

提高ECDL扫频线性度的高效迭代算法

郭佳奇 李鲲 曹杰 李晶晶 梁亚峰

Efficient iterative algorithm for improving frequency sweep linearity of external cavity lasers

GUO Jiaqi, LI Kun, CAO Jie, LI Jingjing, LIANG Yafeng

引用本文:

郭佳奇, 李鲲, 曹杰, 等. 提高ECDL扫频线性度的高效迭代算法[J]. 应用光学, 2024, 45(3): 575–582. DOI: 10.5768/JAO202445.0310012

GUO Jiaqi, LI Kun, CAO Jie, et al. Efficient iterative algorithm for improving frequency sweep linearity of external cavity lasers[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(3): 575–582. DOI: 10.5768/JAO202445.0310012

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0310012>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

波长可调谐的瓦级连续橙红光激光器

Watt-level continuous wave orange-red laser with wavelength tunable

应用光学. 2017, 38(2): 309–315 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0207001>

基于优化迭代算法的细胞荧光光谱解析

Novel algorithm for analysis of cellular fluorescence spectrum based on optimization iteration

应用光学. 2019, 40(3): 461–467 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0303001>

星载激光雷达F-P标准具高效温控算法的设计与实现

Design and implementation of efficient temperature control algorithm for Fabry-Perot etalon of spaceborne lidar

应用光学. 2018, 39(1): 130–134 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0107003>

基于改进Fleury算法的激光扫描投影路径规划方法

Research on path optimization method of laser scanning projection based on improved Fleury algorithm

应用光学. 2019, 40(3): 493–499 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0307002>

一种自适应线性透射率估计去雾算法

Adaptive linear transmission estimation dehazing algorithm

应用光学. 2019, 40(3): 447–453 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0302007>

外腔半导体激光器在低高温下的机械形变与功率变化

Mechanical deformation and power change of external cavity semiconductor laser under temperature change

应用光学. 2021, 42(4): 586–591 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0401003>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 03-0575-08

提高 ECDL 扫频线性度的高效迭代算法

郭佳奇¹, 李 鲲¹, 曹 杰^{1,2}, 李晶晶¹, 梁亚峰¹

(1. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081; 2. 北京理工大学长三角研究院(嘉兴), 浙江 嘉兴 314003)

摘 要: 针对调频连续波激光雷达扫频线性度较差的问题, 提出一种适用于压电陶瓷外腔的可调谐外腔半导体激光 (external cavity diode laser, ECDL) 的高效率线性化预调制修正方法。基于体光栅反馈的 ECDL 模型和压电陶瓷迟滞特性, 设计了符合压电陶瓷偏置器 (piezoelectric ceramics, PZT) 物理性质的迭代控制算法, 实现了 ECDL 高线性度扫频激光输出。该激光系统能够实现 60 kHz 的重频条件下, 输出扫频带宽为 1.1 GHz 的线性扫频, 残余非线性达到 10^{-7} , 并且通过实验验证了在 80 m 的距离下厘米级的测量精度, 在 3 km 的距离下实现米级测量精度。结果表明, 该算法可以有效解决压电陶瓷偏置器的 ECDL 的线性化修正问题。

关键词: 调频连续波; ECDL; 压电陶瓷; 控制算法

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0310012

Efficient iterative algorithm for improving frequency sweep linearity of external cavity lasers

GUO Jiaqi¹, LI Kun¹, CAO Jie^{1,2}, LI Jingjing¹, LIANG Yafeng¹

(1. School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Yangtze Delta Region Academy, Beijing Institute of Technology, Jiaxing 314003, China)

Abstract: Aiming at the problem of poor frequency sweep linearity of frequency-modulated continuous wave lidar, a high-efficiency linearization pre-modulation correction method for external cavity diode laser (ECDL) with piezoelectric ceramic external cavities was proposed. Based on the ECDL model of volume grating feedback and the bias characteristics of piezoelectric ceramics, an iterative control algorithm that conformed to the physical properties of piezoelectric ceramics (PZT) was designed, and the high linearity frequency sweep laser output of ECDL was realized. The laser system could achieve a linear frequency sweep with an output bandwidth of 1.1 GHz under the repetition frequency of 60 KHz, and the residual nonlinearity could reach 10^{-7} . The measurement accuracy at the centimeter-level at a distance of 80 m was verified through experiments, and the meter-level measurement accuracy was achieved at a distance of 3 km. The results show that the algorithm can effectively solve the linearization correction problem of ECDL of the PZT.

Key words: frequency-modulated continuous wave; external cavity diode laser; piezoelectric ceramics; control algorithm

引言

与微波雷达技术相比, 激光雷达具有分辨率高、抗电磁干扰能力强等优点, 可广泛应用于三维

测绘^[1]、自动驾驶^[2]、遥感^[3]等领域。在激光雷达应用中, 采用相干检测技术的体制相比飞行时间法探测体制具有分辨率高、功耗低、灵敏度高、获

收稿日期: 2023-04-06; 修回日期: 2023-05-06

基金项目: 北京自然科学基金 (4232014)

作者简介: 郭佳奇 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事 FMCW 激光雷达技术研究。E-mail: 3120200530@bit.edu.cn

