

光纤时间频率同时传递系统中时间同步方法的研究

程楠¹ 陈炜¹ 刘琴² 徐丹¹ 杨飞¹ 桂有珍² 蔡海文¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800

²中国科学院上海光学精密机械研究所中科院量子光学重点实验室, 上海 201800

摘要 提出了一种应用于光纤时间频率传递系统中时间信号的校准和同步方案。分析了基于光学补偿方式和波分复用技术的时频传递系统中本地和远地时间信号同步方案的原理,并完成了实验室内50 km光纤链路的验证实验,时间同步精度为1.6 ps。在110 km的商用光纤链路上完成了时间信号的同步实验,理论计算的时间同步精度为30.0 ps,对时间信号的误差来源进行了理论分析。

关键词 光纤光学; 时频传递; 时间同步; 光学补偿; 波分复用

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0705002

Time Synchronization Technique for Joint Time and Frequency Transfer via Optical Fiber

Cheng Nan¹ Chen Wei¹ Liu Qin² Xu Dan¹ Yang Fei¹ Gui Youzhen² Cai Haiwen¹

¹Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²Key Laboratory for Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract A time calibration and synchronization technique for joint time and frequency transfer via optical fiber is described. The time synchronization scheme for joint time and frequency transfer based on optical compensation technique and dense wavelength division multiplexer (DWDM) is theoretically analyzed. The verification experiment is achieved via 50 km optical fiber spool in the laboratory, the accuracy of time synchronization is 1.6 ps. The time synchronization via 110 km urban fiber link is described, whose accuracy is 30.0 ps. The source of the error of the synchronization is analyzed.

Key words fiber optics; time and frequency transfer; time synchronization; optical compensation; wavelength division multiplexer

OCIS codes 060.2360; 120.3930; 120.7000

1 引言

高精度时频传递在时钟比对、甚长基线干涉和导航等领域扮演重要角色。由于受大气环境的影响,基于卫星的时频传递性能已经不能满足当前的应用需求^[1]。而光纤具有损耗低、受外界环境影响较小等优点,使其成为一种更佳的传输介质并且在近些年得到了迅速的发展^[2-10]。在导航、深空探测和甚长基线干涉等应用场合,各基站的时钟信号除了同源之外,时钟同步也是一项基本需求。而单一的频率传递并不能完全满足这些应用场合的需求。因此时频信号同时传递技术作为一种更为有效的解决方案受到了广泛的关注^[4-8],而在时频同传系统中,其中的关键技术就是两地之间的时间信号同步。针对这一技术世界各国的研究小组

收稿日期: 2015-01-09; 收到修改稿日期: 2015-03-21

基金项目: 国家自然科学基金(61405212)

作者简介: 程楠(1985—),男,博士研究生,主要从事光纤时频传递方面的研究。E-mail: chengnan98@siom.ac.cn

导师简介: 蔡海文(1975—),男,博士,研究员,主要从事光纤传感、光纤时频传递等方面的研究。

E-mail: hwcai@siom.ac.cn(通信联系人)

提出了不同的解决方案。第一种方案是利用双向卫星时频传递中使用的调制解调器通过双向时间比对的方法来实现两地时间同步^[4-5],该方案将调制解调器输出的微波信号通过光电、光电转换到光载波上在光纤链路上传输,在本地和远地端采用与卫星双向时间比对相同的方式实现两地时间同步。第二种方案通过频率信号的自外差环回比对得到光纤链路噪声并使用延迟线补偿链路噪声的方式,将稳定的时间信号传递到远地端,并且在本地端补偿采用前置补偿技术补偿链路的传输时延,实现两地之间的时间同步^[6-8]。其中时间信号可以调制到频率信号在同一个信道中传输,也可以利用波分复用(WDM)技术和频率信号在两个不同信道中传递;而链路噪声的补偿方式也可以分为光学补偿和电学补偿两种。

