

基于阿秒抖动光纤锁模激光器的时钟同步

秦鹏 宋有建 胡明列 柴路 王清月

Timing synchronization based on mode-locked fiber lasers with attosecond timing jitter

Qin Peng Song You-Jian Hu Ming-Lie Chai Lu Wang Qing-Yue

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 224209 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.224209

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.224209>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I22>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同入射脉冲强度线性啁啾对 BaF₂ 晶体交叉偏振波输出特性影响的数值模拟研究

Investigation on the influences of linear chirp with different input pulse intensities on BaF₂ cross-polarized wave generation

物理学报.2015, 64(2): 020602 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.020602>

基于单模光纤的交叉相位调制型频率分辨光学开关超短脉冲测量

Cross-phase modulation typed frequency resolved optical gating measurement for ultra-short pulses using a single mode fiber

物理学报.2014, 63(24): 240601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.240601>

光纤激光经过模清洁器后的强度噪声分析

Intensity noise analysis of a fibre laser after passing through an optical mode cleaner

物理学报.2014, 63(19): 194203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.194203>

飞秒激光烧蚀金属靶的冲击温度

Shock temperature of femtosecond laser ablation of solid target

物理学报.2013, 62(21): 210601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.210601>

自旋相干态变换和自旋-玻色模型的基于变分法的基态解析解

Spin coherent-state transformation and analytical solutions of ground-state based on variational-method for spin-Bose models

物理学报.2013, 62(11): 114205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.114205>

基于阿秒抖动光纤锁模激光器的时钟同步*

秦鹏 宋有建[†] 胡明列 柴路 王清月

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

(2015年5月24日收到; 2015年6月30日收到修改稿)

光纤锁模激光器结构简单, 运转稳定, 且输出的超短脉冲序列具有极高的时钟稳定性, 在抽运探测、脉冲相干合成等要求高精度时钟同步的前沿领域有着广阔的应用前景. 本文通过激光器腔内的电光调制器进行反馈控制, 实现了两台光纤锁模激光器之间的紧密时钟信号同步; 并且通过平衡光学互相关方法, 对残余的时钟误差信号进行了测量, 分辨率达到了 13 as. 通过优化激光器的腔内动力学过程及反馈环路的参数, 在 [1 Hz, 10 MHz] 的积分区间内得到了 109 as 的残余时钟误差, 对应单台激光器的平均时间抖动为 77 as.

关键词: 光纤锁模激光器, 时钟同步, 时间抖动, 平衡光学互相关

PACS: 42.50.Lc, 06.60.Jn, 06.30.Ft

DOI: 10.7498/aps.64.224209

1 引言

在抽运探测^[1,2]、高速模数转换^[3,4]、脉冲相干合成^[5,6]、时钟信号发布^[7,8]等前沿领域, 系统内各部分之间高精度的时钟同步一直都是主要的技术难题之一. 以抽运探测实验为例, 为了保证整个系统的时间分辨率, 必须精确控制抽运脉冲和探测脉冲的相对到达时间, 这就需要分辨率达到飞秒(fs, 10^{-15} s)甚至阿秒(as, 10^{-18} s)量级的时钟同步^[1]. 飞秒激光器输出的脉冲序列在时域上具有阿秒量级的稳定性, 在时钟同步方面具有天然的优势^[9]. 其中, 钛宝石锁模激光器凭借其极低的时间抖动(timing jitter)特性, 已经成为当前时钟同步信号源的首选^[10]. 早在2006年, 王鹏等^[11]就利用主动控制的方法实现了钛宝石激光器和掺钕钒酸钪激光器的时钟同步, 并在此基础上通过和频效应产生了中心波长 460 nm 的蓝光超短脉冲. 2008年, 赵环等^[12]通过三套锁相环的共同作用, 实现了两台钛宝石激光器之间的高精度同步, 并且通过计算机智能检测获得了长达40分钟的稳定时钟同步, 但是, 钛宝石激光器光-光转化效率低、热效应明显、结构

复杂、对工作环境要求高, 难以实现小型化和低成本运行, 从而极大地限制了其作为时钟同步信号源的推广应用^[13].

