

基于光外差锁相的激光偏振控制与 高偏振消光比的光束合成

邹星星^{1,2}, 沈辉^{2***}, 全昭², 尤阳², 刘美忠², 张璟璞², 何兵^{2**}, 周军², 张建华^{1*}

¹上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072;

²中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800

摘要 激光相干偏振合成(CPBC)是获得高亮度线偏振激光输出的有效方法。基于此,提出一种光相位调制技术,将两路光相位差转变为幅度调制,进行光外差偏振相位探测和线性锁相控制,实现了两路同频率激光光束的相干偏振合成。理论上详细分析了光外差偏振相位探测的理论模型和线性锁相控制环路的数学模型,用于优化系统参数。锁相控制后,合成光束的输出功率为 352.4 mW,偏振消光比高达 17.67 dB,系统的控制带宽约为 66.1 kHz,剩余相位噪声为 $1 \times 10^{-4} \text{ rad} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ (1 Hz)和 $3 \times 10^{-6} \text{ rad} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ($>100 \text{ Hz}$)。相比于其他 CPBC 的锁相方法,该方法对偏振消光比以及控制带宽都有明显的提升,有效地抑制了相位噪声。

关键词 激光光学; 相干偏振光束合成; 光外差探测; 偏振相位控制; 偏振消光比

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1014002

Polarization Control and Laser Combination with High Polarization Extinction Ratios Based on Optical Heterodyne Detection and Phase Locking

Zou Xingxing^{1,2}, Shen Hui^{2***}, Quan Zhao², You Yang², Liu Meizhong²,
Zhang Jingpu², He Bing^{2**}, Zhou Jun², Zhang Jianhua^{1*}

¹School of Mechanical Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

²Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract Coherent polarization beam combination (CPBC) is an effective method to obtain the high-brightness laser with linear polarization. This paper proposed an optical phase modulation method to transform the phase difference between two laser beams into amplitude modulation. Using optical heterodyne phase detection and linear phase-locked control, the polarization beam combination of two laser beams with the same frequency was realized. Further, the mathematical models of optical heterodyne polarization phase detection and linear phase-locked control loop were theoretically analyzed in detail for optimizing the system parameters. After phase locking, the polarization extinction ratio of the combined beam achieves 17.67 dB with the combined power of 352.4 mW, while the control bandwidth is nearly 66.1 kHz. The residual phase noise is $1 \times 10^{-4} \text{ rad} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ (1 Hz) and $3 \times 10^{-6} \text{ rad} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ($>100 \text{ Hz}$). Compared with other CPBC phase-locking methods, the proposed method can significantly improve polarization extinction ratio and control bandwidth, and effectively suppress phase noise.

Key words laser optics; coherent polarization beam combination; optical heterodyne detection; polarization phase control; polarization extinction ratio

OCIS codes 140.3298; 140.3510; 060.2310

收稿日期: 2019-12-17; 修回日期: 2020-01-30; 录用日期: 2020-02-18

基金项目: 国家自然科学基金(61705243, 61735007, 61405202)、广东省重点领域研发计划(2018B090904001)、上海市自然科学基金(16ZR1440100, 16ZR1440200)、上海市优秀技术带头人计划(17XD1424800)、上海市青年科技英才扬帆计划(17YF1421200)

* E-mail: jhzhag@shu.edu.cn; ** E-mail: bryanho@siom.ac.cn; *** E-mail: nature0546@163.com

1 引 言

单频窄线宽光纤激光器由于其良好的性能,特别是相位噪声低、相干长度长、结构紧凑等优点^[1-3],在引力波探测^[4]、非线性频率转换^[5]、高精光谱^[6]、光谱/相干光束合成^[7-8]等领域得到了广泛的应用。然而,激光在光纤放大和传输过程中受到受激布里渊散射(SBS)等非线性效应影响,单频窄线宽激光器的输出亮度很难得到大幅度提升^[9]。在早期的研究工作中,通过采用高掺杂的大模场有源光纤,并在有源光纤上施加应力梯度或者温度梯度等方法^[10-13],抑制了光纤中的SBS,以实现全光纤单频窄线宽激光器输出功率的提升,到目前为止获得的最高功率为414 W^[11]。

为了获得更高亮度、更高功率的单频窄线宽激光光束,相干合成是一种在保证线宽不变的同时还能提升激光功率的关键技术。基于分孔径阵列组束的相干合成由于存在远场旁瓣,严重降低了光束质量^[14],为此,研究者们提出了共孔径合成的偏振光束合成,现已成为获得高光束质量、高功率窄线宽线偏振单频激光光源的关键技术和研究热点,特别是应用于引力波探测等高精度物理实验时,它提供了一个十分有用的技术手段^[15],目前已实现偏振消光比(PER, R_{PE})约为16 dB的合成激光输出^[16]。

相干偏振合成的主要方法是利用偏振分光镜^[17-18]将两路正交偏振的线偏振光进行合束,再通过偏振锁相方法将合束激光的相位锁定为 $n\pi$ (n 为整数),使组合光束的偏振态仍是线性偏振态,进行多路级联合成^[19]。目前主动相干偏振合成的主动相位控制方法主要采用随机并行梯度下降(SPGD)^[20-21]、抖动法^[16,22]等自适应控制算法进行锁相控制。但是基于这些算法的自适应控制系统,存在收敛速度和硬件计算能力有限的问题,导致反馈控制带宽较窄^[16,20],并且相较于线性控制技术带宽也较窄^[23],锁相控制效果一般体现在1 kHz以下。

