

基于光纤双向时间传递实时驯服 铷钟的远程时间溯源

方 维^{1,2,5,6}, 金尚忠^{2,3}, 陈德好^{5,6}, 梁 坤^{4,5,6}

(1. 浙江省计量科学研究院, 浙江 杭州 310018; 2. 中国计量大学
光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018; 3. 微纳制备与光电子检测国际科技
合作基地, 浙江 杭州 310018; 4. 北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044;
5. 中国计量科学研究院 时间频率计量科学研究所, 北京 100029; 6. 国家时间频率计量中心, 北京 100029)

摘要: 为了提高铷原子钟的远程时间溯源性能,在中国计量科学研究院 TWOTFT 链路的基础上,实施了对铷原子钟的高精密准实时驯服实验,驯服间隔分别为 16, 5, 1 min, 实现了基于 TWOTFT 的远程时间溯源原理验证。实验结果表明:在远程时间溯源中, TWOTFT 相比 GNSS 时间频率传递效果更优,且 1 min TWOTFT 远程时间溯源效果最优, 98.67% 的时差绝对值在 0.5 ns 内, 时间稳定性和频率稳定性分别为 $2.5 \times 10^{-11} \text{ s} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $5.0 \times 10^{-16} \text{ d}^{-1}$ 。

关键词: 计量学; 铷原子钟; 远程时间溯源; 光纤双向时间频率传递

中图分类号: TB939

文献标识码: A

文章编号: 1000-1158(2022)03-0542-05

Real-time Disciplining of Rubidium Clock for Remote Time Traceability with Two Way Optical Fiber Time and Frequency Transfer

FANG Wei^{1,2,5,6}, JIN Shang-zhong^{2,3}, CHEN De-hao^{5,6}, LIANG Kun^{4,5,6}

(1. Zhejiang Province Institute of Metrology, Zhejiang, Hangzhou 310018, China; 2. School of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Zhejiang, Hangzhou 310018, China; 3. International Technology Cooperation Base for Micro-Nano Fabrication and Optoelectronic Inspection, Zhejiang, Hangzhou 310018, China; 4. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 5. Division of Time and Frequency Metrology, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China; 6. National Time and Frequency Metrology Center, Beijing 100029, China)

Abstract: To improve the remote time traceability performance of the rubidium atomic clock, the high-precision quasi-real-time disciplining experiments were implemented on the rubidium atomic clock based on the TWOTFT links of National Institute of Metrology (NIM). In the experiment, the disciplining intervals are 16 min, 5 min, and 1 min, which realizes the verification of the principle of remote time traceability based on TWOTFT. The experimental results show that in remote time traceability, TWOTFT is more effective than GNSS time-frequency transfer, and the remote time traceability effect with a disciplining interval of 1 minute is the best, and 98.67% of the absolute values of the time differences are within 0.5 ns, and the time stability and frequency stability are $2.5 \times 10^{-11} \text{ s} \cdot \text{d}^{-1}$ and $5.0 \times 10^{-16} \text{ d}^{-1}$ respectively.

Key words: metrology; rubidium clock; remote time traceability; TWOTFT

1 引 言

随着秒定义的量子化,“时间”成为了准确度最高、应用最广的物理量^[1,2]。时间频率的高度统一对人们日常生活、航空航天以及国家经济等领域都有着十分重要的意义^[3-5]。中国计量科学研究院

(NIM)基于 GNSS 时间频率传递技术研发了 NIMDO 远程时间溯源装置,远程溯源至 UTC (NIM)的时间稳定性和频率稳定性分别优于 1 ns 和 3×10^{-14} ^[6-8]。但大气时延误差和卫星移动等影响因素很大程度上限制了 GNSS (global navigation satellite system, 全球导航卫星系统)时间频率传递精度,导致 NIMDO 远程溯源精度无法进一步提高,

而 TWOTFT (two way optical fiber time and frequency transfer, 光纤双向时间频率传递) 相比 GNSS 时间频率传递有着更高的精度和稳定性^[9~12]。2012 年, 德国物理技术研究院展开了光纤链路距离为 73 km 的 TWOTFT 工作, 不确定度低于 100 ps^[13]。2013 年, Olivier Lopez 等在承载互联网数据的 540 km 光纤链路也做了类似实验, 不确定度为 250 ps^[14]。2015 年, 中国计量科学研究院通过实验室光纤和实际光纤链路进行 TWOTFT 实验, 时间稳定度为 6 ps · s⁻¹ 和 0.9 ps · 100 s⁻¹, 时间传递不确定度小于 200 ps^[15]。

