

# 光纤时间传递的时延测量技术

周旭<sup>1,2,3\*\*</sup>, 陈法喜<sup>1,2\*</sup>, 赵侃<sup>1,2</sup>, 刘涛<sup>1,2</sup>, 张首刚<sup>1,2\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院国家授时中心, 陕西 西安 710600;

<sup>2</sup>中国科学院国家授时中心时间频率基准重点实验室, 陕西 西安 710600;

<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 为了满足长距离光纤时间传递的工程要求, 提出了一种基于时间数字转换(TDC)和现场可编程门阵列(FPGA)的时延测量方法。该方法将FPGA测量范围大和TDC分辨率高的特点相结合, 实现了大范围高分辨率的光纤时延测量。研究表明, 该系统的测量范围为0~1 s, 分辨率为22 ps, 不确定度优于100 ps。

**关键词** 测量; 光纤链路; 光纤时间传递; 时延测量

中图分类号 TN929.11

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.081201

## Time-Delay Measurement Techniques for Time Transfer over Optical Fibers

Zhou Xu<sup>1,2,3\*\*</sup>, Chen Faxi<sup>1,2\*</sup>, Zhao Kan<sup>1,2</sup>, Liu Tao<sup>1,2</sup>, Zhang Shougang<sup>1,2\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710600, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Time and Frequency Standards, National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710600, China;

<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** In order to meet the engineering requirements of long haul time transfer over optical fibers, a time-delay measurement method based on the time digital conversion (TDC) and the field programmable gate array (FPGA) is proposed. This method combines the characteristics of a large measurement range for FPGA and a high resolution for TDC, and thus an optical fiber time-delay measurement with a high resolution in a wide range is realized. The research results show that the measurement range of this system is 0-1 s, the resolution is 22 ps, and the uncertainty degree is superior to 100 ps.

**Key words** measurement; fiber-optic link; time transfer over optical fibers; time-delay measurement

**OCIS codes** 120.3930; 060.2360; 120.7000

## 1 引言

随着科学研究的不断深入和现代技术的高速发展, 实现更高精度的时频传递显得尤为重要<sup>[1-3]</sup>。光纤时间传递具有通信容量大、中继距离长、抗干扰能力强<sup>[4]</sup>、工作性能可靠、温度系数小<sup>[5]</sup>、损耗低等优点, 成为高精度时间传递的一种重要手段<sup>[6-17]</sup>。

光纤时间传递的实现方式和技术手段有很多<sup>[6-17]</sup>, 目前常用的方法为单光纤双向时间传递。单光纤双向时间传递是将本地端参考源(铯原子钟、

氢原子钟等高精度钟源)产生的时间秒脉冲信号(1PPS)通过调制后经过光纤链路传递到远程端, 远程端通过解调将接收到的时间信号再次转换成光信号并沿着相同的光纤链路回传。利用时间间隔计数器测量出本地端和远程端两个时间信号的传递时延, 通过对远程端的时间信号进行时延控制, 实现本地端和远程端之间的时间信号传递和时间同步。

时延测量是光纤时间传递的一个重要环节, 通过精确地测量两端的时延并进行合理的时延控制, 进而实现高精度的时间传递。目前光纤时间传递系

收稿日期: 2018-01-15; 修回日期: 2018-02-09; 录用日期: 2018-02-09

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(91636101)、国家重点研发计划(2016YFF0200200)、国家自然科学基金(11273024)

\* E-mail: cfx2006xd@163.com; \*\* E-mail: squirrel\_chow@163.com; \*\*\* E-mail: szhang@ntsc.ac.cn

统中的时间间隔测量普遍采用专用的时间间隔测量设备<sup>[10,15-16]</sup>。在实际工程中,尤其是对于大规模、长距离的光纤时间传递测量,这些设备价格比较昂贵,且携带使用不便。为了满足实际工程的使用,本文提出了一种基于时间数字转换(TDC)和现场可编程门阵列(FPGA)的时延测量方法。该方法将TDC分辨率高和FPGA测量范围大的优点结合起来,可实现大范围、高分辨率的时延测量,同时具有操作简单、体积小、携带简便、成本低等特点,基本满足了光纤时间传递和实际工程应用的需求。

