

1.5 μm DFB 半导体激光器 HCN 吸收稳频技术

张明富, 杨天新, 葛春风*

(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)

摘要: 在远距离相干测量系统中, 分布反馈式半导体激光器 (DFB-LD) 以其直接高速调制特性、低成本、可批量生产等优势成为精密遥测系统的核心光源, 因此对 DFB-LD 的窄线宽和短时频率稳定性提出了更高的要求。为了实现 DFB-LD 的频率稳定, 通过边频锁定与光电反馈回路的方法将激光频率锁定在 $\text{H}^{13}\text{C}^{14}\text{N}$ 气体吸收谱线 1548.956 nm 的一侧。将光电探测模块、后续误差信号生成与处理模块和激光器驱动模块集成在一块模拟电路板上, 从而有效地降低了系统的噪声; 使用除法器代替减法器来产生鉴频信号, 大大提高了系统灵敏度和稳频精度; 通过这两项技术的改进, 将 DFB-LD 的秒级频率稳定度提高了两个数量级, 从稳频前的秒级频率稳定度 3.67×10^{-8} 提高到稳频后的秒级频率稳定度 2.34×10^{-10} 。实验结果表明, 该 DFB-LD 稳频方案具有高的稳频精度, 且系统结构简单、体积小、可批量生产, 适合于无人机机载应用场景, 是远距离相干测量系统的理想光源。

关键词: 稳频技术; DFB 激光器; 模拟电路; 光电反馈

中图分类号: O436 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210435

Frequency stabilization technology of HCN absorption in 1.5 μm DFB semiconductor laser

Zhang Mingfu, Yang Tianxin, Ge Chunfeng*

(Key Laboratory of the Ministry of Education on Optoelectronic Information Technology, School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A distributed feedback laser diode (DFB-LD) has become the key light source, in which a narrow linewidth and short-term frequency stability are highly demanded, in the far-distance coherent measurement systems due to the characteristics of high-speed direct modulation, low cost, and mass production. To improve frequency stability of a DFB-LD, a new method of frequency locking was proposed. The frequency of the DFB-LD was locked to an absorption line of $\text{H}^{13}\text{C}^{14}\text{N}$ gas at the wavelength of 1548.956 nm by a photoelectric feedback loop based on the principle of side frequency locking. The photodetection module, subsequent error signal generation and processing module and the laser drive module were integrated on the same analog circuit board to minimize the noise of the system. The frequency discrimination signal was generated by using a divider instead of a subtractor to increase the system sensibility and precision of frequency stability significantly. The second-level frequency stability of the DFB-LD was improved by more than two orders of magnitude from

收稿日期: 2021-06-28; 修订日期: 2021-08-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (62075164); 天津市自然科学基金重点项目 (19JCZDJC32500)

作者简介: 张明富, 男, 硕士生, 主要从事于半导体激光器稳频技术、激光雷达、微波光子学方面的研究。

导师简介: 杨天新, 女, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光电子理论和技术的教学和科研工作。

通讯作者: 葛春风, 男, 副教授, 博士, 主要从事电子科学与技术专业的教学与科研方面的工作。

3.67×10^{-8} to 2.34×10^{-10} by using two techniques. The experimental results show that the frequency stability scheme of DFB-LD has high precision frequency stability, in addition to the features of simple structure, low cost, mass production and suitable for UAV applications. The DFB-LD is an ideal light source for far-distance coherent measurement.

