文章编号:1673-0291(2026)02-0214-09 **DOI**:10.11860/j.issn.1673-0291.20250024

光纤双向时间传递链路校准及验证方法研究

齐苗苗[1a,1b],梁 坤[1a,1b],杨志强[2],邱旭强[3],张学东[4],王 剑[1a,1b],林平卫[2],李雨峰[1a,1b]

(1.北京交通大学 a.先进轨道交通自主运行全国重点实验室,b.自动化与智能学院,北京 100044;
2.中国计量科学研究院,北京 100029;3.烟台持久钟表有限公司,山东 烟台 264003;
4.烟台持久钟表集团有限公司,山东 烟台 264003)

摘 要:光纤双向时间传递(Two-Way Optic-fiber Time Transfer,TWOTT)技术是目前不确定度水平最优的时间传递方法之一,其重复性可达百皮秒量级.链路校准作为关键影响因素,会直接影响时间传递结果的准确性.针对当前光纤双向时间传递链路校准研究较少、缺乏标准化方法及校准结果验证困难等问题,提出了一种基于共钟差(Common Clock Difference,CCD)的TWOTT链路校准及验证方法.首先,构建由两台光纤双向时间传递装置组成的时间传递链路,在共钟条件下开展TWOTT链路校准实验,并利用CCD方法获得链路校准结果;然后,对链路校准结果进行不确定度评定,得到链路校准结果的合成标准不确定度;最后,提出利用多种时间传递链路实验结果进行交叉验证的检验方法,在实验室条件下利用不同时间传递链路同时对两个时标进行比对实验,对TWOTT链路校准结果进行验证.实验结果表明:由两台光纤双向时间传递装置构成的时间传递链路校准结果为0.189 ns,合成标准不确定度为81 ps;在实验室中采用3种不同的时间传递链路同时比对两个时标时,所得钟差差值均处于比对不确定度范围内,验证了TWOTT链路校准方法的有效性与准确性,为光纤时间传递链路校准及验证提供了技术参考.

关键词:计量学;TWOTT;链路校准;时间传递;校准验证;不确定度
中图分类号:TB929.11 **文献标志码**:A

Study on calibration and verification methods for two-way optic-fiber time transfer links

QI Miaomiao[1], *LIANG Kun*[1], *YANG Zhiqiang*[2], *QIU Xuqiang*[3], *ZHANG Xuedong*[4], *WANG Jian*[1], *LIN Pingwei*[2], *LI Yufeng*[1]

(1a. State Key Laboratory of Advanced Rail Autonomous Operation, 1b. School of Automation and Intelligence, Beijing Jiaotong University, Beijing, 100044, China; 2.National Institute of Metrology, Beijing 100029, China; 3.Yantai Chijiu Clock Co., Ltd., Yantai Shandong, 264003, China;4.Yantai Chijiu Clock Group Co., Ltd. Yantai Shandong, 264003, China)

Abstract: Two-Way Optic-fiber Time Transfer (TWOTT) is currently one of the most accurate time

收稿日期:2025-02-18;**修回日期**:2026-03-15
基金项目:国家自然科学基金(12473072);泰山产业领军人才(tscx202408155);烟台市重大科技创新工程项目(2024ZDCX002);中央高校基本科研业务费专项资金(W23YJS00280)
Foundation items: National Natural Science Foundation of China(12473072); TaiShan Industrial Experts Program(tscx202408155); Yantai Major Science &.Technology Innovation and Development Project(2024ZDCX002); Fundamental Research Funds for the Central Universities(W23YJS00280)
第一作者:齐苗苗(1994—),女,河北石家庄人,博士生.研究方向为精密测量,高精度光纤时间频率传递和同步.**email**: 22110058@bjtu.edu.cn.
通信作者:梁坤(1980—),男,山西大同人,教授,博士,博士生导师.**email**: liangk@bjtu.edu.cn.

引用格式:齐苗苗,梁坤,杨志强,等.光纤双向时间传递链路校准及验证方法研究[J].北京交通大学学报,2026,50(2):214-222.
QI Miaomiao,LIANG Kun,YANG Zhiqiang,et al.Study on calibration and verification methods for two-way optic-fiber time transfer links[J].Journal of Beijing Jiaotong University,2026,50(2):214-222.(in Chinese)

transfer methods in terms of uncertainty performance, capable of achieving repeatability on the order of hundreds of picoseconds. As a critical influencing factor, link calibration directly affects the accuracy of time transfer results. To address current scarcity of research on TWOTT link calibration, the lack of standardized methods, and the difficulties in verifying calibration results, this study proposes a TWOTT link calibration method based on Common Clock Difference (CCD). First, a time transfer link composed of two TWOTT devices is established. Calibration experiments are conducted under common-clock conditions, and the CCD method is employed to obtain the link calibration results. Then, an uncertainty evaluation is performed to determine the combined standard uncertainty of the link calibration. Finally, a cross-validation method utilizing experimental results from multiple time transfer links is proposed. Under laboratory conditions, different time transfer links are used to simultaneously compare two time scales, thereby verifying the TWOTT link calibration results. The experimental results demonstrate that the calibration value of the time transfer link composed of two TWOTT devices is 0.189 ns, with a combined standard uncertainty of 81 ps. When three different time transfer links are used simultaneously to compare two time scales in the laboratory, the differences among the obtained clock offsets all fall within the range of comparison uncertainty. These results verify the effectiveness and accuracy of the proposed TWOTT link calibration method, providing a technical reference for the calibration and verification of fiber-optic time transfer links.

