



基于声光调制器的光学锁相环He-Ne激光稳频方法研究

刘宇森 王建波 殷聪 韩绍坤 毕文文 俞秋叶 邹金澎

Frequency stabilization method of optical phase-locked loop He-Ne laser based on acousto-optic modulator

Liu Yusen, Wang Jianbo, Yin Cong, Han Shaokun, Bi Wenwen, Yu Qiuye, Zou Jinpeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20240003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

拉曼激光光学锁相环参数设计及仿真

Parameters design and simulation of Raman laser optical phase-locked loop

红外与激光工程. 2018, 47(4): 406007 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0406007>

高功率碘稳频He-Ne激光波长参考源

Powerful iodine stabilized He-Ne laser as wavelength reference

红外与激光工程. 2021, 50(4): 20200111 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200111>

基于相位调制器的宽带窄线宽的线性调频激光源的产生

Generation of linear frequency modulation laser source with broadband narrow linewidth using optical phase modulator

红外与激光工程. 2020, 49(2): 0205004 <https://doi.org/10.3788/IRLA202049.0205004>

用于原子重力仪的外腔半导体激光器的两种稳频方法比较

Comparison between two frequency stabilization methods of external cavity diode laser for atom gravimeter

红外与激光工程. 2017, 46(1): 106002 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0106002>

激光回馈双折射测量系统稳频技术研究

Research on frequency stabilization of laser feedback birefringence measurement system

红外与激光工程. 2018, 47(12): 1217007 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.1217007>

采用温控和碘吸收池技术的发射激光稳频技术

Laser frequency stabilization technology using temperature control and iodine absorption cell technology

红外与激光工程. 2021, 50(3): 20200289 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200289>

基于声光调制器的光学锁相环 He-Ne 激光稳频方法研究

刘宇森^{1,2}, 王建波^{2*}, 殷聪², 韩绍坤¹, 毕文文¹, 俞秋叶^{2,3}, 邹金澎²

1. 北京理工大学光电学院, 北京 100081;
2. 中国计量科学研究院, 北京 100029;
3. 中国计量大学测试工程学院, 浙江杭州 310018)

摘要: 报道了一种基于声光调制器与光学锁相环相结合的高稳定度激光稳频方法, 用于提高热稳频 He-Ne 激光器的频率稳定性和准确度。为了克服全内腔热稳频 He-Ne 激光精密调谐困难的缺点, 发展了基于声光调制器两次移频的频率调谐光路, 有效地消除声光调制器移频光束路径对衍射角 θ 的依赖。自行研制了具有高灵敏度与捕获带宽的光学锁相环系统, 利用声光调制器的高频率响应特性实现热稳频 He-Ne 激光高速、准确的锁定。成功实现了热稳频 He-Ne 激光器偏频锁定至碘稳频 He-Ne 激光器。实验结果表明, 环路锁定后拍频频率波动在 ± 0.2 Hz 范围内, 频率抖动的标准差为 0.04。偏置频率为 30 MHz 时, 系统在 1 s 和 1000 s 积分时间的相对阿伦方差分别为 3.3×10^{-9} 和 1.4×10^{-12} 。系统锁定后, 压缩后的拍频线宽小于 2 kHz。该研究表明, 采用基于声光调制器与光学锁相环相结合的激光稳频方法可以实现亚赫兹级的激光频差控制, 通过将热稳频 He-Ne 激光器偏频锁定至高稳定度的参考激光源可以显著提升其频率稳定性和准确度。

关键词: 激光稳频; 声光调制器; 光学锁相环; 偏频锁定

中图分类号: TN248.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20240003

0 引言

近年来, 航空航天和微电子产业迅速发展, 使得对超精密测量领域的要求也越来越高。He-Ne 激光器因具有高相干性^[1]在机械与超精密测量领域被广泛应用^[2]。激光干涉测量法因具有非接触、测量精度高、测量量程大和可多通道分光测量等优点, 成为当前主流的高精度测量方法^[3]。然而, 激光干涉测量法对作为波长标尺的激光器提出了较高的要求, 激光器必须利用适当稳频方法提高其输出光频率的稳定度、准确度后才能作为可靠的测量光源使用。

He-Ne 激光器的稳频方法可分为被动稳频和主动稳频两种。被动稳频方法主要采取一些措施降低外界扰动造成的影响, 例如利用热膨胀系数低的材料制作谐振腔的间隔器; 或将热膨胀系数为负值的材料

与热膨胀系数为正值的材料按一定长度配合, 以使热膨胀互相抵消, 实现稳频。主动稳频是一种闭环反馈控制调节的方法, 相较于被动稳频, 它可以达到更高的频率准确度和稳定度。主动稳频方法有兰姆凹陷稳频技术、塞曼效应激光稳频技术、双纵模热稳频技术、碘饱和吸收稳频技术等^[4]。其中, 双纵模热稳频 He-Ne 激光器具有高频率稳定性、良好的光束质量^[5]和低成本的优点, 适合作为激光干涉测量法的波长标尺激光器, 但是传统的热稳频激光器频率稳定性和复现性较差, 不能进一步满足高精度激光干涉测量法对激光器的频率稳定性和准确度的要求。

传统的双纵模热稳频激光器的相对频率变化量在 10^{-8} 量级^[5]。2018 年, 德国伊尔默瑙工业大学利用光学锁相环对 He-Ne 激光器进行偏频锁定, 锁定后的

