

DOI : 10.13875/j.issn.1674-0637.2019-03-0206-08

光纤时间传递的大范围高分辨率 时延控制方法研究

孔维成^{1,2,3}, 陈法喜^{1,2,4}, 赵侃^{1,2}, 邓雪^{1,2,3}, 臧琦^{1,2}, 付桂涛⁵, 刘涛^{1,2}

- (1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600 ;
2. 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 101048 ;
3. 中国科学院 时间频率基准重点实验室, 西安 710600 ;
4. 西安电子科技大学, 西安 710126 ;
5. 北京卫星导航中心, 北京 100094)

摘要 :随着原子钟准确度和稳定度的不断提升,对于时间传递技术的要求越来越高。光纤时间传递以其高精度高稳定性能以及安全、可靠等诸多优势已成为重要的时间传递方式。时延控制单元是光纤时间传递的一个重要环节。光纤时间传递的基本原理是先通过估算或实测等方法获得两地之间的传输时延,然后通过对传输时延进行补偿实现时间的传递同步。通过 FPGA (field-programmable gate array) 和 PLL (phase locked loop) 移相技术的应用实现了一种可用于光纤时间传递的大范围高分辨率时延控制技术,经多次实验证明,所述系统可对大范围的时差值进行有效控制,将实测时差值存在的偏差都控制在 ± 20 ps 以内;并对时延控制模块输出的 1 PPS 信号的实测时差数据进行分析得标准差值为 8.2 ps,时延控制模块输出的 1 PPS 信号的稳定度为 4.33 ps@1 s, 0.94 ps@1 ks。

关键词 :光纤时间传递;时延控制;FPGA;PLL 移相

Study on the time delay control method with large range and high resolution in optical fiber time transfer

KONG Wei-cheng^{1,2,3}, CHEN Fa-xi^{1,2,4}, ZHAO Kan^{1,2}, DENG Xue^{1,2,3},
ZANG Qi^{1,2}, FU Gui-tao⁵, LIU Tao^{1,2}

- (1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
2. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Key Laboratory of Time and Frequency Standards, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
4. Xidian University, Xi'an 710126, China;
5. Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China)

Abstract : With the increasing accuracy and stability of atomic clocks, the requirements for time transfer

收稿日期 : 2019-01-23 ; 接受日期 : 2019-03-28

基金项目 : 国家自然科学基金重大研究计划资助项目 (91636101, 91836301) ; 国家重点研发计划资助项目 (2016YFF0200200) ; 中国科学院战略性先导科技专项 (B 类) 资助项目 (XDB21000000)

作者简介 : 孔维成, 女, 硕士研究生, 主要从事通信与信息系统研究。

technology are getting higher and higher. Optical fiber time transfer has become an important time transfer method due to its high accuracy and high stability, as well as safety, reliability and stability. The delay control unit is an important part of fiber optic time transfer. The basic principle of optical fiber time transmission is to obtain the transmission delay between the two places through estimation or actual measurement, and then realize the synchronization of the transmission of time by compensating for the transmission delay. In this paper, a large-range high-resolution time-delay control technology that can be used for fiber time transfer is realized by the application of FPGA and PLL phase shifting technology. It has been proved by many experiments that the system described in this paper can effectively control a large range of time difference, and control the deviation of measured time difference to within ± 20 ps. The measured time difference data of 1 PPS signal output by the time delay control module was analyzed to obtain a standard deviation of 8.2 ps. The stability of 1 PPS signal output from the delay control module is $4.33 \text{ ps}@1 \text{ s}$, $0.94 \text{ ps}@1 \text{ ks}$.

