

激光与光电子学进展

基于双纤环回比值法的光纤时间同步技术

陈丁^{1,2}, 许江宁¹, 吴苗¹, 何泓洋^{1*}

¹中国人民解放军海军工程大学电气工程学院, 湖北 武汉 430033;

²九江学院电子信息工程学院, 江西 九江 332005

摘要 提供了一种基于双纤环回比值法的光纤时间同步技术, 系统通过 3 个时间间隔计数器的测量值及相关比值关系, 可直接测算出主站到从站的单向传输的时延值, 消除了环境温度变化导致的光纤长度膨胀变化及往返时延值的变化对时间同步精度的影响。主从站点分别由 100 km 和 75 km 光纤相连, 当光纤链路温度在 $-20\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内变化的环境下, 采用 1490 nm 和 1550 nm 波长时, 能够将单向时延估算误差降低约 260 ps, 采用 1310 nm 和 1550 nm 波长时, 授时精度提升约 1.3 ns。

关键词 光纤光学; 时间同步; 波分复用; 时延比值; 环回法

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1706001

Optical Fiber Time Synchronization Technology Based on Double Fiber Round-Trip Ratio Method

Chen Ding^{1,2}, Xu Jiangning¹, Wu Miao¹, He Hongyang^{1*}

¹College of Electrical Engineering, The Chinese People's Liberation Army Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China;

²College of Electronic and Information Engineering, Jiujiang University, Jiujiang, Jiangxi 332005, China

Abstract This paper provides an optical fiber time synchronization technology based on the double fiber round-trip ratio method. The system can directly measure the unidirectional transmission delay from a master station to a slave station through the measured values of three time interval counters and the correlation ratio relationship. This method eliminates the influences of fiber length expansion and round-trip delay caused by environmental changes on the time synchronization accuracy. The master and slave stations are connected by 100 km and 75 km optical fibers, respectively. When the fiber link temperature changes from $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ and the wavelengths of 1490 nm and 1550 nm are used, the estimation error of unidirectional delay can be reduced to 260 ps, approximately. When 1310 nm and 1550 nm wavelength pair is used, the timing accuracy is improved about 1.3 ns.

Key words fiber optics; time synchronization; wavelength division multiplexing; time delay ratio; round-trip method

OCIS codes 060.3510; 060.4230; 060.4510

1 引言

随着光钟的秒稳定度和天稳定度已达到 10^{-16}

和 10^{-18} 量级, 时间已成为 7 个国际基本单位中测量精度最高的物理量^[1]。各个用户端与高精度钟源的时间同步成为了科学研究、导航定位、航空航天、电

收稿日期: 2020-11-16; 修回日期: 2020-12-18; 录用日期: 2021-01-02

基金项目: 国家自然科学基金(41804076)、国家重点研发计划(2016YFB0501700, 2016YFB0501701)

通信作者: *xgdhehongyang@163.com

力传输、军事安全等领域的重要需求。由于具有低损耗、高稳定、大带宽等独特优势,光纤时频同步技术在近些年已成为精度最高的授时手段之一^[2]。根据光缆网铺设的实际情况,对远距离高精度光纤时间传递方法展开研究,这具有十分重要的现实意义。

目前,对光纤时间传递技术的研究方法主要有双纤双向同波长传输技术、单纤双向波分复用技术、单纤双向环回法、单纤双向时分复用技术等方法^[3-6]。比较以上 4 种方法,双纤双向同波长传输存在光纤链路长度不相等,现网光纤长度无法精准测量等问题;单纤双向波分复用和环回法存在往返波长、折射率不相等导致往返时延不对称,且时延差随链路温度变化而波动的问题。由于环境温度难以测量,授时系统缺乏对环境温度变化引起时延差值变化的跟踪估算;单纤双向时分复用技术的成本高、难以大范围应用^[7]。

