

高精度光纤时频伺服传递实验研究

李晓亚 朱 勇 卢 麟* 吴传信 经继松 李得龙

(中国人民解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要 阐述了光纤高精度时间频率伺服传递的基本原理、误差来源和系统技术方案。实验上完成了100 km光纤链路温度缓变和剧变条件的授时实验,实验授时同步误差峰峰值小于400 ps。实验结果表明光纤高精度时间频率伺服系统的性能可以满足商用原子钟间的高精度时间比对与传递要求。

关键词 光纤光学;时间传递;波分复用;双向时间比对;时频伺服

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0506004

Study on High Precision Disciplined Time-Frequency Transferring Experiments through Optical Fiber Link

Li Xiaoya Zhu Yong Lu Lin Wu Chuanxin Jing Jisong Li Delong

(Institute of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology,
Nanjing, Jiangsu 210007, China)

Abstract The basic principle of high precision disciplined time-frequency transfer through optical fiber link, the analysis of error sources and the structure of the disciplined clock system are expatiated. Experiments through 100 km optical fiber are done when the temperature slowly changes and extremely changes. The result presents that the peak-to-peak value of synchronization error is smaller than 400 ps. And the performance of the system can satisfy the demand of high precision and synchronization time transfer between commercial atomic clocks.

Key words fiber optics; time transfer; wavelength division multiplexer; two-way time-frequency transfer; disciplined time-frequency

OCIS codes 060.2340; 120.4570; 120.7000

1 引 言

由于光纤信道损耗低、抗干扰能力强的自身特性优势,基于光纤链路的时间传递成为高精度时频传递的重要手段^[1-5]。目前,长距离高精度的时频传递多选择利用波分复用(WDM)技术实现。利用WDM技术的时间传递方式,又可以分为环回法^[6]和双向时间比对法两种。环回法主要应用于主从方式的时间传递,该方式要求主站具备高稳定钟源,对从站没有特别要求,但存在性能受环路带宽和信噪比累积影响的问题,长距离应用时性能受限,且无守时功能。双向时间比对主要应用于两端站同时具备高稳定钟源间的时间比对与传递,可有效抑制环回

法中存在的环路带宽和信噪比累积限制的问题,且具有一定的守时功能。

目前已有的光纤双向时间比对传递文献^[3-5]中只完成了两端站时钟的比对研究,其比对精度在几个纳秒量级。且仅实现了两端站时钟“纸面”上的同步,并未研究终端站时频信号的高精度重生问题,因而限制了其应用场合。本文利用光纤时间伺服样机系统,在完成两端站时钟比对的基础上,利用时间伺服算法对终端站钟源进行持续地校频调整,最终在终端站重生出与中心站高度同步的时频信号,实现了两端站时钟真正意义上的高度同步,且同步精度优于400 ps(峰峰值)。

收稿日期: 2013-11-15; **收到修改稿日期**: 2014-01-23

基金项目: 国家973计划(2012CB31560)、国家自然科学基金(61174199,61032005,61074065)

作者简介: 李晓亚(1990—),男,硕士研究生,主要从事光纤时频传递方面的研究。E-mail: l_makingfocus@163.com

导师简介: 朱 勇(1971—),男,硕士生导师,主要从事光信息及量子光通信技术方面的研究。E-mail: jlzhu@163.com

* **通信联系人**。E-mail: nj_lulin@163.com

文中阐述了光纤高精度时间伺服基本原理和系统实现方案,利用高精度时间频率伺服样机系统,在实验室 100 km 的光纤链路温度缓变和剧变的条件下,完成了伺服铷钟 X72 的授时实验,实验授时误差的峰峰值小于 400 ps。该结果表明,通过时频伺服方式可在远端重生与中心站高度同步的时频信号。

2 光纤高精度时间伺服原理

时间伺服的先决条件是要获得两端站钟源 (clk A 和 clk B) 的精确钟差,单纤双向时间比对能确保来回光纤链路长度严格对称^[7],因而测得两端站的钟差具有较高精度,该时间伺服实验是在采用单纤双向比对测得两端站钟差的基础上完成的,其原理如图 1 所示。在双向比对的过程中,两端站 (“source station”和“terminal station”)分别将本站的秒脉冲信号在现场可编程门阵列(FPGA)内完成调制(MOD)后送至光发送模块(OS)转换成特定波长(λ_1 和 λ_2)的光信号,并将其发送至对端,在接收

