

文章编号: 0258-7025(2010)05-1265-04

# 单链路光束波前畸变对相干合成系统相位控制的影响

周 朴 马浩统 马阎星 王小林 许晓军 刘泽金

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 长沙 410073)

**摘要** 利用相位型空间光调制器产生可控波前畸变,对单链路光束波前畸变对相干合成系统相位控制的影响进行了实验研究。结果表明,当波前畸变均方根(RMS)较小(小于 $\pi/10$ )时,相位控制系统性能基本不受波前畸变的影响。随着波前畸变均方根值的增大,远场条纹逐渐发生不同程度的漂移,相位控制系统不再能够完全锁定各光束的相位,存在一定的相位控制残差。当波前畸变均方根值大于等于 $\pi$ 时,相位基本不能被锁定,相位控制系统失效。实验结果对相位控制系统的影响对相干合成高能激光系统的工程实践具有参考价值。

**关键词** 相干合成;光束质量;波前畸变;相位锁定;空间光调制器

中图分类号 TN248 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103705.1265

## Influence of Wavefront Distortion in Single Laser Channel on Phase Control in Coherent Beam Combination System

Zhou Pu Ma Haotong Ma Yanxing Wang Xiaolin Xu Xiaojun Liu Zejin

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** Phase-only spatial light modulators are employed to generate controllable wavefront distortion, which is incorporated into a coherent beam combining system to investigate the influence of wavefront distortion in single laser channel on phase control system. Experimental results show that the phase control system is almost not affected in the case of wavefront distortion with small root mean square (RMS) value (i. e.,  $\text{RMS} < \pi/10$ ). As an increase in the wavefront distortion, the optical phase cannot be totally controlled, residual phase error goes with excursion in the interference patterns exists in the system. When the RMS value of the wavefront distortion is as large as  $\pi$ , the phase control system is in invalidation state and the beamlets cannot be phase locked. Our experimental results present reference for designing and manufacturing high energy laser system based on coherent beam combining.

**Key words** coherent beam combining; beam quality; wavefront distortion; phase locking; spatial light modulator

### 1 引 言

对多路激光进行相干合成是获得高亮度激光输出的有效途径<sup>[1~13]</sup>。美国诺格公司通过相干合成 7 路 15 kW 级固体激光模块获得了总功率超过 105 kW 的高功率激光输出,这也是迄今为止固体激光获得的最高输出功率<sup>[8]</sup>。在诺格公司的相干合成项目研制报告中不难发现,合成光束的质量随着参与合成激光数目和输出功率的增加而退化<sup>[8~12]</sup>,其中热效应、激光介质本身特性等结构因素的限制引

起的单链路激光波前畸变导致的光束质量下降是合成光束质量退化的重要因素之一,单链路激光波前畸变甚至可能会导致相位控制系统失效。因此,研究单链路激光波前畸变对相位控制系统的影响对相干合成高能激光系统的工程实践具有重要参考价值。与此同时,空间光调制器由于具有非机械结构、较低的功率消耗、高分辨率和可编程控制等优点,在畸变波前的产生与补偿等自适应光学领域得到了广泛的应用<sup>[14,15]</sup>。本文在两路光纤激光相干合成

收稿日期: 2009-07-15; 收到修改稿日期: 2009-10-02

基金项目: 国防科技大学研究生创新基金(B070701)资助课题。

作者简介: 周 朴(1984—),男,博士研究生,主要从事光纤激光器及光束合成等方面的研究。

E-mail: jnck621@163.com

导师简介: 刘泽金(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事高能激光技术方面的研究。E-mail: zejinliu@vip.sina.com