采用线性控制技术能有效提升锁相控制带宽至kHz以上,具有较强的噪声抑制能力,但是对偏振相位信息的获取提出了较高的要求,需要实现偏振相位信息到电信号的线性变换,且需具有较高的噪声免疫能力^[23]。由于相干偏振合成的两路激光需要完全同频率才能合成,微小的频率差会形成光学拍,无法让光束合成为新的线偏振激光,故光零差探测是一项最直接的合成激光的频率或相位噪声的探

测技术^[23],但是该技术会将功率噪声叠加到相位误差信号中,容易受到单路激光功率和偏振扰动的影响,进而严重影响锁相性能。外差锁相则能克服上述缺点,实现稳定的锁相,但是由于合成的激光不能存在频率差,需要提出新的方案才能用于偏振光束的合成。

本文提出了一种基于光相位调制技术的CPBC方法,实现了两路同频率激光光束的相干偏振合成。利用光相位调制技术将两路激光拍频相位差转换为幅度调制,实现了光外差法在CPBC系统中的应用。利用高精度光外差探测技术和线性比例-积分-微分(PID)控制系统,实现了十分稳定的激光相位锁定,获得了稳定的线偏振度高达17.67 dB的合束激光,合束输出功率为352.4 mW。通过建立模型,详细分析了激光锁相的残余相位噪声、单路激光功率和偏振态稳定度、激光的波前畸变情况和合束激光的空间模式匹配等对合成偏振消光比的影响,为后续实验提供了理论基础。该光外差偏振相位探测技术能有效检测合成激光的活塞相位信息,同时能最大程度地降低单路激光功率和偏振态抖动的直接干扰,具有稳定性高、宽带宽、锁相相位噪声低的优点,为进一步的级联偏振合成提供了稳定的子光束。

2 光外差锁相偏振控制的基本原理

为了实现外差锁相的偏振控制,实验上采用激光相位调制转化为幅度调制的方案。首先对一路激光(参考光)进行相位调制,获得激光边带;然后利用参考光的边带与另一路激光进行拍频,将相位调制转化为幅度调制,进而实现光电探测,获取外差锁相的误差信号。基本原理图如图1所示,频率为 ω 的激光分别经过两个声光调制器(AOM)后进行合束,AOM的频移量分别为 ω_1 和 ω_2 。假设相位调制器调制信号为 $\varphi_{\text{mod}} = \beta_{\text{RF}} \sin(\Omega_{\text{RF}} t)$,则入射到PBS的两路合束激光的光场可表示为

$$\begin{cases} E_1 = A_1 \exp[i(\omega - \omega_1)t] \exp[i\beta_{\text{RF}} \sin(\Omega_{\text{RF}} t) + i\varphi_1] \\ E_2 = A_2 \exp[i(\omega - \omega_2)t] \exp(i\varphi_2) \end{cases}, \quad (1)$$

式中: A_1 和 A_2 为光场的幅度; β_{RF} 相位调制深度; Ω_{RF} 为信号角频率; t 为时间; φ_1 和 φ_2 分别为两路激光在各自光路上传播产生的相位。

合成激光经过检偏器实现正交偏振光的检偏和干涉后入射到光电探测器(PD)上,假设检偏器与水平方向的夹角为 θ ,则PD上的光强的光场为 $E_{\text{PD}} = E_1 \cos \theta + E_2 \sin \theta$,其光强为

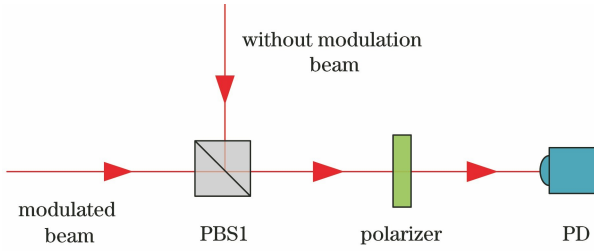


图 1 光外差拍频检测偏振相位原理图

Fig. 1 Principle of polarization phase detection by optical heterodyne beat frequency

$$I_{PD} = E_{PD} E_{PD}^* = I_1 \cos^2 \theta + I_2 \sin^2 \theta + \sqrt{I_1 I_2} \sin 2\theta \cos[\Delta\omega t + \beta_{RF} \sin(\Omega_{RF} t) + \Delta\varphi], \quad (2)$$

式中： $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$ 为两束激光移频后的激光频率差； $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ 为两束激光之间的相位差。假设光电探测器的光电响应为 S_{PD} ，则经过光电转换后光电探测器输出的电信号为

$$V_{PD} = S_{PD} \{ I_1 \cos^2 \theta + I_2 \sin^2 \theta + \sqrt{I_1 I_2} \sin 2\theta \exp[i\Delta\omega t + i\Delta\varphi + i\beta_{RF} \sin(\Omega_{RF} t)] \} \approx S_{PD} [I_1 \cos^2 \theta + I_2 \sin^2 \theta + \sqrt{I_1 I_2} \sin 2\theta J_0(\beta_{RF}) \cos(\Delta\omega t + \Delta\varphi) - 2S_{PD} \sqrt{I_1 I_2} J_{+1}(\beta_{RF}) \sin 2\theta \sin(\Delta\omega t + \Delta\varphi) \sin(\Omega_{RF} t)]. \quad (3)$$

