

# 分布式守时架构下的高精度时间比对技术研究

王崇阳<sup>1</sup>, 杜文丛<sup>1</sup>, 周云<sup>2</sup>, 刘铁强<sup>1</sup>, 孙建设<sup>3</sup>

(1 中国电子科技集团公司第五十四研究所 石家庄 050081;

2 陆装驻石家庄地区第一代表室 石家庄 050000;

3 中国人民解放军 61711 部队 喀什 844000)

**摘要:** 为了实现分布式联合守时系统建立需求, 设计了远程时间比对系统, 包含卫星共视、卫星双向和光纤双向三种时间比对手段, 系统内使用的国产化设备比对精度与进口设备相当, 实现了实验室间多手段、高精度钟差测量。使用移动校准站完成了时间比对设备相对零值校准, 在相距 50 km 的实验室间开展长达 20 天的时间比对, 试验结果表明, 三种比对手段测量得到两地钟差均值相差小于 1 ns, 变化趋势相同, 变化幅度相近, 均可以准确测量得到两地钟差。

**关键词:** 时间比对; 移动校准站; 零值校准

中图分类号: TN927+.2; P127 文献标志码: A 文章编号: 2095-1000(2024)03-0065-07

DOI: 10.12347/j.ycyk.20240226001

引用格式: 王崇阳, 杜文丛, 周云, 等. 分布式守时架构下的高精度时间比对技术研究[J]. 遥测遥控, 2024, 45(3): 65-71.

## Research on High Precision Time Comparison Technology under Distributed Punctuality Architecture

WANG Chongyang<sup>1</sup>, DU Wencong<sup>1</sup>, ZHOU Yun<sup>2</sup>, LIU Tieqiang<sup>1</sup>, SUN Jianshe<sup>3</sup>

(1. The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China;

2. PLA Army Equipment Department Shijiazhuang 1st Region Military Representative Office, Shijiazhuang 050000, China;

3. 61711 Troops, PLA, Kashi 844000, China)

**Abstract:** In order to meet the demand for distributed joint timekeeping system, a remote time comparison system was designed, which includes satellite co-visibility, satellite bi-directional, and fiber bi-directional time comparison means. The domestic equipment used in the system has the same time comparison accuracy as imported equipment, achieving high-precision clock difference measurement between laboratories using multiple means. The relative zero value calibration of the time comparison equipment was completed using a mobile calibration station, and a 20-day time comparison was conducted between laboratories that were 50 km apart. The experimental results show that the mean clock difference measured by the three comparison means at the two locations is less than 1 ns, the trend is the same, and the amplitude is similar, and all can accurately measure the clock difference between the two locations.

**Keywords:** Time comparison; Mobile calibration station; Zero calibration

**Citation:** WANG Chongyang, DU Wencong, ZHOU Yun, et al. Research on High Precision Time Comparison Technology under Distributed Punctuality Architecture[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2024, 45(3): 65-71.

## 0 引言

随着国内原子钟技术发展, 我国守时系统的守时能力在国际原子时归算占据了一定权重, 从国际计量局公布的月报中可以看出, 我国守时系统在频率稳定度、时间稳定度等性能指标上已与

国外先进守时实验室水平相当, 我国世界协调时 (Universal Time Coordinated, UTC) 与 UTC 时间偏差优于  $\pm 5$  ns<sup>[1]</sup>。国内守时实验室钟组一般由氢原子钟和铯原子钟组成, 其中包含大量国产原子钟。为了整合国内原子钟资源, 建立统一的标准时间, 急需精度高、稳定度好的国产化时间比对手段,

构建异地分布式联合守时系统, 产生我国独立自主的时间基准。

分布式联合守时架构是通过部署在异地的守时实验室以时间比对手段共同产生和维持一个准确度、稳定性和可靠性更高的时间尺度。分布式联合守时架构具备两方面的优势, 一方面由于部分守时实验室钟组规模较小, 原子钟性能较差, 难以产生和保持准确稳定的时间尺度, 通过整合异地多个守时实验室的原子钟钟差数据, 共同参与原子时计算过程中, 产生统一综合的时间尺度, 同时提高了实验室原子钟资源的利用率; 另一方面可以为用时或其他守时实验室提供稳定且可靠的溯源参考, 提高各个站点的时间尺度性能, 同时可以为各站点输出的主钟物理信号提供一个稳定可靠的驾驭参考, 提升主钟物理信号性能。