收稿日期: 2024-01-04; 修订日期: 2024-01-31

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFF0603300)

作者简介: 刘宇森, 男, 硕士生, 主要从事激光稳频方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 王建波, 男, 副研究员, 博士, 主要从事稳频激光基准及其精密测量方面的研究。

拍频波动低于 166 Hz^[6]。2020 年, 哈尔滨工业大学利用声光调制器 (Acousto-Optic Modulator, AOM) 将连续激光器偏频锁定至光梳, 拍频波动在 ± 7 Hz 以内^[7]。2021 年, 中国计量科学研究院研制的利用光所锁相环反馈到可调谐外腔半导体激光器的电流调制端口进行偏频锁定, 拍频波动在 ± 0.3 Hz 以内^[8]。

文中报道了一种基于 AOM 和光学锁相环相结合的热稳频 He-Ne 激光偏频锁定系统。该系统结合了 AOM 的高频率响应特性和光学锁相环的高灵敏度特性, 可以实现热稳频 He-Ne 激光器快速、准确的频率锁定。实验中, He-Ne 激光器光束两次经过 AOM 移频后与参考光源碘稳频 He-Ne 激光器进行拍频, 拍频信号通过光学锁相环对 AOM 进行负反馈控制, 使得 AOM 通过频率补偿方式将激光频率偏频锁定至碘稳频激光器。系统锁定后 3 h 内, 激光束和碘稳频激光的拍频频率波动小于 0.2 Hz, 标准差为 0.04 Hz, 闭环进入锁定状态所需时间小于 10 ms。采用这种方式可实现对热稳频 He-Ne 激光器长时间、高稳定度的锁定。

1 系统搭建及实验过程

1.1 实验系统介绍

基于 AOM 的光学锁相环偏频锁定系统同时具有 AOM 的高频率响应特性和光学锁相环的高灵敏度特性, 能够快速对误差信号做出反应, 实现快速、准确的相位锁定。

实验选用基于碘分子腔内饱和吸收稳频的高稳定 He-Ne 激光作为波长参考光源, 用于偏频锁定热稳频全内腔 He-Ne 激光器。碘稳频 He-Ne 激光器频率稳定度高、复现性好, 是国际主流的 633 nm 波长参考光源, 以它作为频率标准, 可以实现基于光学锁相环的高稳定度锁定。该激光器采用半内腔结构的腔内饱和吸收方式, 利用碘分子反兰姆凹陷光谱实现激光频率的精准锁定, 波长的相对标准不确定度达到 E-12 量级, 频率稳定度达到 $1 \text{ E-}11(1 \text{ s})$ ^[9], 为热稳频 He-Ne 激光光学锁相环锁定提供了理想的参考频率。

热稳频 He-Ne 激光器的光学锁相环偏频锁定系

统原理如图 1 所示。图 1(a) 为拍频信号模块, 从激光器发出的光束首先通过半波片改变自身的偏振状态, 使光束尽可能多的向后传递。之后光束通过偏振分光棱镜 (PBS) 被分为反射光和透射光, 透射光经过凸透镜会聚入射到 AOM 中。当光束第一次经过 AOM 衍射后, 使一级衍射光通过四分之一波片和反射镜, 经反射镜反射后再次通过四分之一波片 (此时光束两次经过四分之一波片, 偏振方向旋转 $\pi/2$), 再经过凸透镜会聚入射到 AOM 中。此时两束光的偏振态互相垂直, 无法产生拍频, 因此需要再通过一个半波片改变合束光的偏振状态, 再通过 PBS 产生拍频信号。图 1(a) 中模块产生的拍频信号通过功分器分为三路, 一路传入频谱仪用于观察拍频信号, 一路传入频率计数器用于计数, 最后一路传入图 1(c) 中模块。图 1(c) 中模块首先将拍频信号和参考信号转换成方波, 然后将两路方波信号输入到鉴频鉴相器得到误差信号, 最后, PID 控制电路将误差信号转换成控制信号, 反馈输入到 AOM 进行偏频锁定。该系统依据 AOM 双次通过光路和光学锁相环原理设计, 主要包括光源及拍频信号模块、光学锁相环电路模块和拍频监测模块三部分。搭建的光学锁相环系统实物如图 2 所示。

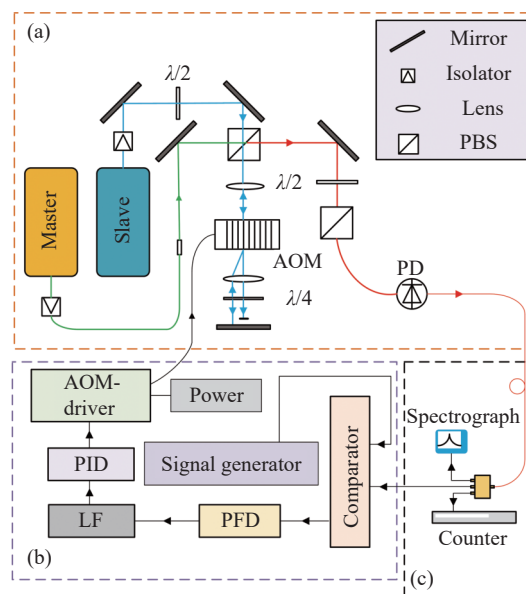


图 1 基于 AOM 和光学锁相环系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of AOM and optical phase-locked loop system