通信作者: 李鲲 (1987—), 男, 博士, 主要从事光电系统、激光雷达技术研究。E-mail: 15210517983@163.com

取目标速度快等优点^[3]。其中的调频连续波(frequency modulated continuous wave, FMCW)激光雷达技术是一种较为广泛使用相干检测技术。基于 FMCW 的激光雷达,连续激光的频率被线性调制,通过相干探测可以同时测量目标距离和速度^[4-8]。为保证测量精度,FMCW 技术要求光源须保持高重频扫频线性度。垂直腔镜激光器和分布式反馈半导体激光器输出激光信号的频率与驱动信号的电压并不存在固定的线性关系。因此,需要使用光学锁相环技术或者预调制技术进行修正^[9-12]。近年来,已通过电调谐外腔半导体激光器(external cavity diode lasers, ECDL)技术克服机械 ECDL 的限制^[6,13-14]。基于压电陶瓷偏置器(piezoelectric ceramics, PZT)的 ECDL,由于 PZT 高精度、高响应速度、性能稳定等优点,可以低功耗并且稳定地实现高精度、高重频、高扫频带宽的扫频激光输出^[14-15]。但是,由于 PZT 的迟滞效应以及针对驱动电压的记忆特性,控制信号和 PZT 的变量不成线性关系,因此,若要实现 PZT 结构 ECDL 的线性扫频输出,需要对控制信号进行额外整形。

迭代预失真技术是一种高效修正分布式反馈(distributed feedback, DFB)激光器和 ECDL 的方案,例如 ZHANG X S 等人^[11]基于预失真技术(迭代学习控制方法)成功地在 45 GHz 的扫描漂移和 360 THz/s 的扫频斜率下,从 DFB-LD 生成线性频率扫描输出,重频为 4 kHz,但是,该方法存在的问题是迭代次数多,收敛时间长。CAO X Y 等人^[16]采用迭代学习控制算法,通过 6 次迭代,实现了在 DFB 激光器重频为 1 kHz、带宽为 26 GHz 的扫频输出,同时残余非线性达到 5.19×10^{-8} ,扫频速率为 52 THz/s,但该方法需要人工设定系数,复杂度高。LI P 等人^[17]采用过零法检测拍频信号时频曲线,并以此为修正基准进行修正。在 DFB 激光器上,使用迭代学习控制法实现了周期 120 μ s、扫频带宽 30 GHz、扫频速率 500 THz/s,通过相对简单的算法,9 次迭代,实现了 10^{-7} 数量级的残余非线性,但是相比于 CAO X Y 提出的算法,该方法的线性度提升效果有限。同时,由于以上提到的方法基于 DFB 激光器,在调制过程中由于激光器的弛豫效应,导致没有办法实现较高重频的扫频信号输出(约 1 kHz),同时 DFB 激光器存在激光线宽明显较宽的问题,影响 FMCW 激光雷达的测距精度以及测量距离。JANG H 等人^[18]对基于电光晶体

构成的 ECDL 进行控制,通过电光效应改变外腔等效长度,实现了 1 GHz 的扫频带宽以及 200 kHz 的高重频扫频激光输出,并且能够在保持相对较窄的激光线宽的同时,将残余非线性控制在相对较低的水平(约 10^{-5}),但是由于电光晶体的特性,实验需要昂贵的信号发生器以及电光晶体构成的 ECDL。TANG L W 等人^[19]通过自制微环谐振芯片以及预调制算法,实现了较高的扫频带宽(约 1 GHz)以及高重频,并且能够保证激光的窄线宽,但是微环谐振需要极高功率的驱动信号源。

针对上述问题,本文提出一种基于 Preisach 模型快速收敛的迭代预失真方法,实现基于压电陶瓷 PZT 的 ECDL 扫频线性输出,并在波长 1550 nm 的窄线宽 ECDL 中进行了实验。通过搭建光纤链路的马赫增德尔干涉仪(Mach-Zehnder interferometer, MZI),得到模拟 FMCW 激光雷达的拍频信号,并对拍频信号进行采集,做短时傅里叶变换得到拍频信号的频谱图,以及对拍频信号进行希尔伯特变换,获得发射扫频激光的实时时间频率信息。通过该方法,实现了高重频,窄线宽扫频激光输出,同时算法简洁、收敛快速,并且可实现高水平的线性度修正,线性度修正效果能够和传统 DFB 激光器的迭代学习控制(iterative learning control, ILC)算法以及外调制方法的修正效果相当。

1 预调制迭代修正原理以及算法设计

实现 ECDL 线性扫频的流程如图 1 所示。ECDL 由迭代预失真算法产生的电流波形驱动,将电流模式预输入到基于 FPGA 的数模转换器(digital to analog converter, DAC),经过 FPGA 中的预失真迭代算法处理,生成每一次迭代所需要的预失真电压参数。预失真电压的生成模块由一个基于 FPGA 驱动的高采样率 DAC 构成,然后经过预失真处理的电压被高采样率 DAC 注入到 ECDL 的驱动模块之中。ECDL 被经过预修正的电压信号驱动,开始输出周期的扫频光波,扫频光波经过一个 50:50 的光纤耦合器,分为 2 路信号,其中一路信号的光纤长度大于另外一路,形成光学时延,这 2 路光纤构成 MZI。2 束光波经过 MZI 后会混合并产生外差干涉,生成拍频信号,其中,一个是原始扫频波形,另一个是时间延迟 τ 的扫频波形。平衡检测器用于将拍频信号的光信号转换为电信号,并且抑制其中的共模噪声,电信号通过带通滤波器

后,由模数转换器采集,其拍频信号的时频曲线通过短时傅里叶变换(short time Fourier transform, ST-FT)得到,瞬时频率信息通过希尔伯特变换表示,对信号分析后将误差回送给迭代程序,对预调制信号进行修正,完成迭代。