建立联合守时系统中高精度的远程时间比对手段尤为重要。国内外主流时间比对手段包括卫星共视时间比对、卫星双向时间比对和光纤双向时间比对, 三种比对手段各有优点<sup>[2-5]</sup>。其中, 国际计量局从 20 世纪 80 年代开始使用 GPS 共视时间比对方法用于 UTC 计算, 该方法使用成本低, 对传递链路无需求, 需要使用地面网传递共视文件, 比对结果具有一定延时性。随着北斗三号提供全球服务, 张继海等开展了基于北斗三号导航系统的卫星共视时间比对应用研究, 使用北斗三号新信号体制在亚欧两地共视比对的钟差噪声和稳定度相对北斗二号均有提升<sup>[6]</sup>。卫星双向时间比对方法使用地球同步轨道卫星转发器信道, 具有比对距离可达几千公里、实时性好、抗电磁信号干扰、测量数据实时交互等优点, 但硬件系统复杂, 需要高昂成本的卫星资源作为传递链路。光纤双向时间比对方法建立在卫星双向时间比对基础上, 使用光纤信道替代无线信道, 具备受外界因素影响小、有线链路可靠性高、时间比对精度高等优点, 近年来已作为数百公里范围内的主要时间传递手段。

绝大多数国际比对链路使用 GPS 系统实现远距离时间比对<sup>[1]</sup>, 随着北斗三号卫星导航系统的建立和完善, 国内开展了基于北斗共视的时间频率传递的研究, 并应用于国际和国内实验时间比对<sup>[7,8]</sup>。本文依托比对链路扩建项目, 在国内守时实验室间建立多手段比对链路, 使用国产化时间比对设备, 基于北斗三号系统与自主伪随机码,

实现了实验室间分布式联合守时, 建立统一的时间基准。

### 1 远距离时间比对方法

#### 1.1 卫星共视时间比对

卫星共视时间比对方法工作原理为各用户接收机同时观测相同导航卫星, 通过数据处理得到本地时间与导航系统的时间差, 生成标准 CGGTTS 共视文件, 交换用户共视文件实现用户间相位相对偏差<sup>[9]</sup>, 原理示意图如图 1 所示。

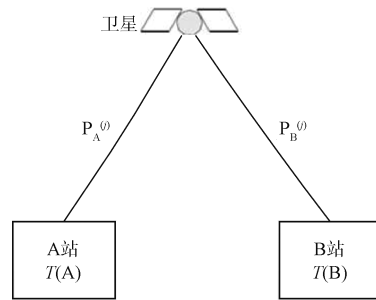


图 1 卫星共视时间比对原理示意图

Fig. 1 Satellite view of time comparison schematic diagram

测量得到本地时钟相对于 GNSS 系统钟差为:  $\Delta T(t) = T(t) - T_{GNSS}(t)$ , 其中,  $T(t)$  表示  $t$  时刻的本地时间,  $T_{GNSS}(t)$  表示  $t$  时刻对应的 GNSS 系统参考时间。在相同时刻  $t$ , A、B 两站分别与 GNSS 系统钟差为:

$$\begin{cases} \Delta T_A(t) = T_A(t) - T_{GNSS}(t) \\ \Delta T_B(t) = T_B(t) - T_{GNSS}(t) \end{cases} \quad (1)$$

将以上两式作差, 得到 A、B 两地钟差:

$$\Delta T_{AB}(t) = \Delta T_A(t) - \Delta T_B(t) = T_A(t) - T_B(t) \quad (2)$$

#### 1.2 卫星双向时间比对

卫星双向时间比对的基本原理为: 地面站 A 和地面站 B 在相同时刻发送测距信号, 同时 A、B 两地时间间隔计数器开始计数, A 站发出的测距信号经过通信卫星转发后被地面站 B 接收设备接收, 同时会触发观测站 B 的时间间隔计数器结束计数, 根据 A、B 两站的时间间隔计数器的读数得出 A 站测距信号到 B 站的传输时延。同样, A 站可以得到 B 站至 A 站的观测信号传输时延。由于双向时间传递链路对称性, 地面站间的传输时延被抵消, 地面站设备延迟测量与校准后, 可以实现纳秒量级的时间传递。计算可得地面站间钟差  $\Delta T_{AB}(t)$  为:

$$\Delta T_{AB} = \frac{1}{2} (\Delta T_A - \Delta T_B) + \frac{1}{2} [(\tau_A^T - \tau_A^R) + (\tau_B^T - \tau_B^R)] \quad (3)$$