## 2 时延测量原理

时延测量原理如图1所示,该系统主要包括时钟信号处理单元、处理器单元、TDC单元、计数器单元和延时处理单元。时钟信号处理单元将原子钟产生的基准频率信号(一般为10 MHz正弦信号,即图1中的10 M<sub>sin</sub>)整形为有效的方波信号输出,该信号用作整个系统的时钟信号。处理器单元控制整个电路的时序操作,并与各个单元通信,实现对芯片的配置、数据的接收处理及上传。计数器单元用于对本地端的时间信号(1PPS<sub>A</sub>)和远程端传递回来的时间信号(1PPS<sub>B</sub>)进行间隔计数。延时处理单元对时间信号进行延时,以满足TDC的测量范围。TDC单元主要是时间数字转换芯片的相关电路,实现对处理后的两个信号进行测量。

系统的测量时序图如图2所示,本地端的时间信号1PPS<sub>A</sub>和远程端的时间信号1PPS<sub>B</sub>之间的时间间隔为 $\Delta t$ ,该时间间隔 $\Delta t$ 是实际的传输时延的两倍,为了方便叙述,直接采用 $\Delta t$ 进行计算。首

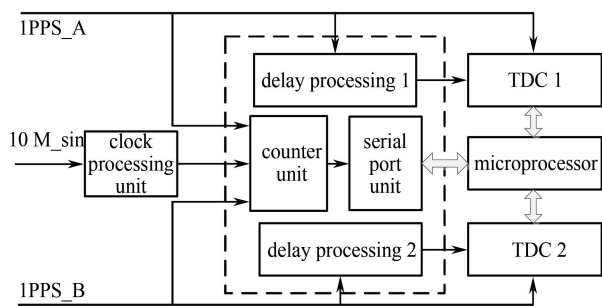


图1 时延测量原理示意图

Fig. 1 Schematic of time-delay measurement

先利用FPGA中的计数器单元对这两个信号进行计数,由于FPGA的计数值受限于FPGA的时钟周期 $T_{CLK}$ ,故计数器单元得到的计数值为

$$N = [\Delta t / T_{CLK}], \quad (1)$$

式中 $[\cdot]$ 为取整运算。为满足TDC单元的测量范围(500 ns~4 ms),需要对1PPS<sub>A</sub>和1PPS<sub>B</sub>进行延时。将1PPS<sub>A</sub>的上升沿用作触发开关信号,触发延时处理单元1获得时延信号1PPS<sub>A1</sub>,延时时间为 $T_1$ ( $T_1 > 500$  ns),通过TDC 1对延时处理后的1PPS<sub>A1</sub>和1PPS<sub>A</sub>进行时间间隔测量,设该时间间隔为 $t_1$ 。同理对1PPS<sub>B</sub>进行延时,延时时间为 $T_2$ ( $T_2 > 500$  ns)得到1PPS<sub>B1</sub>,由TDC 2对1PPS<sub>B</sub>和1PPS<sub>B1</sub>的时间间隔进行测量,设该时间间隔为 $t_2$ 。由此计算出光纤时间传递的时延值为

