

## 表征稳频半导体激光器频率特性的方法

李珊珊<sup>1</sup>, 杨介伟<sup>1</sup>, 杨天新<sup>1\*</sup>, 王肇颖<sup>1</sup>, 张恒康<sup>2</sup>

(1. 天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072;  
2. 北京控制工程研究所, 北京 100190)

**摘要:** 对稳频半导体激光器的频率进行在线实时监测的需求量和迫切性一直在不断增长。特别是近几年发展起来的连续波激光雷达通常以单频半导体激光器为种子源, 并通过相干检测方式获得雷达信号的频率, 从而获得目标物的距离信息, 这就使得种子光源的频率精度直接与测距精度密切相关, 因此, 对光源的频率稳定性的表征也提出了新的要求: 更关注短期(在相干时间内, 亚微秒~数毫秒)的频率变化模式, 对长时段内(数分钟~24 h)的绝对频率高精度监测的需求减弱; 同时要求频率监测系统具有在线实时监测能力。针对这些需求, 基于延时自外差原理, 提出了一种表征稳频激光器的频率变化的方法, 经过严谨的原理推导和算法编程, 使得监测系统不仅结构简单, 还实现了在线实时监测功能, 并测量了一台利用氟化氢( $H^{13}C^{14}N$ )气体吸收谱线基于边频锁定技术的稳频分布反馈式半导体激光器(DFB-LD)频率变化曲线。测量结果是: 在 10 ms 内稳频激光器的最大频率变化约为 25 MHz, 并且清楚地观察到激光器的频率变化不是单向的漂移模式。为了进一步验证该方法的精度, 采用主流的飞秒光频梳拍频法离线测量了同一台稳频 DFB-LD 的频率变化, 实验结果是: 在 50 min 内频率变化约为 30 MHz。两种测量方法的测量结果均在相同的 MHz 量级, 证明了该方法是一个快速可靠的光频率分析手段, 可应用于实时调节稳频激光器的伺服回路系统。

**关键词:** 半导体激光器; 自外差探测; 频率测量; 稳频

**中图分类号:** O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230063

### 0 引言

近年发展起来的车载连续波激光雷达中的光源均是半导体激光器<sup>[1-7]</sup>, 且探测距离一般在 200~500 m 范围内。因为连续波激光雷达测距是通过相干光检测方式实现的, 所以测距精度强烈依赖于发射光源在微秒时间段(对应光在 500 m 范围内的渡越时间)的稳频特性, 而对激光器长期稳定性并不敏感。但是, 现有的测量激光器稳频特性的方法大都是侧重考察激光器频率的长期稳定性, 即频率漂移特性<sup>[8-11]</sup>, 其中比较精确的拍频法<sup>[12]</sup>和延迟自外差法<sup>[13-14]</sup>一般也是只测量到频率的秒稳特性。

用拍频法表征激光器稳频效果时, 通常需要一台

比待测激光器频率稳定度至少高两个数量级的高稳频激光器, 这样的高稳频激光器一般要以昂贵的原子钟作为基准频率, 因此限制了它的在线应用。诚然, 监测系统越昂贵, 监测精度越高。另外, 应用拍频法的频率测量系统大多专注于表征待测激光器的长期频率稳定性, 很难精确测量短时间内的频率波动特性, 这是因为它的数据采集系统只对拍信号进行频率计数测量, 无法记录和存储拍信号本身的波形, 因此无法表征短时间内的频率波动特性。而近期发展起来的连续波激光雷达采用相干检测原理, 对短时间内光波的频率稳定性更敏感, 因此笔者提出一种方法来填补这个空白, 该方法是一种改进的延迟自外差技术。

延迟自外差技术并不是新技术。2014 年, Zhi<sup>[13]</sup>

收稿日期: 2023-02-13; 修订日期: 2023-04-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(62075164); 天津市自然科学基金项目(19 JCYJC32500); 空间光电测量与感知实验室开放基金课题资助项目(WZYY-04002-21)

作者简介: 李珊珊, 女, 硕士生, 主要从事于半导体激光器稳频技术、激光器频率漂移测量方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 杨天新, 女, 教授, 硕士/博士生导师, 博士, 主要从事应用微波光子学技术实现连续波激光雷达成像方面的研究。