其中,  $\Delta T_A$ ,  $\Delta T_B$  分别为地面站 A 和地面站 B 时间间隔计数器测量结果,  $\tau_A^T$ ,  $\tau_A^R$  为地面站 A 发射设备

和接收设备传输时延,  $\tau_B^T$ ,  $\tau_B^R$  为地面站 B 发射设备和接收设备传输时延<sup>[10,11]</sup>。卫星双向时间比对原理如图 2 所示。

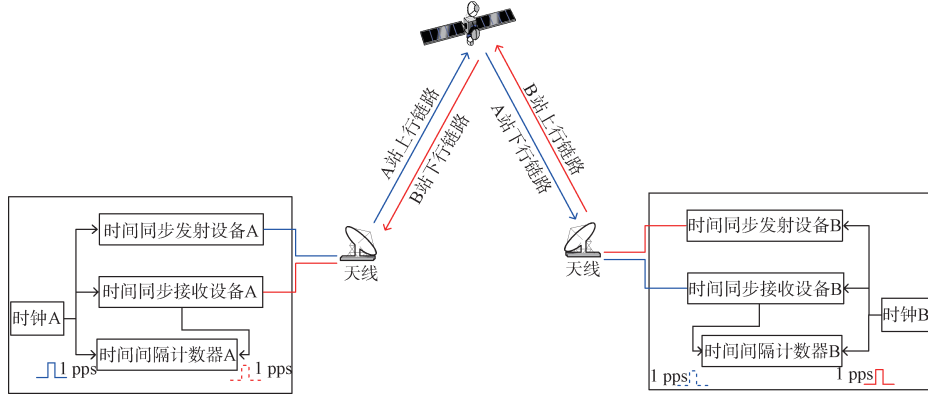


图 2 卫星双向时间比对原理图

Fig. 2 Satellite two-way time comparison schematic diagram

### 1.3 光纤双向时间比对

光纤双向时间比对方法通过单纤双向方式传递时间信号, 同一根光纤解决了传递链路不对称性引起的误差, 地面站 A 与地面站 B 间同时向对方传递以本站时钟为基准的测距信号, 接收到测距信号获得两个传输时延值, 将两个观测数据计算得到 A 站与 B 站的钟差<sup>[12,13]</sup>, 如图 3 所示。

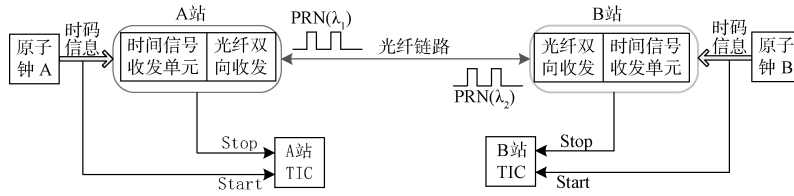
假设 A 站测量得到的 B 站发射信号到 A 站的总

时延为  $T_{BA}$ , B 站测量得到的 A 站发射信号到 B 站的总时延为  $T_{AB}$ , A 站和 B 站两地钟的瞬时钟差  $\Delta T = T_A - T_B$ ,  $T_A$  为 A 站发射测距信号时刻,  $T_B$  为 B 站发射测距信号时刻, 则

$$T_{BA} = \Delta T + \tau_B + \tau_{BA} + \tau'_A \quad (4)$$

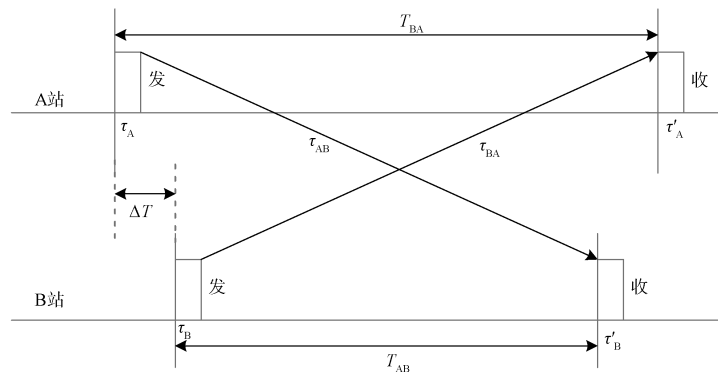
$$T_{AB} = \Delta T + \tau_A + \tau_{AB} + \tau'_B \quad (5)$$

