

激光与光电子学进展

环回授时系统中光纤链路实时温度测量
反推单向时延的方法陈丁^{1,2}, 许江宁², 江山³, 吴苗^{2*}¹九江学院电子工程学院, 江西 九江 332005;²海军工程大学电气工程学院, 湖北 武汉 430033;³海军工程大学办公室, 湖北 武汉 430033

摘要 光纤链路温度是影响光纤时间同步精度的重要因素,但光纤纤芯的实时温度存在测量难度大,估算误差大等问题。提出了一种测量光纤链路实时温度的新方法。通过对光纤链路往返时延和的精确测量,并通过卡尔曼滤波消除时延抖动和系统噪声,精准地推算出光纤链路纤芯的实时等效平均温度。基于分段温度模型的仿真结果验证了所提等效平均温度用于时间同步系统的可行性。温控箱实验结果表明,所提方法的温度测量精度约为 0.015 °C。采用所提方法实时跟踪纤芯温度可使环回法时间同步系统授时精度提高约 1 ns。

关键词 光纤光学; 纤芯温度; 等效平均温度; 环回法; 时间同步; 卡尔曼滤波

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2306009

Method for Real-Time Temperature Measurement of Optical Fiber
Link in Loopback Time Service System to Deduce One-Way DelayChen Ding^{1,2}, Xu Jiangning², Jiang Shan³, Wu Miao^{2*}¹School of Electronic Engineering, Jiujiang University, Jiujiang, Jiangxi 332005, China;²College of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China;³Admin office, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China

Abstract The temperature of optical fiber link is an important factor affecting the accuracy of optical fiber time synchronization, but the real-time temperature of fiber core has some problems, such as difficult measurement, large estimation error, and so on. A new method of real-time temperature measurement for optical fiber link is proposed. Through the accurate measurement of the round-trip delay sum of the optical fiber link, and filtering the delay jitter and system noise by Kalman filtering, the real-time equivalent average temperature of the fiber core of the optical fiber link can be accurately calculated. The simulation results based on the segmented temperature model verify the feasibility of proposed equivalent average temperature for the time synchronization system. The temperature control box experimental results show that the accuracy of the proposed method is about 0.015 °C. Using the proposed method to track the core temperature in real time can improve the timing accuracy of the loopback time synchronization system by about 1 ns.

Key words fiber optics; core temperature; equivalent average temperature; round-trip method; time synchronization; Kalman filtering

OCIS codes 060.3510; 060.4230; 060.4510

收稿日期: 2021-04-22; 修回日期: 2021-05-10; 录用日期: 2021-06-11

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

1 引言

随着高精度频标技术的进步,光频原子钟的稳定度达到 10^{-19} 。时间成为7个国际基本单位中测量精度最高的物理量^[1]。不过单一原子钟无法实现大范围授时,在远距离时钟之间进行时间传递不仅有助于提高钟源准确度与稳定度,而且对钟组的整体性能和冗余性的提升也有重要意义^[2]。因此,如何将高精度时频信息传输给各用户端,成为了该领域的重要课题。由于低损耗、高稳定、大带宽等独特优势,光纤时频同步技术已成为精度较高的授时手段之一^[3]。

目前,光纤时间同步系统在主从授时站点之间采用的单纤双向传输方式主要有3种:环回法、波分复用、时分复用^[4]。其中环回法和波分复用法在同一根光纤链路上采用2种不同波长的光信号,往返波长、折射率不相等导致往返时延不对称,且往返时延差随链路温度变化而波动。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,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。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的时延差值变化的跟踪估算^[5]。

传统环回法通过测量主从站点往返时延和 $\tau_{\lambda_1} + \tau_{\lambda_2}$,并通过确定 τ_{λ_1} 与 τ_{λ_2} 的比值关系 $\rho = \frac{\tau_{\lambda_1}}{\tau_{\lambda_2}}$ 求解主站到从站的单向传输时延 τ_{λ_1} , τ_{λ_1} 用于从站补偿时钟以实现主从站点时间同步。根据光纤温度特性可知,比值 ρ 随温度变化而波动,但由于缺乏对光纤链路温度的跟踪,传统的环回法直接令比值 ρ 为常温下的固定值 $\frac{\tau_{\lambda_1}}{\tau_{\lambda_2}}$ 。该方法可能在100 km的光纤链路中带来纳秒级的时间同步误差^[6]。

