

文章编号: 0253-2239(2010)03-0671-05

# 光纤时间频率传输的时延抖动主动补偿

张帆<sup>1</sup> 侯冬<sup>2</sup> 郭海鹏<sup>2</sup> 赵建业<sup>2</sup> 张志刚<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 北京大学信息科学技术学院量子信息与测量实验室, 北京 100871)  
(<sup>2</sup> 北京大学信息科学技术学院电路与系统实验, 北京 100871)

**摘要** 介绍了使用飞秒锁模激光实现稳定的时间频率传输的实验进展。采用 1.2 km 通信光纤传输 89.7 MHz 飞秒激光脉冲,同时其中插入一个主动延迟线,通过比较光纤返回的脉冲信号与激光器本地信号的第 10 次谐波的相位,将 180 ps 的时延补偿到了 36 ps,证明了此方法在光纤传输时频信号的有效性。理论上本系统的延迟时间测量分辨率应为 10 fs,由于噪声的原因,实际分辨率有所降低。进一步的工作正在进行,以提高信噪比和系统的稳定性。

**关键词** 时延抖动补偿;授时;光纤;飞秒激光;重复频率;传输

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103003.0671

## Timing Delay Jitter Compensation of a Fiber Link with Active Delay Compensation

Zhang Fan<sup>1</sup> Hou Dong<sup>2</sup> Guo Haipeng<sup>2</sup> Zhao Jianye<sup>2</sup> Zhang Zhigang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Quantum Information and Measurement Laboratory, School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China  
<sup>2</sup>Circuits and System Laboratory, School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China

**Abstract** We report the experimental progress of the timing distribution system with a femtosecond laser. For the pulses at repetition rate of 89.7 MHz from a femtosecond fiber laser as the timing signal, and with an active variable timing delay line, we reduced the timing delay from 180 ps to 36 ps, by comparing the phase of the 10<sup>th</sup> harmonic repetition rate of the fiber laser with the feedbacked pulse signal. The results proved the technique to be effective for delay compensation in a timing distribution system. The theoretical prediction of the resolution of the system should be in the order of 10 fs. The noise makes the actual resolution greater than 10 fs. Further experiment is going on to improve signal-to-noise ratio and the system stability.

**Key words** timing delay jitter compensation; timing distribution; fiber; femtosecond laser; repetition rate; transfer

## 1 引言

随着科学研究和国民经济的需求和发展,高精度时间频率标准传输成了亟待解决的问题并成为了国内外广泛研究的课题<sup>[1~16]</sup>,而由于通讯光纤链路已经大范围存在等原因,基于光纤的高精度频率标准传输的研究在国内外得到迅速发展。目前国内主要采用电缆或光纤传输射频(RF)调制信号的方法,这类方法由于其传输信号频谱成分较单一而在应用中存在一定的局限性,主要体现在两个方面:1)高精

度的时延抖动补偿要求较高的频率,而较长环路(如 100 km)的低频时延抖动较大,适于采用较低频率的信号来进行较大动态范围的补偿,因此 RF 较单一的频谱很难同时满足这两个要求;2)传输 RF 调制信号采用的补偿方式较单一,在时延抖动补偿的精度方面不如飞秒激光。飞秒锁模激光拥有较宽的频谱,高频、低频的谐波分量可同时满足时延抖动补偿大动态范围和高精度的要求,且补偿方式不仅可采用传统电学方法,还可辅以平衡式光学互相关

收稿日期: 2009-03-17; 收到修改稿日期: 2009-05-21

作者简介: 张帆(1983—),男,硕士研究生,主要从事光纤授时和飞秒激光系统等方面的研究。

E-mail: plutowilliam@hotmail.com

导师简介: 张志刚(1955—),男,教授,博士生导师,主要从事飞秒固体和光纤激光器、光学频率标准、激光相位控制和相干合成、飞秒时钟传递等方面的研究。E-mail: zhgzhang@pku.edu.cn