端接收信号经过光滤波器(OF)后,送至光接收模块(OR)转换为电信号再送至 FPGA 内解调(DEM)恢复出秒脉冲信号。同时在两端站分别以本站的秒脉冲为 start,以恢复出对端传送至的秒脉冲为 stop,使用时间间隔测量仪(TIC1 和 TIC2)测量其时间间隔。若图中 A、B 两端站的钟源时刻分别以 T_A 、 T_B 表示, T_{RB} 、 T_{RA} 分别表示 A、B 两站解调恢复出对端站传送至秒脉冲的时刻, T_{AB} 、 T_{BA} 分别表示由 A 站传送至 B 站和 B 站传送至 A 站的传输时间。则有

$$T_{AB} = T_{RA} - T_A, \quad (1)$$

$$T_{BA} = T_{RB} - T_B. \quad (2)$$

若两个时间间隔测量仪 TIC1 和 TIC2 的结果分别为 T_1 、 T_2 ,则

$$T_1 = T_{RB} - T_A, \quad (3)$$

$$T_2 = T_{RA} - T_B. \quad (4)$$

由(1)~(4)式,可推算得 A、B 两端站的钟差为

$$T_B - T_A = \frac{1}{2}(T_1 - T_2) + \frac{1}{2}(T_{AB} - T_{BA}). \quad (5)$$

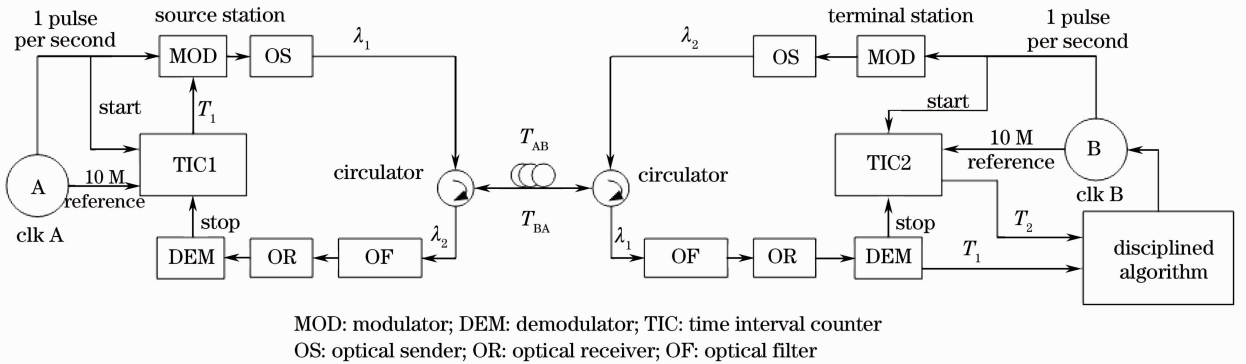


图 1 光纤高精度时间伺服的基本原理

Fig. 1 Principle of high precision disciplined time transferring through optical fiber link

在终端站,接收到两端站测量的时间间隔数据 (T_1 和 T_2) 之后,根据(5)式计算出两端站钟源钟差,然后采用比例积分微分的时频伺服算法每秒对终端站钟源进行持续地伺服调整,进而使两地钟源高度同步。终端站实施校频原理可表示为^[8]

$$\frac{\Delta f}{f} = -\frac{\Delta t}{t}, \quad (6)$$

式中 Δf 为校频调整量, f 为标称频率(即 10 MHz), Δt 为所得钟差(即 $T_B - T_A$), t 为测量间隔(实验中 $t = 1$ s)。

由(6)式可知,终端站钟源校频调整量与钟差成正比,钟差数据越准确,伺服算法校频控制越精确,最终授时精度越高。系统授时误差 E_{rr} 可表示为

$$E_{rr} = T_{\lambda_1-\lambda_2} + E_{\Delta\lambda_1-\Delta\lambda_2} + E_{\Delta n} + T_{\text{sag}} + T_{\text{sys}} + E_{\text{sys}} + E_{\text{alo}}, \quad (7)$$

