

光阵列相干合成相位误差的探测与自适应校正研究

王晓华^{1,2,3} 郑轶^{1,2,3} 沈锋^{1,2} 饶长辉^{1,2}

¹ 中国科学院光电技术研究所自适应光学研究室, 四川 成都 610209
² 中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209
³ 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 介绍了一种用于探测和校正激光阵列相位噪声的新方法。新方法基于探测光强极值算法(DBPIP),既能用于平移相位差(Piston)的探测也能用于倾斜相位差(Tilt)的探测。从理论上分析了新方法的原理,并搭建了基于能动分块反射镜的两路激光阵列相干合成实验系统加以验证。结果表明,闭环后平移相位差的均方根(RMS)值可控制在 $\lambda/19$ 以内,光束倾斜范围控制在 $25\ \mu\text{rad}$ (约0.5倍衍射极限角)以内。实验验证了新方法用于探测平移相位差和倾斜相位差的有效性,而且新方法能满足相干合成所要求的控制精度。

关键词 激光技术;光强极值算法;相干探测;能动分块反射镜;自适应校正

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.021401

Research on Detection and Adaptive Correction of Phase Errors for Coherent Combining Laser Arrays

Wang Xiaohua^{1,2,3} Zheng Yi^{1,2,3} Shen Feng^{1,2} Rao Changhui^{1,2}

¹ Laboratory on Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China
² Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China
³ Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A new method to detect and correct the phase errors of laser arrays is presented. This method, based on finding the brightest point of the diffraction pattern, can be used to detect both piston errors and tilt errors. The principle of this method is described theoretically. A system combining two laser beam arrays is built based on active segmented mirrors to testify the efficiency of the method. The experimental results show that the root-mean-square (RMS) value of the piston errors can be controlled in $\lambda/19$ and the tilt errors can be controlled in $25\ \mu\text{rad}$ (0.5 times of the diffraction limit). The experiments prove that the new method can be used to detect the phase errors in coherent beam combing of laser arrays.

Key words laser technique; displacement of the brightest point of the interference pattern; coherent detection; active segmented mirror; adaptive correction

OCIS codes 140.3298; 030.1640; 230.5160; 120.5050

1 引言

随着激光技术的不断发展,单色窄带高功率激光束在工业焊接与切割、雕刻、激光检测和测量、激光雷达系统、自由空间通信以及激光医疗、谐振腔波长转换等各个领域都在发挥着重要作用。相干合成(CBC)就是一种高效地获得高功率单色激光束的方法。在相干合成技术中,各光束波长相同、偏振一致,通过锁相技术使各光束的相位一致干涉输出,输出光束质量接近于衍射极限^[1]。相干合成分为主动锁相控制和被动锁相控制。被动锁相控制主要应用了自组织效应^[2]和谐振腔技术^[3]等方法,使光束在腔内相互耦合而达到一种稳定的相干状态。主动锁相控制中需要检测出参与合成的光束之间的相位差并通过闭环控制给予补偿,使

收稿日期: 2011-09-29; 收到修改稿日期: 2011-10-10; 网络出版日期: 2011-12-07

作者简介: 王晓华(1985—),男,博士研究生,主要从事激光相干合成技术方面的研究。E-mail: wxhua009@163.com

导师简介: 沈锋(1969—),男,博士,研究员,主要从事自适应光学技术方面的研究。E-mail: shenfeng@ioe.ac.cn

光束之间的位平移相位差为 0 或 2π 的整数倍。目前的技术主要有集检测和控制于一体的方法如外差法^[4~6]、高频抖动法^[7]等,单纯的相位提取方法如针孔光强法^[8]、峰值比例法(PR)^[9,10]、条纹提取法^[10,11]等,以及单纯的闭环控制方法如随机并行梯度下降法(SPGD)^[8,12~15]、比例积分微分控制法(PID)^[9]和爬山法^[15]等。SPGD 一般用作闭环控制算法。PR 法以及条纹提取法等提取方法都只能提取光束的平移相位差(Piston),无法用于提取倾斜相位差(Tilt)。PR 法用于提取 Piston 时需要搜索光斑的主极大峰值和次极大峰值,计算得到的 PR 曲线与 Piston 之间是不对称的非线性关系。条纹提取法需要将二维光强分布沿着条纹分布的方向求和,以得到各级亮暗条纹的位置分布,当干涉条纹的方向未知或条纹方向非水平或竖直时,求取条纹的位置比较麻烦。本文提出的光强极值算法(DBPIP)同样是一种基于远场光斑图像特征提取相位差的方法。相比 PR 法与条纹提取法而言,光强极值算法不仅可用于提取 Piston,还可用于提取光束的 Tilt。该方法用于提取 Piston 时,只需要搜索主极大峰值。算法得到的偏移矢量与 Piston 之间是近似的线性关系,并且偏移矢量的计算与干涉条纹的分布方向无关。在相干合成中,Piston 和 Tilt 是同时存在的,一般要求 Piston 的控制精度在 $\lambda/10$ 以内^[16],倾斜在衍射极限角(λ/D , D 为光束阵列的尺寸范围)量级^[17]。实验结果表明,光强极值法与自适应闭环校正结合,可控制 Piston 在 $\lambda/19$ 以内,Tilt 在 $0.61\lambda/D$ 以内,控制精度均达到相干合成的要求。