本文研究了 TWOTFT 技术, 在中国计量科学研究院的 TWOTFT 链路基础上, 实施了对铷原子钟的高精密准实时驯服实验, 实现了基于 TWOTFT 的远程时间溯源原理验证。

2 TWOTFT 远程时间溯源

2.1 TWOTFT

TWOTFT 原理如图 1 所示, TWOTFT 调制解调系统 A 外部接入时间频率源 A 的频率信号和 1 PPS (pulse per second) 信号作为参考, TWOTFT 调制解调系统 B 外部接入时间频率源 B 的频率信号和 1 PPS 信号作为参考。TWOTFT 调制解调系统将载有时间和频率参考信息的测距码调制到中频载波上。中频载波经过 E/O 转换器, 将其转换为光信号, 通过光纤传输到远程的站点, 然后由远程站点的 O/E 转换器将其转换为电信号。TWOTFT 调制解调系统通过光纤从相对的远程站点接收中频载波, 对调制的测距码进行解调, 并通过计数卡将接收到的 1 PPS 与参考本地 1 PPS 进行比较。参考和客户端将时差比对数据存储在本地文件中, 并通过网络将其相互传输, 从而完成双向时间传递。

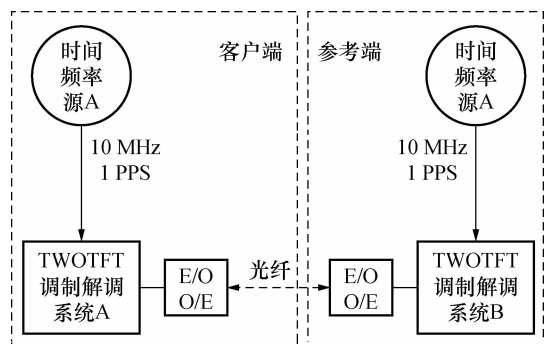


图 1 TWOTFT 原理图

Fig. 1 Schematic diagram of TWOTFT

TWOTFT 调制解调系统中的计数卡测量的时差不能真正反映客户端与参考端间的时差。客户端与

参考端的时差可通过式(1)可获得。

$$\begin{aligned}
 TS_C - TS_R = & +0.5 [TI_C - TI_R] + 0.5 [SP_C - SP_R] \\
 & + 0.5 [TX_C - RX_C] - 0.5 [TX_R - RX_R] \\
 & + [CD_C - CD_R]
 \end{aligned} \tag{1}$$

式中: TS_C 和 TS_R 代表客户端和参考端的本地参考时间; TI_C 和 TI_R 代表客户端和参考端计数卡测量的时间计数间隔; SP_C 和 SP_R 代表客户端和参考端的信号发射后的链路传输延时; TX_C 和 TX_R 分别代表客户端和参考端的信号发射延时; RX_C 和 RX_R 分别代表客户端和参考端的信号接收延时; CD_C 和 CD_R 分别代表客户端和参考端的链路校准延时。

在中国计量科学研究院昌平院区与和平里院区之间进行 TWOTFT 实验, TWOTFT 链路长约 55 km, 两地的参考时间频率源分别为 UTC (NIM) 和 UTC (NIM)_{Hepingli}, 比对时差数据如图 2 所示。

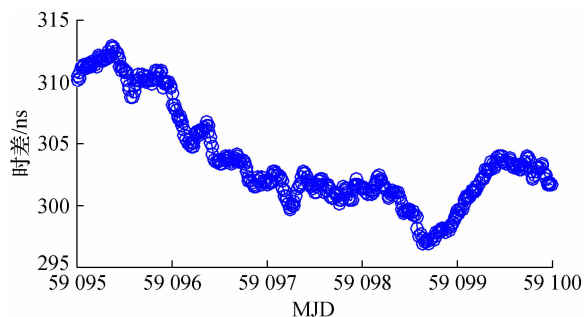


图 2 UTC (NIM)_{Hepingli} - UTC (NIM) 时差图

Fig. 2 Time differences between UTC (NIM)_{Hepingli} and UTC (NIM)

