

基于压电陶瓷与光纤电光调制器双通道伺服反馈的激光相位锁定实验研究

侯佳佳 赵刚 谭巍 邱晓东 贾梦源 马维光 张雷 董磊 冯晓霞 尹王保 肖连团 贾锁堂

Experimental researches of laser phase lock with dual-servo feedbacks based on the piezoelectric transducer and fiber electrooptic phase modulator

Hou Jia-Jia Zhao Gang Tan Wei Qiu Xiao-Dong Jia Meng-Yuan Ma Wei-Guang Zhang Lei Dong Lei Feng Xiao-Xia Yin Wang-Bao Xiao Lian-Tuan Jia Suo-Tang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 234204 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.234204

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.234204>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I23>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

利用啁啾脉冲光谱滤波和非线性偏振旋转技术实现高稳定性和开机自启动的全光纤掺 Yb³⁺ 光纤锁模激光器

Highly stable and self-started all-fiber Yb³⁺ doped fiber laser mode-locked by chirped pulse spectral filtering and nonlinear polarization evolution

物理学报.2016, 65(21): 214207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.214207>

203W 全光纤全保偏结构皮秒掺铥光纤激光器

203 W all-polarization-maintaining picosecond thulium-doped all-fiber laser

物理学报.2016, 65(19): 194208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.194208>

342W 全光纤结构窄线宽连续掺铥光纤激光器

342 W narrow-linewidth continuous-wave thulium-doped all-fiber laser

物理学报.2016, 65(19): 194209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.194209>

基于多层电介质光栅光谱合成的光束质量

Beam quality in spectral beam combination based on multi-layer dielectric grating

物理学报.2016, 65(10): 104203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.104203>

超长腔碳纳米管锁模多波长掺铥光纤激光器

Ultra-long cavity multi-wavelength Yb-doped fiber laser mode-locked by carbon nanotubes

物理学报.2015, 64(20): 204205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.204205>

基于压电陶瓷与光纤电光调制器双通道伺服反馈的激光相位锁定实验研究*

侯佳佳¹⁾²⁾ 赵刚¹⁾²⁾ 谭巍¹⁾²⁾ 邱晓东¹⁾²⁾ 贾梦源¹⁾²⁾ 马维光¹⁾²⁾†
张雷¹⁾²⁾ 董磊¹⁾²⁾ 冯晓霞³⁾ 尹王保¹⁾²⁾ 肖连团¹⁾²⁾ 贾锁堂¹⁾²⁾

1)(山西大学激光光谱研究所, 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 太原 030006)

2)(山西大学, 极端光学协同创新中心, 太原 030006)

3)(山西职业技术学院, 太原 030006)

(2016年4月7日收到; 2016年8月29日收到修改稿)

通过相干合束提高光纤激光器的输出功率是目前研究的一个热门领域, 其中多束激光的相位控制是提高合束效率的关键技术之一. 本文基于主动相位锁定技术对传统外差探测法进行了改进, 基于压电陶瓷及光纤电光相位调制器双通道伺服反馈, 实现了对同一激光源输出的两路相位独立变化的1531 nm激光长时间的相位锁定. 通过选择合适的PID控制参数, 将反馈带宽拓展到了220 kHz (受限于PID控制器自身带宽). 最终的相位锁定控制在 0.88° 以内, 即相位控制精度为 $\lambda/400$, 经过160 s平均后可得到相位锁定的最佳值为 0.006° , 整体实验装置结构简单、运行稳定.

关键词: 相干合束, 相位锁定, 光纤电光相位调制器, 压电陶瓷

PACS: 42.55.Wd, 42.60.Fc, 87.19.lr, 77.55.hj

DOI: 10.7498/aps.65.234204

1 引言

以掺杂光纤作为增益介质的光纤激光器具有输出激光线宽窄、重复性好的优点, 可以用于光纤通讯、激光切割、工业制造、国防安全等领域. 然而光纤激光器中单根光纤的最大输出功率受限于非线性效应和热效应等因素, 且随着输出功率的增加, 其输出光束质量会急剧下降, 阻碍了光纤激光器的推广应用^[1-3]. 为了解决这个问题, 人们提出相干合束(coherent beam combining)技术, 将光纤激光器输出的激光分束, 每束单独通过光纤放大器后再合束, 通过引入主动相位控制机制来提高光束之间的相干性, 从而提高光纤激光器的输出

功率及光束质量^[1,2,4-11]. 相位锁定技术是20世纪60年代由美国Bell实验室的Enloe等^[12,13]提出的, 在1964年他们实现了两路单频He-Ne激光器的相干合成, 做出了开创性的工作, 随后相干合成技术继续发展并不断进步^[11,14], 然而时至今日光纤激光器在合成效率和数目可扩展性方面仍不能令人满意, 其中最关键的问题就是各路激光之间的相位锁定效果还有待提升, 实现方案还有待简化.

