

文章编号 1004-924X(2021)02-0211-09

## 可调谐激光器激光波长宽范围自动偏频锁定

谢建东, 严利平\*, 陈本永, 杨伟雷

(浙江理工大学 机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:**针对激光多波长干涉绝对测距中构建多级合成波长的需求,提出了一种锁至飞秒光频梳的可调谐激光器(External Cavity Diode Laser, ECDL)输出激光波长的宽范围自动偏频锁定方法。首先,设计了光栅+双凸透镜梳齿滤波的拍频信号探测单元,实现了宽范围ECDL激光波长与目标梳齿的拍频探测。接着,采用锁相放大原理对拍频信号进行鉴频鉴相,具备捕获带宽大、鉴相范围宽和鉴相精度高的优点。然后,利用多重闭环控制实现了ECDL输出激光波长宽范围的自动调节及偏频锁定。实验结果表明,本方法实现了10 nm波长范围内ECDL至光频梳的自动锁定,拍频信号信噪比的平均值约为35.9 dB;在4 h内,ECDL激光频率的标准差为1.49 kHz,1 s平均时间的相对阿伦方差为 $4.76 \times 10^{-12}$ ,满足精密干涉测量中宽范围波长调节和高精度稳频的要求。

**关键词:**可调谐激光器;激光稳频;偏频锁定;拍频探测;飞秒光频梳;鉴频鉴相器

**中图分类号:**TN248.4;TN249;TB939 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20212902.0211

## Automatic offset-frequency locking of external cavity diode laser in wide wavelength range

XIE Jian-dong, YAN Li-ping\*, CHEN Ben-yong, YANG Wei-lei

(College of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University,  
Hangzhou 310018, China)

\* Corresponding author, E-mail: yanliping@zstu.edu.cn

**Abstract:** To construct different synthetic wavelengths for multi-wavelength interferometric absolute distance measurements, an automatic offset-frequency locking method was proposed to lock the frequency of a tunable external cavity diode laser (ECDL) to a femtosecond optical frequency comb (OFC) in a wide wavelength range. First, based on the grating and double convex lens comb filtering, a beat signal detection unit was designed. In addition, the beat signal detection between the ECDL and target comb modes in a wide wavelength range was realized. A phase-frequency detector was then designed based on the principle of a lock-in amplifier; phase-locking with a large capture range, wide monotonic phase range, and high accuracy was achieved. Finally, multiple closed-loop controls were adopted to realize automatic adjustment and offset-frequency locking of the ECDL over a wide wavelength range. Experimental results show that the proposed method can automatically lock the ECDL to OFC in the range of 10 nm, and the average signal-to-noise ratio of the beat signal is approximately 35.9 dB. Over 4 h, the standard deviation of the

收稿日期:2020-10-14;修订日期:2020-12-07.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51527807, No. 51875530);国家重点研发计划资助项目(No. 2016YFF0200405);浙江省自然科学基金资助项目(No. LZ18E05003)

ECDL laser frequency is approximately 1.49 kHz, and the relative Allan deviation is approximately  $4.76 \times 10^{-12}$  at 1 s. The proposed automatic offset-frequency locking method can satisfy the requirements of wide-range wavelength adjustment and high-precision frequency stabilization in precision interferometry.

**Key words:** external cavity diode laser; laser frequency stabilization; offset-frequency locking; beat signal detection; femtosecond optical frequency comb; phase-frequency detector

## 1 引言

激光多波长干涉绝对距离测量技术中,通常采用多台固定波长激光器或者一台可调谐激光器(External Cavity Diode Laser, ECDL)作为光源,构建从大到小的多级合成波长。其中,大的合成波长实现大范围测量,小的合成波长实现高精度测量。当采用ECDL输出波长相差较大的两个单波长来构建小合成波长时,需要输出波长范围宽且频率稳定的可调谐激光<sup>[1-5]</sup>。飞秒光频梳(Optical Frequency Comb, OFC)是一种包含大量等频率间隔、高稳定性梳齿的宽光谱梳状光源<sup>[6]</sup>,采用偏频锁定技术将ECDL锁定至OFC,可实现激光波长的高精度稳定<sup>[7-11]</sup>,但是要构建多级合成波长,需要解决ECDL宽波长范围的拍频信号探测和自动偏频锁定问题。

ECDL与OFC的拍频信号探测主要有直接探测法与梳齿滤波法<sup>[12]</sup>。直接探测法将ECDL与OFC合光后直接照射光电探测器获得拍频信号,可实现宽波长范围的拍频信号探测<sup>[11]</sup>,但其中大量不参与拍频的梳齿引入的散粒噪声会降低信噪比<sup>[13]</sup>,达不到偏频锁定稳定要求的30 dB<sup>[12]</sup>。梳齿滤波法采用光栅与狭缝将OFC中大量不参与拍频的梳齿滤除,减少了散粒噪声对拍频信号的影响,信噪比可提高至40 dB,对应的波长探测范围约为1 nm<sup>[12]</sup>。但是,当ECDL波长调节数纳米时,光栅衍射光束会偏转较大的角度,使得ECDL光束和目标梳齿无法照射至光电探测器,导致拍频信号丢失。因此,将ECDL锁定至OFC时,上述方法难以实现宽波长范围内的高信噪比拍频信号探测。

