

文章编号: 0253-2239(2010)01-0059-06

# 平衡式光学互相关方案测量光脉冲传输抖动的理论和实验研究

马雪莲<sup>1</sup> 刘璐<sup>2\*</sup> 张志刚<sup>1</sup> 汤俊雄<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 北京大学信息科学技术学院 量子电子所, 北京 100871  
<sup>2</sup> 北京大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 北京 100871)

**摘要** 给出了平衡式光学互相关方案的理论数学计算和各相关参数对测量性能的影响。研究了该测量方案的工作原理,并给出相应的数学计算,分析了脉冲宽度,倍频晶体长度以及两垂直脉冲光在晶体中的群速度对测量动态范围和灵敏度的影响。在理论分析的基础上,搭建了个平衡式互相关器的实验平台,测量光脉冲经过 100 m 光纤链路传输后产生的时间抖动。实验结果表明,定标曲线与理论计算吻合,在有光纤振动的情况下,1~100 Hz 频率范围内的传输抖动均方根值约为 20 fs。

**关键词** 激光光学; 光脉冲时间抖动; 平衡式光学互相关; 倍频; 群速度; 光纤授时

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103001.0059

## Theoretical and Experimental Study on Timing Jitter Measurement for Transmitted Pulse Using Balanced Optical Cross Correlation Scheme

Ma Xuelian<sup>1</sup> Liu Lu<sup>2</sup> Zhang Zhigang<sup>1</sup> Tang Junxiong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Quantum Electronics, School of Electronics Engineering and Computer Science,  
Peking University, Beijing 100871, China

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Peking University,  
Beijing 100871, China

**Abstract** Mathematical computation for a scheme of balanced optical cross correlation and analysis for the effect of the related parameters on the measuring performance are given. The measuring principle is studied in detail and the mathematical computation is given. We analyze the effect of the pulse width, the crystal length and the group velocity difference between the two perpendicular polarized pulses on dynamic range and sensitivity. On the basis of the theoretical analysis, we construct the experimental platform of the balanced optical cross correlator for the first time to measure the timing jitter of the pulses after transmission through a fiber link of 100 m. The experimental calibration curve agrees with our theoretical computation and the rms of the timing jitter is about 20 fs in the frequency range of 1~100 Hz with the existence of the fiber vibration.

**Key words** laser optics; timing jitter of laser pulses; balanced optical cross correlation; second harmonic generation; group velocity; time-frequency transfer via optical fiber

### 1 引言

近年来,光纤授时(利用光纤链路进行时间和频率的远程传递)由于比微波授时有着精度高和抗干扰等优点,已成为国外广泛研究的课题<sup>[1~8]</sup>。为实

现高精度的光纤授时,需要使用主动补偿环路来克服光学频率源在光纤中传输时引入的时间抖动,可靠和高精度地测量该传输抖动是保证环路有效和稳定的关键。目前常用的抖动测量采用射频域的相位