图1 迭代与修正算法流程图

Fig.1 Schematic diagram of iteration and correction algorithm process

1.1 基于PZT的ECDL初始模型

相比于DFB激光器,ECDL的外腔可以使激光器产生更高光谱纯度的光线,输出的激光信号光束质量更好,线宽相较于DFB型激光器更窄。并且ECDL具有体积小、功率密度高的特点。ECDL可以通过调节外腔镜的位置或替换反射镜来改变光波的反射和传输路径,调节外腔的长度或者光束稳定条件,进而实现高重频、高调制带宽的波长调谐^[20]。Littrow型ECDL系统通过驱动外腔中的PZT模块伸缩来调节外腔的长度,从而实现不同纵模之间增益差的调节,进而调节反馈光的波长,获得不同波长的激光输出,实现波长调谐^[21]。在进行ECDL的扫频线性度修正时,外腔长度的微小变化会对输出波长产生影响,从而影响扫频线性度。因此,需要对PZT调谐控制电压进行精细控制,以确保外腔长度的变化在可控范围内,并且在不同的波长范围内都能够实现线性度较好的调谐。

然而,PZT的迟滞特性导致压电扫描仪输入电压与输出位移之间存在非线性关系,这种特性会显著影响PZT的定位精度^[22],进而影响ECDL的扫频线性度。PZT的迟滞具有记忆特性,这种特性导致输出位移不仅与当前输入电压值接近,而且与输入电压的变化密切相关。针对PZT外腔迟滞导致的扫频非线性,整个控制系统的响应趋于非线性,因此,我们在系统中引入PZT的迟滞模型:Preisach模型,对PZT迟滞造成的非线性进行抑制^[23-24]。

1.2 迭代修正算法设计

为分析ECDL产生的扫频激光特性,需要测量

平衡探测器获得的拍频电信号瞬时频率。现有3种方法可获得可调谐激光器的频率,包括光学频率梳、法布里-珀罗干涉仪^[15,25]和希尔伯特变换提取瞬时频率的方法。由于扫频激光器的核心因素是扫频信号的相对频率线性度,频率的绝对值不影响线性度判断,因此,使用希尔伯特变换提取瞬时频率的方法来测量光源的瞬时频率。单反射臂MZI的外差干涉信号由平衡探测器检测到,可以写成:

$$y(t) = y_0 \sin[\varphi(t) - \varphi(t - \tau) + \xi_0] \quad (1)$$

式中: y_0 代表电压幅度; $\varphi(t)$ 和 $\varphi(t - \tau)$ 分别代表原始光的相位和延迟时间 τ 的光的相位; ξ_0 是辅助差拍信号的恒定初始相位。不同时间点上的不同相位项可以用 $d\varphi(t)/dt$ 代替,因为当辅助干涉仪在100 GHz/s量级的调谐速率下具有1 ns的短延迟时,对相位项进行泰勒展开中的高阶项可以忽略不计。在这种近似之后,电信号的相位与扫频激光器的瞬时频率正相关。式(1)中的外差干涉信号可以简化为

$$y(t) = y_0 \sin[2\pi\tau\nu(t) + \xi_0] \quad (2)$$

式中 $\nu(t)$ 为扫频激光的瞬时频率。对正弦的波形进行希尔伯特变换,效果等同于将 $y(t)$ 的相位移动 $\pi/2$,结果可以表达为

$$H\{y(t)\} = y_0 \sin[2\pi\tau f(t) + \xi_0 + \pi/2] \quad (3)$$

提取出拍频信号在每一个时间点 t 上的即时相位 $\varphi(t)$:

$$\varphi(t) = 2\pi\tau\nu(t) + \xi_0 = \tan^{-1} \left[\frac{y(t)}{H\{y(t)\}} \right] \quad (4)$$

根据式(3)以及式(4)可以得到ECDL产生的扫频信号的瞬时频率:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi\tau} \left(\tan^{-1} \left[\frac{y(t)}{H\{y(t)\}} \right] - \xi_0 \right) \quad (5)$$

得到扫频激光信号的瞬时频率之后,以实时频率的变化为参照,即可对激光器的驱动电压进行调节,按照实时频率的变化率进行修正,从而达到修正扫频激光频率扫描线性度的目的。理想的线性扫频信号可以表示为

$$(f_b)_{ideal} = \gamma_{ideal} \tau \quad (6)$$

式中: γ_{ideal} 是频率扫描的理想斜率,通过 $\gamma_{ideal} = B/T$ 给定,其中 B 是最大频率扫描带宽, T 是频率扫描周期, γ_{ideal} 是已知常数。通过希尔伯特变换,提取出拍频信号对应的扫频激光信号的真实瞬时频率,对照理想频率扫描曲线,计算每段的误差,

