

## 北斗时频传递链整体绝对校准技术研究

梁坤\* 焦祥旭 余洵

(北京交通大学电子信息工程学院 北京 100044)

**摘要:** 全球导航卫星系统(GNSS)时频传递因其较好的不确定度水平及使用方便等特点,已成为当前应用最广泛的时频传递技术。时频传递链校准是时间和频率量值精准传递的关键与必要前提,传统的分步绝对校准技术存在校准步骤复杂、不确定度来源多的问题。针对上述问题,该文提出一种整体绝对校准技术,对北斗卫星导航系统(BDS)时频传递链进行整体一次性校准,测量不确定度更低。通过对时频传递链整体绝对校准方法的研究,搭建了时频传递链整体绝对校准系统及实验平台,实现了北斗时频传递链的整体与分步绝对校准实验,评估其不确定度。结果表明两种方法校准结果一致性优于1.76 ns,合成标准不确定度分别评定为0.80 ns与1.00 ns。

**关键词:** 绝对校准; 时频传递; 北斗导航卫星系统

中图分类号: TB939

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2023)11-4117-10

DOI: 10.11999/JEIT230844

## Research on the Integrated Absolute Calibration of BeiDou Time and Frequency Transfer Chain

LIANG Kun JIAO Xiangxu YU Tian

(School of Electronics & Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Global Navigation Satellite System(GNSS) time and frequency transfer has become the most widely used time and frequency transfer technique due to its fine uncertainty level and ease of use. Time and frequency transfer calibration is the key and necessary prerequisite for the accurate transfer of time and frequency values. The separated absolute calibration technique suffers from complex calibration steps and multiple sources of uncertainty. To address these problems, an integrated absolute calibration technique with fewer implementation steps and fewer sources of uncertainty is proposed in this paper, i.e., an integrated one-time calibration of the BeiDou navigation Satellite system (BDS) time and frequency transfer chain, with lower measurement uncertainty. In this paper, through the research on the integrated absolute calibration method of time and frequency transfer chain, the integrated absolute calibration system and experimental platform of the time and frequency transfer chain are constructed, and the separated absolute calibration and integrated absolute calibration experiments based on one actual BDS time and frequency transfer chain are realized and their uncertainties are evaluated. The results showed that the consistency of the calibration results under the two methods is better than 1.76 ns, and the synthetic standard uncertainties are 0.80 ns and 1.00 ns respectively.

**Key words:** Absolute calibration; Time and frequency transfer; BeiDou navigation Satellite system(BDS)

### 1 引言

时间是当前准确度最高、应用最广的物理量,

高精度时间频率(简称时频)已经成为一个国家科技、经济、军事和社会生活中至关重要的参量,渗透到从基础研究领域到工程技术领域,以及国计民生等诸多方面,关系国家社会安全稳定。精准时间及其传递已成为各领域最基础的技术支撑,时频传递链硬件延迟测量(即时频传递链校准)是保证精准时间及其传递的前提,对全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)时间链和协调世界时(Coordinated Universal Time, UTC)时间链长期监测的关键环节<sup>[1,2]</sup>。基于GNSS的远程时间传递和同步技术因其较广的覆盖范围、较快的信息

收稿日期: 2023-08-04; 改回日期: 2023-10-18; 网络出版: 2023-10-23

\*通信作者: 梁坤 liangk@bjtu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3900704), 国家铁路智能运输系统工程技术研究中心开放课题

Foundation Items: The National Key R&D Program of China (2021YFB3900704), The Open Foundation of National Railway Intelligence Transportation System Engineering Technology Research Center

传递实时性、较低的设备成本及较高的传递和同步精度,逐渐成为远程时频传递技术中应用最广泛的。国际上,基于美国全球定位系统(Global Positioning System, GPS)的时频传递是远程时频传递和溯源的主要手段,同时也是国际原子时(International Atomic Time, TAI)合作中最主要的时频传递方法<sup>[3]</sup>,随着北斗三号系统全球化服务的开通,基于北斗三号系统的时频传递扩展了北斗卫星导航系统(BeiDou navigation Satellite system, BDS)的应用范围,使其能满足我国相关时频传递系统对自主可控性的要求。并且伴随北斗三号系统硬件性能提升,还可能进一步提高时间频率量值在GNSS的传递及同步精度。

时频传递链通常由时频传递主机、GNSS天线及天线馈线组成,可用于与本地时间频率参考建立比对链接。不同地面观测站可由时频传递链基于GNSS共/全视方法完成远程时间频率比对,进而实现两测站时间频率量值传递。在对时频传递链研究中,北斗时频传递链研究较少、起步较晚,文献<sup>[4]</sup>对北斗三号系统的B1C和B2a频点进行时频传递研究,评估了新信号的时间精度值比旧信号提高了约47.6%。文献<sup>[5]</sup>利用北斗三号系统在不同时间站之间进行时频传递实验,实验结果表明误差优于2.00 ns,共视噪声约为0.70 ns。截至目前,TAI合作中仍缺少经过精密校准的北斗参考时频传递链,北斗时频传递数据暂未计入UTC计算,因此北斗时频传递链精密校准也是国际GNSS时频传递的重点研究方向。

国际上,时频传递链校准常用的校准方法是由国际计量局(International Bureau of Weights and Measures, BIPM)研究与主导的差分校准技术<sup>[6]</sup>:基于已校准的参考时频传递链,将其与待校准时频传递链接入本地相同时钟源,进行共钟差实验,即可通过硬件延迟已知的参考时频传递链得到待校准的时频传递链的硬件延迟;另有一种少数单位能够研究实施的分步绝对校准技术,通过模拟GNSS信号对时频传递链3部分各自进行单独校准<sup>[7]</sup>。文献<sup>[8,9]</sup>中,法国空间研究中心(National Centre for Space studies, CNES)和欧洲空间局(European Space Agency, ESA)分别对BIPM和美国国家标准技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)等单位的时频传递链在GPS、伽利略卫星导航系统(GALILEO satellite navigation system, GALILEO)和BDS部分频点进行了分步绝对校准,合成标准不确定度约为1.00 ns。在文献<sup>[10]</sup>中,印度空间研究组织(Indian Space Re-

search Organization, ISRO)对时频传递链在印度星座导航系统(Navigation with Indian Constellation, NavIC)部分频点下进行分步绝对校准,合成标准不确定度优于1.00 ns。在国内,北斗卫星导航系统近几年的快速发展使得北斗时频传递技术同样得到广泛关注。2017年,中国计量科学研究院(National Institute of Metrology of China, NIM)开发了一种兼容北斗频点的新型时频传递系统<sup>[11,12]</sup>,与CNES合作对时频传递链在BDS B1I和B2I频点进行了分步绝对校准实验。