收稿日期: 2009-02-10; 收到修改稿日期: 2009-03-09

作者简介: 马雪莲(1981—),女,博士研究生,主要从事光纤授时和无线光通信等方面的研究。

E-mail: maxuelian@pku.edu.cn

导师简介: 汤俊雄(1941—),男,教授,博士生导师,主要从事量子器件和无线光通信等方面的研究。

E-mail: wuzuyun1840@sina.com

\* 通信联系人。E-mail: lulu@pku.edu.cn

噪声测量方案,其基本原理是利用两个光电探测器将频率源和传输后的频率信号转换为电信号,然后通过混频器得到二者的相位噪声和时间抖动<sup>[2~6]</sup>。

目前光纤授时中的频率源有三种:由微波频率进行幅度调制的连续光(传递微波频率),未调制的连续光(直接传递光学频率)和脉冲光源(传递光脉冲序列的重复频率及其谐波)。随着超短脉冲锁模激光器的迅速发展,第三种传递方式已越来越受重视。使用脉冲光源作为频率源的情况下,需要测量传输后光脉冲相对于基准光脉冲的时间抖动。采用射频域的测量方案需要在上述两个光电探测器的后面各加一个带通滤波器来得到脉冲重复频率的某一谐波。最近针对光纤授时中两光脉冲时间抖动的测量,提出了一种新型的平衡式光学互相关方案,它包括一个第Ⅱ类相位匹配倍频晶体和两个双色镜<sup>[8]</sup>。此互相关方案中,偏振方向互相垂直的基准光脉冲和传输后光脉冲在倍频晶体中往返产生两路倍频光,两脉冲在倍频晶体中的群速差使得探测到的两路倍频信号之差能反映两光脉冲之间的相对抖动<sup>[8]</sup>。该方案的测量动态范围受光脉冲宽度限制,与射频方案相比,具有较高的测量灵敏度和精度。文献[8]中对这种测量方案的原理给了一些定性的解释,未进行更深入的数学计算和分析各参数对测量性能的影响。本文将阐述平衡式光学互相关方案测量脉冲传输抖动的原理,进行相关数学计算,并分析在脉冲光源和光纤链路一定的情况下,晶体长度以及两垂直脉冲光在晶体中的群速度对测量动态范

围和灵敏度的影响,从而可以根据实际测量中所需的动态范围和灵敏度选取合适的晶体,合理设计各参数。在理论分析的基础上,搭建了平衡式光学互相关方案的实验平台,测量光脉冲经过光纤链路传输后的时间抖动。

## 2 抖动测量原理

平衡式光学互相关方案使用一个第Ⅱ类相位匹配倍频晶体<sup>[9]</sup>和两个双色镜,使得偏振方向互相垂直的两个待测基频光脉冲(一个是未传输前的基准光脉冲,另一个是传输后的光脉冲,其波长相同)在倍频晶体中往返产生两个倍频光,两脉冲倍频晶体中的群速差使得探测到的两倍频信号差能反映两个光脉冲之间的相对抖动,其结构如图1所示。偏振分束晶体(PBS)使两偏振方向垂直的脉冲光合束在同一直线上传播。第一个双色镜(DBS1)透射基频光,反射倍频光,第二个双色镜(DBS2)反射基频光,透射倍频光。图中实线代表基频光,虚线代表倍频光。透镜(lens)用来聚焦光束以达到高的倍频效率。第Ⅱ类相位匹配倍频晶体(type-II phase-matched crystal)使得两偏振方向垂直的基频光产生倍频信号,相位匹配的实现可以采用角度匹配<sup>[10]</sup>或周期极化的准相位匹配<sup>[11,12]</sup>。两个光电探测器(PD1和PD2)和一个相减器构成平衡式探测器(balanced detector),用来输出所探测到的两路倍频信号之差。整个装置称为平衡式光学互相关器。

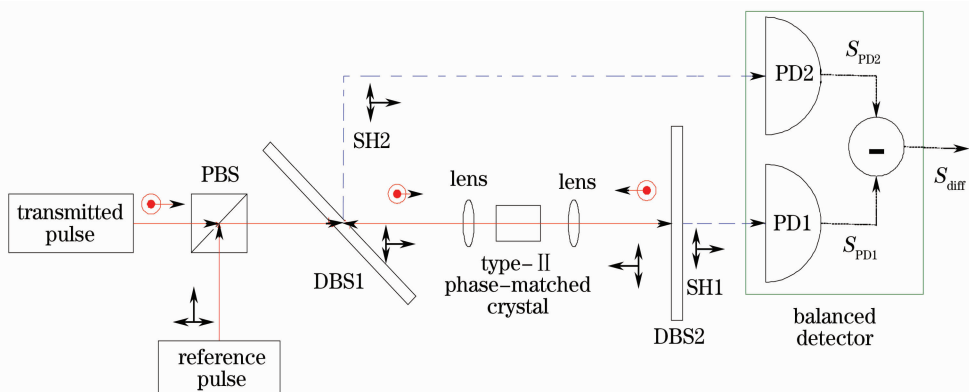


图1 平衡式光学互相关器原理结构

Fig.1 Schematic diagram of balanced optical cross correlator

平衡式光学互相关器测量脉冲传输抖动的工作过程为:偏振方向互相垂直的基准脉冲光(reference pulse)和传输后脉冲光(transmitted pulse)通过PBS合束在同一直线上传播,合束后的两基频脉冲光透过DBS1,经透镜聚焦后进入第Ⅱ类相位匹配倍频晶体,