利用 Jacobi-Anger 展开并忽略高阶项，式中第一项为直流项，由激光功率和零差拍频项组成，第二项为交流项，它包含两束激光之间的相位信息。将光电探测的输出信号通过混频器在调制频率 Ω_{RF} 处使用 $\sin(\Omega_{RF} t)$ 解调、滤波后，可以得到含有相位误差信号

的外差拍频信号，为

$$V = GS_{PD} \sqrt{I_1 I_2} J_1(\beta_{RF}) \sin 2\theta \sin(\Delta\omega t + \Delta\varphi), \quad (4)$$

式中： G 为混频解调增益。

通过(3)式和(4)式可知，外差拍频探测能有效检测到两路激光的活塞相位信息，同时能极大地降低激光功率的直接干扰，获得误差信号没有直流偏置，相比于零差探测锁相要稳定很多。利用该误差信号，结合线性控制，能够将激光相位稳定的锁定在零点，实现两路激光的偏振合成，获得线偏振激光。

3 实验装置

基于光外差锁相的两路激光偏振光束合成系统如图 2 所示，系统使用的种子源为一窄线宽的线偏振单频激光器，其中心波长为 1064 nm，光谱线宽小于 20 kHz。种子激光通过前置保偏掺 Yb 光纤放大器(A0)放大后，通过 1:1 的保偏耦合器(Coupler)分成两路子光束，其中一路作为参考光。参考光依次经过一个电光调制器(EOM)和 AOM 后注入到一级保偏光纤预放大器(A1-1)中进行光放大，放大后的功率约为 187 mW。EOM 用于电光相位调制，为参考光引入边带，调制信号为一正弦波。另一路直接经过一个 AOM 后注入到保偏光纤预放大器(A1-2)中，输出功率约 200 mW。两路 AOM 均用于声光移频，声光频移量约为 150 MHz，其中：一路使用高稳定度信号源驱动，作为参考光束；另一路使用压控振荡器驱动，能够实现频移量的精密调节，可作为激光锁相的相位执行器。

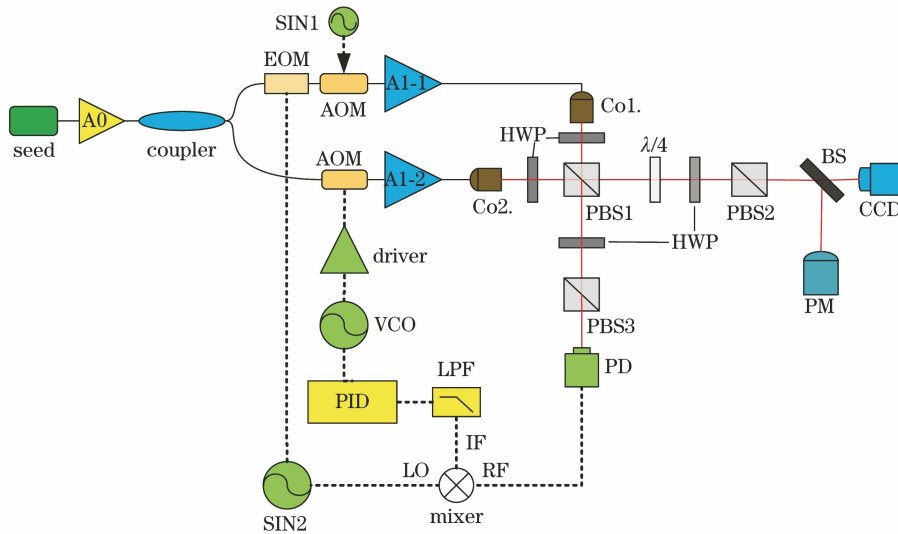


图 2 光外差锁相的两路激光偏振合成系统的装置图

Fig. 2 Schematic diagram for polarization beam combination system of two beams by the optical heterodyne phase locking

两路经过二级光放大后的激光分别经过两个准直器(Co1.和 Co2.)后准直输出。然后经过半波片(HWP)调整光束的偏振方向后,在偏振分光棱镜(PBS1)上进行相干偏振合成。通过细调 HWP, PBS1 合成的绝大部分激光通过一个四分之一波片,用于补偿固定的锁相偏差^[23]。PBS1 泄漏出的少量激光则经过 HWP 和 PBS2 组成的检偏器进行偏光干涉,用于光外差偏振相位检测与反馈控制。

两路激光的拍频信号经过交流耦合的高速光电探测器(PD)探测转化为外差电信号,PD的带宽约为 150 MHz。探测到的外差信号在混频器(Mixer)处与本振光(LO, SIN2)混频解调,获得包含激光偏振相位信息的误差信号。该误差信号经过 PID 电路放大并滤波,形成反馈执行信号用于驱动压控振荡器(VCO),实时改变 AOM 的频移量。由于相位为频率对时间的积分,故通过反馈控制激光的频率能达到两路激光锁相,且具有很大的执行动态范围,这为保证锁相的稳定性提供了可能。当两路激光相位差精确锁定到 0 时,合束输出激光的偏振态为线偏振态,可以用于多束激光的级联偏振合成。

为了评估锁相控制后合束激光的偏振度情况,合束激光会通过 HWP 和 PBS3 构成检偏系统,用于偏振度测量和合束光斑分析。在检偏系统中,透射的合束激光通过一个偏振非相关的分光镜(BS)分束,99%的激光功率注入到功率计(PM),1%的激光功率注入到一个高速的 CCD 相机中。通过旋转 HWP,并记录合束激光功率的最大值和最小值,评估长时间合束激光偏振消光比的变化情况。

