

文章编号: 0258-7025(2010)02-0424-04

# 基于能动分块反射镜的激光相干合成实验研究

杨若夫<sup>1,2</sup> 杨平<sup>1</sup> 沈峰<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院光电技术研究所自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209; <sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要** 研究自适应光学元件——能动分块反射镜在激光相干合成中对光束平移相位差的校正性能。实验采用信号发生器产生正弦电压经过放大后在分块反射镜上产生平移扰动, 通过高速 CCD 探测远场具有平移扰动的光斑, 利用高速数字电路对 CCD 数据进行实时处理输出闭环反馈电压用于校正平移扰动。实验针对不同频率的扰动信号进行了闭环控制。结果表明, 系统可以对频率为 50 Hz 以下并且振幅大于一个波长的平移相位差扰动进行有效的补偿, 在 50 Hz 扰动下, 系统合成效率可达 75%。

**关键词** 相干光学; 相干合成; 平移相位差; 自适应光学元件; 能动分块反射镜

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103702.0424

## Experimental Investigation of Laser Coherent Combining Based on Active Segmented Mirror

Yang Ruofu<sup>1,2</sup> Yang Ping<sup>1</sup> Shen Feng<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Laboratory on Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China*  
<sup>2</sup> *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

**Abstract** The correcting performance on piston aberration of beams with adaptive optics-active segmented mirror in laser coherent combining is studied. The piston aberration is introduced by active segmented mirror driven by high voltage which is produced by signal generator and amplified by high voltage amplifier. The far-field pattern with piston aberration is detected by high-speed CCD and the CCD data is processed by digital circuit to produce the close-loop voltage for correcting the introduced piston perturbation in real-time. This experiment performs close-loop correction in different piston perturbation. The experimental results show that the piston perturbation frequency of 50 Hz is efficiently controlled. System also can compensate the piston aberration above one wavelength and combining efficiency reaches 75%.

**Key words** coherence optics; coherent combining; piston aberration; adaptive optics; active segmented mirror

## 1 引 言

激光相干合成是当前国内外研究的热点课题, 由于非线性与热效应等因素的限制, 单根光纤功率的提高是非常困难的, 并且随着光功率的提高, 光束质量变差, 远场能量集中度下降。国内外很多学者提出了许多方法进行光纤激光束相干合成的研

究<sup>[1]</sup>, 在提高激光功率的同时, 保持激光束好的光束质量。比如采用光纤耦合器自组织效应来进行光束之间的自相位调制<sup>[2~4]</sup>、外差探测铌酸锂(LiNbO<sub>3</sub>)校正的主振荡并联放大(MOPA)实现光束锁相<sup>[5]</sup>、调相阵列结构实现光束锁相(PAPA)<sup>[6]</sup>、外差探测控制与自适应技术相结合<sup>[7,8]</sup>等方案进行相干

收稿日期: 2009-04-08; 收到修改稿日期: 2009-07-06

基金项目: 国防预研基金(A06K024)资助课题。

作者简介: 杨若夫(1980—), 男, 博士研究生, 主要从事自适应光学激光相干合成方面的研究。

E-mail: yang\_ruofu@163.com

导师简介: 沈峰(1969—), 男, 研究员, 主要从事自适应光学技术以及微光波前探测技术等研究工作。

E-mail: shenfeng@ioe.ac.cn

合成。

本实验主要研究采用自适应光学元件——能动分块反射镜对动态变化的光束平移相位差的校正情况。首先模拟在两束相干波前之间有平移相位差下的远场衍射图,并根据衍射图提出了一种改进的峰值比算法来提取具有平移相位差的光斑特征。实验利用信号发生器产生正弦信号从加法器的一个端口输出给能动分块反射镜从而产生不同频率的平移扰动,采用高速 CCD 数字相机采集远场光斑并用针对此系统设计的高速数字电路来处理采集到的图像,输出的校正信号通过加法器的另一个端口输出给能动分块反射镜进行实时的闭环校正。