如果能准确获取实际铺设光纤纤芯的实时温度,就可直接计算出往返时延比值 ρ ,进而更准确地计算出单向时延 τ_{λ_1} 。然而,仅测量光纤表面的温度就已经难以实现,且实际环境下光缆网、光纤、纤芯3者的温度各不相同。因此,通过光纤表层温度估算纤芯温度的方法误差较大。其次,光纤链路长度通常达几十千米或几百千米,经纬跨度、海拔跨度导致同一根光纤各部分的温度各不

相等。即便在光纤的不同部分进行分段温度测量,测量和计算同样会带来较大的误差^[7-8]。由此可见,通过直接测量的方式监控光纤链路的实时温度难以实现。

本文针对传统的环回法光纤授时系统缺乏对光纤链路实时温度的跟踪问题,提出了一种通过往返时延的实时测量值推算出两个授时站点之间光纤链路的等效平均温度的方法。通过对光纤时间同步系统的光纤长度、往返波长、终端硬件时延的精准测量,实现精准测量光纤链路往返时延和随温度变化的实时值,并通过卡尔曼滤波算法滤除往返时延值的抖动和噪声,最终实现光纤链路等效平均温度的准确计算。基于分段温度模式的仿真验证结果表明,在光纤链路中各段温度不相等的情况下,采用所提等效平均温度求解单向时延的精度可达皮秒级。同时,温箱实验结果表明,所提方法对光纤链路温度的估算精度可达到 $0.015\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。所提温度跟踪测量方案可解决实地光纤链路温度难以测量的难题,将其应用至传统的环回授时系统可提升授时精度约1 ns。此外,所提温度测量方法可直接使用环回法授时系统,不需要增设额外的温度测量设备。同时,温度测量的结果可直接应用于授时系统。

2 光纤链路温度特性分析

光纤链路传输时延值^[9]可表示为

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

式中:光速 c 为 299792458 m/s ; L_0 为光纤的初始长度; T_0 为光纤的初始温度; T 为光纤链路的等效平均温度; 光纤的热膨胀系数 α 为 $5.6 \times 10^{-7}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$; λ 为光信号的波长; $n_{(\lambda,T)}$ 为折射率。光纤的 Sellmeier 折射率^[10]可表示为

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

式中:光信号波长 λ 的单位为 μm ,对于G. 652光纤, $A=6.90754 \times 10^{-6}T + 1.31552$; $B=2.35835 \times 10^{-5}T + 0.788404$; $C=5.84758 \times 10^{-7}T + 0.0110199$; $D=5.48368 \times 10^{-7}T + 0.91326$; $E=100$ 。

把温度和波长等相关参数代入(1)式和(2)式即可精确模拟光纤链路随温度变化的传输时延值,结果如图1所示。

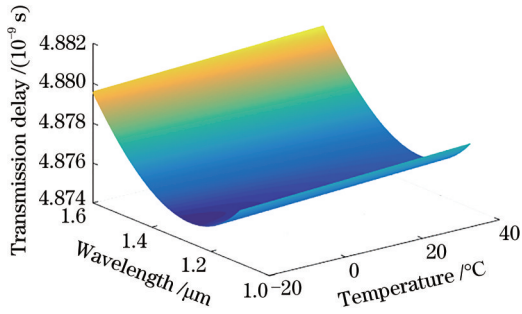


图 1 单位长度光纤链路传输时延特性

Fig. 1 Transmission delay characteristic of unit length optical fiber link

3 系统原理

所提光纤纤芯实时温度测量系统是基于环回

法的光纤时间同步系统,系统结构与原理如图 2 所示。系统由 Site A 和 Site B 两个站点组成,Site A 和 Site B 由光纤链路相连,其中 clock 为钟源,TDC 为时间间隔计数模块,OS 为光发送模块,OR 为光接收模块,WDM 为波分复用模块。