Key words: optical fiber time transfer; time delay control; field-programmable gate array(FPGA); phase locked loop(PLL) phase shift

0 引言

近年来,新型原子钟技术的发展非常迅速,随着半导体激光技术、电磁囚禁技术、激光冷却和陷俘原子技术、索莫飞秒脉冲激光技术以及相干布居囚禁(CPT)等新技术的发展以及新物理原理的应用,原子钟的稳定度和准确度已达到 10^{-18} 数量级^[1]。时间频率的测量精度是目前所有物理量及物理常数中最高的,高精度时间频率已经成为一个国家科技、经济、军事和社会生活中至关重要的参量,其应用范围从基础研究(物理理论和基本物理常数等),渗透到了工程技术应用领域(信息传递、导航定位、计量测试等),关系到人们生活的方方面面^[2]。目前异地时钟的时间频率传输与同步主要是通过卫星链路来实现的。利用卫星双向时间频率传递(TWSTFT)^[3],卫星共视(CV)^[4]等方法可以实现 $10^{-15}/\text{d}$ 量级的频率传输稳定度以及纳秒量级的时间同步精度。现有的时频传输和同步技术已无法满足高精度原子钟时间频率比对的需求,要发展具有更高精度的时频传输与同步方法^[5]。

光纤链路具有通信容量大、中继距离长、抗干扰能力强、工作性能可靠、温度系数小、损耗低及造价低的特点。基于光纤链路的时频同步技术逐渐发展成为一种新型同步技术,世界各国均已开展对此项技术的研究。目前在光纤时间传递技术领域走在世界前列的主要有美国的 NIST(National Institute of Standards and Technology)^[6-8]、喷气推进实验室(JPL)^[9-11]、国家航空航天局(NASA)^[12-13]和时频中心^[14],各国的研究都取得了长足的进步,时间同步的精度由百皮秒级到几十皮秒级,目前国内对于光纤时间传递的研究,如信息产业部电信研究院于 2006 年基于同步数字体系(synchronous digital hierarchy, SDH)传送网的实验证明,时间同步的准确性优于 $\pm 5 \mu\text{s}$ ^[15-16]、近年来解放军工程大学基于 SPBA 的光纤链路时间传递系统的时间传递稳定度可达到百皮秒甚至几十皮秒量级^[17],本文所采用的时延控制方法最终可根据时延控制量控制输出信号与标准信号之间的偏差都在 ± 20 ps 以内。

当前应用于光纤时间传递的时延控制技术,主要依靠于移相器、可编程延迟线或 FPGA(field-programmable gate array)实现。利用移相器产生稳定的相位差,控制精度极高,可达到皮秒量级,但是该技术可能存在信号间断,且控制范围极窄,一般为 10 ns; 可编程延迟线,虽然分辨率高,但一样难以实现大范围的时延控制,一般仅为几十纳秒以下; 利用 FPGA(现场可编程门阵列)实现相位移动,由于 FPGA 移相的分辨率取决于 FPGA 的时钟频率,极大地限制了其分辨率,但也提高

了控制范围,如 FPGA 的时钟周期为 100 ns,我们可调节的范围即为 100 ns 的正整数倍,小于 100 ns 的部分则无法控制。以上几种方法对于控制范围与控制精度均无法兼顾,本文介绍了一种综合了 FPGA 控制范围宽与移相器控制精度高的优点,基于 FPGA 技术与 PLL (phase locked loop) 移相技术相结合的大范围高分辨率时延控制方法。

一般认为,高精度与大范围是一对难以兼顾的控制量,提升控制精度就意味着牺牲了控制范围,而提升了分辨范围以牺牲控制精度为代价。本文提出一种两全法,先由 FPGA 控制的大范围部分来消除 100 ns 的整数倍误差,小于 100 ns 的部分则由移相器部分调节。误差调节过程分为两步:先将原始误差值送入 FPGA 环节,进行大范围调节得到一个小于 100 ns 的修正误差值,再将修正误差值送入移相器环节,进一步对误差进行高精度修正。

为满足实际工程应用,本文将理论与实际相结合,把系统集成于光纤时间传递板卡与光学板卡上,此系统具有操作简单、体积小、重量轻、造价低等优点,不仅满足了高精度光纤时间传递工程的切实需求,也使得系统的可操作性大大增强。

1 光纤时间传递系统与大范围、高分辨率时延控制方法

时延控制单元是光纤时间传递的一个重要环节。目前基于光纤的时间传递方法可分为单向法传输和双向法传输,但是两者所基于的基本原理是一样的。光纤时间传递的基本原理是先通过估算或实测等方法获得两地之间的传输时延,然后通过对传输时延进行补偿实现时间的传递同步。本文所述光纤时间传递的大范围高分辨率时延控制方法,通过 FPGA 技术和 PLL 移相技术的结合,实现相位时延的粗调和细调,实现大范围高分辨率的时延控制。

