

## 参考光学频率梳的数字激光稳频技术

孔萌<sup>1,2,3</sup>, 陆彦婷<sup>1,2\*</sup>, 林栋<sup>1,2,3</sup>, 郑兆琪<sup>1,2</sup>, 李常伟<sup>1,2,3</sup>, 朱小明<sup>1,2</sup>, 张思炯<sup>1,2,3</sup><sup>1</sup>中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042;<sup>2</sup>中国科学院天文光学技术重点实验室(南京天文光学技术研究所), 江苏 南京 210042;<sup>3</sup>中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049

**摘要** 针对激光频率长期漂移锁定问题, 实现了一套以光学频率梳为参考源的数字稳频系统。该系统将被控激光与光学频率梳外差干涉, 获取表征激光频率偏移的拍频信号, 通过自主研发的数字计数式频率电压转换电路测量拍频电信号的频率, 并将频率值转换为误差电压信号, 通过主控程序反馈控制被控激光。在对 760 nm 窄线宽半导体激光器的长期频率稳定实验中, 本系统将该激光器频率的长期稳定度提高 2 个量级, 达到  $4.4 \times 10^{-10}$  ( $\tau=262$  s), 表明本系统可对波长在光学频率梳范围内的激光实现长期偏频锁定, 为进一步激光精细锁频锁相提供基础。

**关键词** 激光光学; 外差干涉; 半导体激光器; 光学频率梳; 激光稳频; 频率电压转换

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1614001

## Digital Laser Frequency Stabilization with Reference to An Optical Frequency Comb

Kong Meng<sup>1,2,3</sup>, Lu Yanting<sup>1,2\*</sup>, Lin Dong<sup>1,2,3</sup>, Zheng Zhaoying<sup>1,2</sup>, Li Changwei<sup>1,2,3</sup>, Zhu Xiaoming<sup>1,2</sup>, Zhang Sijiong<sup>1,2,3</sup><sup>1</sup> National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China;<sup>2</sup> CAS Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Nanjing, Jiangsu 210042, China;<sup>3</sup> University of Chinese Academy of Sciences, School of Astronomy and Space Science, Beijing 100049, China

**Abstract** Aiming at the problem of locking the long-term frequency drift of a laser, a digital laser frequency stabilization system is achieved with reference to an optical frequency comb. In this system, the heterodyne interference between the slave laser and the optical frequency comb is first performed to obtain the beat signal which represents the laser frequency drift. Then, the frequency of the beat signal is measured by a self-developed digital-counting-based frequency to voltage conversion circuit, and the value of the measured frequency is converted to an error voltage signal. At last, the slave laser is controlled through the feedback control of the master program. In the long-term frequency stabilization experiment of a 760 nm narrow linewidth semiconductor laser, the system improves the long-term stability of the laser frequency by two orders of magnitude, and the stability of the laser reaches  $4.4 \times 10^{-10}$  ( $\tau = 262$  s). Experimental result shows that the proposed system can achieve a long-term frequency drift locking for lasers with wavelength locating in the spectrum range of the optical frequency comb. This system can provide a basis for further fine-locking of the frequency and phase of the laser.

**Key words** laser optics; heterodyne interference; semiconductor lasers; optical frequency comb; laser frequency stabilization; frequency to voltage conversion

**OCIS codes** 140.3425; 040.2840; 250.5960

收稿日期: 2021-01-19; 修回日期: 2021-02-20; 录用日期: 2021-03-18

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11873069)、国家自然科学基金青年基金(11703060, 11803058)

通信作者: \*ytlu@niaot.ac.cn

## 1 引言

高稳定度激光在激光通信<sup>[1]</sup>、超稳微波信号产生<sup>[2]</sup>、精密激光光谱<sup>[3]</sup>、高分辨率光谱定标<sup>[4]</sup>、激光测距<sup>[5]</sup>等领域中都有着广泛应用。但受激光器内部结构稳定性和外部环境因素影响,输出激光的频率会发生漂移。为了获得频率长期稳定的激光,需要对激光器进行稳频。