Key words: frequency stabilization technology; DFB laser; analog circuit; photoelectric feedback

0 引言

随着半导体激光器的诞生与发展,其易于调谐与调制、体积小、质量轻、波长覆盖范围广等优点,已被广泛应用于高分辨率光谱学、光通信、激光雷达、频率标准、精密测量等领域,在航空国防、医疗保健等方面,其作用也越来越重要^[1-3]。但是自由运转的半导体激光器在工作状态下的噪声和频率漂移会明显超过以上部分应用对于高频率稳定性和低噪声的要求。因此,对该类激光器进行主动稳频以提高其频率稳定性已成为当今的热门研究方向^[4]。

其中以外腔半导体激光器(ECDL)^[5]的稳频效果最为突出,能够获得较高的频率稳定度。山西大学的王杰等人于 2011 年采用饱和吸收光谱法和偏振光谱法进行稳频,ECDL 在 300 s 内频率起伏分别为 1.5 MHz 和 0.6 MHz^[6]。中国计量大学的丁振名等人于 2019 年通过锁定 698 nm 外腔半导体激光器和飞秒光频梳的拍频信号对 ECDL 进行稳频,取得了秒级频率稳定度约 3.6×10^{-11} 的成果^[7];中国科学院上海光学精密机械研究所的吉经纬等人基于 780 nm 商用外腔半导体激光器利用嵌入式系统设计了一个长期全自动稳频系统,通过锁定到铷原子的吸收峰处实现了 2.3×10^{-13} 的长期频率稳定度^[8]。

但是,外腔半导体激光器具有调谐速度慢,体积大,光路准直和激光稳定困难等缺点,目前仍在进一步发展和完善中。

而另一类半导体激光器——分布反馈式半导体激光器(DFB-LD)凭借直接高速调制、低成本、体积小、易于集成、可批量生产等优势成为了光纤通信的核心光源^[9]。但是 DFB-LD 电流调谐度较高,1 mA 电流会引起几百 MHz 的频率漂移,因此,DFB-LD 的驱动源本身的电路噪声就能导致频率稳定度的恶化,所以对 DFB-LD 实现稳频难度较大。

日本的 Jun Tsuboi 等人于 2016 年采用光混合技术和微波滤波器的 DFB-LD 波长控制系统将输出波

长锁定在光频梳上,但由于他们使用的光频梳本身的频率波动在 100 MHz 以内,所以 DFB-LD 波长误差只能保持在 ± 50 MHz 以内^[10]。同年,中国科学院半导体研究所的郭金金等人利用边带稳频的方法将 1550 nm 的 DFB-LD 的输出波长稳定在 $\text{H}^{13}\text{C}^{14}\text{N}$ 的吸收线边缘,并利用数字信号处理器完成自动寻频和稳频,实现了 2 h 内频移控制在 15 MHz 以内的结果^[11];中国科学院安徽光学精密机械研究所梅教旭等人于 2019 年提出了一种基于水汽的二次谐波吸收特性来实现 1396 nm 窄线宽 DFB-LD 的稳频新方法,实验结果表明:在 100 h 内激光器输出的波长漂移被有效地抑制在 ± 0.16 pm(相当于 24.63 MHz)范围内^[12]。由此可见,DFB-LD 的相对稳频精度一般在 10^{-7} 数量级,进一步开发更高精度的 DFB-LD 的稳频技术是非常必要和迫切的。

文中提出了一种基于 $\text{H}^{13}\text{C}^{14}\text{N}$ 气体吸收池的 DFB-LD 稳频技术,在光电反馈回路中将激光器驱动模块与光电探测模块及后续误差信号产生与处理模块集成在一块模拟电路板上,从而大幅度降低了电路噪声;同时使用除法器来产生鉴频信号,相比于传统的减法器能产生灵敏度更高的误差信号,从而显著地提高了稳频精度,这是文中亮点和新颖之处。最终笔者课题组将 DFB-LD 输出波长锁定在 $\text{H}^{13}\text{C}^{14}\text{N}$ 的 P9 吸收线一侧,其输出波长为 1548.958 nm,秒级频率稳定度达到 2.34×10^{-10} 。

1 稳频基本原理和方法

对于自由运转的 DFB-LD 来说,外界温度起伏会引起谐振腔腔长、能带间隔、折射率等改变,激光器驱动电流的噪声会影响 P-N 结间的载流子浓度、增益和能带间隔等参量涨落,从而导致输出光功率与光频率的抖动与漂移。尽管前人采用了恒温、稳定驱动电源等被动稳频措施^[13-14],但是该类激光器在自由运转条件下的噪声和频漂非常显著,无法满足众多应用的要求。因此需要对半导体激光器采用主动稳频方法