实际的光纤链路不可避免地受到环境因素影响,例如压力、温度变化等,其中温度变化会明显影响光纤链路的传递时延值,是影响基于单纤双向波分复用和环回法传递精度的主要因素^[8]。对于基于波分复用技术环回传递中往返时延差 $\tau_1 - \tau_2$ 的计算,传统估算方法直接将 τ_1 与 τ_2 之间的关系进行常温下的定值处理,对于温度变化条件下的时延差变化未予以考虑^[9-10]。因此传统方法仅适用于实验室常温条件下的测试,对于实际铺设的光纤还需进一步分析。如果能准确获取光纤纤芯的实时温度,则可直接计算出往返时延,进而较准确地计算出往返时延差。然而,即便仅测量光纤表面的温度,并将测试数据用于时延差计算,也难以实现精确计算。此外,通过光纤表层温度估算的纤芯温度误差较大,实际环境下光缆网、光纤、纤芯三者的温度各不

相同,可见通过直接测量所得的温度数据可行性不高^[11-12]。针对温度导致的时延值波动,目前研究人员尚未提出较好的方法。

本文提出的双纤环回比值法可解决上述存在的技术问题,在温度变化条件下通过测量两根光纤上 4 路时间信号的时延和与时延差,并通过时延的比值关系,直接求解主从站点的单向传输时延。本文方案在算法中不仅消除了温度变化对光纤长度的影响,同时消除了温度变化对不同波长信号传输时延值的影响。相比于传统的单纤波分复用和单纤环回法,本文方法虽然多采用了一根光纤,但实际光缆中通常都布设了多根环境温度几乎相同的光纤,因此,此方法未增加工程成本。同时,本文方法所需的双纤温度同步变化的前提条件与实际光缆结构特点高度一致,通过对主从站点单向传输时延的精准估算,实现实时自动补偿,本文方法相比于传统的单纤环回法大大提高了光纤时间传递精度。

2 双纤环回时间同步原理

基于双纤环回比值法的光纤时间同步系统包括主从两个授时站点。主站(master)和从站(slave)包括钟源、待驯服时钟、激光发射器、波分复用模块、时间间隔计数器、光探测器、时延补偿模块等设备。其中,激光发射器用于把时间信号转换为光信号;波分复用模块用于把时间信号调制到两个不同波长并将其发送到光纤链路中;时间间隔计数器用于测量发送或接收信号起止时刻,并输出二者的时间间隔值;光探测器用于接收对方站点发送的时间信号;时延补偿模块用于根据估算获取的单向时延值对从站待驯服时钟的时间信号进行补偿。基于双纤环回比值法的光纤时间同步原理如图 1 所示。

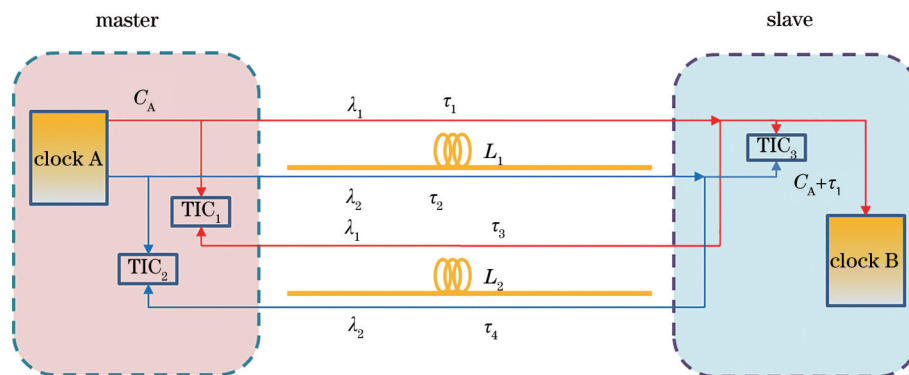


图 1 基于双纤环回比值法的光纤时间同步原理图

Fig. 1 Schematic diagram of optical fiber time synchronization based on double fiber round-trip ratio method

主站与从站由两根光纤相连, 光纤长度分别为 L_1 和 L_2 , 主站时钟 clock A 作为参考钟源, 从站时钟 clock B 作为待补偿时钟。在主站, 经过调制的时间信号在时钟 clock A 的 C_A 时刻分别以波长 λ_1 和 λ_2 经长度为 L_1 的光纤链路到达从站。

波长为 λ_1 的信号在长度为 L_1 的光纤中的传输时延 τ_1 为

$$\tau_1 = \frac{L_1}{c} \left(n_{\lambda_1} - \lambda_1 \frac{dn_{\lambda_1}}{d\lambda_1} \right), \quad (1)$$