与传统的固体激光器相比, 光纤锁模激光器的光-光转化效率高、结构简单、受环境变化的影响小, 因此它作为时钟同步信号源时比钛宝石激光器更容易实现小型化和低成本运行, 从而更利于推进系统的实用化. 近年来, 通过优化光纤激光器的结构和腔内动力学过程, 光纤激光器的时间抖动水平已经得到了极大的抑制, 并最大限度地使其接近钛宝石激光器的水平. 2011年, 宋有建等^[14]对光纤锁模激光器的时间抖动进行了系统的研究, 分别测量了工作在孤子(soliton)、自相似(self-similar)、呼吸孤子(stretched pulse)这三种锁模状态下激光器的时间抖动, 并对光纤锁模激光器时间抖动的影响因素进行了总结; 在此基础上, 通过仔细优化激光器的腔内色散和锁模状态, 在掺铈和掺铒激光器内分别获得了 175 as 和 70 as 的高频时间抖动, 积分区间均为 10 kHz 至奈奎斯特频率^[15,16]. 然而, 光纤激光器的量子极限时间抖动仍然高于钛宝石激光器, 这一方面是由于光纤激光器的增益介质长, 放大自发辐射(amplified

* 国家自然科学基金(批准号: 61205131, 11274239, 61227010, 61322502)、国家重点基础研究发展计划(批准号: 2011CB808101, 2010CB327604)和长江学者和创新团队发展计划(批准号: IRT13033)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: yjsong@tju.edu.cn

spontaneous emission, ASE) 噪声大于钛宝石激光器; 另一方面是由于光纤锁模激光器腔内的脉冲宽度远大于钛宝石激光器(钛宝石激光器腔内可以获得 10 fs 以下脉冲宽度), 不利于降低激光器的时间抖动^[14]. 因此在相同的锁定带宽下, 光纤锁模激光器的时间抖动水平很难达到与钛宝石激光器相同的量级. 2005 年, Hudson 等^[17]通过在激光器腔内使用电光调制器(electro-optic modulator, EOM), 实现了高达 230 kHz 的时钟同步锁定带宽, 为进一步降低光纤锁模激光器的量子极限时间抖动提供了新的思路.

为了实现高精度的时钟同步, 不仅需要抑制激光器本身的时间抖动, 还需要尽量避免在测量过程中引入额外的噪声. 以锁模激光器时钟信号的探测为例, 传统的直接光电探测方法在光电转换的过程中会引入相位噪声, 使测量的分辨率被限制在 10 fs 量级^[18], 从而无法准确反映锁模激光器的时间抖动水平. 近年来, 随着平衡光学互相关(balanced optical cross-correlation, BOC)方法^[19]的出现, 时钟误差的测量分辨率已经提高到阿秒量级, 为准确测量锁模激光器的时间抖动及其后续研究提供了可能. 2007 年, Kim 等^[18]借助 BOC 系统, 分别通过时间探测法和时间延迟法测量了商用掺铒光纤锁模激光器的时间抖动. 与传统的直接光电探测方法相比, BOC 方法的分辨率提高了两个数量级, 达到了 460 as. 此后, BOC 方法的分辨率不断提高, 并被广泛地应用到锁模激光器时间抖动测量和时钟同步的研究中.

本文的主要工作为掺铒光纤锁模激光器的高精度时钟同步, 通过基于腔内 EOM 的反馈控制, 实现了 400 kHz 的时钟同步锁定带宽, 并且通过 BOC 系统测量了残余的时钟误差信号, 测量分辨率高达 13 as. 通过优化激光器的锁模状态和反馈环路的锁定参数, 在 [1 Hz, 10 MHz] 的积分区间内实现了 109 as 的残余时钟误差, 对应每台激光器的平均时间抖动为 77 as. 据作者所知, 本文首次基于宽带锁相环路(>100 kHz 锁定带宽)将独立光纤激光器间的相对时钟误差降低至百阿秒的水平.