2 光强极值算法的应用背景与原理

相干合成需要实时检测并校正各光束之间的 Piston 以及各光束的 Tilt。文献[18]提出了用恰当设计的透镜阵列提取各光束之间的 Piston 和 Tilt 的模型。在图 1 所示的透镜阵列中(实线六边形),位于光束中心的子透镜(如子透镜 1)只包含单束光的信息,得到的光斑可用于检测光束的 Tilt;横跨两相邻光束的子透镜(如子透镜 4)则包含了相邻两束光的信息,得到的光斑可用于检测两光束的 Piston。由此,光束阵列的 Piston 与 Tilt 提取就转化为一系列的两相邻光束的 Piston 提取与单光束 Tilt 的提取。文献[18]展示了 7 路光束阵列 Piston 校正的仿真结果,以 PR 法提取相邻光束的 Piston。为了完善和解决此模型中 Piston 与 Tilt 的检测方法,提出一种基于衍射光斑图像的 Piston 与 Tilt 提取方法:光强极值算法。该算法统一了各子孔径内的测量方法,无论是 Piston 还是 Tilt,都只需要计算出光斑峰值位置的偏移矢量,然后通过线性换算得到此偏移矢量所代表的 Piston 或 Tilt 值。本文从理论上介绍了该算法,并针对该算法分别用于提取 Piston 和 Tilt 进行了实验验证。

光强极值算法分两部分:1) 用于平移相位差的检测,2) 用于倾斜相位差的检测。两部分都是测量光强极大值点的偏移矢量。偏移矢量是指当前光强极大值点相对于标定参考点的位移矢量。矢量的方向指示平移相位差或倾斜相位差的方向,矢量的大小指示平移相位差或倾斜相位差的大小。

2.1 倾斜相位差检测

倾斜相位差是单光束相对于光学系统标定的光轴而言的,各光束的倾斜相位差与其他光束无关。假设一圆形单色平面光束的平移相位为 φ ,沿 x, y 倾斜相位差分别为 t_x, t_y , 则其波前可以表示为

$$U(x_1, y_1) = C \left(\frac{\sqrt{(x_1 - a)^2 + (y_1 - b)^2}}{r} \right) \exp[j\varphi + j(x_1 - a)t_x + j(y_1 - b)t_y], \quad (1)$$

式中 (a, b) 为光束中心点坐标, r 为光束半径, $C(\cdot)$ 表示圆心为 (a, b) 、半径为 r 的圆域函数。在远场的光强分布可用焦距为 f 的透镜做傅里叶变换再取模得到:

$$I(x, y) = r^4 \left[\frac{J_1(2\pi\rho)}{\rho} \right]^2, \quad \rho = \sqrt{\left(\frac{x}{\lambda f} - \frac{t_x}{2\pi} \right)^2 + \left(\frac{y}{\lambda f} - \frac{t_y}{2\pi} \right)^2}, \quad (2)$$

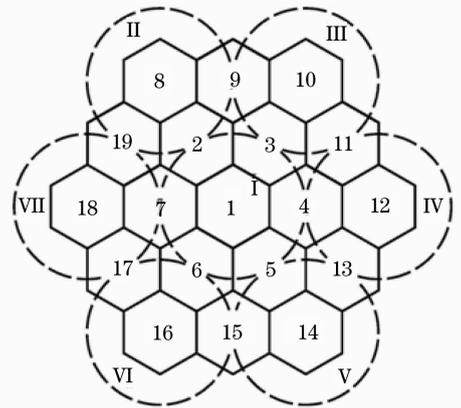


图 1 紧密排列的光束阵列及用于相位差提取的子孔径阵列模型示意图

Fig. 1 Schematic of tiled beams and sub apertures array

式中 $J_1(\cdot)$ 是一阶第一类贝塞尔函数。由函数特性可知,在 $\rho=0$ 时,函数取极大值,此时有

$$x = \frac{\lambda f}{2\pi} t_x, \quad y = \frac{\lambda f}{2\pi} t_y. \quad (3)$$

因此光强极大值点的位移矢量 $\overrightarrow{(x,y)}$ 与倾斜矢量 $\overrightarrow{(t_x,t_y)}$ 成线性比例关系。

2.2 平移相位差检测

干涉光斑的光强分布受倾斜影响。为了简化提取平移相位差的方法,假定光束的倾斜相位差已被消除。以最常见圆形光束为例,分别用理论推导和数值计算的方法来解释检测平移相位差的原理。