Keywords: metrology; TWOTT; link calibration; time transfer; calibration verification; uncertainty

时间作为7个基本物理量之一,其基本单位“秒”不仅具有绝对独立性,同时也是当前复现准确度最高的物理量,不确定度稳定在10^{-16}量级.随着更高性能原子钟的出现,预期可达10^{-18}量级,其复现准确度远高于其他6个基本单位[1].自2019年5月20日起正式生效的修订国际单位制(International System of Units, SI)将“秒”定义列于7个基本单位之首[2],体现了时间单位的中心地位.国际标准时间协调世界时(Coordinated Universal Time, UTC)由国际原子时(International Atomic Time, TAI)经闰秒调整产生,并由国际计量局(International Bureau of Weights and Measures, BIPM)负责维护[3-4],通过远距离时间频率传递技术传播至各个国家的时间计量实验室,经过时区调整为本地提供时间服务.

目前,应用最广泛的远距离时间频率传递与比对技术包括全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)时频传递和卫星双向时频传递(Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer, TWSTFT),同时也是BIPM计算TAI时所采用的两项主要技术[5].其中,GNSS能够提供优于5 ns的时间比对不确定度,及优于5×10^{-14}/d的频率比对不确定度[6];TWSTFT的时间比对不确定度可达1 ns,频率比对不确定度可达10^{-15}/d[7].

链路校准作为影响比对不确定度的关键因素,将直接影响系统时频传递的准确性.国内外相关单位针对GNSS和TWSTFT链路校准技术展开了深入研究[8-11],GNSS链路校准常采用差分校准和绝对校准,并通过不同校准方法所得结果的互比进一步验证校准值的准确性,若吻合在校准不确定度范围内则认为校准值准确.TWSTFT链路校准的常规实现方法包括模拟器法、单移动站法和双移动站法,但由于校准过程依赖卫星链路,并受到大气层、电离层以及卫星漂移等因素影响,校准不确定度很难突破1 ns[12].在TWSTFT技术基础上,光纤双向时间传递(Two-Way Optic-fiber Time Transfer, TWOTT)技术使用光纤链路替代卫星进行传输,可实现百皮秒量级的时间比对不确定度,极低的比对不确定度使得TWOTT技术被广泛应用于计量科学、基础物理研究以及国际时间标准比对等重要领域[13-14].近年来,TWOTT技术研究取得了显著进展,BIPM于2012年在波兰两个城市之间建立了首个可运行的TWOTT链路,光纤长度达420 km,用于验证TWSTFT和GNSS时间传递技术的准确性[15].德国物理技术研究院(Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB)[16]于同年使用TWOTT和全球定位系统(Global Positioning System, GPS)同时比对相距73 km的氢原子钟和参考时标UTC(PTB),实验结果表明,TWOTT的时间比对不确定度相比GPS降低近10倍.中国计量科学研究院(National Institute of Metrology, NIM)[17]于2014年构建长度达109 km的TWOTT比对链路,并在2019年实现TWOTT系统信息的实时处理和可视化[18],在2022年

进一步基于TWOTT链路实现对铷原子钟的实时驯服[19].

上述研究表明,TWOTT系统在远程时间溯源过程中具有高精度、低噪声、安全可靠等多方面优势.对于高精度时间传递系统,时频传递链路校准(即时频传递链路硬件延迟测量)是降低比对不确定度的关键.目前光纤时频传递链路校准研究较少且缺乏标准化方法,同时百皮秒量级的时间比对不确定度要求使得链路校准结果的验证更加具有挑战性.

针对当前TWOTT链路校准研究较少、缺乏标准化方法以及校准结果验证困难等问题,本文围绕TWOTT链路校准及结果验证开展研究.首先,基于共钟差方法建立TWOTT链路校准实验方案,对链路硬件延迟差进行测量与分析;然后,对链路校准结果的不确定度来源进行评定,分析影响校准结果的主要因素;最后,针对校准结果验证困难的问题,设计多种时间传递链路交叉比对实验,对TWOTT链路校准结果进行验证,为光纤时间传递链路校准及相关标准规范的制定提供参考.

1 TWOTT技术

1.1 调制与解调

在TWOTT系统中,调制解调器(Modulator-Demodulator, Modem)是实现两地原子钟高精度比对的核心设备,其内部结构如图1所示,主要包括PRN码生成、时间戳、控制、时间间隔计数及调制/解调等功能模块.其中,PRN码生成模块支持PN1~PN5共5种码型,码速率可选1、2.5、5、10、20 Mchip/s,调制模块载波频率可调范围为52~88 MHz.

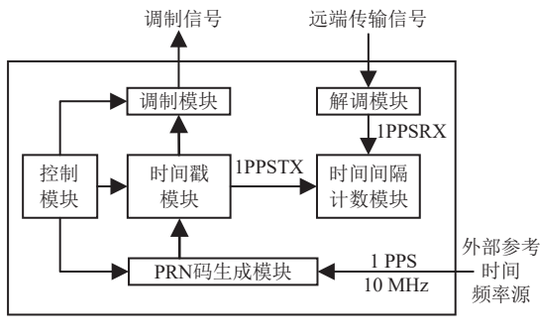


图1 调制解调器结构图

Fig.1 Structural diagram of modem

Modem在接收外部参考时频信号后,由PRN码生成模块产生伪随机码,经时间戳模块标记时间信息,再通过调制模块将PRN码调制到载波上,经光纤链路发送至远端.接收端通过解调模块恢复时频信号,并由时间间隔计数器测量本地与远端信号的时间间隔.收发两端在数据回传后分别计算得到站间钟差.