目前, 常用的主动相位控制方法主要有随机并行梯度下降(SPGD)算法^[15,16]、抖动法^[5,6]和外差探测法^[17,18]三种. SPGD算法只需要一个探测器件, 且不需要参考光束, 但是需要多次迭代运算, 复杂耗时, 且随着合成路数增多, 其控制带宽

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2012CB921603)、教育部长江学者和创新团队发展计划(批准号: IRT13076)、国家自然科学基金(批准号: 11434007, 61475093, 61378047, 61275213, 61475093)、国家科技支撑计划(批准号: 2013BAC14B01)、山西省青年科学基金(批准号: 2013021004-1, 2012021022-1)、山西省回国留学人员科研资助项目(批准号: 2013-011, 2013-01)和山西省高等学校创新人才支持计划资助的课题.

† 通信作者. E-mail: mwg@sxu.edu.cn

会显著下降^[2],应用此方法, Yu等^[19]在2011年实现了八束激光的4 kW相干合成,相位残余误差为 $\lambda/40$;抖动法需要从单路微弱的光电信号中提取相位噪声信号,对信号处理电路有较高的要求,且需要对每一路光信号进行高频相位调制,要求调制频率各不相同,同时为了使相位控制系统具有较大的控制带宽,这些调制信号之间必须保持一定的频率间隔,随着合成路数的增多,必将增加系统的复杂程度,耗费频率资源^[8],应用此方法, Ma等^[20]在2010年实现了四束激光的相位锁定,相位残余误差为 $\lambda/40$;区别于上面两种方法,外差探测法中存在一路参考光束,且只需对该路参考光进行调制,其余各路信号光与调制后的参考光进行相干外差得到相位误差信号,该方法简单有效,扩展性强.应用此方法, Goodno等^[21]在2006年实现了七束激光的相干合成,相位残余误差为 $\lambda/50$; Wang等^[22]在2013年实现了两束激光的相位锁定,其相位残余误差达到 $\lambda/500$.但是在传统的外差探测法中采用AOFS对参考光移频,由于AOFS需要稳定的大功率射频源驱动,对硬件性能和系统设计要求较高^[3,22,23],基于以上原因,我们采用改进的外差探测法,用一个光纤电光相位调制器(EOM)代替AOFS,该EOM具有低半波电压(约6 V),宽带宽(DC-500 MHz)等优点,避免了复杂的驱动及射频电路设计,对参考光的调制灵活自由,使得整体实验装置简单稳定.

国防科学技术大学的王小林等^[3]在2010年首次提出用EOM代替AOFS的方案,并采用了另一个光纤EOM作为相位控制器件,相位锁定控制精度为 $\lambda/50$,但在EOM可以承受的驱动电压范围内相位调节仅为 $\pm\pi$,无法连续响应由于环境变化引起的大范围相位漂移,导致系统的长期稳定性差,并且文中使用多抖动法检测相位噪声,相位误差信号获取速率慢,在反馈过程具有较大的相移,无法实现宽带宽锁定.2013年,罗切斯特大学的Vornehm^[23]基于EOM外差法增加了一个新型的快速 $2n\pi$ 相位折返电路,有效地克服了有限相位调节范围的问题,当反馈到EOM上的电压达到其最大输入值时,通过电容充放电设计使电压在一个很短的时间 τ 内降低/升高特定数值,使相位迅速折返改变 $2n\pi$ (n 为整数),以保持相位锁定的效果.但是相位折返电路“内嵌”于系统反馈电路中, $2n\pi$ 的相位改变需要精确设计固定的PID电路内电容

和电阻值,不利于系统的优化和重复.为了实现宽范围的相位锁定,本文通过组合压电陶瓷(PZT)和EOM来控制两束激光相对相位的漂移,从而增大系统调节范围.通常PZT的长度变化范围在几十微米,可以实现大于 10π 的相位校正,其频率响应带宽通常在几百Hz,因此能够很好地响应低频率的大范围漂移信号.实验中首先加入PZT慢速反馈回路来消除环境温度漂移诱发的激光相位误差,然后再加入EOM快速反馈回路来消除高频噪声的影响,使得两路频率相同的激光相位长时间锁定在 0.88° 以内,即 $\lambda/400$ 范围内,整体实验装置简单稳定,实用性强.

本文首先介绍了外差探测法获得误差信号的原理,然后给出了实验装置和系统PID的参数设定及传递函数,最后由实验结果说明相位锁定的效果,并分析其长期稳定性.