$$\Delta t = (t_1 - T_1) + N \times T_{CLK} - (t_2 - T_2). \quad (2)$$

在实际系统中,为了减少FPGA中延时处理带来的误差,将 $T_1$ 和 $T_2$ 设定为相同的值,此时有

$$\Delta t = N \times T_{CLK} + t_1 - t_2. \quad (3)$$

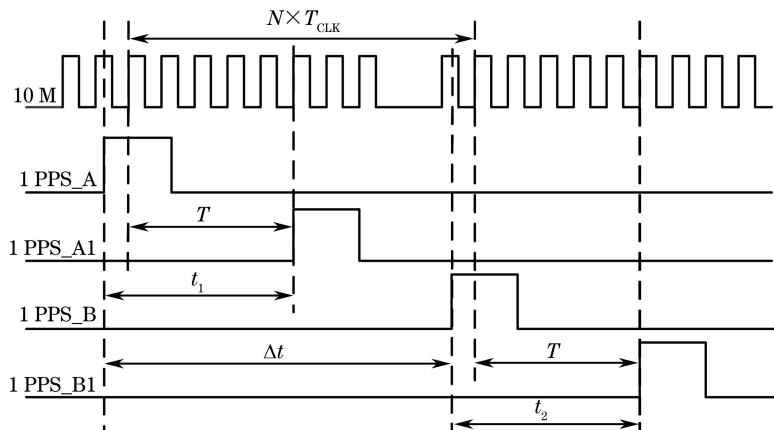


图2 时延测量系统的测量时序

Fig. 2 Time series of time-delay measurement system

### 3 主要电路设计

#### 3.1 电源和时钟单元

电源部分是整个系统正常工作的关键,目前常用的电源有两种,开关电源和线性稳压电源。这两种电源为单一电源,区别为前者效率高但纹波较大,后者效率低而纹波小。由于系统存在多种电源需求,单一的电源供电无法满足整个系统的工作要求,此外系统中的模拟电路对电源的纹波要求比较高,为实现高效率、低纹波、多电源供电,系统采用开关电源+线性低压差电源芯片作为该系统的供电部分。

采用商用开关电源供电,将 220 V 市电转化为 5 V 电源供给整个电源系统,利用电容和磁珠滤波获得纹波较小的 5 V 电源,为系统中的放大器等芯片供电。利用 10  $\mu\text{F}$  钽电解电容和 0.01  $\mu\text{F}$  的小电容进行滤波。

时钟单元用来控制系统的时序。为了匹配不同的时钟输入,在系统中分别设计了方波输入接口和正弦波输入接口。当接入的频率源为正弦波时,如原子钟提供的双极性正弦波,时钟处理单元中的高速比较器将此正弦波和基准电压进行比较,得到电平可用、边沿陡峭的方波。同时为了满足高速比较器的输入要求,在高速比较器的两个输入端设置了偏置电压,调节偏置电压,即可得到合适的方波信号。

#### 3.2 FPGA 单元

FPGA 芯片采用美国 Altera 公司的 Cyclone 系列 EP1C3T100C8,包括计数器单元、延时处理单元

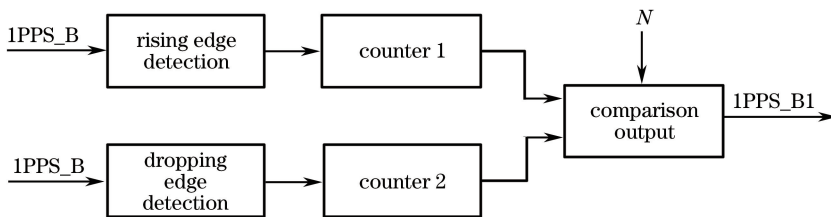


图 3 延时处理模块原理

Fig. 3 Principle of delay processing module

#### 3.3 TDC 单元

TDC 单元采用时间-数字转换芯片 TDC<sub>GP22</sub>。该芯片提供两种测量模式,测量模式 1 可实现 90 ps 的分辨率和 0~2.4  $\mu\text{s}$  的测量范围,测量模式 2 可实现 22 ps 的分辨率和 500 ns~4 ms 的测量范围。为了提高测量的分辨率,选择 TDC 芯片的测量模式 2。这里采用两片 TDC<sub>GP22</sub> 分别测量

和串口通信单元三部分。计数器单元主要由信号边沿检测模块和计数模块组成,1PPS<sub>A</sub> 信号的上升沿作为计数器的开门信号,1PPS<sub>B</sub> 的上升沿作为计数器的关门信号,以此实现对两个信号时间间隔的测量计数。串口单元采用标准串口协议进行通信,将计数器单元中的数据传递给处理器进行处理。为了满足通信对不同波特率的要求,设计了波特率选择功能,可实现常用的 2400,9600,115200 等波特率。同时,分别利用 16 个 0.01  $\mu\text{F}$  和 8 个 0.01  $\mu\text{F}$  陶瓷电容对 FPGA 的 3.3 V 和 1.5 V 供电引脚进行滤波,使 FPGA 具有稳定的工作电压。