以实现激光器的稳频工作。

主动稳频方法要求半导体激光器输出波长锁定到外部参考源上,该外部参考源可以是法布里-珀罗(F-P)腔和原子(Rb、K)或分子(C₂H₂、HCN)吸收谱线等无源参考源,也可以是商用碘稳频 He-Ne 激光器和飞秒光学频率梳等频率稳定度更高的光源。锁定到无源参考源的原理是:参考源与激光相互作用产生频率参考谱线,通过将激光频率锁定在谱线一侧或峰值处来实现激光器频率稳定的目的。锁定到有源参考源的原理是:将参考光源与待稳频激光进行拍频,通过将拍频信号的频率锁定到一个射频基准信号上,从而实现激光器稳定频率的目的。这两类参考源各有优缺点,其中无源参考源的分子吸收谱线不会受外界环境影响,稳定度高,且气室体积小,结构简单,易于小型化使用,因此文中选择分子吸收谱线作为参考源。

文中的稳频方案是基于 H¹³C¹⁴N 气体吸收谱线的边频锁定方法,如图 1 所示。利用不同激光频率在该吸收谱线上的透过率不同,将激光器的频率锁定到该谱线右侧斜率较大的锁定点(Lock point)上。若激光频率偏离该点,则透过气体池的光功率发生变化,导致气体池后面的光电探测器输出的电压发生变化,即产生了误差信号(Error signal)。光电反馈系统会根据频率波动产生变化的电压值与锁定点处固定的电压值进行比较,产生一个反馈回激光器的补偿电压,使激光器的输出频率重新锁定到锁定点上。从图 1 所示的锁定点位置可知,在一定频率范围内,误差信号与频率呈线性关系,所以误差信号可作为理想的鉴频信号。

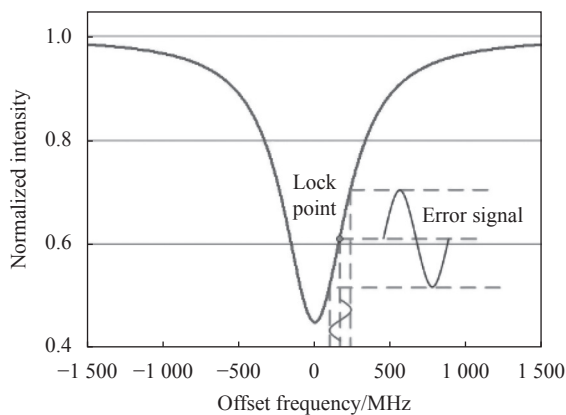


图 1 边频锁定原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of side frequency locking principle

显然,误差信号线性区域斜率越大,则鉴频灵敏度越高,稳频效果越好。文中实验中通过两种方式来提高鉴频灵敏度:一是选择低气压的气体吸收池以减小吸收谱线线宽,使吸收谱线两侧包络线更陡峭,从而提高鉴频信号灵敏度;二是采用了除法器,用通过吸收池的光产生的电信号与未经吸收池的光产生的电信号的比值来生成误差信号,相比于常规使用的减法器而言,能够产生更高灵敏度的鉴频信号。