式中前 4 项主要引入链路不对称时延差 ($T_{AB} - T_{BA}$),其中 $T_{\lambda_1-\lambda_2}$ 为双向波长不对称引入的时延偏差,实验中理论计算补偿校消^[9]; $E_{\Delta\lambda_1-\Delta\lambda_2}$ 和 $E_{\Delta n}$ 为温度及其他因素引起的光源波长波动和光纤折射率变化引入的链路时延随机波动^[6,10],由于其无法通过理论确知其具体波动量,只能通过实时测补偿; T_{sag} 是地球自转引起的 Sagnac 效应引入的链路时延不对称偏差^[2],实验室内使用盘纤链路时不会引入该项偏差。 T_{sys} 为授时端机系统自身不对称偏差,实验前可以通过初校校消; E_{sys} 为系统底噪^[6,10],包括时间间隔测量误差以及滤波、调制解调、光发光收等

处理引入的时延波动噪声,系统底噪导致授时系统随机误差,实验通过优化系统结构抑制。式中最后一项 E_{alo} 是伺服算法的控制误差,实验中通过优化伺服算法抑制。

3 基于双向时间比对的时间伺服授时实验

3.1 实验配置

实验采用基于上述原理研制的光纤高精度时间伺服系统,装置图如图 2 所示。

在授时系统中,中心站采用的钟源为铷原子钟

FS725,其秒稳定度优于 2×10^{-11} ,十秒稳小于 1×10^{-11} ,百秒稳小于 2×10^{-12} ,终端站采用钟源为铷钟 X72,其秒稳定度 3×10^{-11} ,十秒稳小于 1×10^{-11} ,百秒稳小于 3×10^{-12} ,性能稍逊于 FS725,但可以控制其频率变化。时间比对的过程中,中心站选用的波长 λ_1 为 1548.52 nm,终端站选用的波长 λ_2 为 1549.31 nm。同时在中心站和终端站的测量模块(即图 1 中的 TIC1 和 TIC2)采用了 ACAM 公司的 TDC-GP21 芯片,并使用本端站钟源输出的 10 MHz 频率作为基准频率。

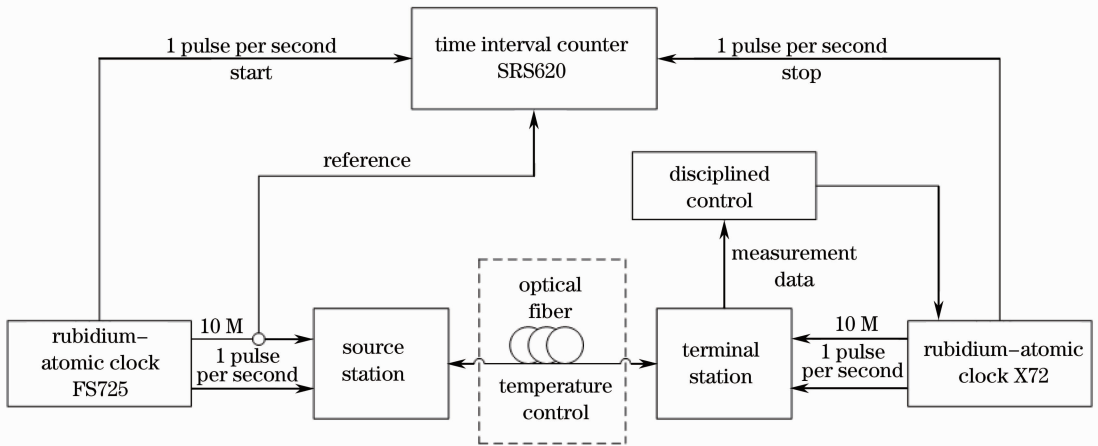


图 2 实验系统配置框图

Fig. 2 System scheme of the experiment

实验过程中,使用冰箱冷冻光纤的温控措施模拟实际链路的温度变化。中心站完成测量后,将测量结果 T_1 与秒脉冲信号一同调制后通过光纤链路发送至终端站,如图 1 所示。在终端站,将解调出的中心站测量结果 T_1 与本端站测量结果 T_2 上报至时频伺服模块,然后结合所测数据、理论分析计算的来回链路时延不对称误差[即(7)式中 $T_{\text{AB}} - T_{\text{BA}}$]计算得出两端站钟差,进而伺服终端站铷钟 X72,使两端站钟源同步。最后使用 SRS620 测量中心站铷钟与铷钟 X72 的钟差,该测量值即为授时同步精度。