延时处理单元原理如图 3 所示。以 1PPS<sub>B</sub> 为例,当延时处理单元接收到 1PPS<sub>B</sub> 信号后,首先对输入信号进行上升沿检测,检测到上升沿时输出一个高脉冲,此高脉冲作为起始信号,计数器 1 清零并开始计数。当计数器 1 的计数值等于设定的整数时延  $N$  时,1PPS<sub>B1</sub> 输出为高电平;对输入信号进行下降沿检测,检测到下降沿时输出一个高脉冲,此高脉冲作为起始信号,计数器 2 清零并开始计数。当计数器 2 的计数值等于设定的整数时延  $N$  时,1PPS<sub>B1</sub> 输出为低电平。该系统中采用的时钟为 10 MHz,故时延的最小值(分辨率)为 100 ns,设定值为  $N$ ,可实现  $100N$  ns 的时延。该方案采用两个计数器分别对上升沿和下降沿进行计数,可以避免两个边沿高脉冲信号之间形成干扰,同时不用考虑 1PPS 信号的脉冲宽度(脉宽最低为 100 ns)。值得注意的是,由于异步信号的输入及边沿检测的延迟性,在实际计算中需要减去由延迟带来的固定时延值,该固定时延值可通过仿真及实测等方法得到。

两地 1PPS 信号和延时信号的时间间隔,两个芯片的相关配置相同。

TDC 芯片以电源单元输出的 3.3 V 作为供电电源,对其核心电压(VCC)和 IO 电压(VIO)引脚供电。为了抑制电源的纹波,在芯片的电源引脚处放置 47  $\mu\text{F}$  的极性电容和 100 nf 的陶瓷电容作为滤波电容,并放置 10  $\Omega$  的电阻隔离两个电压,以减小

电压的相互影响。以 4 MHz 高速时钟作为 TDC-GP22 的时钟信号,并利用精确的 32.768 kHz 时钟作为基准时钟,对 4 MHz 高速时钟进行校准,该校准值用来修正最终的计算结果。在设计中,为了使晶振能够正常起振,利用 560 k $\Omega$  和 1 M $\Omega$  的电阻作为匹配电阻,10 pF 的电容作为起振电容。接口部分为常用的串行外设(SPI)接口,通过该接口可实现对芯片的配置及数据的读取。

在芯片上电后首先对芯片进行初始化操作,并对芯片内部的寄存器进行配置。配置完后,测试芯片以及单片机和芯片的通信是否正常。通信正常后需要进行一次校准测量,随后开始时间间隔的测量。测量完成后通过 SPI 接口读取 TDC 芯片的测量结果  $R$ ,测量结果为 32 位数据,包含 16 位整数和 16 位小数。TDC 测量的时间间隔  $T_{\text{test}}$  为

$$T_{\text{test}} = (R/2^{16}) \times 250. \quad (4)$$

## 4 测试与结果

### 4.1 测试方案及结果

为了测试系统性能,以 10 MHz 的商用铯原子钟作为基准频率源,为时延测量系统和时间间隔计数器 SR620 提供时钟源,同时用分频移相器产生两路具有一定时间间隔的时间信号 1PPS,这两路信号分别输入到时间延迟测量单元和时间间隔计数器 SR620 中进行测试,测试结果传输到上位机中进行数据采集处理。测试原理图如图 4 所示。