本文在通过 WDM 实现了 100 MHz 频率信号和秒脉冲(1PPS)时间信号在实验室内 80 km 光纤同时传递的基础上^[8],提出了一种基于 WDM 的时延校准和时间同步方案,对该方案进行了理论分析并通过实验室 50 km 的光纤链路上的时间同步实验验证了方案的可行性。在 110 km 的商用光纤链路上利用该方案进行了本地端和远地端时间信号的同步实验,并通过理论计算分析了实际链路中的同步精度。

2 时延校准和时间信号同步原理

图 1(a)所示为单光纤双向环回时频同传系统中的时间信号传输原理图,TIC 表示时间间隔测量仪。时间信号以 1PPS 为例,在本地端钟源产生的 1PPS 信号经过时间延迟产生模块进行时间延迟后,输入到本地端光发射机,通过光发射机转换成光信号后通过光纤链路传递到远地端,在远地端将光信号转换成 1PPS 输出给远地端用户,同时 1PPS 通过远地端的光发射机把电信号再次转换成光信号沿着相同的光纤链路回传,在本地端使用光接收机将回传的光信号转换成 1PPS 信号输出。输出的 1PPS 和本地端的钟源输出的 1PPS 信号进行比对,用来测量 1PPS 在链路中往返的时间,并根据测量值计算出能够使远地和本地端时间信号同步的时延值输入到时间延迟产生模块,达到两地之间时间信号同步的效果。

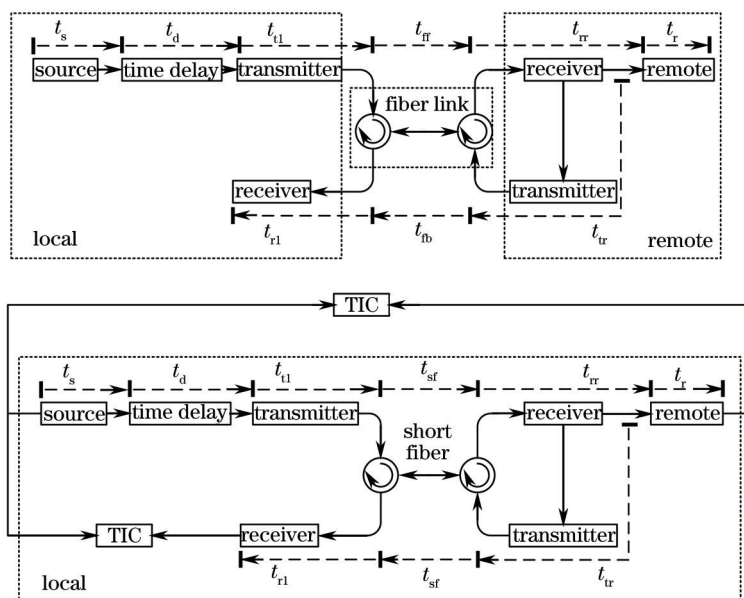


图 1 时间同步系统中的时间信号传输原理图

Fig.1 Schematic of the time transfer in time synchronization system

图 1 中 t_s 和 t_r 表示本地端钟源输出到时间延迟产生模块的时延和远地信号接收端机输出到用户端的时延,通常情况下为输入输出信号所用电缆的传输时延。 t_{d0} 为时间延迟产生模块的固有时延, t_{t1} 和 t_{r1} 为本地发射和接收端机的固有时延,同样, t_{tr} 和 t_{rr} 为远地发射和接收端机的固有时延。图 1 中,将光纤中的光信号从本地端传输到远地端称为正向传播,反之则为反向传播,因此 t_{fb} 和 t_{tr} 分别为光信号在光纤链路上正反向传输时延。

在系统中,通过设置时间延迟产生模块的时延值 t_{d1} 使得两地的 1PPS 同步,即

$$t_s + t_{d_0} + t_{d_1} + t_{t1} + t_{fb} + t_{tr} + t_r = 1, \quad (1)$$

而在整个系统中 1PPS 往返一周的总时延 t_r 表示为

$$t_T = t_s + t_{d_0} + t_{d_1} + t_{ic} + t_{ff} + t_{rr} + t_{lr} + t_{lb} + t_{rc}. \quad (2)$$