等人利用标准的延迟自外差装置测量了窄线宽激光器相对频率漂移,但是因为没有对相位进行解缠绕,因此它不能实时地检测激光器的频率漂移情况,也无法反映频率漂移的趋势,只粗略地观测到 6.7 s 内曾经发生了最大的频率漂移量是 2 MHz。2015 年,段洪城等人<sup>[14]</sup>也采用了延迟自外差技术并且实施了相位解缠绕,但是为了进行实时检测,他们的实验装置比较复杂,采用了双光纤环结构,需要同时产生两个外差信号来测量激光器频率的漂移曲线。他们对一台没有稳频伺服装置的半导体激光器进行了测试,得到的结果是短期(1 ms)内最大的频率漂移为 200 kHz,长期(1 h)的频率漂移量在 75~350 MHz 范围。笔者认为,如果激光器有闭环反馈的稳频回路,激光器的频率漂移现象应该能得到抑制,激光器频率的变化量应该与测量时间长短无关。

为此,开发了一套带有闭环稳频回路的驱动源,驱动一个窄线宽半导体激光器,并用简化的单光纤环结构的延时自外差技术测量该稳频激光器的频率变化,提出了一种新的测量半导体激光器短期频率变化的算法,该方法可以实时地定量表征激光器频率稳定性。实验结果表明,稳频后的激光器的短期稳频特性与长期稳频特性并没有数量级差异,一方面说明该稳频回路是有效的,在短时段内抑制了频率的漂移;另一方面也说明文中的频率监测方法可信,测出的频率曲线不仅符合稳频激光器的工作特性,而且还能够帮助人们正确评估激光雷达的测距精度。另外特别指出,文中提出的能够表征稳频激光器稳频效果的装置不需要昂贵的高稳频基准光源,因此结构简单轻便,可以实现在线实时频率监测。

### 1 测量原理分析

光纤延时自外差法测量激光器短时间内频率特性的实验系统如图 1 所示,其中 DFB-LD 为分布反馈半导体激光器,OC1、OC2 为两个 50:50 的光纤耦合器,AOM 为声光调制器,RF 为射频信号,BPD 为平衡光电探测器,OSC 为宽带实时数字示波器。

在图 1 中,假设分布反馈半导体激光器 DFB-LD 输出的连续光场可以表示为:

$$E(t) = E_0 \cos \left[ 2\pi \int_0^t \nu_0(\tau) d\tau + \varphi_0 \right] \quad (1)$$

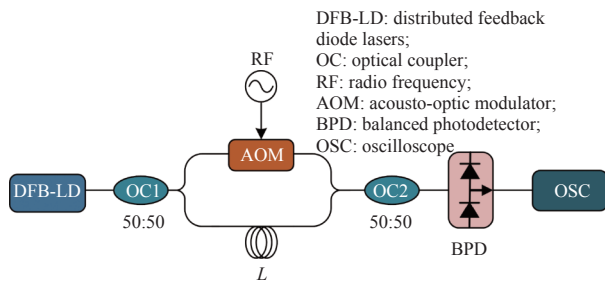


图 1 基于光纤延时自外差测量光频率漂移实验装置图

Fig.1 Experimental setup for optical frequency drift measurement based on delay self-heterodyne interferometer

公式(1)以变限积分函数近似模拟激光器光场的频率变化导致的累积相位随时间 $t$ 的增加而增加的过程(假设频率的起伏波动是光滑连续的),式中, $E_0$ 为激光光场恒定的电场强度振幅, $\nu_0(t)$ 表示随时间变化的激光频率曲线,包含了激光器的频率漂移和本征的频率噪声, $\varphi_0$ 为激光器的初相位。DFB-LD 输出光经过光纤耦合器 OC1 后分为光强相等的两束光:一束光经过声光调制器 AOM 后,光频率频移了 $f_m$ ,其中 $f_m$ 是驱动 AOM 的射频信号频率;另一束光经过长度为 $L$ 的单模延时光纤。两束光经光纤耦合器 OC2 后产生的拍频信号接入平衡光电探测器 BPD, BPD 产生的光电流信号由数字示波器 OSC 采集。经过 AOM 和延时光纤的两路光可分别表示为 $E_1(t)$ 和 $E_2(t)$ 。由于 BPD 是对光强度的响应,因此 $E_1(t)$ 和 $E_2(t)$ 经 OC2 被 BPD 接收之后,拍信号的光电流 $i(t)$ 可表示为:

$$i(t) = k \cos \left( \int_0^t [2\pi\nu_0(\tau) + 2\pi f_m] d\tau - \int_0^{t-\tau_d} 2\pi\nu_0(\tau) d\tau \right) = k \cos[\varphi(t)] \quad (2)$$

