验证时,对于 B1I 频点,最大偏差为 GS10 的分步绝对校准值与差分校准值的 1.07 ns;对于 L1 C/A 频点,最大偏差为 TL16 的整体绝对校准值与差分校准值的 1.47 ns。在分步与整体两种绝对校准方法互相验证时,对于 B1I 频点,最大偏差为 GS10 的 0.56 ns;对于 B1C 频点,最大偏差为 TL16 的 0.74 ns;对于 B2a 频点,最大偏差为 DC02 的 0.31 ns;对于 B3I 频点,最大偏差为 GS01 的 1.33 ns。

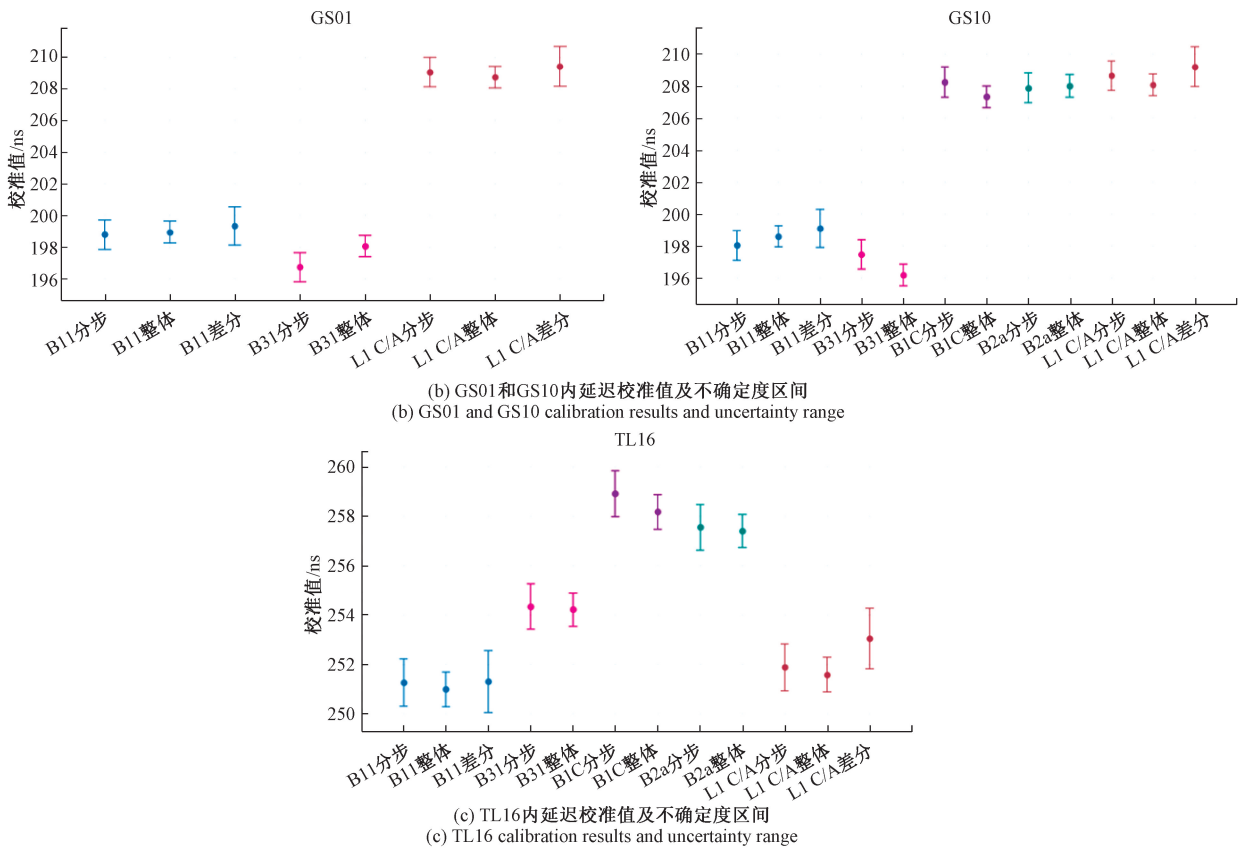


图 17 全频点内延迟校准值及不确定度区间

Fig. 17 All frequency calibration results and uncertainty range

4 结 论

GNSS 时频传递接收机内延迟通常为百纳秒量级,当前高精度远程时频传递与比对主要受其限制,且精密校准不确定度水平通常介于亚纳秒与纳秒之间,故单一校准方法得到的校准值存在复现性差、未经验证的问题。针对目前并无研究机构对 3 种校准方法原理开展比对分析及实验研究,本文提出针对绝对与差分校准方法的实验研究。设计校准比对系统和智能化校准验证软件,基于多类型北斗时频传递接收机 B1I、B1C、B2a、B3I 和 GPS L1C/A 频点开展绝对与差分校准方法的实验研究。校准实验中,在完成各仪器物理连接和通信测试后,依托绝对校准验证模块、4 项重要量值标定、测量与监测模块和数据监测与后处理模块开展接收机主机、GNSS 模拟器、接收机参考延迟和天线馈线等绝对校准对象的实施和数据验证;依托差分校准验证模块和四项重要量值标定、测量与监测模块开展共钟差、接收机参考延迟和天线馈线等差分校准对象的实施和数据验证。