法<sup>[17,18]</sup>以提高补偿精度。基于上述理由,北京大学采用 89.7 MHz 重复频率的飞秒锁模激光来进行时间频率的传输及时延抖动补偿。

## 2 脉冲激光时延抖动补偿

### 2.1 理论分析

根据光纤理论可知,外界干扰如温度和震动等对光纤链路的影响表现为光纤物理长度和折射率的变化,而这两个因素综合起来体现为光程的变化为

$$\Delta L = \Delta n \cdot l + n \cdot \Delta l, \quad (1)$$

式中  $\Delta L$  是总的光程变化, $l, n$  分别为光纤长度和光纤折射率, $\Delta l, \Delta n$  分别为光纤长度和折射率的相应变化。

光程的变化将引起光信号相位的变化,从而造成相位的时延抖动。时延抖动按其频率特性可分为千赫兹量级的高频部分与赫兹量级的低频部分,其中高频部分主要是由于物理振动导致,低频部分主要是由于环境温度的变化导致,较长光纤链路中低频部分对应的光程变化对时延抖动影响较大。本阶

段实验模拟低频部分的时延抖动并进行了补偿。

本实验中采用 1.2 km 通信光纤作为光链路,89.7 MHz 重复频率的飞秒锁模激光作为光源,通过探测本地参考信号与经过光链路的回路信号谐波相位差的变化对环路时延抖动进行补偿。为排除光源频率抖动的因素,将锁模激光分光后分两路进行传输:一路直接在本地作为参考信号;另一路经过 1.2 km 光纤环路后绕回本地作为远端回路信号。两路光信号的相差包含了光纤环路的时延抖动信息。当外界温度、压力变化造成环路光程变化时,两路光的相差也随之发生改变,相差的改变量直接反映出环路的时延抖动。

考察两路锁模激光的某一谐波分量,其是同频正弦型信号,分别设经过光纤环路和本地的谐波信号为  $V_1(t)$  与  $V_2(t)$ ,它们可以表述为

$$\begin{cases} V_1(t) = A_1 \sin[\omega t + \phi_1(t)], \\ V_2(t) = A_2 \sin[\omega t + \phi_2(t)], \end{cases} \quad (2)$$

两路信号相乘后,得到

$$\begin{aligned} V_d &= AA_1 A_2 \sin[\omega t + \phi_1(t)] \cdot \sin[\omega t + \phi_2(t)] = -\frac{1}{2} AA_1 A_2 \\ &\{ \cos[2\omega t + \phi_1(t) + \phi_2(t)] - \cos[\phi_1(t) - \phi_2(t)] \} = A_d \{ \cos[2\omega t + \phi_1(t) + \phi_2(t)] - \cos[\Delta\phi(t)] \}, \quad (3) \end{aligned}$$

式中  $\Delta\phi(t) = \phi_1(t) - \phi_2(t)$ 。可以看出,相乘后的信号是在频域上相互分离的两项,其中  $\cos[2\omega t + \phi_1(t) + \phi_2(t)]$  为高频部分,而另一项  $\cos[\phi_1(t) - \phi_2(t)] = \cos[\Delta\phi(t)]$  为低频部分, $\Delta\phi(t)$  即为两路信号的相位差。当环路光程不发生变化时, $\phi_1(t)$  与  $\phi_2(t)$  均为常量, $\Delta\phi(t)$  亦为常量,由环路参数和初始条件决定。当光程改变时,光程的变化导致  $\phi_1(t)$  变化,此时  $\Delta\phi(t)$  即为环路的时延抖动。

### 2.2 实验方案

本文的实验方案采用飞秒锁模激光作为光源,飞秒锁模激光在时域上是周期窄脉冲串,由信号系统知识可知,其在频域上也体现为周期窄脉冲串,频域上各脉冲间隔是其重复频率。以重复频率为 89.7 MHz 的飞秒锁模激光为例,其在频域上即为以 100 MHz 为起点的周期脉冲串,频域上各脉冲的中心频率依次为 89.7, 179.4 和 269.1 MHz 等。本文中称中心频率为重复频率的频率分量为基频,以上依次为 2 次谐波、3 次谐波等。实验中使用 89.7 MHz 重复频率的飞秒锁模激光作为光源,脉冲重复频率在频域宽度是 10 kHz 量级;而周期在 89.7 MHz,因此可近似认为其各频域分量为单频信号。光源的 10 次谐波