分步绝对校准方法中,由于时频传递链待校准设备多,其操作步骤较为繁琐且复杂,进而导致校准过程中不确定度来源多。基于该方法缺点及前人研究,本文提出了一种整体绝对校准方法,即对时频传递链整体进行校准,避免了对时频传递链主机、GNSS天线及天线馈线进行单独校准。相比传统分步校准方法,本方法简化了校准实施步骤,减少了不确定度来源,改善了绝对校准方法的测量不确定度水平。本文第2节对所提整体绝对校准方法原理进行研究。本文第3节对整体绝对校准实验结果及验证实验进行介绍。本文第4节对整体绝对校准实验及验证实验不确定性评估。本文第5节总结全文。

## 2 整体绝对校准原理

整体绝对校准的思路是以GNSS模拟器作为信号源,模拟产生标准场景信号,使用设定的卫星星座与大气延迟参数构建标准模拟测试场景,在排除电离层、对流层与多径效应等无关误差影响的情况下,测量标定时频传递链的硬件延迟。由于该方法需模拟时频传递链在真实GNSS信号下的工作情况,为减少多径效应、避免杂波干扰,应在微波暗室环境中进行。为保证时频传递链的工作稳定性,GNSS模拟器、时频传递链及外部时钟频率源在校准前需要进行充分预热,且在校准过程中保持正常运行。

图1展示了整体绝对校准的原理,其中箭头方向代表了信号传播方向,根据时频传递链硬件延迟组成,整体绝对校准的计算为

$$t_{\text{int}} = t_{\text{rx-int}} + t_{\text{air}} + t_{\text{horn}} + t_{\text{sim}} - t_{\text{ref-int}} \quad (1)$$

对式(1)移项,即可得到式(2)以解算整体绝对校准值

$$t_{\text{rx-int}} = t_{\text{int}} - t_{\text{sim}} - t_{\text{air}} - t_{\text{horn}} + t_{\text{ref-int}} \quad (2)$$

其中,  $t_{\text{rx-int}}$ ,  $t_{\text{int}}$ ,  $t_{\text{ref-int}}$  分别为整体绝对校准中时频传递链的硬件延迟、伪距解算时延、参考时延,  $t_{\text{air}}$  为气隙传播时延,  $t_{\text{horn}}$  为发射天线时延,  $t_{\text{sim}}$  为

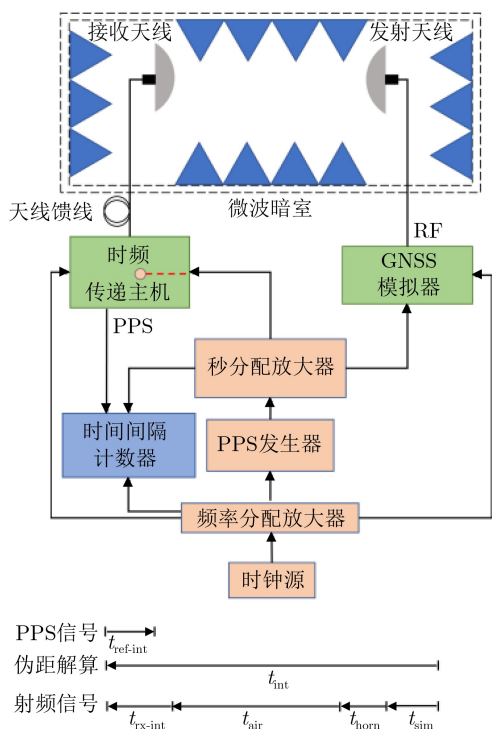


图1 时频传递链整体绝对校准原理

GNSS模拟器时延。整体绝对校准测量内容主要包括发射天线校准、气隙传播时延测量、伪距解算及参考时延测量，下文对各部分进行详细介绍。

在GNSS模拟器排除电离层、对流层与多径效应等无关误差影响的情况下，其输出GNSS射频信号伪码翻转点原则上应与时基零点严格对齐，但由于GNSS模拟器数仿过程中存在编码时延且其硬件存在电路时延，输出GNSS射频信号伪码翻转点和时基零点间会存在相应偏差，即GNSS模拟器时延，因此需要对GNSS模拟器进行校准补偿，具体测量方法如图2所示。通过高速实时示波器采样注入GNSS模拟器的时基参考秒脉冲信号(Pulse Per Second, PPS)和GNSS模拟器输出的射频信号，经过自研处理算法对其进行相干解调后处理，确定GNSS模拟器各频点时延值。

相干解调处理算法原理如图3所示。对于PPS采样信号，由其上升时间极短(通常小于3 ns)，在高速实时示波器采样时可能因采样精度不够导致采样点数过少，故采用3次样条插值法对原有PPS信号上升沿进行插值处理，插值原理如式(3)所示

$$s(x) = a + bx + cx^2 + dx^3 \quad (3)$$

其中， $s(x)$ 为PPS信号插值后的拟合函数， $x$ 为PPS采样信号， $a, b, c$ 和 $d$ 为待定系数。

对于GNSS射频采样信号进行相干解调处理，首先对I支路和Q支路进行下变频处理，其原理如式(4)所示

$$\left. \begin{aligned} x_Q(t) &= a(t) \cos(2\pi f_c t) \\ x_I(t) &= a(t) \sin(2\pi f_c t) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中， $x_Q(t)$ 为Q支路GNSS射频下变频信号， $x_I(t)$ 为I支路GNSS射频下变频信号， $a(t)$ 为GNSS射频采样信号， $f_c$ 为载波频率， $t$ 为采样时间。将去除载波频率后的下变频GNSS射频信号通过低通滤波器进行滤波处理，得到含有原始信号1/2幅值的基带数字信号，再对其I支路和Q支路的基带数字信号进行合路判决，从而恢复原始幅值的基带数字信号，最后对其进行定时采样去除毛刺恢复得到原始数字基带信号。将插值处理后的PPS信号1/2幅值处记为时基时刻 $t_{PPS}$ ，将相干解调处理后GNSS射频信号相位跳变时刻记为 $t_{RF}$ ，GNSS模拟器时延 $t_{sim}$ 的计算如式(5)所示