## 2 光束间具有平移相位差的提取方法

多相干光束的远场衍射是夫朗和费衍射,其远场衍射场分布表达式为

$$\tilde{E}(x, y) = \frac{c}{f} \exp\left[ik\left(f + \frac{x^2 + y^2}{2f}\right)\right] \iint_{\Sigma} \tilde{E}(x_1, y_1) \times \exp\left[-i2\pi\left(\frac{x}{\lambda f}x_1 + \frac{y}{\lambda f}y_1\right)\right] dx_1 dy_1, \quad (1)$$

其中  $\lambda$  为波长,  $\Sigma$  为孔径范围,  $c = \frac{1}{i\lambda}$ ,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $f$  为焦距;  $\tilde{E}(x_1, y_1)$  为  $x_1 y_1$  平面上入射光波的复振幅,  $\tilde{E}(x, y)$  为衍射屏上的光波复振幅。其远场衍射光斑的光强分布为

$$I(x, y) = |\tilde{E}(x, y)|^2. \quad (2)$$

由(1)式可以看出除去积分前面的相位因子,衍射屏上的光波复振幅为入射光波在平面上的复振幅的二维傅里叶变换。对于多个光束的相干衍射,其波前复振幅分布  $\tilde{E}(x_1, y_1)$  是分段函数的形式。

对于两束具有平移相位差平面光波的衍射图,可以从衍射图的光强分布特征来进行特征提取。图 1 是通过计算机仿真得到的两路相干准直光束在平移相位差分别为  $0, \pi/2, \pi$  和  $3\pi/2$  时的远场一维光强分

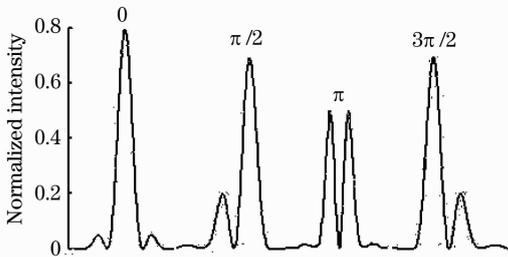


图 1 两路圆形光束的远场一维衍射分布图

Fig. 1 1D diffraction distribution curves of far-field for two circular beams

布,纵坐标是归一化峰值光强,两光束的传播方向平行,波长为 632.8 nm,光束半径为 16.5 mm,光束间隔为 0.5 mm。由图 1 可以看到,随着平移相位差的变化,其峰值光强随之变化,其能量会泄漏到相邻的次峰上,并且主峰位置也有一定的移动。

针对在图 1 中不同的波前平移相位差所引起的远场光斑在一维方向 3 个峰值的变化特征,Chan 等<sup>[9,10]</sup> 对大口径天文望远镜的分离镜面的相对平移提取提出了 Peak Rate 算法( PR Algorithm)。PR 算法是通过搜索一维光斑分布,寻找中央主峰值  $I_{\max}$  以及左右两个相邻的次峰值  $I_{\max L}, I_{\max R}$ , 计算公式为

$$N_{\text{PR}} = \begin{cases} I_{\max}/I_{\max L}, & I_{\max L} \geq I_{\max R} \\ I_{\max R}/I_{\max}, & I_{\max L} < I_{\max R} \end{cases} \quad (3)$$

采用此算法,在一个平移波长内, PR 值与相干光束间的平移相位差是呈单调变化的。但是由于计算过程中引入了除法运算,采用硬件电路来实现会引起计算量的增大,从而降低系统的控制速度;另一方面,采用这种算法得到的 PR 值还会受光强的影响。因此,针对 PR 算法进行了改进

$$N_{\text{PR-mod}} = I_{\max L} - I_{\max R}. \quad (4)$$

两种算法得到的 PR,  $\text{PR}_{\text{mod}}$  与相位差的曲线如图 2 所示(图中的  $\text{PR}_{\text{mod}}$  曲线进行了数值归一化处理)。

