

基于光纤环形网的多点高精度时频传递方法

赵晓宇, 卢麟*, 吴传信, 魏恒, 刘航, 韦毅梅

陆军工程大学通信工程学院, 江苏 南京 210007

摘要 研究了基于光纤环形网的多点高精度时频传递的方法,提出了终端站对钟差自感知的方案,将对钟差的感知测量以及补偿转移到终端站执行,实现网络中各个终端站与中心站的时频同步。搭建了长度为 100 km 的光纤环形网多点时频传递系统,实验研究了链路中色散带来的不对称性偏差的校消方法,验证了链路温度变化下的多点时频传递性能,测量的时频传递同步误差的峰峰值低于 400 ps,均方根误差小于 60 ps,表明终端站可以在光纤环形网的任意位置灵活接入。

关键词 光纤光学; 光纤时频传递; 环形网; 自感知

中图分类号 TN913.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0606002

Ring Fiber Network Based Multipoint Time-Frequency Dissemination Method with High Precision

Zhao Xiaoyu, Lu Lin*, Wu Chuanxin, Wei Heng, Liu hang, Wei Yimei

Institute of Communications Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing, Jiangsu 210007, China

Abstract We study a ring fiber network based multipoint time-frequency dissemination method with high precision. Further, a novel scheme that can realize self-perception for clock difference is proposed; the sensing measurement and compensation for the clock difference are located at remote stations. Time-frequency synchronization can be achieved between the remote stations and the local station. Subsequently, we perform a time-frequency dissemination experiment via a 100-km ring fiber network to study the correction method of asymmetry deviation introduced by dispersion. The multipoint time-frequency dissemination performance is verified under link temperature variation. The measured peak-to-peak value of synchronization error of time-frequency dissemination is smaller than 400 ps, and the root mean square error is smaller than 60 ps. The results show that the remote stations can be accessed anywhere in the ring fiber network.

Key words fiber optics; time-frequency dissemination via optical fiber; ring network; self-perception

OCIS codes 060.2330; 060.4262; 120.4820

1 引 言

由于光纤信道具有损耗低和抗干扰能力强等优点,基于光纤链路的时频传递已经成为高精度时频传递的重要手段。在传统点到点的光纤时频传递方法中,通常先采用环回法或双向比对法测量感知时频信号的延迟相位波动,然后利用高精度延迟或相位补偿模块对链路波动进行实时补偿,从而实现高精度时频传递^[1-3]。

随着 5G 通信和导航定位等领域的发展,一个区域、多个用户的时频分配需求越来越普遍。然而,传统的点到点的光纤时频传递方法已不能胜任对多

终端用户网络的时频分配,如当网络中有 N 个终端站时,中心站需要配备 N 套测量补偿设备,由于每套设备只能给一个终端站进行时频传递,随着终端站数量的增加,系统复杂度增大。因此,在研究时频网络化分配中^[4-9],将时频中心的高精度时频信号分配给网络中的多个终端用户尤为重要。

Zhu 等^[4-5]研究了在树形分支网络上进行时间传递的钟差测量方法和基于星形网进行多点频率传递的实现方案,Krehlik 等^[6]进行了基于干线提取方案的多点时频传递,Chen 等^[7-8]主要对基于环形网的频率信号传递进行了研究,Jiang 等^[9]进行了环形光链路上接入点的时延测量和频率信号的传递实

收稿日期: 2019-01-18; 修回日期: 2019-02-25; 录用日期: 2019-03-12

基金项目: 国家自然科学基金(61673393,61371121)

* E-mail: nj_lulin@163.com

验,测量了中间站与中心站之间秒脉冲的绝对时延差,但实验中并没有对中间站处恢复的秒脉冲进行时延补偿,得到的秒脉冲并非同步的时间信号。因此,需对基于光纤环形网的多点时频传递进行深入研究。

环形网是光纤传送网络中最基本的拓扑结构之一,是面向区域服务最为普遍的网络拓扑结构。通常,光纤环形网中存在多个站,且处于环形链路的任意位置。基于光纤环形网固有的一维空间和环路闭合优势,本文提出了两种环形网终端站对钟差自感知的方案,将对钟差的感知测量以及补偿转移到终端站执行。设计并实现了基于自感知方案的光纤环形网的多点时频传递系统,分析了该系统中的误差来源,在长度为 100 km 的光纤环路中实现了终端站在光纤环形网中的任意位置接入条件下的时频同步。