式中: $k$ 为 BPD 的光电转换系数; $\tau_d$ 为延时光纤 $L$ 产生的延迟时间; $\varphi(t)$ 为拍信号的相位。当光电流随时间变化的曲线 $i(t)$ 被实时数字示波器 OSC 检测并存储在 OSC 中后,最终可以通过希尔伯特变换得到公式(2)中拍信号的相位曲线 $\varphi(t)$ :

$$\varphi(t) = \arctan \left( \frac{H[i(t)]}{i(t)} \right) \quad (3)$$

式中: $H[i(t)]$ 表示光电流曲线 $i(t)$ 的希尔伯特变换曲线。

下面证明由拍信号的相位曲线 $\varphi(t)$ 可以得到激光器的频率随时间变化的信息。由公式(2)可知:

$$\varphi(t) = \int_0^t 2\pi[v_0(\tau) + f_m] d\tau - \int_0^{t-\tau_d} 2\pi v_0(\tau) d\tau \quad (4)$$

将积分核不随时间变化的积分  $\int_0^t 2\pi f_m d\tau$  单独考虑, 将公式 (4) 中另外两项积分  $-\int_0^{t-\tau_d} 2\pi v_0(\tau) d\tau$  和  $+\int_0^t 2\pi v_0(\tau) d\tau$  合并, 其中因为

$$+\int_0^t 2\pi v_0(\tau) d\tau = \int_0^{t-\tau_d} 2\pi v_0(\tau) d\tau + \int_{t-\tau_d}^t 2\pi v_0(\tau) d\tau \quad (5)$$

所以合并后得到:

$$\varphi(t) = \int_0^t 2\pi f_m d\tau + \int_{t-\tau_d}^t 2\pi v_0(\tau) d\tau = 2\pi f_m t + \Delta\varphi(t) \quad (6)$$

式中: 定义  $\Delta\varphi(t)$  为  $t$  时刻的拍信号相位  $\varphi(t)$  中的非线性部分,  $\Delta\varphi(t) = \int_{t-\tau_d}^t 2\pi v_0(\tau) d\tau$ 。从  $\Delta\varphi(t)$  的定义式可以看出,  $\Delta\varphi(t)$  只与激光器在从  $t-\tau_d$ ~ $t$  之间非常短的  $\tau_d$  时段内 ( $\tau_d \approx 100 \text{ ns}$  @  $L = 20 \text{ m}$ ) 的频率曲线  $v_0(t)$  有关, 而与激光器频率  $v_0(t)$  在  $t = 0$ ~ $t-\tau_d$  之间的长期变化曲线无关, 这是因为公式 (5) 中的积分项  $\int_0^{t-\tau_d} 2\pi v_0(\tau) d\tau$  在公式 (6) 中被抵消了。

另一方面, 从公式 (6) 可以看出, 激光器在从  $t-\tau_d$ ~ $t$  之间非常短的时段内产生的相位增量  $\Delta\varphi(t) = \int_{t-\tau_d}^t 2\pi v_0(\tau) d\tau$  可以通过测量拍信号光电流曲线而得到, 因为由公式 (6) 可知:

$$\Delta\varphi(t) = \varphi(t) - 2\pi f_m t \quad (7)$$

在公式 (7) 中,  $\varphi(t)$  曲线可以通过公式 (3) 得到, 当驱动 AOM 的射频信号的频率  $f_m$  已知时, 可以由计算机减去 AOM 的频率  $f_m$  在  $0$ ~ $t$  时间内累积的相位, 从而得到  $\Delta\varphi(t)$  曲线。这样做的好处是既简化了实验装置, 又可以避免真实系统中存在的低频噪声对计算  $\Delta\varphi(t)$  的影响。