系统中虽然采用单根光纤双向环回信号,但是由于往返光的波长不同等原因使得信号在光纤上的往返时间不同,(2)式可改写为

$$t_T = t_s + t_{d_0} + t_{d_1} + t_{ic} + 2t_{ff} - \Delta t_f + t_{rr} + t_{lr} + t_{lb} + t_{rc}, \quad (3)$$

式中 Δt_f 为光纤链路正反向传输时延差,正反向传输时延差主要由以下几部分构成:因为正反向传输的信号光波长不同而产生的色散效应^[9],由于光纤中的偏振模式色散导致的正反向传输时延差,还有在实际的商用光纤链路中由地球自转造成的萨尼亚克效应引入的传输时延差,因此 Δt_f 可表示为

$$\Delta t_f = t_{ff} - t_{fb} = (\lambda_f - \lambda_b) \cdot D + t_{PMD} + t_{SA}, \quad (4)$$

式中 λ_f 和 λ_b 表示正向和反向传输光信号的波长, D 表示色散系数, t_{PMD} 表示由偏振模式色散引入的时延差, t_{SA} 表示的是由萨尼亚克引入的时延差。

从(1)式和(3)式可以看出,想要实现两地时间信号的准确同步,必须满足两个条件:1)准确地获得系统中各个端机的固定时延值;2)准确地测量时间信号在传输链路上环回后总时延。提出一种系统时延的校准方案,该方案不需要单独获得系统中每一个端机的准确时延,仅需要通过3次测量的结果便可以准确得到系统中所有端机的固有时延,同时可以实现本地和远地的时间信号同步。相对于其他时间同步方案,此方案更为简洁有效,同时可以获得很高的时间同步精度。

图1所示为时频同传系统的固定时延校准的原理图。如图2所示,首先将本地端机与远地端机通过一根短的光纤跳线相连,时延产生模块的时延值设置为0,使用TIC测0量1PPS信号从本地端机输入到远地端机输出端口的传输时延 t_{T_1} :

$$t_{T_1} = t_s + t_{d_0} + t_{ic} + t_{sf} + t_{rr} + t_r, \quad (5)$$

式中 t_{sf} 为光信号在光纤跳线中的时延。同时使用TIC测量1PPS信号往返一次的总时延为

$$t_{T_2} = t_s + t_{d_0} + t_{ic} + 2t_{sf} + t_{rr} + t_{lr} + t_{rc}. \quad (6)$$

因为光纤跳线的长度很短,所以认为跳线对往返光信号造成时延相等。然后将远地端机放置于远地机房并与实际光纤线路相连接,如图1所示。为了保证时延校准的准确性,此前使用的光纤跳线仍然保留在链路当中。此时本地端的TIC测得的1PPS信号往返传输的总时延 t_{T_3} 可表示为

$$t_{T_3} = t_s + t_{d_0} + t_{ic} + 2t_{sf} + 2t_{ff} - \Delta t_f + t_{rr} + t_{lr} + t_{rc}, \quad (7)$$

由(4)式可知,如果想实现远地和本地端的1PPS信号同步,则需要通过控制时延产生模块产生一个时间延迟 t_{d_1} ,使得

$$t_s + t_{d_0} + t_{d_1} + t_{ic} + t_{sf} + t_{ff} + t_{rr} + t_r = 1, \quad (8)$$

由(4)~(7)式可得时延产生模块的设定值

$$t_{d_1} = 1 - t_{T_1} + \frac{t_{T_2} - t_{T_3}}{2} + \frac{\Delta t_f}{2}. \quad (9)$$

3 实验方案

3.1 基于光纤的时频同传和时间同步系统

图2为基于波分复用技术和光学补偿方式的时频同传和时间同步系统的原理图。正弦频率信号和1PPS信号通过本地端的光发射机分别调制到两个不同波长的光波上(λ_1, λ_2),两束光经过同一根光纤传递到远地端,通过远地端机分别解调出频率和1PPS信号输出给用户的同时,两路信号分别通过远地端机的光发射机调制到不同波长的光波上(λ_3, λ_4)沿着同一根光纤回传到本地端。在本地端,回传的频率信号与频率源的信号通过鉴相器获得信号在光纤链路中往返传输的相位差。光纤受外界环境的影响例如温度的变化引起往返的相位差的波动。利用相位差反馈控制可控光纤延迟线来补偿光纤链路的波动,使得整个光纤链路的传输时延保持不变。在本地端的1PPS经过时延产生模块延迟后输入到波长为 λ_1 光发射机中,本地端频率信号输入到波长为 λ_2 的光发射机中,两个发射机输出的光信号通过WDM合成一路光信号通过扰偏器、环形