为测量基于单纤双向时间比对的时频伺服授时系统性能,进行了以下三组实验:1)采用 SRS620 测量系统的底噪和单纤双向比对系统的底噪的基础实验,以确定 SRS620 是否满足授时结果的测量需求以及比对系统的本底噪声;2) 1 km 链路的单纤双向比对实验和时频伺服授时实验,验证时频伺服的授时性能;3) 为验证授时系统的长距离以及链路温度缓变和剧变条件下的授时性能,分别进行了 100 km 光纤链路的室温和温变实验。

3.2 单纤双向比对系统底噪测量

图 3 给出了时间间隔测量仪 SRS620 的测量底噪和单纤双向比对系统的底噪。SRS620 底噪的测量过程中,将铷钟 FS725 的同一秒脉冲经过分路器分成两路,一路作为 start,一路作为 stop 送至

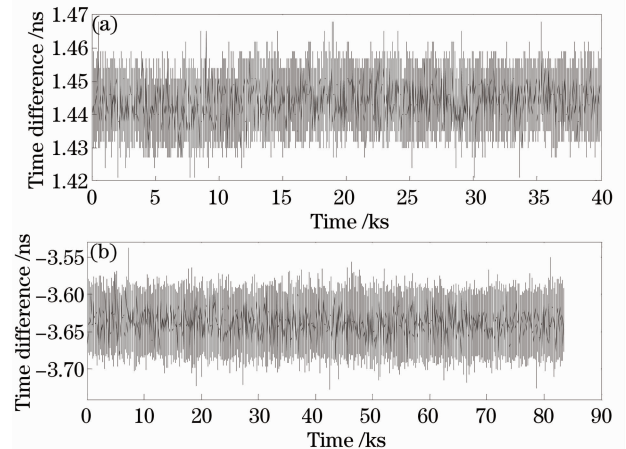


图 3 (a) SRS620 测量系统底噪;(b)样机比对系统底噪

Fig. 3 (a) System noise floor measured by SRS620;
(b) noise floor of the prototype system

SRS620,测得其时间间隔结果即为 SRS620 的测量底噪,其峰峰值为 47 ps,均方差为 5.4 ps。

单纤双向时间比对系统的底噪测量中,两端站共用铷钟 FS725 作为钟源,在 1 km 的光纤链路上进行比对实验。由理论分析计算得 1 km 链路不对称性偏差,结合实验中两端站测量芯片的测量结果(即 T_1 和 T_2),代入(5)式中,得到钟差数据即为系统底噪,如图 3(b)所示,未经过任何滤波处理的比对数据峰峰值为 189.2 ps,均方差为 17.8 ps。

图 4 为 SRS620 测量底噪和单纤双向比对系统底噪的 Allan 方差曲线,以表示其稳定度。SRS620 的测量稳定度如图 4(a)所示,秒稳定度约为 8.4×10^{-12} ,千秒稳约为 9.2×10^{-15} 。比对系统稳定度如图 4(b)曲线所示,秒稳定度为 2.9×10^{-11} ,千秒稳定度为 3×10^{-14} 。

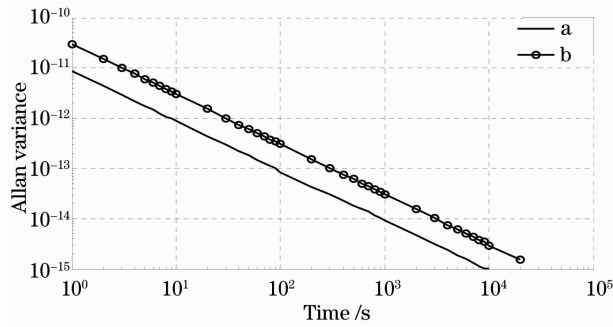


图 4 (a) SRS620 测量系统底噪; (b) 比对系统底噪
Fig. 4 (a) Noise floor of the system measured by SRS620; (b) noise floor of the prototype system