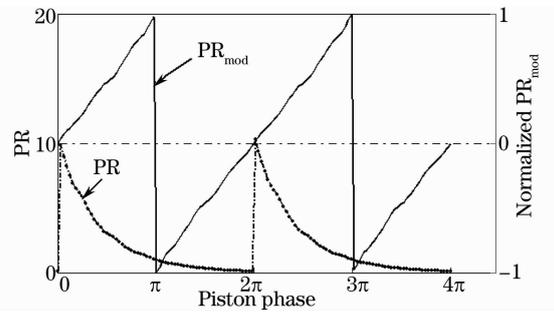


图 2 PR 与  $\text{PR}_{\text{mod}}$  与平移相位差的关系

Fig. 2 Curve diagrams of PR,  $\text{PR}_{\text{mod}}$  versus piston phase

修正 PR 算法只需要计算主峰两边相邻的两个峰值,并用次峰差来表示具有平移相位差的光斑特征。在平移相位差为  $(2n+1)\pi$  ( $n=0, 1, 2, \dots$ ) 的特殊情况下,寻找到的最大峰值光强有两处(如图 1 所示),在修正 PR 算法中以左边峰值光强为准,然后往左搜索得到的第一个峰值光强为  $I_{\max L}$ , 往右搜索得到的第一个峰值光强为  $I_{\max R}$ , 因此  $I_{\max R}$  为与主峰光强相等的右边的峰值光强。采用这种算法,程序中不再进行除法运算。并且从图 2 可以看出,修正 PR 算法在一个波长内的与平移相位差的线性度比

PR 算法高,这可以方便控制系统的参数确定。由于在平移相位差为  $(2n+1)\pi$  ( $n=0,1,2,\dots$ ) 时利用修正 PR 算法计算的次峰差值跳变,因此闭环程序不会稳定地锁定在这个情况下,另外,在控制系统中,只需要控制  $PR_{\text{mod}}$  到 0 位置就可以保证光束之间的平移相位差为波长的整数倍,不需要设定静态工作点<sup>[5]</sup>。

### 3 闭环实验方案及其系统结构

实验采用的光源波长为 632.8nm,激光被准直后入射到分块反射镜上产生两路相干光束,光阑(Stopper)横跨在两束光上用于限制光束的孔径,它使两束相干准直光通过聚焦透镜后在 CCD 焦面上成大小合适的干涉图像以利于后续的硬件处理。信号分路器(Signal splitter)将 CCD 输出数字信号分成两路,一路接到硬件处理电路,另一路接到计算机上进行远场监视。系统结构图如图 3 所示。

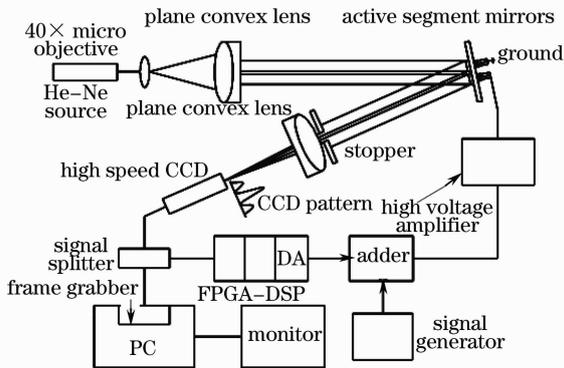


图 3 双光路相干合成系统结构图

Fig. 3 Schematic drawing of two beams coherent combining system

图 3 中的两路能动分块反射镜为中国科学院光电技术研究所自适应国家重点实验室设计,如图 4(a)所示。每一个子反射镜的直径为 16 mm,间距为 0.5 mm,谐振频率约为 5 kHz,每一个子反射镜由 3 个压电陶瓷(PZT)驱动器驱动,可以校正光束的平移相位差以及倾斜像差。在实验中,光束的倾斜像差是通过高压放大器预先手动调整好的。

实验所采用的 CCD 参数为:帧频 2900 Hz,分辨率  $64 \times 64$ ,像素尺寸  $16 \mu\text{m}$ ,像素位宽 8 bit。设计的硬件处理电路采用了 FPGA+DSP+DA 的结构来实现数字图像的实时处理。在硬件处理电路中现场可编程门阵列(FPGA)负责采集 CCD 的输出信号以及将数字信号处理(DSP)运算输出的结果发送给数模转换器(DA)转换成模拟信号,硬件处理电

路如图 4(b)所示。此模拟信号被送到加法器(Adder)的一个输入端,而平移扰动信号则用信号发生器产生输入到加法器的另一端,加法器的输出模拟信号经高压放大器放大后,用于控制分块反射镜移从而对光束中引入的相位扰动进行实时补偿。