2 实验原理

2.1 锁模激光器的时间抖动

理想状况下, 锁模激光器的输出信号是时域上严格等间隔排列的超短脉冲序列; 但是激光器实际

运转的过程中, 在增益介质的 ASE 噪声、腔镜的机械振动、空气的扰动、温度的漂移等一系列内外因素的共同作用下, 锁模激光器输出脉冲序列的时域位置与理想的周期性位置相比, 会有微小的随机偏差. 上述随机偏差在一定时间间隔内的标准差称为时间抖动^[20].

早在 1993 年, Haus 和 Mecozzi^[21]已经对孤子锁模激光器的噪声理论进行了系统的研究. 2004 年, Paschotta^[22]对上述理论进行了拓展, 得到了更为通用的锁模激光器时间抖动耦合理论. 对于光纤锁模激光器而言, 时间抖动主要来源于增益介质中的 ASE 噪声, 它在激光器中引入的时间抖动主要包括两个方面: 在时域中, 由于 ASE 噪声的存在, 会在原本严格周期性排列的脉冲序列上随机地加入光子, 从而使得脉冲峰值的时域位置产生随机的变化, 这种方式引入的时间抖动称为直接耦合时间抖动; 在频域中, 由于 ASE 噪声的存在, 脉冲所对应的光谱成分会发生随机的变化, 从而造成脉冲中心波长的随机漂移, 当脉冲中心波长对应的腔内色散不为零时, 其群速度也会随之发生随机的变化, 最终造成激光器输出脉冲时域位置的随机变化, 这种方式引入的时间抖动称为间接耦合时间抖动. 以双曲正割形的脉冲序列为例, 其时间抖动的功率谱密度(power spectral density)可通过以下表达式得出^[22]:

$$S_{\Delta t}(f) \approx 0.5294 \frac{1}{(2\pi f)^2} \frac{h\nu}{E_p} \frac{g}{T_{rt}} \tau_p^2 + \left(\frac{D_2}{fT_{rt}}\right)^2 S_{f_c}(f), \quad (1)$$

(1) 式的第一项对应直接耦合的时间抖动, 第二项对应间接耦合的时间抖动, 其中 f 为傅里叶变换频率, h 为普朗克常量, ν 为脉冲中心光频率, E_p 为腔内脉冲能量, g 为激光器腔内增益, T_{rt} 为脉冲序列的周期, τ_p 为腔内脉冲平均宽度, D_2 为激光器腔内净色散, $S_{f_c}(f)$ 为脉冲中心频率漂移的功率谱密度.

从 (1) 式可以看出, 降低锁模激光器时间抖动的思路主要包括以下几个方面: 首先, 通过选择合适的锁模状态, 使激光器腔内的脉宽尽量窄, 单脉冲能量尽量高, 从而降低直接耦合时间抖动; 其次, 尽量使激光器工作在近零色散的状态, 从而降低由中心频率漂移引起的间接耦合时间抖动^[14,15].

2.2 BOC 方法

光学互相关本质上是一种下采样过程, 即通过和频效应将时域上两个信号间的微小延时转化为

和频光强度的变化,从而突破光电探测器带宽的限制,实现更高的时间分辨率.互相关强度信号的数学表达式如下:

$$R(\Delta\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(t + \Delta\tau)f_2(t)dt, \quad (2)$$

其中 $\Delta\tau$ 表示两路待测信号间的相对延时.但是从(2)式中可以看出,和频信号的强度同时受到延时 $\Delta\tau$ 和信号强度波动的影响.为此,又有人提出了BOC的思想^[19]:进行两路相同的互相关过程,并且在其中一路的基频信号之间引入固定的附加延时 $\Delta\tau'$ 作为参考,再将两路互相关信号在平衡探测器中相减,就可以抵消基频信号的强度波动对互相关信号的影响,使得互相关信号的强度只取决于两路基频光信号之间的待测延时 $\Delta\tau$.基于单块晶体的BOC系统如图1所示,对于中心波长相同的两路脉冲序列,待测的基频光信号往往以相互正交的偏振态入射,并在前后两次通过倍频晶体时分别产生和频信号,参考延迟 $\Delta\tau'$ 由晶体的双折射效应引入.