圆形光束的参数及分布如图 2 所示,光束半径为 r ,中心间距为 r_a ,对称分布于原点两侧。假设两光束是相位分别为 φ_1 和 φ_2 的理想平面波,则光束的波前可以表示为

$$U(x_1, y_1) = C \left[\frac{\sqrt{(x_1 + a)^2 + (y_1 + b)^2}}{r} \right] \exp(j\varphi_2) + C \left[\frac{\sqrt{(x_1 - a)^2 + (y_1 - b)^2}}{r} \right] \exp(j\varphi_1), \quad (4)$$

光束通过透镜后,透镜的焦平面上的光场分布为

$$U(x, y) = \frac{r^2 J_1(2\pi\rho)}{\rho} \{ \exp[j2\pi(af_x + bf_y) + j\varphi_1] + \exp[-j2\pi(af_x + bf_y) + j\varphi_2] \}, \quad (5)$$

焦平面上的光强分布为

$$I(x, y) = |U(x, y)|^2 = 4r^4 \left[\frac{J_1(2\pi\rho)}{\rho} \right]^2 \cos^2 \left[2\pi \left(\frac{ax}{\lambda f} + \frac{by}{\lambda f} \right) + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \right], \quad (6)$$

式中 $f_x = x/(\lambda f)$, $f_y = y/(\lambda f)$, $\rho = r \sqrt{x^2 + y^2}/(\lambda f)$, λ 为波长, f 为透镜焦距。当 Piston 为 0 或波长的整数倍时,即 $\varphi_1 - \varphi_2$ 为 0 或 2π 的整数倍时,由贝塞尔函数和余弦函数的特征可知,光强分布的极大值点就是原点 $(0,0)$ 。以原点为标定 Piston 的参考点,记平移相位差为 $\Delta\varphi$ 时光强极大值点的位置为 $P(x_P, y_P)$,则原点到 P 点的向量为偏移矢量(图 3),其大小表示为

$$\mathbf{S} = \text{sign}(x_P) \sqrt{x_P^2 + y_P^2}, \quad (7)$$

式中 $\text{sign}(x)$ 是符号函数, $x > 0$ 时取正,否则取负。

由于贝塞尔函数的复杂性,通过数值计算的方法给出了平移相位差 $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ 在 $[-\pi, \pi]$ 区间变化时,干涉光斑光强极大值点的位置轨迹。数值计算中取波长 $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$, 焦距 $f = 1000 \text{ mm}$, $a = 4 \text{ mm}$, $b =$

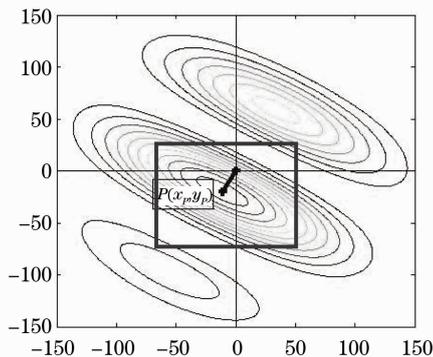


图 3 偏移矢量示意图。偏移矢量 \mathbf{S} 从原点 o 指向光强极大点 P

Fig. 3 Displacement vector \mathbf{S} which directs from point o to point P

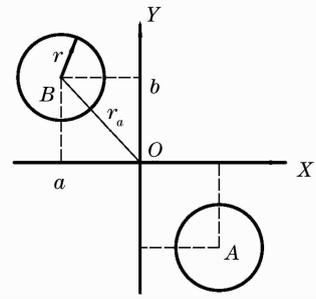


图 2 两路激光阵列形状及分布示意图

Fig. 2 Schematic of the arrangement of two beams

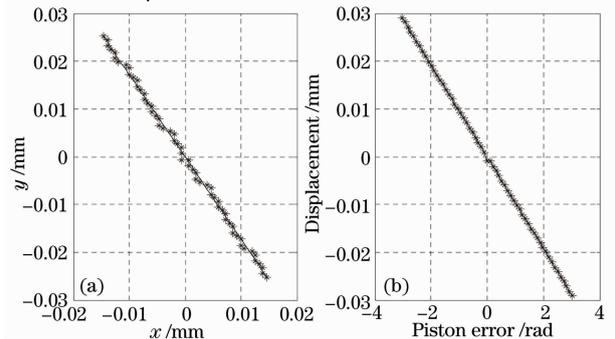


图 4 圆形光束的数值计算。 $\Delta\varphi$ 从 $-\pi$ 变化到 π 时, (a) 光强极大值点的坐标轨迹; (b) 光强极大值点相对于坐标原点的偏移距离

Fig. 4 Calculations for circle shaped beams when $\Delta\varphi$ changes from $-\pi$ to π . (a) Tracks of the peak point; (b) displacement of the peak point