2 终端站对钟差自感知的方案

实现终端站与中心站时间同步的先决条件是在

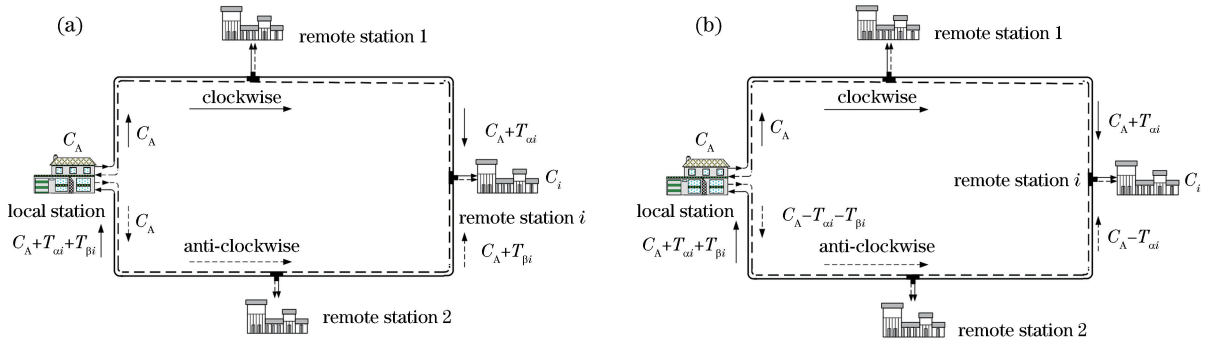


图 1 终端站对钟差自感知方案的示意图。(a)方案 1;(b)方案 2

Fig. 1 Diagram of self-perception at remote stations. (a) Solution 1; (b) solution 2

测得的沿逆时针路径传来的时间信号与本地时间信号的时间间隔 $T_{\beta c}$ 为

$$T_{\beta c} = C_i - (C_A + T_{\beta i}). \quad (3)$$

在终端站将两个方向所测得的时间间隔相加:

$$T_{ac} + T_{\beta c} = 2C_i - (2C_A + T_{\beta i} + T_{ai}). \quad (4)$$

(4)式的右边即为两端站钟差与环路总延迟的线性组合。中心站将测得的环路总延迟 τ 实时广播到光纤环路中,在终端站提取出该时间间隔的数据后,将其代入(4)式进行线性运算处理,得到的两端站钟差为

$$C_i - C_A = \frac{1}{2}(T_{ac} + T_{\beta c} + \tau). \quad (5)$$

至此,终端站即完成了对钟差的自感知。

图 1(b)为终端站对钟差自感知的第 2 种方案

终端站获得其与中心站的钟差,即终端站完成对钟差的自感知。根据环形网拓扑结构的特点,在此提出了两种实现终端站对钟差自感知的方案,如图 1 所示。图 1(a)为方案 1 的原理示意图,各终端站与一个中心站通过双向光纤环形网互联。中心站沿顺时针和逆时针两个方向传播秒脉冲信号(1PPS),设光信号从中心站出发并沿顺时针路径到达终端站 i 的延迟为 T_{ai} ,沿逆时针路径到达终端站 i 的延迟为 $T_{\beta i}$ 。若 C_A 为中心站钟源发出的时刻,则沿顺时针路径传播到终端站 i 后的时间信号为 $C_A + T_{ai}$,沿逆时针路径传播到终端站 i 后的时间信号为 $C_A + T_{\beta i}$,沿顺时针路径经过整个光纤环路回到中心站的时间信号为 $C_A + T_{ai} + T_{\beta i}$,则在中心站测得的环路总延迟 τ 为

