

# 两台独立飞秒激光器的脉冲序列与载波包络相位同步

田昊晨 宋有建\* 马春阳 胡明列 王清月

天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072

**摘要** 研究了两台独立运转的掺镱光纤飞秒激光器的脉冲序列与载波包络相位同步。使用平衡光学互相关的方法探测两台激光器的脉冲延迟, 控制腔内高速压电陶瓷以锁定两台激光器的重复频率, 得到两台激光器的剩余相对时间抖动为 380 as。不同的重复频率锁定带宽会对载波包络相位信号产生明显的影响, 相比于使用压电陶瓷(低锁定带宽), 使用电光调制器锁定重复频率(高锁定带宽)会使载波包络相位产生额外的噪声。将两台激光器的输出脉冲在空间上重合, 入射进入平衡探测器, 探测到两台激光器的相对载波包络频率信号。使用腔外声光调制器对两台激光器的载波包络相位进行锁定, 得到两台激光器的剩余相位噪声为 495 mrad。锁定后观测到两激光器的光谱干涉, 为相干脉冲合成奠定基础。

**关键词** 激光器; 光纤飞秒激光器; 平衡光学互相关; 载波包络相位; 声光调制器; 锁相环

**中图分类号** TN248

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201643.0801003

## Timing and Carrier Envelope Phase Synchronization from Two Independent Femtosecond Lasers

Tian Haochen Song Youjian Ma Chunyang Hu Minglie Wang Qingyue

Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology of the Ministry of Education, Ultrafast Laser Laboratory, College of Precision Instruments and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

**Abstract** We study the timing and carrier envelope phase synchronization from two independent Yb-doped femtosecond lasers. With the balanced optical correlation method used, timing delay of the pulses from two lasers is detected. Two pulse trains are synchronized through controlling the piezoelectric transducer in one of the laser cavities and the residual timing jitter is 380 as. Different repetition rate locking bandwidths yield different carrier envelope phase signal characteristics. Compared with using the piezoelectric transducer (narrow locking bandwidth), using the electro-optic modulator (wide locking bandwidth) leads excess noise to the carrier envelope phase during the repetition rate locking. The output of the two lasers is coincident in space, enters the balanced detector, and the relative carrier envelope frequency signal is detected. The carrier envelope phase is tightly locked by using an external cavity acousto-optic modulator, and the residual phase noise is 495 mrad. The spectrum coherence of the two lasers is achieved, which is the basis of coherent pulse synthesis.

**Key words** lasers; fiber femtosecond laser; balanced optical correlation; carrier envelope phase; acousto-optic modulator; phase locking loop

**OCIS codes** 140.4050; 140.3615; 140.3425

## 1 引 言

自超短脉冲激光器出现以来, 其噪声特性和对其噪声的消除一直被广泛研究<sup>[1-5]</sup>。激光器输出的超短脉

**收稿日期:** 2016-03-14; **收到修改稿日期:** 2016-04-11

**基金项目:** 国家自然科学基金(11274239, 61535009)、天津市应用基础与前沿技术研究计划(13JCQNJC01400)、强场激光物理国家重点实验室开放基金

**作者简介:** 田昊晨(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事飞秒激光技术等方面的研究。E-mail: haochentian@tju.edu.cn

**导师简介:** 胡明列(1978—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事飞秒激光技术等方面的研究。

E-mail: huminglie@tju.edu.cn

\* **通信联系人.** E-mail: yjsong@tju.edu.cn

冲序列拥有两个维度:脉冲序列的包络位置,即脉冲的重复频率为第一个维度;脉冲包络下电场与包络的拍频,即脉冲的载波包络频率为第二个维度。由于机械振动、温度漂移等环境因素和放大自发辐射效应,超短脉冲激光系统输出的脉冲序列的包络和电场都存在一定程度的噪声<sup>[4]</sup>。将单台超短脉冲激光器的重复频率和载波包络相位(CEP)均锁定到低噪声的微波源上,可实现稳定的光学频率梳运转<sup>[6]</sup>。光学频率梳在光学测量、时间基准方面都有非常广泛的应用<sup>[7-9]</sup>。