2 激光器稳频系统设计

该稳频系统结构图如图 2 所示。该系统主要由 DFB-LD、氰化氢气室(HCN Cell)、光电探测器(PD 1 和 PD 2)、除法器(÷)、温控模块(TEC)、比例-积分(PI)模块等模拟电路组成。黑线为电路,红线为光路。DFB-LD 出射的连续激光经 90/10 的耦合器后,90% 的激光用于外部应用,或进入波长计(WM, WA-1100)实现波长实时检测。该波长计显示分辨率为 1 pm。剩余 10% 的激光经过 50/50 的耦合器后分为两路,一路经过 HCN 气体吸收池被吸收谱线吸收后由光电探测器(PD 1)转化为电信号,另一路直接被另一个光电探测器(PD 2)接收并转化为电信号,两路电信号相除后得到的比值电压即为 H¹³C¹⁴N 分子吸收谱线的透过率,在一定范围内透过率与激光频率成正比。高精度参考电压(V_{ref})值为预先设定的 H¹³C¹⁴N 分子吸收谱线的透过率值,实验中设定为 1548.958 nm 处的透过率值。将该比值电压与高精度参考电压经比较器(COMP)进行比较后,由比例-积分电路处理并产生需要调整的反馈电压以驱动半导体激光器在波长 1548.958 nm 处工作。

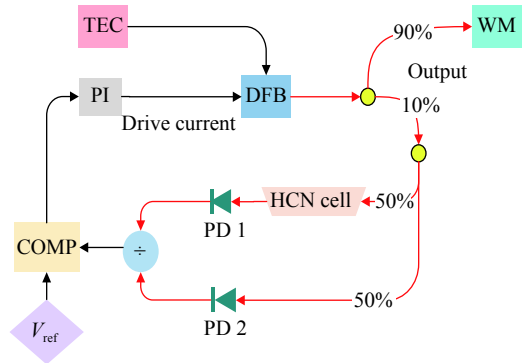


图 2 DFB 激光器稳频系统结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the DFB laser frequency stabilization system

实验证明,该系统可以将激光频率锁定到 $H^{13}C^{14}N$ 分子吸收谱中的不同谱线的右侧,实现不同激光波长的锁定。

2.1 DFB-LD 特性

选用高功率窄线宽蝶形封装的 DFB-LD(四川腾光科技),通过改变激光器内部温度和驱动电流来改变激光输出波长。其主要参数如表 1 所示。

表 1 DFB-LD 主要参数

Tab.1 main parameters of DFB laser diodes

Parameter	Value
Power/mW	40-60
Linewidth/ kHz	474
Central wavelength/nm	1549.100
Temperature tuning coefficient/nm·°C ⁻¹	0.100
Current tuning coefficient/nm·mA ⁻¹	0.010
Operation temperature/°C	-20-70

实验中保持激光器工作温度在 24 °C,控温精度为 ± 0.03 °C,通过闭环负反馈驱动电流使其输出波长锁定在 1548.958 nm 附近。

2.2 $H^{13}C^{14}N$ 气室

氰化氢分子的吸收谱线覆盖范围为 1530~1565 nm,如图 3 所示^[15]。

实验使用了气压约 2.4 Torr 的 $H^{13}C^{14}N$ 气室(Wavelength References),低气压是为了减少分子间的碰撞,从而压缩吸收谱线的线宽,增大吸收谱线两侧包络线的陡峭程度,提高稳频系统中频率误差信号的分辨率和灵敏度。经厂商测定,实验中锁定的 P9 线的半高全宽为 5 pm,比标准气室(25 Torr, 1 Torr \approx 133.322 Pa)的线宽(\sim 15 pm)要窄很多,所以使得误差信号分辨率大大提高,灵敏度也大大增加,有利于提高稳频系统的精度。

