

文章编号: 0258-7025(2010)05-1253-06

矩形光斑阵列合束的锁相闭环分析

易亨瑜 苏毅 唐淳 王沐

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 光束合成是高功率固体激光器进一步发展的重要途径,其中各子束的相位锁定是实现相干合成的关键。分析了 4 束矩形光斑在光束合成中子束相位探测方法,建立阵列光束在锁相闭环下的光束合成模型。采用外差法探测子束与参考光束形成的拍频信号,通过异或电路及滤波电路得到直流信号,计算出该子束的相对相位差;将相位差转换为相位调制控制器的驱动电压,从而实现子束的相位闭环控制。利用模型研究了锁相开环、闭环下,不同子束间相位差、随机像差对合成光束远场强度分布的影响。模拟结果显示,锁相闭环下可以实现各子束与参考光束相位一致。另外讨论了影响闭环控制下相位残差的因素。

关键词 激光技术;相干合成;外差探测法;锁相

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103705.1253

Coherent Combination Analyses of Rectangle Spot Beams Array with Phase-Locked Closing-Loop

Yi Hengyu Su Yi Tang Chun Wang Mu

(Institute of Applied Electronic, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract Beams combination is an important way for development of high power solid state lasers, and the phase control electronics contributes greatly to the success of the coherent combining. The method of phase detection for beamlets in a 4 rectangle spot beams array is analyzed, and its mathematical model of coherent combination under phase-locked condition is established. A high-speed wavefront sensor is used to sample the wavefront of one beamlet in laser array, and phase difference between the beamlet and reference beam is detected by the way of heterodyne method from the beat frequency signal, which results from the interference of the reference beam with each beamlet. The phase difference is used to actively control the phase modulator of the beamlet, and then all of the output phases are exactly aligned. Some simulated waveform signals changing versus time are presented during the locking loop is closed, and it is also simulated that the intensity distribution of combined far-field spots changes with phase difference and random aberration among these beamlets, which is compared with that when the locking loop is opened. It is concluded from the simulated results that all output phases of each beamlets can be exactly aligned when the locking loop is closed. The control precision and condition of closing-loop are also analyzed.

Key words laser technique; coherent combination; heterodyne detection; phase-locking

1 引 言

功率合成是固体激光向更高功率发展的重要途径,它能有效解决激光工作介质、光学元件的技术限制,并减少热效应,实现高功率、高光束质量输出。合成方法主要分为相干合成和非相干合成,其中相干合成能压缩合成后的远场光斑尺寸,并显著提高合成后的光束峰值功率,受到人们广泛关注^[1,2]。

在相干合成中,又分为被动锁相^[3]和主动锁相^[4,5]两类,对于并联主振荡-功率放大(MOPA)方式工作的光纤激光器,利用外差法可以实现多路子束主动锁相的相干合成。目前国内研究较多的是光纤激光器的相干合成,在光束合成效果上,主要针对圆孔光阑的高斯光束阵列^[6~10]进行理论分析。2006 年诺·格公司利用两个 12.5 kW 放大链路并联工作,采用

收稿日期: 2009-07-13; 收到修改稿日期: 2009-08-13

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术基金(2009A0401024)资助课题。

作者简介: 易亨瑜(1969—),男,博士,高级工程师,主要从事光学检测技术方面的研究。E-mail: yihengyu1@sina.com

MOPA 方式,实现平均功率 25 kW 的高光束质量输出^[1,2,11],为固体激光器论证了一种向百千瓦级定标放大的激光器结构。为了抑制光纤介质引入的相位噪声,文献[12]开展了固体激光放大器在自由空间的相位探测实验研究。文献[13]详细分析了理想平面波通过两个矩孔光阑后的衍射现象。

关于阵列锁相与光束合成的综合理论分析,目前尚未查到相关报道。参照文献[11]的报道,本文研究了板条放大器中矩形平顶光斑的 4 束合成,建立了阵列光束在锁相闭环下光束合成的综合理论模型。通过数值模拟,分析了在锁相开环、闭环下,子束间相位差、子束随机像差对合成光束远场光斑的影响。