1.1 光纤时间传递系统

频率信号在光纤介质中传播一定距离需要一定时间,即延时量 τ :

$$\tau = \frac{nL}{c}, \quad (1)$$

式(1)中, n 为光纤折射率, L 为光纤链路长度, c 为真空中电磁波传播速度。

由于光纤链路长度 L 和光纤折射率 n 随温度的变化,及光纤折射率的波长相关性使得光纤链路的时延随外界环境温度、激光器输出波长的变化而波动,影响光纤时频传递的稳定性^[18]。因此,克服或者补偿时间信号的传输时延以及链路的干扰变化引起的相位抖动是我们实现高精度时间传递的一个重要环节。该系统主要包括光纤链路传输时延测量单元、运算控制单元、光纤链路及其时延控制单元。图 1 为光纤时间传递系统结构示意图。

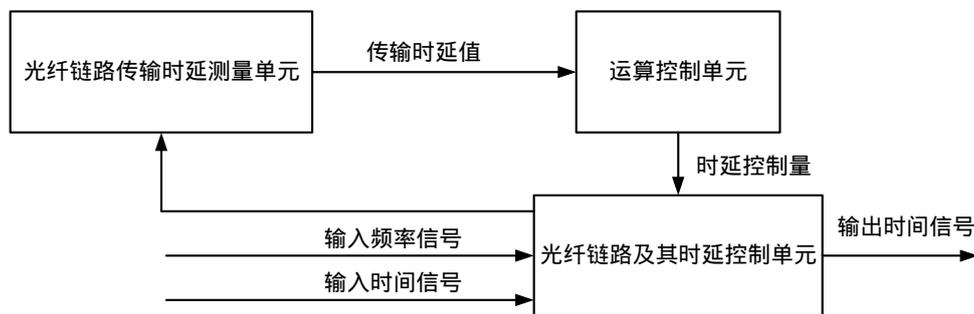


图 1 光纤时间传递系统结构示意图

首先,光纤链路传输时延测量单元主要通过单光纤双向时间传递方式对本地端时间信号与沿着相同链路

从终端返回本地端的时间信号进行实时比对测量，得到光纤链路传输时延值。理想情况下，所得时延量为从本地端与终端单向传输时延 Δt 的 2 倍。其次，将光纤链路传输时延值输入到运算控制单元，运算控制单元计算出可以补偿光纤链路传输时延值的时延控制量。最后，时延控制单元根据时延控制量，对输入的时间信号和频率信号进行时延控制调整，实现输入时间信号与输出时间信号精确同步。为使本地端与终端信号的秒脉冲位置精准同步，一般将本地端信号进行延时。

1.2 时延控制方法

本文通过 FPGA 技术与 PLL 移相技术相结合实现对时间信号时延的大范围高分辨率调节控制。时延控制量 X 由传输时延 Δt 控制。运算控制单元可根据传输时延控制量 X 计算出本文大范围时延控制量 I 以及高精度时延控制量 R ，时延控制单元根据所得的时延控制量，对待时延的时间信号进行时延控制调整，使得终端输出信号与本地端信号精准同步。图 2 为时延控制总体结构示意图。