4 实验结果

4.1 外差偏振相位误差信号

根据第二部分外差偏振相位检测与控制的思路,利用高速示波器(带宽 200 MHz)和频谱仪(SR785)对 PD 输出的外差信号和 Mixer 输出的混频信号进行了实时测量和分析。当两路 AOM 频移量差为 30.8 kHz,且 EOM 上没有增加调制信号时,两路激光处于零差拍频的情况,PD 探测到的信号如图 3(a)所示,该信号为零差锁相控制的误差信号。当在 EOM 上加载 $\Omega_{RF} = 17.8$ MHz 的相位调制信号后,PD 上探测的信号出现被幅度调制的载波

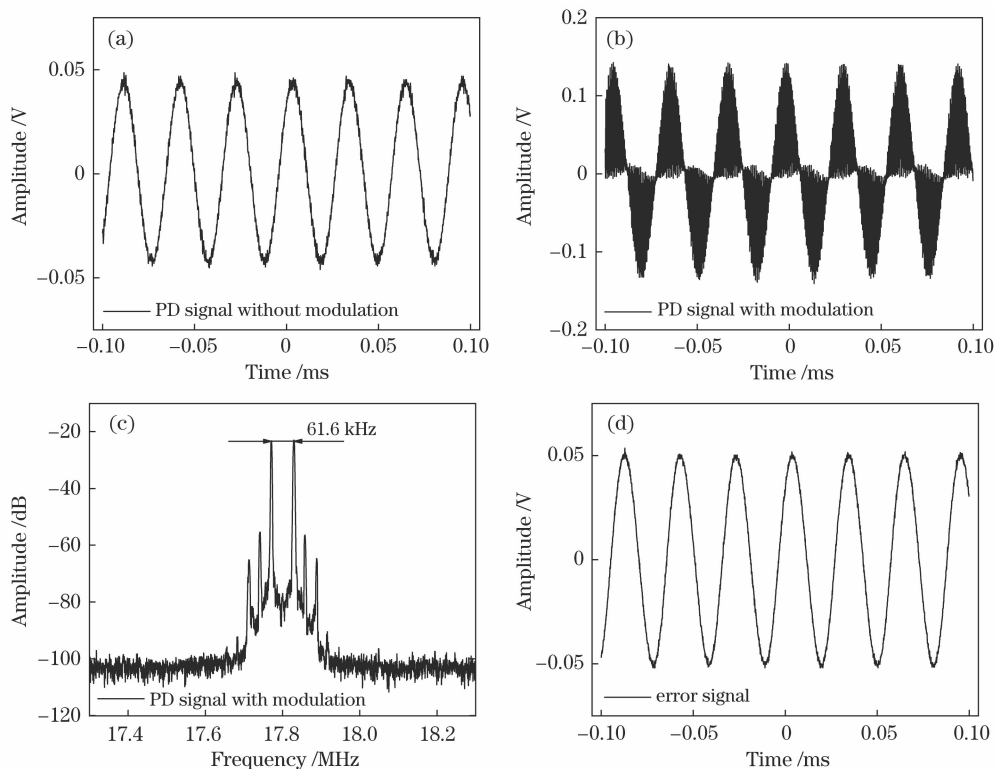


图 3 经相位调制信号调制前后的拍频信号及频谱。(a)未加相位调制信号时光电探测器探测到的零差拍频信号;

(b)(c)增加相位调制信号后光电探测器探测到的外差拍频的信号和频谱;(d)混频解调后的误差信号

Fig. 3 Homodyne beat signal and spectrum before and after modulation by phase modulation signal. (a) Homodyne beat signal detected by photodetector without phase modulation; (b)(c) heterodyne beat signal and its spectrum detected by photodetector with phase modulation added; (d) error signal after mixing demodulation

信号,如图 3(b)所示,载波频率为 17.8 MHz,幅度调制信号为两路 AOM 频移差引入的激光相位差信息,与零差锁相的误差信号一致。以此方式,激光的相位差信息从零差探测的直流信号检测转变为外差探测中的幅度调制。由于外差探测为交流检测,滤除了直流部分,故能极大程度地减小激光功率和偏振态抖动引入的干扰[见(3)式和(4)式],提升锁相环的稳定性。对外差信号进行频谱分析,如图 3(c)所示,能很明显地看出参考光的各级边带与另一路激光的拍频,±1 级边带的拍频率差为 61.6 kHz,等于 AOM 频移量的两倍。

外差射频信号与 EOM 的驱动信号进行混频,并使用低通滤波器滤除高阶边带拍频信号,获得外差偏振相位探测的误差信号,如图 3(d)所示。该误差信号与未受到扰动的零差拍频信号一致,但是没

有激光功率引入的直流偏置,激光相位差信息不会受到激光功率和偏振的扰动。经过正弦拟合,可以得到外差探测的误差信号的鉴相斜率为 $K_d = 0.04 \text{ V/rad}$,实际反馈控制时候会根据系统的稳定性微调反馈电路增益。

4.2 反馈环路设计

锁相控制系统主要由高速光电探测器和混频器组成的鉴相器、环路滤波器、压控振荡器(VCO)构成。鉴相器对两束激光的相位差进行相位提取,产生了误差信号。环路滤波器将含有偏振相位信息的误差信号进行放大和滤波,并产生平稳的调谐电压控制 VCO,VCO 生成调频的射频信号经功率放大后驱动 AOM 改变控制路激光的频率/相位。偏振控制系统的反馈环路模型,如图 4 所示。