激光稳频技术分为被动稳频和主动稳频两种。被动稳频技术主要通过温度控制、隔震等方法实现激光稳频。被动方法简单易行,但是该技术下的激光器长期稳定度有限。主动稳频<sup>[6-11]</sup>通常选择一个稳定的频率参考源,通过激光和参考源的外差干涉产生反映激光漂移的拍频光信号,并将拍频光信号转换为频差电信号主动补偿控制激光器,从而将激光器的频率稳定在选定的参考源上。主动稳频中传统的参考频率基准有原子分子的跃迁谱线中心频率或饱和吸收线<sup>[8]</sup>、光学谐振腔的共振频率<sup>[9]</sup>等。这两种参考源频率都比较稳定,但原子和分子的跃迁和吸收谱线存在频率展宽效应,而光学谐振腔需要精密的控温隔振系统来抑制外界环境因素的影响,因此这两种参考源也都存在频率波动的现象,保持长期稳定需要复杂的结构设计。此外,由于传统参考源频率单一,只适用于某些特定波长单频激光器的稳频,对于需要同时对不同波长激光进行稳频的场景则需要同时选用多个频率参考源,进一步增加了稳频系统的复杂程度和成本。

近年来,光学频率梳作为一种新型光源开始在高精度定标<sup>[4]</sup>、精密测量<sup>[12]</sup>中大量使用。光学频率梳在时域上由等间距的窄脉宽脉冲序列组成,在频域上表现为等频率间隔分布的梳齿,具有窄脉宽、宽光谱的特性<sup>[13]</sup>,而且光学频率梳的重复频率( $f_{\text{rep}}$ )和偏置频率( $f_{\text{ceo}}$ )均可锁定于原子钟上,从而使其

梳齿具有长期高稳定度,可以为波长位于光梳光谱范围内的单频激光提供参考频率基准。目前,国内外都已有研究机构<sup>[14-17]</sup>实现了将单频激光锁定在光学频率梳上。意大利米兰理工大学 Sala 等<sup>[14]</sup>以掺铒光纤光学频率梳作为参考源,采用了前置反馈锁定技术,利用声光移频器(AOFS)对激光器频率进行快速校正补偿,将  $1.55 \mu\text{m}$  的连续激光线宽缩小至 10 kHz。哈尔滨工业大学的 Yang 等<sup>[15]</sup>提出了一种数字反馈与声光移频器(AOFS)前馈控制相结合的复合稳频方法,成功将连续激光锁定在光学频率梳上,相对稳定性达到  $\pm 3.62 \times 10^{-14}$ 。

自由运行的单频激光器输出频率通常极不稳定且漂移量较大,针对其频率长期稳定问题,本文搭建了一套基于外差干涉的连续激光数字稳频系统。该系统以光学频率梳为频率参考源,对频率漂移在光梳梳齿范围内任意位置的激光,均有与其频率最接近的梳齿作为参考基准。激光与相应梳齿干涉的拍频信号经电子混频降频后其频率仍可达百兆赫兹量级,没有适用的商用高频频率电压转换芯片和模块电路。为此,本文研制了一块针对百兆赫兹量级高频信号的频率电压转换电路模块,该模块采用数字计数方案测量信号的频率,并将频率转换为电压信号输出,相对于基于嵌入式平台的测频解决方案,具有结构紧凑、性能稳定、成本低的特点。实验稳频系统以波长为 760 nm 的窄线宽半导体激光器为稳频对象,以掺铒光纤飞秒光学频率梳为参考,实验结果表明本系统可实现对单频激光的长期偏频锁定。

## 2 系统结构

激光稳频系统总体结构如图 1 所示,该系统由外差干涉光路、鉴频电路、高频频率电压转化电路、反馈控制模块等部分组成。被控激光与光学频率梳外差干涉的拍频信号包含激光与参考梳齿频差  $\Delta f$