897 MHz 与通用 GSM 手机中带滤波器的中心频率相同,可方便将其滤出。实验中通过操作 5 cm 空间平移台模拟长距离光纤环路的低频时延抖动,采用计算机控制光纤延迟线对时延抖动进行补偿。

如图 1 所示,将出射的锁模激光分为两路,分别作为本地参考信号和远端回路信号,这两路信号相差  $\Delta\phi(t)$  的变化即为环路的时延抖动。本地参考信号直接通过光电二极管转换为电信号,经中心频率为 897 MHz 的带通滤波器取出其 10 次谐波,放大后进入模拟乘法器。远端回路信号依次经过空间平移台、光纤延迟线后传入 1.2 km 通信光纤,再经过光电二极管转换为电信号,经带通滤波器滤出其 10 次谐波,放大后进入模拟乘法器与本地参考信号做乘法运算。由(3)式可知,乘积信号即为  $A_d \cdot \{ \cos[2\omega t + \phi_1(t) + \phi_2(t)] - \cos[\Delta\phi(t)] \}$ 。调节功率分配器使得两路谐波信号幅度大致相等,此时将乘积信号通过低通滤波器即可得到  $A_d \cdot \cos[\Delta\phi(t)]$ ,放大后送入 16 位数据采集卡并输入计算机,计算机记录下初始相差  $\Delta\phi(t_0)$ 。

当移动空间平移台或其他环境因素使远端回路的光程发生变化时, $\Delta\phi(t)$  随之发生变化,计算机计

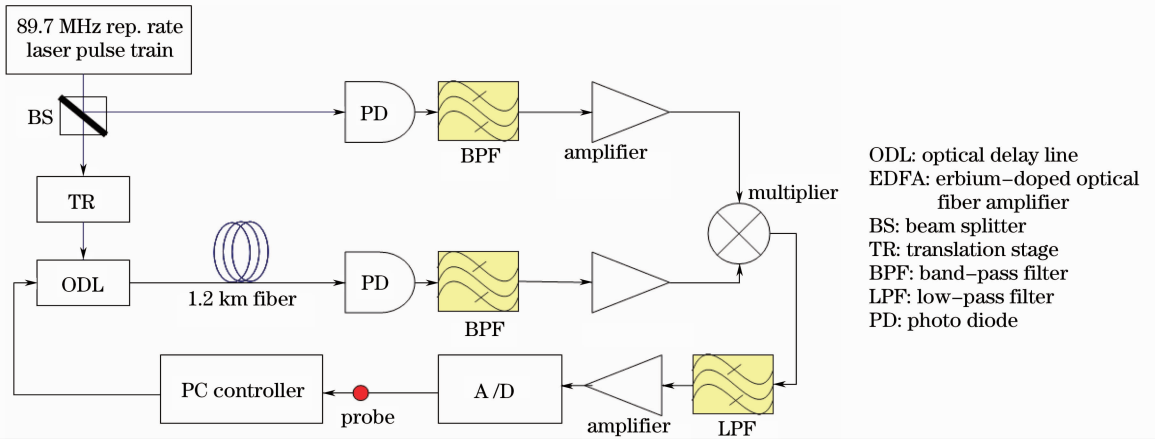


图 1 时延抖动补偿原理图

Fig. 1 Principle of timing delay jitter compensation system

算出相差变化量  $\Delta\phi(t) - \Delta\phi(t_0)$  并将其换算为以皮秒为单位的数字信号驱动光纤延迟线,对环路的时延抖动做出补偿。

### 3 实验结果

实验中采用实验室内移动空间平移台的方法,在约 25 s 内手动移动空间平移台约 5 cm 距离,模拟  $\Delta t$  约为 180 ps 的时延抖动,分别记录无补偿和有补偿两种情况下环路中测试点的数据。测试点如图 1 中所示,由(3)式可知,测试点信号为  $\cos[\phi_1(t) - \phi_2(t)] =$

$\cos[\Delta\phi(t)]$ , 180 ps 的时延抖动引起的相位变化  $\Delta\phi$  约为  $0.32\pi$ 。

无补偿情况下,测试点记录数据如图 2 所示。在 180 ps 时延抖动过程中引起的约  $0.32\pi$  的相位变化完全反映在测试点,测试点电压信号从 2.39 V 变化到 2.37 V,即导致电压变化 0.02V。开启补偿电路,同样手动移动空间平移台模拟光程变化,如图 3 所示,在 180 ps 时延抖动过程中测试点电压信号始终维持在 2.392~2.388 V,变化的峰-峰值在 0.004 V,即相位变化小于  $0.064\pi$ ,时延变化减低到 36 ps。