$-4\sqrt{3}$ mm, 光束半径 $r=5$ mm。很明显, 在 $[-\pi, \pi]$ 区间光强极大值点的位置在光束中心的连线 AB 上[轨迹线为过原点的直线, 与 x 轴夹角为 60° , 图 4(a)], 并且偏移矢量 S 与平移相位差 $\Delta\varphi$ 成高度近似的线性比例关系[图 4(b)], 用公式表示为

$$S = K(\varphi_1 - \varphi_2) = K\Delta\varphi, \quad \Delta\varphi \in [-\pi, \pi), \quad (8)$$

式中 K 是线性比例系数, 由光束的分布和光束的尺寸决定。Chanan 等^[19]在有关 Keck 望远镜拼合子镜之间的平移相位差检测中也给出了类似的结论。

(3)式和(8)式构成了 DBPIP 法提取相位差的原理。DBPIP 法简单直接, 可以很方便地用于相干合成中 Piston 和 Tilt 的提取。因为 Tilt 的存在对 Piston 的提取有一定影响, 所以当 Piston 和 Tilt 同时存在时, 应该先校正 Tilt 再校正 Piston, 在前期的工作中对这种情形做了仿真分析^[20]。

3 光强极大值点的定位讨论

DBPIP 法实际运用的核心是准确定位光强极大值点的位置, 方法主要有灰度极大值法和动态窗质心法。

灰度极大值法是最简单直接的方法。该方法只是比较图像各像素灰度值, 没有复杂的运算, 可以达到很快的处理速度。缺点是精度受相机的空间采样频率和单像素的感光噪声影响较大。在空间采样率低、像素感光噪声不均匀时, 会出现光强极大值点的位置失真。在空间采样频率不高的情况下, 光强极大值点的偏移随 Piston 的变化发生阶梯式突变, 如图 5 所示。

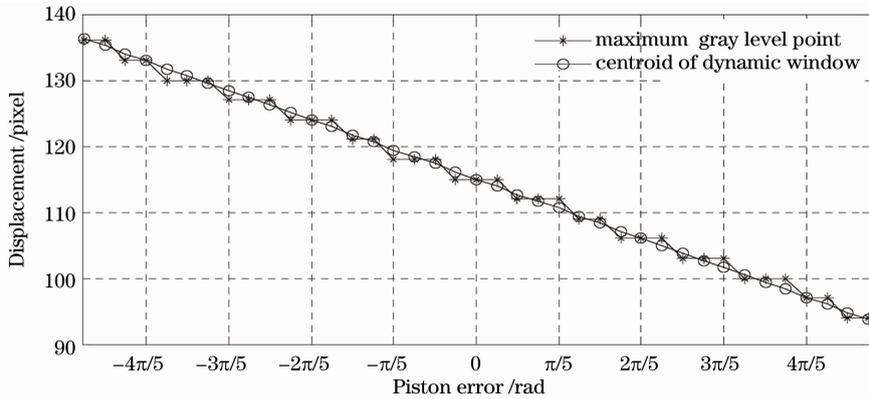


图 5 动态窗质心与灰度极大值点偏移曲线的仿真结果对比

Fig. 5 Simulation results of the displacement of the maximum intensity point with the centroid of dynamic window and the maximum gray level point

动态窗质心法的原理是, 先直接搜寻灰度极大值点的位置 $P(x_p, y_p)$, 接着以 P 为窗口中心, 取一个适当大小的窗口中的像素值计算质心, 如图 3 中的方框范围所示。动态窗的大小选取不宜超过亮条纹的宽度。在实际探测中, 质心定义为光斑强度分布的一阶矩, 可计算为

$$x_c = \frac{\sum_{i,j} x_{i,j} I_{i,j}}{\sum_{i,j} I_{i,j}}, \quad y_c = \frac{\sum_{i,j} y_{i,j} I_{i,j}}{\sum_{i,j} I_{i,j}}, \quad (9)$$

式中 $I_{i,j}$ 为探测器上第 (i, j) 像素的光强测量值。动态质心的计算方法与此相同, 只是取的像素 (i, j) 必须在动态窗范围内。动态窗质心法得到的动态质心的变化的连续性不受像素大小的限制, 而且其变化趋势又呈线性比例, 灵敏度和精确度都比较高, 如图 5 所示。

用图 2 所示的两圆形光束做对比仿真, 平移相位差以步长 $\pi/20$ 从 $-\pi$ 变化到 π , 具体参数是波长 $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$, 焦距 $f = 1000$ mm, $a = 8$ mm, $b = 0$, 光束半径 $r = 5$ mm, 仿真的探测器像素大小为 $4.2 \mu\text{m}$, 图 5 即仿真结果。从仿真结果看出, 以动态窗质心作为光强极大值点的位置更为合适。因此, 后面的实验以动态窗质心的偏移矢量为检测指标。