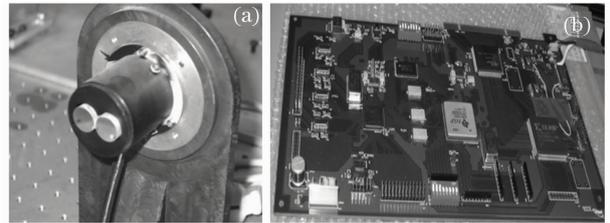


图 4 (a)能动分块反射镜; (b)实时数字处理电路

Fig. 4 (a) Active segmented mirror; (b) real-time digital processing circuit

实验采用比例-积分-微分(PID)控制算法完成系统的变换校正,其电压反馈公式为

$$V_{n+1} = k_1 \times V_n + k_2 \times \Delta p_{n+1} + k_3 \times (\Delta p_{n+1} - \Delta p_n), \quad (5)$$

其中  $V_n$  是上一帧的反馈电压,  $V_{n+1}$  是当前帧计算后送给高压放大器的反馈电压,  $k_1, k_2, k_3$  分别是比例、积分和微分系数,  $\Delta p_{n+1}$  是利用(4)式计算当前帧得到的光斑的两个次峰的差值,当  $I_{\text{maxL}} = I_{\text{maxR}}$  时表明左右两个次峰值相等,因此中央主峰趋于最大,反馈电压保持不变,当  $I_{\text{maxL}} \neq I_{\text{maxR}}$  时电压反馈方程产生相应的反馈电压用于驱动分块反射镜进行校正。

### 4 闭环实验及其结果分析

实验分别让信号发生器产生频率为 10, 20, 50 和 70 Hz, 振幅为 504 mV 的正弦扰动电压,此电压通过高压放大器加到分块反射镜后在两个光束之间产生平移相位差扰动,硬件电路对此平移扰动产生闭环校正电压用于驱动分块反射镜。信号发生器产生的 504 mV 的电压通过高压放大器放大后在驱动器上产生的平移相位差大于一个波长(对此进行了相关的实验,发现能动分块反射镜产生一个波长的平移相位差其输入到高压放大器的电压是 450 mV)。

在不同扰动频率的开环和闭环下,实验均采集了 1 s 的图像数据。图 5 是曝光时间为 0.1 s 时不同扰动频率的开环和闭环远场光斑图。由于系统工作在实时状态下,因此每一个子图是 290 frame 的图像平均结果。

从图 5 可以看出,在开环下[图 5(a)~(d)],其远场的光斑长曝光后亮度下降,并且由于平移相位

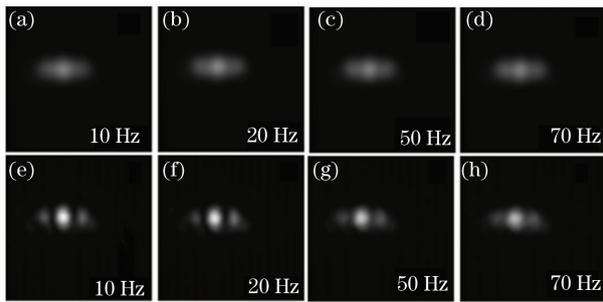


图5 不同扰动频率下 0.1 s 曝光时间的开闭环远场光强分布。(a)~(d):开环;(e)~(h):闭环

Fig. 5 Far-field pattern of 0.1 s exposure time in open and close loop under different perturbation frequencies.