$$\tau = T_{ai} + T_{\beta i}. \quad (1)$$

若 C_i 为终端站 i 的时刻,则在终端站 i 测得沿顺时针路径传来的时间信号与本地时间信号的时间间隔 T_{ac} 为

$$T_{ac} = C_i - (C_A + T_{ai}). \quad (2)$$

示意图,在中心站沿顺时针路径发出调制后的本地秒脉冲信号,信号到达终端站 i 后,同样可测得 T_{ac} ,中心站可测得环路总延迟 τ ,若中心站将发出秒脉冲的时刻提前 τ 且脉冲沿逆时针方向发出,由于引入了逆时针链路上的延迟,则沿逆时针方向传递到终端站 i 的时间信号为 $C_A - T_{ai}$ 。在终端站测得逆时针路径上的时间间隔 $T_{\beta c1}$ 为

$$T_{\beta c1} = C_i - (C_A - T_{ai}). \quad (6)$$

将 $T_{\beta c1}$ 与 T_{ac} 相加,经过线性运算可得两端站钟差为

$$C_i - C_A = \frac{1}{2}(T_{ac} + T_{\beta c1}). \quad (7)$$

通过比较可以发现所提出的这 2 种方案的区别在于:方案 1 中的中心站需测量并广播环路总延迟

数据,终端站需利用三个测量数据(1个中心站广播,2个本站测量)解算钟差;方案2中的中心站需发送补偿环路总延迟后的秒脉冲,终端站只需利用两个测量数据解算钟差。

在获得钟差数据以后,采用时钟驯服的方式,按照(8)式计算并输出调整量,通过持续不断地控制终端站的高频振荡器进行校频,进而使得两地钟源高度同步^[10],则有

$$\frac{\Delta f}{f} = -\frac{\Delta t}{t}, \quad (8)$$

式中: Δf 为校频调整量; f 为标称频率(10 MHz); Δt 为所测得的钟差; t 为测量间隔(在此为1 s)。

3 基于自感知方案的环形网多点时频传递实验

3.1 实验系统配置

考虑到方案2中,在中心站完成环路总延迟的测量后需增加延时补偿功能,这不仅增加了复杂度,还会引入延时补偿误差,因此在此采用方案1来搭建光纤环形网多点时频传递系统。所搭建的系统结构示意图如图2所示,中心站与终端站之间使用光纤环路实现互联,其中顺时针链路的长度为 L_1 ,逆时针链路的长度为 L_2 。

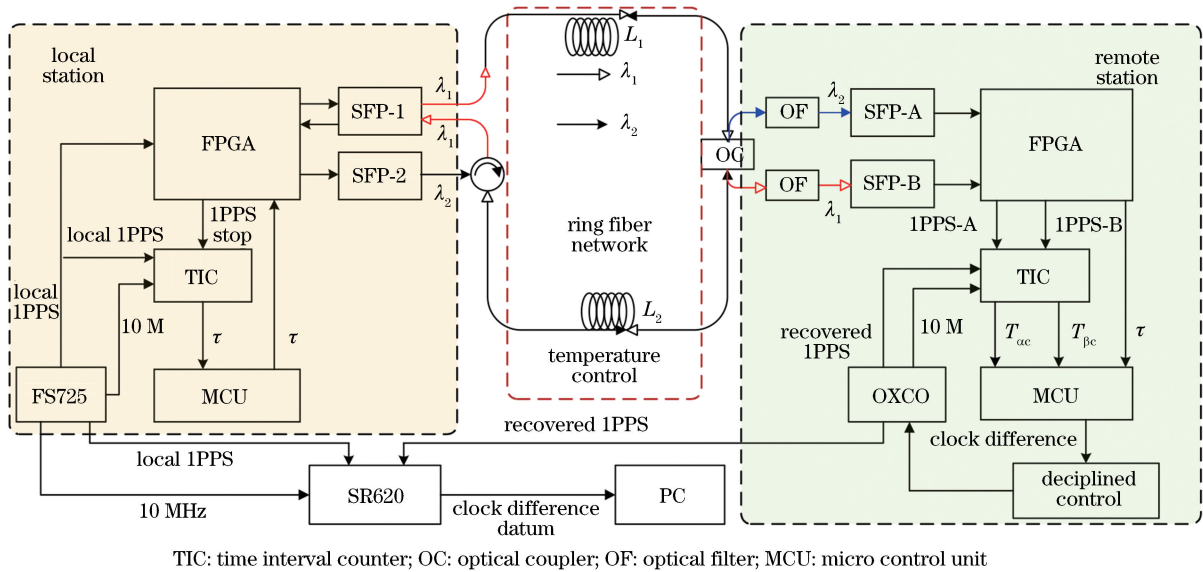


图2 光纤环形网多点时频传递系统结构示意图

Fig. 2 Schematic illustration of multi-point time-frequency dissemination via ring fiber network