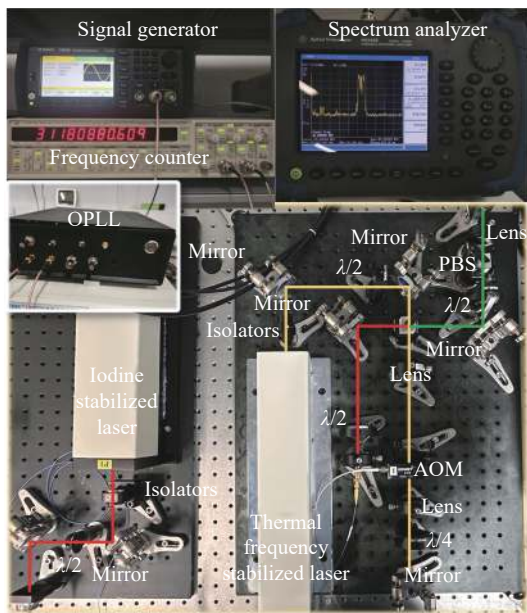


图 2 基于 AOM 和光学锁相环的稳频系统

Fig.2 Frequency stabilization system based on acousto-optic modulators and optical phase-locked loops

1.2 双次通过 (Double-pass)AOM 的拍频光路

为了实现全内腔热稳频 He-Ne 激光器的频率调谐, 实验选取 AOM 作为频率调谐和反馈单元。AOM 由声光介质和压电换能器构成^[10]。当驱动源的某种特定载波频率驱动换能器时, 换能器能够产生同一频率的超声波并传入声光介质, 在介质内形成折射率变化, 光束通过介质时会发生相互作用而改变光的传播方向, 即发生衍射。但是采用 AOM 的光路会存在一个问题: 经过 AOM 移频后, 衍射光的衍射角会随着入射光频率的改变而改变, 导致系统的光路失去唯一性, 无法产生稳定的拍频信号。

为了解决 AOM 的衍射角依赖问题, 文中采用双次通过光路^[11-14]来防止激光束方向随着驱动频率的改变而发生变化: 当激光束入射到 AOM 中, AOM 使激光束发生衍射, 其一阶衍射光以一个小角度出射, 并且产生移频, 角度可以作为 AOM 的输入功率和驱动频率的函数。为了避免光束路径对 θ 的依赖, 在 AOM 后方放置一个凸透镜, AOM 到凸透镜的距离等于透镜的焦距, 这样保证了 AOM 的所有出射光经过透镜后以平行光出射。在透镜的后方有一面反射镜, 所有的出射光经过反射镜后会原路返回, 再次进入 AOM。为了防止零级光也经过反射镜后再次进入拍频光路, 需要在反射镜的前面用光阑将零级光挡住,

只允许一阶衍射光被反射镜反射并再次通过 AOM 返回, 以确保即使角度发生了变化, 返回光束的一阶衍射光与入射光束相比不会改变其光束路径 (见图 3)。基于双次通过光路搭建的系统有效避免了光束路径对 θ 的依赖, 克服了因为 θ 角度变化而导致的拍频信号无法重合的问题。

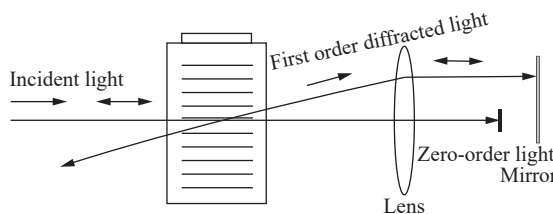


图 3 AOM 的双次通过光路

Fig.3 Double-pass optical path of AOM

AOM 的驱动频率和输入电压的关系如图 4 所示, 可以看出, 在调制频率为 150~250 MHz 的区间内与驱动控制电压呈线性关系。因为文中采用 Double-pass 的光路设计, 所以热稳频激光器经过 AOM 以后的频率为:

$$f_a = f \pm 2f_{AOM} \tag{1}$$

式中: f 、 f_a 分别为经过 AOM 移频前后激光器频率; f_{AOM} 为 AOM 的驱动频率。因此, 该系统的可调谐频率范围为 $2\Delta f_{AOM}$, 约为 200 MHz。

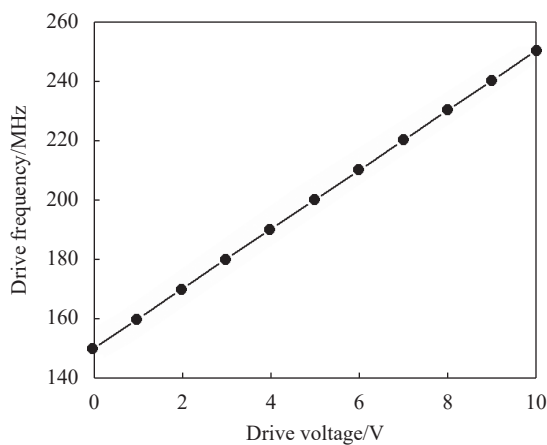


图 4 AOM 的驱动频率与输入电压的关系

Fig.4 The relationship between driving frequency and input voltage of AOM

1.3 光学锁相环

光学锁相环^[15-19]主要由参考激光器、待锁定激

光器、光电接收器、鉴频鉴相器、环路滤波器以及 PI 控制电路组成, 其与传统的锁相环工作原理相类似。光电接收器先将接收到的光信号转换为电信号; 鉴频鉴相器探测出拍频信号与参考信号相位之差, 并输出与之对应的误差信号; 环路滤波器根据环路的需求对这一误差信号进行滤波、去噪; 经过滤波得到的误差信号最后经过 PI 控制电路处理, 产生一个控制信号, 控制信号反馈输出到待锁定激光器上, 对激光器的频率进行控制, 从而实现闭环控制。