由上述结果可知,基于 SRS620 的测试系统底噪优于商用铯钟水平,而光电比对的底噪优于铷钟 FS725 的自身稳定度,能够胜任授时实验的测量需求。

3.3 1 km 单纤双向时间比对实验和时间伺服授时实验及结果分析

为了检验时间伺服的授时性能,设计了 1 km 的单纤双向比对实验和时间伺服授时实验。单纤双向比对实验在实验室室温($25.12 \text{ }^\circ\text{C} \sim 25.38 \text{ }^\circ\text{C}$)环境下进行,链路长度为 1 km,实验中放弃时间伺服环节,使两端站钟源处于自由震荡状态,由 SRS620 测得两端站比对钟差如图 5(a)所示,在长达 21 h 的测量中两钟自由震荡,钟差峰峰值为 4003.1 ns。钟差稳定度如图 6(a)曲线所示,其秒稳定度约为 1×10^{-10} ,百秒稳为 1.8×10^{-12} ,在 500 s 左右达到最优的 7.9×10^{-13} ,万秒稳约为 5×10^{-12} ,该结果符合铷原子钟 X72 的漂移特性。

1 km 光纤时间伺服授时实验即基于 1 km 单纤

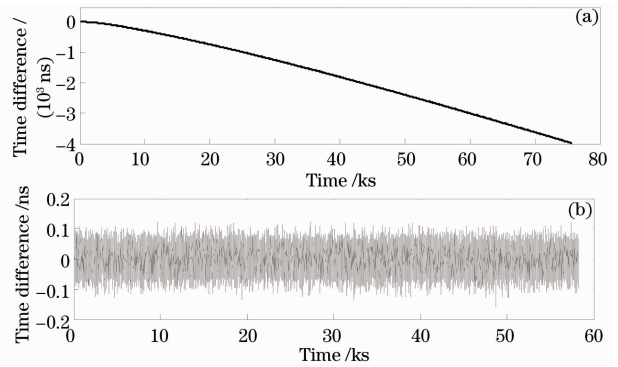


图 5 (a) 1 km 链路双向比对,两端站钟差; (b) 室温下, 1 km 链路授时结果

Fig. 5 (a) Two-way time transfer between two stations through 1 km fiber link; (b) results of the time transfer through 1 km fiber link

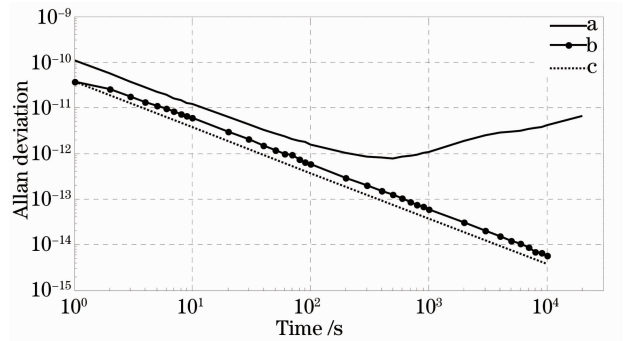


图 6 (a) 1 km 链路,室温下双向比对钟差稳定度; (b) 1 km 链路,室温下时间伺服授时稳定度; (c) 无时间伺服控制误差时的理论授时稳定性

Fig. 6 (a) Stability of the two way time transfer through 1 km optical fiber link under the room-temperature; (b) stability of the disciplining clock time transfer through 1 km optical fiber link under the room-temperature; (c) stability of the disciplining clock time transfer without disciplining error

双向时间比对实验的基础上加上时间伺服的模块,以伺服终端站铷钟 X72。实验在室温($24.7 \text{ }^\circ\text{C} \sim 26.5 \text{ }^\circ\text{C}$)条件下,在经 16.2 h 的测量后,得到时间伺服铷钟 X72 后,两端站钟差即授时同步误差如图 5 (b)所示,其均方差为 34.5 ps,峰峰值为 282 ps。授时误差稳定度如图 6(b)所示,秒稳定度约为 3.7×10^{-11} ,千秒稳约为 5.7×10^{-14} ,万秒稳约为 5.5×10^{-15} 。

由图 6 可以看出:相比于两端站钟源自由震荡时的钟差稳定性(如曲线 a 所示),时间伺服后两端站钟差具有更高的短期和长期稳定度(如曲线 b 所示)。该结果表明:链路长度为 1 km 时,时间伺服模块能有效地伺服铷钟 X72,恢复出与中心站高精