ECDL在宽波长范围内自动调节并锁定至OFC时,需要实时判断ECDL频率与目标梳齿的频差,当频差小于目标值(如20 MHz)时,鉴频鉴相器获得拍频信号的相位误差并通过比例积分(PI)控制闭环调节ECDL频率,最终将其偏频锁

定至目标梳齿,这就要求鉴频鉴相器具有MHz量级的捕获带宽,足够大的鉴相范围与足够高的鉴相精度。现有的模拟鉴频鉴相器的鉴相精度高,但鉴相范围仅为 $\pi$  rad,且容易出现跳周问题,导致捕获带宽较小<sup>[14]</sup>。数字鉴频鉴相器具有较大的捕获带宽和鉴相范围,但可能出现 $\pm 1$ 的误差<sup>[15]</sup>,鉴相精度仅为 $2\pi$  rad。因此,兼顾捕获带宽与鉴相精度的鉴频鉴相是自动偏频锁定的关键。

针对上述问题,本文提出基于光栅+双凸透镜梳齿滤波的拍频信号探测方法和基于锁定放大器原理的鉴频鉴相方法,实现了ECDL波长在宽波长范围内自动偏频锁定至OFC。

## 2 基于OFC的ECDL激光波长宽范围自动偏频锁定

本文设计的ECDL波长在大范围内自动偏频锁定至OFC的原理如图1所示。实验装置包括光源系统、拍频信号探测单元和鉴频鉴相及相位锁定单元3个模块。

### 2.1 宽波长范围高信噪比激光拍频信号探测

ECDL稳定锁至OFC时,一般要求拍频信号信噪比优于30 dB。光电探测器拍频信号的信噪比数学模型可简化为<sup>[12,16]</sup>:

$$S_{NR} \approx 10 \lg \left( \frac{\eta}{h\nu B_w} \cdot P_n \cdot \frac{m}{m+N} \right), \quad (1)$$

其中: $\eta$ 与 $B_w$ 分别表示光电探测器的量子效率与带宽, $h\nu$ 表示单光子的能量, $P_n$ 表示单根梳齿功率, $m = P_{CW}/P_n$ 表示激光功率与梳齿功率的比值, $N$ 表示进入光电探测器的梳齿数, $P_{CW}$ 为ECDL的功率。式(1)表明,当激光功率和单根梳齿功率一定时,在满足拍频波长范围的情况下,减少进入探测器的梳齿总数或降低探测器带宽可提高拍频信号的信噪比。

为了实现宽波长范围、高信噪比的拍频探测,本文设计了光栅+双凸透镜梳齿滤波的拍频

探测单元,如图 1(b)所示。ECDL 激光和 OFC 激光经光纤合束后耦合输出,倒置扩束镜将光束缩小至 1 mm 后入射至光栅,光栅衍射的发散光束经凸透镜 1、狭缝遮光板和凸透镜 2 后,照射至光电探测器的感光区域(即 A 点)后获得拍频信号。图 1(b)的光路中,凸透镜 1(焦距为  $f_1$ ,焦点在 O 点)将光栅衍射的发散梳齿转换为平行光,待锁定波长范围内的梳齿可从狭缝遮光板通过,经凸透镜 2(焦距为  $f_2$ ,焦点在 A 点)汇聚后到达光电探测器。可以看出,在不调整任何光路的情况下,拍频探测波长范围内的任意 ECDL 激光经双凸透镜聚焦后,都能和相邻的梳齿聚焦到 A 点生成拍频信号。作为对比,图 1(b)中的虚线 OB 和 OC 表示未经双凸透镜时,波长不同的两束

ECDL 激光经光栅反射后到达探测面上的不同位置,探测器无法获得拍频信号。

对于重复频率为 250 MHz、波长为  $(780 \pm 20)$  nm 的飞秒 OFC,相邻梳齿间波长差为  $\Delta\lambda_{\text{rep}} \approx 0.5$  pm,梳齿总量约为  $40 \text{ nm}/0.5 \text{ pm} = 80000$ 。当拍频波长探测范围为  $\lambda_w = 10$  nm 时,需要进入探测器的梳齿数量仅为  $\lambda_w/\Delta\lambda_{\text{rep}} = 20000$ 。因此,为了提高拍频信号的信噪比,需要滤除 60000 根不参与拍频的梳齿。图 1(b)中,狭缝的通光宽度  $d$  与凸透镜 1 的焦距应满足下述公式:

$$\frac{d}{f_1} \approx \lambda_w \cdot \Delta\theta, \tag{2}$$

式中  $\Delta\theta$  表示光栅的角色散率。

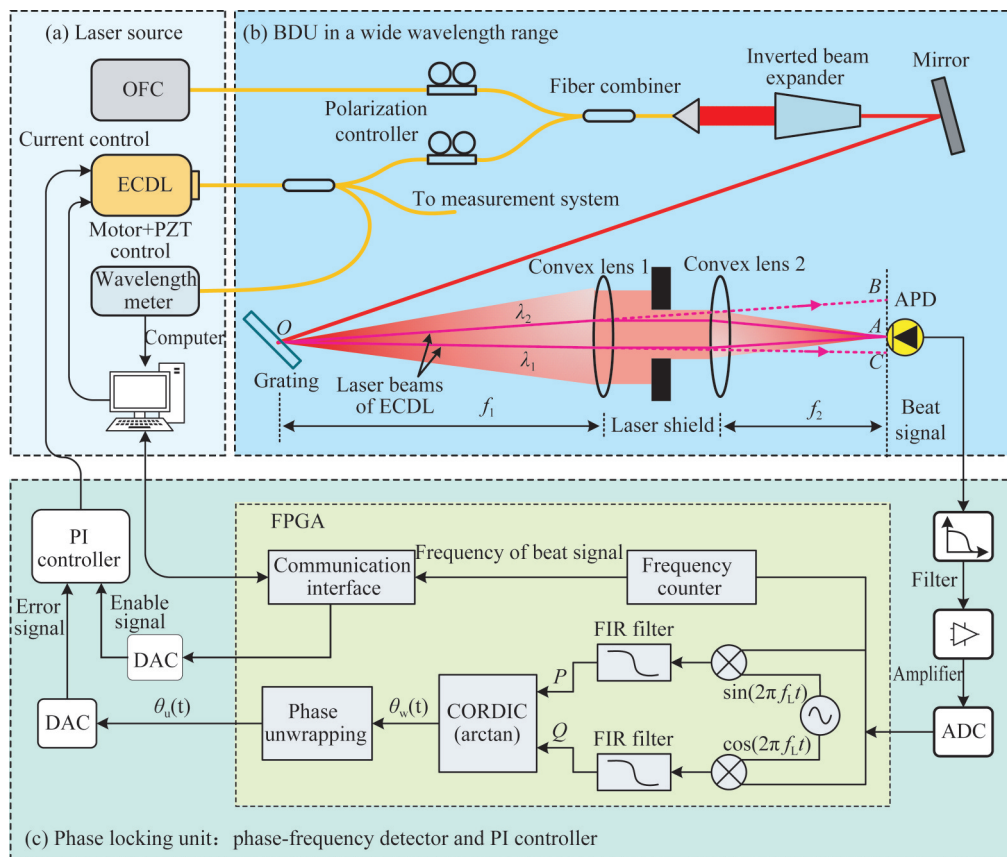


图 1 ECDL 激光波长在大范围内自动偏频锁定至 OFC 的原理。(a)光源系统;(b)宽波长范围的拍频信号探测单元;(c)相位锁定单元

Fig. 1 Schematic diagram of laser wavelength automatic offset-frequency locking to femtosecond optical frequency comb in a wide wavelength range. (a) Laser source; (b) BDU in a wide wavelength range; (c) Phase locking unit

## 2.2 高精度、大捕获带宽的拍频信号鉴频鉴相

基于锁相放大器的拍频信号鉴频鉴相和相位锁定原理如图 1(c)所示。滤波放大后的拍频信号经 125 MHz、16 位的模数转换器采样,进入现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)进行鉴频鉴相处理,FPGA 开发板采用与 OFC 系统相同的参考时钟。拍频信号可表示为:

$$S(t) = A \sin(2\pi f_b t + \varphi), \quad (3)$$

其中: $A$ ,  $f_b$  和  $\varphi$  分别表示拍频信号的幅值、频率和相位,  $t$  表示时间。

拍频信号分别与频率合成器生成的本振信号  $\sin(2\pi f_L t)$  与  $\cos(2\pi f_L t)$  混频,再经低通滤波后得到正交信号  $P(t)$  和  $Q(t)$ :

$$P(t) = -\text{FIR}[S(t)\sin(2\pi f_L t)] = \frac{A}{2} \cos(2\pi \Delta f \cdot t + \varphi), \quad (4)$$

$$Q(t) = \text{FIR}[S(t)\cos(2\pi f_L t)] = \frac{A}{2} \sin(2\pi \Delta f \cdot t + \varphi), \quad (5)$$

其中: $\text{FIR}[\ ]$  表示 FIR 低通滤波运算,  $\Delta f$  表示拍频信号与本振信号的频差。

ECDL 锁定前,计算机借助其控制器和波长计将  $f_b$  调整在  $(f_L \pm 20)$  MHz 内。设置 FIR 低通滤波器的截止频率为 20 MHz,则  $\Delta f$  在  $\pm 20$  MHz 以内时都可对拍频信号进行鉴频鉴相,捕获带宽为 40 MHz。

通过坐标旋转运算器(CORDIC)对正交信号  $P(t)$  和  $Q(t)$  进行反正切运算,获得拍频信号的小数相位差  $\theta_w(t)$ :

$$\theta_w(t) = \arctan\left[\frac{Q(t)}{P(t)}\right] = \text{mod}_{2\pi}\left[2\pi \Delta f \cdot t + \varphi\right], \quad (6)$$

其中: $\text{mod}_{2\pi}[\ ]$  表示余数关系,即  $\theta_w(t)$  等于相位差  $2\pi \Delta f \cdot t + \varphi$  对  $2\pi$  的余数,  $\theta_w(t)$  的取值为  $-\pi \sim \pi$ 。