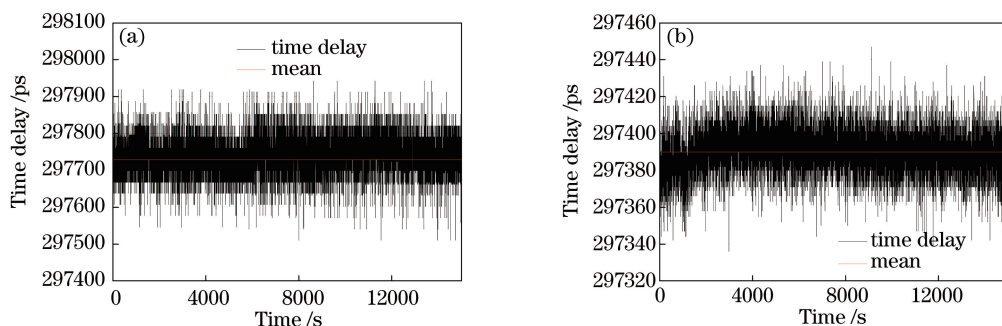


图 5 测试数据。(a)时延测量模块;(b)时间间隔计数器

Fig. 5 Test data. (a) Time-delay measurement module; (b) time interval counter

### 4.2 测量不确定度分析

时延测量的不确定度影响因素主要有:测量的分辨率导致的不确定度  $u_1$  和测量重复性引起的不确定度  $u_2$ 。下面对这两个主要因素引起的不确定度进行分析。

1) 测量芯片的分辨率引入的不确定度主要来

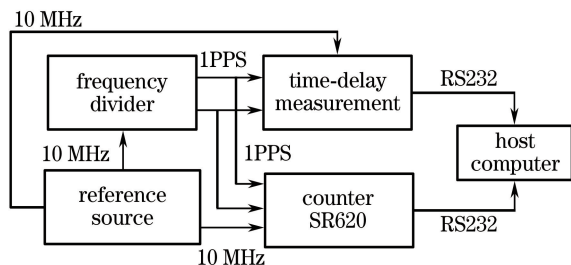


图 4 时延测量模块的测试原理图

Fig. 4 Schematic of testing principle of time-delay measurement module

通过对基准源进行分频移相,产生两个时间间隔约为 300 ns 的时间信号 1PPS,输入至 SR620 和时延测量系统进行测试。测试数据如图 5 所示,其中图 5(a)为时延测量系统的实验数据图,图 5(b)为时间间隔计数器 SR620 的测试数据图。

由测试数据可以看出,时延测量系统的平均值为 297720 ps,SR620 测试的平均值为 297390 ps,两者相差 0.3 ns;时延测量系统的标准差为 54 ps,SR620 的标准差为 12 ps,两者相差 42 ps。为了进一步分析测量的稳定度,图 6 为时延测量系统和时间间隔计数器 SR620 测试相同时间间隔的时间稳定度。其中红色曲线为时延测量系统测量的 1PPS 的稳定度曲线,平均时间为 1 s 时的稳定度为 53 ps,平均时间为 2000 s 时的稳定度为 7.3 ps。黑色曲线为时间间隔计数器 SR620 测量的 1PPS 的稳定度曲线,平均时间为 1 s 时的稳定度为 11 ps,平均时间为 2000 s 时的稳定度为 1.2 ps。

自于 TDC 芯片。根据芯片数据手册可知,TDC 工作在测量模式 2 下的分辨率为 22 ps,假设其服从均匀分布,得到此时的不确定度为  $u_1 = 12.7$  ps。

2) 测量系统的重复性引入的不确定度一般采用测量数据的标准差表示。由图 5(a)可知,重复性引起的不确定度为  $u_2 = 54$  ps。

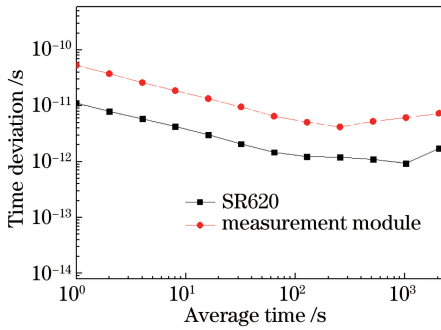


图6 时延测量模块和SR620测试1PPS的稳定度

Fig. 6 Stability of 1PPS by time-delay measurement module and SR620

3) 不确定度合成  $u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 55$  ps.