器和可控光纤延迟线输入到光纤线路中,在长距离传输中在光纤链路中间还需要通过双向掺铒光纤放大器(Bi-EDFA)对信号光进行光放大,最后输入到远地端的信号接收端机中。在远地端机中,光信号通过WDM分解出两路光信号并分别通过两个探测器(PD)解调出1PPS信号和频率信号。1PPS信号通过脉冲分配放大模块(PDA)后分成多路信号,其中一路信号输入到波长为 λ_4 发射机中。频率信号经过放大后一部分经过信号处理后输出,另一部分输入到波长为 λ_3 发射机中。两路光信号通过WDM合成一路沿着同一根光纤回传,在本地端经过环形器后通过WDM分解出两路光信号,通过探测器后得到一路为1PPS信号和本地信号源输出的一路1PPS信号输入到TIC(SR620)中测量1PPS信号的往返总时延,另一路光信号经过探测器并放大后得到频率信号,和本地端信号源输出的一路频率信号输入到鉴相器中测量传递链路噪声,鉴相器输出信号经过比例积分微分系统(PID)反馈控制的光纤延迟线来补偿链路噪声。

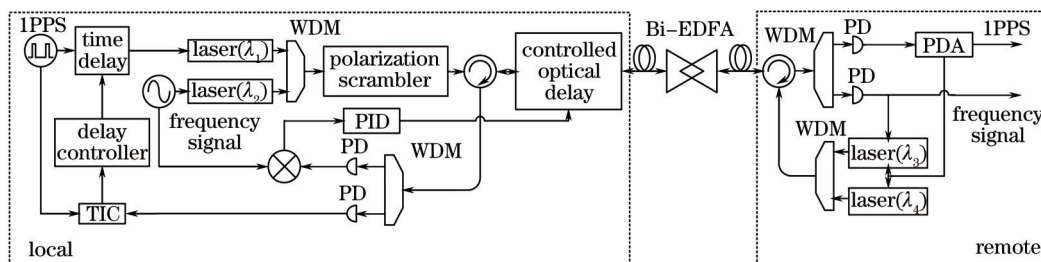


图2 时频同传和时间同步系统原理图

Fig.2 Time synchronization and frequency transfer system

在系统中,由温度和振动引起的光纤链路传输时延的波动通过可控光学延迟线进行补偿。当整个光纤链路稳定后在光纤上传输的任意信号都是稳定的,所以通过光学补偿的方式可以实现频率和时间信号的同步补偿。当链路稳定后,时间信号的传输时延保持不变,因此只要补偿由传输链路引入的绝对时延差即可实现本地端与远地端时间信号长期稳定的同步。

3.2 时间信号同步验证实验

基于图2所示的时间同步系统在实验室50 km的光纤链路上,针对上述方案对1PPS绝对传输时延的校准效果进行了实验验证,验证结果如图3所示。由于目的是为了验证两地的1PPS是否实现了同步,所以主要关