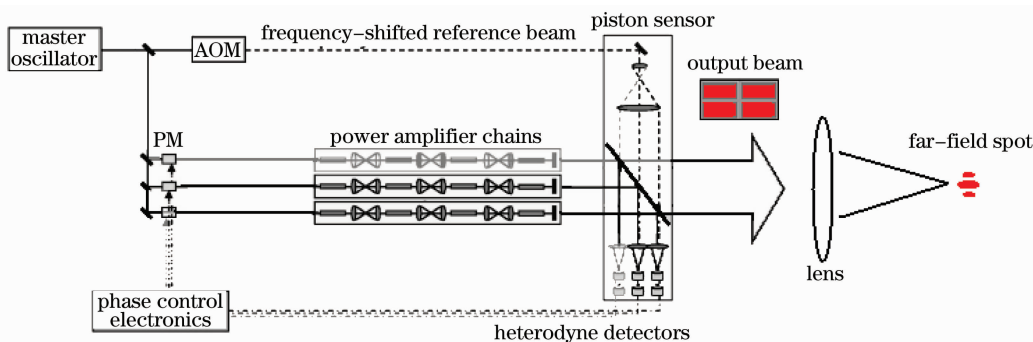


图 1 阵列光束的锁相合成示意图

Fig. 1 Beams combination of phase-locked control

2.1 合成光束

在图 1 中,近场光束在相干合成后通过透镜得到远场光斑。理想情况下光束相干叠加要求各子束的频率、振动方向一致,且相位差恒定。实际放大链路输出的 4 子束,因为经过光程不同而存在相互间整体相位延时,另外还可能因各自材料、装调、热效

2 理论分析

应的差异出现不同的像差,可分别用活塞像差和随机像差模拟。参照文献[11]中的 2 束光斑图,其近场光强分布近似为矩形平顶光束,其长 a ,宽 b ,子束间距 Δd 之间关系近似为 $a = 2b, \Delta d = b/5$ 。忽略热效应退偏等影响,阵列中 4 子束的近场光强分别为

$$E_0 = \text{rect}\left(\frac{x_0}{b}\right)\text{rect}\left(\frac{y_0}{a}\right)\exp(i\omega t). \quad (1)$$

图 1 给出了阵列光束的锁相合成示意图,种子激光分成 5 束后,前 4 束通过 4 个放大链路,再送进 4 个相邻的孔径,形成一定空间布局的阵列光束后再进行光束合成;最后 1 束通过移频器(AOM)后作为参考光束,采用外差法对前 4 束进行相位测量,并通过相位调制器(PM)对各个子束相位进行控制。

应的差异出现不同的像差,可分别用活塞像差和随机像差模拟。参照文献[11]中的 2 束光斑图,其近场光强分布近似为矩形平顶光束,其长 a ,宽 b ,子束间距 Δd 之间关系近似为 $a = 2b, \Delta d = b/5$ 。忽略热效应退偏等影响,阵列中 4 子束的近场光强分别为

$$\begin{aligned} E_{1(x_0, y_0, 0)} &= \text{rect}\left(\frac{x_0 - b/2 - \Delta d/2}{b}\right)\text{rect}\left(\frac{y_0 - a/2 - \Delta d/2}{a}\right)\exp[i(\omega t + \delta_1 + \varphi_1)], \\ E_{2(x_0, y_0, 0)} &= \text{rect}\left(\frac{x_0 + b/2 + \Delta d/2}{b}\right)\text{rect}\left(\frac{y_0 - a/2 - \Delta d/2}{a}\right)\exp[i(\omega t + \delta_2 + \varphi_2)], \\ E_{3(x_0, y_0, 0)} &= \text{rect}\left(\frac{x_0 + b/2 + \Delta d/2}{b}\right)\text{rect}\left(\frac{y_0 + a/2 + \Delta d/2}{a}\right)\exp[i(\omega t + \delta_3 + \varphi_3)], \\ E_{4(x_0, y_0, 0)} &= \text{rect}\left(\frac{x_0 - b/2 - \Delta d/2}{b}\right)\text{rect}\left(\frac{y_0 + a/2 + \Delta d/2}{a}\right)\exp[i(\omega t + \delta_4 + \varphi_4)], \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形函数^[14], $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$ 为子束的相位, $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ 为与空间分布相关的随机像差。根据波的叠加原理^[15],合成光束的远场光斑为图 1 所示焦点处 4 子束的复振幅合成。