光学锁相环的环路模型如图 5 所示, 这是一个相位负反馈的误差控制系统, 图中, $U_d \sin[\cdot]$ 为鉴频鉴相器的传递函数, $F(p)$ 为环路滤波器的传递函数, $K_p + K_i \int_0^t [\cdot] d\tau$ 为 PI 控制器的传递函数, 其中 K_p 和 K_i 分别为比例系数和积分系数, K_0/p 为待锁定激光器的传递函数。待锁定激光器和参考激光器的拍频信号与参考频率信号进行比较, 得到误差信号 $\theta_e(t)$, 由误差信号产生误差电压 $u_d(t)$, 误差电压经过环路滤波器和 PI 控制电路得到控制电压 $u_c(t)$, 控制电压加到待锁定激光器上使拍频信号向参考信号产生频率偏移。一旦达到两者频率相等时, 在特定条件下, 控制环路就能稳定工作, 实现相位锁定。

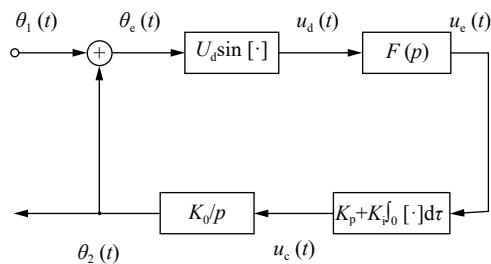


图 5 光学锁相环环路模型

Fig.5 Optical phase-locked loop model

1.4 实验

实验中, 碘稳频 He-Ne 激光器作为该系统的主激光器, 热稳频 He-Ne 激光器和 AOM 共同作为从激光器。热稳频 He-Ne 激光器发出的激光束首先通过 AOM 进行第一次移频, 经过反射镜反射后, 再次通过 AOM 进行二次移频, 经过二次移频后的光路路径不再依赖于出射角 θ , 即当 AOM 的驱动频率发生改变时, 拍频光路依然能够保持不变, 产生稳定的拍频信号。在通过 AOM 移频激光束的过程中, 由于

AOM 的特性, 入射光经过 AOM 会变成零级衍射光和一级衍射光, 为了防止零级衍射光对实验系统产生影响, 需要加入光阑隔离零级衍射光。

在确保两束零级光被光阑遮挡后, 通过偏振分光棱镜使碘稳频 He-Ne 激光器的激光束与二次移频后的热稳频 He-Ne 激光器的激光束进行拍频, 产生的拍频信号由光电探测器接收并转换成电信号, 然后通过功分器分为三路, 其中两路分别连接到频谱仪和频率计数器上, 对拍频信号进行监视和计数, 剩下的一路则进入锁相环系统进行闭环控制。

在构建拍频光路时, AOM 的位置选择至关重要。实验中要求 AOM 的衍射效率尽可能高, 以达到增强拍频信噪比的目的。双通道光路虽然克服了光路对 θ 角的依赖, 但是同时两次经过 AOM 也会大幅度降低激光的功率。为了保证拍频信号的信噪比达到锁相环的要求, 对 AOM 的安装位置进行了仔细优化, 使其衍射效率最大。衍射效率和驱动电压的关系如图 6 所示。光电接收器接受到的拍频信号的信噪比与 AOM 驱动电压的关系如图 7 所示。图中数据表明, 该系统中的双通道光路满足实验要求, 在 0~9 V 区间内能够产生大于 40 dB 的高信噪比拍频信号, 系统的可调谐波长范围为 300~480 MHz。

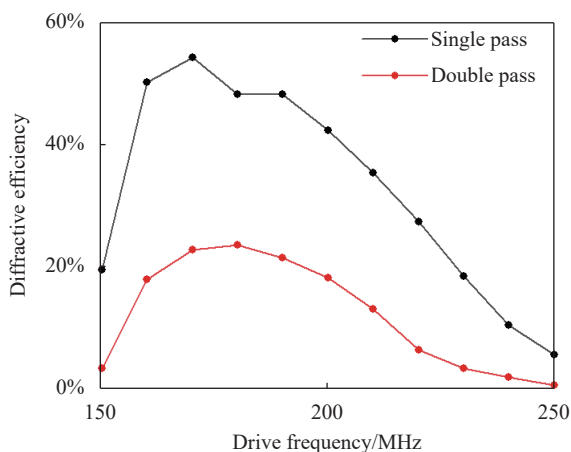


图 6 衍射效率与驱动电压关系图

Fig.6 The relationship between diffraction efficiency and driving voltage

由图 5 可知, 锁相环的系统增益函数由鉴频鉴相器、环路滤波器、PI 控制电路和激光器自身的传递函数决定。由于鉴相器、环路滤波器和激光器自身的传

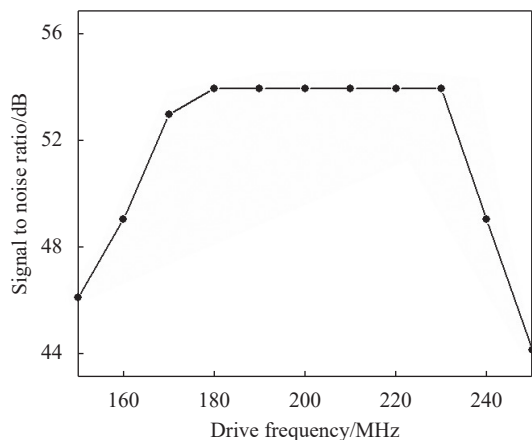


图 7 拍频信号信噪比和驱动电压关系图

Fig.7 The relationship between signal to noise ratio of beat frequency signal and driving voltage