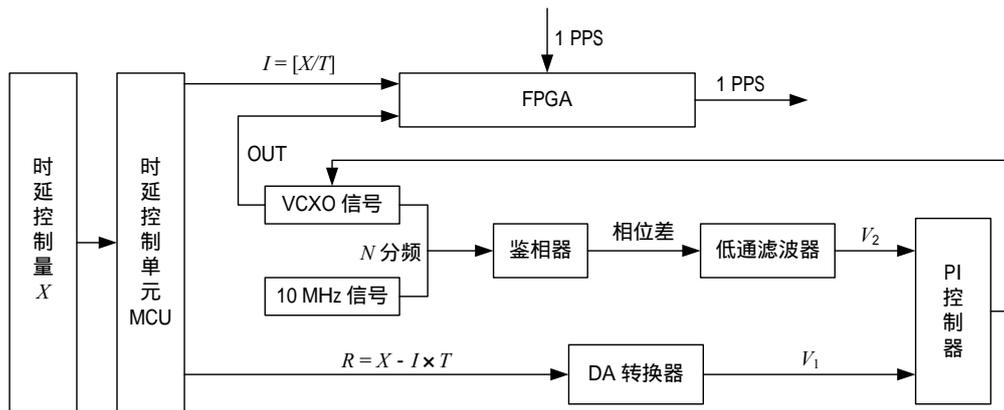


图 2 时延控制总体结构示意图

如图 2 所示，通过时延控制单元 MCU (micro control unit) 对所采集的时延控制量 X 进行处理：

$$I = \left[\frac{X}{T} \right], \quad (2)$$

式 (2) 中， T 为时钟周期， $[\]$ 为取整符号，大范围时延控制量 I (I 为正整数) 被定义为对 X/T 取整。

$$R = X - I \times T, \quad (3)$$

式 (3) 中， R 为高精度时延控制量。

1.2.1 高分辨率时延控制方法

DA 转换器 (digital analog converter) 将小于时钟周期的高精度时延控制量 R 转换为模拟电压 V_1 ， V_1 用于控制 PLL 移相器内部的鉴相电压值 V_2 ，从而完成对 PLL 移相器输出信号相位的控制，实现对时间信号时延的细调。

时钟信号与压控晶振 VCXO (voltage control x-tal [crystal] oscillator) 信号经过 N 分频 (N 为正整数) 同时输入鉴相器，经过鉴相器处理可得到两个输入信号之间的相位差，再使相位差信号经过低通滤波器可得到代表时钟信号与 VCXO 信号相位差的电压值 V_2 。 V_1 与 V_2 同时输入到比例积分 PI (proportional integral) 控制器中，使 PI 控制器的输出控制 VCXO 信号的相位形成锁相环，使得 $V_2 = V_1$ ，从而实现 PLL 移相。图 3 为 PLL 移相器内部结构示意图。

本文需要用 DA 转换输出的模拟电压来控制 PLL 移相器内部的鉴相电压值，故而 DA 转换的精度直接影响到对于小于 100 ns 时延控制的细调分辨率。本文采用 20 位 DA 转换器，且图 3 中 N 取为 4，则时延控制分

分辨率约为 0.4 ps。

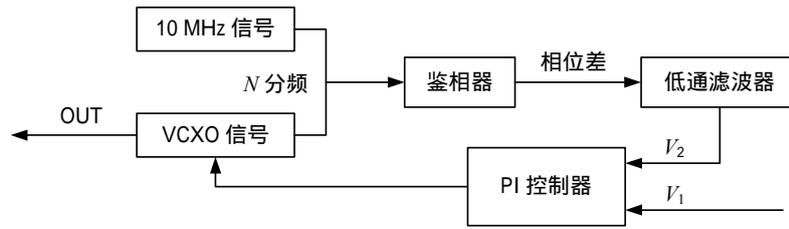


图 3 PLL 移相器内部结构示意图

1.2.2 大范围时延控制方法

通过 FPGA 控制时钟周期整数倍的时延以实现对时间信号时延的粗调。图 4 为 FPGA 的内部结构示意图。如图 4 所示，FPGA 内部计数器模块的 3 个引脚分别为：CLK 时钟信号输入、CLR 清零信号输入、Q 计数器输出。

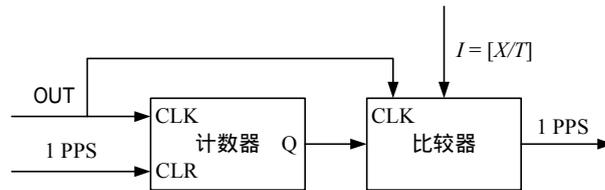


图 4 FPGA 的内部结构示意图

当检测到 1 PPS 的上升沿时，将计数器数值清零，不用考虑 1 PPS 信号的脉冲宽度（脉宽最低为 100 ns）。每当检测到 OUT 信号的一个上升沿即经过输入信号的一个周期 T 时 Q 值加 1，将 Q 值送给比较器，与比较器的另一输入量 I 作比较，当 $Q = I$ 时，输出 1 PPS 信号。图 5 为大范围时延控制方法说明图。