2 外差探测法原理

基于EOM的改进外差探测法获得相位锁定误差信号的原理如图1所示,激光器出射的光经过1:1光纤分束器分为两路,光场分别表示为: $e_c(t) = A_c \exp[-i(\omega_c t - \varphi_c)]$, $e'_c(t) = A_c \exp[-i(\omega_c t - \varphi'_c)]$,其中 A_c 为光场幅度, ω_c 为光场频率, φ_c, φ'_c 分别表示两路光场的相位,其相位差可表示为 $\Delta\varphi = \varphi_c - \varphi'_c$.

当 $e_c(t)$ 路的光场通过EOM被频率为 ω_m 的正弦信号调制后可表示为

$$e(t) = A_c \exp[-i[\omega_c t - \varphi_c - m \sin(\omega_m t)]], \quad (1)$$

其中 m 为相位调制系数.基于Jacobi Anger展开,当 $m \ll 1$ 时,只保留 $J_0(m)$ 和 $J_{\pm 1}(m)$ 项,(1)式可变为

$$e(t) = A_c [J_0(m) + J_1(m) e^{i\omega_m t} - J_1(m) e^{-i\omega_m t}] \times e^{-i(\omega_c t - \varphi_c)}. \quad (2)$$

两路光合束后,在探测器探测到的拍频信号可表示为

$$\begin{aligned} I &= [e'_c(t) + e(t)]^\dagger [e'_c(t) + e(t)] \\ &= A_c^2 \{ J_0^2(m) + 2J_1^2(m) + 1 + 2J_0(m) \cos(\Delta\varphi) \\ &\quad + 4J_1(m) \sin(\omega_m t) \sin(\Delta\varphi) \\ &\quad - 2J_1^2(m) \cos(2\omega_m t) \}. \end{aligned} \quad (3)$$

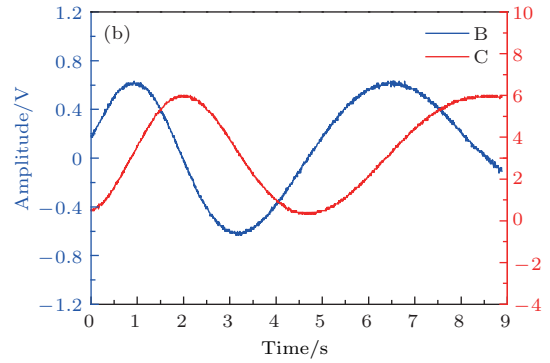
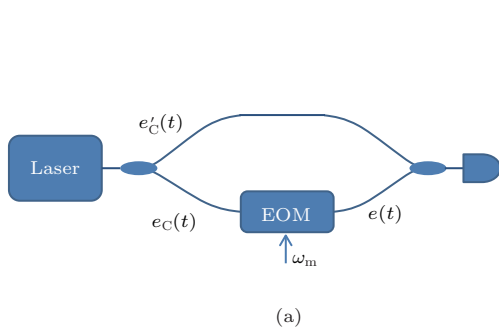


图1 (网刊彩色) 基于外差探测法获得误差信号原理图

Fig. 1. (color online) Schematic diagram of the error signal obtained based on heterodyne detection method.

用 $a'(t) = A'_m \sin(\omega_m t)$ 信号对探测到的信号进行解调, 再经过低通滤波器滤去交流项后可得误差信号为

$$I_{\text{error}} = 2A_c^2 A'_m J_1(m) \sin(\Delta\varphi), \quad (4)$$

可以看出误差信号与两路光相位差的正弦值成正比, 即与相位差 $\Delta\varphi$ 成正相关, 适合作为反馈控制信号, 同时由 (3) 式可以看出拍频后信号的直流分量为

$$\begin{aligned} I_{\text{DC}} &= A_c^2 [J_0^2(m) + 2J_1^2(m) + 1 + 2J_0(m) \cos(\Delta\varphi)] \\ &= 2A_c^2 [1 + J_0(m) \cos(\Delta\varphi)] \quad (m \ll 1), \end{aligned} \quad (5)$$

所以误差信号和拍频直流信号分别是按 $\sin(\Delta\varphi)$ 和 $\cos(\Delta\varphi)$ 变化. 图 1 (b) 所示为实际测量得到的相位误差信号 (蓝线) 和拍频后的直流信号 (红线), 可以看出两者相差为 $\pi/2$, 与理论分析结果相符.

3 实验装置

实验中所建立的基于 PZT 与光纤 EOM 双通道伺服反馈的相位锁定装置如图 2 所示.