度同步的时间信号。图中曲线 b 自 2 s 稳后呈一倍频程下降,说明系统主要噪声来源为相位白噪声,伺服系统的性能已接近 X72(秒稳为 3×10^{-11}) 的极限;曲线 c 为理想条件下不存在时间伺服控制误差时的授时稳定度曲线(自 1 s 稳呈一倍频程下降)。相比于曲线 c,曲线 b 中授时稳定性劣化是由于时间伺服控制误差引起,根据 Allan 方差为均方差的 $\sqrt{3}$ 倍换算关系,计算可得控制误差均方差约为 13.9 ps。

3.4 长距离时间伺服授时实验及结果分析

为验证时间伺服系统在长距离以及链路温度缓变和剧变时的授时性能,将链路长度拓展至 100 km,并进行了温度缓变和剧变条件下的两组实验。

图 7 为 100 km 光纤时间伺服结果和终端站站至中心站单向时延。该实验仍然在实验室室温 ($26.9\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 28.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,环境温度变化为缓变过程)条件下进行,通过 10 h 的测试,得到其授时同步误差如图 7(a)所示,其均方差为 40.78 ps,峰峰值为 350.0 ps。实验测得终端站到中心站的单向时延如图 7(b)所示,峰峰值为 3.62 ns。相比于 1 km 时间伺服授时实验,该实验性能劣化的主要原因是光功率下降导致的光电转换信噪比下降。

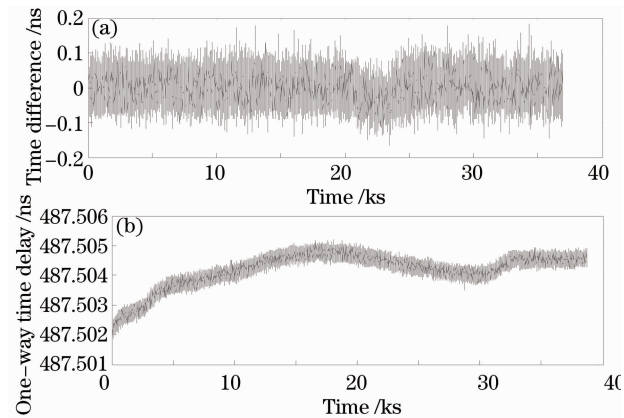


图 7 (a)室温条件下,100 km 链路授时结果;
(b) 100 km 链路,终端站至中心站单向时延

Fig. 7 (a) Results of time transfer under the room-temperature through 100 km fiber line; (b) one-way delays from terminal station to source station through 100 km fiber link

图 8 为 100 km 光纤链路采用冰箱冷冻的温控措施时的时间伺服结果和终端站至中心站单向时延。实验在实验室内 ($26.0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 27.8\text{ }^{\circ}\text{C}$) 进行,为了检验该套样机系统在实际链路时延剧烈变化时的授时性能,将 100 km 光纤中的 75 km 放入冰箱进行冷冻处理。首先,将 50 km 的光纤放入 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冰

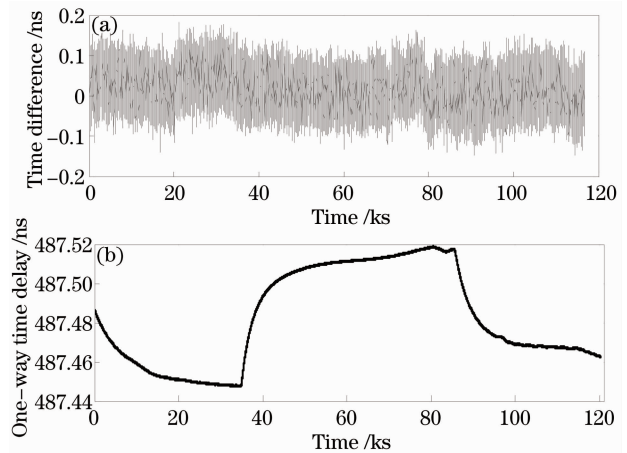


图 8 (a) 75 km 冷冻时,授时结果;(b) 75 km 光纤冷冻时,终端站至中心站单向时延

Fig. 8 (a) Result of time transfer when 75 km fibers are frozen; (b) one-way time delay from terminal station to source station when 75 km fibers are frozen