上式中,  $\tau_A$  为 A 站时间信号发射单元、光纤发射单元 (半导体激光器) 的发射时延,  $\tau'_A$  为 A 站时



(a) 光纤双向时间比对框图

(a) Optical fiber bidirectional time comparison block diagram



(b) 光纤双向时间比对系统原理图

(b) Optical fiber bidirectional time comparison system schematic diagram

图 3 光纤双向时间比对

Fig. 3 Optical fiber bidirectional time comparison

间信号接收单元和光纤接收单元(光电探测器)的接收时延; 同样  $\tau_B$  和  $\tau'_B$  分别为 B 站的接收和发射时延;  $\tau_{AB}$  为时间信号由 A 站发送到 B 站的光纤链路单向传输时延;  $\tau_{BA}$  为时间信号由 B 站发送到 A 站的光纤链路单向传输时延。

由式(4)、式(5)可得:

$$\Delta T = \frac{1}{2} [(T_{BA} - T_{AB}) + (\tau_B - \tau_A) + (\tau'_A - \tau'_B) + (\tau_{BA} - \tau_{AB})] \quad (6)$$

当 A 站和 B 站在同一时刻发送 1PPS 信号, 由于传输路径相同且传输光信号波长接近, 传输时延接近可近似相等, 即  $\tau_{BA} \approx \tau_{AB}$ , 则有:

$$\Delta T = \frac{1}{2} [(T_{BA} - T_{AB}) + (\tau_B - \tau_A) + (\tau'_A - \tau'_B)] \quad (7)$$

A 站和 B 站通过交换测量数据  $T_{AB}$  和  $T_{BA}$ , 发送时延和接收时延的差  $(\tau_B - \tau_A) + (\tau'_A - \tau'_B)$  可通过设备零值标校进行测定, 站间钟差  $\Delta T$  就可计算得到。用式(4)来修正 A、B 两站原子钟之间的钟差, 可使 B 站原子钟与 A 站原子钟相同步<sup>[5]</sup>。

### 2 时间频率系统

时间频率系统由原子钟分系统与时间比对分系统组成。

原子钟分系统包含原子钟、钟组合成器、多通道计数器、多通道比相仪、时频信号产生器等, 该分系统可以对原子钟组的 10 MHz 信号和 1 PPS 脉冲信号进行测量比对, 对各原子钟进行性能分析, 建立各原子钟的模型, 对原子钟钟差数据、相位比对数据、溯源比对数据进行处理, 完成综合原子时的生成, 依据综合原子时时间尺度信息, 通过相位微跃计实现对主用氢原子钟的高稳定驾驭, 如图 4 所示<sup>[14]</sup>。

时间比对分系统包含卫星共视接收机、卫星双向时间比对设备、光纤双向时间比对设备, 主要功能是利用高精度远程时频比对手段, 建立本地原子钟组与其他守时实验室间的比对关系, 可以将时间比对钟差上报给原子钟分系统, 为系统时频信息的校准或调整提供依据, 可实现多级时频系统溯源与分布式综合原子时建立。