将两台飞秒激光器梳齿脉冲序列的重复频率和载波包络相位进行相对锁定,可以进一步拓展光谱,获得脉宽更小、峰值功率更高的超短脉冲输出。由于光纤飞秒激光器的噪声远大于钛宝石飞秒激光器<sup>[10]</sup>,因此将两台光纤激光器输出脉冲序列的电场进行相位锁定具有一定难度。平衡互相关(BOC)技术可使探测两脉冲在时域上相对延迟的分辨率达到阿秒量级<sup>[11]</sup>,与激光器腔内的高速压电陶瓷(PZT)结合,可以实现两台飞秒激光器重复频率的宽带锁定。通过调节激光器抽运光强度可在一定程度上调谐脉冲序列的载波包络相位,但同时也会对脉冲的重复频率产生影响,干扰重复频率的锁定<sup>[12]</sup>。将声光频移器放置在激光器腔外调节脉冲的载波包络相位可很好地解决上述问题<sup>[13]</sup>。

同时锁定两台独立运转的掺镱光纤飞秒激光器的重复频率和载波包络相位,将两台激光器的相对时间抖动和载波包络相位噪声控制在阿秒量级,对于实现相干脉冲的合成、差频效应产生太赫兹、单周期脉冲的产生、任意光学波形的产生及光学频率梳齿的复制和远距离传输等技术有重要的意义<sup>[14-17]</sup>。

## 2 基本原理

### 2.1 光学频率梳

超短脉冲时域波形序列的傅里叶变换在频域表现为梳状结构,称为光学频率梳。单个脉冲的频谱没有梳状结构,因此光学频率梳是多个脉冲在时间上相干叠加并取平均的过程。超短脉冲激光器输出的光学频率梳在频域上可以简单地表示为  $f_n = n f_r + f_0$ ,其中  $f_r$  为飞秒激光器输出脉冲的重复频率,  $f_0$  为载波包络频率,  $f_n$  为第  $n$  个梳齿的光学频率,如图 1 所示。重复频率  $f_r$  为射频段信号,表现的是脉冲包络对应的射频信号的相位特性,可以用快速响应的光电二极管直接探测或者将其与微波信号混频后探测。通过激光器的腔长反馈控制,可将重复频率信号与基准微波信号进行同相位锁定。

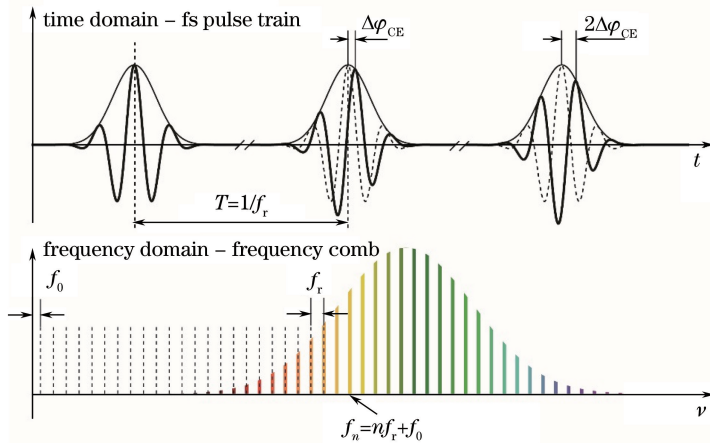


图 1 光学频率梳齿的时域与频域特性

Fig. 1 Characteristics of optical frequency comb in time and frequency domains

载波包络频率  $f_0$  也是射频波段的信号,与  $f_r$  不同的是,  $f_0$  表现的是脉冲包络下电场的相位特性。在频率域  $f_0$  表现为光学频率梳齿的整体平移,在时域上表现为脉冲电场峰值与包络峰值在传播过程中发生周期性偏移。载波包络频率源于激光器腔内色散导致的脉冲传播的相速度和群速度的失配,如果以脉冲包络为基准,脉冲在腔内每循环一周,到达输出镜时被取样一次,电场便积累一个“多余”的相位  $\Delta\varphi_{CE}$ ,

$$\Delta\varphi_{CE} = \left( \frac{1}{v_g} - \frac{1}{v_p} \right) L_c \omega_c, \quad \text{mod}[2\pi], \quad (1)$$