4 实 验

两路激光阵列相干实验系统如图 6(a)所示, 图中 MO 是波长为 $1.064 \mu\text{m}$ 的种子单模光纤激光器, 输出

功率约为 100 mW。种子光经保偏光纤分束器后被分成两束。光束通过光纤准直器(OZ 公司定制)准直并被扩束成直径为 10 mm 的圆形光束。自制能动分块反射镜(ASM)的子镜中心间隔是 16 mm,子镜之间紧密排列。透镜焦距是 1000 mm,透镜的焦斑经 4 倍的显微物镜放大后在相机上成像。采用 Photonfocus 公司的高速相机,其像素大小为 $10.6 \mu\text{m}$,当分辨率为 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ 时,帧频可达 2960 frame/s。相机图像经采集计算得到补偿信号。该数字信号通过数模转换器(DA)转换成模拟信号后送给高压放大器(HVA)(自制)以驱动 ASM 执行校正指令。动态实验时,在光束 2 准直前,接入一块铌酸锂相位调制器,并加一定频率和幅度的正弦扰动信号,这样就会在光束 2 中产生额外的平移相位扰动。为了验证方法的适应性,把两光束倾斜排列,光束中心连线与 x 轴约成 60° 角,中心间距约为 16 mm,如图 6(b)所示。

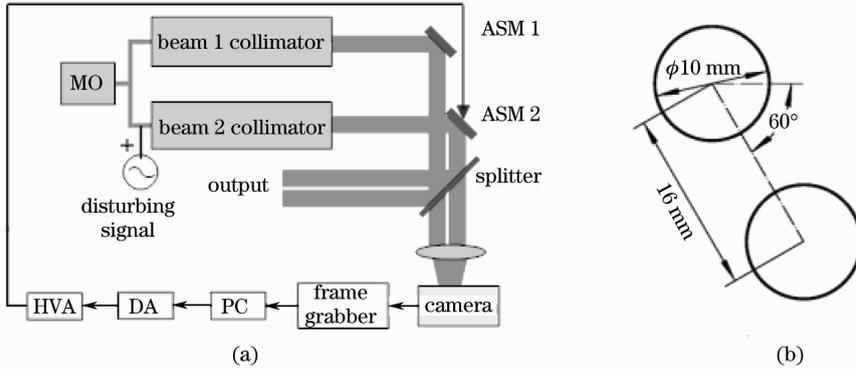


图 6 实验系统示意图

Fig. 6 Schematic of the experiment system

4.1 两光束平移相位差的闭环校正与分析

实验用的执行器为自制 ASM,每个子镜后有成正三角形排布的三个驱动电极,子镜的直径为 16 mm。通过给予镜的三个电极加相同的电压使之前后伸缩,从而补偿平移相位差。在压电陶瓷的正常工作范围内,可以近似认为压电陶瓷的伸缩长度与所加电压成线性关系,这样求得光强极大值点的偏移 S 后就可以通过

$$\Delta V = -K_v \Delta \varphi = -K_v K_p S = -K_d S \quad (10)$$

公式直接求得反馈的补偿电压值。式中的系数 $K_d = K_v K_p$ 需要通过实验测定。

在校正平移相位差时调整系统,使得光束倾斜的影响可以忽略。实验中所加的动态扰动信号是 20 Hz 振幅为 1.1 V 的正弦波,该扰动信号可以产生约 0.6λ 的 Piston 扰动,由于光纤分束后出射的光束之间有缓慢变化的平移相位漂移,与扰动信号叠加可以引起 1λ 的平移相位差(图 7 中开环时 Piston 的变化范围已经覆盖了 $[-\pi, \pi]$ 整个区间)。在此扰动信号的作用下,闭环前后控制参数的变化曲线和远场的干涉图像的长曝光图如图 8 所示。

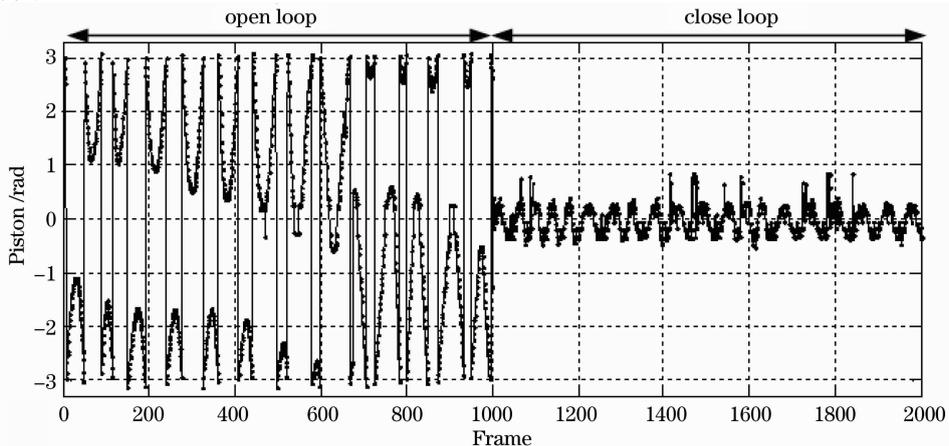


图 7 开、闭环时的平移相位差,帧频约为 1000 frame/s

Fig. 7 Piston curves in open loop and closed loop of the control system. The frame rate is about 1000 frame/s