基于不确定度来源模型评估内延迟测量不确定度,差分校准测量不确定度为 1.19~1.27 ns,而分步绝对校准和整体绝对校准测量不确定度水平在亚纳秒量级,分别为 0.92~0.98 ns 和 0.67~0.71 ns。针对每个频点,基

于 3 种校准方法下的内延迟校准值均能互相吻合在各自不确定度区间内,验证了校准比对实验的有效性。

绝对校准相比于差分校准,更适用于拥有绝对校准能力且面向亚纳秒校准需求的导航或时间实验室,而差分校准适用于精度要求不高且大规模校准值传递的基础场景。整体绝对校准相比于分步绝对校准可省去 GNSS 接收天线和天线馈线线缆的单独校准而具有更低的内延迟测量不确定度,可优于 0.7 ns,故整体绝对校准方法具有测量精度与不确定度水平的优越性。

参考文献

[1] 梁坤,方维,顾杨义,等. 远程时间传递与溯源方法、装置及体系[J]. 计量科学与技术,2021,65(4):3-13.
LIANG K, FANG W, GU Y Y, et al. Remote time transmission and traceability methods, devices, and systems[J]. Metrology Science and Technology, 2021, 65(4): 3-13.

[2] 林弋戈,梁坤,方占军. 时间单位——秒的演进[J]. 中国计量,2018,5(8):16-17,49.
LIN Y G, LIANG K, FANG ZH J. Time unit-evolution of seconds [J]. China Metrology, 2018, 5(8): 16-17,49.