2.2 相位探测及锁相闭环

设声光移频器的电信号为

$$E(t) = A\cos(\Delta\omega t), \quad (3)$$

式中 $\Delta\omega$ 为移频器频率。参考光束通过移频器后,扩束成为

$$\begin{aligned} E_{5(x_0, y_0, 0)} &= \text{rect}\left(\frac{x_0}{2b + \Delta d}\right)\text{rect}\left(\frac{y_0}{2a + \Delta d}\right) \times \\ &\exp\{i[(\omega + \Delta\omega)t + \delta_5]\}, \end{aligned} \quad (4)$$

式中 δ_5 为参考光束相位。

在 4 个光电探测器上参考光束 E_5 与 E_1, E_2, E_3, E_4 分别叠加, 其光波矢量分别为

$$E_{i5} = \text{rect}(x/b_1) \text{rect}(y/a_1) \{ \exp[i(\omega t + \delta_i + \varphi_i)] + \exp[i[(\omega + \Delta\omega)t + \delta_5]] \}, \quad (5)$$

式中 $i=1, \dots, 5, a_1, b_1$ 为光电探测器上的光斑尺寸。合成光强度为

$$I_{i5} = E_{i5} E_{i5}^* = 2I_0 + 2I_0 \cos(\Delta\omega t + \Delta\delta_i + \varphi_i), \quad (6)$$

式中 I_0 为常数项, $*$ 为卷积, $\Delta\delta_{i5} = \delta_i - \delta_5$ 反映了参考光与子束 i 的相位差。(6) 式中第二项为外差法得到的拍频信号, 是光电探测器的输出信号。

拍频信号与声光移频器的电信号一同输入到相位解调器中, 核心器件为一个异或门(XOR)电路和一个积分器, 如图 2 所示。得到与 $\Delta\delta_{i5}$ 成正比的电压信号 V_{out} ; 该电压信号经过一定的线性变换后去驱动各子束光路上的相位调制器, 使各子束与参考光

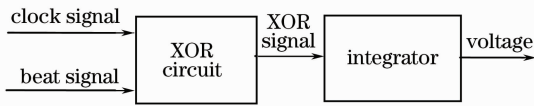


图 2 相位解调器结构

Fig. 2 Phase-sensing electronics unit

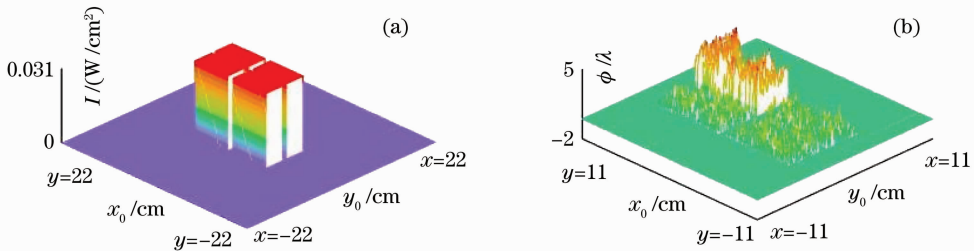


图 3 近场光强分布。(a) 光强分布; (b) 相位分布

Fig. 3 Near-field intensity. (a) intensity; (b) phase

3.1 锁相开环

图 4 给出了不同相位差 $\Delta\delta_{i5}$ 下, 相位解调电路得到的结果。将外差法探测得到的拍频信号 [图 4(a), (c) 中的波形 2] 和移频器电信号 [图 4(a), (c) 中的波形 1] 都整形为相应的测试脉冲和时钟脉冲, 如图 4(b), (d) 波形 1 和波形 2 所示; 再对两者做异或处理, 得到图 4 中的脉冲波形 3 (即 XOR 脉冲); 将 XOR 脉冲进行低通滤波, 并在一个周期内积分后得到输出电压信号 V_{out} 。计算可得当 $\Delta\delta_{i5} = \pi/2$ 时, $V_{\text{out}} = 7.85398 \text{ V}$; 当 $\Delta\delta_{i5} = \pi$ 时, $V_{\text{out}} = 15.708 \text{ V}$ 。可以看到, $\Delta\delta_{i5}$ 与 V_{out} 成正比。