$$t_{sim} = t_{RF} - t_{PPS} \quad (5)$$

在整体校准中，信号经过了一段空气中的路径，即空气传播时延，是GNSS射频信号从发射天线相

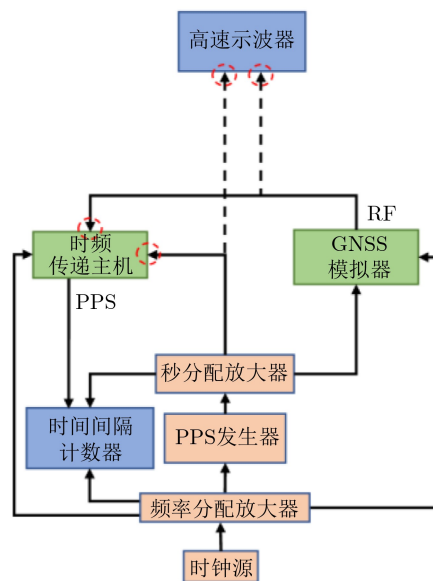


图2 GNSS模拟器校准原理

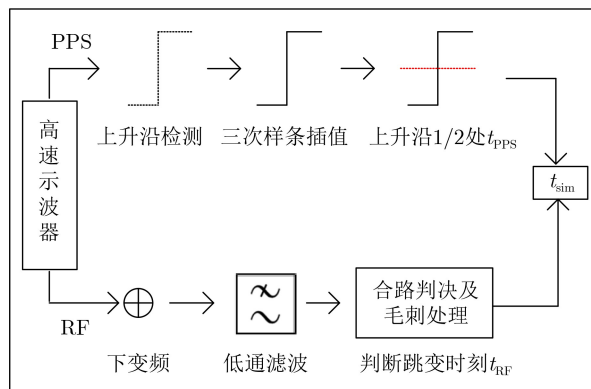


图3 采样数据相干解调处理算法原理

位中心到GNSS天线相位中心所经历的时延,需要测量及补偿,可由式(6)得到。其中,不同型号天线各自外包络线与相位中心之间的距离可通过国际GNSS服务(International GNSS Service, IGS)获得

$$t_{\text{air}} = \frac{s}{c} \quad (6)$$

其中,  $s$  为发射天线和GNSS天线各自相位中心间路径长度,为减小多径效应造成误差,在设置时需保证大于发射天线的远场条件,具体量值可由标准钢卷尺测得;  $c$  为空气中光速。

在整体校准过程中,发射天线射频连接器到天线的相位中心之间的GNSS射频信号传播时延,即发射天线时延,也需在最终解算中扣除。在微波暗室环境下,模拟真实GNSS射频信号,构建直连和无线实验场景,对不同场景下测量得到的伪距进行解算,完成发射天线的校准,其原理如图4所示。对于直连实验场景,伪距解算结果记为  $t_{\text{tare-int}}$ , 对于无线实验场景,伪距解算结果记为  $t_{\text{horn-horn}}$ , 两个喇叭天线间的空气传播时延记为  $t_{\text{air-horn}}$ , 在补偿线缆延迟后,由式(7)可算得发射天线时延值  $t_{\text{horn}}$

$$t_{\text{horn}} = \frac{(t_{\text{horn-horn}} - t_{\text{tare-int}} - t_{\text{air-horn}})}{2} \quad (7)$$

根据时间量值的传递路径,PPS输入时间参考和时频传递链内部时间参考之间的时延,即参考时延,也需要测量补偿,其测量原理如图5所示,在整体绝对校准过程中使用时间间隔计数器实时对两路PPS信号进行采样测量,若干时长后取均值作为其测量结果。

射频传播链路总时延是GNSS射频信号传播依次经过GNSS模拟器、发射天线、空气气隙、GNSS天线、天线馈线、时频传递主机及其中用到的辅助线缆的时间延迟总和。由于传播链路中涉及设备较

多,测量不便,可以对时频传递链测量的伪距进行解算得到射频传播链路的总时延  $t_{\text{int}}$  为

$$t_{\text{int}} = \frac{p}{c} \quad (8)$$

其中,  $p$  为解算时频传递链测量的伪距数据。

### 3 实验结果及验证实验

由于GNSS模拟器的兼容频点和各频点校准方法的相似性,以下仅讨论和实施了GPS L1C/A和BDS B1I频点的整体绝对校准。

#### 3.1 整体校准实验结果

整体绝对校准中,所用GNSS模拟器为湖南矩阵电子GNS8332,被校准的时频传递链为自研TLab-TFS-G1型时频传递链(代号TL07)。整体绝对校准的实验环境是位于北京交通大学获得中国合格评定国家认可委员会(China National Accreditation Service for conformity assessment, CNAS)认可的电磁兼容实验室暗室。TL07测量伪距数据采样间隔为1 s,其BDS B1I和GPS L1C/A频点伪距解算结果和标准差如图6和图7所示,标准差优于0.20 ns。

GNSS模拟器校准中,设置GNSS模拟器仿真单星、零伪距、单频点场景,且无其他干扰误差,利用第2节所述方法,对GNSS模拟器进行校准。由于较高的GNSS射频信号功率可使伪码翻转点更明显,因此在GNSS模拟器校准中调整其输出GNSS射频信号功率为最大,即-60 dBm。此处以GPS L1C/A频点下GNSS模拟器校准为例,高速实时示波器显示如图8所示,PPS信号3次样条插值前后插值比对如图9所示。