在通过晶体的过程中逐渐消耗并产生倍频光,在晶体右端得到倍频光SH1,它由DBS2透射进入PD1,得到倍频电信号 $S_{PD1}$ 。剩余的基频光被DBS2反射和透镜聚焦再次通过晶体在左端产生倍频光SH2,它由DBS1反射进入PD2,得到电信号 $S_{PD2}$ 。平衡式探测

器的最后输出  $S_{\text{diff}}$  是图中两个倍频光经过光电探测后的电信号之差 ( $S_{\text{diff}} = S_{\text{PD2}} - S_{\text{PD1}}$ )。

为使平衡式光学互相关器最后的输出能反映两脉冲的时间抖动, 需要保证三个条件: 1) 在没有时间抖动的情况下, 两倍频信号  $S_{\text{PD1}}$  和  $S_{\text{PD2}}$  相同, 此时平衡式探测器输出的信号  $S_{\text{diff}}$  为零; 2) 输出信号的符号(正负)能反映传输后脉冲相对于基准脉冲的超前和滞后关系; 3) 输出值能反映脉冲间相对时延大小。倍频晶体的双折射使得不同偏振方向的光群速度不同, 令基准脉冲光在晶体中的群速度小于传输后脉冲光在晶体中的群速度, 则在晶体中传播时基准脉冲光为慢光, 传输后脉冲光为快光。由于群速度差异, 当两脉冲在晶体中传播时, 脉冲重叠度一直在变化。而两脉冲在晶体末端产生的倍频光强和探测到的倍频电信号与它们的平均重叠度相关, 此外还与两基频光本身的光强有关, 所以第一个条件即是要保证在没有时间抖动时, 两脉冲第一次通过晶体和第二次返回晶体时两脉冲光强和平均重叠度相同。考虑基频光低消耗的情况, 则两基频光脉冲在第一次通过晶体和第二次返回晶体时的光强不变, 只要保证平均重叠度相同即可。

当两脉冲没有相对时间抖动时, 恰当调整两脉

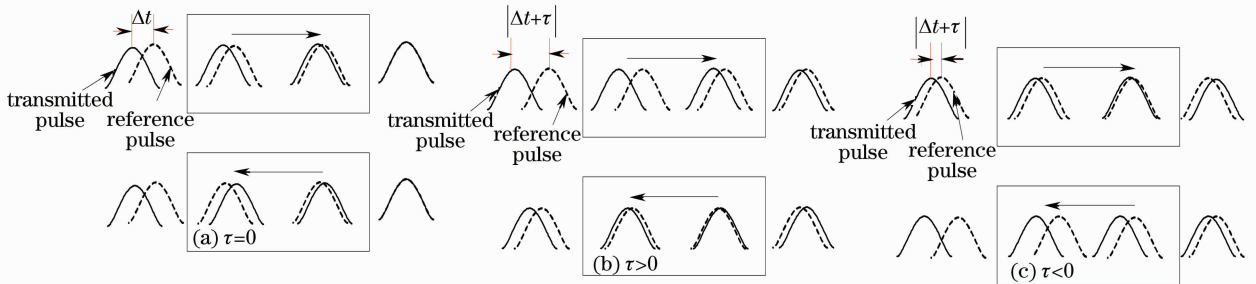


图 2 两脉冲在晶体中传播的重叠度变化情况

Fig. 2 Overlapping level of the two pulses in the crystal

需要特别注意的是, 由于两基频光脉冲宽度的限制, 如果两脉冲间的时间抖动太大以致它们在晶体中不再有重叠, 则无法进行测量, 所以该方案只能保证时间抖动在脉冲宽度量级范围内有效。

### 3 数学计算和参数分析

两基频光是脉冲光, 光电场振幅随时间变化, 它们产生的倍频光强也随时间变化, 信号  $S_{\text{PD1}}$  和  $S_{\text{PD2}}$  是对倍频光强的时间积分, 可近似写成如下表达式:

$$S_{\text{PD1}}(\tau, \Delta t) = L^2 \int I_1(t) I_2(t - \Delta t - \tau) dt, \quad (1)$$

$$S_{\text{PD2}}(\tau, \Delta t) = L^2 \int I_1(t - \Delta t) I_2(t - \tau) dt, \quad (2)$$