在锁相开环下, 信号 V_{out} 不去控制子束的相位调制器。子束 1 相位 $\delta_1 = \pi/2$ 时, 对应于子束 1 的活塞像

束的相位一致, 从而实现子束间的相位一致, 达到锁相目的。

3 光束合束模拟计算

在光束合成中, 对各子束进行能量归一化, 假设其偏振态一致。计算中取子束大小为 $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$, 子束间距 $\Delta d = 0.8 \text{ cm}$ 。模拟得到理想情况下, 合成光束远场光斑的峰值功率密度为 $I_0 = 4.56 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 。考虑到各链路材料、装调、热效应的差异, 在各子束上叠加一定随机像差 φ_i , 采用 Rms 像差形式。假设其系数大小相同, 都为 $\varphi_0 = 0.125 \lambda$, 像差的自相干长度为 $\sigma_x = \sigma_y = 1 \text{ mm}$, 此时合成光束远场光斑形状基本不变, 但峰值功率密度下降为 $I_1 = 2.46 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$, 计算得到随机像差引起的功率密度下降因数 $\eta_1 = I_1/I_0 = 53.9474\%$ 。它与 Strehl 比公式^[16]得到的斯特列尔比 $R_s = \exp(-k^2 \times \varphi_0^2) = 0.539641$ 基本一致, 式中传播常数 $k = \lambda/(2\pi)$ 。

取声光移频器的频率为 40 MHz , 子束相位 $\delta_2 = \delta_3 = \delta_4 = \delta_5 = 0, \delta_1$ 由 0 变化到 π , 所以 $\Delta\delta_{i5} \neq 0$ 。建立 4 光束阵列的振幅分布如图 3(a) 所示, 其波前相位分布 ϕ 如图 3(b) 所示, 图中波前相位 ϕ 包括了各子束相位 δ_i 和随机像差 φ_i 。

差为 $\lambda/4$, 其合成光束远场分布如图 5(a) 所示, 合成光束远场光斑的峰值功率密度为 $I_2 = 1.74 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 。图 5(b) 给出了 $\delta_1 = \pi$ 时合成光束的远场分布, 此时远场光斑的峰值功率密度为 $I_3 = 9.6 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 。计算得到子束间相位差引起的功率密度下降因数 $\eta_2 = I_2/I_1 = 70.7\%, \eta_3 = I_3/I_1 = 39\%$ 。另外可以看到, 随着 δ_1 由 0 到 π 间的增大, 远场光斑由一个椭圆形小光斑, 逐渐变成大散斑。可见单个子束的相位差达到 π 时的影响, 已大于各子束 0.125λ 的随机像差。热效应导致的随机像差不会随意增大, 而各个子束间的相位差, 却会因光路的微小振动而随时间变化, 而且差值很容易达到 π 。为了获得最佳的合成光束远场峰值功率密度, 子束间的相位锁定非常必要。