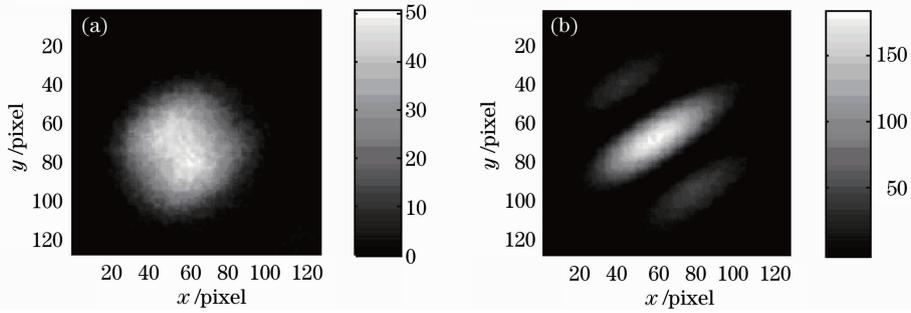


图 8 开闭环的长曝光图(图像已减背景处理)。(a)开环;(b)闭环

Fig. 8 Long exposure patterns of (a) open loop and (b) closed loop (background has been subtracted)

闭环后 Piston 的均方根(RMS)值为 0.32 rad,约对应于 $\lambda/19$,而相干合成所要求的精度通常为 $\lambda/10$ 。最大灰度值由开环的 50 提升到闭环后的 180 左右,补偿阈值后分别为 90 和 220,峰值提升了 140%。闭环后,最大峰值为 180,次大峰值为 58,补偿阈值后分别为 220 和 98,两者之比(PR)值约为 2.24。理论最优干涉时(图 9)PR 值约为 2.55。实验闭环的 PR 值比理论值低 12%,这是因为实验中有许多其他因素的影响,如激光不是理想的单色平面波,闭环后两光束 Piston 残差不为 0,系统本身的对准误差引入系统倾斜等。

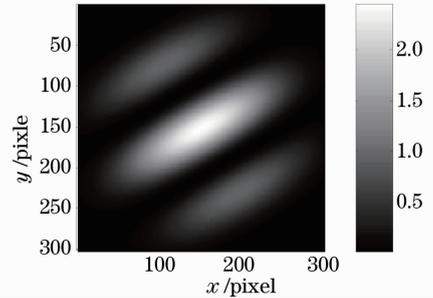


图 9 按实验光束排布参数计算得到的理论干涉图像

Fig. 9 Theoretic pattern calculated with the experimental parameters

图 7 显示了闭环前后连续时间内的平移相位差 Piston 的变化。开环时的平移相位差是随加入的扰动信号变化的,略去 2π 倍数后在 $[-\pi, \pi]$ 区间内不停振荡。开环时,Piston 在区间界限 $-\pi$ 和 π 附近的突变是因为 Piston 在 $-\pi$ 或 π 附近时,干涉光斑的光强峰值从一个旁瓣转移到另一个旁瓣,在光强极值算法提取平移相位差的结果中表现为对当前的 Piston 值增加或减去了 2π 。闭环后的控制信号偶有毛刺,说明光斑有较大的抖动。这是因为实验中未对偏移信号 S 做滤波处理,相位差有较大的突变时可能引起系统瞬时振荡。

4.2 单光束的倾斜闭环校正与分析

图 10(a)表示反射镜上的三个电极以正三角形分布。定义电极位置 P_N ($N=1,2,3$) 到正三角形外接圆圆心 O 的向量为该电极对应的电极向量 \mathbf{R}_N 。若固定两个电极 (P_2, P_3),只给一个电极 (P_1) 加驱动电压,在远处的观测屏上会看到光束的中心在向量 \mathbf{R}_1 方向上移动。

各驱动电极的向量 \mathbf{R}_N 与所加电压 V_N 之间的关系可近似为 $\mathbf{R}_N = V_N \mathbf{r}_N$, \mathbf{r}_N 为驱动电极 N 上加单位电压所产生的单位电极向量 (x_{0N}, y_{0N}),即

$$\begin{cases} x_N = V_N x_{0N} \\ y_N = V_N y_{0N} \end{cases}, \quad (11)$$

总的倾斜效果是各电极向量的矢量叠加 $\mathbf{R} = \mathbf{R}_1 + \mathbf{R}_2 + \mathbf{R}_3$,即

$$\begin{cases} x = V_1 x_{01} + V_2 x_{02} + V_3 x_{03} \\ y = V_1 y_{01} + V_2 y_{02} + V_3 y_{03} \end{cases}, \quad (12)$$

式中 (x, y) 为目标偏移矢量 \mathbf{R} [图 10(b)]。另外, \mathbf{r}_N 之间还有一个约束条件 $\mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2 + \mathbf{r}_3 = 0$,即

$$\begin{cases} x_{01} + x_{02} + x_{03} = 0 \\ y_{01} + y_{02} + y_{03} = 0 \end{cases}. \quad (13)$$