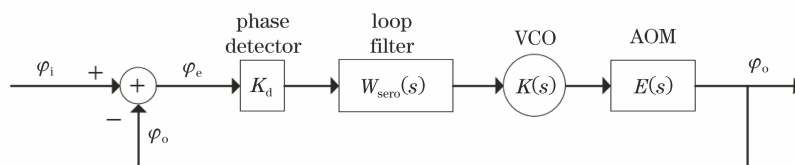


图 4 激光锁相环模型

Fig. 4 Model of laser phase-locked loop

利用上述的控制系统框图,结合实验所用的器件参数,对系统的开环响应进行仿真。图 5 给出了系统开环响应的 Bode 图和 Nyquist 图,从 Nyquist 图可以看出,由于系统无右半平面的开环极点,开环幅相曲线不包围 $(-1, j_0)$ 点,闭环系统稳定。由 Bode 图可知:系统的幅值裕度 $h = 34.6 \text{ dB}$,穿越频

率 $\omega_x = 647 \text{ kHz}$;单位增益点的相角裕度 $\gamma = 55.6^\circ$,相应的截至频率 $\omega_c = 66.1 \text{ kHz}$ 。由 Nyquist 判据可知,系统闭环环路能稳定工作。依据系统环路模型和实验数据的仿真,当环路闭合后,锁相带宽为 66.1 kHz,能够对小于该频率范围内的相位噪声进行有效的压制。

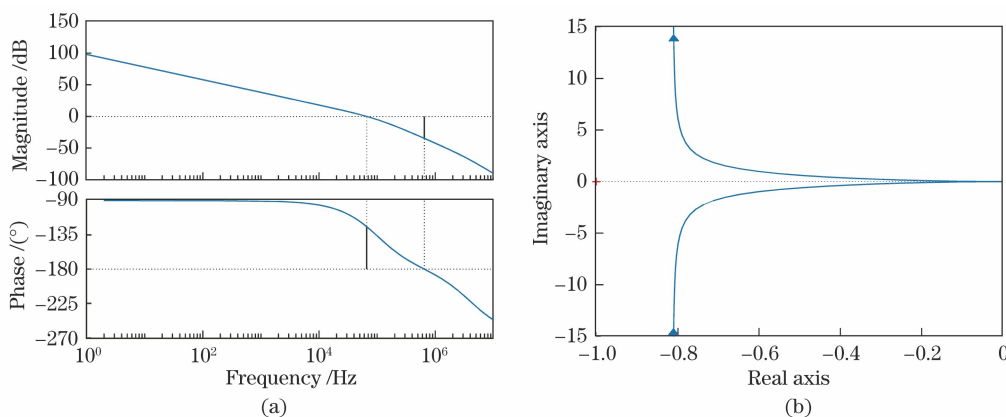


图 5 激光锁相系统的开环 Bode 图和 Nyquist 图。(a) Bode 图;(b) Nyquist 图

Fig. 5 Bode and Nyquist diagrams of laser phase-locked system in open loop.

(a) Bode diagram; (b) Nyquist diagram

4.3 偏振控制与合成

根据系统环路设计,在实验过程中通过观察误差信号来微调系统增益,可使反馈环路具有最高增

益和最宽带宽,同时也可使相位锁定稳定。图 6(a)给出了使用示波器观察到的反馈环路在闭合的过程中误差信号的变化情况。在没有相位控制的情况

下,解调误差信号的频率差还是两路 AOM 驱动信号的频率差 $\Delta\omega$ 。当 PID 控制器执行相位控制时,解调的误差信号可以在零点附近有效地锁定,两个放大器链路之间的相位差也可得到有效的补偿。当两路激光相位锁定后,使用频谱分析仪(SR785)能对锁定后的相位噪声情况进行测量和评估。图 6(b)

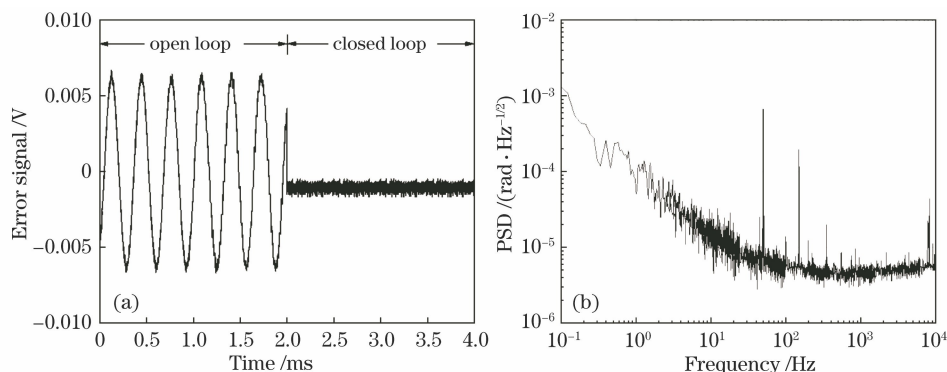


图 6 误差信号及其相位噪声谱。(a)开环和闭环的误差信号;(b)系统闭环时的相位噪声谱

Fig. 6 Error signal and power spectral density of phase noise. (a) Error signal in open and closed loops; (b) power spectral density of phase noise in closed loop