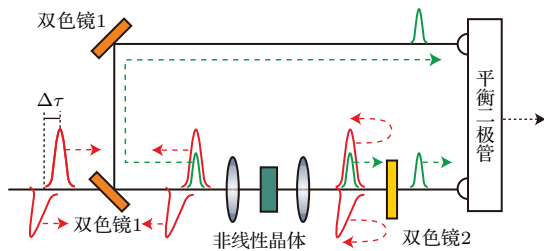


图1 (网刊彩色) BOC 系统

Fig. 1. (color online) BOC system.

2.3 基于BOC的时钟同步及残余时钟误差信号测量

BOC系统提供的高时间分辨率为实现精确的时钟同步提供了可能.但是,由于光纤锁模激光器的短期稳定性很好,高频的时间抖动非常低,所以往往不容易找到其他的时间基准直接进行测量.为了解决上述问题,在实验中往往使用与待测激光器结构相同、时间抖动水平接近的锁模激光器作为时间参考.这种情况下测量到的时间抖动功率谱是两台激光器的总和,该结果可用于衡量两台激光器时钟同步的效果.由于两台激光器的时间抖动水平相近,所以将上述结果除以2,就可以得到单台待测激光器对应的平均时间抖动水平.

3 实验系统、实验结果与分析

3.1 实验系统

本实验中所用待测激光器为非线性偏振旋转(nonlinear polarization evolution)锁模的环形腔掺镱光纤激光器,其结构如图2(a)所示.其中,光纤部分由22 cm长的高掺杂浓度掺镱光纤和51 cm长的单模尾纤构成,激光器的重复频率为152.3 MHz.该激光器腔内添加了EOM,通过外加电压控制晶体的折射率来微调激光器的重复频率.参考激光器除了腔内没有EOM外,结构与待测激光器基本相同.通过调节其腔内空间光路的长度,参考激光器的重复频率同样被固定在152.3 MHz附近,以便与待测激光器进行锁定.为了在尽量降低间接耦合时间抖动的前提下兼顾激光器锁模状态的稳定性^[15],通过调节腔内光栅对的间距,两台激光器的腔内净色散均被控制在 -0.002 ps^2 左右.由于本文中暂不讨论抽运噪声对激光器时间抖动和时钟同步效果的影响,因此为了剔除泵源共模噪声,两台激光器的抽运光由一台工作在976 nm的抽运激光器经50:50光纤分束器来提供.在各自250 mW的抽运水平下,两台激光器均可以实现稳定的呼吸孤子锁模,输出脉冲序列的平均功率为80 mW,光谱宽度约为60 nm.上述脉冲序列经过腔外色散补偿,可以压缩至半极大全宽约为55 fs的洛伦兹形脉冲序列,其光谱和强度自相关曲线分别如图2(b)和图2(c)所示.

两台激光器的时钟同步和残余时钟误差测量系统如图2(d)所示.两台激光器的输出脉冲序列均由分束系统分为两束,一束进入BOC系统,用于构建时钟同步的反馈环路.另一路进入环外的单臂互相关系统,用来验证环内残余时钟误差测量结果真实性.分束系统由半波片和偏振相关分束器(polarized beam splitter)组成,以便调节环内外光功率的分配.环内BOC系统中,和频晶体为第二类相位匹配偏硼酸钡(β -barium borate, BBO),厚度为0.65 mm.环外互相关系统中的和频晶体为一块厚度0.45 mm的第二类相位匹配BBO晶体.在闭合时钟同步的反馈环路之前,两台激光器完全自由运转,此时上述两套光学互相关系统的输出信号如图2(d)中右侧曲线所示.在BOC输出曲线零延时点附近的区间内,互相关的强度信号与输入脉冲之间的延时成正比,因此该区间被称为BOC系统的线性区间.同样,环外单臂互相

关系统的输出曲线也有相应的线性区间, 位于互相关信号的两侧. 本实验中环内外互相关曲线的线性区间已由阴影部分标出. 需要说明的是, 在实际测量过程中, 二极管探测基底对应的电压值是一定的, 且在数值上等于二极管的噪声等效功率(noise equivalent power)与增益的乘积. BOC 输出信号线性部分的斜率越高, 就可以在一定的

噪声电压水平下分辨越小的延时, 即测量分辨率越高. 环内BOC系统的输出信号进入比例积分(proportional-integral)控制器后, 经过滤波、积分和放大, 用于控制EOM晶体的折射率, 从而调节待测激光器的重复频率来补偿两台激光器输出脉冲之间的延时变化, 最终实现两台激光器之间的时钟同步.