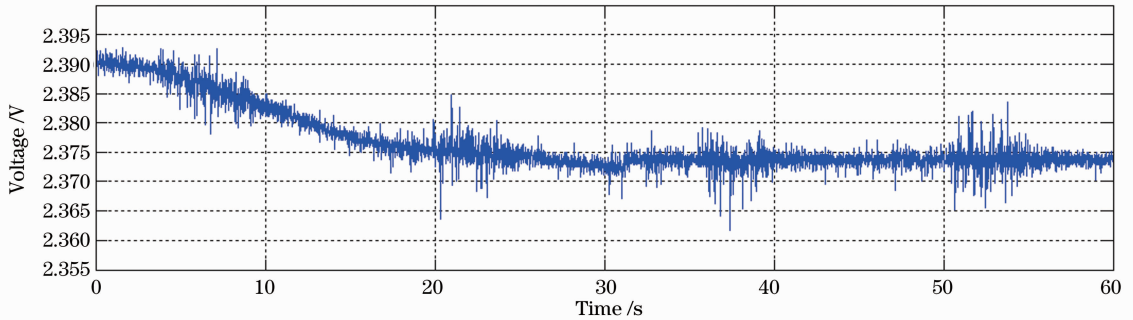


图 2 无补偿情况下模拟 180 ps 时延时测的相位差导致的电压差

Fig. 2 Measured voltage difference induced by phase difference for 180 ps timing delay without active compensation

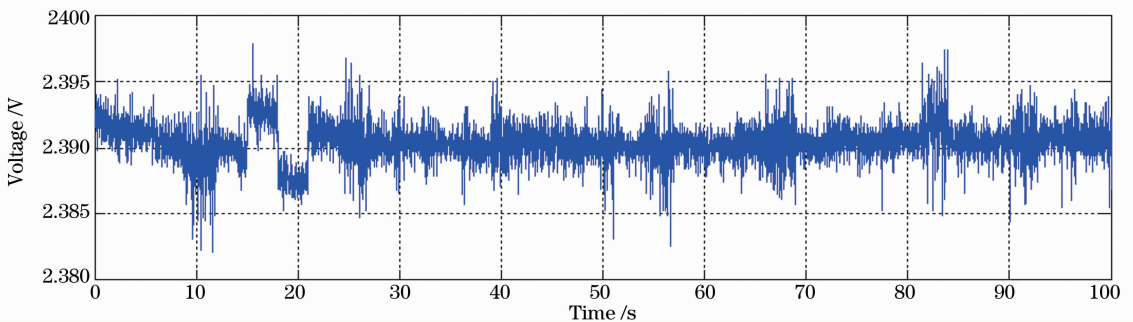


图 3 有补偿情况下模拟 180 ps 时延时测的相位差导致的电压差

Fig. 3 Measured voltage difference induced by phase difference for 180 ps timing delay with active compensation

## 4 实验结果分析

### 4.1 影响时延抖动的分辨率的因素

本次实验采用的方法是计算两路锁模激光 10 次谐波的相差,以此作为时延抖动的补偿信号。谐波频率  $f$  与采样位数  $N$  一起决定了时延抖动分辨率的极限。本次试验中,锁模激光的重复频率为 89.7 MHz,其 10 次谐波频率  $f$  为 897 MHz,周期  $T$  为 1.1148 ns,而半周期为 0.557 ns。采用 16 位 A/D 进行采样后,理论上分辨率可以达到

$$\frac{1/2 \cdot T_{10}}{2^N} = \frac{1/2 \times 1.1148 \text{ ns}}{2^{16}} \approx 8.5 \text{ fs},$$