### 3 比对链路校准

时间比对设备零值校准是时间同步的关键技术, 校准精度是决定时间比对精度的主要因素。

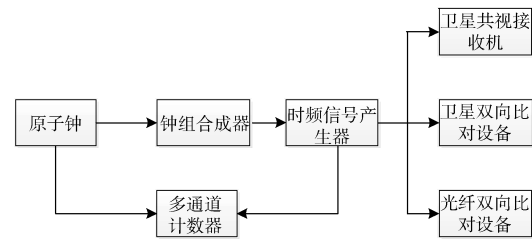


图 4 时间频率系统原理框图

Fig. 4 Time frequency system block diagram

针对时间比对设备的零值校准方法有两种: 一种是设备绝对时延校准, 共视时间比对设备主要时延是接收链路时延, 由天线、馈线和接收机三部分组成, 卫星双向时间比对设备关注的是设备内模块收发时延, 常采用导航模拟器和模拟卫星转发器完成绝对时延校准; 另一种是设备相对时延校准, 该方法目的为获得时间比对设备间的相对时延差, 无需各个单机的绝对时延进行测试, 认为并址同源条件下在大气传输过程中引入的误差全部被抵消掉, 解决了大尺寸反射面天线校准困难的问题, 相对时延校准方法受参考设备稳定性与移动校准设备测量精度影响。本文采用移动校准站方式对卫星共视接收机和卫星双向比对设备进行相对零值校准, 光纤双向比对设备使用同源零基线并址运行实现设备相对零值校准<sup>[15]</sup>。

移动校准站由 GNSS 时间频率传递参考装置、时间间隔计数器、KVM 显示控制装置、数据采集及处理装置组成。移动校准站首先在站址 A 并址运行一周, 测得移动校准站与共视接收机 A 相位差  $X_A$ , 然后移动校准站在站址 B 并址运行一周, 测得移动校准站与待校准共视接收机 B 相位差  $X_B$ , 以站址 A 为基准接收机, 则共视接收机 B 校准值为  $X_B - X_A$ 。

如图 5 所示, 两套移动校准站分别部署在站址 A 与站址 B, 分别以本站内时频基准作为参考源与站内卫星双向比对设备进行并址运行, 两套卫星双向比对设备测量得到两地钟差为  $T_1$ , 两套移动校准站测量得到两地钟差为  $T_2$  (两套移动校准站已完成并址工作零值校准), 以站址 A 为基准卫星双向比对设备, 则卫星双向比对设备 B 相对校准值为  $T_1 - T_2$ <sup>[16-18]</sup>, 如图 6 所示。

将光纤双向时间比对设备 B 搬到实验室 A 中与光纤双向比对设备 A 进行同源并址运行, 使用光纤盘模拟实际光纤链路长度与衰减量。调整可调时延设备(调整范围 -100 ns ~ 100 ns)使 10 MHz\_B 与

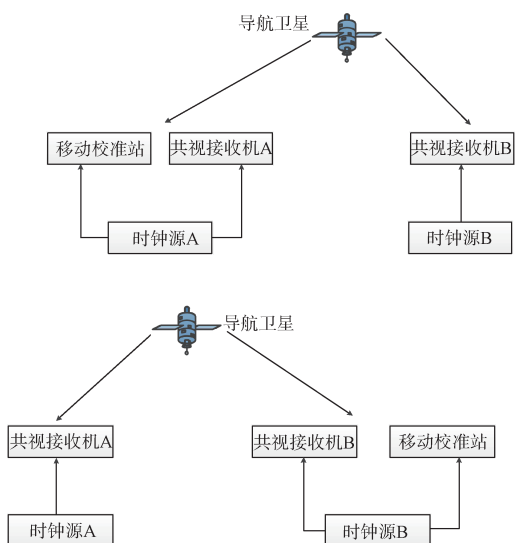


图5 卫星共视接收机校准过程

Fig. 5 Calibration process of satellite common view receiver

1 PPS<sub>B</sub> 相位关系与光纤双向时间比对设备在实验室 B 中的相位关系一致<sup>[19]</sup>, 如图 7 所示。

光纤双向比对设备 A 与 B 得出钟差为测量值  $X_C$ , 使用计数器测量 1 PPS<sub>A</sub> 与 1 PPS<sub>B</sub> 的真实值  $X_Z$ , 使用测量值减真实值为设备相对零值  $X_L$ :  $X_L =$

$X_C - X_Z$ 。

#### 4 时间比对数据分析

在相距 50 km 的 A、B 两地实验室间开展时间比对测试, 两实验室间具备卫星共视、卫星双向、光纤双向三条比对链路, 时间比对设备完成零值校准后, 实时测量两地实验室钟组产生的标准时间信号 MC(A)和 MC(B)。选取简化儒略日(MJD)为 59 721-59 739(2022年5月22日-2022年6月9日)时间段内时间比对数据, 卫星共视比对手段得出实验室 A 与实验室 B 钟差均值为 -8.1 ns, 如图 8 所示; 卫星双向时间比对手段得出实验室 A 与实验室 B 钟差均值为 -8.7 ns, 如图 9 所示; 光纤双向时间比对手段得出实验室 A 与实验室 B 钟差均值为 -8.5 ns, 如图 10 所示。通过比对结果曲线可得出, 三种比对手段测得两地标准时间相位差 MC(A)-MC(B)变化趋势相同, 变化幅度相近, 卫星共视、卫星双向和光纤双向比对手段钟差均值相差在 1 ns 内。实验结果表明: 经过校准后的比对系统中三种比对手段均可以准确测量两地钟差, 同时三种比对手段可实现融合互检, 增强系统可靠性。