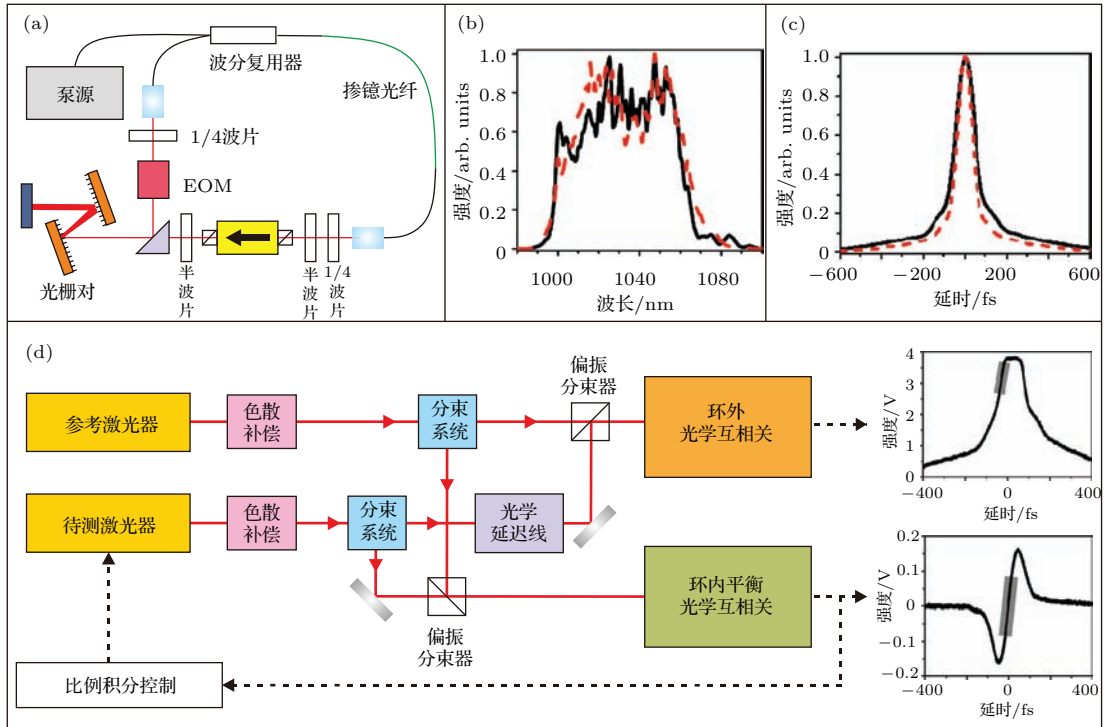


图2 (网刊彩色) (a) 实验中所用激光器; (b) 待测激光器(黑色实线)和参考激光器(红色虚线)的光谱; (c) 待测激光器(黑色实线)和参考激光器(红色虚线)的强度自相关; (d) 基于BOC的时钟同步及残余时钟误差测量系统
 Fig. 2. (color online) (a) Laser system; (b) optical spectra of the laser under test (black solid line) and the reference laser (red dashed line); (c) intensity auto-correlation of the laser under test (black solid line) and the reference laser (red dashed line); (d) timing-synchronization and residual-timing-jitter-measurement system based on BOC.

3.2 实验结果与分析

锁相环路闭合后, 通过优化比例积分控制器的拐点频率和增益, 可以获得400 kHz的锁定带宽. 为了获得尽量高的测量分辨率, 首先将全部功率分配到环内测量部分, 此时BOC信号线性部分的斜率为40 mV/fs, 两台激光器之间的残余时钟误差功率谱密度及二极管的探测基底分别如图3(a)中黑色实线和灰色点划线所示. 从图3(a)中可以看到, 在[1 Hz, 10 kHz]及[4 MHz, 10 MHz]的频率范围内, 时间抖动功率谱密度的测量结果被二极管的探测基底限制. 在[1 Hz, 10 MHz]的频率范围内, 二极管探测基底引入的附加时间抖动约为13 as, 对应系统的测量分辨率, 如图3(b)中灰色点划线所

示. 上述频率范围内, 残余时钟误差的积分值为109 as, 如图3(b)中黑色实线所示. 剔除二极管探测基底引入的附加噪声后, 真实的残余时钟误差约为108 as. 本实验中, 两台激光器的中心波长均为1030 nm左右, 对应3.43 fs的光学周期. 以上数据说明, 在足够长的观测时间(1 s)内, 激光器同步后的残余时钟误差仍然远小于十分之一光学周期.