包括比例项和差分项,每一段的误差可以表示为

$$\begin{aligned} [\Delta y(t_i)]_{n+1} = & [\Delta y(t_i)]_n \times \frac{\gamma_{\text{ideal}}}{\gamma(t_i)_{\text{actual}}} + p \times [\Delta e(t_i)]_n + \\ & k \times \sum_0^n [\Delta e(t_i)]_n = [\Delta y(t_i)]_n \times \\ & \frac{\gamma_{\text{ideal}}}{\left[\frac{f(t_{i+1}) - f(t_i)}{\Delta t} \right]_n} + [\Delta e(t_i)]_n \times p + k \times \\ & \sum_0^n [\Delta e(t_i)]_n \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $\gamma(t_i)_{\text{actual}}$ 为频率扫描的实际测量扫描速率; $[*]_n$ 表示第 n 次迭代中 $*$ 的值; $\Delta y(t_i) = y(t_{i+1}) - y(t_i)$ 是 $y(t_{i+1})$ 和 $y(t_i)$ 之间的电压增量; $f(t_i)$ 为激光瞬时频率,通过拍频 $f(t_i)_{\text{beat}}$ 的希尔伯特变换得到; $\Delta e(t_i) = f(t_i) - f(t_i)_{\text{ideal}}$, 为 t_i 时刻实际瞬时频率和理想频率的差值; 系数项 p 为激光器电压和频率的比例值,由激光器性质决定; k 为积分项系数需用实验确定。根据得到的 $\Delta y(t_i)$ 进行迭代,迭代收敛的依据为希尔伯特变换的残余非线性 $(1-r^2)$ 减小,减小到极小值为最佳结果,式(7)中每次迭代中积分项与差分项具有物理含义,实际瞬时频率与理想频率之间存在的误差揭示了该时间点上电压需要被调整的趋势,所以引入扫描斜率对算式进行修正,当测量的频率扫描斜率 $\gamma(t_i)$ 实际值小于期望斜率 γ_{ideal} 时,电压增量应增加,以加快迭代中的频率扫描。由于 PZT 材料具有记忆属性,上一个时间段的输入对当前的响应有影响,故引入积分项反应累计输入对位移的影响。与迭代学习控制算法不同的是,引入了积分项与差分项,在迭代公式中体现为乘法项 $\gamma_{\text{ideal}}/\gamma(t_i)_{\text{actual}}$ 和加法项 $\sum_0^n [\Delta e(t_i)]_n$ 。每次迭代如式(8)所示,则该方法在当前系统参数下是收敛的。

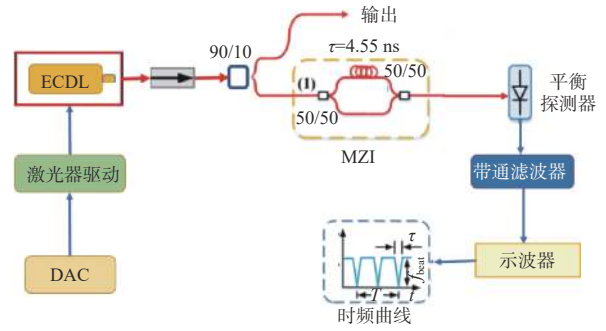
$$[y(t_i)]_{n+1} = [\Delta y(t_i)]_n + [y(t_i)]_n \quad (8)$$

另外,由于使用 Preisach 模型演算出来的电压曲线作为迭代起点,有利于优化迭代的初始效果,从而加速了迭代收敛的效率。

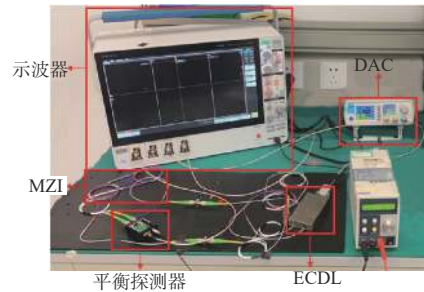
2 实验结果与分析

实验系统的示意图如图2(a)所示。基于窄线宽 ECDL 激光器,静态线宽 3 kHz,中心波长 1550 nm,最大输出功率 10 mW, MZI 双臂之间的时延差设置为 4.55 ns。在我们的例子中,待测光纤的时延长度足够小,并且实验中采用保偏光纤作为待测光纤,它是振动隔离的,因此可以假设延迟时间 t 随时间完全恒定。本系统中信号由示波器采集,采

样率为 625 兆点/s; 时频曲线 $\omega_{\text{sn}}(t)$ 由 STFT 导出。在每次预失真迭代中,将驱动电压的数据设置到 DAC 芯片 ad9516 (Texas instrument) 中,以 1 Gs/s 的采样率生成稳定的波形,以驱动 ECDL,偏置电压为 1.5 V,幅度为 ± 1 V,实验实物图如图2(b)所示。根据所采用的 ECDL 的特性,式(7)中的 p 参数设定为 0.5; k 参数设定为 0.02。为了验证本方法效果,分别设计了 3 组实验,从修正算法作用于系统所实现的精度、线性度进行说明,最后各个距离的光纤测距实验验证了光源能够达到高精度测距系统的要求,并且激光器扫描激光保持窄线宽。



(a) 原理示意图



(b) 实验结构图

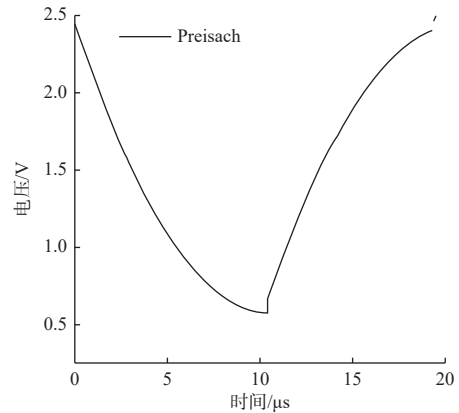
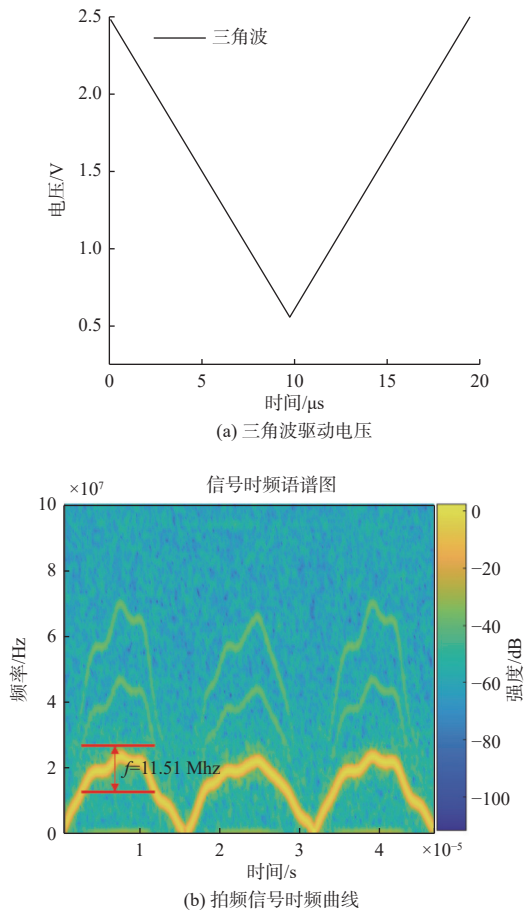
图2 实验框架示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental framework