实验系统中引入相位型空间光调制器,用于模拟不同程度的波前畸变,分析了单链路光束波前畸变对相干合成系统相位控制的影响。

## 2 实验装置

实验系统如图 1 所示,主振荡激光器(MO)发出的光束通过分束器(splitter)后被分为 2 路,每路各含有一个 LiNbO<sub>3</sub> 相位调制器(PM),起到相位控制的作用。各光束经过准直器(CO)后形成阵列光束输出至自由空间。阵列光束经两块液晶空间光调制器(SLM)反射后波前受到调制发生畸变,调制信号由计算机(computer)通过控制电路(control circuit)施加。经过 SLM 后,阵列光束被分光镜(splitter)分成两部分,一部分光束经透镜(lens)聚焦,光电探测器放置于透镜的后焦平面上,紧贴于探测器前端放置小孔光阑,光阑半径小于或等于理想

相干合成情形下合成光束的主瓣宽度,多重抖动相位控制系统(phase control circuit)<sup>[15,16]</sup>从探测器探测到的信号中解调出相位控制信号并施加给 LiNbO<sub>3</sub> 相位调制器;阵列光束经过分光镜的另一部分光束由透镜聚焦,红外相机(camera)放置在透镜的后焦平面上观察远场图样及相干合成的效果。实验中激光器为 KEOSPSYS 公司的 DFB 单频光纤激光器,中心波长为 1083 nm,线宽小于 1 MHz,SLM 为 Boulder Nonlinear Systems(BNS)公司的 256 pixel×256 pixel 高速反射式液晶空间光调制器,刷新速率超过 500 Hz。调制器输出光斑直径为 3.5 mm,SLM 的靶面大小为 6.14 mm×6.14 mm,能够对整个光斑的波前进行调制。系统相位控制由多重抖动法实现<sup>[16,17]</sup>,其中调制信号为 80 kHz,幅度为 100 mV,积分时间为 30 μs。

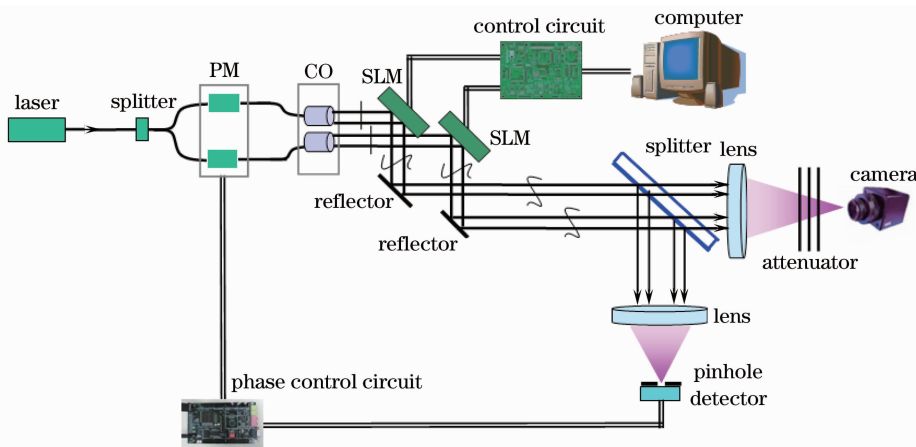


图 1 两路波前畸变的光纤激光相干合成系统结构

Fig. 1 System setup for coherent beam combining of two fiber lasers with distorted wavefront

## 3 实验与结果分析

采用功率谱反演法产生不同程度的波前畸变数据,波前畸变  $\varphi$  的产生方法为<sup>[18~20]</sup>

$$\varphi(m'\Delta x, n'\Delta y) = \sum_{m=0}^{N_x-1} \sum_{n=0}^{N_y-1} [a(m, n) + ib(m, n)] \exp[i2\pi(m'm/N_x + n'n/N_y)]. \quad (1)$$

式中  $\Delta x, \Delta y$  分别为  $x$  及  $y$  方向的网格间距,通常  $\Delta x = \Delta y$ ;  $N_x, N_y$  分别为  $x$  及  $y$  方向的网格采样点数,则  $L_x = N_x \Delta x$  及  $L_y = N_y \Delta y$  即为相位屏尺寸;  $a(m, n)$  及  $b(m, n)$  为服从高斯分布的随机数,其均值为零。波前畸变数据通过计算机施加在空间光调制器上,从而引入两路波前畸变程度可控的光束。在实验中,对于均方根(RMS)为某一特定值(如