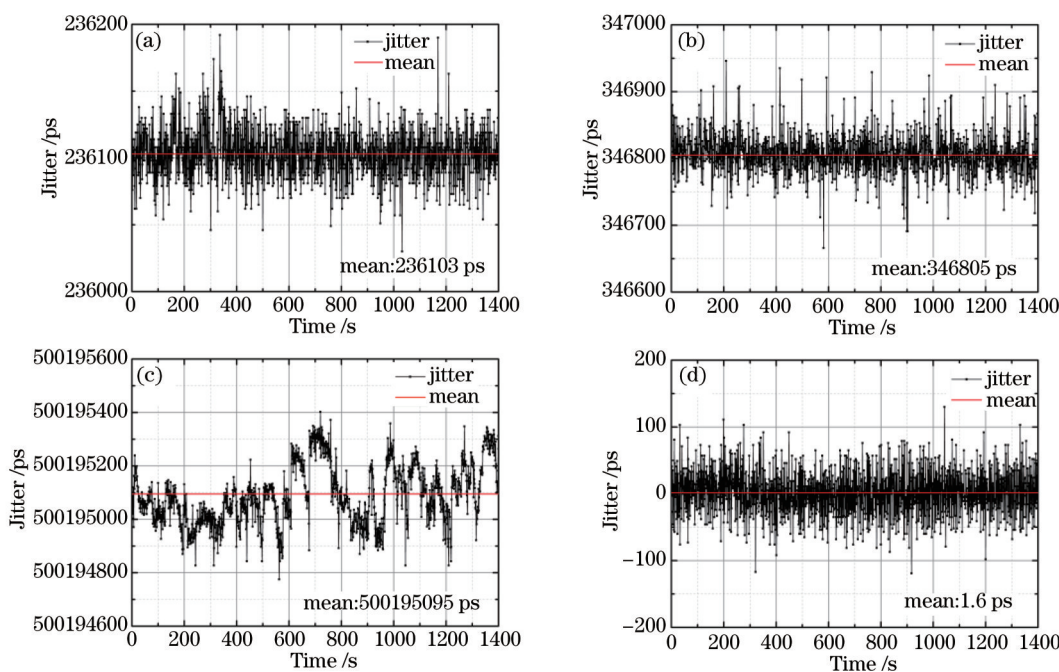


图3 时间同步方案实验验证。(a) 第一次测量的时间抖动和平均值;(b) 第二次测量的时间抖动和平均值;(c) 第三次测量的时间抖动和平均值;(d) 两地之间时间信号同步结果

Fig.3 Experimental results of the time synchronization system. (a) Time jitter and the average value of the first measurement; (b) time jitter and the average value of the second measurement; (c) time jitter and the average value of the first measurement; (d) result of the time synchronization between two sites

注的是 1PPS 传输的绝对时延值,因此每一次测量的结果均取短时间多次测量的平均值。同时保证每一次测试时,各个端机的光信号输入和输出光功率保持不变,并且测试时 TIC 的脉冲触发电平也保持不变。由图 3(a)~(c)可知,TIC 第一次测量结果的平均值 t_{T_1} 为 236103 ps;第二次测量结果的平均值 t_{T_2} 为 346805 ps;第三次测量结果的平均值 t_{T_3} 为 500195095 ps。实验中,由 Bi-EDFA 双向不对称引入的时延差已事先校准。然后采用色散测量仪(MT-8000)来测量正反向光信号的色散值,实验中通过仪器测得的正反向光信号由色散引入的传输时延差为 836.8 ps。在系统中采用扰偏器去消除偏振模式色散对正反向传输时延差的影响,可以认为由偏振模式色散引入传输时延差已经下降到了可以忽略的程度^[10]。最后,由于实验是在实验室内进行的,所以忽略萨尼亚克效应造成时延差。由此将测量值代入(9)式,可以计算出时延产生模块的时延设定值为 999749840170 ps。最后使用 TIC 测量本地端信号源输出的 1PPS 和远地端机输出的 1PPS 的时延,结果如图 3(d)所示,同步后 1PPS 信号绝对时延差的短期平均值为 1.6 ps,实验结果验证了时间同步方案的正确性和可行性。

3.3 商用光纤链路测试

3.3.1 时间信号同步的长期稳定性

在 110 km 的实际商用链路上使用相同的时间同步系统进行了一次时间同步实验。在 3.2 节中,只关注的是 1PPS 的绝对时延差的校准结果,而当校准了两地时间信号的绝对时延差实现同步后,时间信号同步的长期稳定性也是一个表征同步性能的重要指标。因为该方案是将传输时延稳定并且经过前置校准后的 1PPS 传递到远地端,所以可以用 1PPS 的传递稳定度来表征两地之间的同步稳定度,在本地端测量从远地端环回的 1PPS 信号的时间阿伦方差(TDEV)如图 4 所示。图中黑色的线表示的是光纤链路在开环状态下的 TDEV,而红色的线表示的是经过光学补偿后的 TDEV,从图中可知,通过光学补偿后,在平均时间为 1000 s 时,TDEV 已经下降到 5.4 ps,在平均时间为 100 s 时,1PPS 传递的短期抖动均方根(RMS)值为 20.1 ps。