箱保鲜室,将 25 km 的光纤放入 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冰箱冷藏室;在放置约 10 h 后将上述 50 km 和 25 km 光纤从冰箱中取出,置于实验室内;约 14 h 后,再将 50 km 和 25 km 的光纤以上述方式再次置于冰箱中。实验最终授时结果如图 8(a)所示,授时同步误差均方差约为 39.9 ps,峰峰值为 331.0 ps。

由于光纤的热胀冷缩,采用上述冷冻方式后链路时延将产生剧烈变化,根据文献[11]报道,温度引起的光纤链路时延变化为 $30\text{ ps}/(\text{K} \cdot \text{km})$,理论上计算经过上述冷冻处理链路时延变化约为 70.1 ns。而实验测得单向链路时延变化如图 8(b)所示,其终端站至中心站链路时延变化峰峰值为 71.6 ns,与理论计算结果相符,也符合架空链路条件下的时延波动量^[12],而实际铺设的埋地光缆时延波动更小。

由上述两组实验结果可以看出:链路温度缓变或剧变时,两组实验授时误差的峰峰值均在 400 ps 以内,均方差在 50 ps 以内,说明时间伺服系统都能实时测量感知补偿温度变化引起的链路时延波动,并根据时延波动量控制伺服校频调整量,保持伺服钟与中心站钟源的高度同步。

图 9 为 100 km 室温和温变时间伺服结果稳定性和局部放大图,由图可见,两组实验时间伺服结果稳定性基本相同,秒稳定度约为 3.6×10^{-11} ,千秒稳约为 5.8×10^{-14} ,万秒稳约为 5.7×10^{-15} ,与 1 km 链路的时间伺服授时结果其本一致。由于伺服再生时间信号的短稳由伺服钟 X72 本身决定,长稳由时间比对精度及伺服控制系统决定,图 9 中的授时结

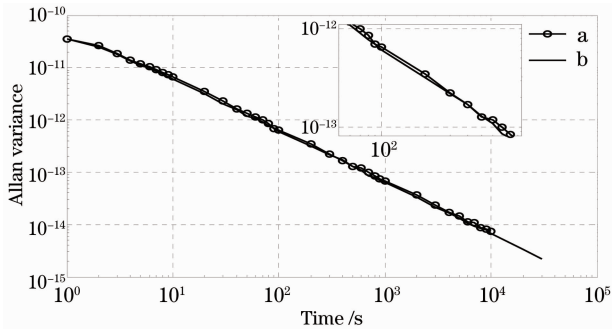


图9 (a) 100 km 链路,室温下授时稳定度;(b) 100 km 链路,75 km 冷冻授时稳定度

Fig. 9 (a) Time transfer stability through 100 km fiber link under the room-temperature; (b) time transfer stability through 100 km fiber link when 75 km fibers are frozen

果自秒稳呈一倍频程下降,说明系统的主要噪声来源为相位白噪声,伺服系统的性能已接近 X72(秒稳为 3×10^{-11}) 的极限。

100 km 时间伺服实验系统中引入授时误差的主要因素、量级及控制措施可归纳如表 1 所示。实验中对于来回链路波长不对称引入的时延不对称偏差,通过理论计算值为 1.34 ns 并加以补偿。理论上商用激光器波长最大漂移 ± 0.1 nm 时,来回链路时延波动为 340 ps。根据文献[13]知温度变化 20 °C 时,由折射率变化引入的来回链路时延波动为 4.0 ps,但实验中因授时误差远大于该值,所以未能测出其具体波动量。实验测得系统自身不对称偏差为 4.25 ns,并通过初校校消。而系统底噪以及伺服控制误差的实验测量值分别为 17.8 ps 和 13.9 ps (均方差值),其中系统底噪可以通过优化系统设计的方式控制减小,伺服控制误差可以通过优化伺服算法的方式加以控制。

表 1 100 km 光纤链路时间伺服传递误差来源、量级及控制方法

Table 1 Error source, order and control method in the disciplined time transferring through 100 km fiber link