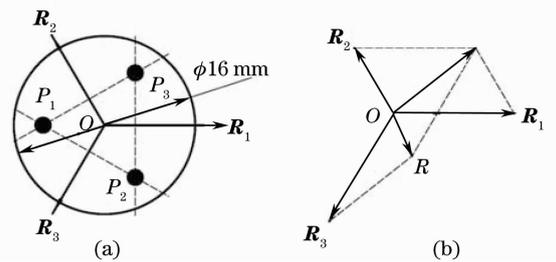


图 10 电极向量示意图

Fig. 10 Schematic of the electrode vectors of a sub mirror

代入(12)式可解得

$$V_1 = \frac{y_{02}x - x_{02}y}{x_{01}y_{02} - y_{01}x_{02}} + V_3, \quad V_2 = \frac{y_{01}x - x_{01}y}{x_{02}y_{01} - y_{02}x_{01}} + V_3. \quad (14)$$

V_3 是多余的自由度,令 $V_3 = 0$,实验只需要测得 1,2 号电极的单位电极向量 (x_{01}, y_{01}) (x_{02}, y_{02}) 和目标偏移矢量 (x, y) (即由光强极值法测得的偏移矢量 \mathbf{S}) 就可以得到 1,2 号电极上应该补偿的电压。

在图 6 实验系统中,只打开光束 1,并在 ASM 前放置一个小型的取暖器以引入倾斜扰动。实验记录了开环与闭环的光束动态窗质心的轨迹图,如图 11 所示。开闭环各运行 5000 frame,时长约 4.3 s。实验中光波长为 $1.064 \mu\text{m}$,光束的直径为 10 mm,光束间距为 16 mm。

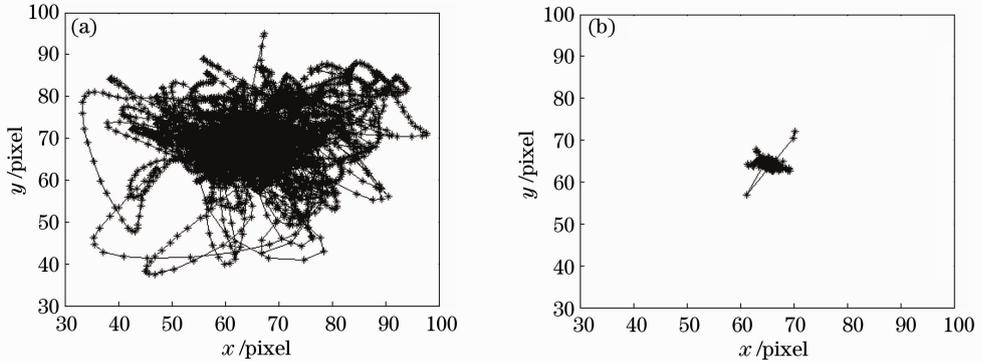


图 11 有大气扰动下光束质心的变动轨迹。(a) 开环;(b) 闭环

Fig. 11 Traces of the beam in turbulence when (a) tilt control is off and (b) tilt control is on

结合光路的参数,根据光束质心的范围可以换算出闭环后光束的倾斜最大范围由 $185 \mu\text{rad}$ (约 $4.51\lambda/D$, $D=26 \text{ mm}$) 减小到 $25 \mu\text{rad}$ (约 $0.61\lambda/D$), 约为 $1/2$ 衍射极限角 ($1.22\lambda/D$)。闭环与开环的单光束长曝光图沿 x 方向的积分曲线如图 12 所示。开环时光束倾斜误差较大,光束不稳定,长曝光图中能量分布比较分散,峰值能量较低。闭环后光束的倾斜误差大大减小,光束几乎稳定在相机靶面中心,光束形状清晰而且能量分布集中。开环峰值能量仅相当于闭环时的 70% 左右,说明系统对倾斜扰动有较好的校正效果。

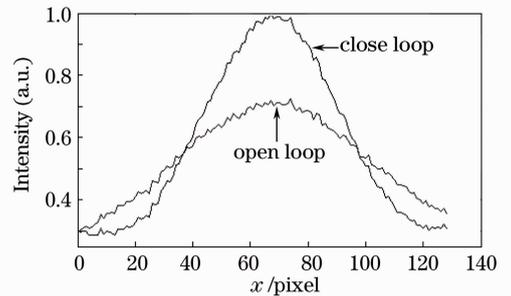


图 12 有大气扰动时开环和闭环条件下光束的长曝光图沿 x 方向的积分曲线。

Fig. 12 Intensity curves along the x axis of long exposure patterns of open loop and close loop