式中: n_{λ_1} 为波长为 λ_1 的光信号的折射率; c 为光速。波长为 λ_2 的信号在长度为 L_1 的光纤中的传输时延 τ_2 为

$$\tau_2 = \frac{L_1}{c} \left(n_{\lambda_2} - \lambda_2 \frac{dn_{\lambda_2}}{d\lambda_2} \right), \quad (2)$$

式中: n_{λ_2} 为波长为 λ_2 的光信号的折射率。时间信号到达从站后, 继续分别以波长 λ_1 和 λ_2 经长度为 L_2 的光纤链路环回到主站。

波长为 λ_1 的信号在长度为 L_2 的光纤中的传输时延 τ_3 为

$$\tau_3 = \frac{L_2}{c} \left(n_{\lambda_1} - \lambda_1 \frac{dn_{\lambda_1}}{d\lambda_1} \right). \quad (3)$$

波长为 λ_2 的信号在长度为 L_2 光纤中的传输时延 τ_4 为

$$\tau_4 = \frac{L_2}{c} \left(n_{\lambda_2} - \lambda_2 \frac{dn_{\lambda_2}}{d\lambda_2} \right). \quad (4)$$

主站安装两台时间间隔计数器 TIC_1 和 TIC_2 , TIC_1 用于测量波长为 λ_1 的光信号一个环回周期 (主站 → 从站 → 主站) 的时延和 T_{IC1} , 即 $T_{IC1} = \tau_1 + \tau_3$; TIC_2 用于测量波长为 λ_2 的光信号一个环回周期的时延和 T_{IC2} , 即 $T_{IC2} = \tau_2 + \tau_4$ 。从站安装了一台时间间隔计数器 TIC_3 , 用于测量主站至从站波长 λ_1 和 λ_2 光信号的单向时延差 T_{IC3} , 即 $T_{IC3} = \tau_1 - \tau_2$ 。

由(1)式和(3)式可知, 时间间隔计数器 T_{IC1} 的测量值的表达式为

$$T_{IC1} = \frac{L_1 + L_2}{c} \left(n_{\lambda_1} - \lambda_1 \frac{dn_{\lambda_1}}{d\lambda_1} \right). \quad (5)$$

由(2)式和(4)式可知, 时间间隔计数器 T_{IC2} 的测量值的表达式为

$$T_{IC2} = \frac{L_1 + L_2}{c} \left(n_{\lambda_2} - \lambda_2 \frac{dn_{\lambda_2}}{d\lambda_2} \right). \quad (6)$$

时间间隔计数器 T_{IC3} 的测量值的表达式为

$$T_{IC3} = \frac{L_1}{c} \left[\left(n_{\lambda_1} - \lambda_1 \frac{dn_{\lambda_1}}{d\lambda_1} \right) - \left(n_{\lambda_2} - \lambda_2 \frac{dn_{\lambda_2}}{d\lambda_2} \right) \right]. \quad (7)$$

由(1)式和(7)式可得

$$\frac{\tau_1}{T_{IC3}} = \frac{n_{\lambda_1} - \lambda_1 \frac{dn_{\lambda_1}}{d\lambda_1}}{\left(n_{\lambda_1} - \lambda_1 \frac{dn_{\lambda_1}}{d\lambda_1} \right) - \left(n_{\lambda_2} - \lambda_2 \frac{dn_{\lambda_2}}{d\lambda_2} \right)}. \quad (8)$$

由(5)式和(6)式可得

$$\frac{T_{IC1}}{T_{IC1} - T_{IC2}} = \frac{n_{\lambda_1} - \lambda_1 \frac{dn_{\lambda_1}}{d\lambda_1}}{\left(n_{\lambda_1} - \lambda_1 \frac{dn_{\lambda_1}}{d\lambda_1} \right) - \left(n_{\lambda_2} - \lambda_2 \frac{dn_{\lambda_2}}{d\lambda_2} \right)}. \quad (9)$$

由(8)式和(9)式可得, $\frac{\tau_1}{T_{IC3}}$ 与 $\frac{T_{IC1}}{T_{IC1} - T_{IC2}}$ 的比值与光纤长度 L_1 和 L_2 无关, 为

$$\frac{n_{\lambda_1} - \lambda_1 \frac{dn_{\lambda_1}}{d\lambda_1}}{\left(n_{\lambda_1} - \lambda_1 \frac{dn_{\lambda_1}}{d\lambda_1} \right) - \left(n_{\lambda_2} - \lambda_2 \frac{dn_{\lambda_2}}{d\lambda_2} \right)},$$