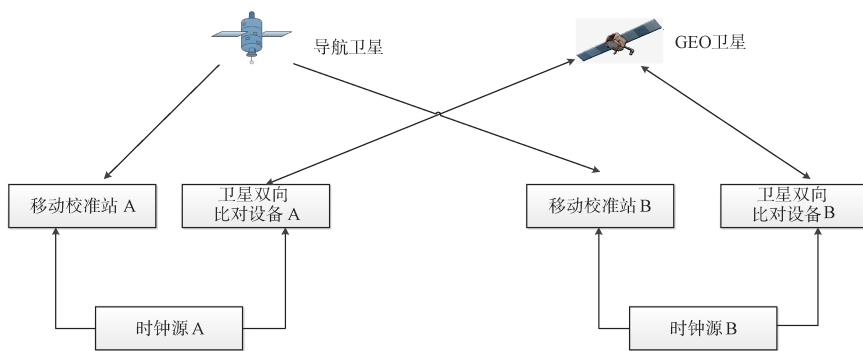


图6 卫星双向时间比对设备校准过程

Fig. 6 Calibration process of satellite bidirectional time comparison equipment

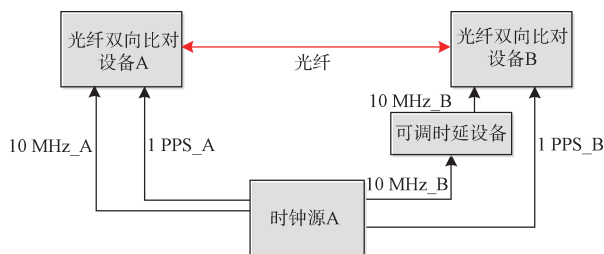


图7 光纤双向时间比对设备校准过程

Fig. 7 Calibration process of optical fiber bidirectional time comparison equipment

从表 1 可以看出卫星共视时间比对不确定度为 1.74 ns, 在三种比对手段中精度相对较差, 而且随站间距离的增大, 受电离层对流层延迟误差等空间相关性降低, 指标会进一步恶化, 但其具备设备成本低、使用便捷、不依靠卫星转发器和光纤专线资源的优点; 卫星双向时间比对不确定度为 0.83 ns, 该手段优势为实时性好, 比对精度相对较高, 但系统复杂, 包含变频器、功放、低噪放与抛物面天线等信道设备, 同时需要租赁卫星转发器进行信号传输; 光纤双向时间比对不确定度为