Error source	Order	Control method
$T_{\lambda_1 - \lambda_2}$	1.34 ns	Compensated
$E_{\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2}$	340 ps	Fluctuation unmeasured
$E_{\Delta n}$	4.0 ps	Fluctuation unmeasured
T_{sys}	4.25 ns	Initial calibration
E_{sys}	17.8 ps	Optimize system
E_{alo}	13.9 ps	Optimize algorithm

4 结 论

在光纤高精度时间频率伺服实验中,利用

100 km 光纤在链路温度缓变及剧变条件下,实现了授时误差均方差小于 40 ps,峰峰值小于 400 ps 的高精度授时。结果表明:时间伺服的授时方式能在终端站恢复出与中心站高精度同步的信号;在补偿来回链路不对称性误差后,在双向时间比对和时间伺服系统的综合作用下,光纤时间伺服系统的性能接近了终端伺服钟的极限,能满足目前商用原子钟的无损时间同步要求。

参 考 文 献

- Zhang Fan, Hou Dong, Guo Haipeng, *et al.*. Timing delay jitter compensation of a fiber link with active delay compensation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(3): 671–675.
- 张帆, 侯冬, 郭海鹏, 等. 光纤时间频率传输的时延抖动主动补偿[J]. *光学学报*, 2010, 30(3): 671–675.
- Yu Longqiang, Lu Lin, Wang Rong, *et al.*. Analysis of the Sagnac effect and its influence on the accuracy of the optical fiber time transfer system [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.
- Vladimir Smotalacha, Alexander Kuna, Werner Mache. Time transfer in optical network [C]. 42nd Annual Precise Time and Time Interval Meeting, 2010. 427–436.
- Dirk Piester, Miho Fujieda, Michael Rost, *et al.*. Time transfer through optical fibers (TTTOF): first results of calibrated clock comparisons [C]. 41st Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting, 2009. 16–19.
- S C Ebenhag, P Jarlemark, R Emdarson, *et al.*. Time transfer over a 560 km fiber link [C]. Proceedings of the 22nd European Frequency and Time Forum (EFTF), 2008. 23–25.
- Lu Lin, Wu Chuanxin, Zhu Yong, *et al.*. High accurate time transfer on 125 km fiber [C]. First Session of the China Satellite Navigation Conference, 2010.
- 卢麟, 吴传信, 朱勇, 等. 125 km 光纤高精度光纤时间传递 [C]. 第一届中国卫星导航学术年会, 2010.
- S C Ebenhag, P Jarlemark, R Emdarson, *et al.*. Measurements and error sources in time transfer using asynchronous fiber network [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2010, 59(7): 1918–1924.
- Yang Xuhai, Zhai Huisheng, Hu Yonghui, *et al.*. Study on GPS disciplined Rb clock based on new frequency accuracy measurement [J]. *Chinese J Scientific Instrument*, 2005, 26(1): 42–44.
- 杨旭海, 翟惠生, 胡永辉, 等. 基于新校频算法的 GPS 可驯钟系统研究[J]. *仪器仪表学报*, 2005, 26(1): 42–44.
- Lukasz Sliwczynski, Przemyslaw Krehlik, Albin Czubla, *et al.*. Dissemination of time and RF frequency via a stabilized fiber optic link over a distance of 420 km [J]. *Metrologia*, 2013, 50(2): 133–145.
- Lai Xianzhu, Zhang Baofu, Lu Lin, *et al.*. Estimation of transmission delay in the accurate time transfer system based on optical link [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(s2): 170–173.
- 赖先主, 张宝福, 卢麟, 等. 高精度光链路授时时延估算[J]. *光学学报*, 2008, 28(s2): 170–173.
- M Fujieda, M Kumagai, T Gotoh, *et al.*. Ultrastable frequency dissemination via optical fiber at NICT [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, 58(4): 1223–1228.
- Mizuhiko Hosokawa, Motohiro Kumagai, Miho Fujieda, *et al.*. Development of frequency transfer via optical fiber link at NICT [C]. 42nd Annual Precise Time and Time Interval Meeting, 2010. 125–134.
- William H Hatton, Masayuki Nishimura. Temperature dependence of chromatic dispersion in single mode fibers [J]. *J Lightwave Technol*, 1986, 4(10): 1552–1555.

栏目编辑: 王晓琪