冲的初始(未进入晶体前)相对时延, 使快光(传输后光脉冲)滞后慢光(基准光脉冲)一特定时延  $\Delta t$ , 使得当脉冲达到倍频晶体右端时两脉冲重合, 如图 2(a) 所示, 此时当两基频光再次从晶体右端返回晶体左端后, 快光刚好超前慢光  $\Delta t$ , 则两次传播过程中两脉冲平均重叠度相同, 晶体左端和右端两个倍频信号相同, 最后平衡探测器的输出为零。可见, 该互相关方案在测量传输抖动前需要先调整固定时延  $\Delta t$ , 才能保证零平衡点。

当两脉冲存在相对时间抖动时, 则两脉冲间的相对时延不断随时间变化。设在上述固定时延  $\Delta t$  的基础上, 传输后光脉冲相对于基准光脉冲的瞬时时延为  $\tau$ , 并假设当前者相对于后者滞后时  $\tau > 0$ , 超前时  $\tau < 0$ 。当  $\tau > 0$  时, 如图 2(b) 所示, 两脉冲在第一次通过晶体的平均重叠度小于第二次返回晶体的平均重叠度, 此时  $S_{\text{PD1}}$  小于  $S_{\text{PD2}}$ , 输出的信号大于零。反之, 当  $\tau < 0$  时, 如图 2(c) 所示, 则最后输出的信号小于零。而且  $\tau$  的绝对值越大,  $S_{\text{PD2}}$  和  $S_{\text{PD1}}$  的差值就越大, 最后输出的绝对值越大。可见, 最后输出的信号能反映两脉冲瞬时时延的方向和大小, 这表明该方案能够测量两脉冲的时间抖动。

式中  $I_1(t)$  和  $I_2(t)$  分别为基准脉冲和传输后脉冲的光强,  $L$  为倍频晶体长度, 将式中右端的比例常数设为 1。

假设两个基频脉冲时域上的波形是高斯型, 光强的时域表达式分别如下:

$$I_1(t) = I_{10} \exp[-(t/T_1)^2], \quad (3)$$

$$I_2(t) = I_{20} \exp[-(t/T_2)^2], \quad (4)$$

式中  $I_{10}$  和  $I_{20}$  为峰值光强,  $T_1$  和  $T_2$  为脉冲半宽度(在光强峰值的  $1/e$  处)。脉冲宽度  $T_p$  一般定义为半峰全宽, 它们之间关系为<sup>[10]</sup>

$$T_{p1} = 2(\ln 2)^{1/2} T_1 \approx 1.665 T_1,$$

$$T_{p2} = 2(\ln 2)^{1/2} T_2 \approx 1.665 T_2, \quad (5)$$

将(3)式和(4)式代入(1)式和(2)式,并进行傅里叶变换,先在频域上进行计算,然后得到时域上的结果为

$$S_{PD2}(\tau, \Delta t) = \frac{\sqrt{2\pi}I_{10}I_{20}T_1T_2L^2}{\sqrt{T_1^2+T_2^2}} \exp\left[-\frac{(\tau-\Delta t)^2}{T_1^2+T_2^2}\right], \quad (6)$$

$$S_{PD1}(\tau, \Delta t) = \frac{\sqrt{2\pi}I_{10}I_{20}T_1T_2L^2}{\sqrt{T_1^2+T_2^2}} \exp\left[-\frac{(\tau+\Delta t)^2}{T_1^2+T_2^2}\right], \quad (7)$$

最后平衡探测器的输出  $S_{diff}$  的表达式为

$$S_{diff}(\tau, \Delta t) = \sqrt{2\pi}I_{10}I_{20}L^2(T_1T_2/T_0) \cdot \{\exp[-(\tau-\Delta t)^2/T_0^2] - \exp[-(\tau+\Delta t)^2/T_0^2]\}, \quad (8)$$