式中  $v_g$  为脉冲传播的群速度,  $v_p$  为脉冲传播的相速度,  $L_c$  为激光器腔长,  $\omega_c$  为载波频率,  $\text{mod}[\ ]$  表示求余运算。探测载波包络频率最常用的方法是自参考法 ( $f-2f$ ), 即将光学频率梳通过非线性光纤产生超过一个倍频程的光谱后, 长波部分的倍频与短波部分拍频可得到载波包络频率的信号。通过抽运电流控制等反馈技术可将飞秒激光器的载波包络相位与低噪声微波源进行同相位锁定, 从而获得带宽稳定的光学频率梳齿。

### 2.2 平衡光学互相关

两台激光器重复频率的锁定是探测相对载波包络频率信号和锁定的基础。由于光电二极管的响应带宽在纳秒量级, 无法分辨飞秒脉冲在时域上是否重合。探测两个飞秒光学脉冲在时域上的延迟, 最简单的方法是用光学互相关, 即将两个光学脉冲入射到非线性晶体内进行和频, 和频信号的强度与两脉冲的时间延迟相关。当延迟为零时, 和频信号最强; 当两脉冲时域完全无交叠时, 和频信号为零。但激光器的输出脉冲会表现出强度抖动, 直接影响和频信号的强度探测。2003年, Schibli等<sup>[11]</sup>提出BOC方法, 进行两路相同的光学互相关过程, 在其中一路通过色散晶体对两脉冲引入固定的时间延迟作为基准, 将两路互相关信号在探测器中相减, 得到的互相关信号强度严格与两脉冲的初始相对延迟成比例, 同时消除了激光器强度噪声的影响<sup>[18]</sup>。

### 2.3 声光调制器

声光调制器(AOM)是一种基于声光效应对光产生衍射和频移的器件, 通常使用的声波频率在射频波段。AOM广泛用于调Q激光器、通信系统的信号调制、光谱学测量中的频率控制等<sup>[19]</sup>。AOM的主要结构为: 一个压电陶瓷传感器与声光晶体联合, 一般声光晶体的材料为石英或二氧化碲, 调制信号经放大后加载到压电陶瓷上, 带动传感器产生超声波频率的振动, 超声波与晶体相互作用, 向前传播的周期性平面波使声光晶体的折射率产生周期性的改变, 经此效应调制产生的周期性结构与布拉格光栅类似, 因此当入射光与声波波面成一定角度入射时, 会发生布拉格衍射, 如图2所示。

根据布拉格方程

$$\sin \theta_B = \frac{\lambda}{2n\lambda_s} = \frac{\lambda}{2nv_s} f_s, \quad (2)$$

式中  $\theta_B$  为布拉格角,  $\lambda$  为入射光的中心波长,  $\lambda_s$  为声波波长,  $v_s$ 、 $f_s$  分别为声波传播速率和声波频率。当入射角等于布拉格角时, 在声波面上的衍射光波具有相同的相位, 满足相干加强的条件, 衍射效率最高。

声子与光子的相互作用可看作三波混频作用, 可以产生和频效应与差频效应。当超声波频率改变时, 布拉格角和入射光波的频率都会发生相应的变化。声光波矢图如图2(b)所示, 入射光波矢  $\mathbf{K}_i$ , 衍射光波矢  $\mathbf{K}_d$  和超声波波矢  $\mathbf{K}_s$  满足矢量三角形, 超声波频率改变时,  $\mathbf{K}_s$  发生改变, 导致矢量三角形改变,  $\mathbf{K}_d$  变为  $\mathbf{K}'_d$ , 布拉格衍射角发生微小改变, 使光波产生频移。

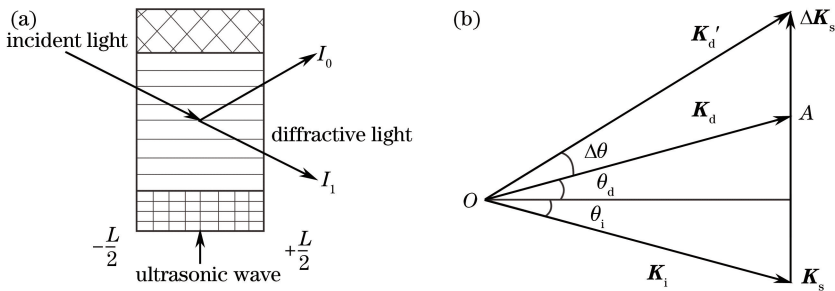


图2 声光调制器原理。(a)布拉格衍射光栅原理;(b)声光调制原理示意图

Fig. 2 Principle of acousto-optic modulator. (a) Principle of Bragg diffraction gratings; (b) principle of acousto-optic modulator