递函数在系统设计时就已经确定,通过改变系统中 PI 控制电路的参数来改变系统的增益函数。PI 控制电路的积分常数与系统闭环锁定后拍频信号的标准差的关系如图 8 所示。可以看出,当积分常数 K_i 在 1×10^6 附近时,系统锁定后的标准差最小,低于 0.05;当积分常数小于 1×10^4 时,锁相环系统将无法实现环路锁定。

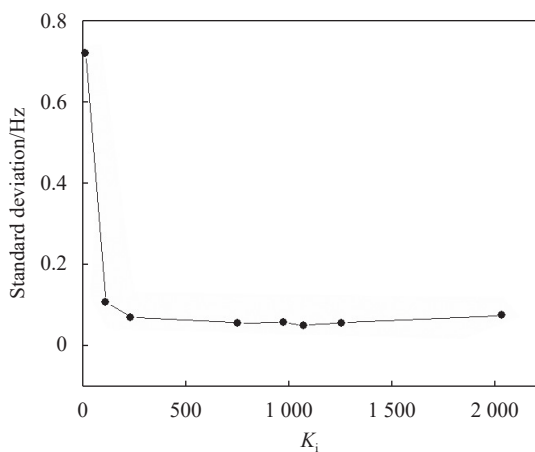


图 8 拍频标准差与 PI 控制电路参数的关系

Fig.8 The relationship between beat frequency standard deviation and PI control circuit parameters

2 实验结果及分析

实验中采用基于腔内饱和吸收稳频的高稳定 He-Ne 激光器作为热稳频激光器锁定的波长参考源。通过与碘稳频激光波长基准的拍频测量,结果显示该碘

稳频激光的 1 s 波长稳定度为 1.3×10^{-11} , 1000 s 达到 4.1×10^{-13} , 复现性优于 1.0×10^{-11} 。

实验中使用的信号发生器、频率计数器、偏频锁定的射频频率以及频谱仪等均采用高稳定外部频率参考源进行外促发同步。高稳定外部频率参考源可通过 GPS、北斗以及光纤传输的方式溯源至时间频率基准,保证了其量值的准确性。

开环状态下的拍频信号如图 9(a) 所示,此时碘稳频激光器和热稳频激光器的输出功率分别为 $200 \mu\text{W}$ 和 $700 \mu\text{W}$, 信号发生器输入的偏频频率为 30 MHz。拍频信号的功率约为 $70 \mu\text{W}$, 信噪比为 56 dB, 线宽约为 6 MHz, 该线宽是碘稳频激光器频率调制产生的边带效应所导致。图 9(a) 中, 在 50 MHz 处的信号是拍频的二次谐波信号, 由于高次谐波的信噪比低于 40 dB, 故不会对系统的锁定产生影响。在 AOM 的可调谐波长范围内, 通过调节 AOM 的驱动电压来获得信噪比大于 40 dB 的拍频信号, 以满足光学锁相环系统正常工作对信号信噪比的要求。

当锁相环闭环锁定时, 拍频信号将被闭环锁定至信号发生器产生的射频频率上。环路锁定后的拍频信号频谱如图 9(b)、(c) 所示, 其中, 图 9(b) 为扫宽为 60 MHz 时环路锁定状态下的拍频信号图 9(c) 为扫宽为 2 MHz 时环路锁定状态下的拍频信号展开图。可以看出, 环路锁定后的拍频线宽小于 2 kHz。图 9(c) 中, 在 30 MHz 附近有许多尖峰, 这些尖峰是由 AOM 产生的。

图 9(d)、(f) 为环路未锁定状态下的 AOM 驱动频率图。图 9(f) 为环路锁定状态下的驱动频率图, 可以看出, 在驱动频率附近有许多高次谐波, 这也是图 9(c) 中尖峰的来源。图 9(e) 为系统锁定后 AOM 的驱动频率图, 当环路锁定后, AOM 的驱动频率由图 9(d) 变为图 9(e), 对比两图可以发现, AOM 的频率线宽明显加宽, 这是因为环路锁定状态下, AOM 需要产生和碘稳频激光器相反的抖动来保证偏频锁定的稳定。

系统锁定后激光拍频的频率抖动如图 10 所示, 作为对比, 图中给出了自由运转下拍频频率的漂移情况。实验中利用频率计数器在光学锁相环开环状态下对拍频信号进行 30 min 计数, 然后将参考频率设置为 30 MHz, 使热稳频激光器锁定至碘稳频激光器, 并