在 C_A 时刻, clock 的 1PPS 时间信号通过 OS 以波长为 λ_1 的光信号经光纤链路从 Site A 发送到 Site B, Site B 的 OR 接收到时间信号后,信号被调制成波长为 λ_2 的光信号经光纤链路发送回 Site A。 τ_{sum} 是主从站点往返时延和,可表示为

$$\tau_{sum} = \tau_{\lambda_1} + \tau_{\lambda_2}, \quad (3)$$

式中: τ_{λ_1} 和 τ_{λ_2} 分别为波长为 λ_1 和波长为 λ_2 的光信号在光纤链路上的传输时延。根据(1)~(3)式,有

$$\begin{cases} \tau_{sum} = \frac{L_0}{c} \left[1 + \alpha(T - T_0) \right] \left[n_{(\lambda_1, T)} - \lambda_1 \frac{dn_{(\lambda_1, T)}}{d\lambda_1} \right] + \left[n_{(\lambda_2, T)} - \lambda_2 \frac{dn_{(\lambda_2, T)}}{d\lambda_2} \right] \\ n_{(\lambda, T)} = \sqrt{A + B/(1 - C/\lambda^2) + D/(1 - E/\lambda^2)} \end{cases} \quad (4)$$

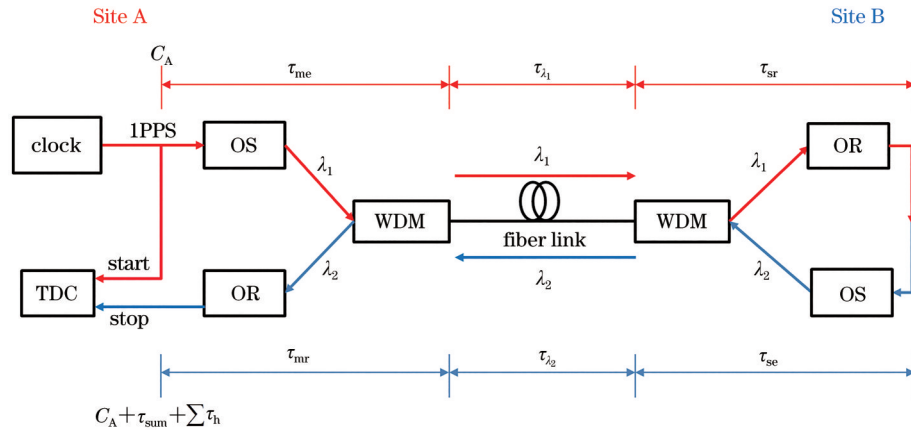


图 2 光纤链路温度测量系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of optical fiber link temperature measurement system

当光信号返回主站时, Site A 接收到信号的时此刻为 $C_A + \tau_{sum} + \sum \tau_h$ 。由此可知, TDC 测量值可表示为

$$\tau_{TDC} = \tau_{sum} + \sum \tau_h, \quad (5)$$

$$\sum \tau_h = \tau_{me} + \tau_{sr} + \tau_{se} + \tau_{mr}, \quad (6)$$

式中: $\sum \tau_h$ 为主从站点终端收发设备硬件时延之和,在实际光纤授时系统中,终端设备放置在恒温环境中, $\sum \tau_h$ 可视为固定值,可预先测量获得; τ_{me} 是主站发送端硬件时延; τ_{sr} 是从站接收端硬件时延; τ_{se} 是从站发送端硬件时延; τ_{mr} 是主站接收端

硬件时延。

由(5)式和(6)式可知,主从站点往返时延和 τ_{sum} 为

$$\tau_{sum} = \tau_{TDC} - \sum \tau_h \quad (7)$$

根据(4)式和(7)式,可得到所提时间同步系统往返时延和 τ_{sum} 与光纤链路实时温度 T 的对应关系,从而通过测量往返时延求解光纤链路温度。系统工作流程如图 3 所示。

- 1) 预先测量 23 °C 光纤链路的物理长度 L ;
- 2) 通过光谱仪测量往返光信号波长 λ_1 和 λ_2 ;
- 3) 通过往返时延和与温度的对应关系,建立温