中心站采用铷原子钟(FS725,斯坦福研究系统公司,美国)来提供10 MHz频率信号和秒脉冲信号。在不考虑损耗的条件下,不论终端站的数量或位置如何变化,中心站只需要完成以下两个方面的工作:

1) 秒脉冲的对发。由铷原子钟提供10 MHz频率信号和秒脉冲信号,信号在现场可编程门阵列(FPGA)内完成调制,并被传送给商用光模块1(SFP-1)和商用光模块2(SFP-2),经光电转换得到波长分别为 $\lambda_1 = 1549.32 \text{ nm}$ 和 $\lambda_2 = 1548.51 \text{ nm}$ 的光信号,二者分别沿顺时针方向和逆时针方向进入光纤环路中。

2) 对光纤环路总延迟的测量及广播。波长为 λ_1 的光信号沿着顺时针链路方向传回到中心站,由光纤环形器提取后被传送给SFP-1的光接收部分,将光电转换得到的电信号送到FPGA进行解调,以

恢复出秒脉冲信号1PPS stop。由时间间隔测量模块(TIC)测得秒脉冲信号local 1PPS与恢复的秒脉冲信号1PPS stop之间的时差 τ ,该时差即为光信号在光纤环路中的传播总延迟。 τ 经过单片机(MCU)整合后被传送到FPGA,与本地秒脉冲一起完成信号编码和调制后,由SFP-1实时发送到光纤环路中。

终端站的二级频标采用恒温晶体振荡器(OXCO,广州市天马电讯科技有限公司,中国)产生的本地所需的10 MHz频率信号和秒脉冲信号,并根据钟差进行驯服同步。终端站通过一个 2×2 的耦合器(OC)分别提取出顺时针和逆时针方向传来的光信号,经相应光滤波器(OF)的滤波后,由光模块SFP-A和光模块SFP-B分别接收逆时针方向波长为 λ_2 的光信号和顺时针方向波长为 λ_1 的光信号,信号经过光电转换后被传送到FPGA进行解

调,分别恢复出逆时针方向传来的秒脉冲信号 1PPS-A、顺时针方向传来的秒脉冲信号 1PPS-B 以及 τ 。利用时间间隔测量模块可分别测出 T_{ac} 和 T_{bc} ,并将时间间隔数据交给 MCU。考虑到终端站 1 s 内只能完成 1 次时间间隔测量,在此采用交替测量的方案;通过 MCU 发送指令控制终端站的秒脉冲提取模块,将秒脉冲信号 1PPS-A 和 1PPS-B 交替送到时间间隔测量模块,测得的时间间隔数据将会被传送到 MCU。MCU 按照(5)式对本地测得的时间间隔及环路总延迟进行处理,将计算得到的两地钟差数据传送到时间伺服模块^[11],伺服模块根据接收到的钟差数据产生调整量,控制晶振进行校频以实现两地钟源的同步。

为了检验时频传递性能,采用时间间隔测量仪 (SR620,斯坦福研究系统公司,美国)对中心站及终端站的钟差进行测量,测量数据由自编软件进行采集与分析,最终得到时频传递同步精度。