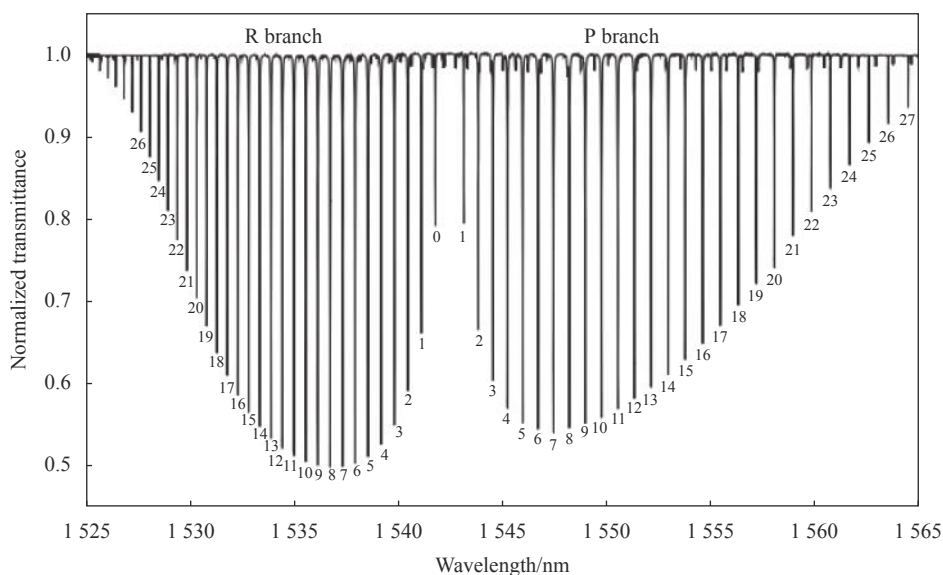


图 3 $H^{13}C^{14}N$ $2v_3$ 旋转振动带的归一化光谱

Fig.3 Normalized spectrum of $H^{13}C^{14}N$ $2v_3$ rotational-vibration band

2.3 负反馈+驱动电路

为了尽量减少 DFB-LD 光源系统内部噪声对频率锁定效果的影响,实验中将负反馈电路与驱动电路集成在一块 PCB 电路板上,其部分原理图如图 4 所示。图 2 中经过吸收池的光入射到光电探测模块 U7, 未经过吸收池的光入射到光电探测模块 U1。两者电压经过除法器 U3 相除后送入电压比较器 U4 的同相输入端。U12 电压基准模块产生 10 V、精度为

0.1% 的基准电压。通过调节电位器 P1 来改变电压比较器 U4 的反相输入电压,即参考电压,将该参考电压调到使激光器输出波长在 1548.958 nm 处附近,输出波长可通过波长计观测得到。U4 的比较输出电压经 PI 电路 U5 的比例与积分作用后生成一直流误差信号,该误差信号经限流保护模块 U6 反向输出到激光二极管中作为驱动与补偿电流使用。其中限流保护模块 U6 的限制电流设为 373.43 mA。