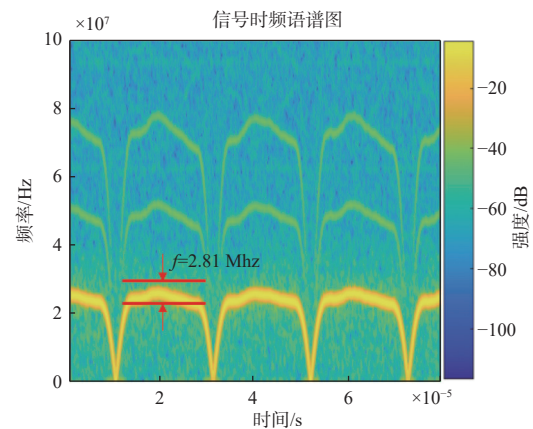
首先需要确定算法中积分项的参数 k , 令其他参数不变, 调整参数 k 并进行迭代, 通过希尔伯特变换获得每一次迭代的从残余非线性 $(1-r^2)$, 来确定不同参数 k 条件下的算法收敛情况, 并且根据收敛速度进一步确定最佳的 k 值。根据误差的数量级, k 值从 0.01 测试到 0.05, 当 k 取 0.02 时算法收敛速度最快, 并且达到最佳结果; 当 k 值选取大于等于 0.04 时, 由于误差值的积分的数量级过大, 算法不再收敛。根据以上分析, 实验中算法的 k 值设定为 0.02。

按照上述实验设计, 通过对获得的拍频信号进行分析, 来验证预失真电压驱动 ECDL 输出线性扫描激光的线性度修正效果。

初始输入电压为滞后模型产生的预失真波,重复频率为 60 kHz,为 PZT 在外腔内的谐振频率,电压波形曲线与对应的时频曲线如图 3 所示。没有进行预失真的三角波电压曲线驱动 ECDL 发射的扫频信号,经过外差干涉后得到的拍频信号如图 3(a)所示,这个拍频信号对应的时频曲线如图 3(b)所示。时频曲线在很宽的带宽 Δf 内随时间急剧变化,距离理想的稳定信号有极大的偏差,这意味着 ECDL 的频率与时间不是线性的。在本实验的调制带宽条件下,该信号难以被希尔伯特变换识别。当 Preisach 模型产生的预失真波注入 ECDL 的驱动模块时,如图 3(c)所示, MZI 输出端获得的拍频信号的时频曲线会偏离理想的恒定频率,如图 3(d)所示。经过 Preisach 模型预修正的驱动电压对应的拍频信号的时频曲线,远比直接输入的信号更接近理想的恒定信号,优化的效果在 5 倍左右,5 倍的 Δf 优化表明 Preisach 模型对 PZT 的修正是有意义的。值得注意的是,在图 3(d)的上下扫描转换处存在频率突变,频率峰峰值为 2.54 MHz。这是由 ECDL 的 PZT 记忆效应引起的,可以通过调整驱动电压拐点来减弱。



(c) 由 Preisach 模型产生的预失真驱动电压



(d) 拍频信号时频曲线

图 3 三角波与 Preisach 模型预失真电压与对应的拍频信号时频曲线

Fig. 3 Triangular wave and pre-distorted voltage given by presach model and corresponding time-frequency curves of beat frequency signal

在实验中,拐点附近数据变化量过大,难以被希尔伯特变换准确计算并提取,仅利用线性扫频范围内的 80% 作为感兴趣区域(region of interest, ROI)。经过更多次的预修正迭代, ECDL 输出光波的频率变化与时间的线性度越来越高。图 4(a)展示了经过 5 次迭代的电压波形图,图 4(b)展示了按照迭代公式进行第 5 次迭代的实验结果, Δf 从 2.81 MHz 进一步降至 94 kHz,该波形对应的时频曲线最接近理想稳定曲线。更高次数的迭代并不一定得到更好的结果,图 4(c)展示了经过算法第 9 次迭代的电压波形,结果如图 4(d)所示,频率变化范围 Δf 增加至 121 kHz。这可能是由于多次迭代的累积效应,在每次迭代操作中, ADC 采集 40 个周期信号,为了提高 STFT 的精度进行滤波处理,然而一些 ROI 外的有效数据也会被滤除,从而导致算法迭代偏离最佳优化。