## 3 实验过程与结果

两台独立飞秒激光频率梳的同步依赖于相对重复频率与相对载波包络偏移(CEO)频率这两个维度的同时锁定。使用BOC可以实现阿秒分辨率的脉冲时间抖动探测, 通过反馈控制压电陶瓷、电光调制器(EOM)等高速腔长调谐元件, 可以紧密锁定两台光纤飞秒激光器的相对重复频率。腔外声光调制器的使

用,可在不影响振荡级运转的情况下对两台激光器的 CEO 频率进行带宽锁定。

### 3.1 激光器的重复频率锁定

实验中两台掺镱光纤飞秒激光器均为非线性偏振旋转锁模激光器。第一台振荡级为线性腔,腔内光纤总长度均为 80 cm,掺镱光纤长度为 25 cm,抽运源为中心波长为 976 nm 的低噪声激光二极管。腔内光栅对用于色散补偿及连续粗调节载波包络频率。激光器重复频率为 159 MHz。与第一台振荡级不同,第二台振荡级为  $\sigma$  腔,一个端镜粘在压电陶瓷上,达到微量调节锁定两台激光器重复频率的目的。通过调节腔内色散,两台激光器均运转在近零色散域,抽运功率为 250 mW 时锁模输出为 80 mW。

激光器的腔内净色散越接近零色散,激光器的时间抖动越低<sup>[20]</sup>。近零色散也会降低载波包络频率的噪声,基于此,实验中将两台飞秒激光器运转在近零色散域,虽然近零色散的飞秒脉冲有良好的噪声特性,却很难保证长时间、相同状态的锁模运转<sup>[21]</sup>。为此,在保证锁模状态稳定的情况下,使腔内色散尽量接近零色散。

随后将激光器输出的脉冲序列入射进入 BOC,将平衡探测器探测到的误差信号放大后加到一台激光器腔内的压电陶瓷上,控制压电陶瓷的长度,对激光器的重复频率进行调节,形成一个完整的锁相环路,锁定两台激光器的重复频率。测量锁定后误差信号的功率谱密度,结果如图 3 所示。由于压电陶瓷的响应速度有限,锁相环的锁定带宽为 10 kHz 量级。图 3 中锁定带宽之外(大于 10 kHz)的部分反映了激光器真实的时间抖动特性。锁定带宽内的部分在很大程度上被补偿。可以看出,激光器的时间抖动特性十分符合随机游走过程。功率谱密度按照  $1/f^2$  的斜率下降( $f$  为频率)。对功率谱密度图从直流到 10 MHz 积分,得到的剩余时间抖动为 380 as。

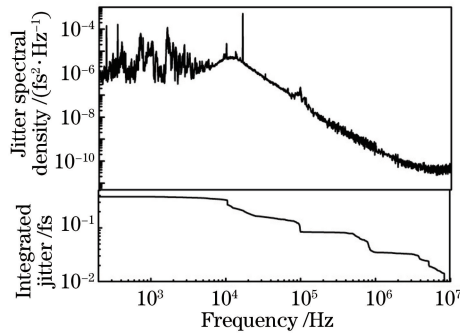


图 3 两台激光器的剩余相对时间抖动功率谱密度

Fig. 3 Power spectral density of residual timing jitter between two lasers

### 3.2 载波包络相位的探测

实现了两台低时间抖动的激光器的重复频率锁定后,脉冲包络在时域上的相对抖动得到补偿,但两台激光器输出脉冲在时域上的载波包络频率仍然不同,脉冲包络下电场随着传输距离  $z$  在空间上产生拍频,此频率为 CEO。从频域上看,两台激光器的梳齿间隔  $f_r$  已经相等, $f_{cep}$  不相等,两台激光器的  $f_{cep}$  之差为  $\Delta f_{cep}$ 。

为了探测 CEO,需在重复频率锁定的情况下,两台激光器的输出脉冲在空间上重合,一同进入平衡探测器。由于使用偏振分束器(PBS)将两路脉冲合束,两路脉冲的偏振态正交,无法直接看到 CEO 信号。为解决此问题,当两路脉冲在 PBS 上合束后,用半波片将两脉冲的偏振态一同旋转  $45^\circ$ ,然后再经过另一个 PBS, PBS 透过的平行偏振态的脉冲与反射的水平偏振态的脉冲均包含两台激光器的脉冲,用平衡探测器探测两路脉冲,与 BOC 的效果相同,平衡探测器会消除激光器强度噪声的影响。