1.2 TWOTT原理

TWOTT技术可实现异地标准时间频率源的实时、精确且稳定的比对,其原理如图2所示.以参考端(时钟A)向客户端(时钟B)的传输为例:参考端原子钟输出的时间频率信号经射频同轴电缆接入Modem 1,在其内部将生成的PRN码调制到载波上,再经电/光转换模块转换为光信号,通过环形器耦合至光纤链路进行远距离传输.客户端环形器接收到光信号后,经光/电转换模块输出至Modem 2,对调制的PRN码进行解调.客户端执行与参考端相同的过程,通过双向时间互换协议交换时间戳数据,利用路径对称性抵消光纤传输延迟,最终精确计算实现两站钟差比对.

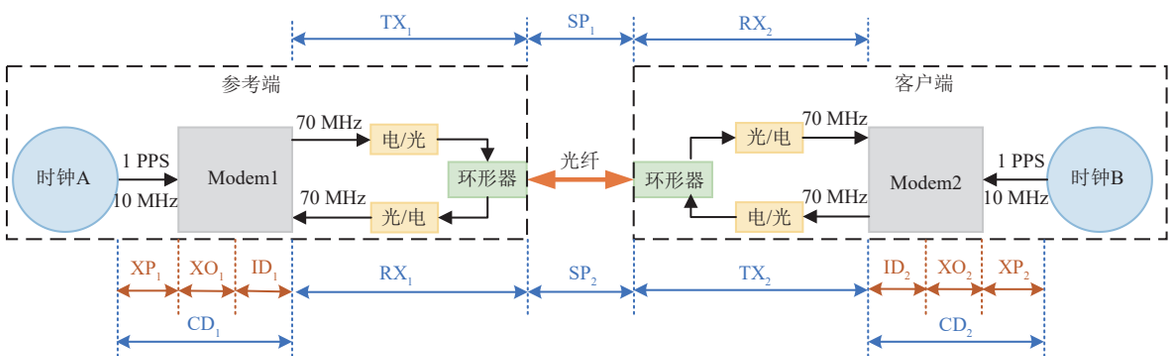


图2 TWOTT原理图

Fig.2 Principle diagram of TWOTT

当时钟A发送信号时,参考端Modem 1内部时间间隔计数模块开始计时,直到接收到来自客户端的时钟B信号时停止计时;同样地,当时钟B发送信号时,客户端Modem 2内部时间间隔计数模块开始计时,接收到参考端时钟A的信号时停止计时.假设时钟A的时刻相对于时钟B存在超前,两个时间间隔计数模块的读数可以通过路径传输延迟进行表示.

参考端 Modem 1 内部时间间隔计数模块的测量结果 TI_1 的表达式为

$$TI_1=SP_2+TX_2+CD_2+RX_1+(TS_1-TS_2) \quad (1)$$

客户端 Modem 2 内部时间间隔计数模块的测量结果 TI_2 的表达式为

$$TI_2=SP_1+TX_1+CD_1+RX_2-(TS_1-TS_2) \quad (2)$$

式(1)和式(2)相减可得到时钟 A 和时钟 B 的差值表达式为

$$\begin{aligned}TS_1-TS_2=&0.5(TI_1-TI_2)+\\&0.5(SP_1-SP_2)+0.5(TX_1-RX_1)-\\&0.5(TX_2-RX_2)+0.5(CD_1-CD_2)\end{aligned} \quad (3)$$

式中:TS_1、TS_2 分别表示参考端和客户端两地的时间频率参考;SP_1、SP_2 分别表示参考端到客户端及客户端到参考端的路径延迟;TX_1、TX_2 表示参考端和客户端的发射传输过程中的信号延迟;RX_1、RX_2 表示参考端和客户端的接收传输过程中的信号延迟;CD_1、CD_2 表示 TWOTT 链路校准延迟.

2　校准

2.1　校准原理

链路精密校准是保证 TWOTT 系统实现时间信号精准传递的必要前提,因此 TWOTT 设备在开展双向比对实验之前,需要进行链路校准.由图 2 可知,TWOTT 链路校准延迟包括 3 个部分,分别为:外部参考延迟,即本地参考时间频率源到 Modem 输入之间的同轴射频线缆延迟,通常采用时间间隔测量法,通过 SRS 公司的 SR620 型号计数器直接测量得到;内部参考延迟,即 Modem 输入端到内部参考信号之间的延迟,通常使用计数器进行差分测量;Modem 内部硬件延迟,即 Modem 发送和接收信号之间的延迟,包括电路板布线、内部线缆等因素导致的延迟.因此,链路校准延迟的新表达式为

$$CD_1-CD_2=XP_1-XP_2+XO_1-XO_2+ID_1-ID_2 \quad (4)$$

式中:XP_1、XP_2 分别表示参考端和客户端的外部参考延迟,统一表示为 XP_i;XO_1、XO_2 分别表示参考端和客户端的内部参考延迟,统一表示为 XO_i;ID_1、ID_2 分别表示参考端和客户端的 Modem 内部硬件延迟.