在 ECDL 未锁定时,拍频信号与本振信号的频差不等于零 ( $\Delta f \neq 0$ ),  $\theta_w(t)$  呈锯齿形周期性变化,每个周期都有从  $\pi \sim -\pi$  或者从  $-\pi \sim \pi$  的相位跳变,在偏频锁定中容易产生跳周问题。为了解决跳周问题,本文对  $\theta_w(t)$  进行相位解缠绕来提高鉴相范围。解缠绕相位差  $\theta_u(t)$  表示为:

$$\theta_u(t) = 2\pi \cdot k + \theta_w(t) = 2\pi \Delta f \cdot t + \varphi, \quad (7)$$

其中  $k$  表示  $\theta_w(t)$  变化  $2\pi$  的次数。解缠绕相位差  $\theta_u(t)$  在 FPGA 内用 16 位整数表示,高 8 位为整周期数  $k$ ,低 8 位为小数相位差  $\theta_w(t)$ 。 $\theta_u(t)$  通过 125 MHz、16 位数模转换器转换为误差电压信号,经 PI 控制器闭环调制 ECDL 电流,实现 ECDL 至飞秒 OFC 的偏频锁定。

基于锁相放大器的鉴频鉴相方法与模拟鉴相法和数字鉴频鉴相法的鉴相结果对比如图 2 所示。模拟鉴相器的鉴相范围仅为  $\pi$  rad;数字鉴频鉴相器的鉴相范围大,但出现  $\pm 1$  误差时鉴相精度仅为  $2\pi$  rad;本文设计的鉴相方法通过相位解缠绕,兼具鉴相范围大和鉴相精度高的优点,可以对频率在  $f_L \pm 20$  MHz 内的拍频信号进行鉴频鉴相处理,鉴相范围为  $2\pi \times 2^8$  rad,鉴相精度为  $2\pi/2^8$  rad。

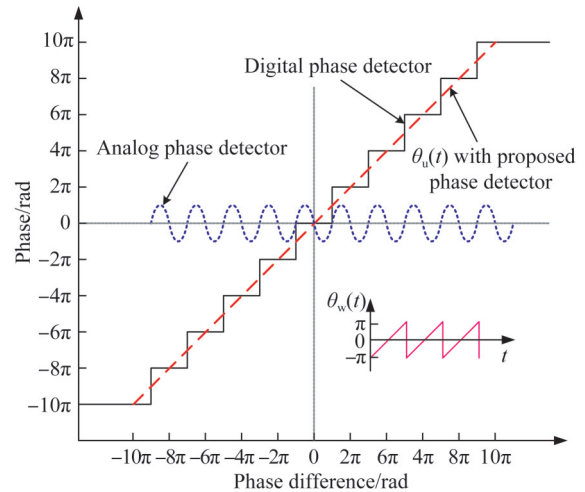


图 2 三种不同鉴相方法的鉴相结果比较

Fig. 2 Comparison of results of three different phase detectors

## 2.3 ECDL 激光波长宽范围自动偏频锁定

在图 1(a)所示的光源系统中,ECDL 输出激光波长/频率有 3 种调制方式:直流电机和压电驱动器(PZT)通过控制外腔反射镜角度,分别实现纳米级和数十 GHz 的激光波长/频率调节;电流调制端控制激光二极管电流实现几百 MHz 的激光频率快速调节。图 3 为本文实现的 ECDL 波长在宽范围内的自动调节和偏频锁定流程。首先,通过波长计测得 ECDL 频率  $f_M$ ,比较  $f_M$  和设定目标频率  $f_T$ ,当两个频率值相差较大(大于 4 GHz)时,通过直流电机调制端对激光频率快速粗调;

当频差小于 4 GHz 但仍然大于 20 MHz 时,通过 PZT 调制端对激光频率进行精调;当频差小于 20 MHz 时,启动图 1(c)所示的相位锁定系统,通过电流调制实现 ECDL 频率的偏频锁定。锁定后 ECDL 频率为:

$$f_{\text{ECDL}} = N_{\text{ECDL}} \cdot f_{\text{rep}} + 2f_{\text{ceo}} + f_{\text{b}}, \quad (8)$$

其中: $f_{\text{rep}}$ 和 $f_{\text{ceo}}$ 分别为 OFC 的重复频率和偏置频率,锁定时 $f_{\text{b}} = f_{\text{L}} = 31.25 \text{ MHz}$ ,梳齿序号 $N_{\text{ECDL}}$ 可通过波长计测得的 ECDL 频率来计算。

图 1(c)中,为了避免 ECDL 激光频率长期漂移导致电流调节失锁,对 PI 控制器的输出电压进行实时监测。当输出电压超过阈值时,微调 PZT 偏置电压,在闭环控制作用下,PI 控制器输出电压将返回到阈值范围内。结合电流调制的短期频率锁定与 PZT 的长期频率漂移补偿,实现 ECDL 频率的长期锁定。

当 ECDL 处于锁定状态时,若改变目标梳齿频率 $f_{\text{T}}$ ,系统会自动解锁激光器,通过电机粗调、PZT 精调将其频率调整至 $f_{\text{T}}$ 附近,再重新启动相位锁定。因此,该方法能够自动调节 ECDL 频率并将频率锁至不同的梳齿。