式中  $T_0 = \sqrt{T_1^2+T_2^2}$ 。

固定时延  $\Delta t$  是两脉冲通过晶体的时间差,它与倍频晶体长度  $L$ ,以及基准光脉冲和传输后光脉冲在晶体中的群速度  $v_{g1}$  和  $v_{g2}$  有关,表达式如下:

$$\Delta t = \delta L \quad (9)$$

式中  $\delta = v_{g1}^{-1} - v_{g2}^{-1}$ 。

通常采用锁模脉冲激光器作为基准脉冲光源,它具有一定的脉冲宽度,经过光纤传输后脉冲宽度会增大。对于特定的基准脉冲光源和光纤链路,  $T_1$ ,  $T_2$  和  $T_0$  的取值一定。根据(7)式可以做出平衡探测器输出  $S_{diff}$  与  $\tau/T_0$  的关系曲线,如图3所示,这就是测量传输抖动的定标曲线,其中  $S_{diff}$  是归一化的结果。由图3可以看出,曲线中间接近直线,输出与时延  $\tau$  近似成正比关系,所以能反映时间抖动的大小和方向,可应用于时间抖动的测量。直线段内  $\tau$  的范围即是测量动态范围  $\Delta\tau$ ,直线斜率反映了测量灵敏度  $K_s$ ,  $\Delta\tau$  和  $K_s$  表征了抖动测量性能。

研究测量动态范围  $\Delta\tau$  和灵敏度  $K_s$  随参数  $\delta$  和  $L$  的变化情况。图4给出  $\delta/T_0$  取不同值时,  $\Delta\tau/T_0$  与

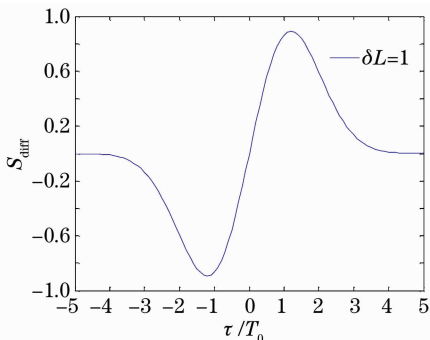


图3 输出  $S_{diff}$  与  $\tau/T_0$  的关系曲线

Fig. 3 Relationship of output  $S_{diff}$  versus  $\tau/T_0$

$L$  的关系曲线。当  $\delta/T_0$  的值一定,  $\Delta\tau/T_0$  随  $L$  呈上升趋势,可以看出  $\Delta\tau/T_0$  同时随  $\delta/T_0$  的增加而增加。当  $\delta L/T_0 = 2$  ( $L = 2T_0/\delta$ ) 时,  $\Delta\tau/T_0$  达到其最大值4,此时动态范围  $\Delta\tau = 4T_0$ 。 $\delta L/T_0$  的值超过2时  $\Delta\tau/T_0$  不再增加,即晶体长度  $L$  在超过  $2T_0/\delta$  时动态范围不再增大。

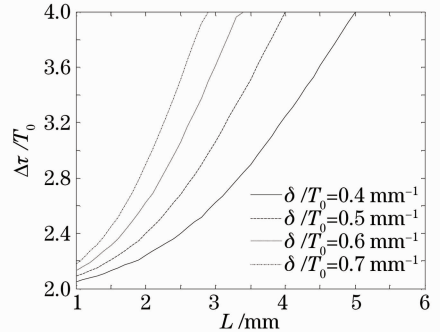


图4  $\Delta\tau/T_0$  与  $L$  的关系曲线

Fig. 4 Relationship of  $\Delta\tau/T_0$  versus  $L$

图5给出  $\delta/T_0$  取不同值时,  $K_s$  与  $L$  的关系曲线。当  $\delta/T_0$  值一定时,  $K_s$  先随  $L$  的增大而增大,在  $\delta L/T_0 \approx 1.8$  ( $L \approx 1.8T_0/\delta$ ) 处达到极大后下降,  $L$  的值超过  $L = 2T_0/\delta$  时  $K_s$  不再变化。当  $L$  值一定且比较小时,  $K_s$  随  $\delta/T_0$  的增大而增大,但此时不同  $\delta/T_0$  的  $K_s$  值只有细微差别,可以看作近似不变;当  $L$  值一定且很大时,  $K_s$  则随  $\delta/T_0$  的增大而减小,该趋势很明显,这与动态范围  $\Delta\tau$  随  $\delta/T_0$  的变化情况相反。