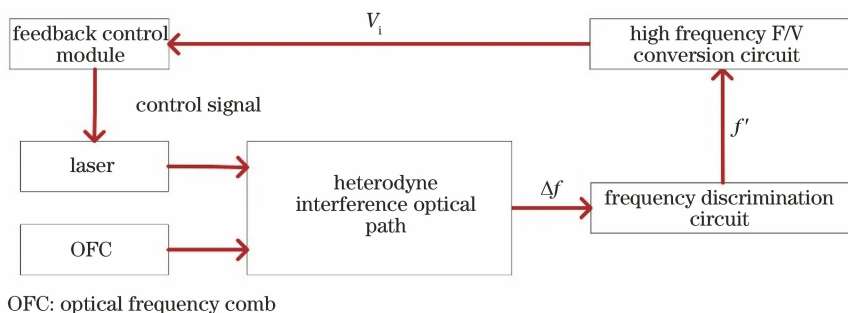


图 1 激光稳频系统总体结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of general structure of laser frequency stabilization system

的信息,经光电探测器转换为电信号后,通过鉴频电路进一步降低频率至  $f'$ ,然后通过高频频率电压转换模块转化为误差电压信号  $V_i$ 。上位机主控程序通过采集卡采集误差电压信号,处理分析后输出反馈控制信号至激光控制器电流调制端控制激光器的频率。各模块具体结构讨论如下。

### 2.1 外差干涉光路

外差干涉光路如图 2 所示。光学频率梳通过中心波长与待控激光波长相同带宽为 10 nm(半峰全宽)的带通滤波片后,与被控激光于立方分光棱镜(CBS)合束,合束光通过线性偏振器调整偏振方向后,入射到闪耀光栅上进行色散,色散后的光束经透

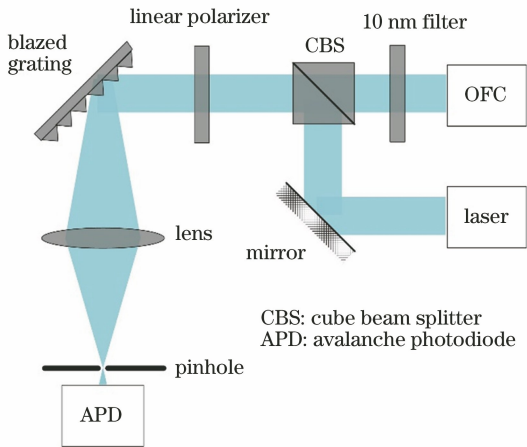


图 2 外差干涉光路示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of optical path of heterodyne interference

镜聚焦后经针孔入射到雪崩二极管(APD)上,探测拍频信号。滤波和色散的主要作用是尽量减少入射到 APD 上的光梳梳齿的数量,提高拍频信号的信噪比。

### 2.2 鉴频电路

鉴频电路将拍频信号的频率降低至后续数字测频电路的工作范围,其结构如图 3 所示。频率为  $\Delta f$  的拍频信号经低噪声放大器放大后与压控振荡器输出的频率为  $f_{10}$  的本振信号混频,通过低通滤波器和放大器得到频率为  $f' = |\Delta f - f_{10}|$  的鉴频信号。

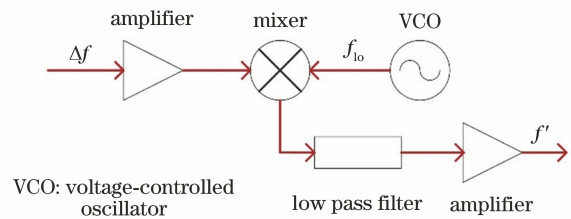


图 3 鉴频电路结构示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of frequency discrimination circuit structure

### 2.3 高频频率电压转换电路

高频频率电压转换电路采用数字计数原理<sup>[18]</sup>测量鉴频信号的频率值,并将频率值转化为电压值输出。如图 4 所示,过零比较器将频率为  $f'$  的鉴频信号转换为方波信号;计数器对采样周期内方波信号中下降沿个数进行计数;数模转换器(DAC)将二进制计数值转化为对应的模拟电压值  $V_i$ ,作为激光器控制的误差信号。