为了计算 ECDL 在电流驱动下输出扫频光波

的时频曲线,我们通过希尔伯特变换提取拍频信号的瞬时频率。从示波器获得的40个周期拍频信号,通过方程(5)获得扫频光波的时频曲线;分别如图5(a)和图5(b)所示。图5(a)和图5(b)分别展示了 Preisach 模型产生的预修正算法驱动下和第5次预修正电压驱动下激光输出光波的扫频结果,并且展示了16 μs 的扫频光波完整扫频过程的频率曲线。如图5(a)所示,在 Preisach 模型产生的

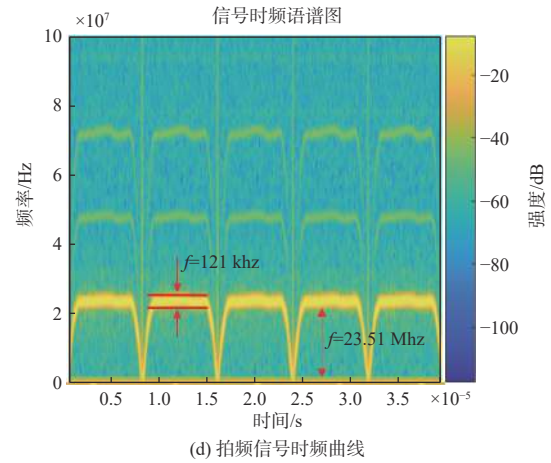
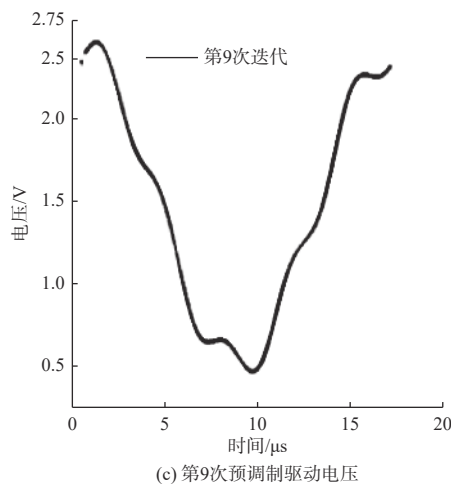
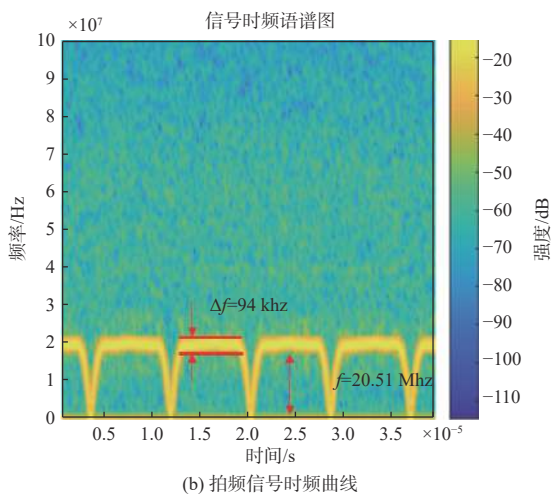
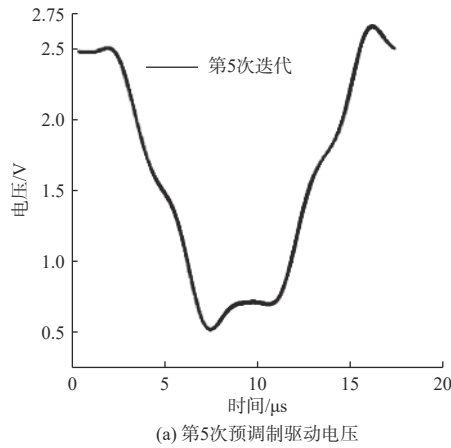


图4 算法迭代预失真电压与对应的拍频信号时频曲线

Fig.4 Pre-distorted voltage given by algorithm iteration and corresponding time-frequency curves of beat frequency signal

电压驱动下,扫频波形具有较大的非线性,扫频带宽为1.13 GHz。如图5(b)所示,在第5次预修正电压驱动下,扫频信号的线性度得到优化,扫频带宽减至1.03 GHz。

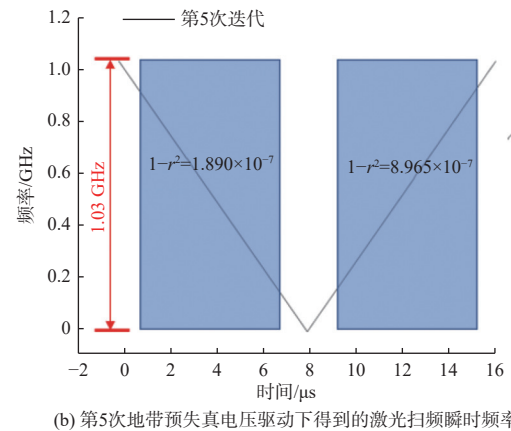
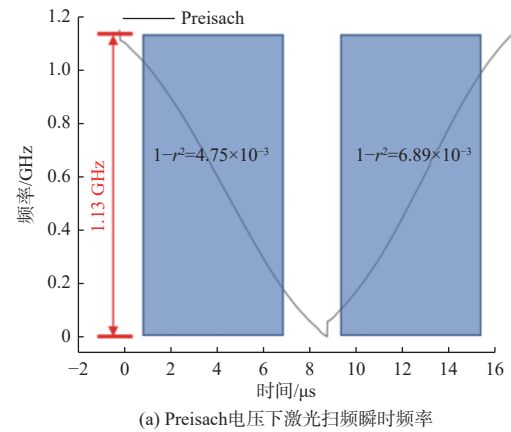