在发射天线校准中,利用GNSS模拟器仿真静态定位场景,时频传递链测量伪距数据的间隔为1 s,解算测量伪距数据得到发射天线校准时延。

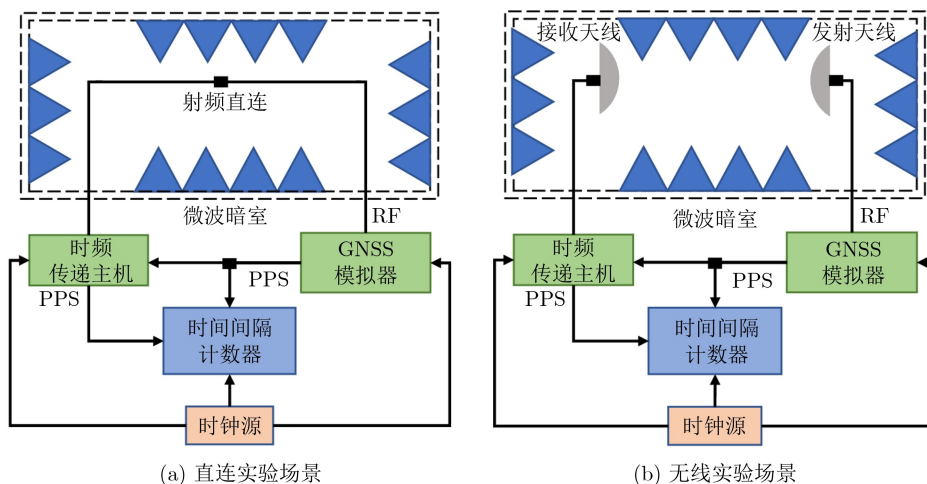


图4 发射天线校准原理

由于时频传递链硬件延迟与输入GNSS射频信号功率具有一定相关性，因此需保证各种实验场景下到达时频传递链输入端的GNSS射频信号功率相同，这可以通过调整GNSS模拟器输出功率来实现。通过对比时频传递链输入几个常用GNSS射频信号功率的伪距解算结果，选择时频传递链输入GNSS射频信号功率为-70 dBm进行发射天线校准实验。

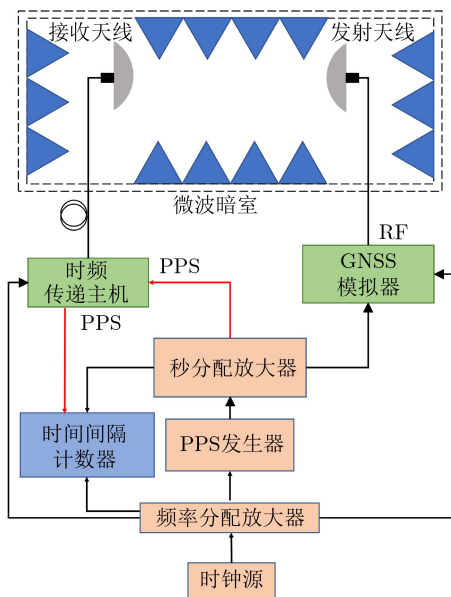


图5 参考时延测量原理

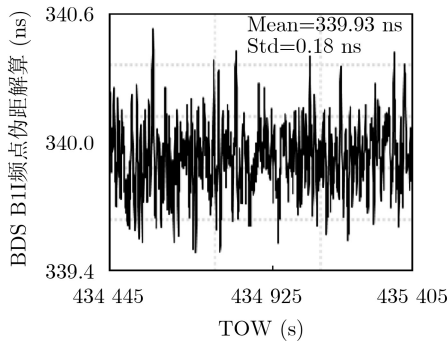


图6 BDS B1I频点伪距解算结果

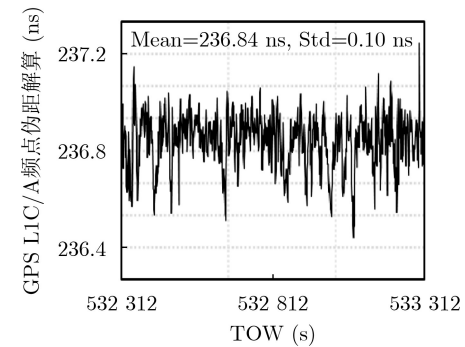
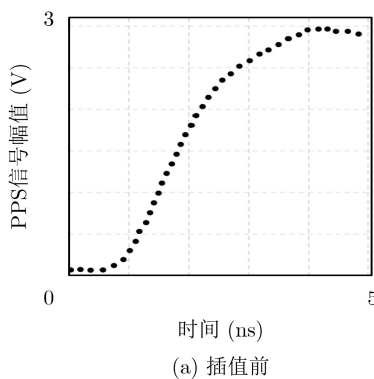


图7 GPS L1C/A频点伪距解算结果

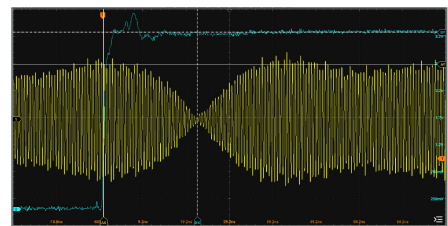


图8 GPS L1C/A频点GNSS模拟器校准

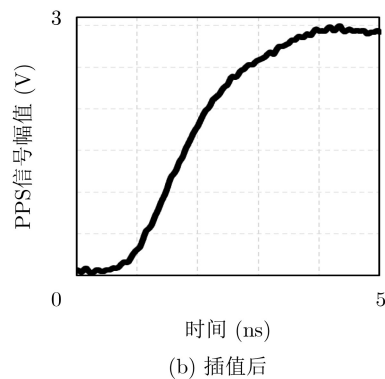


图9 PPS信号3次样条插值前后插值对比

空气传播时延校准中，使用标准钢卷尺测量发射天线和接收天线相位中心距离。参考时延测量中，采用时间间隔计数器，采样间隔为1 s。射频传播链路时延校准现场如图10所示。

综上，根据整体绝对校准原理，对TL07的整体校准结果总结如表1。

### 3.2 实验验证

通过传统分步绝对校准方法来验证整体校准实验的可靠性，即针对时频传递主机、GNSS天线及天线馈线分步测量补偿。时频传递主机校准原理如图11所示。

对于GNSS天线校准，用已校准发射天线对GNSS天线进行标定，实验设置按图4所示，设置直连实验场景，该场景下的伪距解算结果记为 $t_{\text{taro-sep}}$ ；设置无线实验场景，发射天线为喇叭天线，时延为 $t_{\text{horn}}$ ，接收天线为待校准的GNSS天线，该场景下的伪距解算结果记为 $t_{\text{horn-gnss}}$ ，发射天线和接收天

表1 时频传递链TL07整体绝对校准结果(ns)

	$t_{\text{int}}$	$t_{\text{sim}}$	$t_{\text{air}}$	$t_{\text{horn}}$	$t_{\text{ref-int}}$	$t_{\text{rx-int}}$
BDS B1I	339.93	151.10	2.00	1.75	57.25	242.33
GPS L1C/A	471.04	256.90	2.00	0.85	36.11	247.40