根据  $\Delta\varphi(t)$  的定义,  $\Delta\varphi(t)$  是光载波频率  $v_0(t)$  在光纤延时时间  $\tau_d$  内的相位累积。为了用定义式  $\Delta\varphi(t) = \int_{t-\tau_d}^t 2\pi v_0(\tau) d\tau$  计算出激光器频率从  $0$ ~ $t$  时刻 ( $\sim \text{ms}$ ) 范围内的频率变化总量  $\Delta\nu(t)$ , 可以将  $0$ ~ $t$  时刻之内的激光频率曲线  $v_0(t)$  离散为连续的  $N$  段频率线性变化的折线, 每段折线频率表达式如下:

$$v_0(t_i) = v_{i,0} + \mu_0(t_i) \tau_d, i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

这样做的本质就是将  $\Delta\varphi(t) = \int_{t-\tau_d}^t 2\pi v_0(\tau) d\tau$  的积分核中从  $t-\tau_d$ ~ $t$  之间的激光频率曲线  $v_0(\tau)$  近似为在  $t$  时刻、 $\Delta t$  间隔内的由不随时间变化的部分  $v_{i,0}$  和随时间变化部分  $\mu_0(t_i) \tau_d$  组成。即在很小的  $\Delta t$  间隔内激光

频率曲线为直线  $v_0(t) = v_0 + \mu_0(t) \Delta t$ 。在实验系统中, 采用了  $20 \text{ m}$  米延迟光纤考察在  $\text{ms}$  时段内 (在  $0$ ~ $t$  时间段) 激光器频率变化曲线  $\Delta\nu(t)$  时,  $\tau_d$  只有百  $\text{ns}$  量级, 可以认为  $\tau_d$  就是  $\Delta t$ , 上述线性近似条件成立。公式 (8) 中的  $\mu_0(t_i)$  为在  $t-\tau_d$ ~ $t$  时间内的频率的平均斜率; 当  $\tau_d$  趋于  $0$  时, 平均斜率  $\mu_0(t_i)$  趋于它的瞬时值  $\mu_0(t)$ 。

通过对曲线  $\Delta\varphi(t) = \int_{t-\tau_d}^t 2\pi v_0(\tau) d\tau$  进行时间  $t$  求导可以直接得到激光频率斜率  $\mu_0(t_i)$ 。由积分变限函数导数定理<sup>[15]</sup> 及公式 (8) 可得:

$$\begin{aligned} \left. \frac{d\Delta\varphi(t)}{dt} \right|_{t=t_i} &= 2\pi[v_0(t_i) - v_0(t_i - \tau_d)] = \\ &= 2\pi\tau_d \frac{[v_0(t_i) - v_0(t_i - \tau_d)]}{\tau_d} = \\ &= 2\pi\tau_d \mu_0(t_i) \end{aligned} \quad (9)$$

公式 (9) 表明, 如果已知  $d\Delta\varphi(t)/dt$  曲线, 就可以得到每个  $t_i$  时刻、 $\tau_d$  时间间隔内的频率平均斜率  $\mu_0(t_i)$ 。将公式 (3) 和公式 (7) 代入公式 (9) 得到:

$$\begin{aligned} \mu_0(t_i) &= \frac{1}{2\pi\tau_d} \left. \frac{d\Delta\varphi(t)}{dt} \right|_{t=t_i} = \\ &= \frac{1}{2\pi\tau_d} \left. \frac{d}{dt} [\varphi(t)] \right|_{t=t_i} - \frac{f_m}{\tau_d} \end{aligned} \quad (10)$$