实验中用示波器探测到的 CEO 信号是频率为 577.37 kHz 的周期信号,该周期信号存在许多毛刺,如图 4(a)所示。用频谱分析仪探测该信号,在 10 kHz 分辨率带宽下,信号的信噪比大于 60 dB,如图 4(b)所示。可以看出,这个相对的 CEO 信号并非理想的正弦信号,含有许多噪声成分。

CEO 信号的频率一直在慢漂移。经测量,CEO 在 30 min 内从 77.1 MHz 漂移至 71.5 MHz,原因在于 CEO 对环境因素十分敏感,激光腔内的温度、湿度变化、增益介质的热效应均会对其产生影响。众多因素的结合使其向某一方向慢漂移,导致 CEO 的长期锁定存在一定困难,需将整个系统放在一个尽量封闭的空间内,激光器开机后需经一段时间预热,待外部环境稳定再进行锁定。

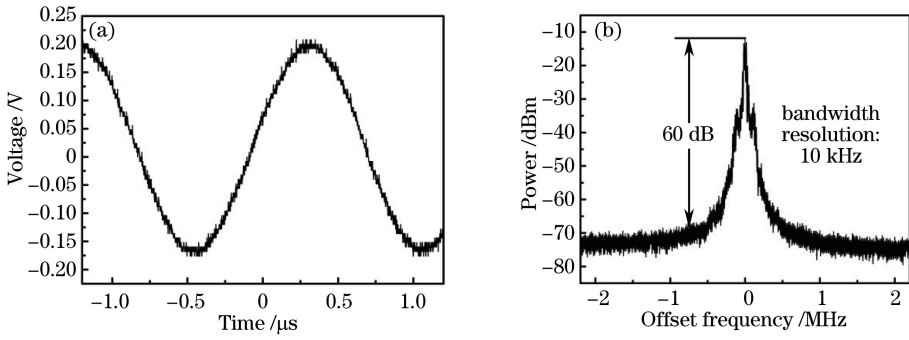


图 4 两台激光器的相对载波包络频率。(a)时域的 CEO 信号;(b)频域的 CEO 信号

Fig. 4 Relative carrier envelope frequency between two lasers. (a) CEO signal in time domain; (b) CEO signal in frequency domain

### 3.3 载波包络相位的锁定

实现两台激光器的时间同步后,用平衡探测的方法探测到 CEO 的拍频信号。为了实现 CEO 的稳定,第一台振荡级输出的脉冲经聚焦后进入声光调制器,光斑直径为  $113 \mu\text{m}$ ,有效地缩短了声波经过光斑的时间,增大了 CEO 的锁定带宽。将拍频信号经锁相控制器加载到驱动声光频移器的压控振荡器上,形成完整的反馈环路。整个实验系统如图 5 所示。图 5 中 DC 为色散补偿,BS 为分束器,BOC 为平衡光学互相关,DL 为时间延迟,VCO 为压控振荡器,FFT 为快速傅里叶变换,RF 为射频频谱,BD 为平衡探测器。

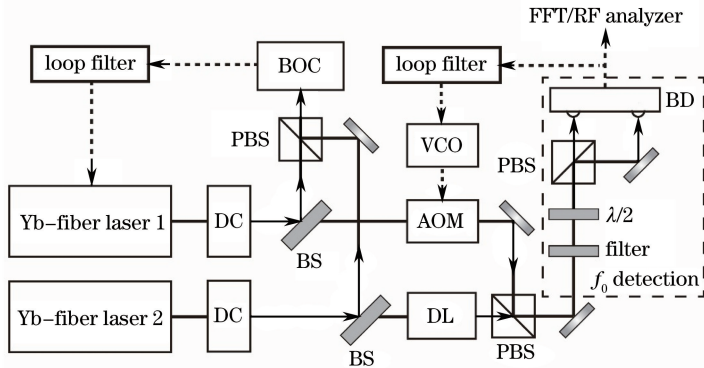


图 5 实验系统示意图

Fig. 5 Experimental setup of the whole system

锁定后,剩余载波包络相位噪声的功率谱密度如图 6 所示,锁定带宽为 300 kHz,从直流到 5 MHz 积分,得到剩余相位噪声为 446 mrad。相比于传统  $f-2f$  方法对 CEO 噪声的探测,该方法避免了超连续过程引入的过量噪声,因此,锁相环带宽外的部分真实体现了光学频率梳的 CEO 量子噪声,为研究 CEO 噪声打下基础。目前只能实现短期锁定,长期锁定的稳定性需要改善。