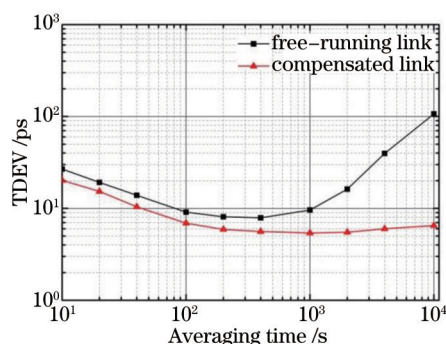


图 4 实际商用链路的测试中远地端环回的 1PPS 的 TDEV

Fig.4 TDEV of 1PPS coming back from the remote site via urban fiber link

3.3.2 同步误差计算

在实地链路中,由于本地和远地端机相隔很远,无法使用 TIC 准确地测量 1PPS 的同步性能,因此只能通过理论计算来分析商用光纤链路上的时间同步精度。由(4)式和(9)式可知,绝对时间同步精度主要受正反向传输时间差 Δt_r 的测量精度影响,因此主要从光纤色散、萨尼亚克效应、时延产生模块的延时精度以及端机受室内环境温度变化而引起的传输时延变化等方面来估算两地之间的时间同步精度。

本实验中使用的色散测量仪的色散系数测量不确定性为 ± 0.06 ps/(nm·km),并且正反向光信号的波长相差 0.8 nm,因此可知由色散系数测量精度引入的时间同步的误差为 ± 5.28 ps。当光信号在商用光纤链路上传输时,还必须要考虑萨尼亚克效应对传输时延不对称的影响^[11]。萨尼亚克效应引入的传输时延差可表示为

$$T_{SA} = 2\omega A_E / c^2, \quad (10)$$

式中 ω 表示的是地球自转的角速度, A_E 表示的是地球表面铺设的光缆线路在赤道平面的投影曲线与地心围成的图形的面积, c 表示真空的光速。当光信号自西向东传输时,萨尼亚克效应引入的传输时延为正值,反之为负值。在实际中由于光缆铺设的不规则性,只能估算萨尼亚克效应引入的传输时延差。为了简化运算,按照本地端和远地端的经纬度分别计算出投影面积的最大和最小值的平均值来估算萨尼亚克效应引入的时延差,因此可以得到,估算误差为最大和最小差值的一半,本文中通过计算得到萨尼亚克效应引入的时间

同步误差为 ± 1.098 ps。另外时延产生模块的时延精度为5 ps,所以时延产生模块引入的同步误差为 ± 2.5 ps。实验中各个端机均放置在温度恒定的实验室中,两地的室内温度相同并且温度变化控制在1℃以内,室内温度不同造成的端机绝对时延的变化在 ± 1 ps以内。最后,在实地实验中还需要考虑到1PPS的抖动引入的同步误差,本实验中1PPS的RMS抖动为20.1 ps。综上所述,本地端和远地端的时间同步误差为 ± 30.0 ps。

4 讨 论

基于共视原理的卫星授时的时间同步系统可以达到纳秒量级的授时精度^[12],而基于卫星双向时间比对的时间同步系统,时间同步精度可以达到纳秒量级^[13]。在时频传递和时间同步的实际应用中,例如利用多基站雷达的短基线、中长基线、长基线和超长基线干涉进行目标测距和卫星定轨等应用中,各雷达基站时钟1 ns的时间同步误差在测距过程中会产生0.3 m的测距误差^[14],而采用光纤时频传递和时间同步系统时,基站时钟的同步精度可以达到30 ps,测距的精度可以提高至1 cm量级。