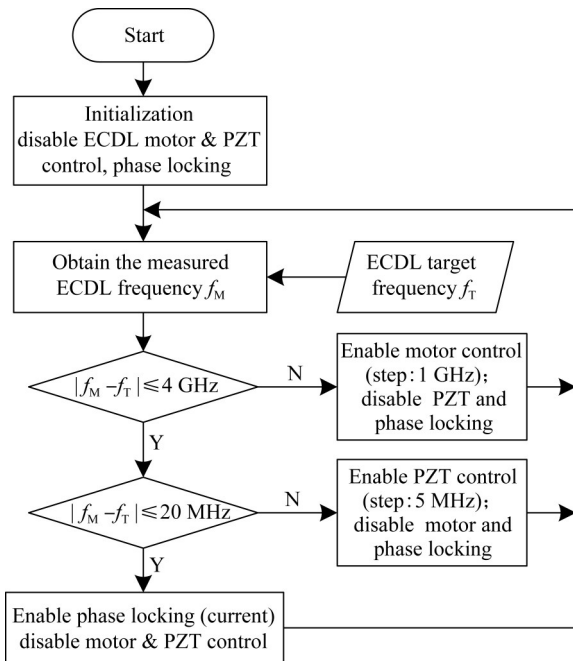


图 3 ECDL 激光波长大范围自动调节和偏频锁定流程

Fig. 3 Flow chart of ECDL wavelength automatic adjustment and offset-frequency locking in wide wavelength range

### 3 实验与结果分析

为了验证所设计的激光波长宽范围拍频探测和自动偏频锁定系统的有效性和可行性,搭建了如图 4 所示的实验装置。采用 Menlo System 公司的 FC1500-250 飞秒 OFC 系统, $f_{\text{rep}}$ 和 $f_{\text{ceo}}$ 分别为 250 MHz 和  $-20 \text{ MHz}$ ,光谱范围为  $(780 \pm 20) \text{ nm}$ ,功率约为 150 mW;待锁定 ECDL 为 New Focus 公司的 TLB6712,波长为 765~781 nm,功率约为 25 mW;ECDL 频率由 Highfinesse 公司的 WSU30 波长计测量,精度为 30 MHz;采用 FPGA 开发板设计了基于锁相放大原理的鉴频鉴相器,结合 New Focus 公司的 LB1005 PI 控制器实现了偏频锁定,本振信号频率 $f_{\text{L}}$ 设置为 31.25 MHz。飞秒 OFC 和 FPGA 开发板溯源至同一频率基准(Menlo System 公司的 GPS-8),其平均时间为 1 s 时的相对稳定性约为  $4 \times 10^{-12}$ 。开展了激光波长宽范围拍频信号探测、长期锁定稳定性测试和大范围自动调节和锁定实验。

如图 4 所示,OFC 与 ECDL 的合光经光栅和凸透镜 1 后,在激光遮挡板处形成宽度约为 18 mm 的光带,光栅的角色散率约为  $2.512 \text{ mrad/nm}$ ,凸透镜 1 的焦距为 100 mm。根据式(2),当遮挡板透过的激光波长为 770~780 nm 时,狭缝宽度约应为 2.5 mm,考虑到 ECDL 光束直径约接近 1 mm,实验中狭缝宽度调整为 4 mm 左右。拍频信号采用 Newport 公司的 1601FS-AC 光电接收器进行探测,该接收器中硅 PIN 光电二极管的光电转换效率约为  $0.5 \text{ A/W}$ ,带宽为  $30 \text{ kHz} \sim 1 \text{ GHz}$ ,低噪声放大器的增益为 15。照射至接收器上的 OFC 总功率约为 0.46 mW,ECDL 功率约为 0.66 mW,接收器的输出信号经 90 MHz 的低通滤波器后,信噪比理论值约为 38.5 dB。

#### 3.1 激光波长宽范围拍频信号探测

图 5 为 ECDL 输出波长为 770~780 nm 时拍频信号的探测结果。从图中可以看出,在分辨率带宽(Resolution Band Width, RBW)和视频带宽(Video Band Width, VBW)均为 100 kHz 时,波长为 775 nm 时信噪比最低,约为 34.3 dB,波长为 773 nm 时信噪最高,达到 36.8 dB,拍频信号信噪比的平均值约为 35.9 dB,满足偏频锁定时拍频信号信噪比高于 30 dB 的要求。实验结果表