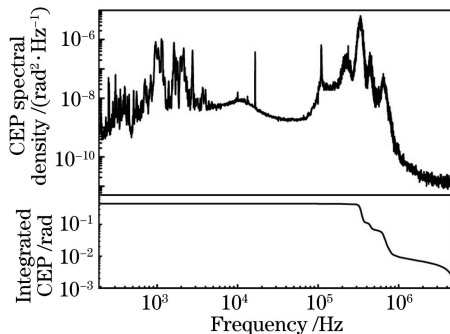


图 6 锁定后载波包络相位的功率谱密度

Fig. 6 CEP power spectral density after locking

## 4 分析与讨论

### 4.1 重复频率锁定带宽对载波包络频率的影响

将 EOM 放置于激光器腔内也可以调节激光器的重复频率,相比于压电陶瓷, EOM 的响应速度更快,因而重复频率的锁定带宽也更高。对比分别采用压电陶瓷和 EOM 锁定两台激光器的重复频率对 CEO 信号的影响。如图 7 所示,使用压电陶瓷的锁定带宽为 20 kHz,使用 EOM 的锁定带宽为 400 kHz。使用压电陶瓷锁定重复频率时,CEO 的线宽小于使用 EOM 锁定。因此,使用压电陶瓷的方法更适合载波包络相位的锁定。可用光学频率梳齿的橡皮筋理论解释该现象。量子波动引入的光学相位噪声的固定点在光谱中心,即中心波长附近梳齿的噪声比光谱两翼梳齿的噪声低,而腔长波动引入的光学相位噪声的固定点在零频率,即零频率附近的梳齿噪声较低,随着频率增加,梳齿噪声增加。因此当重复频率的锁定带宽过高,由量子波动引入的时间抖动也被部分补偿时,由于补偿技术的错误,腔长的改变会对每一个光学频率梳齿引入额外的相位噪声,这一额外的相位噪声与 CEO 的噪声相等<sup>[3]</sup>。

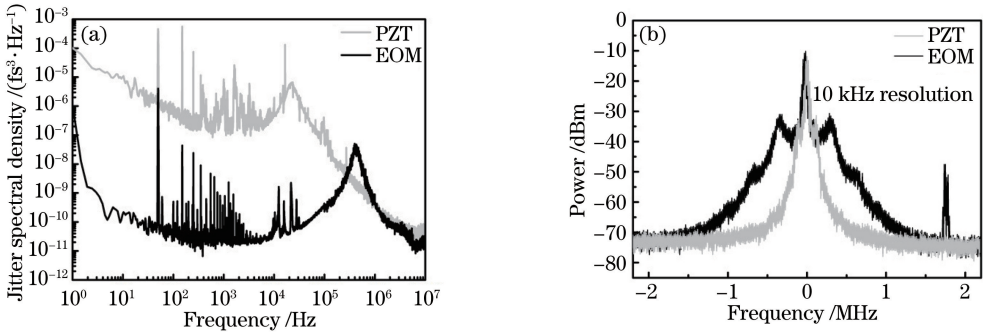


图 7 重复频率锁定带宽对 CEO 的影响。(a) PZT 和 EOM 锁定重复频率剩余时间抖动功率谱密度的对比;(b) CEO 的对比  
Fig. 7 Influence on CEO signal under different repetition rate locking bandwidths. (a) Comparison of power spectral density using PZT and EOM to lock the repetition rate; (b) comparison of CEO signal