表2 时频传递链TL07分步绝对校准结果(ns)

	$t_{\text{sep}}$	$t_{\text{sim}}$	$t_{\text{gnss}}$	$t_{\text{ref-sep}}$	$t_{\text{cab}}$	$t_{\text{rx-sep}}$
BDS B1I	97.58	151.10	14.43	57.24	222.42	240.57
GPS L1C/A	227.07	256.90	17.48	36.06	222.42	246.13

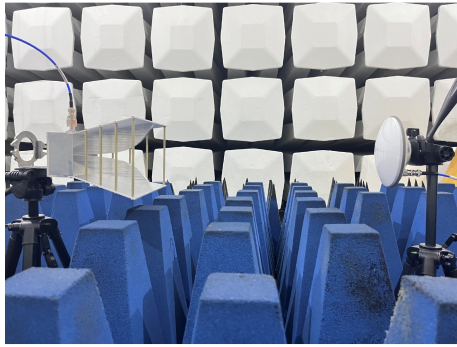


图10 射频传播时延校准现场图

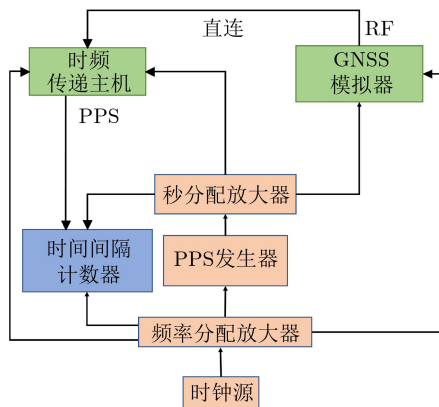


图11 时频传递主机分步绝对校准原理

线之间的空气传播时延记为 $t_{\text{air-gnss}}$ ，由式(9)得到GNSS天线时延 $t_{\text{gnss}}$

$$t_{\text{gnss}} = t_{\text{horn-gnss}} - t_{\text{ref-sep}} - t_{\text{air-gnss}} - t_{\text{horn}} \quad (9)$$

采用矢量网络分析仪对天线馈线进行校准，测量参数上选择1 kHz中频带宽来平衡测量动态范围和适度的扫描时间，选择1~2 GHz跨距覆盖目前所有可用的GNSS载波频率。

对于时频传递主机校准包括3个部分，分别是GNSS模拟器校准、参考时延测量、伪距解算，其具体方法见第2节，综上得到分步绝对校准为

$$t_{\text{rx-sep}} = t_{\text{sep}} - t_{\text{sim}} + t_{\text{ref-sep}} + t_{\text{cab}} + t_{\text{gnss}} \quad (10)$$

其中， $t_{\text{ref-sep}}$ 、 $t_{\text{sep}}$ 分别为分步绝对校准中时频传递主机的参考时延、伪距解算时延， $t_{\text{rx-sep}}$ 为时频传递主机硬件延迟， $t_{\text{sim}}$ 为GNSS模拟器时延， $t_{\text{gnss}}$ 为GNSS天线时延。表2为时频传递链TL07的分步绝对校准结果。

## 4 不确定度评估

### 4.1 整体绝对校准不确定度评估

不确定度是北斗时频传递链整体绝对校准中以衡量校准结果质量的重要指标之一，根据对北斗时频传递链整体绝对校准方法的研究，其不确定度评估主要分为不确定度A类评定方法和不确定度B类评定方法，前者是对在规定测量条件下(如重复性测量条件、期间精密度测量条件或复现性测量条件)测得的量值用统计分析的方法进行的测量不确定度分量的评定，后者是不同于测量不确定度A类评定的方法对测量不确定度分量进行的评定，如权威机构发布的量值、有证标准物质的量值、校准证书、仪器的漂移、经检定的测量仪器的准确度等级、根据人员经验推断的极限值等。根据时频传递链整体绝对校准实验过程，校准的合成标准不确定度 $u_{\text{int}}$ 为发射天线校准 $u_{\text{AD}}$ 、GNSS模拟器校准 $u_{\text{SD}}$ 、参考时延测量 $u_{\text{REF-int}}$ 及伪距解算 $u_{\text{Cal-int}}$ 标准不确定度的合成，评定如式(11)所示。其中，每项不确定度来源及评定在下文分析

$$u_{\text{int}} = (u_{\text{AD}}^2 + u_{\text{SD}}^2 + u_{\text{REF-int}}^2 + u_{\text{Cal-int}}^2)^{1/2} \quad (11)$$

在对发射天线校准中，采用普通钢卷尺对天线相位中心路径测量引入的不确定度记作 $u_{\text{Meas}}$ ，根据卷尺测量不确定度与测量长度的关系<sup>[13]</sup>，结合本实验中接收天线和发射天线相位中心0.60 m的实测距离评定出的保守值。由天线相位中心稳定性引入的不确定度记作 $u_{\text{APC}}$ ，参考计量技术规范JJF 1403-2013中校准实例给出的天线相位中心稳定性1.60 mm评定的保守值<sup>[14]</sup>。由开关机特性引入的不确定度记作 $u_{\text{Reset-RX}}$ ，在实验布置不变的条件下，多次重启时频传递链后，根据对发射天线校准中伪距解算结果最大偏差0.13 ns为该项不确定度评估结果。由时频传递链GNSS射频信号输入功率电平引入的不确定度记作 $u_{\text{RF}}$ ，参考文献<sup>[8]</sup>方法将GNSS射频信号功率调整至接近实际GNSS信号接收功率-130~-120 dBm，时频传递链自动增益控制保持在线性区域时所给出的评估结果。由GNSS模拟器通道间偏差引入的不确定度记作 $u_{\text{Bais}}$ ，根据发射天线校准中时频传递链测量GNSS模拟器各通道的伪距最大偏差0.01 ns为该项不确定度评估结果。由热灵敏度引入的不确定度记作 $u_{\text{Tcm-RX}}$ ，为参考文献<sup>[9]</sup>给出