(a)~(d): open loop; (e)~(h): close loop

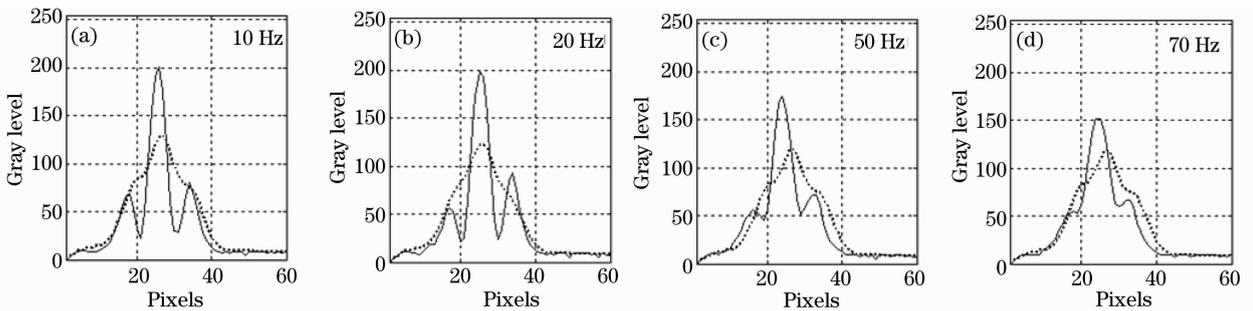


图6 在不同频率开闭环情况下的远场光强一维分布曲线

Fig. 6 1-D far-field distribution of open and close loop in different frequencies

## 5 结 论

研究了自适应光学元件——能动分块反射镜在相干合成中的动态校正情况。实验表明,当平移扰动幅度在一个波长附近时系统可以对 50 Hz 以下的扰动频率进行有效的校正,在 50 Hz 的扰动下,校正后峰值光强相比于校正前提高了 1.5 倍,合成效率达到 75%。基于这一种新颖的探测与闭环校正思想,开展了在这一技术方案下的 10 W 光纤放大器相干合成实验研究,并取得了良好的实验结果。

## 参 考 文 献

- Zhou Pu, Liu Zejin, Xu Xiaojun. Comparative of coherent combining and incoherent combining of fiber lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 276~280
- 周朴,刘泽金,许晓军. 光纤激光相干合成与非相干合成的比较[J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 276~280
- Wang Ji, Liu Yang, Cai Hongxing *et al.*. Coherent output of fiber lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(s2): 57~59
- 王蓓,刘洋,蔡红星等. 光纤激光器的相干输出[J]. *中国激光*, 2008, **35**(s2): 57~59
- H. Bruesselbach, Monica Minden, J. L. Rogers *et al.*. 200 W

差在动态变化,长曝光后其中央的峰的包络增大并扩展到了旁瓣位置。闭环后[图 5(e)~(h)]中央主峰的亮度明显增大,左右两个次峰高度基本相等,故能动分块反射镜将光束之间的动态平移相位差校正到了波长的整数倍。

图 6 是频率分别为 10, 20, 50 和 70 Hz 的开环和闭环情况下的一维光强分布。图中虚线和实线分别表示开环和闭环的一维光强分布,曝光时间为 0.1 s,从图 6 可以更为直观地看出:随着扰动频率的不断增大,控制系统性能,在 10 Hz 和 50 Hz 扰动下,闭环后峰值光强提高了约 1.6 和 1.5 倍,合成效率分别为 80% 和 75%,而在 70 Hz 的频率扰动下,闭环后峰值光强仅提高了 1.27 倍,改善不明显。

- self-organized coherent fiber arrays [C]. *CLEO*, 2005, **1**(CMDD4): 532~534
- He Bing, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Phase-locking and high coherent power output of two fiber lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9): 1153~1158
- 何兵,楼祺洪,周军等. 两个光纤激光器的相位锁定及高相干功率输出[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9): 1153~1158
- Xiao Rui, Hou Jing, Jiang Zongfu *et al.*. Coherent combining and closed loop controlling of two fiber lasers[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(1): 31~34
- 肖瑞,侯静,姜宗福等. 两个光纤激光器的相干合成及其闭环控制[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(1): 31~34
- Steven Serati, Hugh Masterson, Anna Linnenberger. Beam combining using a phased array of phased arrays (PAPA) [C]. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2004, **3**: 1722~1729
- D. R. Neal, T. G. Smith, G. R. Eislser *et al.*. Multiple laser beam combining and phasing using closed-loop control [C]. *SPIE*, 1993, **1920**: 9~19
- D. R. Neal, S. D. Tucker, R. Morgan *et al.*. Multi-segment coherent beam combining [C]. *SPIE*, 1995, **2534**: 80~95
- Gary Chanan, Catherine Ohara, Mitchell Troy. Phasing the mirror segments of the keck telescopes II: The narrow-band phasing algorithm [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(25): 4706~4714
- G. Chanan, M. Troy, C. Ohara. Phasing the primary mirror segments of the keck telescopes: A comparison of different techniques [C]. *SPIE*, 2000, **4003**: 188~201