由式(4)可知,TWOTT 链路校准实质为精确测量并补偿 Modem 硬件延迟的过程.TWOTT 系统在双向钟差比对实验过程中同时使用两个 Modem,实际钟差计算为使用两个 Modem 的硬件延迟差值,即 ID_1-ID_2.TWOTT 链路校准选择在同一地点使用两个待校准光纤双向时频传递装置开展 CCD 实验,测量得到硬件延迟差值,该方案的优势在于:一方面简化了校准系统,另一方面降低已校准参考设备因无法同一时间内校准而额外引入的测量不确定度.

2.2　不确定度来源

不确定度是 TWOTT 链路校准中用于衡量校准结果质量的关键指标,可对于影响校准结果的各种误差源进行量化,具体分为 A 类评定和 B 类评定[20].其中,A 类评定表示针对在规定测量条件下测得的量值采用统计分析方法进行的测量不确定度分量的评定;B 类评定不同于 A 类评定,常用权威机构发布的量值、有证标准物质的量值或根据经验推断的极限值等对测量不确定度分量进行评定.

其中,A 类评定在 TWOTT 链路中常体现为对测量重复性的统计,测量重复性使用 CCD 实验的伪距差值的标准偏差表示.内部参考延迟 XO_i 和外部参考延迟 XP_i 均使用同一个计数器经两次测量值相减的形式得到,因此系统效应导致的不确定度相互抵消,随机效应导致的不确定度使用标准偏差表示,计数器设置采用 1.0 V 触发电平和 50 Ω 输入阻抗.在校准阶段,TWOTT 系统使用单根光纤进行双向传输,通过改变光纤长度比较两次校准值的变化,根据差值评估不同光纤长度对校准结果的影响.同时,为研究系统对电源开关循环的复现性,Modem 经过多次开关机,分别计算得到校准值,取最大差值作为开关机对校准结果的影响.

2.3　实验设置

开展 TWOTT 链路校准实验需要参考时间频率源,实验中采用北京交通大学时间实验室守时系统产生的标准时间 TS(BJTU),并通过 GNSS 时间频率传递链路实现与原子时标国家计量基准 UTC(NIM)的比对,图 3 为守时系统实物图.



图 3　守时系统

Fig.3　Timekeeping system

为进一步验证并评估 TS(BJTU)的性能,使用溯源参考 UTC(NIM)与 TS(BJTU)进行稳定度监测,监测时间约为一个月监测结果如图 4 和图 5 所示.

由图 4 和图 5 可知：TS(BJTU)的时间稳定度(Time Deviation，TDEV)约为 4.0×10^{-11}@10^5，TS(BJTU)的频率稳定度(Modified Allan Deviation，MDEV)约为 6.8×10^{-16}@10^5，表明了 TS(BJTU)的稳定性；同时，TS(BJTU)具有优异的短期频率稳定度(秒稳优于 2×10^{-11})[21]和良好的相位噪声(在 10 Hz 偏移处优于 −130 dBc/Hz)，确保由参考时间频率源自身引入的测量不确定度分量可忽略不计，为校准结果的可靠性提供了关键保障.

在参考时间频率源可靠的基础上，采用 TS(BJTU)开展 TWOTT 链路校准实验，图 6 为 CCD

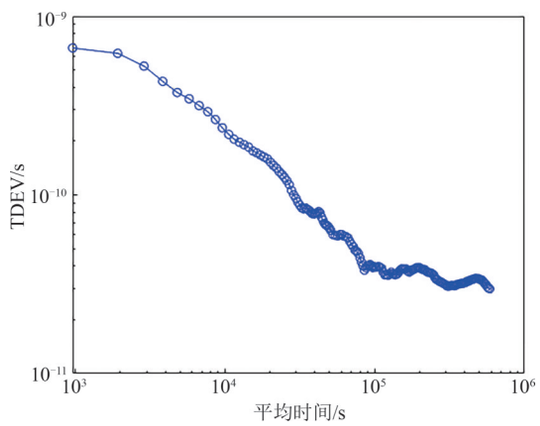


图 4　TS(BJTU)的时间稳定度

Fig.4　Time stability of TS(BJTU)

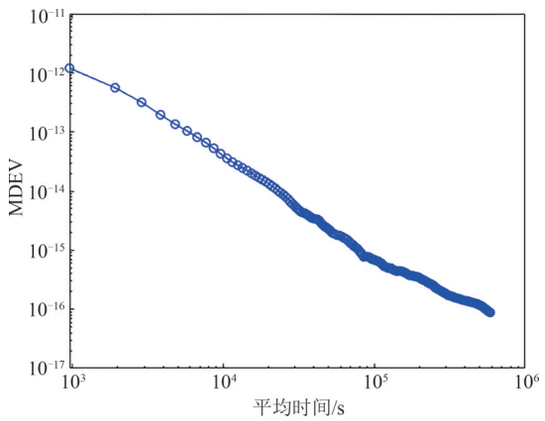


图 5　TS(BJTU)的频率稳定度

Fig.5　Frequency stability of TS(BJTU)

实验架构图.如图 6 所示：TS(BJTU)输出的标准时间频率信号经频率分配放大器和秒脉冲分配放大器后分别接入参考端 Modem 1 和客户端 Modem 2，设置 Modem 1 码型为 PN1，码速率为 10 Mcps，发射频率为 70 MHz；设置 Modem 2 码型为 PN2，码速率为 10 Mcps，发射频率为 70 MHz，调制后的信号由电/光转换模块转换为光信号通过光纤传输到另一端.TWOTT 链路使用单根 1 m 光纤进行双向传输，因此两端发送信号路径延迟近似相等，同时假设两地发送信号与接收信号路径延迟差相等，Modem 内部参考延迟使用时间间隔计数器进行实时测量.