2.2 TWOTFT 远程时间溯源基本原理

TWOTFT 远程时间溯源是 TWOTFT 的进一步扩展和应用, 其基本原理与 GNSS 时间频率传递远程时间溯源相似^[16,17]。TWOTFT 远程时间溯源基本原理如图 3 所示。

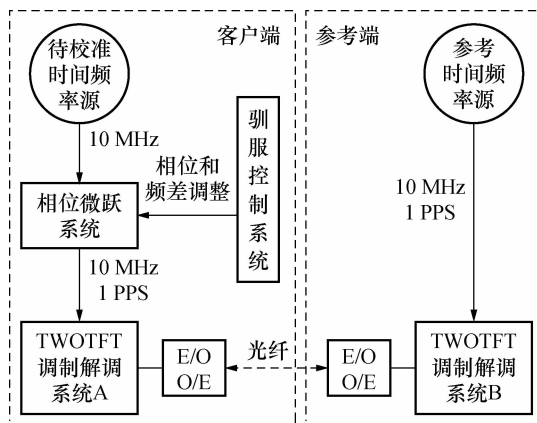


图 3 TWOTFT 远程时间溯源原理图

Fig. 3 Schematic diagram of remote time traceability based on TWOTFT

TWOTFT 调制解调系统 A 和 TWOTFT 调制解调系统 B 经过光电转换器后通过光纤链路相连接,组成 TWOTFT 链路。在客户端中,TWOTFT 调制解调系统 A 参考到相位微跃系统时频信号输出,而相位微跃系统参考至待校准时间频率源的时频信号输出。在参考端中,TWOTFT 调制解调系统 B 参考至参考时间频率源的时频信号输出。

通过 TWOTFT 实时获得客户端和参考端的时间差后,在客户端的驯服控制系统根据待校准时间频率源的特性来预测客户端与参考端时差,并将相位和频差调整量等数据传输给相位微跃系统,以对