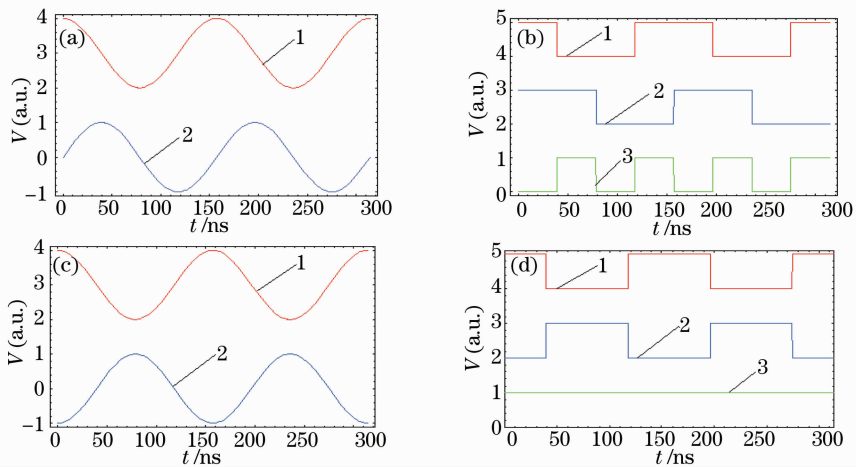


图 4 $\Delta\delta_{15} = \pi/2$ 和 π 时信号的解调过程。(a),(c)拍频信号和移频器电信号;(b),(d)拍频信号解调结果
 Fig. 4 Waveforms of heterodyne phase measurement at $\Delta\delta_{15} = \pi/2$ and π . (a),(c) beat signal and frequency shifted signal; (b),(d) signals of test, clock and their XOR

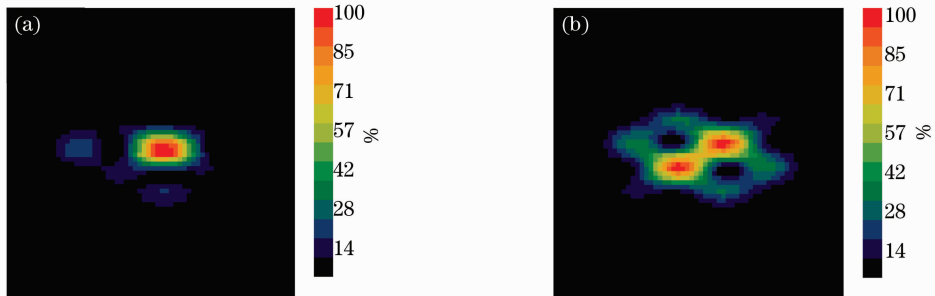


图 5 不同相位差下远场光斑的平面图。(a) $\delta_{15} = \pi/2$; (b) $\delta_{15} = \pi$
 Fig. 5 Far-field intensity of two beamlets. (a) $\delta_{15} = \pi/2$; (b) $\delta_{15} = \pi$

3.2 锁相闭环

根据图 2,3 的方法,图 6(a)给出了相位差 $\Delta\delta_{15}$ 在 $0 \sim 2\pi$ 间变化时,拍频信号解调电压的变化情况。可以看到, $\Delta\delta_{15} < \pi$ 后,曲线基本上呈单调上升; $\Delta\delta_{15} > \pi$ 后,曲线呈单调下降。拟合得到

$$V_{\text{out}} = \begin{cases} 5.0001 \times \Delta\delta_{15}, & \Delta\delta_{15} \leq \pi/2 \\ -5.0001 \times \Delta\delta_{15} + 31.416, & \Delta\delta_{15} \geq \pi/2 \end{cases} \quad (7)$$

为了实现锁相控制,拍频信号解调电压与相位

差 $\Delta\delta_{15}$ 必须为一一对应,因此对测试脉冲和时钟脉冲进行二分频,再进行拍频信号解调,这样可以得到拍频信号解调电压随相位差 $\Delta\delta_{15}$ 单调线性的变化情况,如图 6(b)所示。拟合得到

$$V_{\text{out}} = 2.5001 \times \Delta\delta_{15}. \quad (8)$$

图 7 给出了对图 4(b),(d)中的测试脉冲和时钟脉冲二分频后的拍频信号解调过程,得到了一个周期内积分的输出电压幅值。当 $\Delta\delta_{15} = \pi/2$ 时, $V_{\text{out}} = 3.92699 \text{ V}$; 当 $\Delta\delta_{15} = \pi$ 时, $V_{\text{out}} = 7.85398 \text{ V}$ 。