为了验证环内残余时钟误差测量结果真实性, 实验中同时测量了锁相环路闭合之后环内外的残余时钟误差, 结果如图4(a)所示. 从图4(a)可以看出, 在[100 kHz, 2 MHz]的频率区间内, 环内环外的测量结果基本相同. 在[1 Hz, 100 kHz]的频率区间内, 环外的测量结果稍高于环内, 这是由于环外的探测系统中不包含任何补偿机理, 周围环境中

低频的机械噪声会耦合到环外测量的光路中, 从而增加环外测量在低频部分的结果. 在 2 MHz 以上的频率区间内, 环内外的测量结果先后被各自探测器的基底所限制, 由于上述两套互相关系统中所用的探测器有所不同, 所以探测基底的水平和形状也不完全相同. 在 [1 Hz, 10 MHz] 的频率范围内, 环内

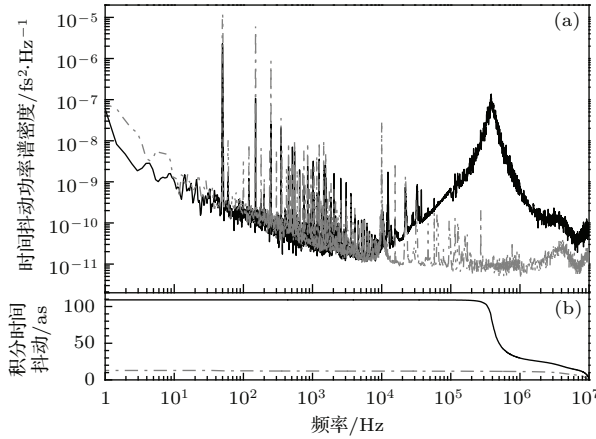


图3 (a) 激光器时钟同步后残余时钟误差 (黑色实线) 及二极管探测基底 (灰色点划线); (b) 残余时钟误差 (黑色实线) 及二极管探测基底 (灰色点划线) 的积分结果

Fig. 3. (a) Residual timing jitter between the lasers while timing synchronized (black solid line) and noise floor of the photodiode (gray dash-dot line); (b) integrated residual timing jitter (black solid line) and noise floor (gray dash-dot line).

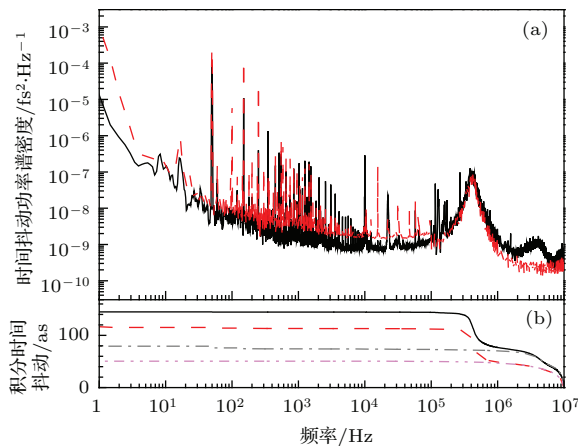


图4 (网刊彩色) (a) 环内 (黑色实线) 与环外 (红色虚线) 残余时钟误差; (b) 环内 (黑色实线) 与环外 (红色虚线) 残余时钟误差及环内 (灰色点划线) 环外 (粉色双点划线) 探测基底的积分结果

Fig. 4. (color online) (a) Residual timing jitter of the in-loop (black solid line) and out-of-loop (red dashed line) measurement; (b) integrated residual timing jitter of the in-loop (black solid line) and out-of-loop (red dashed line) measurement, and integrated noise floor of the in-loop (gray dash-dot line) and out-of-loop (pink dash-dot-dot line) measurement.