所采用的光纤激光器 (Koheras Adjustik E15 PztS PM) 输出中心波长为 1531 nm, 输出功率为 20 mW, 激光线宽为 1 kHz (120 μ s), 输出的激光通过光纤分束器 (1 : 1) 分为反馈回路 I 及参考光路 II 两路. I 路光 $e'_c(t)$ 经过光纤相位调制器 EOM1 (FEOM1, Photline, MPX-LN-0.5) 后经光纤准直器输出, 再依次经过反射镜 M1, M2, M3 后入射到合束镜 BS, 其中 M2 粘在环状 PZT 上用于调节 M1 和 M3 之间的光程; 为了更清楚地分析伺服反馈对系统的作用, 由函数发生器 (FG, Tektronix AFG3022C, 25 MHz) 给出一个 ± 6 V 的随机噪声

信号加在 EOM1 上, 产生 $\pm\pi$ 之间的随机相位误差来模拟恶劣环境对 I 路光相位的影响. II 路光 $e_c(t)$ 通过光纤相位调制器 EOM2 (1550 nm LiNbO3 Phase Modulator, Conquer, GC15PMPC7813) 进行相位调制, 调制信号 LO 为函数发生器 (FG, Tektronix AFG3022C) 产生的 15 MHz 正弦信号. 调制后的激光 $e(t)$ 经光纤准直器输出, 与 I 路光 $e'_c(t)$ 经过 BS 合束后, 被带宽为 1 GHz 的高速光电探测器 PD (PD, NEW FOCUS 1611) 探测, 获得拍频信号. 由探测器交流端输出的信号成分 I_{AC} 与 LO 混频后再被 1.9 MHz 低通滤波器 (LPF, Mini-Circuits, MODEL BLP-1.9) 滤波获得误差信号, 该信号分为两路分别经过 PID1 和 PID2 (PID, STANFORD, SIM960) 后送入 PZT 和 EOM1, 通过低频控制 PZT 的长度以及高频控制 EOM1 的折射率来实现宽带的相位锁定.

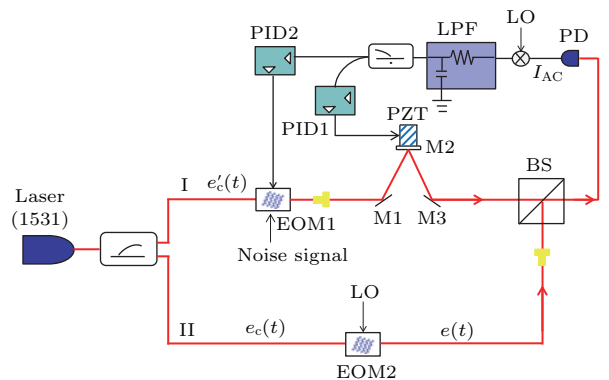


图2 实验装置图

Fig. 2. Experimental setup.

实验首先分别测量了 PZT 与 PID1 以及光纤 EOM1 与 PID2 级联的开环传递函数, 其中两个 PID 控制器的带宽大于 100 kHz, 且只设定为比例

增益, 测得PZT环路为二阶低通响应, 其截止频率约为100 Hz, 而EOM1环路为三阶低通响应, 其截止频率约为550 kHz, 该行为主要为PID模块自身的响应. 接下来将相位误差信号中的慢速成分和快速成分分别反馈到PZT和EOM1^[24], 为了保证低频反馈增益足够大, 将PID1的传递函数设定为比例加二阶积分, 其中比例系数 P 为 10^3 , 积分系数 I 为100; 另外为了保证增益裕度大于20 dB、相位裕度大于 45° (定义系统总传递函数增益为1时对应的频率称为单位增益点 $f_{0\text{ dB}}$, 为了保证系统的稳定性, $f_{0\text{ dB}}$ 对应的相位应该和 -180° 之间保留有一定的裕度, 通常称其为相位裕度(phase margin); 增益裕度(gain margin)是指相位等于 -180° 的频率 f_{-180° 对应增益的倒数), 使系统处于稳定, 将PID2的传递函数设定为比例加微分, 其中比例系数 P 为 10^3 , 微分系数 D 为 0.5×10^{-5} , 使大于200 kHz的误差信号相位超前 90° 而拓宽锁定带宽, 实现两路激光相位长期稳定的锁定. 最终系统整体传递函数如图3所示, 图中蓝色点划线为PZT与PID1级联的开环传递函数, 红色虚线为EOM1与PID2级联的开环传递函数, 黑色实线为系统整体传递函数. 可见两路伺服反馈的交接点在100 Hz, 在低频时主要由PZT来伺服控制系统相位, 且频率越低增益越大, 系统低频最大增益为80 dB; 在高频时EOM1起主要作用, 系统传递函数增益为1的带宽约为200 kHz. 且从图3可以看到在DC时相位会接近 -180° , 这是由于为了获得尽可能大的低频增益, PID1采用了二阶积分设计, 但由于DC处的增益远远大于1, 所以不会对系统稳定性造成影响^[25].