则在  $0$ ~ $t$  时间内激光器频率变化总和  $\Delta\nu(t)$  就等于对每个  $\tau_d$  时间间隔内激光器频率变化求和, 即

$$\Delta\nu(t) = \sum_{i=1}^N \mu_0(t_i) \tau_d \quad (11)$$

## 2 实验分析与讨论

为了实践上述测量激光频率曲线的方法, 完成了一系列实验。首先建立了一套有伺服回路的稳频激光器系统。它是一台利用氰化氢 ( $\text{H}^{13}\text{C}^{14}\text{N}$ ) 气体吸收谱线 ( $1548.9 \text{ nm}$ ) 为基准的、采用边频锁定技术的稳频 DFB-LD (最大输出功率  $40 \text{ mW}$ , 线宽小于  $200 \text{ kHz}$ ), 该激光器闭环稳频启动后的频率稳定度为  $2.34 \times 10^{-10}$ <sup>[16]</sup>。经过进一步对 DFB-LD 驱动进行优化升级, 并加以封装提高其鲁棒性之后, 作者分别用文中的延时自外差方法和传统的飞秒光频梳拍频法测试了这台稳频后的 DFB-LD 的频率在短时间和长时间内的变化特性。

首先用延时自外差的方法测量稳频 DFB-LD 的在  $10 \text{ ms}$  以内的频率变化特性, 实验装置如图 1 所

示,对 AOM 加载频率为 80 MHz 的射频信号,延时光路采用了 20 m 的单模光纤来延时,两路光经过耦合器 OC2 后接入 BPD,通过 OSC 采集拍信号,OSC 的采样率为 400 MSa/s。采集后的数据直接由计算机处理,通过希尔伯特变换提取拍信号的相位信息,经过解缠绕后,提取 DFB-LD 频率的信息,得到频率变化速率,通过对时间的积分得到每个离散间隔处的频率变化值。

测量结果如图 2 所示,实验测量了三组 10 ms 内稳频 DFB-LD 的频率变化曲线,曲线呈上下往复变化模式,没有出现单调的频率漂移模式,最大频率总变化量在 25 MHz 以内,说明在 10 ms 内激光器的闭环稳频功能发挥正常。另外,由于利用了高带宽示波器的高采样率,因此可以准确得到实时的连续的拍信号,用这样的拍信号能得到更短时间间隔内激光器的频率变化细节。

综合图 2 的测试结果,说明所制作的稳频反馈回路在短时段内发挥了作用,可以满足连续波激光雷达对光源的稳频需求。

为了考察文中的频率监测方法的准确程度,用常规的拍频法观测了同一台稳频半导体激光器的长期频率漂移特性。即用频率稳定性更高的光频梳光源

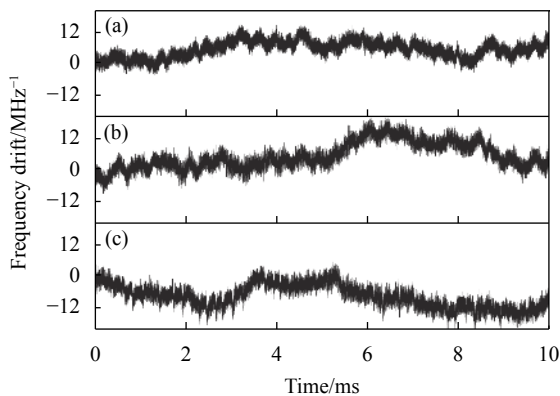


图 2 基于延时自外差法测量稳频 DFB-LD 在 10 ms 下频率漂移实验结果图。(a) 第一组 (14.04~ -3.33 MHz, 17.37 MHz); (b) 第二组 (18.24~ -6.28 MHz, 24.52 MHz); (c) 第三组 (3.24~ -17.17 MHz, 20.41 MHz)

Fig.2 The experiment result for optical frequency drift of the frequency stabilized DFB-LD within 10 ms based on delay self-heterodyne interferometer. (a) The first group (14.04~ -3.33 MHz, 17.37 MHz); (b) The second group (18.24~ -6.28 MHz, 24.52 MHz); (c) the third group (3.24~ -17.17 MHz, 20.41 MHz)

作为参考光源,该光源是中国计量科学研究院搭建的与原子钟锁定的飞秒光学频率梳系统 (FOFC),该 FOFC 的重复频率 ( $f_{rep}$ ) 为 200 MHz,载波包络偏置频率 ( $f_{ceo}$ ) 为 20 MHz,频率稳定度优于  $10^{-14}$  量级<sup>[17]</sup>。实验系统如图 3 所示,将稳频的 DFB-LD 与 FOFC 的输出光经过光耦合器 (OC) 进行相干混频,混频光经过准直器输出为空间光束,到达光栅后由小孔光阑滤出 1548.9 nm 附近的光频梳梳齿和稳频连续光,由光电探测器 (PD) 接收二者混频光的拍频分量,输出的电信号经过带通滤波器 (BPF) 和低噪声放大器 (LNA) 后送入计数器 (Counter) 和电谱仪 (ESA) 进行测量和观测。