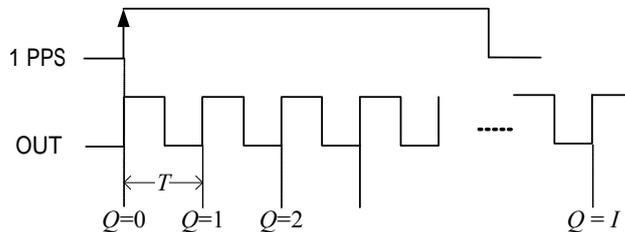


图 5 大范围时延控制方法说明图

由于异步信号的输入及边沿检测的延迟性，实际计算中需要减去由延迟带来的固定时延值，固定时延值可通过仿真及实测等方法得到^[19-20]。

2 实验装置

本文为验证时延控制方法所采用的实验装置结构图如图 6 所示，信号源输出的一路 10 MHz 和 1 PPS 信号输入到时延控制模块中，时延控制模块输出经过时延控制后的 1 PPS 信号，作为时间间隔计数器 SR620 的关门信号。信号源输出另一路的信号 10 MHz 作为时间间隔计数器 SR620 的参考频率信号，输出另一路 1 PPS 信号作为 SR620 的开门信号。通过计算机设定延迟控制量 X ，并采集 SR620 的测量结果数据进行分析。图 7 为实验装置图。

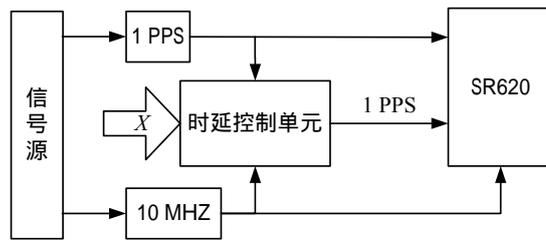


图 6 实验装置结构图

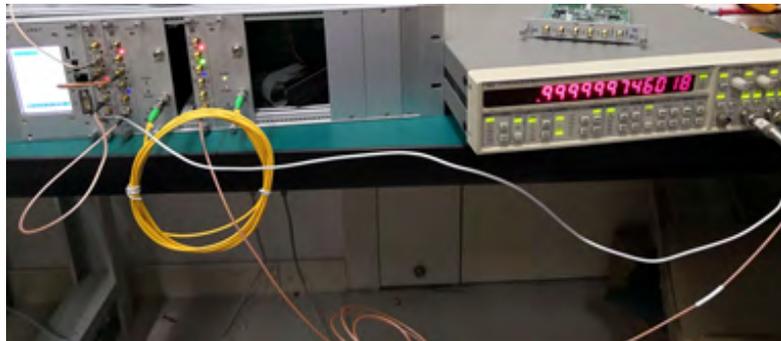


图 7 实验装置图

3 实验及结果分析

实验一，时延控制模块的准确度测试。计算机设定时延控制量，并连续 5 min 采集 SR620 的数据，将测量的平均值记录为实测的时延值；重复上述步骤多次改变设定的时延控制量，采集数据。表 1 为时延控制模块准确实验数据表。

表 1 时延控制模块准确实验数据表 ns

设定时延控制量	实测时差值	时间偏差
0.000	19.831	0.000
1.000	20.845	+0.014
10.048	29.861	-0.018
5 165 7894.341	51 657 914.191	+0.019
304.171	324.014	+0.012

当时延控制量设定为 0.000 ns 时，实验装置存在系统误差 19.831 ns，这个偏差主要由同轴线的时延、芯片传输时延、SR620 测量的系统等因素引入。在扣除这个系统偏差影响后，计算出各个时延设定值下的实测时差值存在的时间偏差都在 ± 20 ps 以内，这个偏差基本上与 SR620 测量非线性引入的偏差相当。理论上时延控制范围为无穷大，本次实验所测定的时延控制量的范围为 51 657 894.341 ns，当设定时延值为 5 165 7894.341 ns 时，时间偏差依然可以控制在 20 ns 以内。