从测试结果看,1PPS传递抖动仍然较大,表现为1PPS的RMS值抖动较大,TDEV曲线在平均时间为10 s和100 s的尺度下的抖动依然较大,影响了时间同步精度的提高。系统的短期抖动主要受到电子学噪声的影响,因此激光发射机和探测器等模块的性能还有待进一步的提升。下一步的研究方向是进一步提高时间同步精度,研制应用于更长距离的光纤时频传递和时间同步系统。

5 结 论

提出了一种应用于单光纤双向环回时间同步系统中的时间信号的校准和同步方案。详细阐述了基于光学补偿和波分复用的时频传递和时间同步系统中本远地时间信号的同步理论。在实验室50 km的光纤链路上对理论进行了实验验证,得到了1.6 ps的时间同步精度,证明了该方案的正确性和可行性。在110 km的商用光纤链路上进行了两地之间时间信号传递和同步实验,最后通过理论分析计算出两地之间时间信号的时间同步误差为30.0 ps。

参 考 文 献

- 1 W Lewandowski, J Azoubib, W J Klepczynski. GPS: Primary tool for time transfer[J]. Proc IEEE, 1999, 87(1): 163–172.
- 2 Hua Yun, Gui Youzhen, Yang Fei, *et al.*. Analysis of repeater for time and frequency dissemination via optical fiber[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(9): 0905002.
华 芸, 桂有珍, 杨 飞, 等. 光纤时频传递系统的中继技术分析[J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0905002.
- 3 Li Xiaoya, Zhu Yong, Lu Lin, *et al.*. Study on high precision disciplined time–frequency transferring experiments through optical fiber link[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34 (5): 0506004.
李晓亚, 朱 勇, 卢 麟, 等. 高精度光纤时频伺服传递实验研究[J]. 光学学报, 2014, 34 (5): 0506004.
- 4 M Rost, D Piester, W Yang, *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.
- 5 O Lopez, A Kanj, P Pottie, *et al.*. Simultaneous remote transfer of accurate timing and optical frequency over a public fiber network [J]. Appl Phys B, 2013, 110(1): 3–6.
- 6 P Krehlik, Ł Sliwczynski, Ł Buczek, *et al.*. Fiber–optic joint time and frequency transfer with active stabilization of the propagation delay[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 61(10): 2844–2851.
- 7 B Wang, C Gao, W L Chen, *et al.*. Precise and continuous time and frequency synchronization at the 5×10^{-19} accuracy level[J]. Sci Rep, 2012, 2: 556.
- 8 F Yang, D Xu, Q Liu, *et al.*. Accurate transmission of time and frequency signals over optical fibers based on WDM and two way optical compensation techniques[C]. CLEO: Applications and Technology, 2013.
- 9 Ł Sliwczynski, P Krehlik, M Lipiński. Optical fibers in time and frequency transfer[J]. Meas & Sci Technol, 2010, 21 (7): 075302.
- 10 Ł Sliwczynski, P Krehlik, Ł Buczek, M Lipiński, *et al.*. Active propagation delay stabilization for fiber–optic frequency distribution using controlled electronic delay lines[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(4): 1480–1488.
- 11 Yu Longqiang, Lu Lin, Wang Rong, *et al.*. Analysis of the Sagnac effect and its influence on the accuracy of time transfer system by

- the optical fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0306003.
- 于龙强, 卢麟, 王荣, 等. Sagnac效应对光纤时间传递精度的影响分析[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0306003.
- 12 Xu Longxia. A New Common-View Based Timing Method[D]. Xi'an: National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, 2012: 5.
- 许龙霞. 基于共视原理的卫星授时方法[D]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2012: 5.
- 13 Li Meng. Research on Improving Ranging Precision Method in Dual One-Way Ranging and Time Synchronization System[D]. Xi'an: National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, 2014: 4.
- 李梦. 双向测距与时间同步系统提高测量精度的方法研究[D]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2014: 4.
- 14 Tan Jianhua. Designing of Multi-Base Radar's Synchronization Technology[D]. Nanjin: Nanjing University of Science and Technology, 2012: 21.
- 谭建华. 多基地雷达同步技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012: 21.

栏目编辑: 何卓铭