3.2 误差来源

根据(8)式,终端站对钟差自感知的数据越准确,伺服控制就越精确。在工程实现中,双向链路所采用波长的不同和萨尼亚克 (Sagnac)效应的影响会导致双向信号在传输过程中产生不对称时延偏差^[9-10]。设实际 L_1 中逆时针传输的时延为 T'_{ai} , L_2 中逆时针传输的时延为 T'_{bi} ,则依据(3)式,终端站实际测得的时间间隔 T'_{bc} 为

$$T'_{bc} = C_i - (C_A + T'_{bi})。 \quad (9)$$

实际计算得到的钟差为

$$C_i - C_A = \frac{1}{2}(T_{ac} + T'_{bc} + T_{bi} + T_{ai})。 \quad (10)$$

对比(10)式和(5)式,可以发现在实际工程实现中引入的偏差为 $T'_{bc} - T_{bc}$,该值为光信号在 L_2 上的不对称时延,其主要影响因素是 Sagnac 效应和光纤色散,则不对称性偏差为

$$T'_{bc} - T_{bc} = T_{sag} + T_{dis}, \quad (11)$$

式中: T_{sag} 为 Sagnac 效应引入的链路时延不对称偏差; T_{dis} 为光纤色散带来的不对称性时延偏差。考虑链路不对称性的随机误差及系统自身的不对称偏差,整个时频传递系统的误差 E_{rr} 可以表示为

$$E_{rr} = T_{dis} + T_{sag} + T_{sys} + E_{\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2} + E_{\Delta dis} + E_{sys}, \quad (12)$$

式中: T_{sys} 为端机系统和测量系统端机的光纤跳线、电缆线及处理时延等的不对称性导致的系统自身不对称性偏差; $E_{\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2}$ 为光源波长随机波动和链路色散的共同作用引入的时频传递随机误差; $E_{\Delta dis}$ 为色

散温变引入的链路时延随机波动; E_{sys} 为测量以及光电、电光转换引入的时延波动噪声^[12-15]。

3.3 时频传递实验与结果

为了检验基于光纤环形网多点时频传递系统的性能,在长度为 100 km 的光纤环路中取逆时针链路 L_2 的长度分别为 25, 50, 75 km 进行时频传递实验。

对于 E_{rr} ,实验中需根据其来源分别进行校消或补偿,以提高时频传递的准确性。实验中首先利用长度为 20 m 的光纤跳线将中心站与终端站进行互联,测得终端设备的 T_{sys} 为 72.486 ns,将该偏差值存储于终端站 MCU 中,使得终端站在不同位置处均可通过比例-积分-微分 (PID) 算法的初值设定进行校消^[16-17]。由于实验平台均在同一地点, Sagnac 效应不会产生不对称性偏差。理论上商用激光器的最大漂移波长为 0.1 nm,但中心波长漂移是光源使用寿命内的偏移指标,短期实验激光器的波长十分稳定,可无需考虑 $E_{\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2}$ 。在温度变化 20 °C 时,色散温变引入的时延波动为 4 ps,低于测量分辨率。 E_{sys} 可由时频信号伺服重生算法滤除。因此,实验中最主要的偏差来自色散造成的不对称性偏差。根据色散的定义,如果 L_2 的长度为 100 km,则会引入 0.68 ns 的偏差[以色散系数典型值 17 ps/(nm · km)为例]。由于终端站可能处于环路上的任意位置,所对应的 L_2 也在变化,各个终端站需根据 L_2 的变化灵活利用色散的典型值进行计算补偿。

由(2)式可知,在终端站可得到光信号在 L_2 上的传播延迟 T_{bi} 为

$$T_{bi} = (C_i - C_A) - T_{bc}。 \quad (13)$$

终端站可根据 T_{bi} 反推 L_2 的长度,并结合色散的定义式计算补偿量,实现对色散偏差的自感知补偿,其补偿量 T_{comp} 可表示为

$$T_{comp} = \frac{1}{2}D \cdot \Delta\lambda \cdot T_{bi} \cdot \frac{c}{n}, \quad (14)$$

式中: D 为色散系数,其典型值为 17 ps/(nm · km); $\Delta\lambda$ 为两个方向的波长差, $\Delta\lambda = 0.8$ nm; c 为真空中的光速, $c = 3 \times 10^8$ m/s; n 为光纤中的折射率,在此取 1.47。

为验证方案的可行性,在 3 个终端站分别进行色散引起的时频传递偏差补偿校消实验,补偿前后的偏差测量结果如图 3 所示。表 1 列出了初始偏差数值、色散校消偏差的理论补偿量及校消后得到的最终偏差值。