- [3] 梁坤,张爱敏. GLONASS 时频传递研究[J]. 计量学报, 2011, 32(2): 172-177.
LIANG K, ZHANG AI M. Research on GLONASS time frequency transmission [J]. China Metrology, 2011, 32(2): 172-177.
- [4] 陈瑞琼,刘娅,李孝辉. 一种高精度的国家标准时间远程复现方法[J]. 武汉大学学报, 2018, 43(2): 188-193.
CHEN R Q, LIU Y, LI X H. A method of national standard time high precision remote reproduction [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(2): 188-193.
- [5] 许龙霞,刘娅,李孝辉. GNSS 授时与时间同步在基础设施行业的应用[J]. 航空学报, 2024, 45(S1): 91-101.
XU L X, LIU Y, LI X H. Application of GNSS timing and time synchronization in infrastructures [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(S1): 91-101.
- [6] LOMBARDI M A. Synchronizing stock market clocks to UTC(NIST)[C]. 2020 XXXIIIrd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science, IEEE, 2020: 1-4.
- [7] PETIT G, JIANG Z, UHRICH P, et al. Differential Calibration of ashtech Z12T receivers for accurate time comparisons [C]. Proceedings of the 14th European Frequency and Time Forum. Torino, 2000: 40-44.
- [8] LIANG K, ZHANG A, YANG Z, et al. Experimental research on BeiDou time transfer using the NIM made GNSS time and frequency receivers at the BIPM in Euro-Asia link [C]. 2017 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium. IEEE, 2017: 788-797.
- [9] LIANG K, ARIAS F, PETIT G, et al. Evaluation of BeiDou time transfer over multiple inter-continental baselines towards UTC contribution [J]. Metrologia, 2018, 55(4): 513-525.
- [10] PROIA A, CIBIEL G, WHITE J, et al. Absolute calibration of GNSS time transfer systems: NRL and CNES techniques comparison[C]. 2011 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control and the European Frequency and Time Forum (FCS) Proceedings. IEEE, 2011: 1-6.
- [11] DELPORTE J, VALAT D, JUNIQUE T. Progress on absolute calibrations of GNSS reception chains at CNES[C]. 2016 IEEE International Frequency Control Symposium (IFCS). IEEE, 2016: 1-6.
- [12] VALAT D, DELPORTE J. Absolute calibration of timing receiver chains at the nanosecond uncertainty level for GNSS time scales monitoring [J]. Metrologia, 2020, 57(2):025019.
- [13] GARBIN E, DEFRAIGNE P, KRISTEK P, et al. Absolute calibration of GNSS timing stations and its applicability to real signals [J]. Metrologia, 2018, 56(1):015010.
- [14] KASAT N, NEELAPPA S A, SINGH F B, et al. Absolute calibration of NavIC reference receiver [C]. 2022 URSI Regional Conference on Radio Science. IEEE, 2022: 1-4.
- [15] UHRICH P, RIEDEL F, CHUPIN B, et al. A new approach for absolute calibration of a GNSS receiver: Use of a Software-Defined Radio (SDR) technique[C]. 2022 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS). IEEE, 2022: 1-6.
- [16] WALLER P, VALCESCHINI R, DELPORTE J, et al. Cross-calibrations of multi-GNSS receiver chains [C]. 2019 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum (EFTF/IFC). IEEE, 2019: 1-4.
- [17] 梁坤,焦祥旭,余油. 北斗时频传递链整体绝对校准技术研究 [J]. 电子与信息学报, 2023, 45(11): 4117-4126.
LIANG K, JIAO X X, YU T. Research on the integrated absolute calibration of BeiDou time and frequency transfer chain [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2023, 45(11): 4117-4126.
- [18] LIANG K, FELDMANN T, BAUCH A, et al. Performance evaluation of NIM GPS receivers in use for time transfer with PTB[C]. EFTF-2010 24th European Frequency and Time Forum. IEEE, 2010: 1-8.
- [19] PECHERITSA D, BURTSEV S, FROLOV A, et al. GNSS-receivers carrier phase calibration[C]. 2020 1st International Conference Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering (PIERE). IEEE, 2020: 165-169.

作者简介



李雨峰, 2022 年于北京交通大学获得学士学位, 现为北京交通大学在读硕士研究生, 主要研究方向为 GNSS 时间/频率传递及 GNSS 接收机硬件时延校准。

E-mail: 23120220@bjtu.edu.cn

Li Yufeng received his B. Sc. degree from Beijing Jiaotong University in 2022. Now he is a M. Sc. candidate in Beijing Jiaotong University. His main research interests include GNSS time/frequency transfer and GNSS receiver calibration.



梁坤(通信作者), 2002 年于北京交通大学获得学士学位, 2005 年于北京交通大学获得硕士学位, 2008 年于中国科学院获得博士学位, 现为北京交通大学教授, 主要研究方向为精密测量/计量、时间和频率、卫星导航。

E-mail: liangk@bjtu.edu.cn

Liang Kun (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Beijing Jiaotong University in 2002, M. Sc. degree from Beijing Jiaotong University in 2005, and Ph. D. degree from Chinese Academy of Sciences in 2008. Now he is a professor in Beijing Jiaotong University. His main research interests include precision measurement/metrology, time and frequency, and satellite navigation.