相位微跃系统输出的频率和时间进行调整,使得客户端输出的时间和参考端参考时间源的时差在可接受范围之内,从而完成客户端时间频率源的 TWOTFT 远程时间溯源。

3 TWOTFT 远程时间溯源实验设计

在中国计量科学研究院的两条 TWOTFT 链路基础上,进行了 TWOTFT 远程时间溯源实验, TWOTFT 远程时间溯源实验设备连接如图 4 所示。

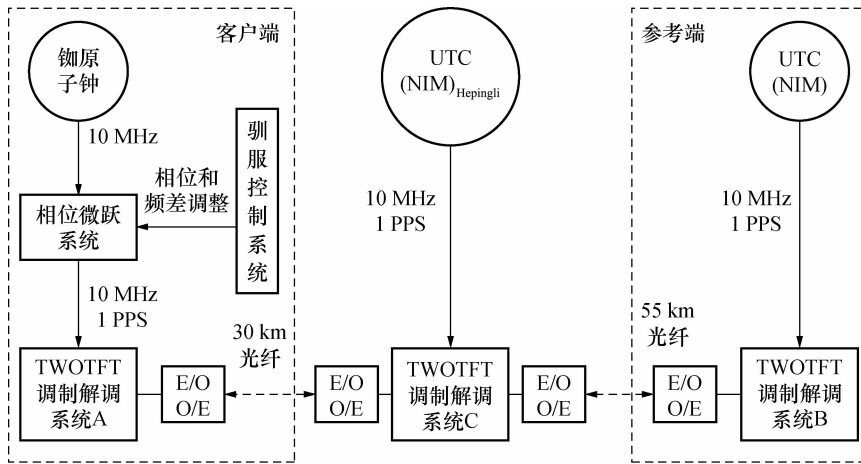


图 4 TWOTFT 远程时间溯源实验图

Fig. 4 Experimental Diagram of remote time traceability based on TWOTFT

第一条 TWOTFT 链路搭建在中国计量科学研究院和平里院区,光纤距离长为 30 m,光纤链路的两端分别连接位于和平里院区的 TWOTFT 调制解调系统 A 和 TWOTFT 调制解调系统 C,通过该 TWOTFT 链路可实时获得客户端中铷原子钟与 UTC (NIM)_{Hepingli} 的时差。第二条 TWOTFT 链路的光纤距离长约 55 km,光纤链路两端分别连接位于和平里院区和昌平院区的 TWOTFT 调制解调系统 C 和 TWOTFT 调制解调系统 B,通过该 TWOTFT 链路可实时获得 UTC (NIM)_{Hepingli} 与参考端 UTC (NIM) 的时差。通过两条链路时差比对得出铷原子钟与 UTC (NIM) 的时差,客户端的驯服控制系统采用一种类似 NIMDO 驯服算法的 PID 驯服算法,PID 驯服算法根据时差计算得出相位和频率调整量,并将其传递给相位微跃系统,然后相位微跃系统对铷原子钟的频率和相位进行调整,从而驯服铷原子钟,将其远程时间溯源至 UTC (NIM)。

4 实验结果分析

为了评估 TWOTFT 远程时间溯源性能,实施了

对铷原子钟的高精密准实时驯服实验,将中国计量科学研究院和平里院区的铷原子钟远程时间溯源至昌平院区的 UTC (NIM),驯服间隔分别为 16, 5, 1 min。客户端的铷原子钟远程时间溯源后与 UTC (NIM) 时差如图 5 ~ 图 7 所示。

对 16、5、1 min TWOTFT 远程时间溯源时差数据进行统计,统计结果如表 1 所示 ($|*|$ 代表客户端铷原子钟和 UTC (NIM) 时差的绝对值)。从表 1 中可以看出随着溯源时间间隔缩短, TWOTFT 远程时间溯源效果得到明显提高。1 min TWOTFT 远程时间溯源时,98.67% 的时差绝对值在 0.5 ns 内,总体时差绝对值在 1 ns 以内。

分别计算 16、5、1 min TWOTFT 远程时间溯源的时间稳定度 TDEV 和频率稳定度 MDEV,并与 16 min GNSS 时间频率传递的铷原子钟远程时间溯源相比较,时间稳定度 TDEV 和频率稳定度 MDEV 如图 8 和图 9 所示。

从时间稳定度图 8 和频率稳定度图 9 中看出,16 min TWOTFT 远程时间溯源效果明显优于 16 min GNSS 时间频率传递远程时间溯源。

表 1 时差数据统计
Tab. 1 Statistics of time differences

溯源间隔	观测量	$0 < * \leq 0.5 \text{ ns}$	$0.5 \text{ ns} < * \leq 1 \text{ ns}$	$1 \text{ ns} < * \leq 1.5 \text{ ns}$	$ * > 1.5 \text{ ns}$	平均值/ns	标准差/ns
16 min	观测点数/个	237	116	47	12	0.093	0.667
	百分比/(%)	57.52	28.16	11.41	2.91		
5 min	观测点数/个	854	277	65	2	0.028	0.494
	百分比/(%)	71.29	23.12	5.43	0.17		
1 min	观测点数/个	7140	96	0	0	0.004	0.180
	百分比/(%)	98.67	1.33	0	0		