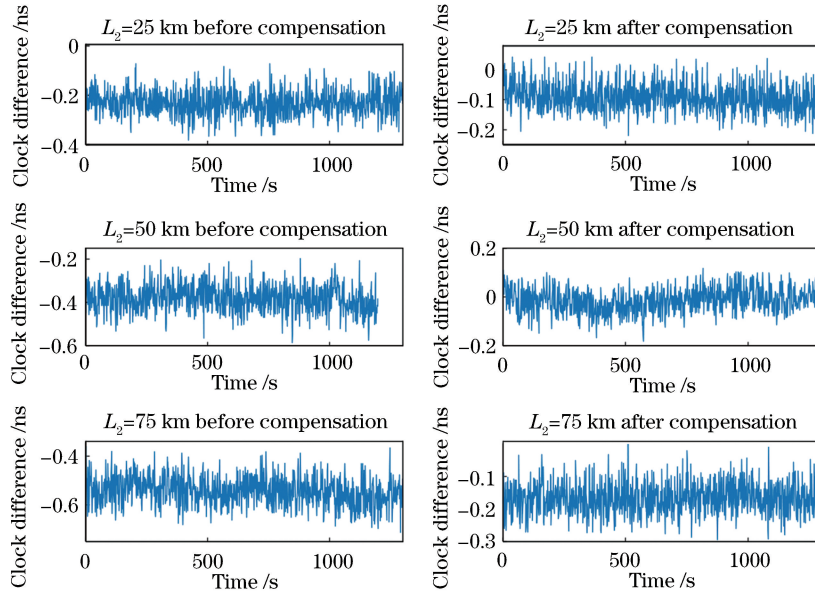


图 3 在三个终端站处进行色散引起的时频传递偏差补偿前后的偏差测量结果

Fig. 3 Deviation measurement results before and after compensation for time-frequency dissemination deviation introduced by dispersion in three remote stations

表 1 初始偏差数值、色散校消偏差的理论补偿量及校消后得到的最终偏差值

Table 1 Initial deviation, theoretical compensation of dispersion correction deviation, and final deviation after dispersion compensation

Length of anti-clockwise links (L_2) / km	Initial deviation / ps	Theoretical compensation / ps	Deviation after dispersion compensation / ps
25	-233	170	74
50	-386	340	-15
75	-551	510	-130

根据图 3 和表 1 中的实验结果,可以发现处于不同位置的各个终端站均存在 10^{-10} s 量级的初始误差,该偏差与 L_2 近似呈线性关系,表明初始偏差主要来源于色散造成的不对称性时延偏差,该结果与理论分析相符。对比色散校消补偿前后的偏差测量结果,可以发现:通过计算补偿可很好地提高时频传递的准确度。但由于光纤盘纤的实际色散值 [$15\sim 20$ ps/(nm·km)] 与典型值 [17 ps/(nm·km)] 存在偏差,采用典型值计算补偿时必然会引入一定的残差,后续可通过进一步优化色散补偿来提高时频传递的精度。此外,以 SR620 为核心的测量系统本身受到环境的影响,也会引入数十皮秒的偏差波动。

考虑到现实光纤环路外界环境复杂多变的情况,其引起链路延迟波动的最主要因素是外界温度的变化。为了检验多点时频传递方案在外界环境温度变化下的时频传递性能,在此进行了链路温度刷

变下的时频传递实验。

实验中将长度为 100 km 的光纤放进恒温箱,以恒温箱内的温度变化来模拟实际环境中的温度变化,为直观体现链路温度变化给延迟波动带来的影响,在中心站测得环路总延迟后通过串口进行上报。待时频传递系统稳定工作后,设定恒温箱的温度由 16 °C 上升到 35 °C,等链路延迟趋于平稳后,关闭恒温箱,使光纤环路所处的环境温度自然下降。其中在 13500 s 内的链路温度变化下,长度为 100 km 链路上的单向时延如图 4 所示,由图可知:外界环境温度变化 19 °C 时,单向传播延迟变化了约 40 ns,该结果符合相关文献中的报道^[18-19]。

调整终端站的位置,重复上述改变链路温度的步骤进行时频传递实验,得到的长度为 100 km 的光纤环形网多点时频传递的稳定度如图 5 所示。由于采用的铷原子钟 FS725 的秒稳定度为 2×10^{-11} ,恒温晶振的秒稳定度为 5×10^{-11} ,按照均方根叠加