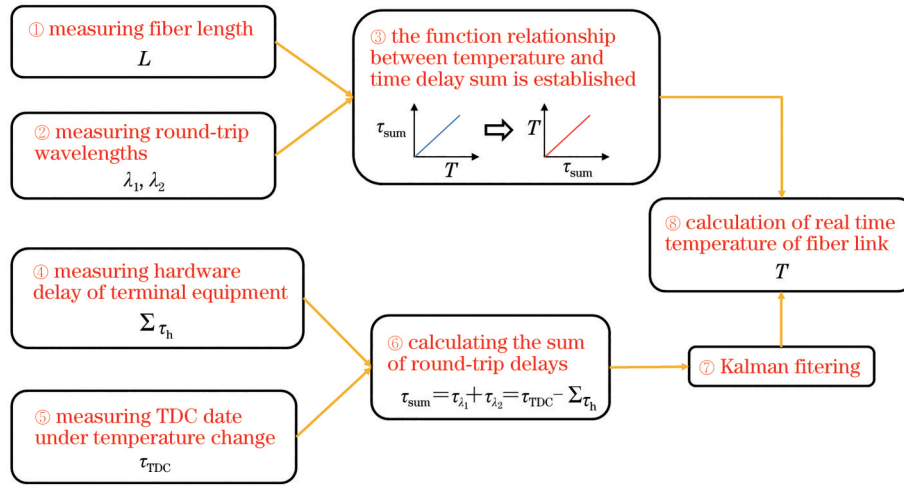


图 3 光纤链路温度测量系统流程图

Fig. 3 Flow chart of optical fiber link temperature measurement system

度反推时延和的关系式；

4) 预先标定主从站点终端硬件的收发时延和 $\sum \tau_h$ ；

5) 通过时间间隔测量模块测量主从站点往返时延 τ_{TDC} ；

6) 计算出光纤链路的往返时延和 $\tau_{sum} = \tau_{\lambda_1} + \tau_{\lambda_2} = \tau_{TDC} - \sum \tau_h$ ；

7) 通过卡尔曼滤波算法滤除 τ_{sum} 的时延抖动和噪声干扰；

8) 由 τ_{sum} 的滤波值计算光纤链路的等效平均温度 T 。

4 分段温度模型仿真验证

在实际长距离光纤时间同步系统中,由于光纤链路跨越不同的区域和海拔,光纤链路各段的纤芯温度各不相同。为了验证光纤链路分段温度与等效平均温度关系,建立了光纤链路分段温度模型。光纤链路被分为 k 段,假设同一段光纤温度相等,如图 4 所示。

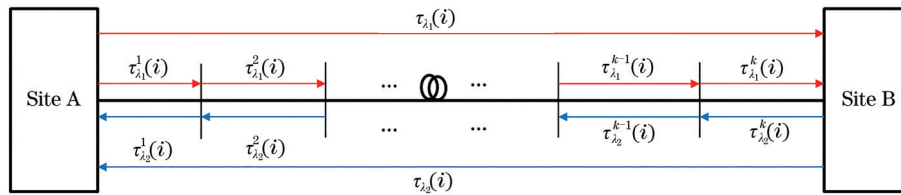


图 4 光纤时间同步链路分段温度模型

Fig. 4 Segmented temperature model of optical fiber time synchronization link

在第 i 秒, Site A 到 Site B 的光纤链路中 λ_1 光信号的传输时延为

$$\tau_{\lambda_1}(i) = \sum_{m=1}^k \tau_{\lambda_1}^m(i), \quad (8)$$

式中: $\tau_{\lambda_1}^m(i)$ 是第 i 秒第 m 段光纤链路中 λ_1 光信号的传输时延。根据(1)式, $\tau_{\lambda_1}^m(i)$ 可表示为

$$\tau_{\lambda_1}^m(i) = \frac{L_{0m}}{c} \left\{ 1 + \alpha [T_m(i) - T_{0m}] \left[n_m(i) - \lambda_1 \frac{dn_m(i)}{d\lambda_1} \right] \right\} \quad (9)$$

同理, 在第 i 秒 Site B 到 Site A 的光纤链路中 λ_2 光信号的传输时延为

$$\tau_{\lambda_2}(i) = \sum_{m=1}^k \tau_{\lambda_2}^m(i), \quad (10)$$

式中: $\tau_{\lambda_2}^m(i)$ 是第 i 秒第 m 段光纤链路中 λ_2 光信号的传输时延。根据(1)式, $\tau_{\lambda_2}^m(i)$ 可表示为

$$\tau_{\lambda_2}^m(i) = \frac{L_{0m}}{c} \left\{ 1 + \alpha [T_m(i) - T_{0m}] \left[n_m(i) - \lambda_2 \frac{dn_m(i)}{d\lambda_2} \right] \right\} \quad (11)$$