的同类型时频传递链温度系数 $0.083 \text{ ns}/^\circ\text{C}$ ，结合整体校准实验中实际温度变化 $\pm 1^\circ\text{C}$ 评定出的保守值。由实验重复性引入的不确定度记作 $u_{\text{Rep-AD}}$ ，根据发射天线校准中解算时频传递链和GNSS模拟器伪距之间的差值的最大标准差(1 000个数据点)。综上，由发射天线校准引入的标准不确定度 $u_{\text{AD}}$ 如式(12)所示，具体评估结果如表3。

$$u_{\text{AD}} = (u_{\text{Meas}}^2 + u_{\text{APC}}^2 + u_{\text{Reset-RX}}^2 + u_{\text{RF}}^2 + u_{\text{Bais}}^2 + u_{\text{Tem-RX}}^2 + u_{\text{Rep-AD}}^2)^{1/2} \quad (12)$$

在对GNSS模拟器的校准中，由高速实时示波器分辨率引入的不确定度记作 $u_{\text{Res-osc}}$ ，由高速实时示波器触发错误引入的不确定度记作 $u_{\text{Trig}}$ ，均参考高速实时示波器产品手册得出。由相干数据处理引入的不确定度记作 $u_{\text{Code}}$ ，该项参考ESA方法给出的评估结果<sup>[9]</sup>，结合实际情况有所放大。在多次对GNSS模拟器校准中发现，仅重启GNSS模拟器情况下，前后用高速实时示波器对伪码翻转点与PPS上升沿之间进行标定的时延结果有一定偏差，记为由GNSS模拟器开关机特性引入的不确定度记作 $u_{\text{Reset-Sim}}$ ，经多次重复实验，对GNSS模拟器校准结果的最大偏差为 $0.50 \text{ ns}$ ，取为该项不确定度评估结果。由GNSS模拟器配置RF功率引入的不确定度记作 $u_{\text{Pow}}$ ，该项参考ESA方法给出的评估结果<sup>[9]</sup>。综上，由GNSS模拟器校准引入的标准不确定度 $u_{\text{SD}}$ 如式(13)所示，具体评估结果如表4。

$$u_{\text{SD}} = (u_{\text{Res-osc}}^2 + u_{\text{Trig}}^2 + u_{\text{Code}}^2 + u_{\text{Reset-Sim}}^2 + u_{\text{Pow}}^2)^{1/2} \quad (13)$$

在参考时延测量中，由时间间隔计数器分辨率误差引入的不确定度记作 $u_{\text{Res-tic}}$ ，由时间间隔计数器相对误差引入的不确定度记作 $u_{\text{Rel-tic}}$ ，参考CNES方法给出评估结果<sup>[8]</sup>。由实验重复性引入的不确定度记作 $u_{\text{Rep-REF}}$ ，取参考时延测量结果的标准差(500个数据点)。综上，由参考时延测量引入的标准不确定度 $u_{\text{REF-int}}$ 如式(14)所示，具体评估结果如表5。

表 3 发射天线校准不确定度评估(ns)

校准不确定度来源	类型	值
天线相位中心路径测量	B	0.01
天线相位中心稳定性	B	0.02
开关机特性	B	0.13
GNSS射频信号输入功率电平	B	0.10
GNSS模拟器通道间偏差	B	0.01
热灵敏度	B	0.20
重复性	A	0.16
合成标准不确定度	/	0.31

$$u_{\text{REF-int}} = (u_{\text{Res-tic}}^2 + u_{\text{Rel-tic}}^2 + u_{\text{Rep-REF}}^2)^{1/2} \quad (14)$$

在伪距解算中，由时频传递链的热灵敏度引入的不确定度 $u_{\text{Tem-RX}}$ 、开关机特性引入的不确定度 $u_{\text{Reset-RX}}$ 、GNSS射频信号输入功率电平引入的不确定度 $u_{\text{RF}}$ 及GNSS模拟器通道间偏差引入的不确定度 $u_{\text{Bais}}$ 的评估方法及结果均与在对发射天线校准步骤中不确定度评估相同。由实验重复性引入的不确定度记作 $u_{\text{Rep-Cal}}$ ，取伪距解算结果的最大标准差(1 000个数据点)。综上，由伪距解算引入的标准不确定度 $u_{\text{Cal-int}}$ 如式(15)所示，具体评估结果如表6。

$$u_{\text{Cal-int}} = (u_{\text{Bais}}^2 + u_{\text{Tem-RX}}^2 + u_{\text{Reset-RX}}^2 + u_{\text{RF}}^2 + u_{\text{Rep-Cal}}^2)^{1/2} \quad (15)$$

限于篇幅，此处仅以时频传递链TL07的BDS B1I频点整体绝对校准为示例，对整体步绝对校准实验中每一步的不确定因素进行分析，根据不确定度来源进行评定，其不确定度评估结果如表7所示，GPS L1C/A频点不确定度评估细项与其类似。

#### 4.2 分步绝对校准不确定度评估

分步绝对校准与整体绝对校准是分别对同一套时频传递链两次不同的测量，因此每次测量结果都

表 4 GNSS模拟器校准不确定度评估(ns)

校准不确定度来源	类型	值
高速实时示波器分辨率	B	0.05
高速实时示波器触发误差	B	0.20
相干数据处理	B	0.20
开关机特性	B	0.50
配置RF功率	B	0.10
合成标准不确定度	/	0.59

表 5 参考时延测量不确定度评估(ns)

校准不确定度来源	类型	值
时间间隔计数器分辨率误差	B	0.10
时间间隔计数器相对误差	B	0.05
重复性	A	0.06
合成标准不确定度	/	0.13

表 6 伪距解算不确定度评估(ns)

校准不确定度来源	类型	值
GNSS模拟器通道间偏差	B	0.01
热灵敏度	B	0.20
开关机特性	B	0.13
GNSS射频信号输入功率电平	B	0.10
重复性	A	0.18
合成标准不确定度	/	0.32

要对应一次不确定度评定。时频传递链分步绝对校准的总体不确定度 $u_{\text{sep}}$ 为GNSS天线校准 $u_{\text{GNSS}}$ 、天线馈线校准 $u_{\text{Cab}}$ 和时频传递主机校准 $u_{\text{Rec}}$ 标准不确定度的合成,分步绝对校准的总体不确定度评定如式(16)所示。其中,每项不确定度来源及评定在下文分析。

$$u_{\text{sep}} = (u_{\text{GNSS}}^2 + u_{\text{Cab}}^2 + u_{\text{Rec}}^2)^{1/2} \quad (16)$$