即 10 fs 量级。通过进一步提高频率,即选取更高次的谐波分量或提高锁模激光的重复频率可进一步提高分辨率。

然而由于信噪比较低等原因,本次实验中的分辨率远远达不到 10 fs 水平。造成信噪比较低的原因主要是锁模激光高次谐波功率较低和高频电路系统的噪声问题。首先,高频高 Q 值的带通滤波器制作难度较大,故本次实验中采用了 89.7 MHz 重复频率锁模激光的 10 次谐波,以利用通用 GSM 手机终端的带通滤波器。但采用高次谐波的问题有两个:1)长距离传输时高次谐波衰减较大;2)锁模激光功率主要集中于基频,2 次和 3 次谐波,高次谐波功率较小,功率利用率低下。总功率约 20 mW 的锁模激光经光电管和滤波器后提取的 10 次谐波分量幅度仅为 10~20 mV,此时电源噪声与环境的干扰使得严重信噪比严重下降。

制作更高重复频率的激光器可从根本上提高有用信号幅度,大大改善信噪比问题。使用基频或低次谐波进行时延抖动补偿,以提高有用光信号功率占锁模激光总功率的比例。同时更高的重复频率也大幅降低了带通滤波器的设计制作难度。

### 4.2 相位补偿与时延抖动补偿

本实验所述系统是根据本地参考信号和远端回路信号的相位差  $\Delta\phi(t)$  来对环路的时延抖动进行补偿,然而由于所探测的函数为余弦函数,其周期性会导致在实际应用中  $\Delta\phi(t)$  与  $\Delta\phi(t) + 2N\pi$  (其中  $N$  为正整数) 无法区分。现就此问题做两点简要说明:

首先,光纤的时延抖动由光纤光程变化导致,而光纤光程(折射率、光纤长度)的变化诱因是温度、振动等,且光程是温度和振动的连续函数,因此不会出现相位跳变的情况。

其次,即使实际应用中光纤环路的相位出现跳变,则通过增加不同中心频率带通滤波器(即采用多

个谐波分量计算光程变化)的方式将系统进行扩展后即可解决该问题。锁模激光不同的谐波分量拥有不同的波长,因而相同的光程变化对不同谐波分量产生的相位变化不同,据此即可准确计算出光程变化数值。例如,若同时将脉冲信号的 5 次和 10 次谐波滤出,设在时刻  $t$  环路发生光程跳变,跳变量为 10 次谐波波长的 1.5 倍,则在  $t_-$  所探测到 5 次和 10 次谐波分量对应的相位差值分别为  $\Delta\phi_5(t_-)$  和  $\Delta\phi_{10}(t_-)$ ,在  $t_+$  所探测到 5 次和 10 次谐波分量对应的相位差值分别为

$$\Delta\phi_5(t_+) = \Delta\phi_5(t_-) + \frac{1.5\lambda_{10}}{\lambda_5} =$$

$$\Delta\phi_5(t_-) + \frac{1.5\lambda_{10}}{2\lambda_{10}} \cdot 2\pi = \Delta\phi_5(t_-) + \frac{3}{2}\pi,$$

$$\Delta\phi_{10}(t_+) = \Delta\phi_{10}(t_-) + \frac{1.5\lambda_{10}}{\lambda_{10}} \cdot 2\pi =$$

$$\Delta\phi_{10}(t_-) + 3\pi = \Delta\phi_{10}(t_-) + \pi.$$

可以看出,由 5 次谐波的相位变化是否超过  $\pi$  即可判断时延抖动是否超过了 10 次谐波的一个周期,于是再根据 10 次谐波的相位变化可精确计算时延抖动。这样扩展系统既可以排除掉  $\Delta\phi(t)$  与  $\Delta\phi(t) + 2N\pi$  无法区分的问题,同时又保证了系统的时延抖动分辨率不会下降。

### 4.3 频率响应的局限与下一步工作

本实验中采用 NI 的 6251 数据采集卡对相差信号进行采样,之后经计算机处理后输出补偿信号。由于 A/D 转换、计算机处理、光纤延迟线三个部分均会引入较大时延,因此本方法仅能对赫兹量级的时延抖动进行补偿。针对时延抖动高频部分的补偿需采用全模拟电路和高速的补偿器件,目前光纤延伸器等器件的响应速度可达到 10 kHz 量级,但其响应范围较小。空间可变延迟线的响应范围为 0~560 ps,光纤延伸器的响应范围约为 0~10 ps,下一阶段的工作将把两种补偿器件结合使用以进一步提升环路的补偿效果。