环外残余时钟误差的积分结果分别为 145 as 和 117 as. 上述积分结果偏大的原因主要是由于探测基底的升高. 正如上文所述, 在同时测量环内外残余时钟误差的过程中, 由于激光器总的输出功率有限, 所以环内外只能分得部分功率, 导致各自光学互相关系统输出信号斜率的下降, 进而造成了等效探测基底的升高. 在 [1 Hz, 10 MHz] 的频率范围内, 环内外探测基底引入的额外时间抖动分别为 79 as 和 51 as, 如图 4 (b) 中灰色点划线和粉色双点划线所示. 在剔除探测基底的影响后, 环内外残余时钟误差值分别为 121 as 和 105 as. 综合上述分析, 可以认定环内残余时钟误差的测量真实有效.

4 结 论

本文基于 BOC 方法, 通过 EOM 微调腔内光程, 实现了光纤锁模激光器的高精度宽带时钟同步. 通过优化激光器的锁模状态及反馈环路的锁定参数, 在 13 as 的测量分辨率下得到了 109 as 的残余时钟误差, 对应单台激光器的平均时间抖动为 77 as. 上述高精度宽带时钟同步系统的残余时钟误差远小于载波的光学周期, 在抽运探测、脉冲相干合成、高精度模数转换等方面有着广阔的应用前景.

参考文献

- [1] Schulz S, Grguraš I, Behrens C, Bromberger H, Costello J T, Czwalinna M K, Felber M, Hoffmann M C, Ilchen M, Liu H Y, Mazza T, Meyer M, Pfeiffer S, Prędko P, Schefer S, Schmidt C, Wegner U, Schlarb H, Cavalieri A L 2015 *Nat. Commun.* **6** 5938
- [2] Domke M, Rapp S, Schmidt M, Huber H P 2012 *Opt. Express* **20** 10330
- [3] Khilo A, Spector S J, Grein M E, Nejadmalayeri A H, Holzwarth C W, Sander M Y, Dahlem M S, Peng M Y, Geis M W, DiLello N A, Yoon J U, Motamedi A, Orcutt J S, Wang J P, Sorace-Agaskar C M, Popović M A, Sun J, Zhou G R, Byun H, Chen J, Hoyt J L, Smith H I, Ram R J, Perrott M, Lyszczarz T M, Ippen E P, Kärtner F X 2012 *Opt. Express* **20** 4454
- [4] Kim J, Park M J, Perrott M H, Kärtner F X 2008 *Opt. Express* **16** 16509
- [5] Cox J A, Putnam W P, Sell A, Leitenstorfer A, Kärtner F X 2012 *Opt. Lett.* **37** 3579
- [6] Fong B J, Lin W T, Wu S Y, Peng J L, Hsiang W W, Lai Y 2015 *Opt. Lett.* **40** 966
- [7] Hou D, Li P, Xi P, Zhao J, Zhang Z 2010 *Chin. Opt. Lett.* **8** 993