在GNSS天线校准中,其不确定度来源包括天线相位中心路径测量引入的不确定度 $u_{\text{Meas}}$ 、天线相位中心稳定性引入的不确定度 $u_{\text{APC}}$ 、时频传递链开关机特性引入的不确定度 $u_{\text{Reset-RX}}$ 、GNSS模拟器通道间偏差引入的不确定度 $u_{\text{Bais}}$ 、热灵敏度引入的不确定度 $u_{\text{Tem-RX}}$ 、实验重复性引入的不确定度 $u_{\text{Rep-GNSS}}$ ,以上不确定度评定方法在4.1节有详细介绍。由于GNSS天线校准过程中额外使用发射天线为辅助,GNSS天线校准不确定度还应包括发射天线校准引入的不确定度 $u_{\text{AD}}$ ,取4.1节中的 $u_{\text{AD}}$ 的评估结果。综上,由GNSS天线校准引入的标准不确定度 $u_{\text{GNSS}}$ 如式(17)所示,具体评估结果如表8。

$$u_{\text{GNSS}} = (u_{\text{Meas}}^2 + u_{\text{APC}}^2 + u_{\text{Reset-RX}}^2 + u_{\text{Bais}}^2 + u_{\text{Tem-RX}}^2 + u_{\text{Rep-GNSS}}^2 + u_{\text{AD}}^2)^{1/2} \quad (17)$$

在天线馈线校准中,由矢量网络分析仪两接口初始校准引入的不确定度记作 $u_{\text{VNA}}$ ,该项参考文献[15]给出的评估结果。由线缆形变引入的不确定度记作 $u_{\text{Sha}}$ ,参考文献[9]给出的评估结果。由天线馈线温度效应引入的不确定度记作 $u_{\text{Tem-Cab}}$ ,该项参考文

表7 整体绝对校准不确定度评估(ns)

校准不确定度来源	值
发射天线校准	0.31
GNSS模拟器校准	0.59
参考时延测量	0.13
伪距解算	0.32
合成标准不确定度	0.80

表8 GNSS天线校准不确定度评估(ns)

校准不确定度来源	类型	值
天线相位中心路径测量	B	0.01
天线相位中心稳定性	B	0.02
开关机特性	B	0.13
RF输入功率电平	B	0.10
模拟器通道间偏差	B	0.01
热灵敏度	B	0.20
发射天线校准	B	0.31
重复性	A	0.18
合成标准不确定度	/	0.44

献[16]给出的同轴线缆温度系数,结合本实验中实际温度变化 $\pm 1^\circ\text{C}$ 保守评定得出。同轴线缆转接头引入的不确定度记作 $u_{\text{Ada}}$ ,该项通过测量若干个转接头串联群时延,评定由单个转接头引入的不确定度为0.10 ns,根据实验中实际使用转接头数量评定该项标准不确定度为0.40 ns。由实验重复性引入的不确定度记作 $u_{\text{Rep-Cab}}$ ,取网分测量线缆原始数据标准差(500个数据点)。综上,由天线馈线校准引入的标准不确定度 $u_{\text{Cab}}$ 如式(18)所示,具体评估结果如表9。

$$u_{\text{Cab}} = (u_{\text{VNA}}^2 + u_{\text{Sha}}^2 + u_{\text{Tem-Cab}}^2 + u_{\text{Ada}}^2 + u_{\text{Rep-Cab}}^2)^{1/2} \quad (18)$$

时频传递主机校准中,其不确定度来源包括GNSS模拟器校准引入的不确定度 $u_{\text{SD}}$ 、参考时延测量引入的不确定度 $u_{\text{REF-sep}}$ 及伪距解算引入的不确定度 $u_{\text{Cal-sep}}$ ,以上不确定度评定方法与整体绝对校准中评估方法类似,在4.1节有详细介绍。综上,由时频传递主机校准引入的标准不确定度 $u_{\text{Rec}}$ 如式(19)所示,具体评估结果如表10。

表9 天线馈线校准不确定度评估(ns)

校准不确定度来源	类型	值
矢量网络分析仪两接口初始校准	B	0.20
线缆形变	B	0.15
温度效应	B	0.12
转接头	B	0.40
重复性	A	0.20
合成标准不确定度	/	0.53

表10 时频传递主机校准不确定度评估(ns)

校准不确定度来源	类型	值
矢量网络分析仪两接口初始校准	B	0.20
线缆形变	B	0.15
GNSS模拟器校准	B	0.12
温度效应	B	0.12
转接头	B	0.40
重复性	A	0.20
时间间隔计数器分辨率误差	B	0.10
参考时延测量	B	0.05
时间间隔计数器相对误差	B	0.05
重复性	A	0.06
模拟器通道间偏差	B	0.01
热灵敏度	B	0.20
伪距解算	B	0.13
开关机特性	B	0.13
RF输入功率电平	B	0.10
重复性	A	0.18
合成标准不确定度	/	0.63



$$u_{\text{Rec}} = (u_{\text{SD}}^2 + u_{\text{REF-sep}}^2 + u_{\text{Cal-sep}}^2)^{1/2} \quad (19)$$

限于篇幅，此处仅以时频传递链TL07的BDS B1I频点分步绝对校准为示例，其不确定度评定结果如表11所示，GPS L1C/A频点不确定度评估细项与其类似。

## 5 结论

本文研究了对时频传递链整体绝对校准方法，设计了时频传递链整体绝对校准方案，搭建了时频传递链整体绝对校准系统及校准验证平台，对同一套时频传递链在BDS B1I和GPS L1C/A频点进行了整体和分步绝对校准实验，具体校准步骤比对如表12所示，整体绝对校准相较传统绝对校准方法，避免了对GNSS天线及天线馈线的单独校准，减少了不确定度来源，改善了绝对校准方法的测量不确定度水平。

校准结果如表13所示，两种方法校准结果最大偏差为1.76 ns；分别对两种校准方法的测量不确定度进行了评定，分步绝对校准合成标准不确定度为1.00 ns，整体绝对校准合成标准不确定度为0.80 ns；两种方法的校准结果偏差吻合在不确定度范围内，验证了整体绝对校准方法的可行性。

相比分步校准方法将时频传递主机、GNSS天

线及天线馈线分别单独校准，本文提供了一种操作步骤更简、不确定度更低的绝对校准方法，可对时频传递链进行整体校准，有效缓解分步绝对校准实验步骤复杂、不确定度来源多的问题。