为了验证分段温度与等效平均温度的关系,对分段温度模型进行了仿真验证。假设 Site A 和 Site B 由 100 km 光纤链路连接, Site A 到 Site B 的光信号波长 $\lambda_1 = 1490$ nm, Site B 到 Site A 的光信号波长 $\lambda_2 =$

1550 nm。光纤链路分为 4 个不同的温度段,各段长度分别为 10, 20, 25, 45 km, 24 小时内各段温度变化情况如图 5 所示。从图中可以看出:第 1 段 10 km 光纤温度在 $-20\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 随时间线性变化;第 2 段 20 km 光纤温度在 $-10\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 随时间正弦变化;第 3 段 25 km 光纤温度在 $-20\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 随时间正弦变化;第 4 段 45 km 光纤温度在 $-20\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 随时间正弦变化。

将光纤长度、光信号往返波长、光纤链路各段温度等参数代入(1)式和(2)式可以仿真计算出各段光纤的传输时延值,进而得出 100 km 光纤链路的往返时延和 τ_{sum} ,如图 6(a)所示。同时,根据分段时延仿真结果可计算 Site A 到 Site B 单向传输时延 τ_{λ_1} 的真实值,如图 6(b)所示。 τ_{λ_1} 可用于补偿 Site A 和 Site B 的钟差,可用于验证所提测量等效平均温度的可行性和精确性。

根据 100 km 光纤链路往返时延与温度的函数关系可建立往返时延和反推 100 km 光纤链路等效

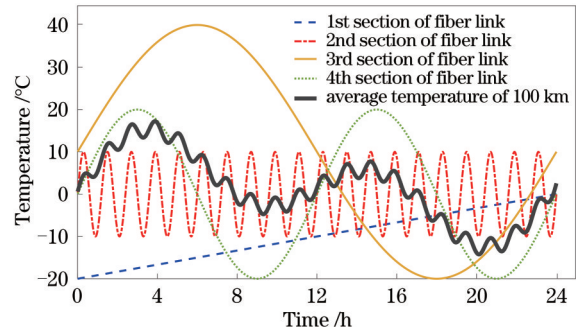


图 5 光纤链路 24 小时内各段温度变化情况
Fig. 5 Temperature change of each section of optical fiber link within 24 hours

平均温度的函数关系式。

$$T = A\tau_{\text{sum}}^2 + B\tau_{\text{sum}} + C, \quad (12)$$

式中: $A=39355523484.7644$; $B=52714975.5964494$; $C=-88876.1754398691$ 。

将往返时延和 τ_{sum} 代入(7)式可求解 100 km 光纤链路等效平均温度,结果如图 6(c)所示。

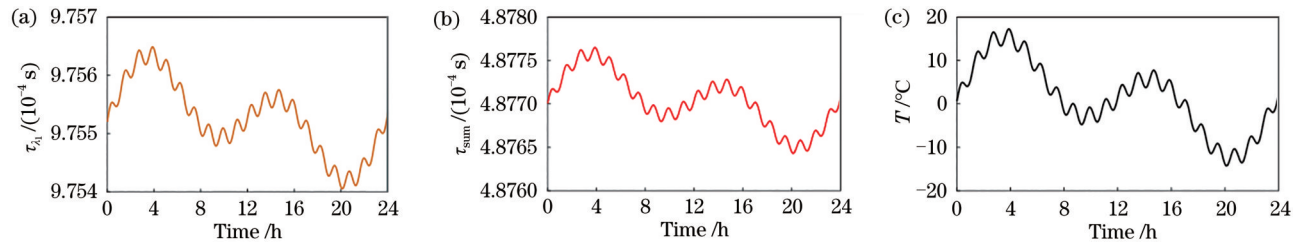


图 6 100 km 光纤链路仿真验证结果。(a)往返时延和;(b)单向传输时延;(c)等效平均温度
Fig. 6 Simulation results of 100-km optical fiber link. (a) Round-trip delay; (b) unidirectional transmission delay; (c) equivalent average temperature

推算出 24 小时内光纤链路的实时等效平均温度后,可通过(1)式和(2)式计算出 Site A 到 Site B 单向传输时延 τ'_{λ_1} 。将由等效平均温度求解的 τ'_{λ_1} 与真实的单向传输 τ_{λ_1} 作差,可分析验证等效平均温度用于主