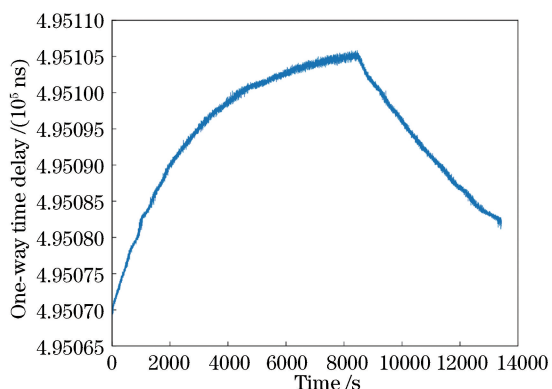


图 4 在 13500 s 内的链路温度变化下长度为 100 km 链路上的单向时延

Fig. 4 One-way time delay of 100 km fibers under link temperature change in 13500 s

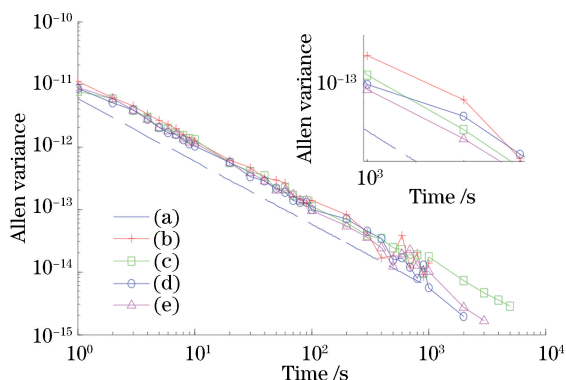


图 5 100 km 光纤环形网多点时频传递的稳定度。(a) 系统时频传递稳定度的极限;终端站位于(b) $L_2 = 25$ km、(c) $L_2 = 50$ km 和(d) $L_2 = 75$ km 时,光纤链路温度变化下的时频传递稳定度;(e) $L_2 = 25$ km 时,光纤链路处于室温($16 \sim 17$ °C)下的时频传递稳定度

Fig. 5 Time-frequency dissemination stability via 100 km ring fiber network. (a) Time-frequency dissemination stability extremity of system; time-frequency dissemination stability when remote station locates at (b) $L_2 = 25$ km, (c) $L_2 = 50$ km, and (d) $L_2 = 75$ km; (e) time-frequency dissemination stability under room-temperature of $16 \sim 17$ °C when $L_2 = 25$ km

可估算出理论上时频传递系统的秒稳定度极限为 5.8×10^{-11} 。图 5 中曲线(a)为系统时频传递稳定度的极限。曲线(b)~(d)分别为终端站位于 25, 50, 75 km 时,光纤链路温度变化下的时频传递稳定度曲线,时频传递结果的秒稳定度近似呈一倍频程下降,千秒稳定度均在 10^{-14} 量级,该结果表明系统的主要噪声来源于相位白噪声,且链路时延波动带来的稳定度损失已被消除。曲线(e)为 $L_2 = 25$ km

时,光纤链路处于稳定室温($16 \sim 17$ °C)下的时频传递稳定度,其千秒稳定度为 5.2×10^{-14} 。通过对比曲线(b)~(e)可以发现,光纤环路在温度变化下的系统时频传递稳定度与其处于稳定室温下的时频传递稳定度十分相近,这表明更换终端站在光纤环形网中所处的位置,在链路温度剧烈变化的情况下,中心站与终端站均能实时测量感知链路延迟的波动和准确的钟差,并进行高精度时频伺服重生。

4 结 论

为实现基于光纤环形网的多点时频传递,提出了两种环形网终端站对钟差自感知的方案,该方案可在光纤环形网上的任意位置接入终端站并恢复出与中心站高度同步的时间频率信号。搭建了长度为 100 km 的光纤环形网多点时频传递系统,进行了色散不对称性时延校消和链路温度变化下的时频传递实验,得到的时频传递误差的峰峰值小于 400 ps,均方根误差小于 60 ps。该方案可实现基于环形网进行区域网络的高精度时频分配。