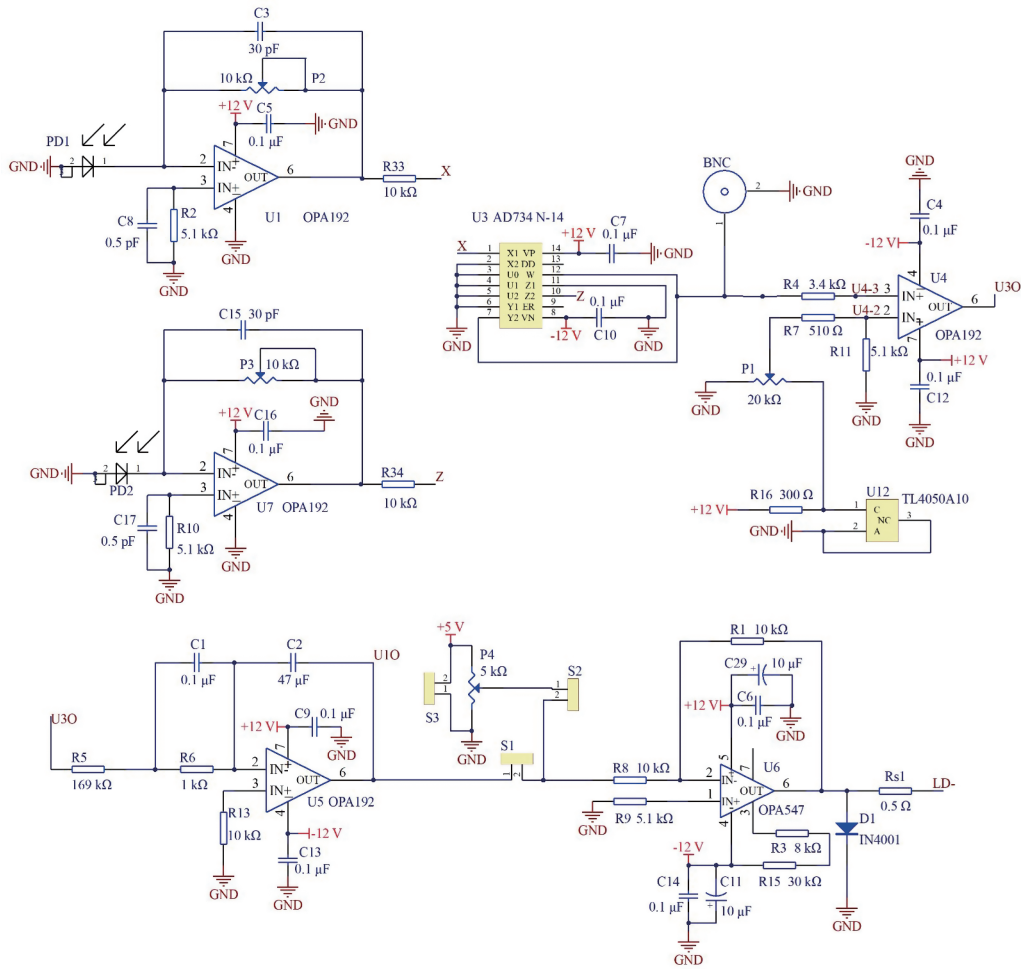


图 4 反馈与部分驱动电路设计

Fig.4 Feedback and partial drive circuit design

3 稳频验证及实验结果

验证DFB-LD的稳频效果的方法通常是先将稳频后的DFB-LD与已知频率稳定度更高的连续激光器进行拍频,观测拍频信号的频率稳定性。如果参与拍频的连续激光器的频率稳定度足够高(至少高三个数量级及以上),就可以根据拍频信号的频率波动来确定稳频后的DFB-LD的频率稳定度。

实验中,高频率稳定度的连续光波是中国计量科学研究院研制的飞秒光学频率梳的某个梳齿。飞秒光学频率梳的频率覆盖范围为1100~2200 nm,其重复频率 $f_{rep}=250.002$ MHz,载波包络偏移频率 $f_{ceo}=20$ MHz,频率稳定度达到 10^{-14} 量级,比文中研制的稳频DFB-LD的稳频精度高三四个数量级。拍频系统如图5所示。图中橙色为光纤光路,蓝线为空间光路,黑线为电路。

将光频梳(FOFC)与DFB-LD的输出光在光耦合器(Coupler)中混频,经准直器(Collimator)输出到空间光栅(Grating),光栅将光谱中1548.9 nm的光及其与光频梳重叠部分用空间小孔光阑滤出,经反射镜(Reflector)反射后用带尾纤的光电探测器(PD)探测拍频信号。此方法与纯粹的空间光路拍频相比可以更好地实现混频光场的模式匹配,获得更高的信噪比。输出的拍频电信号经带通滤波器(BPF)滤波和

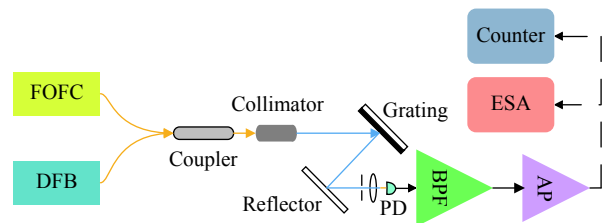


图 5 拍频系统结构框图

Fig.5 Block diagram of beat frequency system

低噪声放大器 (AP) 放大后送往计数器 (Counter) 计数, 同时也送往频谱仪 (ESA) 实时监测。计数器采样时间为 1 s。图 6 为频谱仪上稳定的飞秒光频梳与 DFB-LD 输出光的拍频信号。由图 6 可知该拍频信号的信噪比达到 25 dB, 足以保证计数器计数正确。