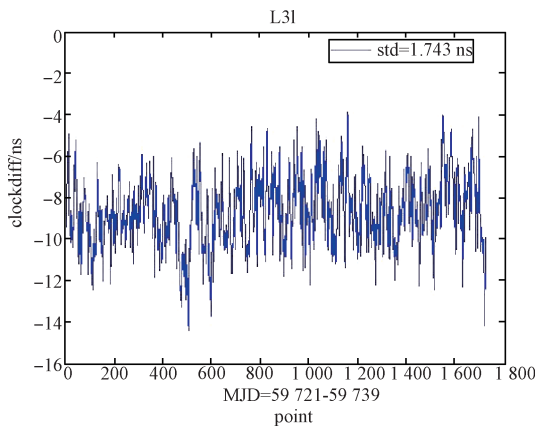


图8 卫星共视时间比对结果 20220522-20220609

Fig. 8 Satellite coview time comparison results 20220522-20220609

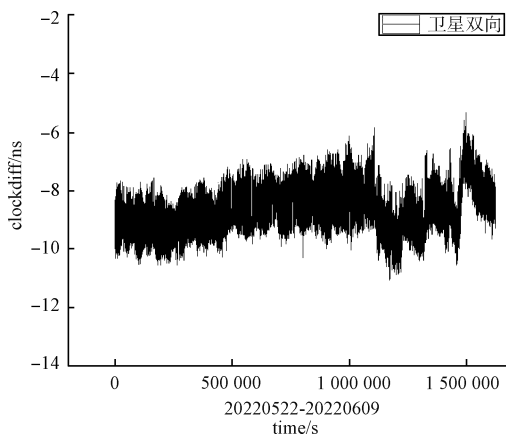


图9 卫星双向时间比对结果 20220522-20220609

Fig. 9 Satellite bidirectional time comparison results 20220522-20220609

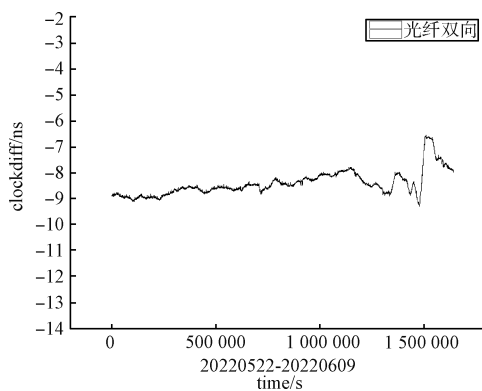


图10 光纤双向时间比对结果 20220522-20220609

Fig. 10 Optical fiber bidirectional time comparison result 20220522-20220609

0.47 ns, 该方法时间比对精度最高, 而且光纤损耗低、抗电磁干扰、价格低, 适用于城市内或城市间百公里量级时间比对链路, 省际近千公里受限于光

缆专线往往使用无线链路时间比对手段。针对不同使用场景需求, 可选择对应时间比对方法。

表1 两地时间比对结果

Table 1 Time comparison between the two places

序号	比对方法	钟差均值/ns	不确定度/ns
1	卫星共视时间比对-北斗L3I双频	-8.1	1.74
2	卫星双向时间比对	-8.7	0.83
3	光纤双向时间比对	-8.5	0.47

本文中使用了国产化卫星共视接收机、卫星双向时间比对设备、光纤双向时间比对设备进行时间比对, 是国内首次使用三种比对手段同时在两守时实验室间进行时间比对, 三种手段互相检验, 为后续多手段比对融合处理打下基础。而且卫星共视北斗双频比对精度与进口共视接收机GPS双频性能相当, 卫星双向时间比对精度优于1 ns, 与国外主流时间比对调制解调器SATRE Modem比对精度相近, 可以对进口时间比对设备进行国产化替代<sup>[20]</sup>。

### 5 结束语

国内守时实验室钟组建设日渐完善, 实验室间急需建立分布联合守时系统。使用国产自主时间比对设备在守时实验室间建立卫星共视、卫星双向、光纤双向三种比对链路, 使用移动校准站完成时间比对设备校准, 开展长期时间比对实验。实验结果表明, 校准过程可以完成时间比对设备零值标校, 校准后三种比对手段比对结果相差优于1 ns, 均可以真实反映两地钟组相位偏差, 实现异地钟差数据获取。

### 参考文献

[1] 杨玉婷, 刘晨帆, 蔺玉亭, 等. 我国守时系统发展现状与性能分析[J]. 自动化仪表, 2021, 42(7): 93-97.  
 YANG Yuting, LIU Chenfan, LIN Yuting, et al. Development status and performance analysis of China's time-keeping systems[J]. Process Automation Instrumentation, 2021, 42(7): 93-97.

[2] 武文俊, 王威雄, 王翔, 等. 基于北斗三号的长基线共视时间比对[J]. 宇航计测技术, 2020, 40(1): 33-37.  
 WU Wenjun, WANG Weixiong, WANG Xiang, et al. Long base-line common view time comparison based on BDS-3[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2020, 40(1): 33-37.