通过 CCD 相机收集的光斑强度分布来研究 PID 锁相前后合成光束光斑的变化情况。图 7(a)~(c)给出没有锁相时的光斑强度分布的 3 个快照,从图中可以看出两路合成光束基本上完全重合,在空间指向和模式匹配上误差很小。在没有锁相的情况下,光斑的强度分布随时间变化,并且由于两个光束之间的不确定相位差,功率计中的测量到的功率值十分不稳定,体现为两路激光的光学拍。当系统处

给出了测量到的激光拍频相位噪声谱密度(PSD),锁相控制后的噪声在 1 Hz 处为 $1 \times 10^{-4} \text{ rad} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$,在小于 20 Hz 区域,相位噪声呈现 $1/f$ 上升规律;在大于 100 Hz 区域,相位噪声为 $3 \times 10^{-6} \text{ rad} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。根据第 4.2 节的环路模型,系统对相位噪声的抑制带宽约为 66.1 kHz。

于闭环时,合成光束的强度分布呈现高斯分布规律,且光束强度分布十分稳定,使用功率计收集合束激光的输出功率也十分稳定。在锁相情况下,通过旋转 HWP,观察合成光束最小功率和最大功率情况下的强度分布,分别如图 7(d)和图 7(e)所示。观察最小功率下激光的强度分布可以看出两路合束光斑分布不均匀,这主要是由于两路激光光束输出波前相位还存在微小的不匹配,波前相位差在整个光斑

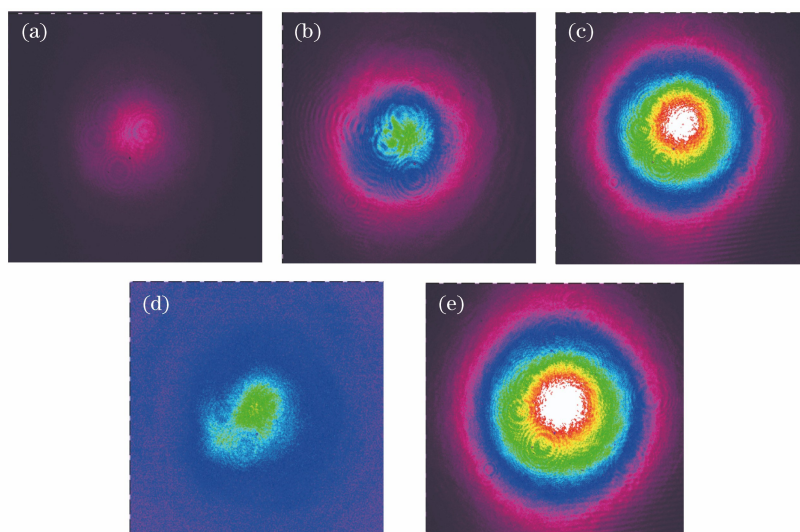


图 7 锁相前后光斑强度的光斑快照。(a)~(c)三张未锁相时的光斑强度变化的快照;(d)(e)锁相后的最小功率和最大功率的光斑快照

Fig. 7 Snapshots of the spot intensity profiles before and after phase locking. (a)~(c) Three snapshots of the spot intensity profiles without phase locking; (d)(e) spot snapshots after phase locking in the lowest and highest powers

上分布不一致,导致在空间不同位置处的相对相位差不同,系统的锁相只能将大部分区域内的相位差锁定至 0,而这些不匹配区域则还是存在微小的相位差,从而降低这一区域的偏振消光比,导致整个合成光束的消光比降低。

为了评估合成激光的偏振态情况,精确测量了合成光束的偏振消光比的变化规律。旋转 HWP,使得合成激光的偏振方向与 PBS 的透射方向平行或垂直,测量透射出 PBS 的最大光功率或最小光功率,如图 8 所示。在一段时间内采集的最小功率和最大功率的平均值分别为 $P_{\min}=6.02$ mW (0.563 mW) 和 $P_{\max}=352.4$ mW (7.83 mW),因而输出合成激光的偏振消光比稳定在 17.67 dB。在功率曲线中出现的较小的功率波动是由于合成激光的功率和偏振方向发生微小的抖动导致的,详细原因将在第 5 部分分析。

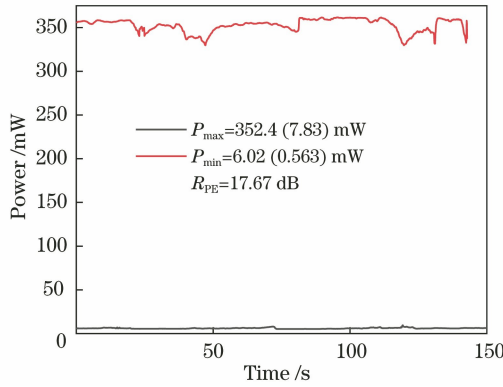


图 8 闭环时合束激光的偏振消光比
Fig. 8 Polarization extinction ratio of combined beam in closed loop

5 分析与讨论

在实际实验系统中,两路激光经过外差式锁相能获得宽带宽、大锁相动态范围和高锁定稳定度的信号,然而锁相控制后,合成激光偏振消光比依然有限。通过对系统的设计分析并实验验证,可得该方案对最终合成激光的消光比限制因素主要有激光锁相的残余相位噪声、单路激光光源的功率和偏振态稳定度、激光的波前畸变情况和合束激光的空间模式匹配^[24-26]。在所提偏振合成系统中,采用较好的准直器可将单路激光的输出激光波前畸变降低到最小。在空间模式匹配方面,实验上同时监测合成激光的近场和远场光斑情况,通过精密微调两路光束的指向确保两路光斑几乎完全重合,使中心位置误差控制在 2 mm 左右,从而确保合成激光的偏振消