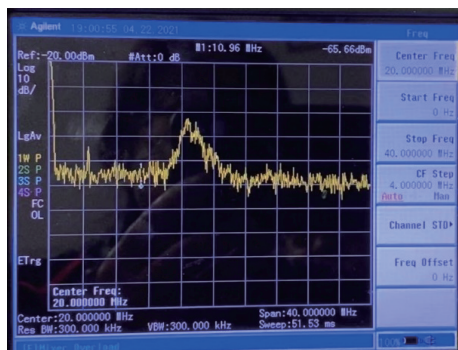


图 6 飞秒光频梳与 DFB 激光器输出光拍频信号

Fig.6 Femtosecond optical frequency comb and DFB laser output optical beat frequency signal

为了考察长期频率稳定度, 图 7 为无稳频反馈与有稳频的 DFB-LD 与光频梳梳齿的拍频信号的频率波动测试结果。在无稳频的 12 min 内 DFB-LD 自由运转, 其频率漂移约 60 MHz; 加入稳频回路后, 在频率锁定状态下的 12 min 内, DFB-LD 的频率的最大偏移约 1 MHz, 笔者分析认为这主要是由于温度控制精度 ($\pm 0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$) 不高且存在外部噪声的干扰导致的激光器输出频率存在随机游走造成的。计算得到的秒级平均频率波动是 46.33 kHz, 与稳频前秒级平均频率波动 7.717 MHz 相比, 稳频后 DFB-LD 的短时稳频精度有很大的提高。

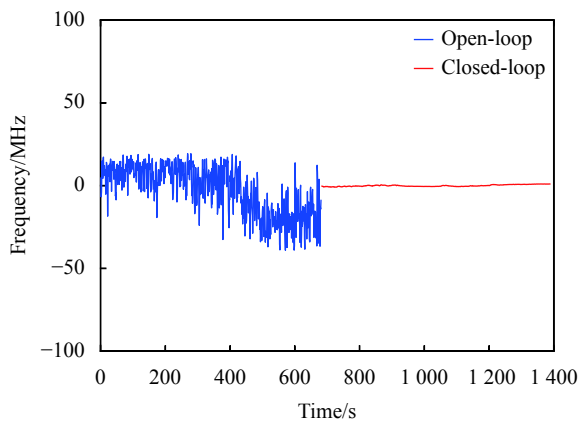


图 7 稳频前后频率波动

Fig.7 Frequency fluctuation before and after frequency stabilization

图 8 为稳频前后计算得到的艾伦偏差结果。由图 8 可知, 稳频后的艾伦偏差明显低于稳频前的艾伦偏差。秒级频率稳定度达到了 2.34×10^{-10} 。虽然存在噪声影响使得艾伦偏差曲线在百秒级频率稳定度变低, 但是依然显示出短时频率稳定性逐渐改善的趋势。