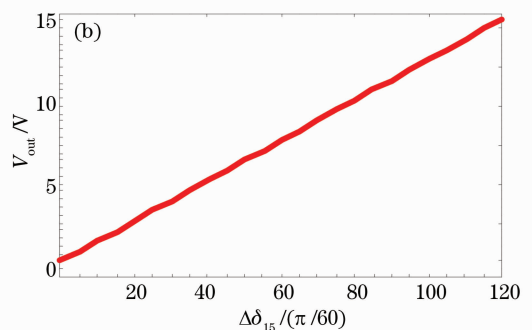
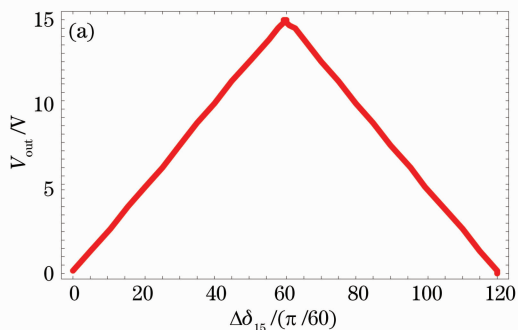


图 6 拍频信号解调电压随相位差 $\Delta\delta_{15}$ 变化的关系
 Fig. 6 Voltage of XOR signal versus phase difference $\Delta\delta_{15}$

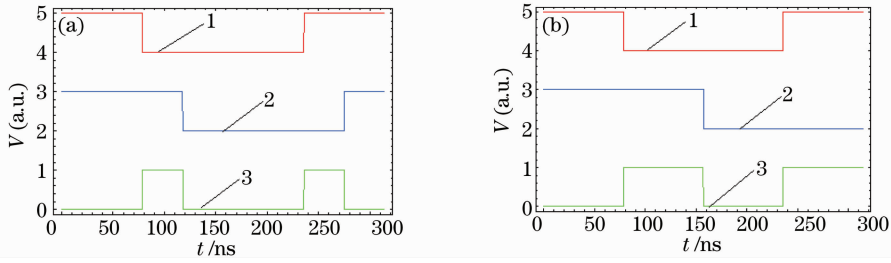


图7 在二频下拍频信号的解调过程。(a) $\Delta\delta_{15} = \pi/2$; (b) $\Delta\delta_{15} = \pi$

Fig. 7 Heterodyne phase measurement at: (a) $\Delta\delta_{15} = \pi/2$; (b) $\Delta\delta_{15} = \pi$

对比图4,7可知,二频后电压信号降低为原来的1/2,导致信噪比下降。

闭环工作时,将此电压信号 V_{out} 经线性变换后成为补偿电压,控制子束1上的相位调制器,实现相位差 $\Delta\delta_{15} = 0$ 。控制过程如下:相位检测电路实时检测出的开环下电压信号如图6(b)所示,通过(8)式变换为图8(a)所示的相位调制器上实时变化的补

偿相位 δ_c , 叠加在子束1上;此时子束1与参考光束再产生拍频信号,通过相位解调得到锁相闭环控制下的电压残差信号为图8(b)所示。理想情况下,锁相闭环后的相位残差为0,对应的电压残差信号也为0。此时无论 δ_1 如何变化,远场光束强度分布都将由图5给出的杂乱大散斑,变成一个椭圆形小光斑,如图8(c)所示。

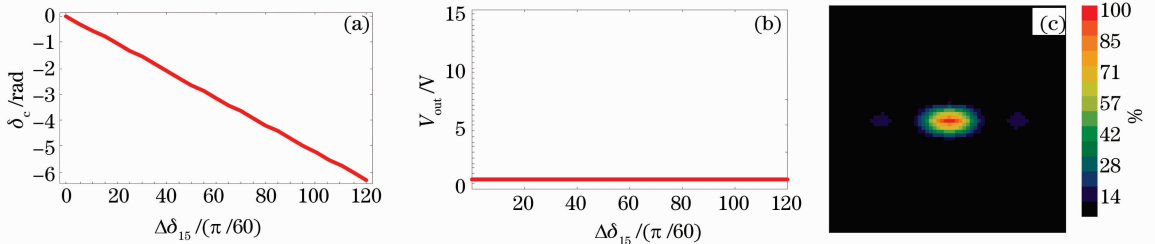


图8 闭环工作下补偿相位(a)、电压残差(b)和远场光斑(c)随相位差 $\Delta\delta_{15}$ 的变化

Fig. 8 Compensated phase(a), voltage of XOR signal (b) and far-field spot (c) change with phase difference $\Delta\delta_{15}$ at lock-loop closing