$\pi/4$ )的波前畸变,利用功率谱反演法产生 100 组数据,并设置空间光调制器以 50 Hz 的速率更新。图 2 给出了部分波前畸变数据(单位为 rad)。

当波前畸变均方根较小(RMS 小于  $\pi/10$ )时,相位控制系统性能基本不受波前畸变的影响,远场条纹稳定不变,红外相机探测的两束合成光束远场长曝光图样为高对比度的同相模式条纹,如图 3(a)所示,两束激光的相位得到很好的锁定。随着波前畸变均方根值的增大,远场条纹逐渐发生不同程度的漂移,对应的相位控制系统不再能够完全锁定两路光束之间的相位,存在一定的相位控制残差。当波前均方根值为  $\pi$  时,相位基本不能被锁定,远场为动态快速变化的模糊光斑。波前畸变均方根值为  $\pi/3, 2\pi/3$  和  $\pi$  时对应的长曝光图样如图 3(b)~(d)所示。

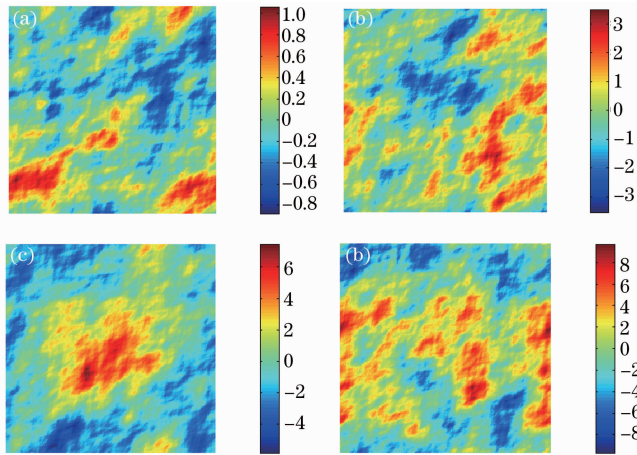


图 2 功率谱反演法生成的部分波前数据。(a) RMS:  $\pi/10$ ; (b) RMS:  $\pi/3$ ; (c) RMS:  $2\pi/3$ ; (d) RMS:  $\pi$   
 Fig. 2 Phase distortion data generated by power spectrum method. (a) RMS:  $\pi/10$ ; (b) RMS:  $\pi/3$ ;  
 (c) RMS:  $2\pi/3$ ; (d) RMS:  $\pi$

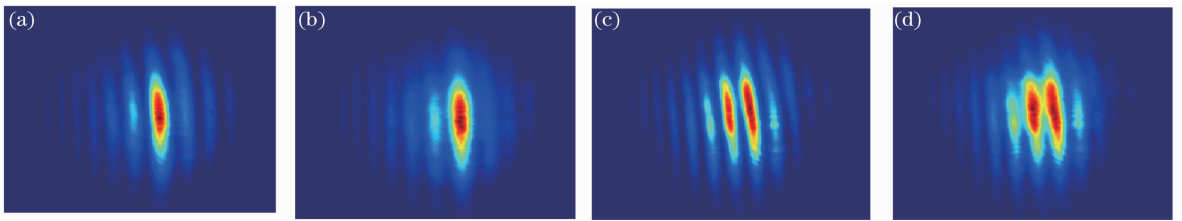


图 3 不同畸变程度情形下合成光束的远场长曝光条纹。(a) RMS:  $\pi/10$ ; (b) RMS:  $\pi/3$ ; (c) RMS:  $2\pi/3$ ; (d) RMS:  $\pi$   
 Fig. 3 Long-exposure pattern of combined beam under different distortions. (a) RMS:  $\pi/10$ ; (b) RMS:  $\pi/3$ ;  
 (c) RMS:  $2\pi/3$ ; (d) RMS:  $\pi$