### 4.2 光谱合成结果分析

对两台激光器合成后的光谱进行探测,如图 8(a)所示,由于脉冲包络和电场均得到严格控制,两台激光器表现出很好的相干性,光谱有明显的干涉条纹。为了评价长期锁定的稳定性,测量了 20 s 内两台独立飞秒激光器锁相的干涉光谱随时间的演化,如图 8(b)所示,由 20 个干涉光谱构成,单个光谱的测量积分时间为 1 s。从图 8 可看出,在 20 s 内,干涉图样的中心波长并没有出现显著的漂移,说明锁相环路工作正常。但是,干涉条纹在 1 s 尺度上的重复性比较差,这可能是由  $f_0$  的探测光路不稳定引起。需要指出的是,基于光学外差的  $f_0$  信号的提取实际上是通过两台激光器的干涉实现的,这要求在合束之前两台激光器的光束路径保持纳米量级的相对长度稳定性。由于目前的探测装置没有采取有效的隔振措施,机械振动很可能会频繁地引起大于 1/4 光波长的随机长度突变,这种相位突变会引起锁相状态的跳变。如果这种相位突变过大,会引起锁相环失锁。一般情况下,锁相持续时间在数十秒量级。下一步工作将在  $f_0$  探测光路中进行被动

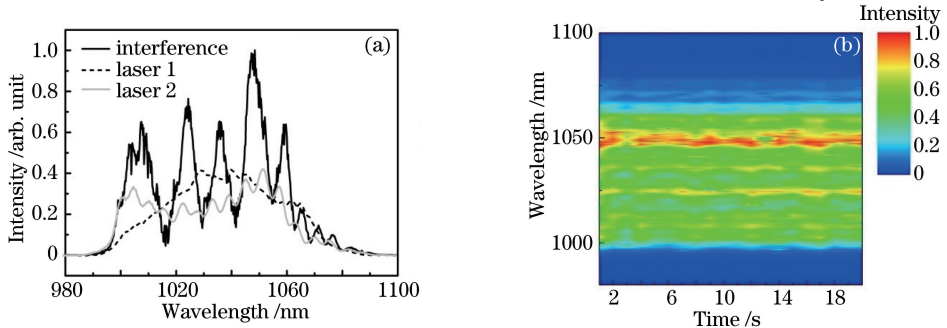


图 8 两台锁定的飞秒激光器的光谱干涉实验结果。(a)光谱干涉图样;(b)干涉光谱随时间的演化

Fig. 8 Coherence spectra of two phase-locked femtosecond lasers. (a) Spectra of dual-laser interference; (b) evolution of interference patterns

振动隔离,抑制气流和机械振动的影响,改善光路的长度稳定性。

此外,激光器的锁模稳定性也是影响两台飞秒激光器长期锁相的主要因素。当单台激光器不稳定时,尤其是出现轻微的调Q锁模时,锁定时间只能在数秒量级,这是由强度噪声耦合的 $f_0$ 波动引起的,可以通过优化非线性偏振旋转锁模状态加以改善。下一步工作中,为改善激光器的稳定性,需要更精细地优化腔内色散,改善激光器的强度噪声,并压缩自由运转的 $f_0$ 线宽。

## 5 结 论

实验研究了两台独立运转的掺镱光纤飞秒激光器的脉冲序列与载波包络相位同步。锁相环锁定后得到两台激光器的剩余相对时间抖动为380 as,剩余相位噪声为495 mrad。电场锁定的短期稳定性较好,长期稳定性还有很大的提升空间。研究发现,重复频率的锁定带宽并不是越宽越好,如果压电陶瓷、电光调制器等改变激光器腔长的器件恰好补偿了由机械振动产生的时间抖动,载波包络相位不会被影响,但如果改变激光器腔长的器件锁定带宽过高,不仅补偿了机械振动产生的时间抖动,还补偿了量子噪声引入的时间抖动,会使载波包络相位产生额外的噪声,因此锁定载波包络相位时使用压电陶瓷锁定两台激光器的重复频率。

将光学频率梳的两个维度信息都进行相位锁定,两台光学频率梳的每根梳齿都有很好的相干性,因此合成后激光器的光谱叠加会产生周期性的光谱调制。两台独立运转的激光器的脉冲序列与载波包络相位同步,对于相干脉冲的合成、差频效应产生太赫兹波、单周期脉冲的合成、任意光学波形的产生及光学频率梳齿的复制和远距离传输等技术有重要的意义。