## 5 结 论

介绍了采用飞秒激光进行时间频率传输中时延抖动补偿的实验进展:对锁模激光脉冲进行分光传输 1.2 km 通信光纤,比较两路信号 10 次谐波的相位变化,通过可变空间延迟器对环路的模拟低频时延抖动进行主动补偿;时间延迟从人工模拟的 180 ps 降低到 36 ps,证明此系统能够补偿光纤时间频率传输的低频时延抖动。

## 参 考 文 献

- 1 Longsheng Ma, Peter Jungnert, Jun Ye *et al.*. Delivering the same optical frequency at two places; accurate cancellation of phase noise introduced by an optical fiber or other time-varying path[J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**: 1777
- 2 B. Sprenger, J. Zhang, Z. H. Lu *et al.*. Atmospheric transfer of optical and radio frequency clock signals [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**: 965
- 3 Seth M. Foreman, Kevin W. Holman, Darren D. Hudson *et al.*. Remote transfer of ultrastable frequency references via fiber networks [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2007, **78**(2): 021101
- 4 F. Narbonneau, M. Lours, S. Bize *et al.*. High resolution frequency standard dissemination via optical fiber metropolitan network [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2006, **77**(6): 064701
- 5 C. Daussy, O. Lopez, A. Amy-Klein *et al.*. Long-distance frequency dissemination with a resolution of  $10^{-17}$  [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(20): 2039040
- 6 Zhao Tingsheng, Li Guohua, Peng Handong *et al.*. Phase shift measurement of a retarder based on Fourier analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 105~109  
赵廷生, 李国华, 彭捍东等. 利用傅里叶分析法测量光相位延迟器延迟量[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 105~109
- 7 Kaoru Minoshima, Hirokazu Matsumoto. High-accuracy measurement of 240 m distance in an optical tunnel by use of a compact femtosecond laser[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(30): 20
- 8 Li Qiliang, Li Qingshan. Calculation and analysis of timing-jitter in dispersion-managed soliton system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5): 607~612  
李齐良, 李庆山. 色散管理孤子系统定时抖动的分析计算[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5): 607~612
- 9 Xu Ming, Ji Jianhua. Phase jitter of multi-perturbations in differential phase-shift keying dispersion managed soliton system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 781~785  
徐 铭, 吉建华. 差分相移键控色散管理孤子多扰动系统的相位抖动[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 781~785
- 10 Liang Shuangyou, Zhang Jiankang, Li Lizhong. Time-frequency transfer via optic fiber and phase compensation[J]. *J. Time and Frequency*, 2008, **31**(2): 147~155  
梁双有, 张健康, 李立中. 光纤时间传输及相位补偿[J]. *时间频率学报*, 2008, **31**(2): 147~155
- 11 G. F. Lutes, R. T. Logan. Status of frequency and timing reference signal transmission[C]. 45th Annual Symposium On Frequency Control., 1991. 679~686
- 12 G. Lutes, M. Calboun. Simultaneous transmission of a frequency reference and a time code over a single optical fiber [C]. Annual Precise Time and Time Interval (PTTI), 1989. 527~532
- 13 R. T. Jr. Logan, G. F. Lutes, M. Lute. Impact of semiconductor laser frequency deviations on fiber optic frequency reference distribution systems[C]. 43rd Annual Symposium On Frequency Control, 1989. 201~217
- 14 G. Lutes. Development of fiber frequency and time distribution aystems [C]. 13th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI), 1981. 243~262
- 15 F. Narbonnea, M. Loura, D. Chambon. Ultra-stable ground frequency dissemination via optical fibres[C]. 18th EFTE. 2004. 208
- 16 Ye Jun, Peng Jinlong, R. J. Jones *et al.*. Delivery of high-stability optical and microwave frequency standards over an optical fiber network[J]. *J. the Optical Society of American B*, 2003. 1459~1467
- 17 J. Kim, J. Chen, Z. Zhang *et al.*. Long-term femtosecond timing link stabilization using a single-crystal balanced cross correlator [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(9): 1044~1046
- 18 Kevin W. Holman, Darren D. Hudson, Jun Ye. Remote transfer of a high-stability and ultralow-jitter timing signal [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(10): 1225~1227