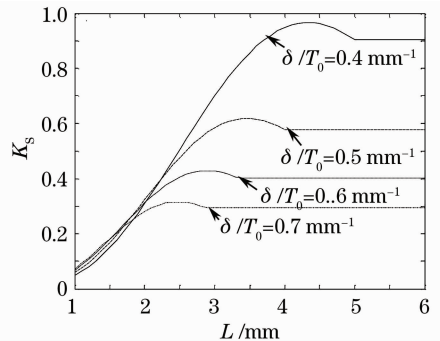


图5  $K_s$  与  $L$  的关系曲线

Fig. 5 Relationship of  $K_s$  versus  $L$

由上述分析得出  $\delta$  和  $L$  对测量动态范围和灵敏度的影响,可以指导抖动测量实验的参数设计。在测量光脉冲在光纤链路中的传输抖动时,需要测量锁模脉冲激光器的脉冲宽度和经过光纤链路传输后的脉冲宽度,再根据动态范围和灵敏度的需要,合理选择晶体以及设计参数  $v_{g1}$ ,  $v_{g2}$  和  $L$ 。

该测量方案的动态范围受脉冲宽度所限,最大值为  $4T_0$ 。锁模脉冲激光器的脉冲宽度一般在飞秒到皮秒量级<sup>[13~16]</sup>,光脉冲在经过光纤传输后脉冲会



产生展宽,在短距离传输和不使用光纤放大器时展宽可忽略,抖动测量动态范围可达飞秒到皮秒量级。上述分析中的输出采用归一化值,实际中应该考虑到输出与倍频效率成正比,所以倍频效率越高灵敏度值越大。影响倍频效率的一个重要参数是晶体的有效非线性系数  $d_{\text{eff}}^{[10]}$ ,该值越大倍频效率越高,从而灵敏度越大。

## 4 传输抖动测量实验

搭建平衡式互相关器的实验平台测量光脉冲经过 50 m 光纤链路往返传输(相当于传输 100 m)后的时间抖动,实验装置和光路如图 6 所示。脉冲光源为自制的锁模掺铒光纤激光器,中心波长为 1550 nm,重复频率为 90 MHz,脉冲宽度为 475 fs。装置中的 1/2 波片(HWP)用来调节脉冲光源的偏振方向,从而调节由偏振分束晶体(PBS)反射和透射的光功率比例。光源由 PBS 透射的部分通过 1/4 波片(QWP)和反射镜(GM)返回,重新入射到 PBS 时偏振方向旋转  $90^\circ$ ,恰好可以由 PBS 反射,这部分脉冲光可以作为基准脉冲光源;光源由 PBS 透射的部分通过光纤准直镜(collimator)高效率地耦合到光纤中,光纤链路(fiber link)末端的法拉第旋转镜(FRM)将传输后的光脉冲返回,并使其偏振方向旋转  $90^\circ$ ,返回光恰好可以由 PBS 反射,这部分脉冲光是经过光纤往返链路传输后的脉冲光。两路光由 PBS 合束后进入平衡式光学互相关器中进行抖动测量。在测量过程中引入了人工扰动,使得在光脉冲传输时光纤有振动,增大了时间抖动。

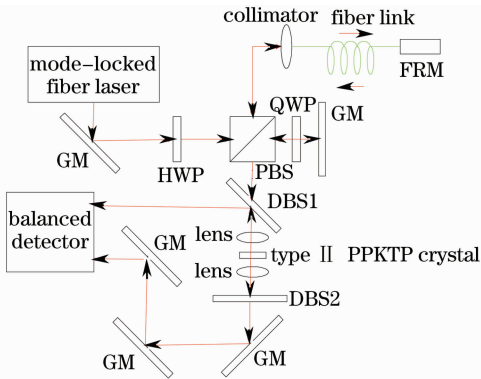


图 6 测量脉冲在光纤中传输抖动的实验装置

Fig. 6 Experimental setup for measuring timing jitter of the pulse transmitted in the fiber link