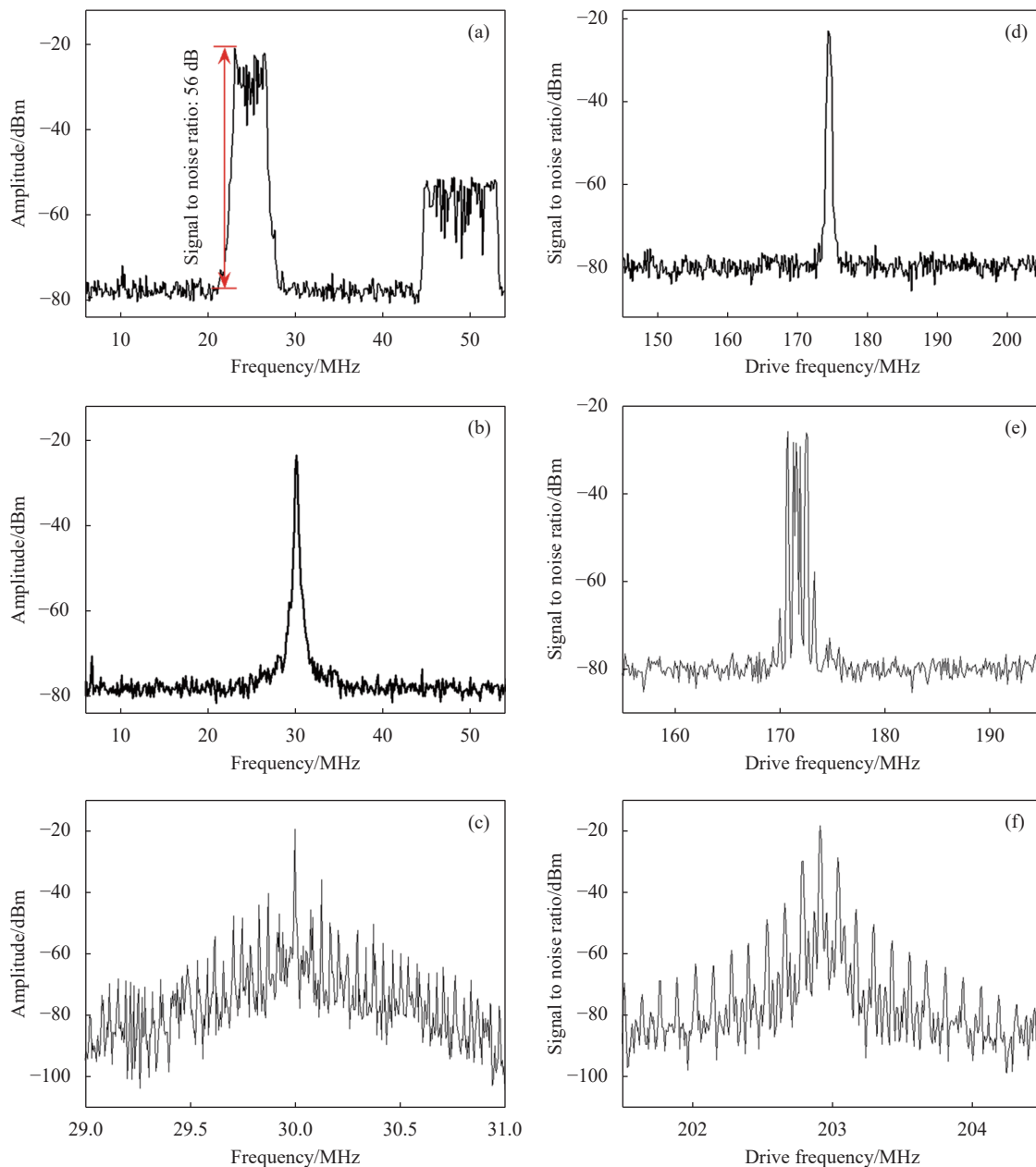


图 9 (a) 环路锁定前拍频频谱图; (b) 环路锁定后拍频频谱图; (c) 拍频信号展开图; (d) 环路未锁定时 AOM 驱动频率图; (e) 环路锁定时 AOM 驱动频率图; (f) 环路未锁定时 AOM 驱动频率展开图

Fig.9 (a) Beat frequency spectrum before loop locking; (b) Beat frequency spectrum after loop locking; (c) Beat frequency signal expansion diagram; (d) AOM drive frequency map when the loop is not locked; (e) AOM drive frequency map during loop locking; (f) AOM drive frequency expansion diagram when the loop is not locked

继续对环路锁定以后的拍频频率进行 180 min 计数, 拍频频率被锁定在 30 MHz 偏置频率上, 波动范围在 ± 0.2 Hz 以下, 实现了热稳频激光器相对于碘稳频激光器的高稳定度偏频锁定。

光学锁相环偏频频率的相对阿伦方差^[20]和参考频率的相对阿伦方差如图 11 所示。其中, 锁相环系

统的 1 s 和 1000 s 积分时间的相对阿伦方差分别为 3.3×10^{-9} 和 1.4×10^{-12} , 参考频率的 1 s 和 1000 s 积分时间的相对阿伦方差分别为 1.8×10^{-10} 和 3.9×10^{-13} , 满足 $1/\tau$ 下降规律。该结果表明, 经过长时间的锁定后, 光学锁相环系统的阿伦方差和参考信号的阿伦方差已经十分接近, 达到了理想的锁定效果。