从站点时间同步的授时误差。误差结果如图 7(a)所示,从图中可以看出,在 100 km 光纤链路中采用等效平均温度的方案求解单向时延的误差在 30 fs 左右。考虑到实际应用中时间间隔计数器的测量精度一般

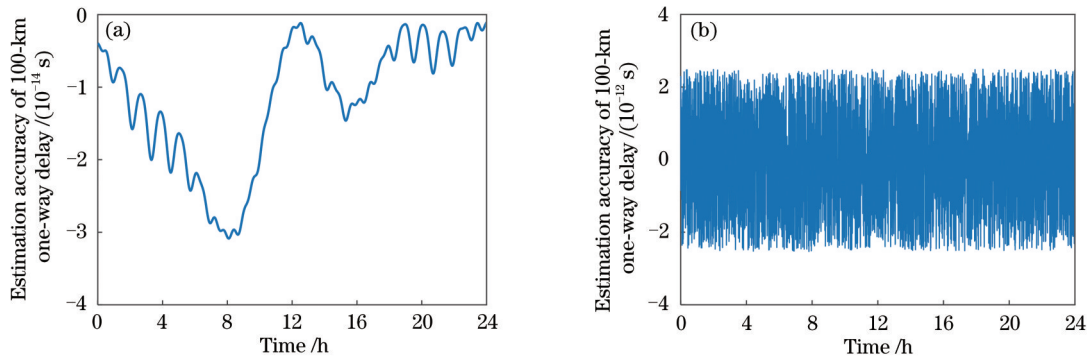


图 7 100 km 单向时延估算精度。(a)不考虑时间间隔计数器分辨率;(b)考虑时间间隔计数器分辨率
Fig. 7 Estimation accuracy of 100-km one-way delay. (a) Without considering Time interval counter resolution, (b) considering Time interval counter resolution

为 10 ps 左右,被测量往返时延和数据应该在 10^{-11} 量级处取整数。实际应用中的单向时延的估算误差为 2.5 ps,如图 7(b)所示。ps 级的授时误差证明了用等效平均温度表征整个链路实时温度的可行性。将所提等效平均温度的方案应用于光纤时间同步系统的温度跟踪,可大大提高时间同步的精度。

5 实验与分析

5.1 实验平台搭建

为验证所提方案对链路温度测量的可行性和准确度,进行了相关实验。光纤采用 50 km 的

G. 652 单模光纤。主从站点之间盘纤及附加连接光纤的准确长度为 50692.593 m。主站至从站的光信号波长 λ_1 为 1550.87 nm,从站至主站光纤波长 λ_2 为 1490.92 nm。时间间隔测量模块的测量精度为 100 ps。主从站点终端设备放置在 23 °C 的恒温环境下,通过预先测量可知,终端设备的硬件时延为 3.4 ns。将盘纤放置在温控箱中,温控箱初始温度为 17 °C 并保持 3 小时,经过 30 min 升温之后,温控箱温度达到 27 °C 并保持 5.5 h,实验总时长为 9 h。实验相关参数如表 1 所示,实验平台实物图如图 8 所示。

表 1 实验相关参数

Table 1 Experimental related parameters

Parameter	Value	Parameter	Value
Optical fiber model	G. 652	Fiber length /m	50692.593
Wavelength of λ_1 /nm	1550.87	Measurement resolution of TDC /ps	100
Wavelength of λ_2 /nm	1490.92	Experiment duration /h	9
Terminal equipment temperature /°C	23	Initial temperature of temperature control box /°C	17
Hardware delay $\sum \tau_n$ /ns	3.4	Final temperature of temperature control box /°C	27



图 8 实验平台实物图。(a)终端设备及光纤链路;(b)温控箱

Fig. 8 Physical diagrams of experimental platform. (a) Terminal equipment and optical fiber link; (b) temperature control box

5.2 实验结果

温控箱温度变化曲线如图 9 虚线所示。在 0~3 h 时,温控箱保持 17 °C,以确保光纤纤芯温度达到初始温度;在 3~3.5 h 时,温控箱迅速升温至 27 °C;在 3.5~9 h 时,温控箱保持 27 °C,使光纤纤芯有足够长时间吸收热量,并确保纤芯温度最终能达到 27 °C。通过 TDC 的测量数据并扣除终端硬件时延,可得到光纤链路的往返时延和的变化曲线,如图 9 实线所示。从图中可以看出,光纤链路往返时延和在 0~2.5 h 时缓慢变大,在 2.5~3 h 趋于平缓,