图5 ECDL 经过迭代预处理得到的线性扫频实验结果

Fig.5 Experimental results of linear frequency sweep obtained by iterative pre-processing with ECDL

在图 5(a) 中, ECDL 输出光波的频率随时间呈现出非线性, 由 Preisach 模型生成的预修正电压驱动。为了表征这种非线性的大小, 选择 ECDL 扫频范围中上下扫描区域的 80% 作为有效区域, 如图 5(a) 中的阴影区域所示。激光扫频的线性度也可以用线性回归系数 $r^2 = 1 - SS_{\text{res}} / SS_{\text{tot}}$ 来表示, 其中 SS_{res} 是残差平方和, SS_{tot} 是总平方和, r^2 是小于 1 的常数, 线性度越高, 越接近于 1, 我们采用 $1 - r^2$ 来表示残余的非线性。这两个有效区域中的 $1 - r^2$ 在图 5(a) 中计算并显示。经过计算, 扫频信号的非线性 RMS 值 $f_{\text{nl,rms}}$ 下行和上行扫描的 $1 - r^2$ 分别为 0.00689 和 0.00475, 均在 10^{-3} 量级, 相应的 $f_{\text{nl,rms}}$ 计算的结果分别为 642 MHz 和 242 MHz, 都在几百 MHz 的范围内。正如我们所预期的那样, 在经过 5 次迭代后情况显著改善, 扫频信号的线性度明显提高, 如图 5(b) 所示。在相同的阴影区域中, 2 个 $1 - r^2$ 均达到 10^{-7} 级别, 提高了 4 个数量级。 $f_{\text{nl,rms}}$ 也降低了 2 个数量级, 为几 MHz 的范围, 上行扫描和下行扫描对应的 $f_{\text{nl,rms}}$ 分别为 8.31 MHz 和 5.42 MHz。

为了验证生成的扫频信号的激光线宽以及测距能力, 分别采用等效光程为 5 m、15 m、80 m、0.5 km 以及 3 km 的光纤作为时延长度, 采用相同的激光强度进行混频, 并采用频率分辨率为 10 kHz 的傅里叶变换, 对分别采集到的拍频信号整个周期的 ROI 做傅里叶变换, 得到的结果如图 6 所示。

图 6(a) 频域中信号的脉宽分别为 20 kHz、40 kHz 和 90 kHz, 在 80 m 的条件下, 测距误差为 1.125 cm。图 6(b) 中 0.5 km 和 3 km 的 3 dB 脉宽分别为 110 kHz 和 450 kHz, 分别对应 0.137 m 和 0.562 m 的测距误差, 表明线性度能够满足实际需求, 有利于高精度 FMCW 激光雷达探测。

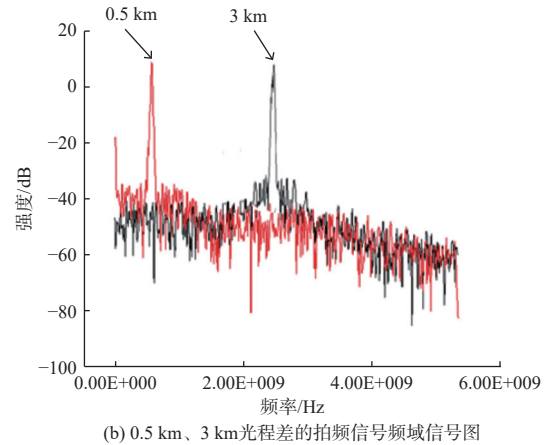
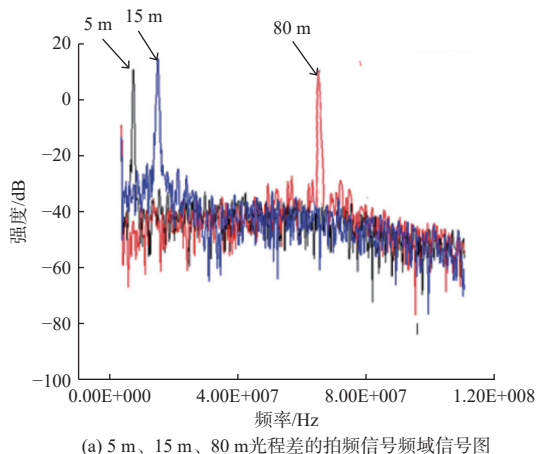


图 6 不同距离的测距实验

Fig. 6 Distance measurement experiments at different distances

值得注意的是, 在光程差为 80 m、0.5 km、3 km 的实验中, 拍频信号的频谱并未明显展宽和强度衰减, 这表明扫频激光保持了很窄的线宽。这一结果说明了算法使得系统保持了较高的光谱纯度, 适用于远距离的激光雷达应用。

3 结论

本文提出了一种针对 PZT 外腔的 ECDL 激光器迭代预调制算法, 根据 PZT 的特性, 以迟滞模型为参照, 实现高性能频率扫描线性化, 并证明迭代预修正算法可以用于校正 1550 nm 的基于 PZT 的 ECDL 激光器的频率扫描非线性。通过多次实验和分析, 第 5 次迭代获得了最佳的频率扫描线性化效果。当使用第 5 次迭代生成的预修正电流驱动激光器时, 可以在 60 kHz 的高重频条件下, 将扫频激光的相对残余非线性 ($1 - r^2$) 缩减到 10^{-7} 数量级, 实现 1.03 GHz 的线性频率变化。同时, 通过长距离测距实验验证了扫频激光的线宽并没有明显增加, 所获结果有利于提升 FMCW 激光雷达的测距精度。

参考文献:

- [1] MA H, LIU K K, LIU J B, et al. Simple and efficient registration of 3D point cloud and image data for an indoor mobile mapping system[J]. *Journal of the Optical Society of America A, Optics, Image Science, and Vision*, 2021, 38(4): 579-586.
- [2] WALLACE A M, HALIMI A, BULLER G S. Full waveform LiDAR for adverse weather conditions[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(7): 7064-7077.