这是一个随环境温度变化的变量。光纤时间同步系统中两根光纤包裹于同一根光缆中, 主从站之间同一环回周期内往返时延的时间间隔小于 1 ms, 在温度缓慢变化的环境下, 1 ms 内的往返链路温度差为 10^{-7} °C 量级, 由此引起的时延差为 fs 级。因此, 同一环回周期内 2 根光纤链路的 4 路光信号所处的环境温度变化具有高度一致性, 在任意时刻(8)式和(9)式的比值相等, 由此可得

$$\frac{\tau_1}{T_{IC3}} = \frac{T_{IC1}}{T_{IC1} - T_{IC2}}. \quad (10)$$

根据(10)式求解得到用于补偿 clock B 的时延差值 τ_1 为

$$\tau_1 = \frac{T_{IC1} \times T_{IC3}}{T_{IC1} - T_{IC2}}. \quad (11)$$

将计算出的 τ_1 送入从站的时延补偿模块, 在从站驯服时钟 clock B。当自主站发出的波长为 λ_1 的时间信号到达从站时, 主站钟源 clock A 的时刻值由 C_A 变化为 $C_A + \tau_1$, 此刻未被补偿从站时钟 clock B 的时刻值为 C_B , 因此需把 clock B 的时刻值补偿至 $C_A + \tau_1$, 从而实现主从站点的时间同步。

基于双纤环回比值法的光纤时间同步系统时序图见图 2。

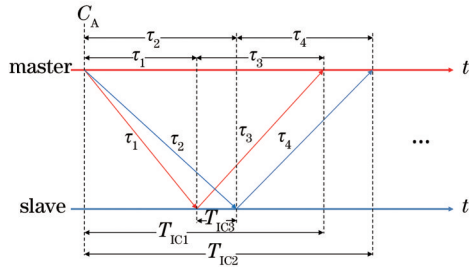


图 2 基于双纤环回比值法的光纤时间同步系统时序图
Fig. 2 Timing diagram of optical fiber time synchronization system based on double fiber round-trip ratio method

3 实验验证与分析

光纤链路传输时延值可表示为^[13]

$$\tau_{\lambda,T} = \frac{1}{c} L_0 \left[1 + \alpha(T - T_0) \right] \left(n_{\lambda,T} - \lambda \frac{dn_{\lambda,T}}{d\lambda} \right), \quad (12)$$

式中： T 为光纤链路的实时温度； T_0 为初始温度，取 23℃； L_0 为光纤在初始温度时的物理长度； α 为光纤的热膨胀系数，其值为 $5.6 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ； λ 为光信号的波长； $n_{\lambda,T}$ 为光纤的 Sellmeier 折射率，其表达式为^[4]

$$n_{\lambda,T} = \sqrt{A + B/(1 - C/\lambda^2) + D/(1 - E/\lambda^2)}. \quad (13)$$

对于 G. 652 光纤，(13)式中相关参数的设置如下： $A=6.90754 \times 10^{-6}T + 1.31552$ ， $B=2.35835 \times 10^{-5}T + 0.788404$ ， $C=5.84758 \times 10^{-7}T + 0.0110199$ ， $D=5.48368 \times 10^{-7}T + 0.91326$ ， $E=100$ 。

通过把温度和波长等相关参数代入(12)式和(13)式，可精确模拟光纤链路随温度变化的传输时延值，从而仿真出(6)~(9)式的结果。

系统仿真设置光纤长度 $L_1=100 \text{ km}$ 、 $L_2=75 \text{ km}$ ，给定两组波长分别为 $\lambda_1=1310 \text{ nm}$ 、 $\lambda_2=1550 \text{ nm}$ 和 $\lambda_1=1490 \text{ nm}$ 、 $\lambda_2=1550 \text{ nm}$ 。模拟环境温度在 $-20 \sim 40 \text{ } ^\circ\text{C}$ 内变化时的 τ_1 、 τ_2 、 τ_3 、 τ_4 的实时数据，从而获取给定双波长和温度变化条件下时间间隔计数器 T_{IC1} 、 T_{IC2} 、 T_{IC3} 的测量数据，并通过本文方案求解用于补偿 clock B 的单向传输时延 τ_1 。