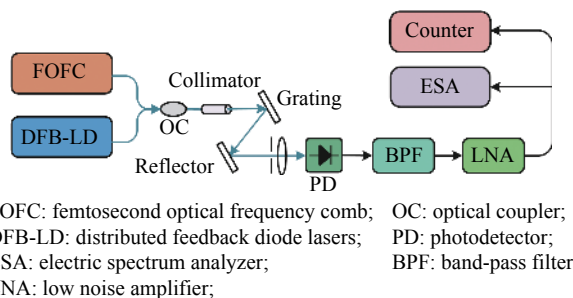


图 3 基于光纤飞秒光学频率梳测量稳频激光器频率漂移的系统原理图

Fig.3 Experimental setup for frequency drift measurement of frequency stabilized laser based on fiber femtosecond optical frequency comb

在实验中,稳频的 DFB-LD 的输出光与光频梳拍频时,会输出激光器波长与左右相邻的两个光频梳梳齿分量分别进行拍频的两个峰值,因此在电谱仪上会观察到两个拍频信号,如图 4 所示。在电谱仪上观察到,一旦启动 DFB-LD 的闭环稳频系统,拍信号沿横轴无明显频率抖动和漂移,说明稳频系统起到了控制作用。

图 5 是计数器连续记录的启动稳频回路后的 50 min 内其中频率偏低的一支拍信号频率的变化曲线。计数器的采样率为 1 s,由图 5 可以看出,激光器 50 min 内频率漂移了约 30 MHz。在开始稳频的半小时之内,由于激光器工作尚未稳定,此时频率波动范围较大,约为 25 MHz。后 20 min,激光器的频率逐渐趋于稳定,漂移范围较小,约为 5 MHz。

对比这两种频率测量方法,后者拍频法在采集拍信号的信息时,计数器的采样率为 1 s,便于采集长时间的信息,更适合观测长期的频率漂移性。而前者延

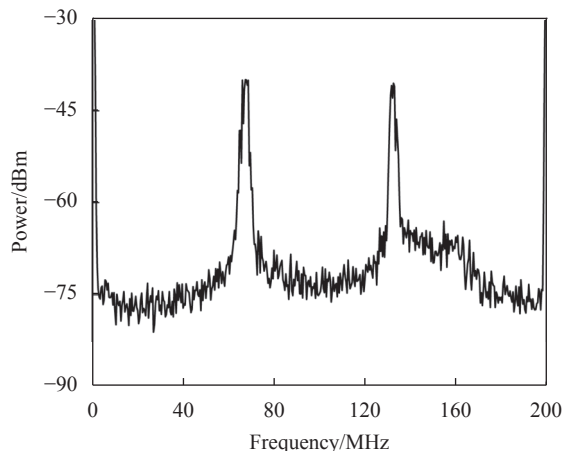


图 4 稳频 DFB-LD 通入飞秒光学频率梳系统下的拍频信号实验结果图

Fig.4 Experimental result of beat signal between DFB-LD with femtosecond optical frequency comb system

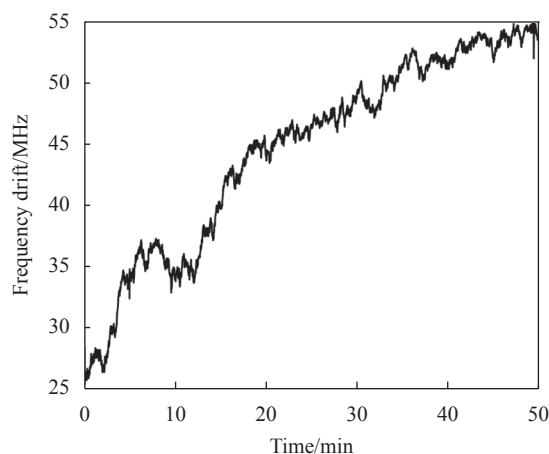


图 5 基于飞秒光学频率梳系统测量稳频 DFB-LD 在 50 min 内的频率漂移曲线

Fig.5 The experiment result for optical frequency drift of the frequency stabilized DFB-LD within 50 minutes based on the femtosecond optical frequency comb system