互相关器中的倍频晶体我们选择第 II 类相位匹配的周期极化磷酸钛钾(PPKTP)晶体,它采用的是周期极化的准相位匹配,有效非线性系数比较大,倍

频效率高,可以实现高灵敏度。由于引入的光纤振动增大了时间抖动,为保证测量有效,参数设计应保证最大的动态范围,在此基础上考虑提高灵敏度,根据前面的理论分析并考虑成本问题,选取的晶体长度为 5 mm。

在实际测量传输抖动之前,需要先对平衡式光学互相关器进行定标,得到最后输出的信号与时间抖动的关系曲线,并且同时找到输出的平衡零点。将图 6 实验装置图中的光纤传输一路先换成与基准光脉冲一路相同的设置,并且配置机械平移台来移动反射镜以不断改变光路长度,从而调节传输光脉冲相对于基准光脉冲的时延。根据实验数据点得到反映输出和时延关系的定标曲线如图 7 所示,可以看出实验的定标曲线与之前的理论计算吻合。

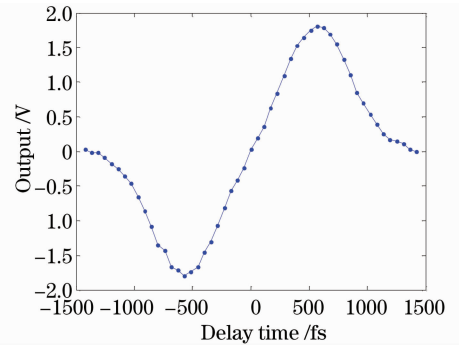


图 7 实验定标曲线

Fig. 7 Experimental calibration curve

定标之后,将光路换回光纤链路,进行传输时间抖动的测量。最后得到时间抖动曲线如图 8(a)所示,相应的频域抖动功率谱曲线如图 8(b)。抖动主要集中在低频区域,计算得到 1~100 Hz 频率范围内传输抖动均方根值为 21.6799 fs。图 8(a)中两处低谷值恰好是人工扰动使光纤振动的时刻,此时由于振动使得光纤引入的抖动增大,而测量曲线也反映了这一点,可见该测量的可靠性。

## 5 结 论

平衡式光学互相关方案作为一种新型的脉冲传输抖动测量方案,具有高灵敏度和高精度的优点。阐述了该方案的测量原理,并进行了数学计算和理论分析,得出动态范围和灵敏度随各参数变化情况,从而指导实验的参数设计。当  $\delta/T_0$  的值一定,  $\Delta\tau/T_0$  随  $L$  呈上升趋势;当  $\delta L/T_0 = 2$  ( $L = 2T_0/\delta$ ) 时,  $\Delta\tau/T_0$  达到其最大值 4,此时动态范围  $\Delta\tau = 4T_0$ ;  $\delta L/T_0$  的值超过 2 时  $\Delta\tau/T_0$  不再增加,即晶体长度  $L$  在超过  $2T_0/\delta$  时动态范围不再增大。当  $\delta/T_0$  值一定,灵敏

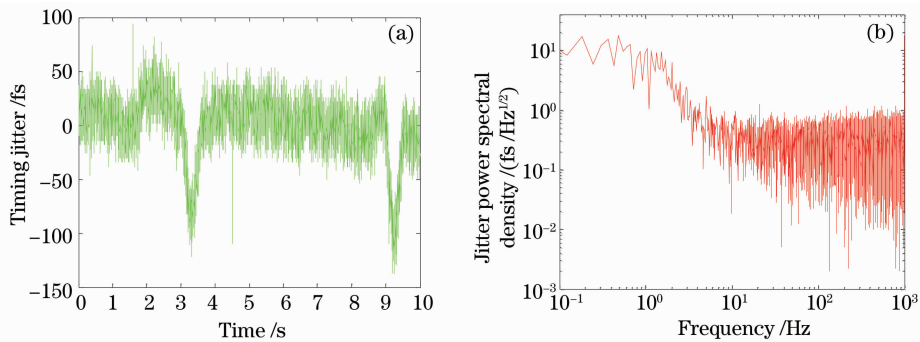


图 8 100 m 光纤链路传输的实验结果。(a)时间抖动;(b)抖动功率谱密度曲线

Fig. 8 Experimental result for 100 m fiber link. (a) Timing jitter; (b) jitter power spectral density