为了便于直观分析相位畸变程度对相位控制系统的影响,对不同畸变程度情形下多幅长曝光图样中光强极大值所处的位置进行了统计,统计直方图如图 4 所示。由图可见,当波前畸变均方根较小(RMS 小于  $\pi/10$ )时,光强极大值稳定在特定位置;

随着波前畸变程度的增加,光强极大值的位置发生漂移的概率也逐渐增大;当均方根值小于  $2\pi/3$  时,光强极大值的位置在大部分时间内仍能被有效控制,当波前均方根值为  $\pi$  时,光强极大值的位置已经完全无法控制,对应的相位控制系统失效。

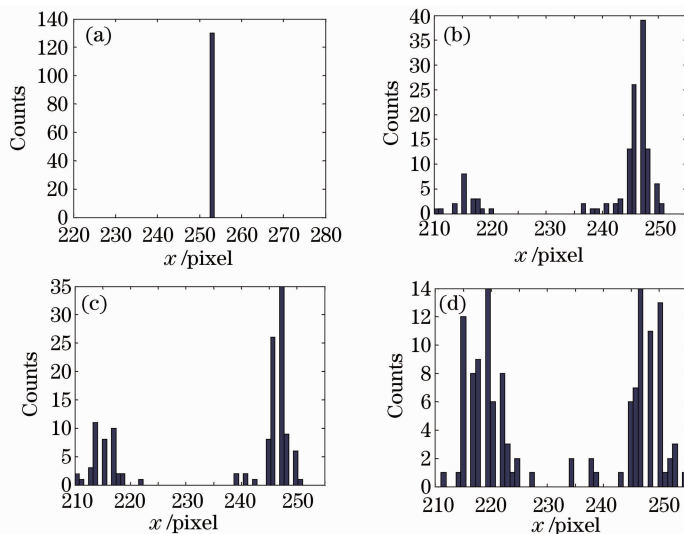


图 4 不同波前畸变情形下峰值光强所处位置的统计分布。(a) RMS:  $\pi/10$ ; (b) RMS:  $\pi/3$ ; (c) RMS:  $2\pi/3$ ; (d) RMS:  $\pi$   
 Fig. 4 Statistical distribution of the position of the peak intensity. (a) RMS:  $\pi/10$ ; (b) RMS:  $\pi/3$ ; (c) RMS:  $2\pi/3$ ; (d) RMS:  $\pi$

## 4 结 论

在两路光纤激光相干合成实验系统中引入相位型空间光调制器,分析单链路光束波前畸变对相干合成系统相位控制的影响。实验结果表明,当波前畸变均方根较小(RMS 小于  $\pi/10$ )时,相位控制系统性能基本不受波前畸变的影响,随着波前畸变均方根值的增大,远场条纹逐渐发生不同程度的漂移,相位控制系统不再能够完全锁定两路光束之间的相位,存在一定的相位控制残差。当波前均方根值大于  $\pi$  时,相位控制系统基本失效。因此,在相干合成激光系统设计过程中,有必要采用高性能的光束净化系统补偿单链路光束波前畸变,保证波前畸变残差被控制在一定范围,使得相位控制系统能够有效控制各路光束激光的相位,获得相位锁定的高亮度阵列光束输出。另外,本文实验是在入射激光功率较低的情况下实现的,提高空间光调制器对于高功率激光辐照的承受阈值以及如何产生更加切合实际高功率激光波前畸变统计特性的畸变数据是接下来实验拓展到高功率情形下验证的关键。