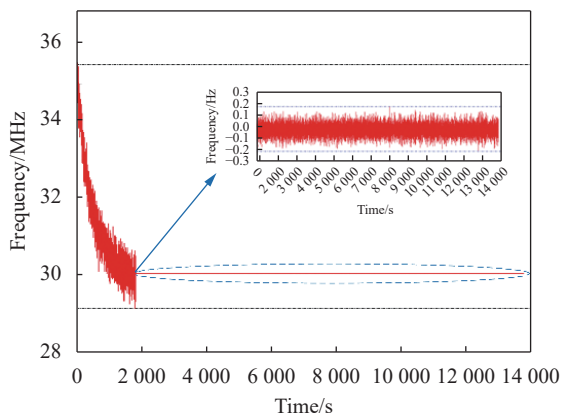


图 10 自由运行及锁定后的拍频频率波动

Fig.10 Fluctuating beat frequency after free operation and locking

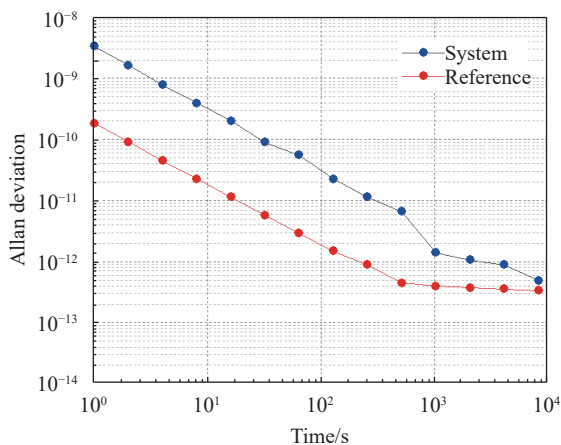


图 11 光学锁相环系统的阿伦方差和参考信号的阿伦方差对比图

Fig.11 Comparison diagram of Allen variance of optical phase-locked loop system and reference signal

3 结 论

文中介绍了一种基于 AOM 与光学锁相环相结合的高稳定度激光稳频方法。利用自主研发的光学锁相环系统进行了热稳频全内腔 He-Ne 激光器偏频锁定至碘稳频激光器的实验,通过基于 AOM 的拍频信号检测单元将拍频信号的信噪比提升至 40 dB 以上,采用数字鉴频鉴相器和 PI 控制电路对 AOM 进行反馈控制,实现光学锁相环的闭环控制。偏频频率为 30 MHz 时,系统锁定后 3 h 内的拍频频率抖动均在 ± 0.2 Hz 以内。光学锁相环系统在 1 s 和 1000 s 积分时间的相对阿伦方差分别为 3.3×10^{-9} 和 1.4×10^{-12} 。

综上所述,基于 AOM 和光学锁相环的高稳定度激光稳频方法相较于传统的热稳频激光器,利用光学

锁相环对 AOM 进行反馈控制,弥补了传统热稳频激光器频率响应低的缺点,实现了亚赫兹级的偏频锁定,显著提高了热稳频 He-Ne 激光器的频率稳定度,使其能够满足超精密干涉测量和超灵敏光谱探测等领域对激光频率稳定性和准确度的要求。

参考文献:

- [1] Kok Y, Ireland M J, Robertson J G, et al. Low-cost scheme for high-precision dual-wavelength laser metrology [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(12): 2808-2814.
- [2] Miao Xin, Wang Qi, Deng Yong, et al. Thermal frequency stabilization system of He-Ne laser based on temperature closed-loop feedback [J]. *Laser Technology*, 2022, 46(6): 755-759. (in Chinese)
- [3] Beil F W, Pescini L, Höhberger E, et al. Comparing schemes of displacement detection and subharmonic generation in nanomachined mechanical resonators [J]. *Nanotechnology*, 2003, 14(7): 799.
- [4] Yang Ruitao. Research on offset frequency locking laser signal monitor and digital control technology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese)
- [5] Xi Lu, Yin Cong, Wang Jianbo, et al. Research on thermal-frequency characteristics of 633 nm internal-mirror He-Ne laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 48(5): 0601002. (in Chinese)
- [6] Sternkopf C, Manske E. Digital frequency offset-locked He-Ne laser system with high beat frequency stability, narrow optical linewidth and optical fibre output [J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(6): 064013.
- [7] Yang R, Lv H, 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.
- [8] Zhang Chaochao, Wang Jianbo, Yin Cong. Research on high stability laser frequency stabilization method based on optical phase-locked loop [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2022, 43(9): 1154-1160. (in Chinese)
- [9] Sternkopf C, Goellner S, Manske E. Frequency stabilization of an external-cavity diode laser by offset frequency looking to a stabilized He-Ne laser[C]//Semiconductor Lasers and Laser Dynamics VI. SPIE, 2014, 9134: 272-281.
- [10] Wang Jianbo, Yin Cong, Shi Chunying, et al. Powerful iodine stabilized He-Ne laser as wavelength reference [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(4): 20200111. (in Chinese)