图 3(a)为系统采用波长 $\lambda_1=1310 \text{ nm}$ 和 $\lambda_2=1550 \text{ nm}$ ， T_{IC1} 在 $-20 \sim 40 \text{ } ^\circ\text{C}$ 内变化的时延值，即传输波长为 1310 nm 对应的 $\tau_1 + \tau_3$ 的测量值，以及 T_{IC2} 在 $-20 \sim 40 \text{ } ^\circ\text{C}$ 内变化的时延值，即传输波长为 1550 nm 对应的 $\tau_2 + \tau_4$ 的测量值。从图 3(a)可以看出， T_{IC2} 的测量值大于 T_{IC1} 的测量值。图 3(b)为 T_{IC3} 的测量值。

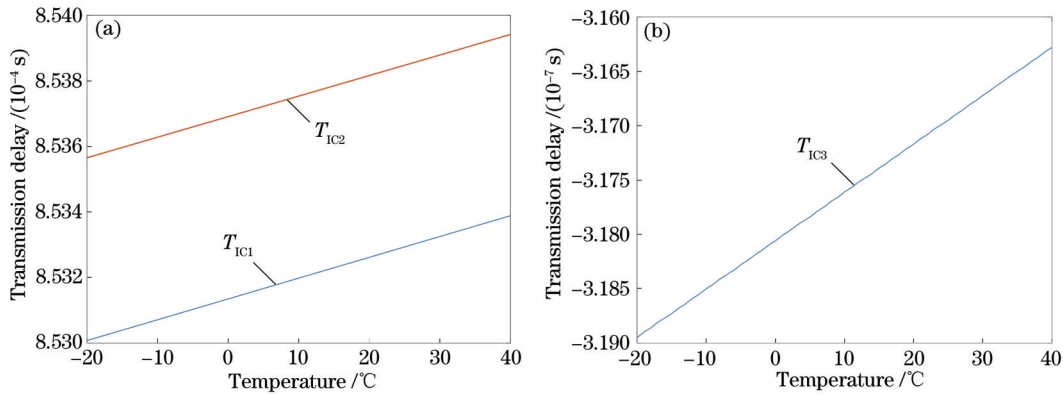


图 3 波长 1310 nm 和 1550 nm 的光信号在温度变化下时间间隔计数器的测量值。(a) T_{IC1} 和 T_{IC2} ；(b) T_{IC3}
Fig. 3 Measured values of time interval counters at 1310 nm and 1550 nm with temperature variation.

(a) T_{IC1} and T_{IC2} ；(b) T_{IC3}

图 4(a)为系统采用波长 $\lambda_1=1490 \text{ nm}$ 和 $\lambda_2=1550 \text{ nm}$ ， T_{IC1} 在 $-20 \sim 40 \text{ } ^\circ\text{C}$ 内变化的时延值，即传输波长为 1490 nm 对应的 $\tau_1 + \tau_3$ 测量值，以及 T_{IC2} 在 $-20 \sim 40 \text{ } ^\circ\text{C}$ 内变化的时延值，即传输波长为 1550 nm 对应的 $\tau_2 + \tau_4$ 测量值。图 4(b)为 T_{IC3} 的测量值。

通过对 T_{IC1} 、 T_{IC2} 和 T_{IC3} 的测量，并将测量值代入(11)式进行计算，可获取主站到从站的单向传输时延 τ_1 的计算值，仿真结果如图 5 所示。两条直线分别为温度变化下传输波长为 1310 nm 和 1550 nm 光

信号的 τ_1 计算值，以及传输波长为 1490 nm 和 1550 nm 光信号的 τ_1 计算值。

对两组波长的单向传输时延 τ_1 计算值与 τ_1 实测值进行比对分析，结果如图 6 所示。如图 6(a)所示，在 $-20 \sim 40 \text{ } ^\circ\text{C}$ 的光纤链路温度变化环境下：针对 1310 nm 和 1550 nm 的传输波长，采用传统的单纤环回授时方案得到的最大授时精度约为 1.4 ns，而采用双纤环回授时方案得到的授时精度约为 70 ps，针对 1310 nm 和 1550 nm 的传输波长，双纤环回方案相比于传统单纤环回方案的授时精度可提