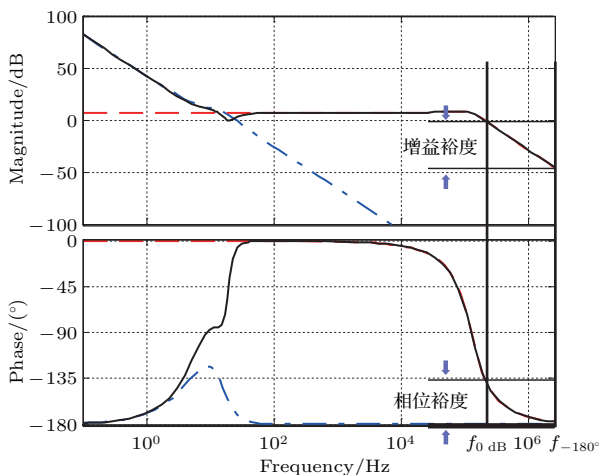


图3 (网刊彩色) 系统传递函数

Fig. 3. (color online) System transfer function.

4 实验结果与讨论

图4(a)为不加反馈时解调获得的相位误差信号和拍频后探测器探测的直流信号, 分别用实线和虚线表示. 可见, 在90 s的测量时间内由于环境条件(温度、湿度)的变化以及平台扰动等因素引起相位差及探测光强随机变化. 其中相位误差信号变化范围为 $\pm 0.65\text{ V}$, 探测直流光强变化范围为0—5.7 V. 图4(b)为增加反馈后的相位锁定结果, 可见在1000 s时间内, 相位被很好地锁定, 探测光强维持在最大值.

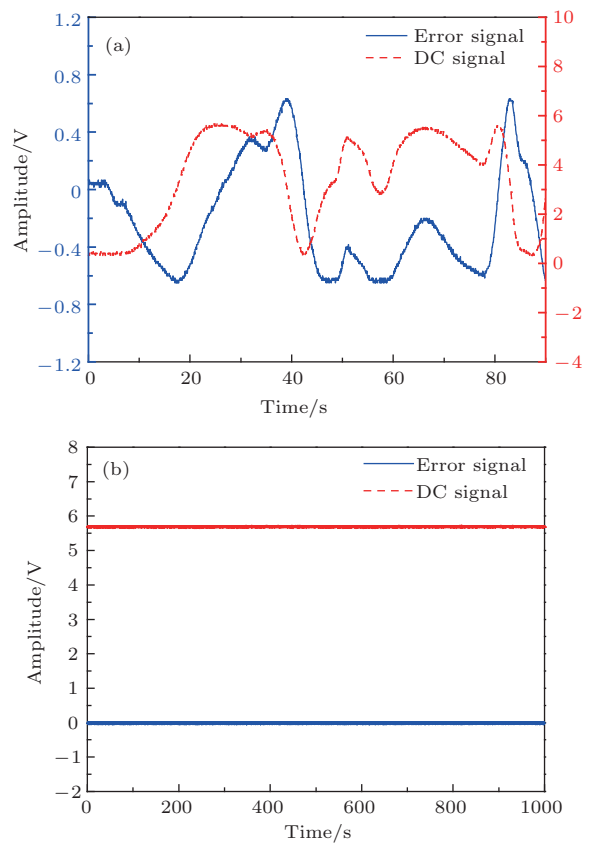


图4 相位锁定前/后的误差信号和探测器直流信号 (a) 相位锁定前; (b) 相位锁定后

Fig. 4. The error signal and DC signal of PD with phase unlock and lock: (a) Phase unlock; (b) phase lock.

为了比较只有PZT反馈和PZT与EOM1共同反馈的效果, 分别测量了两种条件下的误差信号, 结果如图5所示. 可见在前1.9 s内系统只有PZT慢反馈, 误差信号峰峰值0.03 V相比于自由运转时的峰峰值1.3 V有很大程度的抑制; 1.9 s后再加入EOM1快速反馈回路, 由于反馈带宽的增加, 致使高频噪声进一步被抑制, 误差信号峰峰值进一步

降低到0.02 V, 根据误差信号的变化幅度, 可以推算出相位被锁定在 0.88° 以内, 即 $\lambda/400$ 范围内.

为了评估系统的长期稳定性, 获得系统的相位锁定极限, 我们对锁定后的误差信号(角度误差)进行了2 h的测量, 并对其进行阿伦偏差分析, 结果分别如图6(a)和图6(b)所示. 图6(b)中的点线为误差信号在不同积分时间下的阿伦偏差; 下降的虚线为白噪声情形下的阿伦偏差, 其行为符合 $\tau^{-1/2}$; 上升的虚线为线性漂移情形下的阿伦偏差, 其行为符合 $\tau^{1/2}$. 可见随着积分时间的增加, 误差信号的阿伦偏差符合白噪声行为, 直到160 s时阿伦偏差达到最小值 0.006° , 表明此时系统达到最佳的锁定效果; 在超过160 s后, 阿伦偏差逐渐变大, 符合线性漂移行为[26].