- [11] Chanson M. Design of a stable AOM double-pass setup for trapped-ion laser systems [DB/OL]. [2024-01-31]. https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/phys/quantum-electronics/tiqi-dam/documents/semester_theses/semesterthesis-mathieu_chanson.pdf.
- [12] McCarron D J. A guide to acousto-optic modulators [DB/OL]. [2024-01-31]. <http://massey.dur.ac.uk/resources/slcornish/AOMGuide.pdf,2007>.
- [13] Donley E A, Heavner T P, Levi F, et al. Double-pass acousto-optic modulator system [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, 76(6): 1930095.
- [14] Zhang Liqiong, Li Yan, Zhu Minhao, et al. Method on double-pass acousto-optic frequency shifter in absolute distance measurement using Fabry-Perot interferometry [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(18): 180701. (in Chinese)
- [15] Zhang Chuan. Study of optical phase lock loop based on analog PID[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [16] Chanteau B, Lopez O, Zhang W, et al. Mid-infrared laser phase-locking to a remote near-infrared frequency reference for high-precision molecular spectroscopy [J]. *New Journal of Physics*, 2013, 15(7): 073003.
- [17] Friederich F, Schuricht G, Deninger A, et al. Phase-locking of the beat signal of two distributed-feedback diode lasers to oscillators working in the MHz to THz range [J]. *Optics Express*, 2010, 18(8): 8621-8629.
- [18] Sternkopf C, Diethold C, Gerhardt U, et al. Heterodyne interferometer laser source with a pair of two phase locked loop coupled He-Ne lasers by 632.8 nm [J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23(7): 074006.
- [19] White L S. Development of a digital laser offset lock system[D]. Williamsburg: College of William and Mary, 2012.
- [20] Liu Ruonan, Wang Jianbo, Yin Cong, et al. Study on a portable 633 nm laser wavelength evaluation system [J]. *Optical Technique*, 2022, 48(5): 523-530. (in Chinese)

Frequency stabilization method of optical phase-locked loop He-Ne laser based on acousto-optic modulator

Liu Yusen^{1,2}, Wang Jianbo^{2*}, Yin Cong², Han Shaokun¹, Bi Wenwen¹, Yu Qiuye^{2,3}, Zou Jinpeng²

(1. School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China;

3. College of Metrology & Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract:

Objective With the rapid development of the aerospace and microelectronics industries, the demand for ultra precision measurement is also increasing. He-Ne lasers are widely used in mechanical and ultra precision measurement fields due to their excellent coherence and other characteristics. Among them, the thermally stabilized He-Ne laser is suitable as a wavelength scale laser for laser interferometry due to its high frequency stability, good beam quality, and low cost. However, traditional thermally stabilized lasers have poor frequency stability and reproducibility, which cannot further meet the requirements of high-precision laser interferometry for frequency stability and accuracy. This article reports a frequency biased locking system for thermally stable He-Ne laser based on a combination of an acousto-optic modulator and an optical phase-locked loop. This system combines the high-frequency response characteristics of an acousto-optic modulator with the high sensitivity characteristics of an optical phase-locked loop, enabling fast and accurate frequency locking of a thermally stable He-Ne laser.

Methods This article reports an optical phase-locked loop bias locking system based on an acousto-optic modulator. An iodine stabilized frequency laser is chosen as master laser, and a thermally stabilized He-Ne laser as the slave laser. The beam of the slave laser is modulated by an acousto-optic modulator and locked onto the master laser. The reference signal for frequency offset locking is a 30 MHz signal generated by a signal generator.

Data are collected using a frequency counter. The locking result is shown (Fig.9).

Results and Discussions In the experiment, a highly stable He-Ne laser based on intracavity saturation absorption stabilization was used as the wavelength reference source for thermal stabilization laser locking. Through beat frequency measurement with iodine stabilized laser wavelength reference, the results show that the 1 s wavelength stability of the iodine stabilized laser is 1.3×10^{-11} , reaching 4.1×10^{-13} in 1 000 s, reproducibility better than 1.0×10^{-11} . The frequency jitter of the laser beat frequency after the system is locked is shown (Fig.10). As a comparison, the figure shows the drift of the beat frequency under free operation. In the experiment, a frequency counter was used to count the beat frequency signal for 30 min in the open-loop state of the optical phase-locked loop. Then, the reference frequency was set to 30 MHz to lock the thermal stabilized frequency laser to the iodine stabilized frequency laser, and the beat frequency after the loop locking was continued to be counted for 180 min. The beat frequency was locked at a bias frequency of 30 MHz, with a fluctuation range below 0.2 Hz. We have achieved high stability frequency locking of thermally stabilized lasers compared to iodine stabilized lasers. The relative Allen variance of the frequency offset of the optical phase-locked loop is shown (Fig.11). Among them, the relative Allen variance of the integration time of 1 s and 1 000 s is 3.3×10^{-9} and 1.4×10^{-12} respectively.

Conclusions This article introduces a high stability laser frequency stabilization method based on the combination of an acousto-optic modulator and an optical phase-locked loop. An experiment was conducted using a self-developed optical phase-locked loop system to lock the bias of a thermally stable all cavity He-Ne laser to an iodine stable frequency laser. The signal-to-noise ratio of the beat frequency signal was increased to over 40 dB (Fig.9) through a beat frequency signal detection unit based on an acousto-optic modulator. A digital frequency discriminator and PI control circuit were used to feedback control the acousto-optic modulator, achieving closed-loop control of the optical phase-locked loop. The frequency stability of the thermally stable He-Ne laser is significantly improved, enabling it to meet the requirements for laser frequency stability and accuracy in the fields such as ultra precision interferometry and ultra sensitive spectral detection.

Key words: laser frequency stabilization; acousto-optic modulator; optical phase-locked loop; bias locking

Funding projects: National Key Research and Development Program of China (2021YFF0603300)