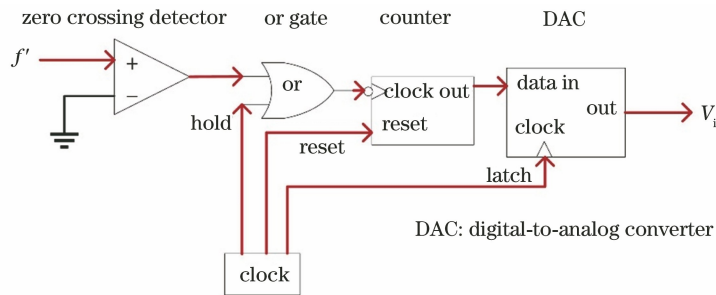


图 4 高频频率电压转换电路结构示意图  
Fig. 4 Schematic diagram of high frequency to voltage conversion circuit structure

图 4 中的 clock 模块产生控制采样的时序逻辑。该模块由晶振、分频器、移位寄存器和异或门等器件组成,产生保持、重置、锁存三路信号,用以控制计数器的采样周期,并使数模转换器在计数器输出保持时间内完成数模转换。时序逻辑如图 5 所示,本文采用 25 MHz 的晶振产生时基信号,经过 8 位分频器产生 195.3 kHz 的采样时钟,在死区时间

内,保持信号处于高电平时使计数器输出锁定不变,锁存信号的上升沿触发数模转换器工作,并在锁存信号处于高电平时间内完成数字信号向模拟信号的转换,重置信号的上升沿触发计数器清零,重置信号高电平结束后计数器重新开始计数。

### 2.4 反馈控制模块

反馈控制模块如图 6 所示,上位机主控程序

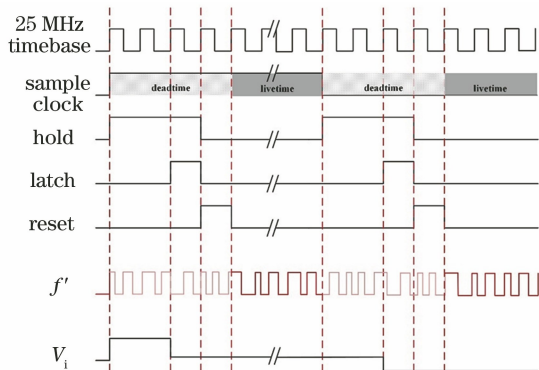


图 5 高频频率电压转换电路时序逻辑图

Fig. 5 Timing logic diagram of high frequency to voltage conversion circuit

(PC)通过采集卡采集经过高频频率电压转换后的误差电压值,处理分析后输出控制电信号至被控激光控制器电流调制端,反馈控制激光器的频率。

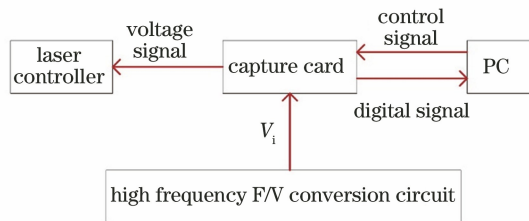


图 6 反馈控制模块示意图

Fig. 6 Schematic diagram of feedback control module

本文将压控振荡器输出的本振信号频率作为被控激光与光学频率梳拍频的锁定频率,以锁定频率为中心设置双侧锁频死区,即拍频频率在该区域内时,保持控制电压不变,而当拍频频率超出死区范围时采取相应的控制操作,死区边界对应的阈值电压为  $V_{th}$ 。根据光学频率梳与被控激光的拍频信号特性,以及考虑到本系统没有鉴相环节,本文针对激光长期频率漂移锁定制定的控制策略如图 7 所示:当采集的误差电压值超出死区对应的阈值电压  $V_{th}$  时,正向调整激光器频率一步,再次采集误差电压值进行判断,若仍超出设定值  $V_{th}$ ,则反向调整激光器频率两步;当采集的误差电压小于  $V_{th}$  时,控制电压输出保持不变。