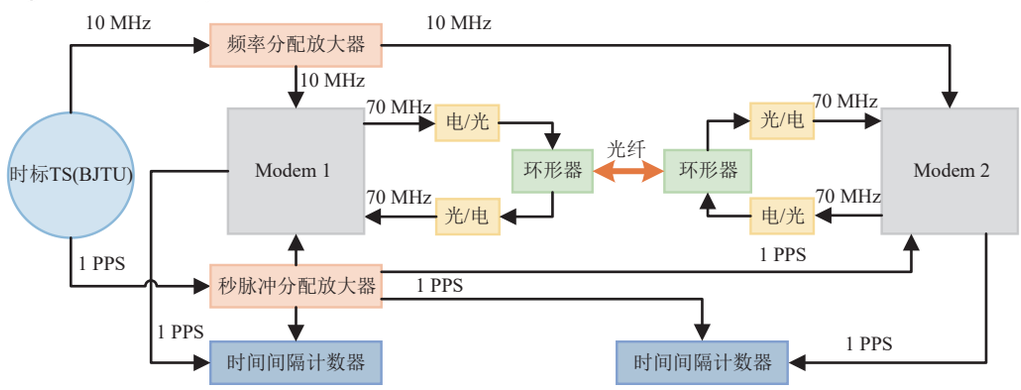


图 6　CCD 实验

Fig.6　CCD experiment

2.4　校准不确定度评定

经 CCD 实验，根据式(3)计算得到两个 Modem 的硬件延迟差值 CD_1-CD_2 为 0.189 ns，对校准结果进行不确定度评定，结果如表 1 所示.

合成标准不确定度的表达式为

$$u_c=\sqrt{u_1^2+u_2^2+u_3^2+u_4^2+u_5^2}=81\ \text{ps} \quad (5)$$

式中：u_c 表示校准值的合成标准不确定度；u_1 表示测量重复性；u_2 表示内部参考延迟 XO_i 测量值因随机效应导致的测量不确定度；u_3 表示外部参考延迟 XP_i 测量值因随机效应导致的测量不确定度；u_4 表示多次开关机计算得到的校准值出现的最大差值；u_5 表示在校准阶段将 1 m 短光纤替换为 10 km 长光纤重新开展校准实验，两次校准结果的差值.

表 1　校准不确定度评定

Tab.1　Calibration uncertainty evaluation

序号	不确定度来源	类型	值/ps
1	重复性	A	20
2	XO_i 测量不确定度	B	70
3	XP_i 测量不确定度	B	11
4	开关机	B	16
5	不同长度光纤	B	27

3　验证

3.1　验证方法

经CCD实验得到的TWOTT链路校准值需要进一步验证其准确性.考虑到光纤的时间频率传递技术比对不确定度相对较低、验证实验实现困难且成本高、不适合广泛工程应用等特点,采用多种实验结果交叉验证的方法进行间接验证.采用TWOTT比对链路法、时间间隔直接测量法和GNSS比对链路法总计3种方法在同一时间段内比对时标TS(BJTU)和另一个远程溯源时间装置TM01的钟差,对比3种方法所得钟差差值是否吻合在比对不确定度范围内,从而达到验证TWOTT链路校准实验结果的目的,验证实验架构如图7所示.

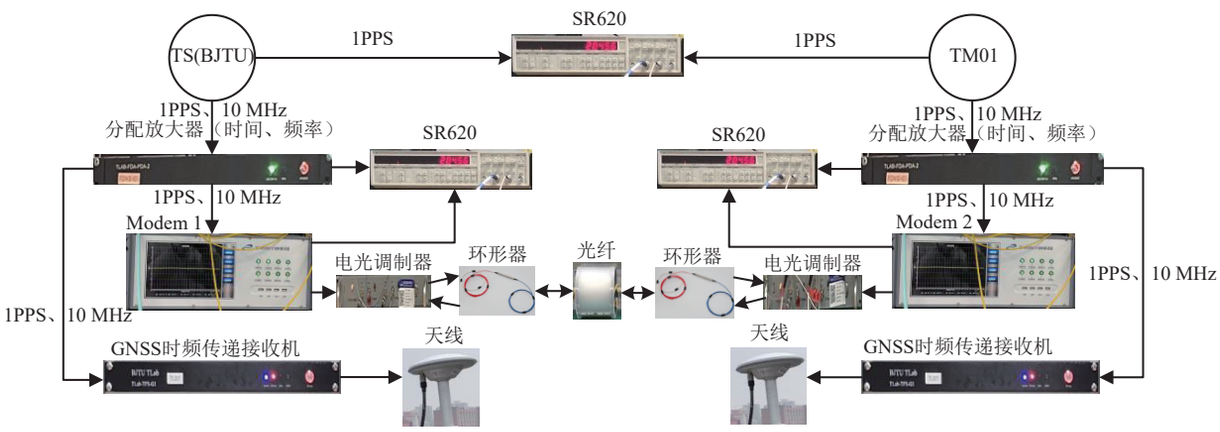


图7　验证实验连接图

Fig.7　Connection diagram for the validation experiment

同时,通过GNSS时频传递链路与UTC(NIM)近一个月的长期比对,评估TM01的稳定度性能,比对结果如图8和图9所示.由图8和图9可知:TM01的TDEV约为$2.5\times10^{-10}@10^{5}$,TM01的MDEV约为$4.2\times10^{-15}@10^{5}$,时间稳定度和频率稳定度均较高,证明了TM01的稳定性.