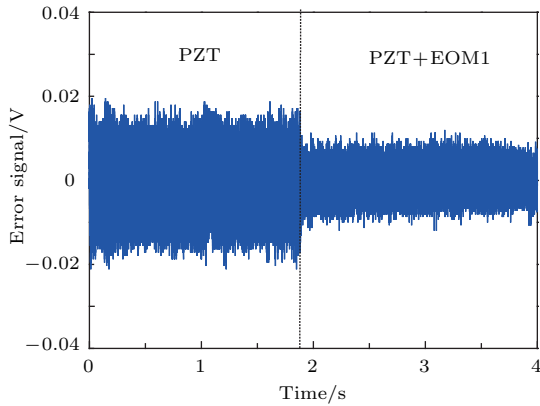


图5 PZT与EOM1双通道反馈相位锁定后的误差信号
Fig. 5. Error signal of PZT and EOM1 Dual-feedback phase lock.

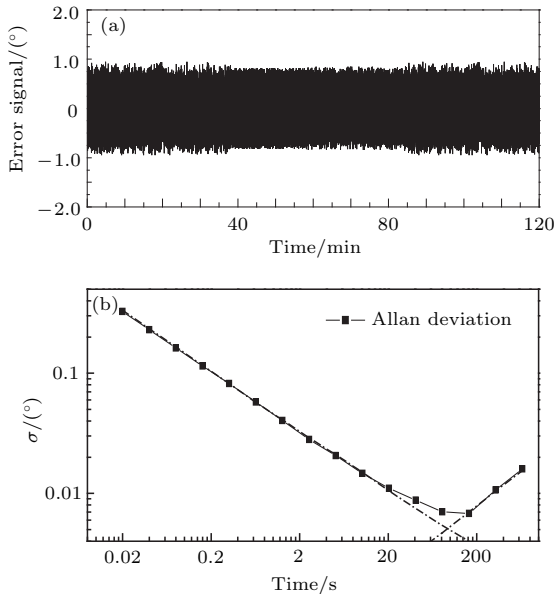


图6 系统长期监测阿伦偏差图
Fig. 6. The system Allen deviation for long-term monitoring.

由于是同频率激光的相位锁定, 相位扰动噪声幅度较小, 故为了确定相位锁定的带宽, 在EOM1上增加一个幅度为 ± 6 V的随机噪声, 并通过频谱分析仪(N9010 A EXA, Keysight, 10 Hz—3.6 GHz)测量了相位误差信号在7—400 kHz的频率谱, 结果如图7所示, 其中黑色曲线对应锁定前的相位误差信号, 红色曲线对应锁定后的相位误差信号. 可见在低频部分, 锁定后在小于220 kHz的范围内相位误差明显降低, 因此系统的锁定带宽约为220 kHz, 而在大于该频率范围内, 由于反馈的增益仍大于0, 相移小于 180° , 系统仍有一定程度的噪声抑制能力. 如果更换更高带宽的PID反馈电路, 系统锁定效果可进一步提升.

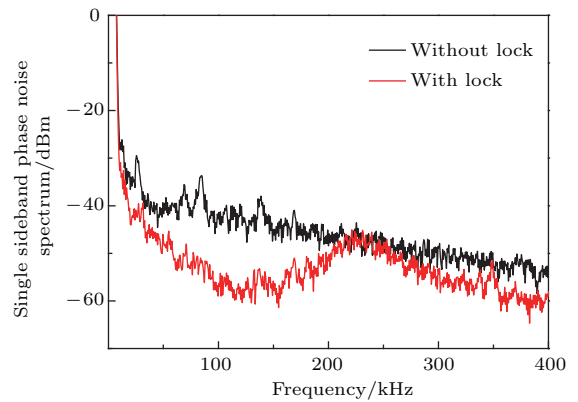


图7 (网刊彩色) 相位误差信号频谱图

Fig. 7. (color online) The phase error signal spectrogram.

5 结 论

本文实现了基于PZT及光纤EOM1的双重伺服反馈的相位锁定实验研究, 采用改进的外差探测法对两路频率相同的光纤激光进行了相位锁定, 实现了长时间的稳定锁定, 伺服反馈带宽约为220 kHz, 相位最终锁定在 0.88° , 即 $\lambda/400$ 内, 经过160 s平均后可得到相位锁定的最佳值为 0.006° , 整体实验装置简单、操作简便, 且可以通过进一步优化PID控制器的参数提升锁定效果, 适合应用于光纤激光器的相干合束领域.