参 考 文 献

- [1] Zhang H, Wu G L, Li H W, *et al.* High-precision ultralong distance time transfer using single-fiber bidirectional transmission unidirectional optical amplifiers[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(5): 7804408.
- [2] Śliwczynski Ł, Krehlik P, Czubla A, *et al.* Dissemination of time and RF frequency via a stabilized fibre optic link over a distance of 420 km [J]. Metrologia, 2013, 50(2): 133-145.
- [3] Li X Y, Zhu Y, Lu L, *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] Zhu X, Wang B, Guo Y C, *et al.* Robust fiber-based frequency synchronization system immune to strong temperature fluctuation[J]. Chinese Optics Letters, 2018, 16(1): 010605.
- [5] Zhu X, Wang B, Gao C, *et al.* Fiber-based multiple-access frequency synchronization via 1f-2f dissemination [J]. Chinese Physics B, 2016, 25(9): 090601.
- [6] Krehlik P, Śliwczynski Ł, Buczek Ł, *et al.* Multipoint dissemination of RF frequency in fiber optic link with stabilized propagation delay[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2013, 60(9): 1804-1810.

- [7] Chen W, Liu Q, Cheng N, *et al.* Joint time and frequency dissemination network over delay-stabilized fiber optic links[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(3): 7901609.
- [8] Wang J L, Chen W, Liu Q, *et al.* Ultrastable multiclock frequency injection and dissemination in a ring fiber network [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(2): 7201107.
- [9] Jiang Z Z, Dai Y T, Zhang A X, *et al.* Precise time delay sensing and stable frequency dissemination on arbitrary intermediate point along fiber-optic loop link with RF phase locking assistance[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(2): 7200809.
- [10] Yang X H, Zhai H S, Hu Y H, *et al.* Study on GPS disciplined Rb clock based on new frequency accuracy measurement algorithm[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2005, 26(1): 41-44.
杨旭海, 翟惠生, 胡永辉, 等. 基于新校频算法的 GPS 可驯铷钟系统研究[J]. *仪器仪表学报*, 2005, 26(1): 41-44.
- [11] Zhao X Y, Lu L, Zhu Y, *et al.* Design and realization of disciplining time automatically in remote module of the optical fiber time transfer system[J]. *Optical Communication Technology*, 2018, 42(8): 10-13.
赵晓宇, 卢麟, 朱勇, 等. 光纤时间传递系统中终端站自主伺服的设计实现[J]. *光通信技术*, 2018, 42(8): 10-13.
- [12] Yu L Q, Lu L, Wang R, *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.
- [13] Jiang S P, Zhang H, Jiang W N, *et al.* Noise analysis for BTDM-based fiber-optic time transfer link[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2017, 28(6): 596-604.
江少平, 张浩, 姜文宁, 等. 双向时分复用光纤时间传递链路噪声分析[J]. *光电子·激光*, 2017, 28(6): 596-604.
- [14] Krehlik P, Śliwczynski 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.
- [15] Krehlik P, Schnatz H, Śliwczynski Ł. A hybrid solution for simultaneous transfer of ultrastable optical frequency, RF frequency, and UTC time-tags over optical fiber [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2017, 64(12): 1884-1890.
- [16] Priyanka E B, Maheswari C, Meenakshipriya B. Parameter monitoring and control during petrol transportation using PLC based PID controller [J]. *Journal of Applied Research and Technology*, 2016, 14(2): 125-131.
- [17] Dai J K, Jiang H M, Zhong Q R, *et al.* LD temperature control system based on self-tuning fuzzy PID algorithm[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3287-3291.
戴俊珂, 姜海明, 钟奇润, 等. 基于自整定模糊 PID 算法的 LD 温度控制系统[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(10): 3287-3291.
- [18] Fujieda M, Kumagai M, Gotoh T, *et al.* Ultrastable frequency dissemination via optical fiber at NICT[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, 58(4): 1223-1228.
- [19] Palmer R K, Blue T E. Modulation transfer function for distributed temperature measurements using an optical fiber sensor system[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(5): 1911-1918.