如果多路子束存在不同相位,每一束都和参考光束相比较,就可以将各子束相位都与参考光束相同,实现阵列光束锁相闭环,从而达到光束的相干合成。

3.3 闭环影响因素

在实验中很难实现不同子束相位的完全一致。激光放大器中的相位噪声、采集单元中电信号的转换存储精度,都会使拍频信号解调过程中 XOR 脉冲产生畸变,尤其在 $\Delta\delta_{15}$ 较小时,甚至出现 XOR 脉冲的缺失,如图9(a)所示。这些因素会导致解调电

压 V_{out} 随相位差 $\Delta\delta_{15}$ 的变化直线上出现跃变点,如图9(b)所示。当锁相闭环时,在跃变点附近将产生一定的锁相闭环后的相位残差,如图9(c)所示,导致控制不稳定,并影响远场光束质量。当闭环相位残差为0.4 rad时,模拟得到合成光束远场光斑形状与图8(c)基本一致,但峰值功率密度下降为 $I_4 = 2.38 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$, 计算得到闭环相位残差引起的功率密度下降因数 $\eta_1 = I_3/I_1 = 96.7\%$ 。

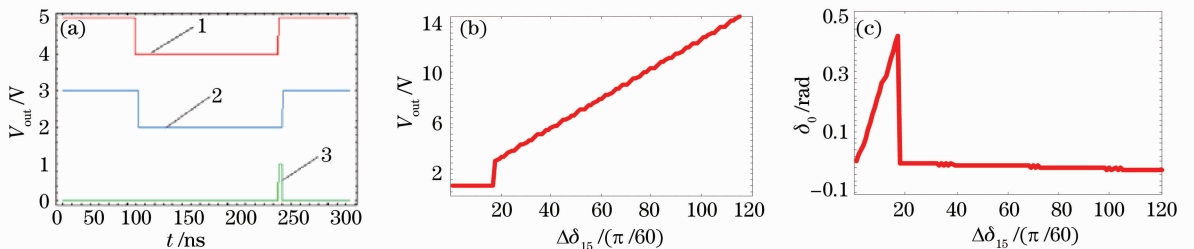


图9 (a)拍频信号解调失真;(b)拍频信号解调电压随相位差 $\Delta\delta_{15}$ 的变化;(c)闭环相位残差

Fig. 9 (a) Error of XOR waveform; (b) voltage of XOR signal versus phase difference $\Delta\delta_{15}$; (c) phase error versus phase difference $\Delta\delta_{15}$ under lock-loop closing

目前较为有效的方法是选择图 9(b)中的线性段进行光束合成的锁相闭环,即将光束阵列中各子束的相位与参考束 5 的相位锁定在某一设定的静态工作点上,如 $\delta_{15} = \delta_{25} = \delta_{35} = \delta_{45} = \pi$ 。

4 结 论

分析了 4 束矩形光斑的相干合成技术,并通过数值模拟,采用外差法模拟了子束锁相闭环过程,以及在锁相开环、闭环下,子束间相位差对合成光束远场光斑的影响,分析了实验中锁相闭环后的相位残差的产生原因。可以看到单个子束的相位差达到 π 时的影响,就大于各子束 0.125λ 的随机像差。在光束阵列中,4 路子束在不同的放大链路中传输,因光程不同而总是存在相互间相位差,并由于光路振动而随时间变化。为了获得最佳的合成光束远场峰值功率,必须进行各子束的锁相控制。