时自外差的方法在观测短期内的频率变化时,用了高采样率 (400 MSa/s) 获得拍信号的信息,能够观察到更丰富的细节,比如伺服反馈系统的启动时刻,失锁阶段等信息。更重要的是作者的延时自外差法能揭示稳频激光器频率在短时间内的较为连续的变化幅度,为评估连续波激光雷达的测距精度提供实验依据。但是同时也注意到,文中的稳频系统对激光器在初始运转阶段的长时间频率漂移的控制还不理想,还需要进一步改进。

### 3 结 论

为了表征稳频半导体激光器在短时段内的稳频特性,文中提出了一个监测频率的新方法,包括一种测量稳频半导体激光器短期频率曲线的算法和基于单光纤环延时自外差装置。采用该方法测量了一台稳频激光器在 10 ms 内的频率曲线,发现在 ms 量级的短时段内,自建的伺服闭环系统比较有效地抑制了激光器的频率漂移。但是对长时间段,仍然存在激光器频率漂移现象,说明该伺服稳频回路有可存在缺陷,有可能在极短时间内失锁或响应不及时。这一猜想在长期稳频测试结果中得到验证,当用光频梳拍频法测量该台稳频激光器的长期稳定性时,在 50 min 的频率锁定时段内,光频率缓慢地改变了约 30 MHz,这个改变量与短时间 (10 ms) 发生的变化量是同一个数量级,在很大程度上取决于 DFB-LD 稳频伺服回路中的电路参数。因此文中提出的检测方法可以快速显示出频率的变化,无需通过长时间的等待,就能获得激光频率变化的范围;每当调节伺服回路中元器件参数之后,通过快速地测量激光器频率地变化范围,就能知道伺服回路地调节是否沿着正确方向。因此,文中的频率监测方法为实时调节 DFB-LD 稳频伺服回路中的器件参数提供了快速有效的在线光频率分析手段。

### 参考文献:

- [1] Behroozpour B, Sandborn P A M, Quack N, et al. 11.8 Chip-scale electro-optical 3D FMCW lidar with 8  $\mu\text{m}$  ranging precision[C]//2016 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), 2016: 214-216.
- [2] Qiao Kai, Yang Jie, Jin Chenfei. Research on penetrating imaging LIDAR based on time-correlated single photon counting (invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(8): 20220404. (in Chinese)
- [3] Li Yujia, Zhou Xiaoqing, Li Guoyuan, et al. Progress and prospect of space-borne photon-counting lidar shallow water bathymetry technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(10): 20220003. (in Chinese)
- [4] Lu Z, Yang T, Li Z, et al. Broadband linearly chirped light source with narrow linewidth based on external modulation [J]. *Opt Lett*, 2018, 43(17): 4144-4147.
- [5] Feng Zhenzhong, Yang Zhenyuan, Yu Chen, et al. Design and