说明盘纤的初始温度略低于温控箱初始温度 17 °C,但吸收 2.5 h 热量后,盘纤的纤芯基本达到 17 °C。当温控箱温度达到 27 °C 之后,光纤链路往返时延和经历了长达 5.5 h 的上升,并在 8.5 h 后趋于平缓,说明盘纤温度从 17 °C 变化至 27 °C 耗时约 5.5 h。盘纤升温速度远远滞后于温箱升温速度,是由于盘纤内光纤相互紧密缠绕,且盘纤外壳有塑料材料包裹。

受激光器发射波长抖动、链路噪声、系统随机误差的影响,光纤链路往返时延的测量数据存在一

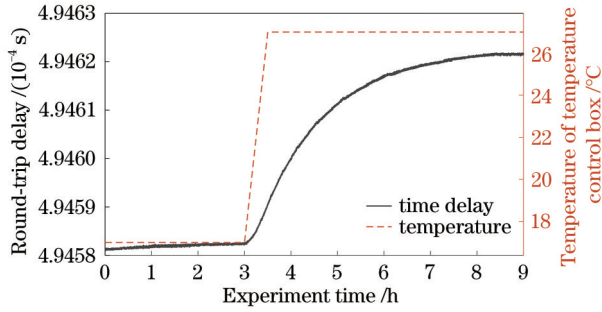


图 9 往返时延与温箱温度

Fig. 9 Round-trip delay and temperature of temperature control box

定的波动。所提方案使用卡尔曼滤波对往返时延值进行处理,以获得更准确的往返时延测量值。卡尔曼滤波处理后的往返时延估计值如图 10 所示。

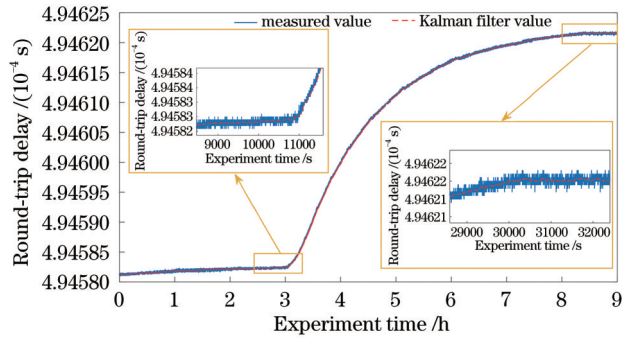


图 10 卡尔曼滤波处理后的往返时延

Fig. 10 Round trip delay after Kalman filtering

将本实验方案的光纤长度 L 、往返波长 λ_1 和 λ_2 代入(4)式,可确定往返时延值与光纤链路温度 T 的对应关系,并可推导出往返时延反推链路温度的关系式,从而求解链路温度 T 的变化曲线。链路温度的估算值如图 11 所示。

对比未经卡尔曼滤波处理的温度值,经过卡尔曼滤波处理后的往返时延值推导的温度值波动范

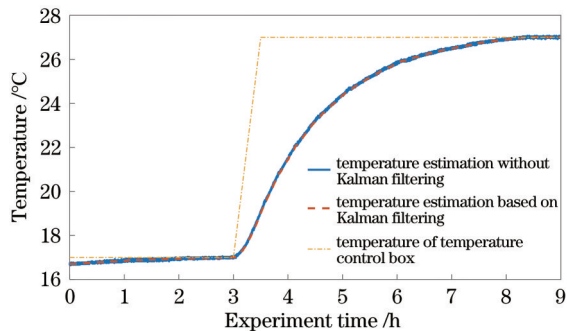


图 11 温箱温度与链路估算温度

Fig. 11 Temperature of temperature control box and estimated temperature of link

围更小。从 9000~10800 s 与 30000~324000 s 两个时间段可以看出,滤波处理后的温度值更接近光纤纤芯的实时温度。

由此,所提方案可估算任意时刻光纤链路的实时温度值。为进一步分析所提方案测量光纤链路实时温度的准确度,选取 30000~32400 s 时间段的实验数据进行分析,结果如图 12 所示。