## 参 考 文 献

- 1 T. Y. Fan. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2005, **11**(3): 567~577
- 2 J. Anderegg, S. Brosnan, E. Cheung *et al.*. Coherently coupled high power fiber arrays[C]. *SPIE*, 2006, **6102**: 61020U
- 3 Li Jianfeng, Duan Kailiang, Wang Jianming *et al.*. Experiment on coherent-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 Cheng Yong, Liu Yang, Xu Lixin *et al.*. Mutual-injection phase-locking fiber laser with corner-cube cavity[J]. *Chinese J. Lasers*, **36**(1): 77~81  
程勇,刘洋,许立新等. 角锥腔互注入锁相光纤激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 77~81
- 5 Qihong Lou, Jun Zhou, Bing He *et al.*. Fiber lasers and their coherent beam combination [J]. *Opt. Photon. News*, 2008, **19**(5): 46~51
- 6 Zhou Pu, Liu Zejin, Ma Yanxing *et al.*. Simulation and experimental investigation on coherent beam combining of two fiber amplifiers based on stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 431~436  
周朴,刘泽金,马阎星等. 随机并行梯度下降算法模拟两路光纤放大器相干合成与实验研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 431~436
- 7 Zhou Pu, Ma Yanxing, Wang Xiaolin *et al.*. Coherent beam combination based on active phase controlling at the high-power output port[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2503~2505  
周朴,马阎星,王小林等. 基于高功率激光输出端相位控制的光纤激光相干合成[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2503~2505
- 8 Northrop Grumman Space Technology, El Segundo, CA. [http://www.irconnect.com/noc/press/pages/news\\_releases.html?d=161575](http://www.irconnect.com/noc/press/pages/news_releases.html?d=161575)
- 9 Northrop Grumman Space Technology, El Segundo, CA. [http://www.irconnect.com/noc/press/pages/news\\_releases.mhtml?d=107455](http://www.irconnect.com/noc/press/pages/news_releases.mhtml?d=107455)
- 10 G. D. Goodno, C. P. Asman, J. Anderegg *et al.*. Brightness-scaling potential of actively phase-locked solid-state laser arrays [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum. Electron.*, 2007, **13**(3): 460~472
- 11 Northrop Grumman Space Technology, El Segundo, CA. [http://www.irconnect.com/noc/press/pages/news\\_releases.html?d=149444](http://www.irconnect.com/noc/press/pages/news_releases.html?d=149444)
- 12 J. Marmo, H. Injeyan, H. Komine *et al.*. Joint high power solid state laser program advancements northrop grumman[C]. *SPIE*, 2009, **7195**: 719507
- 13 Li Jinmin. Development, trend and application of high average power diode pumped lasers [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(7): 16~29  
李晋闽. 高平均功率全固态激光器发展现状、趋势与应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(7): 16~29
- 14 S. Serati, J. Stockley. Advances in liquid crystal based devices for wavefront control and beam steering [C]. *SPIE*, 2005, **5894**: 58940K
- 15 J. D. Phillips, M. E. Goda, J. Schmidt. Atmospheric turbulence simulation using liquid crystal spatial light modulators [C]. *SPIE*, 2005, **5894**: 589406
- 16 Y. X. Ma, Si Lei, Wang Xiaolin *et al.*. Coherent beam combination of two fiber amplifiers with multi-dithering technique [J]. *Optoelectronics Letters*, 2009, **1**(5): 0018~0020
- 17 Y. X. Ma, Z. J. Liu, P. Zhou *et al.*. Coherent beam combination of three fiber amplifiers with multi-dithering technique[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, **26**(4): 044204
- 18 Zhang Huimin, Li Xinyang. Numerical simulation of wavefront phase screen distorted by atmospheric turbulence [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(1): 14~19  
张慧敏,李新阳,大气湍流畸变相位屏的数值模拟方法研究[J]. *光电工程*, 2006, **33**(1): 14~19
- 19 H. Yan. Numerical simulation of an adaptive optics system with laser propagation in the atmosphere [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**: 3023~3031
- 20 J. Fleck, J. Morris. Time-dependent propagation of high energy laser beams through the atmosphere[J]. *Appl. Phys.*, 1976, **10**: 129~160