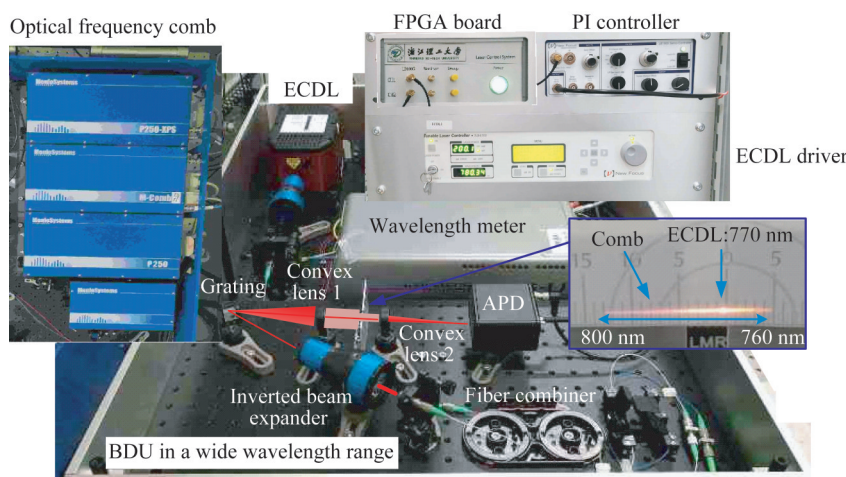
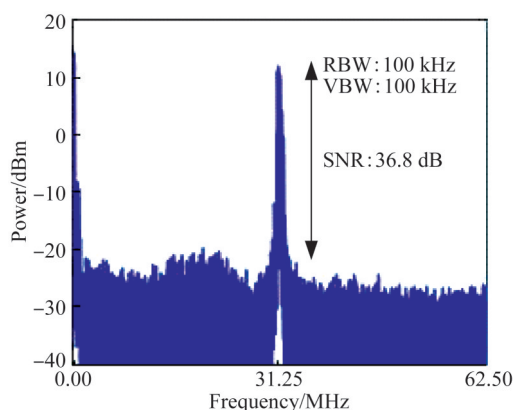


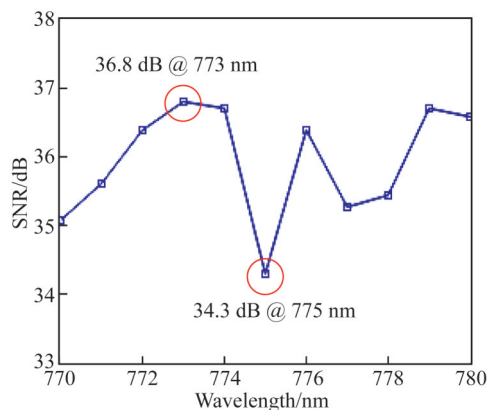
图 4 ECDL 激光波长宽范围拍频探测和自动偏频锁定实验装置

Fig. 4 Experimental setup for beat signal detection and automatic offset-frequency locking of ECDL in wide wavelength range



(a) 波长为 780 nm 时拍频信号频谱

(a) Frequency spectrum at wavelength of 780 nm



(b) 拍频信号的信噪比

(b) SNR of beat signal at different wavelengths

图 5 ECDL 激光波长在 770~780 nm 内拍频实验结果

Fig. 5 Experiment results of frequency spectrum and SNR (signal to noise ratio) of beat signal in 770-780 nm

明,本文设计的光栅+双凸透镜梳齿滤波方法,实现了 10 nm 宽波长范围内高信噪比的拍频信号探测。

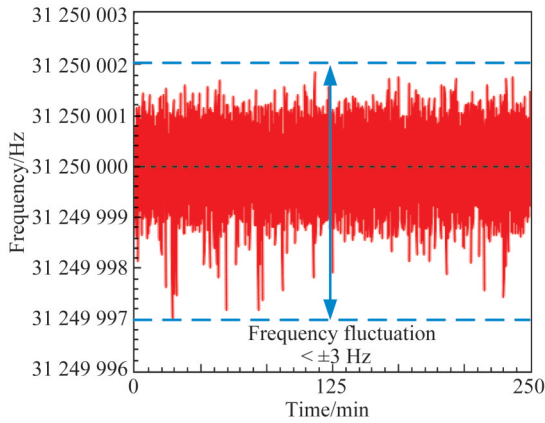
### 3.2 ECDL 长期锁定稳定性测试

图 6 为 ECDL 长期锁定至 OFC 第 1 537 397 根梳齿时的稳定性测试结果。采用 4 通道频率计测得拍频信号频率、OFC 的重复频率和偏置频率,根据式(8)换算得到 ECDL 的光频,其中频率计的计数时间设置为 1 s。从图 6 可以看出,在 4 h 内,拍频信号的频率波动小于  $\pm 3$  Hz,标准差为 0.51 Hz;ECDL 的光频波动小于  $\pm 6.50$  kHz,标准差为 1.49 kHz。进一步分析可知,4 h 内 OFC 的重复频率波动在  $\pm 4$  mHz 内,对应第 1 537 397 根梳齿的频率波动为  $\pm 6.15$  kHz。这表明经本文设计的偏频锁定系统锁定后,拍频信号频率非常稳定,对 ECDL 光频的影响可以忽略不计。

图 7 为根据图 6(b)所示 ECDL 激光频率计算所得的相对 Allan 方差。可以看出,在平均时间为 1 s 时,相对 Allan 方差达到  $4.76 \times 10^{-12}$ ,平均时间为 2 048 s 时,相对 Allan 方差达到  $1.48 \times 10^{-15}$ 。这表明本文设计的偏频锁定系统能够将 ECDL 频率长期稳定地锁至飞秒 OFC。