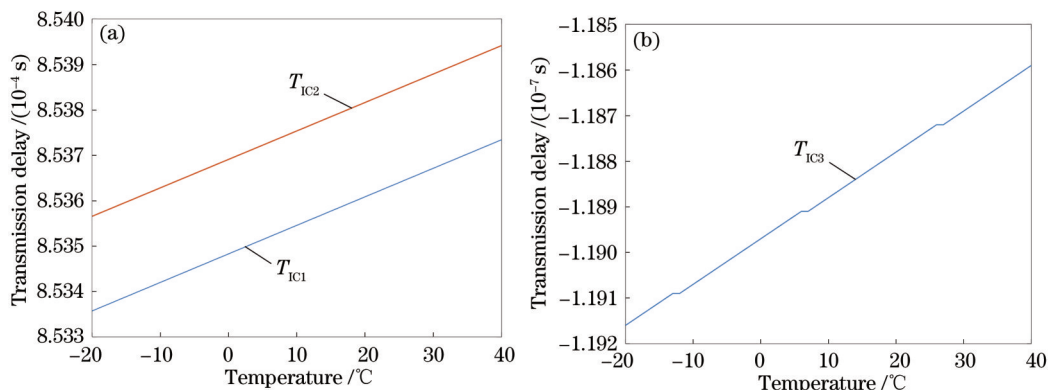


图 4 波长 1490 nm 和 1550 nm 的光信号在温度变化下时间间隔计数器的测量值。(a) T_{IC1} 和 T_{IC2} ; (b) T_{IC3}
 Fig. 4 Measured values of time interval counters at 1490 nm and 1550 nm under temperature variation. (a) T_{IC1} and T_{IC2} ; (b) T_{IC3}

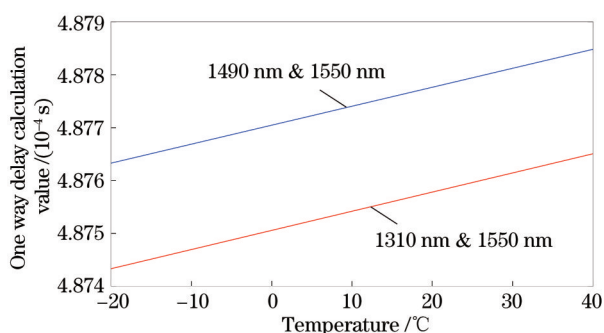


图 5 单向传输时延 τ_1 的计算值
 Fig. 5 Calculated value of one-way transmission delay τ_1

高约 1.33 ns。如图 6(b) 所示,在 $-20\sim 40\text{ }^\circ\text{C}$ 的光纤链路温度变化环境下:针对 1490 nm 和 1550 nm 的传输波长,采用传统的单纤环回授时方案得到的最大授时精度约为 330 ps,而采用双纤环回授时方案得到的授时精度约为 70 ps;针对 1490 nm 和 1550 nm 的传输波长,双纤环回方案相比于传统单纤环回方案的授时精度可提高约 260 ps。

系统仿真验证中残余的 70 ps 误差主要来源于

时间间隔计数器的测量误差。理论上系统仿真的光纤链路时延值可精确至 10^{-19} s 量级,但系统选用的时间间隔计数器的测量精度为 10 ps,因此,(11) 式中的 T_{IC1} 、 T_{IC2} 、 T_{IC3} 的测量数据精确度为 10^{-11} s,10 ps 级别的测量造成本算法的计算精度只能达到 70 ps 左右。如果时间间隔计数器的精度更高,本文方案的授时精度也可相应提高。但目前常用的时间间隔计数设备的测量精度一般为 10 ps 级。这是造成本方案 70 ps 误差的最主要原因。

需要指出的是,图 6 所示的授时精度为仅针对主站到从站光纤链路的时延误差的估算结果,并不包含主站与从站两端的终端收发设备产生的误差。同时在实际工程中,受激光器发射波长抖动、时间间隔计数器的测量精度、从站驯服模块等仪器设备的影响,授时精度将有所降低。