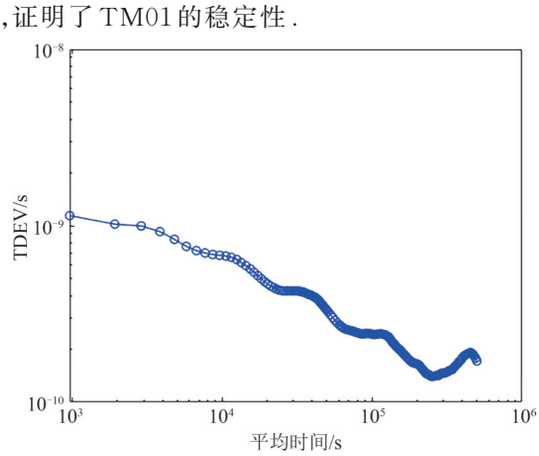


图8　TM01的时间稳定度

Fig.8　Time stability of TM01

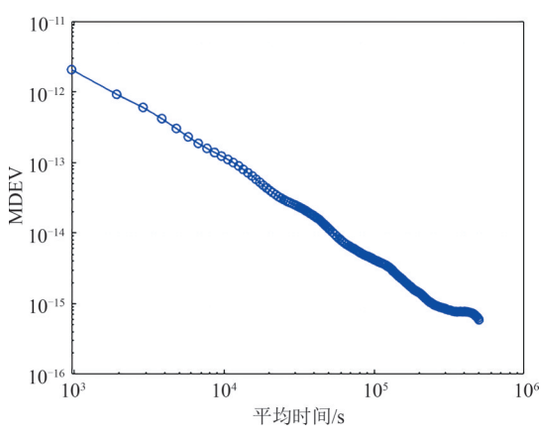


图9　TM01的频率稳定度

Fig.9　Frequency stability of TM01

3.2　实验设置

TWOTT测量实验设置为:TS(BJTU)输出的1 PPS信号和10 MHz信号首先经过频率分配放大器和秒脉冲分配放大器,输出的信号通过同轴射频线缆连接到参考端Modem 1;同样地,TM01输出的1 PPS信号和10 MHz信号经过另一个频率分配放大器和秒脉冲分配放大器,输出的信号通过同轴射频线缆连接到客户端Modem 2,进行双向时间信号的比对,根据比对结果计算得到TS(BJTU)和TM01的钟差;外部参考延迟XP_i在实验前使用SR620计数器直接测量,内部参考延迟XO_i在实验中使用SR620计数器进行实时测量;为减少测量不确定度,Modem相关参数设置和CCD实验参数设置保持一致.

时间间隔直接测量实验设置为:使用SR620计数器直接测量TS(BJTU)和TM01的钟差,TS(BJTU)和TM01到计数器之间的同轴射频线缆延迟在实验前使用同一计数器测量.

GNSS测量实验设置为:使用实验室型号为Tlab-TFS-G1的自研GNSS时频传递接收机构建

比对链路，选择经过校准的接收机（代号分别为TL01和TL07），选用BDS B1I、BDS L3B和GPS L1C共3个频点，最后通过接收机生成的CGGTTS文件计算得到钟差.

3.3 验证结果

将TWOTT链路比对结果、时间间隔直接测量结果以及GNSS链路比对结果进行汇总，如图10所示.由图10可知，3种比对链路得到的钟差变化趋势基本保持一致，其中不同链路的曲线平滑程度存在一定差异，具体表现为：① TWOTT链路比对曲线最为平滑，由于光纤传输具有较低的相位噪声和环境干扰，同时双向传输过程中的共模抑制作用能够消除传输路径延迟对比对结果的影响，因此其测量噪声较小；② 时间间隔直接测量法的比对曲线次之，该结果与SR620型号时间间隔计数器的时差测量不确定度相关，其测量值中包含系统效应和随机效应，如触发抖动、分辨率误差以及时基误差等，因此测量噪声相比TWOTT链路略大；③ GNSS链路比对结果的曲线抖动最大，由于实验室中使用的TL01和TL07接收机为码基时频传递接收机，PRN码的时间分辨率由码速率决定，有限的时间分辨率导致其难以实现高精度的时间比对，因此比对结果的抖动较为明显，该实验结果与理论分析相符.此外，图中钟差结果呈现一定周期性的起伏，这可能与时标驯服算法有关，但该现象不会影响本实验对TWOTT链路校准结果的验证.