## 参 考 文 献

- 1 Paschotta R. Noise of mode-locked lasers (part I): Numerical model[J]. Applied Physics B, 2004, 79(2): 153-162.
- 2 Paschotta R. Noise of mode-locked lasers (part II): Timing jitter and other fluctuations[J]. Applied Physics B, 2004, 79(2): 163-173.
- 3 Paschotta R, Schlatter A, Zeller S C, *et al.* Optical phase noise and carrier-envelope offset noise of mode-locked lasers [J]. Applied Physics B, 2006, 82(2): 265-273.
- 4 Newbury N R, Swann W C. Low-noise fiber-laser frequency combs [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2007, 24(8): 1756-1770.
- 5 Gao Kang, Guo Xueshi, Zhao Ningbo, *et al.* Measurement of the noise of Yb-doped femtosecond photonic crystal fiber laser [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0927001.  
高亢, 郭学石, 赵宁波, 等. 掺镱光子晶体光纤飞秒激光器噪声的测量 [J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0927001.
- 6 Diddams S A. The evolving optical frequency comb [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(11): B51-B62.
- 7 Lee J, Kim Y J, Lee K, *et al.* Time-of-flight measurement with femtosecond light pulses [J]. Nature Photonics, 2010, 4(10): 716-720.
- 8 Wu Xuejian, Li Yan, Wei Haoyun, *et al.* Femtosecond optical frequency combs for precision measurement applications [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(3): 030001.  
吴学健, 李岩, 尉昊赞, 等. 飞秒光学频率梳在精密测量中的应用 [J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(3): 030001.
- 9 Diddams S A, Udem T, Bergquist J C, *et al.* An optical clock based on a single trapped  $^{199}\text{Hg}^+$  ion [J]. Science, 2001, 293(5531): 825-828.
- 10 Paschotta R. Timing jitter and phase noise of mode-locked fiber lasers [J]. Optics Express, 2010, 18(5): 5041-5054.
- 11 Schibli T R, Kim J, Kuzucu O, *et al.* Attosecond active synchronization of passively mode-locked lasers by balanced cross correlation [J]. Optics Letters, 2003, 28(11): 947-949.
- 12 Washburn B R, Swann W C, Newbury N R. Response dynamics of the frequency comb output from a femtosecond fiber laser [J]. Optics Express, 2005, 13(26): 10622-10633.
- 13 Koke S, Grebing C, Frei H, *et al.* Direct frequency comb synthesis with arbitrary offset and shot-noise-limited phase noise [J]. Nature Photonics, 2010, 4(7): 462-465.
- 14 Cox J A, Putnam W P, Sell A, *et al.* Pulse synthesis in the single-cycle regime from independent mode-locked lasers using attosecond-precision feedback [J]. Optics Letters, 2012, 37(17): 3579-3581.
- 15 Fong B J, Lin W T, Wu S Y, *et al.* Relative carrier-envelope phase stabilization of hybridly synchronized ultrafast Yb and

- Er fiber-laser systems with the feed-forward scheme[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(6): 966-969.
- 16 Chan H S, Hsieh Z M, Liang W H, *et al.* Synthesis and measurement of ultrafast waveforms from five discrete optical harmonics[J]. *Science*, 2011, 331(6021): 1165-1168.
- 17 Ma Chunyang, Song Youjian, Liu Xinyu, *et al.* Femtosecond precision timing distribution over km level stabilized fiber link for application in XFEL[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28(5): 055102.  
马春阳, 宋有建, 刘新宇, 等. 面向 XFEL 的 km 级光纤链路的 fs 精度时钟分布[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28(5): 055102.
- 18 Ma Xuelian, Liu Lu, Zhang Zhigang, *et al.* Theoretical and experimental study on timing jitter measurement for transmitted pulse using balanced optical cross correlation scheme[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(1): 59-64.  
马雪莲, 刘 璐, 张志刚, 等. 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[J]. *光学学报*, 2010, 30(1): 59-64.
- 19 Yang Sha, Qu Ronghui, Liu Rui, *et al.* Recent progress of acousto-optic devices and applications in fibers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, 43(1): 67-70.  
阳 莎, 瞿荣辉, 刘 锐, 等. 声光调制光纤器件及其应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, 43(1): 67-70.
- 20 Song Y, Kim C, Jung K, *et al.* Timing jitter optimization of mode-locked Yb-fiber lasers toward the attosecond regime[J]. *Optics Express*, 2011, 19(15): 14518-14525.
- 21 Nugent-Glandorf L, Johnson T A, Kobayashi Y, *et al.* Impact of dispersion on amplitude and frequency noise in a Yb-fiber laser comb[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(9): 1578-1580.