- application of high-speed and high-precision information processing of multi-line lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(11): 20210684. (in Chinese)
- [6] Liang H, Ying K, Wei F, et al. Narrow linewidth swept laser source based on cascaded multi-wavelength injection of DFB lasers [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(30): 9393-9399.
- [7] Huang Yifan, He Yan, Hu Shanjiang, et al. Extracting sea water depth by image processing of ocean lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(6): 20211034. (in Chinese)
- [8] Zou K, Bi R, Chen K, et al. Research on frequency stability of narrow linewidth laser in resonant optical gyro [J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 61: 102403.
- [9] Mu K L, Ma X R, Zhang S G, et al. Measurement of frequency stability in tunable lasers by using an F-P interferometer [J]. *Optoelectronics Letters*, 2014, 10(1): 74-76.
- [10] Cheng K W, Chang S K, Li B S, et al. Design and analysis of a resistive frequency-locked oscillator with long-term stability using double chopper stabilization [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2023, 70(2): 655-666.
- [11] Su Q S, Wei F, Sun G W, et al. Frequency-stabilized external cavity diode laser at 1572 nm based on frequency stability transfer [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2022, 34(4): 203-206.
- [12] Liu Tao, Ma Xiurong, Zhang Shuanggen, et al. Measurement of frequency stability of two independent lasers with the same model [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(4): 0408006. (in Chinese)
- [13] Zhi Y, Feng L, Lei M. Delay self-heterodyne measurement of narrow linewidth laser frequency drift characteristic [J]. *Optik*, 2014, 125(13): 3124-3126.
- [14] Duan Hongcheng, Wu Jin, Zhao Zhilong, et al. Frequency drift measurement on single-frequency laser by short fiber delayed self-heterodyne [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(7): 0408006. (in Chinese)
- [15] 余英, 李坤琼, 汤华丽, 等. 应用高等数学: 工科类[M]. 第三版. 重庆: 重庆大学出版社, 2015.
- [16] Zhang Mingfu, Yang Tianxin, Ge Chunfeng. Frequency stabilization technology of HCN absorption in 1.5  $\mu\text{m}$  DFB semiconductor laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(7): 20210435. (in Chinese)
- [17] Meng Fei, Cao Shiyong, Cai Yue, et al. Study of the femtosecond fiber comb and absolute optical frequency measurement [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(10): 125-131. (in Chinese)

## Method for characterizing frequency of frequency-stabilized semiconductor lasers

Li Shanshan<sup>1</sup>, Yang Jiewei<sup>1</sup>, Yang Tianxin<sup>1\*</sup>, Wang Zhaoying<sup>1</sup>, Zhang Hengkang<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of the Ministry of Education on Optoelectronic Information Technology, School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China ;

2. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China)

### Abstract:

**Objective** The demand for on-line and real-time monitoring of frequency-stabilized semiconductor laser is very high and urgent. Especially, the continuous wave lidar developed in recent years usually takes a single frequency semiconductor laser as a seed source, and obtains the frequency of the radar signal through coherent detection, so as to obtain the distance of the target. It results in the frequency accuracy of the seed light source directly determining the ranging accuracy. Therefore, new requirements are proposed for the characterization of the frequency stabilization of the light source. More attention is paid to short-term (in coherent time of sub-microsecond up to milliseconds) frequency change patterns, rather than the absolute frequency accuracy in a long duration of minutes, even up to 24 hours; At the same time, the frequency monitoring system is required to have functions of on-line and real-time monitoring.

**Methods** Aiming at these requirements, based on the principle of delay self-heterodyne, this paper proposes a

method for characterizing the frequency of frequency stabilized laser. By deriving the principle rigorously and programming the algorithm, the monitoring system not only has a simple structure (Fig.1), but also realizes the functions of online and real-time monitoring.

**Results and Discussions** The frequency variation curve of a frequency-stabilized distributed feedback semiconductor laser (DFB-LD) using hydrogen cyanide ( $\text{H}^{13}\text{C}^{14}\text{N}$ ) gas absorption spectrum based on side frequency locking technique is measured. The result is that the maximum frequency range of the stabilized laser is about 25 MHz in 10 ms, and it is clearly observed that the frequency changes of the laser are not in one-way drift pattern (Fig.2). In order to further verify the accuracy of this method, the mainstream femtosecond optical frequency comb beat method is adopted to measure the frequency change of the same frequency-stabilized DFB-LD offline (Fig.3-4). The experimental results show that the frequency range is about 30 MHz within 50 minutes (Fig.5).

**Conclusions** The measurement results of the two methods are in the same magnitude order of MHz, which proves that the method is a fast and reliable way for optical frequency analysis, and can be used to adjust a servo-loop system of frequency stabilized laser in real time and on-line in application systems.

**Key words:** semiconductor laser; self-heterodyne detection; frequency measurement; frequency stabilization

**Funding projects:** National Natural Science Foundation of China (62075164); Natural Science Foundation of Tianjin (19JCZDJC32500); Open Foundation for Space Optoelectronic Measurement and Perception Laboratory (WZYY-04002-21)