实验证明，基于 FPGA 技术与 PLL 移相技术相结合的时延控制方法不仅可控制大范围时延且精度水平已经远可以满足在目前高精度光纤时间传递系统中的应用，在未来中国科学院国家授时中心正在建设的高精度国家地基授时系统中也将发挥重要作用。

实验二，时延控制模块输出 1 PPS 信号的稳定度。设定时延量为 304.171 ns，采集 24 h 的数据，测得的时差数据图如图 8 所示，对于所测得时延控制模块输出的 1 PPS 信号的实测时差数据进行分析得标准差值为 8.2 ps。

为了进一步分析测量的稳定度，将采集到的时差数据经处理得到的时延控制模块输出的 1 PPS 信号稳定度如图 9 所示，图中所示曲线时间偏差 TDEV (time deviation) 为 4.33 ps@1 s，0.94 ps@1 ks。

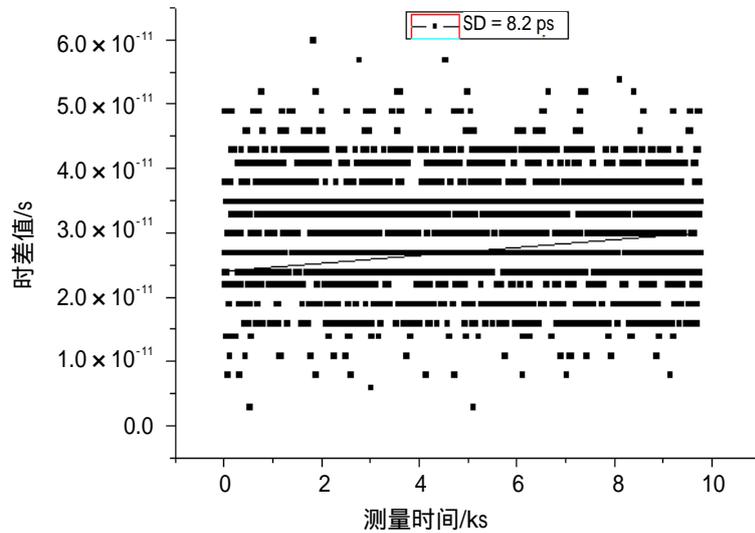


图 8 实测时差数据图

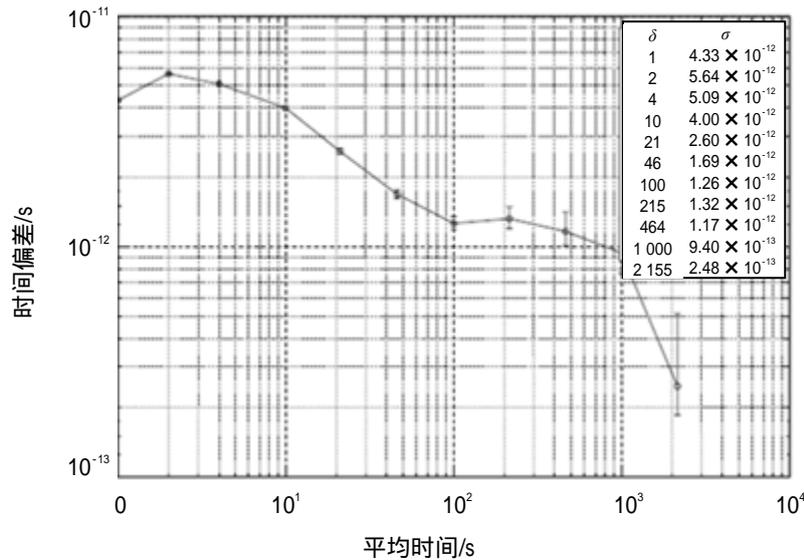


图 9 时延控制模块输出 1 PPS 信号稳定度图

4 结语

本文通过 FPGA 和 PLL 移相技术的应用实现了一种可用于光纤时间传递的大范围高分辨率时延控制技术，经多次实验证明，本文所述系统可对大范围的时差值进行有效控制，将实测时差值存在的偏差都控制在 ± 20 ps 以内，相比于 FPGA 时延技术，控制精度由纳秒量级提升至皮秒量级。时延控制模块输出的 1 PPS 信号的标准差值为 8.2 ps，时延控制模块输出的 1 PPS 信号的稳定度为 4.33 ps@1 s，0.94 ps@1 ks。