为验证激光器波长抖动对授时精度的影响,对主站的两个激光器的固定波长增加 ± 0.1 nm 的随机波长抖动以模拟激光器的谱宽^[14]。增加波长抖

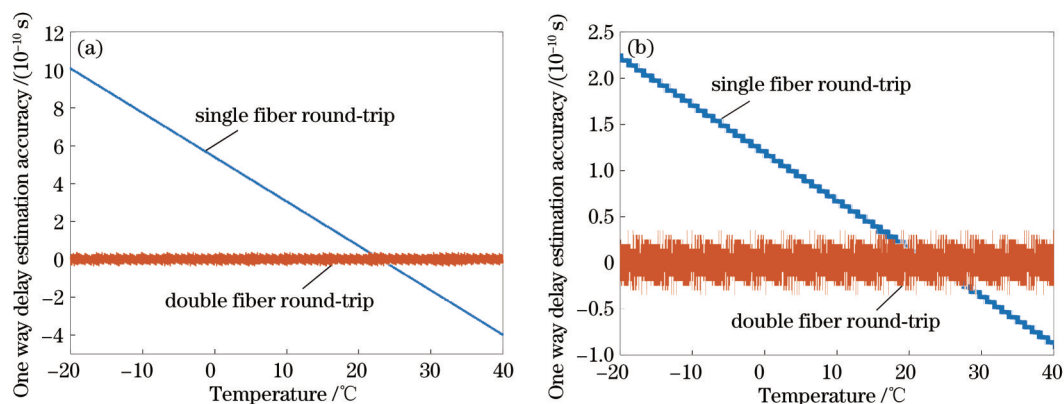


图 6 单向传输时延估算精度。(a) 1310 nm 和 1550 nm; (b) 1490 nm 和 1550 nm
 Fig. 6 One-way transmission delay estimation accuracy. (a) 1310 nm and 1550 nm; (b) 1490 nm and 1550 nm

动后,单纤环回法的授时精度明显降低,1310 nm 和 1550 nm 波长授时精度由图 6(a)中的 1.33 ns 变为图 7(a)所示的 1.60 ns;1490 nm 和 1550 nm 波长组合精度由图 6(b)中的 330 ps 变为图 7(a)所示的

660 ps。而波长抖动对双纤环回比值法带来的授时精度的变化并不明显,1310 nm 和 1550 nm、1490 nm 和 1550 nm 的授时精度仍然保持在 100 ps 以内(图 7)。

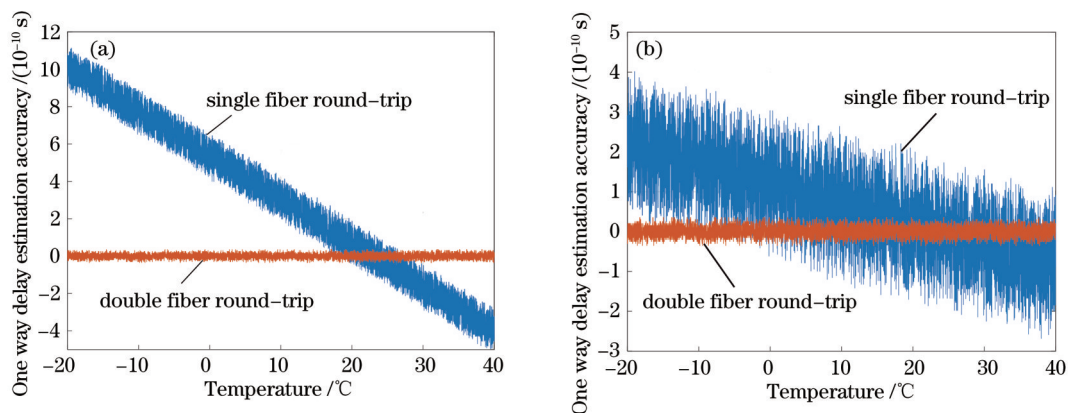


图 7 增设波长抖动的估算精度。(a) 1310 nm 和 1550 nm; (b) 1490 nm 和 1550 nm

Fig. 7 Estimation accuracy after adding wavelength jitter. (a) 1310 nm and 1550 nm; (b) 1490 nm and 1550 nm