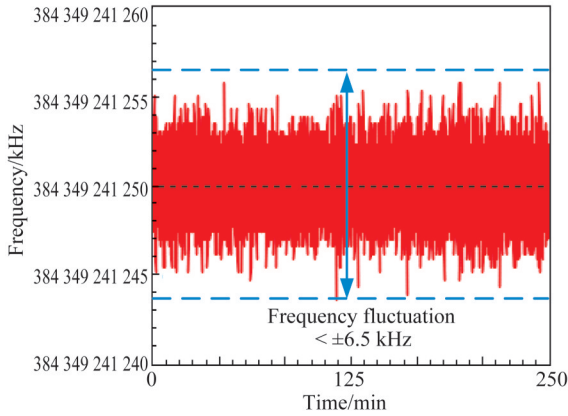
### 3.3 激光波长宽范围调节和自动锁定

为验证设计系统在宽范围内对 ECDL 波长



(a) 拍频信号频率波动

(a) Frequency fluctuation of beat signal



(b) ECDL 激光频率波动

(b) Frequency fluctuation of ECDL

图 6 ECDL 锁至光频梳梳齿 4 小时的稳定性测试结果

Fig. 6 Stability test result of proposed offset-frequency locking method in 4 hours

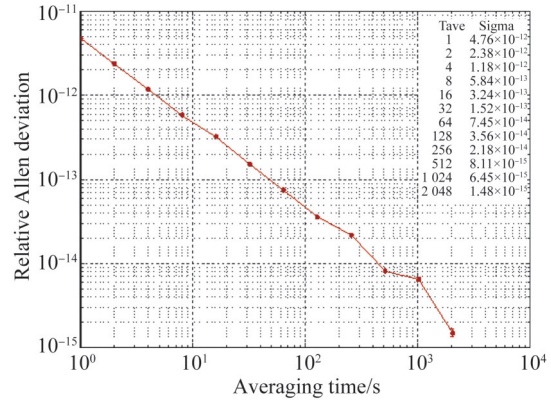


图 7 ECDL 频率稳定性

Fig. 7 Frequency stability of ECDL

的自动调节和偏频锁定性能,开展了 10 nm 宽波长、nm 量级波长切换锁定实验。控制 ECDL 输出的初始波长为 770 nm,以 2 nm 为间隔,自动调节到各个波长处并锁定,最后再返回到 770 nm。图 8 为波长计记录的波长变化数据,从一个波长切换至另一波长的过程中,系统自动完成偏频锁定解锁、波长粗调至下一待锁定梳齿附近和锁定至新梳齿等多个步骤,期间无需人为干预。在图 8 中,从解锁 ECDL 到将它锁定至下一目标波长,平均耗时约 34 s,自动锁定所需的时间与两次锁定波长间隔无关,时间主要消耗在 ECDL 电机或 PZT 调整后,等待波长稳定的过程中。

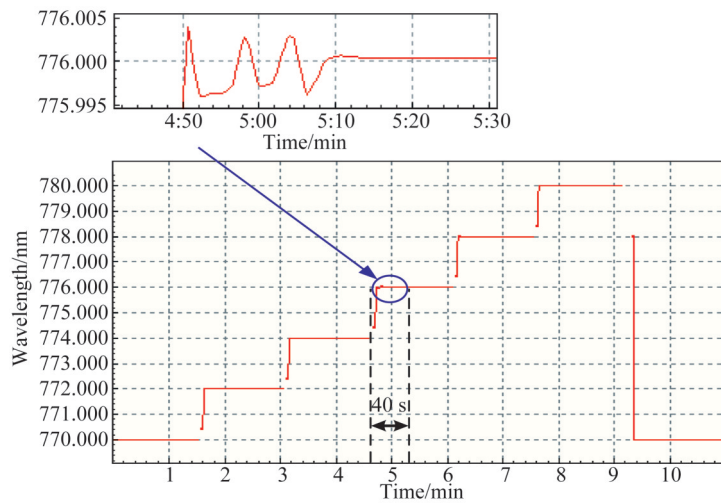


图 8 ECDL 激光频率宽波长范围自动调节和锁定实验结果

Fig. 8 Experimental result of ECDL laser automatic adjustment and locking in wide wavelength range

## 4 结 论

本文提出了一种锁至飞秒 OFC 的 ECDL 输出激光波长的宽范围自动偏频锁定方法。设计了一种光栅+双凸透镜梳齿滤波的宽波长范围高信噪比激光拍频信号探测方法,在 770~780 nm 内,拍频信号的平均信噪比高达 35.9 dB;设计了基于锁相放大器原理的鉴频鉴相器,捕获带宽高达 40 MHz,鉴相范围为  $2\pi \times 2^8$  rad,鉴相精度高达  $2\pi/2^8$  rad;实现了 ECDL 波长在 10 nm 内的自动调节和偏频锁定至 OFC。ECDL 锁定后