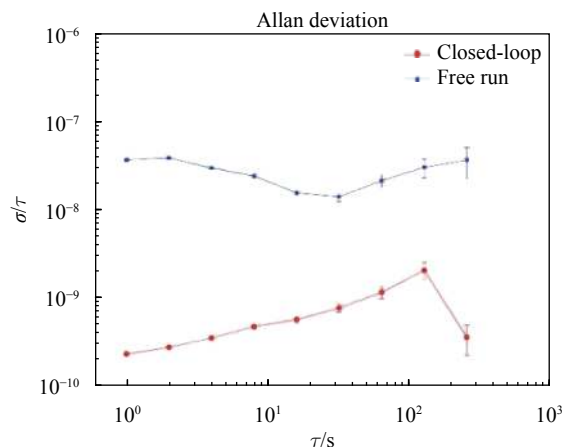


图 8 稳频前后艾伦偏差比较

Fig.8 Allen deviation comparison before and after frequency stabilization

4 结论

文中提出了一种基于 $\text{H}^{13}\text{C}^{14}\text{N}$ 气体吸收池的边频锁定技术, 在以下两方面进行了改进。为了降低驱动及锁定系统的内部噪声, 将光电反馈回路中的温控模块、光电探测模块、除法器模块、基准电压与电压比较模块、PI 模块、限流保护模块等集成在一块 PCB 电路板上; 为了提高鉴频信号的灵敏度, 采用除法器来处理两路光电探测器的电信号, 以期实现更高的系统灵敏度和频率稳定性。结果表明, 虽然该系统存在长期频率漂移, 但是短期频率稳定度较高, 秒级频率稳定度达到了 2.34×10^{-10} , 比稳频前提升了两个数量级, 具有较明显的稳频效果。后续将会对系统的温度进行进一步控制, 同时做好电磁屏蔽以防止驱动及锁定电路板受外部噪声干扰, 解决长期频率漂移的问题, 达到更高的长期频率稳定性。

参考文献:

[1] Chen L H, Yang G W, Liu Y X. Development of semiconductor lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0500001. (in Chinese)

- [2] Yang C A, Zhang Y, Shang J M, et al. Research progress of 2-4 μm mid-infrared antimonide semiconductor lasers (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(12): 20201075. (in Chinese)
- [3] Sun S M, Fan J, Xu L, et al. Progress of tapered semiconductor diode lasers [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(1): 48-58. (in Chinese)
- [4] Han Shunli, Wu Xin, Lin Qiang. Frequency stabilization technologies of semiconductor laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(5): 1189-1193. (in Chinese)
- [5] Hua J P, Jiang Y. Recent progresses of tunable external cavity diode laser [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2021, 42(1): 11-19, 56. (in Chinese)
- [6] Wang J, Gao J, Yang B D, et al. Comparison of frequency locking of 780 nm diode laser via rubidium saturated absorption and polarization spectroscopies [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(3): 305-312. (in Chinese)
- [7] Ding Z M. Research on laser frequency stabilization method based on femtosecond optical comb[D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2019. (in Chinese)
- [8] Ji J W, Cheng H N, Zhang Z, et al. Automatic laser frequency stabilization system for transportable ^{87}Rb fountain clock [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(22): 2214002. (in Chinese)
- [9] Lu D, Yang Q L, Wang H, et al. Review of semiconductor distributed feedback lasers in the optical communication band [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(7): 0701001. (in Chinese)
- [10] Jun Tsuboi, Takeshi Kuboki, Kazutoshi Kato. Wide-capture-range, high-precision wavelength stabilization within ± 50 MHz for flexible-grid wavelength division multiplexing by photomixing technique [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2016, 55(8S3): 08RB10.
- [11] Guo J J, Liu N H, Deng Y et al. Frequency stabilization of a semiconductor laser based on gas absorption cell[C]//2016 25th Wireless and Optical Communication Conference (WOCC), 2016: 1-3.
- [12] Mei J X, Wang L, Tan T, et al. Research on new method of frequency stabilization of DFB laser based on second harmonic characteristics [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, 39(10): 2989-2992. (in Chinese)
- [13] Dai Q, Song W W, Wang X J. Design and stability analysis of high frequency LD's driving circuit [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(5): 745-748. (in Chinese)
- [14] Cong M L, Li L, Cui Y S, et al. Design of high stability digital control driving system for semiconductor laser [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(7): 1629-1636. (in Chinese)
- [15] Gilbert S, Swann W, Wang C. Hydrogen cyanide $\text{H}^{13}\text{C}^{14}\text{N}$ absorption reference for 1530 nm to 1565 nm wavelength calibration —SRM 2519a[S/OL]. (2005-08-01)[2021-06-11]. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.260-137>.