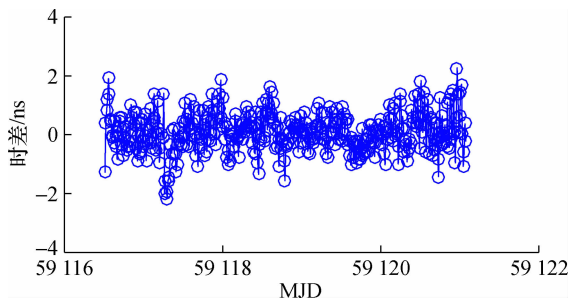


图 5 16 min TWOTFT 远程时间溯源时差图

Fig. 5 Time differences of 16 min remote time traceability based on TWOTFT

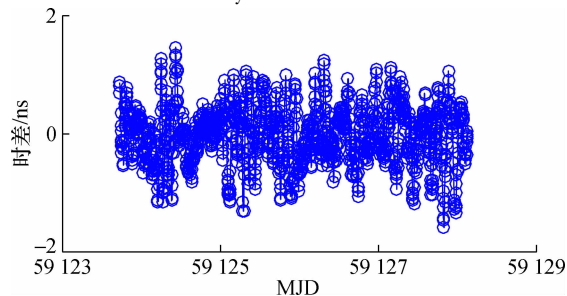


图 6 5 min TWOTFT 远程时间溯源时差图

Fig. 6 Time differences of 5 min remote time traceability based on TWOTFT

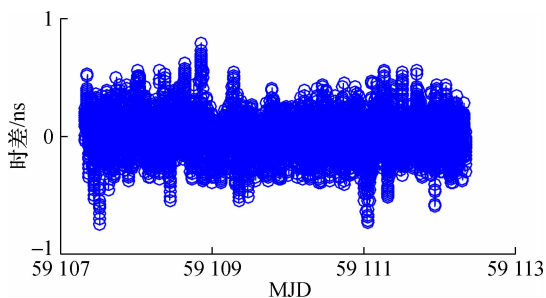


图 7 1 min TWOTFT 远程时间溯源时差图

Fig. 7 Time differences of 1 min remote time traceability based on TWOTFT

随着溯源时间间隔的缩短, TWOTFT 远程时间溯源的时间稳定性和频率稳定性总体上也得到不断提高。16、5、1 min TWOTFT 远程时间溯源的时间稳定性分别为 $1 \times 10^{-10} \text{ s} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $5.2 \times 10^{-11} \text{ s} \cdot \text{d}^{-1}$ 和

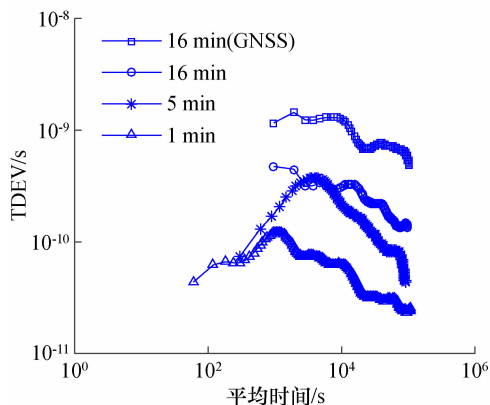


图 8 TDEV 时间稳定度

Fig. 8 TDEV Time stability

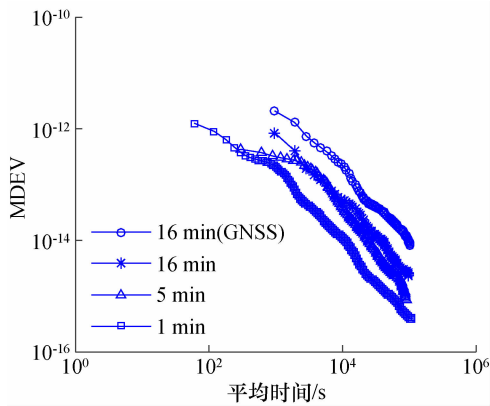


图 9 MDEV 频率稳定度

Fig. 9 MDEV Frequency stability

$2.5 \times 10^{-11} \text{ s} \cdot \text{d}^{-1}$ 。16、5、1 min TWOTFT 远程时间溯源的频率稳定性分别为 $2.8 \times 10^{-15} \text{ d}^{-1}$ 、 $1.0 \times 10^{-15} \text{ d}^{-1}$ 、 $5.0 \times 10^{-16} \text{ d}^{-1}$ 。

4 结 论

通过研究 TWOTFT 技术, 在中国计量科学研究院 TWOTFT 链路的基础上, 进行了 TWOTFT 实验, 完成了 UTC(NIM) 和 UTC(NIM)_{Hepingli} 的时间比对, 并实施了对铷原子钟的高精密准实时驯服实验, 驯

服间隔分别为 16、5、1 min, 实现了基于 TWOTFT 的远程时间溯源原理验证。实验结果表明 16 min TWOTFT 远程时间溯源效果明显优于 16 min GNSS 时间频率传递的铷原子钟远程时间溯源, 而在 TWOTFT 远程时间溯源实验中, 1 min TWOTFT 远程时间溯源效果最优, 98.67% 的时差绝对值在 0.5 ns 内, 时间稳定性和频率稳定性可分别达到 $2.5 \times 10^{-11} \text{ s} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $5.0 \times 10^{-16} \text{ d}^{-1}$ 。

[参 考 文 献]