的长期稳定性测试表明,4 h 内拍频信号的频率波动小于  $\pm 3$  Hz,标准差为 0.51 Hz;ECDL 光频波动小于  $\pm 6.5$  kHz,标准差为 1.49 kHz;平均时间为 1 s 的相对 Allan 标准差为  $4.76 \times 10^{-12}$ ,表明 ECDL 激光锁定后频率稳定度逼近频率基准。本文设计的激光波长宽范围自动偏频锁定系统,具有偏频锁定精度高,激光频率可溯源和锁定波长范围宽等优点,可用于构建不同大小的高精度合成波长,在多波长干涉绝对距离测量、激光频率测量等精密测量领域具有广阔的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 高书苑,黎尧,纪荣祎,等. 偏振调制测距系统频率漂移误差及其补偿[J]. 光学精密工程, 2019, 27(2): 279-286.  
GAO S Y, LI Y, JI R Y, *et al.*. Frequency drift error and its compensation in polarization modulation range-finding system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(2): 279-286. (in Chinese)
- [2] 史春钊,张福民,潘浩,等. 正弦调频下大带宽激光调频连续波测距技术[J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1201002.  
SHI C ZH, ZHANG F M, PAN H, *et al.*. Distance measurement technique of large bandwidth laser frequency modulated continuous wave under sinusoid frequency modulation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(12): 1201002. (in Chinese)
- [3] 曲兴华,职广涛,张福民,等. 利用信号拼接提高调频连续波激光测距系统的分辨力[J]. 光学精密工程, 2015, 23(1): 40-47.  
QU X H, ZHI G T, ZHANG F M, *et al.*. Improvement of resolution of frequency modulated continuous wave laser ranging system by signal splicing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(1): 40-47. (in Chinese)
- [4] 张继涛,吴学健,李岩,等. 利用光频梳提高台阶高度测量准确度的方法[J]. 物理学报, 2012, 61(10): 100601.  
ZHANG J T, WU X J, LI Y, *et al.*. Method for improving the accuracy of step height measurement based on optical frequency comb [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(10): 100601. (in Chinese)
- [5] ZHAO X Y, QU X H, ZHANG F M, *et al.*. Absolute distance measurement by multi-heterodyne interferometry using an electro-optic triple comb [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(4): 807-810.
- [6] 廖磊,易旺民,杨再华,等. 基于合成波长法的飞秒激光外差干涉测距方法[J]. 物理学报, 2016, 65(14): 140601.  
LIAO L, YI W M, YANG Z H, *et al.*. Synthetic-wavelength based absolute distance measurement using heterodyne interferometry of a femtosecond laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(14): 140601. (in Chinese)
- [7] CHUN B J, HYUN S, KIM S, *et al.*. Frequency-comb-referenced multi-channel fiber laser for DWDM communication [J]. *Optics Express*, 2013, 21(24): 29179-29185.
- [8] WANG G C, JANG Y S, HYUN S, *et al.*. Absolute positioning by multi-wavelength interferometry referenced to the frequency comb of a femtosecond laser [J]. *Optics Express*, 2015, 23(7): 9121-9129.
- [9] 吴学健,尉昊赞,朱敏昊,等. 基于飞秒光频梳的双频 He-Ne 激光器频率测量 [J]. 物理学报, 2012, 61(18): 180601.  
WU X J, WEI H Y, ZHU M H, *et al.*. Frequency measurement of dual frequency He-Ne laser based on a femtosecond optical frequency comb [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(18): 180601. (in Chinese)
- [10] WU X J, LI Y, WEI H Y, *et al.*. Interferometric diameter determination of a silicon sphere using a traceable single laser frequency synthesizer [J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(11): 115202.
- [11] ZHANG W P, WEI H Y, YANG H L, *et al.*. Comb-referenced frequency-sweeping interferometry for precisely measuring large stepped structures

- [J]. *Applied optics*, 2018, 57(5): 1247-1252.
- [12] 罗京. 参考飞秒光频梳的半导体激光器偏频锁定技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.  
LUO J. *Research on frequency offset locking of semiconductor laser with reference to femtosecond optical frequency comb*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese)
- [13] REICHERT J, HOLZWARTH R, UDEM TH, *et al.*. Measuring the frequency of light with mode-locked lasers[J]. *Optics Communications*, 1999, 172(1-6): 59-68.
- [14] BEVERINI N, PREVEDELLI M, SORRENTINO F, *et al.*. An analog+digital phase-frequency detector for phase locking of a diode laser to an optical frequency comb [J]. *Quantum Electronics*, 2004, 34(6): 559-564.
- [15] 孟飞,曹士英,蔡岳,等. 光纤飞秒光学频率梳的研制及绝对光学频率测量[J]. *物理学报*,2011,60(10):100601.  
MENG F, CAO SH Y, CAI Y, *et al.*. Study of the femtosecond fiber comb and absolute optical frequency measurement [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(10): 100601. (in Chinese)
- [16] YANG R T, LV H S, LUO J, *et al.*. Ultrastable Offset-locking continuous wave laser to a frequency comb with a compound control method for precision interferometry [J]. *Sensors*, 2020, 20(5): 1248.

## 作者简介:



谢建东(1993—),男,浙江温州人,博士研究生,2015年于浙江理工大学获得学士学位,主要从事激光干涉绝对距离测量技术的研究。E-mail: xiejiantong@yeah.net

## 通讯作者:



严利平(1977—),女,四川内江人,教授,博士生导师,2000、2003年于重庆大学分别获得学士和硕士学位,2014年于浙江理工大学获得博士学位,主要从事激光干涉精密测量技术的研究。E-mail: yanliping@zstu.edu.cn