- [8] Zhang F, Hou D, Guo H P, Zhao J Y, Zhang Z G 2010 *Acta Opt. Sin.* **30** 671 (in Chinese) [张帆, 候冬, 郭海鹏, 赵建业, 张志刚 2010 光学学报 **30** 671]
- [9] Kim J, Cox J A, Chen J, Kartner F X 2008 *Nat. Photon.* **2** 733
- [10] Benedick A J, Fujimoto J G, Kartner F X 2012 *Nat. Photon.* **6** 97
- [11] Wang P, Zhao H, Wang Z H, Li D H, Wei Z Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4161 (in Chinese) [王鹏, 赵环, 王兆华, 李德华, 魏志义 2006 物理学报 **55** 4161]
- [12] Zhao H, Zhao Y Y, Tian J R, Wang P, Zhu J F, Ling W J, Wei Z Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 892 (in Chinese) [赵环, 赵研英, 田金荣, 王鹏, 朱江峰, 令维军, 魏志义 2008 物理学报 **57** 892]
- [13] Zhang D P, Hu M L, Xie C, Chai L, Wang Q Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 044206 (in Chinese) [张大鹏, 胡明列, 谢辰, 柴路, 王清月 2012 物理学报 **61** 044206]
- [14] Song Y, Jung K, Kim J 2011 *Opt. Lett.* **36** 1761
- [15] Song Y, Kim C, Jung K, Kim H, Kim J 2011 *Opt. Express* **19** 14518
- [16] Kim T K, Song Y, Jung K, Kim C, Kim H, Nam C H, Kim J 2011 *Opt. Lett.* **36** 4443
- [17] Hudson D D, Holman K W, Jones R J, Cundiff Steven T, Ye J, Jones D J 2005 *Opt. Lett.* **30** 2948
- [18] Kim J, Chen J, Cox J, Kärtner F X 2007 *Opt. Lett.* **32** 3519
- [19] Schibli T R, Kim J, Kuzucu O, Gopinath J T, Tandon S N, Petrich G S, Kolodziejewski L A, Fujimoto J G, Ippen E P, Kaertner F X 2003 *Opt. Lett.* **28** 947
- [20] Kim J, Kärtner F X 2009 *Laser Photon. Rev.* **4** 432
- [21] Haus H A, Mecozzi A 1993 *IEEE J. Quantum Electron.* **29** 983
- [22] Paschotta R 2004 *Appl. Phys. B* **79** 163

Timing synchronization based on mode-locked fiber lasers with attosecond timing jitter*

Qin Peng Song You-Jian[†] Hu Ming-Lie Chai Lu Wang Qing-Yue

(Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology of Ministry of Education, College of Precision Instruments and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(Received 24 May 2015; revised manuscript received 30 June 2015)

Abstract

Mode-locked fiber lasers output ultra-short pulse trains with extremely high temporal stability, showing great potential in systems that require precise timing synchronization, such as pump-probe experiments, high-speed analog-to-digital conversion, large-scale timing distribution and coherent combination. Fiber lasers are usually simpler, less costly, more efficient and more robust to the environment than solid state lasers, making them a better option for real-world applications. With the attosecond temporal resolution of the balanced optical cross-correlation (BOC) method, timing jitter of mode-locked fiber lasers has been carefully measured and optimized over the last decade. However, due to the inherently large amplified spontaneous emission noise in the long gain fiber and broad pulse width inside the laser cavity, the quantum-noise-limited timing jitter of mode-locked fiber lasers is still much higher than that of the solid state lasers. In order to further optimize the timing synchronization of mode-locked fiber lasers, larger locking bandwidth is required to suppress the low-frequency timing jitter, which contributes significantly to the total amount of residual timing jitter. In this work, tight timing synchronization between two mode-locked Yb-fiber lasers is achieved via a feedback loop built on an intra-cavity electro-optic phase modulator. Both lasers work in the stretched-pulse regime, which has been proven to support the lowest quantum-noise-limited timing jitter of mode-locked fiber laser. The output of the BOC system provides a timing error discriminator of 40 mV/fs, corresponding to 13 as resolution within the integration bandwidth. When the pulse trains from both lasers are successfully synchronized, the residual timing jitter can be measured with the same signal as that used for timing synchronization. Based on the residual timing jitter measurement, the intra-cavity dynamics of the laser and the locking parameters of the feedback loop can be further optimized and a tight synchronization with 400 kHz locking bandwidth is finally achieved. When integrated from 1 Hz to 10 MHz, the residual timing error is as low as 109 as, corresponding to 77 as averaged timing jitter of each laser. A parallel out-of-loop single-arm cross-correlation measurement is also performed to test the validity of the in-loop results, and both measurements agree with each other.

Keywords: mode-locked fiber lasers, timing synchronization, timing jitter, balanced optical cross-correlation

PACS: 42.50.Lc, 06.60.Jn, 06.30.Ft

DOI: [10.7498/aps.64.224209](https://doi.org/10.7498/aps.64.224209)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61205131, 11274239, 61227010, 61322502), the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2011CB808101, 2010CB327604), the Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University, China (Grant No. IRT13033).

[†] Corresponding author. E-mail: yjsong@tju.edu.cn