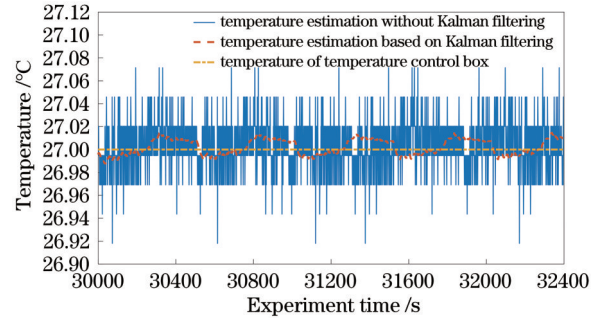


图 12 链路估算温度

Fig. 12 Estimated link temperature

在 30000~32400 s 时间段,温箱温度已稳定在 27 °C 超过 5 h,系统求解的链路温度值在 30600 s 左右首次超过 27 °C,此后一直在 27 °C 上下波动,说明这一时间段内纤芯温度与温箱温度已经达到一致。未经卡尔曼滤波处理的纤芯温度测量数据的误差峰值约为 0.08 °C;卡尔曼滤波处理后的纤芯温度测量数据的误差峰值约为 0.015 °C。

通过误差分析可知,0.015 °C 的温度测量误差主要由以下几方面因素造成。首先,实验使用的 CTP404 温控箱的温度控制精度为 0.01 °C,这是最大的误差来源;其次,温度测量系统的设备存在噪声和信号抖动,例如激光器发射波长抖动,终端设备硬件时延抖动等;此外,时间间隔计数器的测量精度也造成了一定的测量误差。

所提方法精确测量的光纤链路实时等效平均温度如图 11 所示,将其代入(1)式和(2)式中可求解出往返时延的动态比值关系 $\rho = \frac{\tau_{\lambda_1}}{\tau_{\lambda_2}}$,该动态比值可以取代传统环回法中 ρ 取常温下的固定值从而求解单向时延。由此,相对于传统环回法,所提光纤链路温度测量方案在求解主从站点单向时延时考虑了链路实时温度对比值 ρ 的影响,从而提升了环回法时间同步系统主从站点的时间同步精度。如果环回法系统采用 1310~1550 nm 波长组合,所提跟踪方案可使时间同步精度提升约 1 ns;如果环回法系统采用 1490~1550 nm 波长组合,所提跟踪方案

可使时间同步精度提升约 300 ps。

6 结 论

提出了一种光纤链路实时温度测量的新方法。通过对光纤链路往返时延和的精确测量,并通过卡尔曼滤波滤除时延抖动和系统噪声,从而精准地推算出光纤纤芯实时温度。基于分段温度模型的仿真验证了所提等效平均温度用于时间同步系统的可行性。温箱实验结果表明,所提方法的温度测量精度约为 0.015 °C。采用所提方法实时跟踪纤芯温度可使环回法时间同步系统授时精度提高约 1 ns。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Smotlacha V, Kuna A, Mache W. 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: 13581660.
- [3] Krehlik P, Śliwczyński Ł, Buczek Ł, 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.
- [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] 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.
- [6] Ding X Y, Lu L, Zhang B F, et al. Error analysis of fiber time service using round-trip method[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(4): 040603.
丁小玉, 卢麟, 张宝富, 等. 光纤 Round-Trip 法授时的误差分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(4): 040603.
- [7] Jiang S P, Zhang H, Jiang W N, et al. Effects of link delay fluctuations on stability of fiber-optic time transfer[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(4): 040603.
江少平, 张浩, 姜文宁, 等. 链路时延波动对光纤时间传递稳定性的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(4): 040603.
- [8] 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.
- [9] Li D J, Mei J J, Hu D P, et al. Research on channel characteristics of high-precision frequency remote transmission via optical fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(8): 0806002.
李东瑾, 梅进杰, 胡登鹏, 等. 高精度频率远距离光纤传输信道特性研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(8): 0806002.
- [10] Medhat M, El-Zaiat S Y, Radi A, et al. Application of fringes of equal chromatic order for investigating the effect of temperature on optical parameters of a GRIN optical fibre[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2002, 4(2): 174-179.