光比达到最好的效果。针对锁相剩余相位噪声的影响,系统锁相后,能对 66.1 kHz 附近的相位噪声进行有效抑制,剩余噪声约为 3×10^{-6} rad·Hz^{-1/2},因此对合成光束的偏振消光比影响很小。

在该系统中影响合成激光偏振消光比的主要因素是源于单路光源的功率噪声影响。激光的功率涨落体现为合成后线偏振态的偏振方向的旋转,这会导致合成激光偏振消光比测量值不稳定。对于单路激光的偏振态稳定度的影响,由于合成器件为偏振分光元件,激光偏振态的旋转体现为合成激光的某一偏振态功率的抖动,故它对偏振消光比的降低机制与功率抖动的情况相同。较大的偏振态抖动会导致合成的激光线偏振方向发生旋转,从而降低偏振消光比。

假设两路正交偏振激光的光场为 E_x 和 E_y ,则合成激光的线偏振方向为 $\tan \theta = \frac{E_y}{E_x}$,如图 9 所示。

如果两路激光功率涨落分别为 ΔE_x 和 ΔE_y ,合成激光的瞬时线偏振方向的变化量为

$$\tan \Delta \theta \approx \frac{1}{E_x^2 + E_y^2} (E_x \Delta E_y - E_y \Delta E_x). \quad (5)$$

所以合成激光的瞬时偏振消光比为检偏过程中最大光功率与最小光功率的比值,即

$$\frac{1}{R_{PE}} \equiv \frac{I_{\min}}{I_{\max}} = \frac{I \sin \Delta \theta}{I \cos \Delta \theta} = \tan \Delta \theta \approx \left(\frac{\Delta I_y}{I_y} - \frac{\Delta I_x}{I_x} \right) / \left(2 \sqrt{\frac{I_x}{I_y}} + 2 \sqrt{\frac{I_y}{I_x}} \right), \quad (6)$$

式中: I 为合成激光的总光强, $I_i = E_i^2$, $\Delta I_i = 2E_i \Delta E_i$ ($i=x, y$) 分别为两个正交偏振态的光强。由于两路激光功率涨落属于独立的随机噪声,因而测量到的偏振消光比的标准差为两路功率涨落的非相干叠加,即

$$\left(\frac{1}{R_{PE}} \right)_{SD} \approx \left(\frac{\Delta I_{ySD}}{I_y} + \frac{\Delta I_{xSD}}{I_x} \right) / \left(2 \sqrt{\frac{I_x}{I_y}} + 2 \sqrt{\frac{I_y}{I_x}} \right). \quad (7)$$

此外,当检偏器件为 HWP 与 PBS 的组合时,旋转 HWP 将偏振角固定为最大/最小功率角度。单路激光的功率噪声对最大功率的影响相对误差值较小,但是对最小功率值的测量影响较大,尤其是在较差的功率稳定度情况下,最小值的测量误差可能大于 100%,这将严重降低激光的偏振消光比。

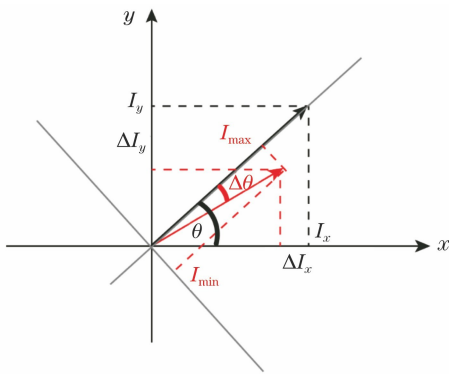


图 9 激光功率噪声对偏振消光比的影响

Fig. 9 Influence of laser power noise on polarization extinction ratio

6 结 论

在激光偏振光束合成研究中,提出了一种基于光外差技术进行偏振相位探测和线性 PID 锁相控制的合成光束偏振控制方法,该方法具有高的锁相控制带宽和偏振消光比。对于用于合成的两路同频率的激光,采用光相位调制技术,将两路光拍频相位信息转变为幅度调制,进而进行光电探测和锁相控制。相对于零差探测来说,外差技术极大程度上减小了激光功率和偏振态扰动对锁相控制的影响,有效提升了控制的稳定性和控制带宽。通过系统仿真设计,实现了高带宽和高增益的反馈控制环路,环路带宽高达 66.1 kHz。锁相控制后合成激光功率为 352.4 mW,系统剩余相位噪声为 $1 \times 10^{-4} \text{ rad} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ (1 Hz) 和 $3 \times 10^{-6} \text{ rad} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ($>100 \text{ Hz}$),合成光束的偏振消光比为 17.67 dB。通过分析和评估激光锁相的残余相位噪声、单路激光光源的功率和偏振态稳定度、激光的波前畸变情况和合束激光的空间模式匹配的影响,目前系统的偏振消光比主要来源于空间指向和模式的轻微不匹配,以及功率和偏振态的抖动。下一步将考虑对每条链路的功率进行功率稳定控制,以使输出的合成激光功率更加稳定,提高输出激光的消光比的稳定性。