参考文献

- [1] He B, Lou Q H, Zhou J, Zheng Y H, Xue D, Dong J X, Wei Y R, Zhang F P, Qi Y F, Zhu J Q, Li J Y, Li S Y, Wang Z J 2007 *Chin. Opt. Lett.* **5** 412
- [2] Zhou P 2009 *Ph. D. Dissertation* (Changsha: National University of Defense Technology) (in Chinese) [周朴 2009 博士学位论文(长沙: 国防科学技术大学)]

- [3] Wang X L, Zhou P, Ma Y X, Ma H T, Li X, Xu X J, Zhao Y J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 084203 (in Chinese) [王小林, 周朴, 马阎星, 马浩统, 李霄, 许晓军, 赵伊君 2011 物理学报 **60** 084203]
- [4] Fan T Y 2005 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **11** 567
- [5] Jolivet V, Bourdon P, Bennai B, Lombard L, Goulard D, Pournat E, Canat G, Jaouen Y, Moreau B, Vasseur O 2009 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **15** 257
- [6] Ma Y X, Liu Z J, Zhou P, Wang X L, Ma H T, Li X, Si L, Xu X J 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 44204
- [7] Ma P F, Zhou P, Ma Y X, Su R T, Liu Z J 2012 *Chinese J. Lasers* **39** 0402009 (in Chinese) [马鹏飞, 周朴, 马阎星, 栗荣涛, 刘泽金 2012 中国激光 **39** 0402009]
- [8] Ma Y X, Si L, Zhou P, Wang X L, Zhang K, Zhao H C, Xu X J, Zhao Y J 2012 *Journal of National University of Defense Technology* **34** 38 (in Chinese) [马阎星, 司磊, 周朴, 王小林, 张侃, 赵海川, 许晓军, 赵伊君 2012 国防科技大学学报 **34** 38]
- [9] Wang X L, Zhou P, Ma Y X, Ma H T, Li X, Xu X J, Zhao Y J 2012 *Journal of National University of Defense Technology* **34** 33 (in Chinese) [王小林, 周朴, 马阎星, 马浩统, 李霄, 许晓军, 赵伊君 2012 国防科技大学学报 **34** 33]
- [10] Zhou P, Liu Z J, Xu X J 2009 *Chinese Journal of Laser* **36** 276 (in Chinese) [周朴, 刘泽金, 许晓军 2009 中国激光 **36** 276]
- [11] Liu Z J, Zhou P, Wang X L, Ma Y X, Xu X J, Hou J 2010 *Chinese Journal of Laser* **37** 2221 (in Chinese) [刘泽金, 周朴, 王小林, 马阎星, 许晓军, 侯静 2010 中国激光 **37** 2221]
- [12] Enloe L H, Rodda J L 1965 *Proc. IEEE* **53** 165
- [13] Stover H L, Steier W H, 1966 *Appl. Phys. Lett.* **8** 91
- [14] Hall J L, Sheng L, Kramer G 1987 *IEEE J. Quantum Electron.* **23** 427
- [15] Vorontsov M A, Weyrauch T, Beresnev L A, Carhart G W, Liu L, Aschenbach K 2009 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **15** 269
- [16] Wang X L, Zhou P, Ma Y X, Ma H T, Xu X J, Liu Z J, Zhao Y J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 973 (in Chinese) [王小林, 周朴, 马阎星, 马浩统, 许晓军, 刘泽金, 赵伊君 2010 物理学报 **59** 973]
- [17] Goodno G D, Asman C P, Anderegg J, Brosnan S, Cheung E C, Hammo D, Injeyan H, Komine H, Long W H, McClellan M Jr, Mcnau S J, Redmond S, Simpson R, Sollee J, Weber M, Weiss S B, Wickham M 2007 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **13** 460
- [18] Xiao R, Hou J, Jiang Z F, Liu M 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6464 (in Chinese) [肖瑞, 侯静, 姜宗福, 刘明 2006 物理学报 **55** 6464]
- [19] Yu C X, Augst S J, Redmond S M, Goldizen K C, Murphy D V, Sanchez A, Fan Y 2011 *Opt. Lett.* **36** 2686
- [20] Ma Y X, Zhou P, Wang X L, Ma H T, Xu X J, Si L, Liu Z J, Zhao Y J 2010 *Opt. Lett.* **35** 1308
- [21] Goodno G D, Komine H, McNaught S J, Weiss S B, Redmond S, Long W, Simpson R, Cheung E C, Howland D, Epp P, Weber M, McClellan M, Sollee J, Injeyan H 2006 *Opt. Lett.* **31** 1247
- [22] Wang Y X, Qiu Q, Shi S J, Su J, Liao Y, Xiong C D 2014 *COL* **12** 021402
- [23] Vornehm J E, Schweinsberg A, Shi Z, Gauthier D J, Boyd R W 2013 *Opt. Express* **21** 13094
- [24] Müller H, Chiow S, Long Q, Chu S 2006 *Opt. Lett.* **31** 202
- [25] Patrick E 2014 *Ph. D. Dissertation* (Sweden: Umeå university)
- [26] Skřínský J, Janečková R, Grigorová E, Strížík M, Kubát P, Herecová L, Nevrlý V, Zelinger Z, Civiš S 2009 *J. Mol. Spectrosc.* **256** 99