4 结 论

提出了基于双纤环回比值法的光纤时间同步技术,通过时间间隔计数器获取主从站点之间双纤双波长四路时间信号的传输延时和时延差,根据获取的时延值及时延比值关系计算主从站点单向传输的时延值,最后在从站时延补偿模块对从站时钟进行补偿,实现主从站点的时间同步。所提方法通过双纤环回比值法消除了环境温度变化引起的光纤长度膨胀变化及温度变化进而导致的往返时延值的变化对时间同步精度的影响。结果表明,主从站点分别由 100 km 和 75 km 光纤相连,当光纤链路温度在 $-20\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内变化,采用 1490 nm 和 1550 nm 的传输波长时,单向时延估算误差降低约 260 ps,采用 1310 nm 和 1550 nm 的传输波长时,授时精度将提升约 1.3 ns。

参 考 文 献

- [1] Uzan J P. The fundamental constants and their variation: observational and theoretical status[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2003, 75(2): 403-455.
- [2] Liu J. Experimental study on optical frequency transfer via optical fibers[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016: 5.
刘杰. 光纤光学频率传递研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(国家授时中心), 2016: 5.
- [3] Hua Y, Guo W, Yan B R, et al. Developing status of national time service architecture[J]. *Journal of*

Time and Frequency, 2016, 39(3): 193-201.

华宇, 郭伟, 燕保荣, 等. 我国授时服务体系发展现状分析[J]. *时间频率学报*, 2016, 39(3): 193-201.

- [4] Liang Y F, Xu J N, Wu M, et al. Research progress on optical fiber time-frequency synchronization technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(5): 050004.
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): 050004.
- [5] Chen D, Xu J N, Li Z Z, et al. Advancement in time synchronization technology using Bi-contrast methods in optical fiber[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(13): 130004.
陈丁, 许江宁, 李振中, 等. 光纤双向比对时间同步技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(13): 130004.
- [6] Smotlacha V, Kuna A, Mache W, et al. Time transfer using fiber links[C]//EFTF-2010 24th European Frequency and Time Forum, April 13-16, 2010, Noordwijk, Netherlands. New York: IEEE Press, 2010: 1-8.
- [7] Krehlik P, Śliwczynski L, Buczek L, et al. ELSTAB: fiber-optic time and frequency distribution technology: a general characterization and fundamental limits[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2016, 63(7): 993-1004.
- [8] Lopez O, Kéfélian F, Jiang H F, et al. Frequency and time transfer for metrology and beyond using telecommunication network fibres[J]. *Comptes*

- Rendus Physique, 2015, 16(5): 531-539.
- [9] Cheng N, Chen W, Liu Q, et al. Time synchronization technique for joint time and frequency transfer via optical fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(7): 0705002.
程楠, 陈炜, 刘琴, 等. 光纤时间频率同时传递系统中时间同步方法的研究[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0705002.
- [10] Huang H, Wu G L, Hu L, et al. Influence of temperature on the precision of bidirectional TDM based fiber-optic time transfer[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0506006.
黄璜, 吴龟灵, 胡亮, 等. 温度对双向时分复用光纤时间传递精度的影响[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0506006.
- [11] Guo J C, Lu L, Wu C X, et al. Time delay measurement of optical fiber link using time-frequency joint transfer[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(9): 0906003.
郭俊成, 卢麟, 吴传信, 等. 基于时频共传的光纤链路时延测量方法[J]. 光学学报, 2019, 39(9): 0906003.
- [12] Zhao X Y, Lu L, Wu C X, et al. Ring fiber network based multipoint time-frequency dissemination method with high precision[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(6): 0606002.
赵晓宇, 卢麟, 吴传信, 等. 基于光纤环形网的多点高精度时频传递方法[J]. 光学学报, 2019, 39(6): 0606002.
- [13] Hedekvist P O, Ebenhag S C. Time and frequency transfer in optical fibers[M]//Yasin M. Recent progress in optical fiber research. London: InTech, 2012: 372-386.
- [14] Wang Z, He R J, Liu Y G, et al. Applications of time-stretch dispersion Fourier transform technique in study on passively mode-locked fiber lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0508002.
王志, 贺瑞敬, 刘艳格, 等. 时间拉伸色散傅里叶变换在被动锁模光纤激光器研究中的应用[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0508002.