- [1] 林弋戈, 梁坤, 方占军. 时间单位一秒的演进[J]. 中国计量, 2018(8):16-17.
Lin Y G, Liang K, Fang Z J. Unit of time—Evolution of seconds[J]. *China Metrology*, 2018(8):16-17.
- [2] 马爱文, 曲兴华. SI 基本单位量子化重新定义及其意义[J]. 计量学报, 2020, 41(2):129-133.
Ma A W, Qu X H. The Quantized Redefinition of the SI and its Signification[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2020, 41(2):129-133.
- [3] 袁通, 高厚磊, 徐彬, 等. 5G 高精度时间同步及在电网中的应用模式研究[J]. 电力信息与通信技术, 2020, (8):47-53.
Yuan T, Gao H L, Xu L, et al. Research on 5G High-Precision Time Synchronization and its Application Mode in Power Grid [J]. *Electric Power Information and Communication Technology*, 2020, (8):47-53.
- [4] 龙波, 王菊凤, 黄徐瑞晗, 等. 基于 NIMDO 及光纤传递的高精度时间同步系统研究[J]. 计量学报, 2019, 40(5):904-909.
Long B, Wang J F, Huang X R H, et al. Study of High Precision Time Synchronization System Based on NIMDO and Optical Fiber Transfer[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2019, 40(5):904-909.
- [5] 杨志强, 梁坤, 张爱敏, 等. 卫星双向时间频率比对软件接收技术研究[J]. 计量学报, 2021, 42(12):1658-1664.
Yang Z Q, Liang K, Zhang A M, et al. Research of Software Designed Receiver on Two Way Satellite Time and Frequency Transfer [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2021, 42(12):1658-1664.
- [6] Liang K, Zuo F, Pei C, et al. Real-Time Remote Calibration (RTRC) System for Time and Frequency [C]//Proceedings of IFCS-EFTF. Prague, Czech Republic, 2013.
- [7] 龙波, 尤捷雯, 张宇, 等. 基于 NIMDO 的远程时间频率溯源[J]. 计量与测试技术, 2019, 46(8):9-11.
Long B, You J W, Zhang Y, et al. Remote Traceability of Time and Frequency Based on NIMDO[J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2019, 46(8):9-11.
- [8] Liang K, Chen Q Y, Han K, et al. Replicating UTC (NIM) remotely for Time and Frequency Traceability [J]. *IJEE*, 2019, 26(4):147-155.
- [9] Zhang P, Tu R, Zhang R, et al. Combining GPS, BeiDou, and Galileo Satellite Systems for Time and Frequency Transfer Based on Carrier Phase Observations [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(2):324.
- [10] 武文俊. 卫星双向时间频率传递的误差研究[D]. 西安:中国科学院国家授时中心, 2012.
- [11] 王晔. 基于 GNSS 共视的远程时间频率溯源的性能提升方法研究[D]. 北京:北京交通大学, 2018.
- [12] 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.
- [13] Rost M, Piester D, Yang W, Feldmann T, Wübbena T and Bauch A. Time transfer through optical fibers over a distance of 73 km with an uncertainty below 100 ps[J]. *Metrologia*, 2012, 49(6):772-778.
- [14] Lopez O, Kanj A, Pottier P E, et al. Simultaneous remote transfer of accurate timing and optical frequency over a public fiber network [J]. *Applied Physics B*, 2013, 110(1):3-6.
- [15] Liang K, Zhang A, Yang Z, et al. Preliminary time transfer through optical fiber at NIM [C]//Proceedings of 2015 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium & the European Frequency and Time Forum. Denver, CO, USA, 2015.
- [16] Liang K, Hang Y, Fei Z, et al. Disciplined Oscillator System by UTC(NIM) for Remote Time and Frequency Traceability [C]//Proceedings of EFTF. Neuchatel, Switzerland, 2014.
- [17] 高小珣, 高源, 张越, 等. GPS 共视法远距离时间频率传递技术研究[J]. 计量学报, 2008, 29(1):80-83.
Gao X X, Gao Y, Zhang Y, et al. GPS Common View Method for Remote Time and Frequency Transfer [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2008, 29(1):80-23.



第一作者: 方维(1996-), 男, 浙江衢州人, 浙江省计量科学研究院工程师, 主要研究方向是时间频率计量。
Email: fangweimx@163.com



通讯作者: 梁坤(1980-), 山西大同人, 北京交通大学教授, 主要从事精密测量, 守时及时频传递研究。
Email: liangk@bjtu.edu.cn