[3] 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 Positioning and Timing, 2021, 8(4): 11-19.
- [4] 梁益丰, 许江宁, 吴苗, 等. 光纤时频同步技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(5): 37-50.  
LIANG Yifeng, XU Jiangning, WU Miao, et al. Research progress on optical fiber time-frequency synchronization technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(5): 37-50.
- [5] 王崇阳, 蔚保国, 王正勇. 远距离高精度光纤双向时间比对方法研究[J]. 无线电工程, 2017, 47(3): 47-50.
- [6] 张继海, 董绍武, 袁海波, 等. 北斗三号新信号体制共视时间比对[J]. 国防科技大学学报, 2021, 43(6): 66-73.  
ZHANG Jihai, DONG Shaowu, YUAN Haibo, et al. Common view time comparison by new signal system of BDS-3[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2021, 43(6): 66-73.
- [7] 张继海, 武文俊, 广伟, 等. 基于北斗共视的国际时间比对研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(6): 96-103.  
ZHANG Jihai, WU Wenjun, GUANG Wei, et al. Study of international common view time comparison by Beidou [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(6): 96-103.
- [8] LIANG K, ARIAS F, PETIT G. Evaluation of BeiDou time transfer over multiple inter-continental baselines towards UTC contribution[J]. Metrologia, 2018, 55(4): 513-525.
- [9] 韩华, 解建伟, 刘连照. GNSS 时间比对设备设计与实现[J]. 无线电工程, 2020, 50(7): 563-567.  
HAN Hua, XIE Jianwei, LIU Lianzhao. Design and implementation of GNSS time transfer equipment[J]. Radio Engineering, 2020, 50(7): 563-567.
- [10] 王茂磊, 王棋萍, 刘魁星. 一种卫星双向时间同步系统故障定位方法[J]. 无线电工程, 2020, 50(5): 362-367.
- [11] 张金涛, 魏海涛, 李隽, 等. 车载卫星双向时间同步系统研究[J]. 无线电工程, 2016, 46(11): 51-54.
- [12] 彭丽, 王正勇, 王崇阳. 基于伪码测距的光纤双向时间比对技术[J]. 无线电通信技术, 2021, 47(4): 503-506.  
PENG Li, WANG Zhengyong, WANG Chongyang. Research on two-way time comparison through optical fiber based on PN code ranging[J]. Radio Communications Technology, 2021, 47(4): 503-506.
- [13] 谢勇, 赵大勇, 尹继凯, 等. 基于电子相位补偿的光纤频率传递技术[J]. 无线电通信技术, 2022, 48(3): 534-540.
- XIE Yong, ZHAO Dayong, YIN Jikai, et al. Research on optical fiber frequency transfer technology based on electronic phase compensation[J]. Radio Communications Technology, 2022, 48(3): 534-540.
- [14] 袁媛, 孙霞, 杨嘉明, 等. 光纤远程溯源系统的设计与实现[J]. 计量学报, 2021, 42(11): 1504-1510.  
YUAN Yuan, SUN Xia, YANG Jiaming, et al. Design and implementation of remote traceability system based on optical fiber[J]. Acta Metrologica Sinica, 2021, 42(11): 1504-1510.
- [15] 冯彬. 远程时间比对中的设备时延校准技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
- [16] 王茂磊, 肖胜红, 张达, 等. 一种基于移动参考站的卫星双向时间频率传递系统时延校准方法[J]. 宇航计测技术, 2015, 35(3): 32-35.  
WANG Maolei, XIAO Shenghong, ZHANG Da, et al. A delay calibration method based on portable station for two-way satellite time and frequency transfer system[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2015, 35(3): 32-35.
- [17] 王国永. 基于双移动站的卫星双向时间传递系统误差校准方法研究[D]. 西安: 中国科学院大学, 2015.
- [18] 谭俊雄. 基于 PPP 的高精度 GNSS 授时接收机技术[D]. 武汉: 武汉大学, 2019.
- [19] 杨文可. 高精度站间双向时间频率传递关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
- [20] 王翔, 董绍武, 武文俊, 等. 基于 1 Mcps/s 码速率的亚欧卫星双向时间比对性能分析[J]. 天文学报, 2019, 60(6): 1-10.  
WANG Xiang, DONG Shaowu, WU Wenjun, et al. Performance analysis of two-way time comparison of Eurasian satellites based on 1Mcps/s code[J]. Acta Astronomica Sinica, 2019, 60(6): 1-10.
- [作者简介]  
王崇阳 1990年生, 硕士, 工程师。  
杜文丛 1994年生, 硕士, 工程师。  
周云 1987年生, 硕士, 工程师。  
刘铁强 1984年生, 硕士, 高级工程师。  
孙建设 1984年生, 本科, 工程师。
- (本文编辑: 杨秀丽)