建立的阵列光束在锁相闭环下光束合成的综合理论模型,有助于分析高功率固体激光器系统中各种影响因素。

致谢 感谢赵娜为本文提供了参考文献。

参 考 文 献

- 1 Qi Yu. Northrop Grumman corporation and its high power solid state laser[J]. *High Energy Laser Research & Development*, 2009, **124**(1): 1~17
齐 予. 诺·格公司及其研制的高功率固体激光器 [J]. *强激光研究与发展*, 2009, **124**(1): 1~17
- 2 Qi Yu. The important progress of joint high power solid state laser program at Northrop Grumman during phase 3[J]. *High Energy Laser Research & Development*, 2008, **120**(1): 83~85
齐 予. 诺·格公司第三阶段联合高功率固体激光器计划取得重要进展[J]. *强激光研究与发展*, 2008, **120**(1): 83~85
- 3 Li Jianfeng, Duan Kailiang, Wang Jianming *et al.*. Experiment of coherence-locking of two photonic crystal fiber lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 923~926
李剑峰, 段开棕, 王建明 等. 两光子晶体光纤激光器相干锁定的实验研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 923~926
- 4 Jesse Anderegg, Stephen Brosnan, Mark Weber *et al.*. 8-watt coherently phased 4-element fiber array [C]. *SPIE*, 2003, **4974**: 1~6
- 5 Hou Jing, Xiao Rui, Jiang Zongfu *et al.*. Coherent beam combining of three ytterbium fiber amplifiers[J]. *High Power*

- Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(10): 1585~1588
侯 静, 肖 瑞, 姜宗福 等. 三路掺镱光纤放大器的相干合成实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(10): 1585~1588
- 6 Cao Jianqiu, Lu Qisheng, Hou Jing *et al.*. Influence of combining errors in the system for coherent combining of fiber lasers on the far field of output[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 351~358
曹涧秋, 陆启生, 侯 静 等. 光纤激光器相干合成系统中组束误差对远场光场的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 351~358
- 7 Sun Ling, Zhao Hong, Yang Wenshi *et al.*. Study on coherent combination theory of multi-beam laser[J]. *Laser and Infrared*, 2007, **37**(2): 111~113
孙 玲, 赵 鸿, 杨文是 等. 多光束激光相干合成技术研究[J]. *激光与红外*, 2007, **37**(2): 111~113
- 8 Zhao Na, Tang Chun, Xie Gang *et al.*. Numerical simulation on coherent combination of multi-beam super-Gaussian laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(11): 1779~1782
赵 娜, 唐 淳, 谢 刚 等. 多束超高斯激光相干合成的数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(11): 1779~1782
- 9 Dong Hongcheng, Tao Chunxian, Zhao Yuan'an *et al.*. Combination of characteristics analysis of Gaussian beams[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(2): 171~176
董洪成, 陶春先, 赵元安 等. 高斯光束合成特性分析[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(2): 171~176
- 10 Zhou Pu, Liu Zejin, Xu Xiaojun *et al.*. Feasibility analysis and effect evaluation of partially coherent combining of high power fiber lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 730~733
周 朴, 刘泽金, 许晓军 等. 高功率光纤激光部分相干合成的可行性及效果分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 730~733
- 11 G. D. Goodno, H. Komine, S. J. McNaught *et al.*. Coherent combination of high-power zigzag slab lasers[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(9): 1247~1249
- 12 Zhao Na, Tang Chun, Hu Hao *et al.*. Numerical simulation on coherent combination of multi-beam super-Gaussian laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(s2): 184~186
赵 娜, 唐 淳, 胡 浩 等. 激光自由空间的位相探测方法研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(s2): 184~186
- 13 Wang Mingzhuo, Lü Baida. Fraunhofer and Fresnel diffraction at two asymmetrical rectangular aperture[J]. *Laser Technology*, 2004, **28**(3): 330~332, 336
王明灼, 吕百达. 非对称方孔的夫琅禾费和非涅耳衍射[J]. *激光技术*, 2004, **28**(3): 330~332, 336
- 14 Su Xianyu, Li Jitao. Information Optics[M]. Beijing: Science Press, 1999. 1~2
苏先渝, 李继陶. *信息光学*[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 1~2
- 15 Lü Baida. Propagation and Quality Control of High Power Laser [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999. 33~34
吕百达. *强激光的传输与控制*[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. 33~34
- 16 Su Yi, Wan Min. High Energy Laser System [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004. 47~59
苏 毅, 万 敏. *高能激光系统*[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004. 47~59