### 3 实验与分析

本系统使用的光学频率梳为掺镱光纤飞秒光学频率梳,其  $f_{rep}$  为 810 MHz,  $f_{ceo}$  为 30 MHz,该光梳经光子晶体光纤(PCF)扩谱后光谱范围为 550~1500 nm。鉴频电路模块中的压控振荡器、放大器、混频器和低通滤波器等模块使用 minicircuits 公司产品,低通滤波器截止频率为 100 MHz,本振信号

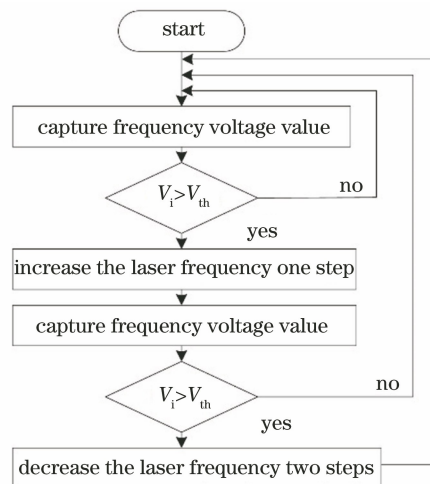


图 7 反馈控制流程图

Fig. 7 Flow chart of feedback control

频率设置为 120 MHz。反馈控制模块数据采集部分使用研华 USB-4716 采集卡。上位机主控程序使用 Visual C++ 实现,对误差电压  $V_i$  的采样速率设置为 1 kS/s。

被控激光为 Sacher-Laser 公司型号为 S1-0760-040 的 760 nm 窄线宽半导体激光器。被控激光控制器可接受的外部电压范围为  $-10 \sim 10$  V,精度为 0.0003 V,对应最小调频步长为 9 MHz。采集误差电压  $V_i$  分析该激光器频率漂移特性可知,1 ms 内激光频率最大漂移值约为 10 MHz。由于激光控制器最小调频步长为 9 MHz,针对该激光器长期频率漂移锁定,设置单边死区宽度为 10.5 MHz,对应阈值电压  $V_{th}$  值为 0.195 V。

由于光学频率梳使用的掺镱光纤放大器(YDFA)带来了自发辐射噪声(ASE),且经光子晶体光纤扩谱后光梳输出能量不稳定,导致激光与光梳拍频信号信噪比较低。图 8 为 APD 输出的拍频电信号经 20 dB 低噪声放大器放大后输出到频谱分析仪所得频谱图。由图 8 可知,拍频信号的信噪比仅有 15 dB。为了提高误差电压信号  $V_i$  的抗噪性,

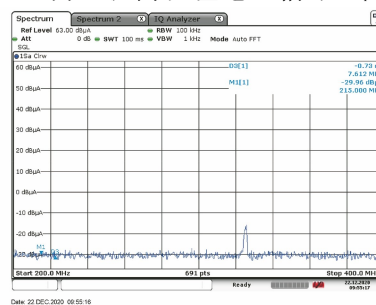


图 8 拍频信号频谱图

Fig. 8 Spectrum of beat signal

PC 主控程序在反馈控制前对  $V_i$  进行了均值滤波。

按照前述控制策略和参数设置,本系统对该 760 nm 窄线宽激光器的长期频率稳定进行了实验,实现了超过 1 h 的长时间频率锁定,拍频信号成功锁定在本振信号频率为中心的单边带宽为 10.5 MHz 的控制死区范围内。图 9 为被控激光未锁定时,800 s 经混频后的拍频信号频率漂移情况,激光频率长期漂移速度约为 360 MHz/h。图 10 为

使用本系统锁定被控激光后,激光频率漂移情况,其漂移速度为 21 MHz/h,对比图 9 可见本系统对激光频率长期漂移锁定效果良好。图 11 为根据 1.6 h 内稳频后激光频率漂移数据计算阿伦偏差结果图,由阿伦偏差可得激光频率稳定度为  $4.4 \times 10^{-10}$  ( $\tau = 262$  s),取相同取样时间  $\tau$  计算未锁定时激光频率稳定度  $4.3 \times 10^{-8}$  ( $\tau = 262$  s)。