度  $K_s$  先随  $L$  的增大而增大,在  $\delta L/T_0 \approx 1.8$  ( $L \approx 1.8T_0/\delta$ ) 处,  $K_s$  达到极大值后下降, $L$  的值超过  $L = 2T_0/\delta$  时  $K_s$  不再变化。在锁模脉冲激光光源和光纤链路一定的情况下,可以根据灵敏度和动态范围的要求,合理设计晶体长度以及两基频光在晶体中的群速度。最后在理论分析的基础上,搭建了平衡式互相关器的实验平台,测量了光脉冲经过 100 m 光纤链路传输后产生的时间抖动。实验结果表明平衡式互相关器的定标曲线与理论计算吻合,在有光纤振动的情况下,1~100 Hz 频率范围内的传输抖动均方根值约为 20 fs。

### 参 考 文 献

- 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): 021101.1~021121.25
- 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): 064701.1~064701.8
- 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): 203904.1~203904.4
- A. Amy-Klein, A. Goncharov, C. Daussy *et al.*. Absolute frequency measurement in the 28-THz spectral region with a femtosecond laser comb and a long-distance optical link to a primary standard [J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **78**(1): 25~30
- Kevin W. Holman, David J. Jones, Darren D. Hudson *et al.*. Precise frequency transfer through a fiber network by use of 1.5- $\mu$ m mode-locked sources [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(13): 1554~1556
- 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
- Darren D. Hudson, Seth M. Foreman, Steven T. Cundiff *et al.*. Synchronization of mode-locked femtosecond lasers through a

- fiber link [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(13): 1951~1953
- 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
- Deng Qinghua, Peng Hansheng, Li Mingzhong *et al.*. Research on the method to stabilize second harmonic generation using type II phase matching [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 313~317
- 邓青华, 彭翰生, 李明中等. 利用 II 类相位匹配实现稳定倍频输出 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 313~317
- Qian Shixiong, Wang Gongming. *Nonlinear Optics-Principles and Developments* [M]. Shanghai: Fudan University Press, 2001, 53~79
- 钱士雄, 王恭明. *非线性光学-原理与进展* [M]. 上海: 复旦大学出版社, 2001. 53~79
- J. A. Armstrong, N. Bloembergen, J. Ducuing *et al.*. Interactions between light waves in a nonlinear dielectric [J]. *Phys. Rev.*, 1962, **127**(6): 1918~1939
- Fu Weijia, Yu Jian, Kang Yuzhuo *et al.*. 13 mW-continuous-wave green light output by quasi-phase-matched frequency doubling in periodically poled KTP [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1063~1066
- 付伟佳, 于建, 康玉琢等. 准相位匹配 PPKTP 晶体连续倍频 13 mW 绿光输出 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 1063~1066
- Shen Minchang, Xu Wencheng, Chen Weicheng *et al.*. Experimental study of fiber ring laser with single polarization controller [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 2003~2007
- 申民常, 徐文成, 陈伟成等. 单偏振控制器环形腔光纤激光器实验研究 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(11): 2003~2007
- Song Fang, Xu Wencheng, Shen Minchang *et al.*. Actively mode-locked femtosecond pulse fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 347~350
- 宋方, 徐文成, 申民常等. 主动锁模飞秒光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 347~350
- S. Rivier, U. Griebner, V. Petrov *et al.*. Sub-90 fs pulses from a passively mode-locked Yb:YAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> laser [J]. *Appl. Phys. B*, 2008, **93**(4): 753~757
- Liu Bowen, Hu Minglie, Song Youjian *et al.*. 39 fs, 16 W all photonic crystal fiber laser system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 811~814
- 刘博文, 胡明列, 宋有建等. 39 fs, 16 W 全光子晶体光纤飞秒激光系统 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 811~814