通过光外差锁相技术的激光相干偏振合成相位控制有潜力实现宽带宽激光锁相以及更多路数的偏振合成。通过进一步控制单路激光输出功率的稳定性以及偏振态,优化光束的空间模式,能够获得低相位噪声、高光束质量和高偏振度的高功率窄线宽激光,有望应用于现代科学研究中。

参 考 文 献

- [1] Li C, Xu S H, Huang X, et al. All-optical frequency and intensity noise suppression of single-frequency fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(9): 1964-1967.
- [2] Gouhier B, Guiraud G, Rota-Rodrigo S, et al. 25 W single-frequency, low noise fiber MOPA at 1120 nm [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(2): 308-311.
- [3] Gouhier B, Rota-Rodrigo S, Guiraud G, et al. Low-noise single-frequency 50 W fiber laser operating at 1013 nm[J]. *Laser Physics Letters*, 2019, 16(4): 045103.
- [4] Wei L W, Cleva F, Man C N. Coherently combined master oscillator fiber power amplifiers for Advanced Virgo[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(24): 5817-5820.
- [5] Krupa K, Bettenciana M, Tonello A, et al. Four-wave mixing in nonlinear fiber with two intracavity frequency-shifted laser pumps [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(4): 258-260.
- [6] Wu T, Peng X, Gong W, et al. Observation and optimization of ^4He atomic polarization spectroscopy [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(6): 986-988.
- [7] Uberna R, Bratcher A, Tiemann B G. Power scaling of a fiber master oscillator power amplifier system using a coherent polarization beam combination [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(35): 6762-6765.
- [8] Zheng Y, Zhu Z D, Liu X X, et al. High-power, high-beam-quality spectral beam combination of six narrow-linewidth fiber amplifiers with two transmission diffraction gratings[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(30): 8339-8343.
- [9] Fu S J, Shi W, Feng Y, et al. Review of recent progress on single-frequency fiber lasers[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(3): A49-A62.
- [10] Rothenberg J E, Thielen P A, Michael W, et al. Suppression of stimulated Brillouin scattering in single-frequency multi-kilowatt fiber amplifiers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6873: 68730O.
- [11] Huang L, Wu H S, Li R X, et al. 414 W near-diffraction-limited all-fiberized single-frequency polarization-maintained fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(1): 1-4.
- [12] Zhao X, Yang Y F, Shen H, et al. 302 W triple-frequency, single-mode, linearly polarized Yb-doped all-fiber amplifier[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2017, 5: e31.
- [13] Liu A P. Suppressing stimulated Brillouin scattering in fiber amplifiers using nonuniform fiber and temperature gradient[J]. *Optics Express*, 2007, 15(3): 977-984.
- [14] Xiao R, Hou J, Liu M, et al. Coherent combining technology of master oscillator power amplifier fiber arrays[J]. *Optics Express*, 2008, 16(3): 2015-2022.
- [15] Tünnermann H, Pödl J H, Neumann J, et al. Beam

[1] Li C, Xu S H, Huang X, et al. All-optical frequency

- quality and noise properties of coherently combined ytterbium doped single frequency fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2011, 19(20): 19600-19606.
- [16] Ma P F, Wang X L, Ma Y X, et al. Analysis of multi-wavelength active coherent polarization beam combining system[J]. Optics Express, 2014, 22(13): 16538-16551.
- [17] Wu W D, Han P G, Shi M, et al. Design and performance analysis of a single-unit polarizing beam-splitting prism based on negative refraction in a uniaxial crystal[J]. Applied Optics, 2019, 58(26): 7063-7066.
- [18] Wu W D, Wu F Q, Shi M, et al. A unit structure Rochon prism based on the extraordinary refraction of uniaxial birefringent crystals [J]. Optics Express, 2013, 21(11): 13162-13168.
- [19] Uberna R, Bratcher A, Tiemann B G. Coherent polarization beam combination[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2010, 46(8): 1191-1196.
- [20] Yang Y, Geng C, Li F, et al. Combining module based on coherent polarization beam combining [J]. Applied Optics, 2017, 56(7): 2020-2028.
- [21] Haraguchi E, Akiyama T, Ando T, et al. Simultaneous detection of beam pointing and optical phase errors for multiple beams using a quadrant photo detector for high-efficiency coherent beam combining systems[J]. Applied Physics Express, 2019, 12(10): 102012.
- [22] Ma P F, Zhou P, Wang X L, et al. Coherent polarization beam combining of four 200-W-level fiber amplifiers[J]. Applied Physics Express, 2014, 7(2): 022703.
- [23] Shen H, Quan Z, Yang Y F, et al. Polarization control of combined laser beams based on optical homodyne polarization detection and phase locking [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(1): 0103007.
- 沈辉, 全昭, 杨依枫, 等. 基于光学零差偏振探测和锁相的合束激光偏振控制 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47(1): 0103007.
- [24] Jiang M H, Su Y, Lu F. Influence of polarization on laser beam coherent combining[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(3): 611-614.
- 蒋茂华, 苏毅, 卢飞. 偏振态对激光相干合成的影响 [J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(3): 611-614.
- [25] Zhu J, Du W, Dong X, et al. Effect of the polarization-state fluctuation on coherent beam combining of fiber lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8192: 819237.
- [26] Ma P F, Zhou P, Ma Y X, et al. Analysis of the effects of aberrations on coherent polarization beam combining of fiber laser beams[J]. Applied Optics, 2012, 51(16): 3546-3551.