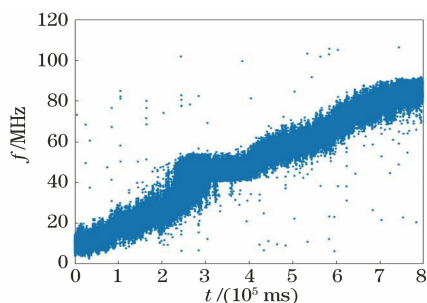


图 9 未锁定时,800 s 内激光频率漂移图

Fig. 9 Frequency drift of unlocked laser within 800 s

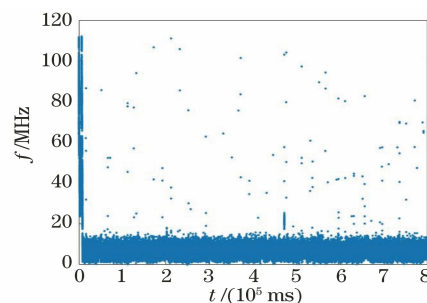


图 10 锁定后,800 s 内激光频率漂移图

Fig. 10 Frequency drift of locked laser within 800 s

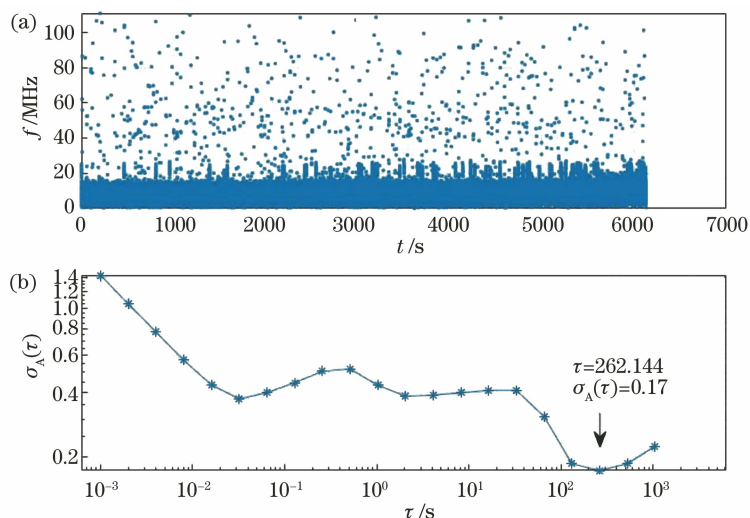


图 11 1.6 h 内激光频率长期漂移情况及其阿伦偏差

Fig. 11 Long-term drift of laser frequency within 1.6 h and its Allan deviation

由上述实验结果可知,本系统实现了对 760 nm 窄线宽激光器的长期稳频目标,频率稳定度提高了两个量级。由于被控激光器最小调频电流限制,本系统无法进一步提高其频率稳定性。

## 4 结 论

本文基于数字计数测频技术研制了一套激光器长期频率漂移锁定系统。该系统以光学频率梳为参考频率源,可为波长位于光梳光谱范围内的激光器稳定频率,适用范围广,尤其适合锁定自由运转时漂移量较大的激光器。自主研制的高频频率电压转换

电路,性能稳定,成本低廉,测量频率范围高达百兆赫兹量级,适合作为以光梳为参考的稳频系统的测频解决方案。760 nm 窄线宽激光器长期稳频实验表明,本系统可在拍频信号信噪比较低的情况下对被控激光实施长期锁定,令激光稳定度提升两个量级。若使用能量更稳定的光梳做参考源,激光稳频能力将得到进一步提升。

## 参 考 文 献

- [1] Juarez J C, Young D W, Sluz J E, et al. High-sensitivity DPSK receiver for high-bandwidth free-