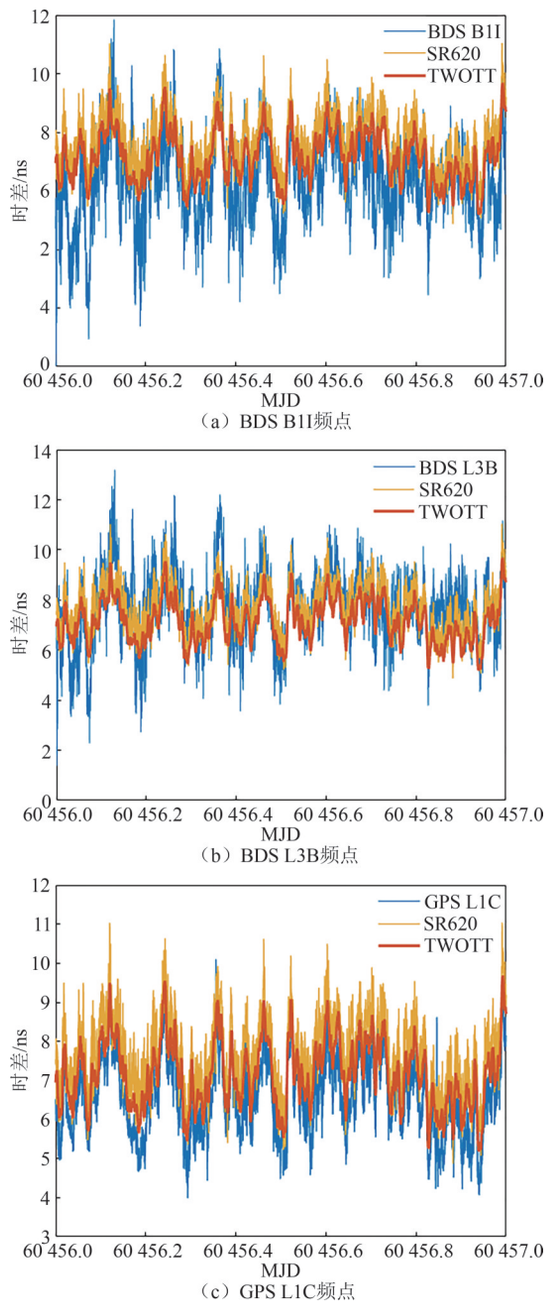


图10 3种比对方式的钟差

Fig.10 Clock difference among the three comparison methods

表2为3种比对链路所得钟差结果.由表2可知：GNSS时频传递接收机的差分校准不确定度约为1.2 ns，比对不确定度约为1.7 ns；SR620计数器的时差测量不确定度约为1.0 ns；TWOTT设备校准不确定度为81 ps，比对不确定度[15]约为0.1 ns.进一步将3种比对链路所得钟差均值进行两两作差并取绝对值，其结果见表3.由表3可知，不同链路之间的钟差差值均吻合在比对不确定度范围内.

表2 3种比对方式结果汇总

Tab.2 Summary of results from the three comparison methods

ns

比对方式	钟差均值	比对不确定度
GNSS-BDS B1I	6.328	1.700
GNSS-BDS L3B	7.678	1.700
GNSS-GPS L1C	6.538	1.700
SR620	7.672	1.000
TWOTT	7.155	0.100

表3 验证结果汇总

Tab.3 Summary of validation results ns

比对方式	GNSS-BDS B1I	GNSS-BDS L3B	GNSS-GPS L1C	SR620	TWOTT
GNSS-BDS B1I	—	1.350	0.210	1.344	0.827
GNSS-BDS L3B	1.350	—	1.140	0.006	0.523
GNSS-GPS L1C	0.210	1.140	—	1.134	0.617
SR620	1.344	0.006	1.134	—	0.517
TWOTT	0.827	0.523	0.617	0.517	—

为进一步验证实验结果的可靠性，后续采用不同型号的GNSS时频传递接收机开展多组重复性实验，实验结果表明：① 不同型号GNSS接收机参与

实验时,3种比对方式所得钟差结果仍均吻合在比对不确定度范围内;② 多组重复性实验结果具有良好一致性;③ 结果验证了TWOTT链路校准结果的准确性,同时表明利用多种实验链路进行交叉验证的方法具有可行性.

4　结论

1) 通过构建TWOTT比对链路开展链路校准实验,得到由两台光纤双向时间传递装置构成的时间传递链路校准结果为0.189 ns,其合成标准不确定度为81 ps,表明该方法能够实现百皮秒量级的链路校准不确定度.

2) 通过TWOTT链路、时间间隔直接测量链路及GNSS时间传递链路3种方式同时对两个时钟进行比对,并将3种链路所得钟差均值进行两两比较.实验结果表明,不同链路所得钟差差值均处于各自比对不确定度范围内,结果具有良好一致性.

3) 采用不同型号GNSS时频传递接收机开展多组重复性实验,3种比对方式所得钟差结果均保持在比对不确定度范围内,结果具有良好一致性,验证了TWOTT链路校准结果的准确性,同时表明多种实验链路交叉验证方法具有良好的可行性和工程应用价值.

本文对光纤双向时间传递链路校准及验证方法进行了实验研究,但仍有进一步优化空间.后续研究将重点分析温度变化、光纤色散等关键因素对链路时延的影响机理,并开展相应的补偿技术研究,以进一步提升光纤时间传递系统的稳定性和环境适应能力.

参考文献(References):

[1] 宋明顺, 方兴华, 马爱文, 等. 论新国际单位制(SI)的“秒制”特征及其未来发展[J]. 计量学报, 2019, 40(4): 541－548.
SONG Mingshun, FANG Xinghua, MA Aiwen, et al. The characteristics of the new SI base on “second system” and its future development[J]. Acta Metrologica Sinica, 2019, 40(4): 541－548. (in Chinese)

[2] BIPM. On the revision of the International System of Units (SI)[EB/OL]. [2026-03-12]. https://www.bipm.org/en/committees/cg/cgpm/26-2018/resolution-1.