光纤时间传递以其较高的精度指标优势，在未来有着重要而广阔的应用前景。本文所介绍的时延控制方法具有大动态范围和高分辨率的特点，已成功应用于光纤时间传递研究与应用领域，为国家授时中心研制的光纤时间传递系统在不同复杂环境条件下实现较高的时间传递指标提供了基础，为十三五国家重大科技基础设施“高精度地基授时系统”提供了支撑。

参考文献：

- [1] 翟造成, 杨佩红. 新型原子钟及其在我国的发展[J]. 激光与电子学进展, 2009, 46(3): 21-31.
- [2] 刘杰. 光纤光学频率传递研究[D]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2015.
- [3] 单晓庆, 杨俊. 卫星驯服时钟系统的新进展[J]. 测试技术学报, 2009, 23(5): 396-401.
- [4] DAVID W A, MARC A W. Accurate time and frequency transfer during common-view of a GPS satellite[C] // 34th Annual Symposium on Frequency Contro, Philadelphia: IEEE, 1980.
- [5] 王力军. 超高精度时间频率同步及其应用[J]. 物理学报, 2014, 43(6): 360-363.
- [6] JEFFERTS S R, WEISS M A, LEVINES J, et al. Two-way time transfer through SDH and SONET systems[C]// European Frequency and Time Forum, York: EFTF 2016 Local, Scientific and Executive Organising Committee, 1996.
- [7] WEISS M A, JEFFERTS S R, LEVINE J, et al. Two-way time and frequency transfer in SONET[C]// Frequency Control Symposium, Hawaii: IEEE, 1996.
- [8] JEFFERTS S R, WEISS M A, LEVINE J, et al. Two-way time and frequency transfer using optical fibers[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1997, 46(2): 209-211.
- [9] PRIMAS L, LUTES G, SYDNOR R. Fiber optic frequency transfer link[C] // Frequency Control Symposium, Baltimore: IEEE 1988.
- [10] LORI E, PRIMAS L, RONALD T, et al. Applications of ultra-stable fiber optic distribution systems[C] // Proceedings of the 43rd Annual Symposium on Frequency Control 1989, Denver: IEEE, 1989.
- [11] LOGAN R T, LUTES G F. High stability microwave fiber optic systems: demonstrations and applications[C] // Frequency Control Symposium, Hershey: IEEE, 1992.
- [12] SATO K, HARA T, KUJI S, et al. Development of an ultras table fiber optic frequency distribution system using an optical delay control module[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2000, 49(1): 19-24.
- [13] HOLMAN K W, JONES D J, HUDSON D D, et al. Precise frequency transfer through a fiber network using 1.5- μ m mode-locked sources[J]. Opt. Lett., 2004, 29(13): 1554-1556.
- [14] EBENHAG S C, HEDEKVIST P O, RIECK C, et al. Evaluation of output phase stability in a giber-optic two-way frequency distribution system[C] // Proceedings of Annual Precise Time & Time Interval Systems & Applications Meeting, 2008.
- [15] 张大元, 谢毅, 孟艾立, 等. 利用光纤数字同步传送网 2.048 Mbit/s 支路传送高精度标准时间信号[J]. 现代电信科技, 2006(12): 17-25.
- [16] 丁小玉, 张宝富, 卢麟, 等. 高精度时间信号的光纤传递[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(11): 1-7.
- [17] 王翔, 卢麟, 王荣, 等. 基于光纤的时间伺服传递距离拓展研究[J]. 光通信技术, 2015, 39(2): 28-30.
- [18] 江少平, 张浩, 姜文宁, 等. 链路实验波动对光纤时间传递稳定性的影响[J]. 激光雨光电子学进展, 2016, 53(4): 1-7.
- [19] 周旭, 陈法喜, 赵侃, 等. 光纤时间传递的时延测量技术研究[J]. 激光与电子学进展, 2018(8): 298-303.
- [20] 陈法喜, 赵侃, 周旭, 等. 长距离多站点高精度光纤时间同步[J]. 物理学报, 2017, 66(20): 200701.