## 参考文献

- [1] PETIT G and DEFRAIGNE P. Calibration of GNSS stations for UTC[J]. *Metrologia*, 2023, 60(2): 025009. doi: [10.1088/1681-7575/acbd52](https://doi.org/10.1088/1681-7575/acbd52).
- [2] DELPORTE J and VALAT D. CNES Accurate monitoring of GNSS time scales based on absolute calibration[C]. 2022 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium, Paris, France, 2022: 1–5. doi: [10.1109/EFTF/IFCS4560.2022.9850525](https://doi.org/10.1109/EFTF/IFCS4560.2022.9850525).
- [3] 梁坤, 张爱敏. GLONASS时间频率传递研究[J]. *计量学报*, 2011, 32(2): 172–177. doi: [10.3969/j.issn.1000-1158.2011.02.17](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1158.2011.02.17).
- [4] LIANG Kun and ZHANG Aimin. Study on time and frequency dissemination by GLONASS[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2011, 32(2): 172–177. doi: [10.3969/j.issn.1000-1158.2011.02.17](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1158.2011.02.17).
- [5] REN Zhiling, GONG Hang, PENG Jing, et al. Common-view time transfer with BeiDou new navigation signals[C]. The 15th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI), Beijing, China, 2022: 1–5. doi: [10.1109/CISP-BMEI56279.2022.9980287](https://doi.org/10.1109/CISP-BMEI56279.2022.9980287).
- [6] LI Guojun, WANG Cunjun, and YE Huchun. Performance analysis of BeiDou-3 common-view time transferring[J]. *Chinese Astronomy and Astrophysics*, 2022, 46(4): 471–485. doi: [10.1016/j.chinastron.2022.11.006](https://doi.org/10.1016/j.chinastron.2022.11.006).
- [7] PETIT G, JIANG Z, UHRICH P, et al. Differential calibration of Ashtech Z12-T receivers for accurate time comparisons[C]. The 14th European Frequency and Time Forum, Turin, Italy, 2000: 40–4.
- [8] PETIT G, JIANG Zhiheng, WHITE J, et al. Absolute calibration of an Ashtech Z12-T GPS receiver[J]. *GPS Solutions*, 2001, 4(4): 41–46. doi: [10.1007/pl00012865](https://doi.org/10.1007/pl00012865).
- [9] VALAT D and DELPORTE J. Absolute calibration of timing receiver chains at the nanosecond uncertainty level for GNSS time scales monitoring[J]. *Metrologia*, 2020, 57(2): 025019. doi: [10.1088/1681-7575/ab57f5](https://doi.org/10.1088/1681-7575/ab57f5).
- [10] GARBIN E, DEFRAIGNE P, KRYSSTEK P, et al. Absolute calibration of GNSS timing stations and its applicability to real signals[J]. *Metrologia*, 2019, 56(1): 015010. doi: [10.1088/1681-7575/aaf2bc](https://doi.org/10.1088/1681-7575/aaf2bc).
- [11] KASAT N, NEELAPPA S A, SINGH F B, et al. Absolute calibration of NavIC reference receiver[C]. 2022 URSI

表 11 分步绝对校准不确定度评估(ns)

校准不确定度来源	值
GNSS天线校准	0.44
天线馈线校准	0.53
时频传递主机校准	0.63
合成标准不确定度	1.00

表 12 绝对校准步骤比对

校准步骤	整体	分步
发射天线校准	√	√
GNSS天线校准	×	√
天线馈线校准	×	√
GNSS模拟器校准	√	√
参考时延测量	√	√
伪距解算	√	√

表 13 绝对校准结果比对(ns)

序号		整体	分步	偏差
BDS B1I	校准结果	242.33	240.57	1.76
	不确定度评定	0.80	1.00	/
GPS L1C/A	校准结果	247.4	246.13	1.27
	不确定度评定	0.80	1.00	/

- Regional Conference on Radio Science, Indore, India, 2022: 1-4. doi: [10.23919/URSI-RCRS56822.2022.10118474](https://doi.org/10.23919/URSI-RCRS56822.2022.10118474).
- [11] LIANG Kun, FELICITAS A, GERARD P, *et al.* Evaluation of BeiDou time transfer over multiple inter-continental baselines towards UTC contribution[J]. *Metrologia*, 2018, 55(4): 513-525. doi: [10.1088/1681-7575/aac586](https://doi.org/10.1088/1681-7575/aac586).
- [12] LIANG Kun, ZHANG Aimin, YANG Zhiqiang, *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, Besancon, France, 2017: 788-797. doi: [10.1109/FCS.2017.8089036](https://doi.org/10.1109/FCS.2017.8089036).
- [13] 陶香琴. 标准钢卷尺测量结果不确定度评估[J]. *中国计量*, 2005(2): 66-69. doi: [10.16569/j.cnki.cn11-3720/t.2005.02.045](https://doi.org/10.16569/j.cnki.cn11-3720/t.2005.02.045).  
TAO Xiangqin. Uncertainty assessment of measurement results of standard steel tape measure[J]. *China Metrology*, 2005(2): 66-69. doi: [10.16569/j.cnki.cn11-3720/t.2005.02.045](https://doi.org/10.16569/j.cnki.cn11-3720/t.2005.02.045).
- [14] 国家质量监督检验检疫总局. 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]. 北京: 中国质检出版社, 2013.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. JJF 1403-2013 Calibration specification for GNSS receivers used in time measurement[S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2013.
- [15] ROVERA D, ABGRALL M, UHRICH P, *et al.* Techniques of antenna cable delay measurement for GPS time transfer[C]. 2015 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium & the European Frequency and Time Forum, Denver, USA, 2015: 239-244. doi: [10.1109/FCS.2015.7138832](https://doi.org/10.1109/FCS.2015.7138832).
- [16] LIANG Kun, FELDMANN T, BAUCH A, *et al.* Performance evaluation of NIM GPS receivers in use for time transfer with PTB[C]. The EFTF-2010 24th European Frequency and Time Forum, Noordwijk, Netherlands, 2010: 1-8. doi: [10.1109/EFTF.2010.6533694](https://doi.org/10.1109/EFTF.2010.6533694).
- 梁 坤: 男, 教授, 研究方向为精密测量、时间频率标准产生、精准测量、传递和同步(守时、授时)等。  
焦祥旭: 男, 硕士生, 研究方向为精密测量、时间频率传递和同步等。  
余 泐: 男, 硕士生, 研究方向为精密测量、时间频率传递和同步等。

责任编辑: 余 蓉