[3] BIPM. Clocks and time transfer files by year [EB/OL]. (2026-03-11) [2026-03-12]. https://www.bipm.org/en/time-ftp/data.

[4] 史丰丰, 程梦飞, 李国俊, 等. 国产守时型原子钟长期性能分析[J]. 时间频率学报, 2023, 46(4): 279－288.
SHI Fengfeng, CHENG Mengfei, LI Guojun, et al. The long-term performances analysis of the domestic time-keeping atomic clocks[J]. Journal of Time and Frequency, 2023, 46(4): 279－288. (in Chinese)

[5] BIPM. BIPM annual report on time activities[EB/OL]. [2026-03-12]. https://www.bipm.org/en/time-ftp/annual-reports.

[6] 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(增1): 91－101.
XU Longxia, LIU Ya, LI Xiaohui. Applications of GNSS timing and time synchronization in infrastructures [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(S1): 91－101. (in Chinese)

[7] BAUCH A, ACHKAR J, BIZE S, et al. Comparison between frequency standards in Europe and the USA at the 10－15 uncertainty level[J]. Metrologia, 2006, 43(1): 109.

[8] 张升康, 王学运, 王宏博, 等. 卫星双向时间频率传递校准技术综述[J]. 宇航计测技术, 2013, 33(1): 15－22.
ZHANG Shengkang, WANG Xueyun, WANG Hongbo, et al. Review of calibration techniques for two way satellite time and frequency transfer system[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2013, 33(1): 15－22. (in Chinese)

[9] 王国永, 秦晓伟, 孙云峰, 等. 卫星双向时间频率传递系统差校准方法[J]. 空间电子技术, 2017, 14(2): 19－24.
WANG Guoyong, QIN Xiaowei, SUN Yunfeng, et al. Systematic errors calibration method based on two-way satellite time and frequency transfer[J]. Space Electronic Technology, 2017, 14(2): 19－24. (in Chinese)

[10] 梁坤, 焦祥旭, 余沺. 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 Kun, JIAO Xiangxu, YU Tian. Research on the integrated absolute calibration of BeiDou time and frequency transfer chain[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2023, 45(11): 4117－4126. (in Chinese)

[11] 梁坤, 张爱敏, 高小珣. 时间频率传递GPS接收机内延迟差分校准技术研究[J]. 计量学报, 2012, 33(1): 77－80.
LIANG Kun, ZHANG Aimin, GAO Xiaoxun. Study on the differential calibration techniques for the internal time delays of the GPS receivers for time and frequency transfer [J]. Acta Metrologica Sinica, 2012, 33(1): 77－80. (in Chinese)

[12] 张升康, 杨文哲, 王学运, 等. 卫星双向时间频率传递研究进展[J]. 导航定位与授时, 2021, 8(4): 11－19.
ZHANG Shengkang, YANG Wenzhe, WANG Xueyun, et al. Review of recent progress of two-way satellite time and frequency transfer[J]. Navigation Posi-

tioning and Timing, 2021, 8(4): 11－19. (in Chinese)

[13] 董文. GNSS单差载波相位时间传递技术研究[D]. 西安：中国科学院大学(中国科学院国家授时中心), 2019.
DONG Wen. Research on GNSS single differential carrier phase time transfer technology[D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences (National Time Service Center Chinese Academy of Sciences), 2019. (in Chinese)

[14] JIANG Z, KONATÉ H, LEWANDOWSKI W. Review and preview of two-way time transfer for UTC generation: From TWSTFT to TWOTFT [C]//2013 Joint European Frequency and Time Forum & International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS). Prague, 2014: 501－504.

[15] JIANG Z, CZUBLA A, NAWROCKI J, et al. Towards accurate optical fibre time transfer in UTC[C]// 2014 European Frequency and Time Forum (EFTF). Neuchatel, 2015: 231－234.

[16] ROST M, PIESTER D, YANG W, et al. Time transfer through optical fibres over a distance of 73 km with an uncertainty below 100 ps[J]. Metrologia, 2012, 49(6): 772－778.

[17] LIANG K, ZHANG A M, YANG Z Q, et al. Preliminary time transfer through optical fiber at NIM[C]//2015 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium & the European Frequency and Time Forum (IFCS/EFTF). Denver, 2015: 742－746.

[18] 韩凯. 基于光纤的频率传递及远程时间频率溯源方法研究[D]. 北京:北京交通大学, 2019.
HAN Kai. Research on frequency transmission and remote time frequency traceability method based on optical fiber[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. (in Chinese)

[19] 方维, 金尚忠, 陈德好, 等. 基于光纤双向时间传递实时驯服铷钟的远程时间溯源[J]. 计量学报, 2022, 43(4): 542－546.
FANG Wei, JIN Shangzhong, CHEN Dehao, et al. Real-time disciplining of rubidium clock for remote time traceability with two way optical fiber time and frequency transfer[J]. Acta Metrologica Sinica, 2022, 43(4): 542－546. (in Chinese)

[20] 国家质量监督检验检疫总局. 测量不确定度评定与表示：JJF 1059.1—2012[S]. 北京：中国标准出版社, 2013: 4－5.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Evaluation and expression of uncertaintv in measurement: JJF 1059.1—2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013: 4－5. (in Chinese)

[21] 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 Kun, FANG Wei, GU Yangyi, et al. Remote time transfer and traceability method, device and system[J]. Metrology Science and Technology, 2021, 65(4): 3－13. (in Chinese)