- [3] CAO X Y, QIU G F, WU K, et al. Lidar system based on lens assisted integrated beam steering[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(20): 5816-5819.
- [4] CHEN T, WU J, XU W M, et al. Linearly polarized, dual wavelength frequency-modulated continuous-wave fiber laser for simultaneous coherent distance and speed measurements[J]. *Laser Physics Letters*, 2016, 13(7): 075105.
- [5] AUDE M, PETER V, PETER D H, et al. Photonic integrated circuit-based FMCW coherent LiDAR[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(19): 4640-4645.
- [6] MATEO A B, BARBER Z W. Precision and accuracy testing of FMCW ladar-based length metrology[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(19): 6019-6024.
- [7] OKANO M, CHONG C. Swept source lidar: simultaneous FMCW ranging and nonmechanical beam steering with a wideband swept source[J]. *Optics Express*, 2020, 28(16): 23898-23915.
- [8] POULTON C V, YAACOBI A, COLE D B, et al. Coherent solid-state LIDAR with silicon photonic optical phased arrays[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(20): 4091-4094.
- [9] AHN T J, LEE J Y, KIM D Y. Suppression of nonlinear frequency sweep in an optical frequency-domain reflectometer by use of Hilbert transformation[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(35): 7630-7634.
- [10] DILAZARO T, NEHMETALLAH G. Large-volume, low-cost, high-precision FMCW tomography using stitched DFBs[J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 2891-2904.
- [11] ZHANG X S, POULS J, WU M C. Laser frequency sweep linearization by iterative learning pre-distortion for FMCW LiDAR[J]. *Optics Express*, 2019, 27(7): 9965-9974.
- [12] 于秀明, 丁云飞, 陈俊达, 等. 高重复频率锁模光纤激光器及其超连续谱产生[J]. *应用光学*, 2018, 39(6): 916-920.
YU Xiuming, DING Yunfei, CHEN Junda, et al. High repetition-rate mode-locked fiber laser and generation of supercontinuum[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(6): 916-920.
- [13] GONG H, LIU Z G, ZHOU Y L, et al. Mode-hopping suppression of external cavity diode laser by mode matching[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(4): 694-701.
- [14] SHEN L, YE Q, CAI H W, et al. Mode-hop-free electro-optically tuned external-cavity diode laser using volume Bragg grating and PLZT ceramic[J]. *Optics Express*, 2011, 19(18): 17244-17249.
- [15] DENG Z, LI X, SUN H, et al. Nonlinearity suppression method for optical frequency scanning based on the Phenomenological model[C]// 2021 International Conference of Optical Imaging and Measurement (ICOIM), Xi'an: [s.n.], 2021: 24-27.
- [16] CAO X Y, WU K, LI C, et al. Highly efficient iteration algorithm for a linear frequency-sweep distributed feedback laser in frequency-modulated continuous wave lidar applications[J]. *Journal of the Optical Society of America B Optical Physics*, 2021, 38(10): D8-D14.
- [17] LI P, ZHANG Y T, YAO J. Rapid linear frequency swept frequency-modulated continuous wave laser source using iterative pre-distortion algorithm[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14: 3455.
- [18] JANG H, KIM J W, KIM G H, et al. Simultaneous distance and vibration mapping of FMCW-LiDAR with akinetic external cavity diode laser[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 160: 107283.
- [19] TANG L W, JIA H X, SHAO S, et al. Hybrid integrated low-noise linear chirp frequency-modulated continuous-wave laser source based on self-injection to an external cavity[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(10): 1948.
- [20] SHIN D K, HENSON B M, KHAKIMOV R I, et al. Widely tunable, narrow linewidth external-cavity gain chip laser for spectroscopy between 1.0 μm ~1.1 μm [J]. *Optics Express*, 2016, 24(24): 27403-27414.
- [21] DING K, MA Y, WEI L, et al. Research on narrow linewidth external cavity semiconductor lasers[J]. *Crystals*, 2022, 12(7): 956-961.
- [22] DENG Z W, LIU Z G, LI B, et al. Precision improvement in frequency-scanning interferometry based on suppressing nonlinear optical frequency sweeping[J]. *Optical Review*, 2015, 22(5): 724-730.
- [23] LI Z, SU C Y, CHAI T Y. Compensation of hysteresis nonlinearity in magnetostrictive actuators with inverse multiplicative structure for preisach model[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2014, 11(2): 613-619.
- [24] AL JANAIDEH M, RAKOTONDRABE M. Precision motion control of a piezoelectric cantilever positioning system with rate-dependent hysteresis nonlinearities[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2021, 104(4): 3385-3405.
- [25] 鲁闯, 赵美蓉, 王双, 等. 基于三角波驱动法珀可调谐滤波器的光纤光栅解调偏差校正算法[J]. *应用光学*, 2017, 38(1): 147-152.
LU Chuang, ZHAO Meirong, WANG Shuang, et al. Deviation calibration method for fiber Bragg grating demodulation system based on tunable Fabry-Perot filter driven by triangular wave[J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(1): 147-152.