5 结 论

详细介绍了光强极值算法的原理及其在实际应用中的改进,指出平移相位差和倾斜相位差都与光强极大值点的偏移矢量成线性比例关系。实验结果证明,该方法既能测量相干合成中的平移相位差又能测量倾斜相位差。闭环控制后,Piston 的锁相精度为 $\lambda/19$,Tilt 的控制范围在衍射极限角的 $1/2$ 以内,均满足相干合成的控制精度和稳定性要求。该方法可以用于提取光束阵列的相位差信息。闭环控制精度的进一步提高可以通过提高相机的采样频率和图像信号的处理速度来实现。

参 考 文 献

- 1 Gregory D. Goodno, Joshua E. Rothenberg. Advances and limitations in fiber laser beam combination[C]. Frontiers in Optics, 2008 FTuW1
- 2 Hans Bruesselbach, D. Cris Jones, Metin S. Mangir *et al.*. Self-organized coherence in fiber laser arrays[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(11): 1339~1341
- 3 Baishi Wang, Eric Mies, Monica Minden *et al.*. All-fiber 50 W coherently combined passive laser array[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(7): 863~865

- 4 Jesse Anderegg, Stephen Brosnan, Mark Weber *et al.*. 8-watt coherently phased 4-element fiber array[C]. *SPIE*, 2003, **4974**: 1~6
- 5 Jesse Anderegg, Stephen Brosnan, Eric Cheung *et al.*. Coherently coupled high power fiber arrays [C]. *SPIE*, 2006, **6102**: 61020U
- 6 Xiao Rui, Hou Jing, Jiang Zongfu. Experimental investigation of phase detection and compensation in coherent combining of fiber laser array[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(1): 184~187
肖 瑞, 侯 静, 姜宗福. 光纤激光器阵列相干合成中的相位探测与校正方法研究[J]. *物理学报*, 2006, **55**(1): 184~187
- 7 Thomas M. Shay, Vincent Benham, Jeffrey T. Baker *et al.*. Self-synchronous and self-referenced coherent beam combination for large optical arrays[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, **13**(3): 480~486
- 8 Zheng Yi, Shen Feng. Research on phase-locking technique for 2-channels fiber laser coherent beam combination based on stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 631~635
郑 轶, 沈 锋. 基于随机并行梯度下降算法的两路光纤激光相干合成锁相控制技术研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 631~635
- 9 Yang Ruofu, Yang Ping, Shen Feng. Experimental investigation of laser coherent combining based on active segmented mirror[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 424~427
杨若夫, 杨 平, 沈 锋. 基于能动分块反射镜的激光相干合成实验研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 424~427
- 10 Ping Yang, Ruofu Yang, Feng Shen *et al.*. Coherent combination of two ytterbium fiber amplifier based on an active segmented mirror[J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(7): 1349~1353
- 11 Yang Ruofu, Yang Ping, Shen Feng. Experimental research on phase detection and correction of two fiber amplifier based on active segmented mirrors[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(12): 8297~8301
杨若夫, 杨 平, 沈 锋. 基于能动分块反射镜的两路光纤放大器相位探测及其相干合成实验研究[J]. *物理学报*, 2009, **58**(12): 8297~8301
- 12 L. Liu, M. Vorontsov. Phase-locking of tiled fiber array using SPGD feedback controller[C]. *SPIE*, 2005, **5895**: 58950P
- 13 Pu Zhou, Yanxing Ma, Xiaolin Wang *et al.*. Coherent beam combination of three two-tone fiber amplifiers using stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(19): 2939~2941
- 14 Wang Xiaolin, Zhou Pu, Ma Yanxing *et al.*. High precision phase control system in coherent combining of fiber laser based on stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(2): 973~979
王小林, 周 朴, 马阎星 等. 基于随机并行梯度下降算法光纤激光相干合成的高精度相位控制系统[J]. *物理学报*, 2010, **59**(2): 973~979
- 15 Hou Jing, Xiao Rui, Liu Zejin *et al.*. Two methods to realize phase controlling of ytterbium fiber amplifiers[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(11): 1779~1882
侯 静, 肖 瑞, 刘泽金 等. 两种方法实现对掺镱光纤放大器的相位校正[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(11): 1779~1882
- 16 C. D. Nabors. Effects of phase errors on coherent emitter arrays[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(22): 2284~2289
- 17 Pu Zhou, Zilun Chen, Xiaolin Wang *et al.*. Tolerance on tilt error for coherent combining of fiber lasers[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(1): 39~42
- 18 P. Yang, R. Yang, L. Dong *et al.*. Hartmann phase pick-up method for detection and correction of piston aberrations in a multi-beam coherent combination system[J]. *Appl. Phys. B*, 2010, **98**(2-3): 465~469
- 19 Gary Chanan, Mitchell Troy, Frank Dekens *et al.*. Phasing the mirror segments of the Keck telescopes: the broadband phasing algorithm[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(1): 140~145
- 20 Wang Xiaohua, S. Feng. Application of DBPIP to phase errors detection in coherent beam combination[C]. *SPIE*, 2010, **7656**: 76564Q