- space optical communication links [J]. *Optics Express*, 2011, 19(11): 10789-10796.
- [2] Weyers S, Lipphardt B, Schnatz H. Reaching the quantum limit in a fountain clock using a microwave oscillator phase locked to an ultrastable laser [J]. *Physical Review A*, 2009, 79(3): 031803.
- [3] Fu J. Research of precision spectroscopy and atomic filter at 420 nm wavelength for isotope  $^{87}\text{Rb}$  [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.  
傅俊.  $^{87}\text{Rb}$  420 nm 波长精密光谱及原子滤光器研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [4] Zhu X M, He J P. A 10-million-resolution VIPA spectrograph calibrated simultaneously with a laser frequency comb: the design and applications [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(11): 158-168.  
朱小明, 何晋平. 激光频率梳同步定标的千万分辨率 VIPA 光谱装置设计及应用 [J]. *光子学报*, 2020, 49(11): 158-168.
- [5] Gibson S M, Coe P A, Mitra A, et al. Coordinate measurement in 2-D and 3-D geometries using frequency scanning interferometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2005, 43(7): 815-831.
- [6] Xiang J F, Wang L G, Li L, et al. Automatic frequency stabilization system of external cavity diode laser based on digital signal processing technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0914002.  
项静峰, 王利国, 李琳, 等. 基于 DSP 技术的外腔半导体激光器自动稳频系统 [J]. *光学学报*, 2017, 37(9): 0914002.
- [7] Wang L X, Jiang Y Y, Bi Z Y, et al. Laser frequency stabilization based on control of intermode beat note [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(9): 1198-1202.  
王丽霞, 蒋燕义, 毕志毅, 等. 基于纵模拍频控制的激光稳频技术 [J]. *中国激光*, 2007, 34(9): 1198-1202.
- [8] Drever R W P, Hall J L, Kowalski F V, et al. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator [J]. *Applied Physics B*, 1983, 31(2): 97-105.
- [9] Meng T F, Wu Y L, Ji Z H, et al. Frequency stabilized diode laser based on cesium molecular saturated absorption spectroscopy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(5): 1182-1185.  
孟腾飞, 武跃龙, 姬中华, 等. 铯分子饱和吸收谱的半导体激光器稳频 [J]. *中国激光*, 2010, 37(5): 1182-1185.
- [10] Han L, Lin Y G, Yang J, et al. Research and development on laser frequency stabilization based on spectral hole-burning effect [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(11): 110003.  
韩琳, 林弋戈, 杨晶, 等. 基于光谱烧孔效应的激光稳频技术与进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(11): 110003.
- [11] Wang J, Chen D J, Wei F, et al. Research on frequency stabilization technology of transfer cavity based on all-fiber ring resonator [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(9): 0906005.  
王吉, 陈迪俊, 魏芳, 等. 基于全光纤环形谐振腔的转移腔稳频技术研究 [J]. *中国激光*, 2020, 47(9): 0906005.
- [12] Wu X J, Li Y, Yu H Y, et al. Femtosecond optical frequency combs for precision measurement applications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(3): 030001.  
吴学健, 李岩, 尉昊赟, 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.
- [13] Kim S W. Combs rule [J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(6): 313-314.
- [14] Sala T, Gatti D, Gambetta A, et al. Wide-bandwidth phase lock between a CW laser and a frequency comb based on a feed-forward configuration [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(13): 2592-2594.
- [15] Yang R T, Lü 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): 1248-1261.
- [16] Li C C. Study of laser frequency stabilization based on erbium-doped fiber femtosecond optical frequency comb [D]. Hangzhou: China University of Metrology, 2017.  
李晨超. 基于掺铒光纤飞秒光学频率梳的激光稳频技术研究 [D]. 杭州: 中国计量大学, 2017.
- [17] Shao X D. Transfer of laser frequency stability based on optical frequency comb [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.  
邵晓东. 基于光学频率梳的激光频率稳定性传递研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- [18] Hughes J, Fertig C. A widely tunable laser frequency offset lock with digital counting [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2008, 79(10): 103104.