Experimental researches of laser phase lock with dual-servo feedbacks based on the piezoelectric transducer and fiber electrooptic phase modulator*

Hou Jia-Jia¹⁾²⁾ Zhao Gang¹⁾²⁾ Tan Wei¹⁾²⁾ Qiu Xiao-Dong¹⁾²⁾ Jia Meng-Yuan¹⁾²⁾
 Ma Wei-Guang^{1)2)†} Zhang Lei¹⁾²⁾ Dong Lei¹⁾²⁾ Feng Xiao-Xia³⁾ Yin Wang-Bao¹⁾²⁾
 Xiao Lian-Tuan¹⁾²⁾ Jia Suo-Tang¹⁾²⁾

1) (State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Laser Spectroscopy, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

2) (Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

3) (Shanxi Polytechnic College, Taiyuan 030006, China)

(Received 7 April 2016; revised manuscript received 29 August 2016)

Abstract

Fiber laser can be used for fiber optic communications, laser cutting, industrial manufacture, defense security and many other fields because of its advantages of narrow output linewidth, good reproducibility, etc. However, due to nonlinear and thermal effects, only a limited output power of a single fiber can be obtained with a sharp attenuation of the output beam quality, which obstructs the applications of fiber lasers. Therefore, the research of expanding the power of a fiber laser source while maintaining its beam quality by combining coherent beam has become a hot subject at present. In this field, the performance of phase control of coherent laser beams is a key factor to influence the efficiency of combination. The phase-controlling methods mainly include stochastic parallel gradient descent control algorithm, dithering, and heterodyne detection. In this paper, based on the active phase lock technology, the traditional heterodyne detection method is improved by the use of a fiber electro-optic phase modulator (EOM) rather than an acousto-optic frequency shifter (AOFS) to avoid the complex designs of the RF driver and circuit, which makes the overall experimental setup simple and stable. Moreover, in order to achieve a stable and wide correction range of phase locking, two servo paths are designed by use of piezoelectric transducer (PZT) and EOM1 to correct the optical phase differences. Firstly, a single-frequency narrow-width fiber laser with its central wavelength of 1531 nm is split by a beam splitter to generate a signal and a reference beam, respectively. The reference beam is phase modulated by another EOM2 with a 15 MHz signal. The phase error signal is obtained by demodulating the detected heterodyne signal at the modulation frequency. After that the error signal is divided into two parts, and sent to two PID servos to control PZT and EOM1, respectively. The PZT, used in the slow feedback loop, eliminates the laser phase error induced by the ambient temperature drift, while the EOM1, in the quick feedback loop, can eliminate the influence of high frequency noise. Two PID servos are

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2012CB921603), the Program for Changjiang Scholar and Innovative Research Team in University of Ministry of Education of China (Grant No. IRT13076), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11434007, 61475093, 61378047, 61275213, 61475093), the National Key Technologies Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (Grant Nos. 2013BAC14B01), the Foundation for Young Scholars of Shanxi Province, China (Grant Nos. 2013021004-1, 2012021022-1), the Shanxi Scholarship Council of China (Grant Nos. 2013-011, 2013-01), and the Program for the Outstanding Innovative Teams of Higher Learning Institutions of Shanxi, China.

† Corresponding author. E-mail: mwg@sxu.edu.cn

carefully designed according to the measurements of the dynamic response of the PZT and EOM1. A stable feedback loop with a bandwidth of 220 kHz (limited by the bandwidth of PID controller) is obtained according to the measurement of its phase error signal spectrum, thus a tight lock is expected. As a consequence, the error of phase locking is less than 0.88° , which indicates that the phase control accuracy is $\lambda/400$. The long-term stability of the system is assessed by a 2 hour monitoring of the lock error signal. According to the analysis of Allan deviation, the best phase lock value of 0.006° can be obtained for an integration time of 160 s. The overall phase lock experimental setup is simple and easy to operate; moreover the phase lock can be further improved by optimizing the parameters of the PID controller.

Keywords: coherent beam combining, phase lock, fiber electro-optic phase modulator, piezoelectric transducer

PACS: 42.55.Wd, 42.60.Fc, 87.19.lr, 77.55.hj

DOI: [10.7498/aps.65.234204](https://doi.org/10.7498/aps.65.234204)