经过实验测量及结果分析可知,该系统的测量范围为0~1 s,分辨率为22 ps,不确定度为55 ps,同时该系统具有操作简单、体积小、携带简便、成本低等特点,基本满足了光纤时间传递和实际工程应用的需求。

## 5 结 论

对光纤时延测量技术进行了研究,提出了一种体积小,价格便宜,可应用于工程的光纤时延测量技术。该系统的分辨率(22 ps)与时间间隔计数器SR620的分辨率(25 ps)相当,但受TDC单元中TDC芯片自身的不稳定性及外部电磁干扰的影响,系统的稳定度较SR620存在一定差距。下一步将针对这些问题进行系统优化,在现有的基础上开展光纤时间传递中时延控制技术的研究。

## 参 考 文 献

- [1] Wang L J. High precision synchronization of time and frequency and its applications[J]. *Physics*, 2014, 43(6): 360-363.  
王力军. 超高精度时间频率同步及其应用[J]. *物理*, 2014, 43(6): 360-363.
- [2] Zang Q, Deng X, Cao Q, *et al.* Ultra-stable optical frequency signal transfer in 210 km urban communication link[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7): 0706004.  
臧琦, 邓雪, 曹群, 等. 基于210 km实地通信链路的高稳定性光学频率信号传递[J]. *光学学报*, 2017, 37(7): 0706004.
- [3] Cao Q, Deng X, Zang Q, *et al.* Two-way optical phase comparison method based on local measurement[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(5): 0504004.  
曹群, 邓雪, 臧琦, 等. 基于本地测量的双向光学相

位比对方法[J]. *中国激光*, 2017, 44(5): 0504004.

- [4] 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.
- [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] Predehl K, Grosche G, Raupach S M F, *et al.* A 920-kilometer optical fiber link for frequency metrology at the 19th decimal place[J]. *Science*, 2012, 336(6080): 441-444.
- [7] Lopez O, Amy-Klein A, Daussy C, *et al.* 86-km optical link with a resolution of  $2 \times 10^{-18}$  for RF frequency transfer[J]. *The European Physical Journal D*, 2008, 48(1): 35-41.
- [8] Wang B, Gao C, Chen W L, *et al.* Precise and continuous time and frequency synchronization at the  $5 \times 10^{-19}$  accuracy level[J]. *Scientific Reports*, 2012, 2: 1-4.
- [9] Gao C, Wang B, Chen W L, *et al.* Fiber based multiple access ultrastable frequency dissemination[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(22): 4690-4692.
- [10] Zhang H, Wu G L, Hu L, *et al.* High-precision time transfer over 2000-km fiber link[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(6): 7600208.
- [11] Zhang J, Zhou D M. Research on two-way transfer with single wavelength single fiber[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2014(10): 1968-1976.  
张杰, 周栋明. 单波长单光纤时间双向传递的研究[J]. *光电子 • 激光*, 2014(10): 1968-1976.
- [12] Hua Y, Gui Y Z, Yang F, *et al.* Analysis of repeater for time and frequency dissemination via optical fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(9): 0905002.  
华芸, 桂有珍, 杨飞, 等. 光纤时频传递系统的中继技术分析[J]. *中国激光*, 2012, 39(9): 0905002.
- [13] 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.
- [14] Liu T, Liu J, Deng X, *et al.* Study on time-frequency signal transferring through optical fiber link[J]. Journal of Time and Frequency, 2016, 34(3): 207-215.  
刘涛, 刘杰, 邓雪, 等. 光纤时间频率信号研究[J]. 时间频率学报, 2016, 34(3): 207-215.
- [15] Wang L D, Wu G L, Shen J G, *et al.* Simultaneous transfer of time and frequency over 100 km fiber link[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0406004.  
王灵东, 吴龟灵, 沈建国, 等. 基于 100 km 光纤链路的时间和频率同时传递[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0406004.
- [16] 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.
- [17] Liu Q, Chen W, Xu D, *et al.* Simultaneous frequency transfer and time synchronization over a cascaded fiber link of 230 km[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(3): 0305006.  
刘琴, 陈炜, 徐丹, 等. 采用级联方式在 230 km 光纤链路中同时实现频率传递和时间同步[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0305006.