

基于 CMOS 传感器的高速高精度激光光束自动准直系统

李 耀^{1,2} 王 丁¹ 郭晓杨^{1,2} 冷雨欣¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800)

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 设计了一套激光光束自动准直系统,能够高速、高精度地自动准直激光输出方向。该系统使用了由小孔衍射放大光束抖动的光路和互补金属氧化物半导体传感器组成的传感模块;系统的信号处理模块是以现场可编程门阵列芯片为核心的电路装置,可实现高速计算和反馈控制功能。软件方面,采用了自动定标的算法来确定自动准直过程中所需的驱动信号,可以使光路调节过程中的水平和竖直方向解耦合,提高了调节的精度和速度。该算法可以实现更程度的自动化控制。设计了实验以验证自动准直系统性能,结果表明,该装置的调整精度为 $2.5\ \mu\text{m}$,反馈控制频率约为 $1\ \text{kHz}$,可显著降低频率在 $1\ \text{kHz}$ 以下的光束抖动。

关键词 光学设计; 自动准直; 光路模型; 光电控制

中图分类号 TP273 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0916002

Fast and Accurate Laser Beam Automatic Alignment System Based on CMOS Sensor

Li Yao^{1,2} Wang Ding¹ Guo Xiaoyang^{1,2} Leng Yuxin¹

(¹ State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract A new system is developed to adaptively collimate laser beam direction, with high speed and high accuracy. The sensing module of this system consists of an optical layout using pinhole to amplify the beam drift and a complementary metal-oxide-semiconductor transistor sensor. An field programmable gate array chip is the core of the signal processing module to perform high speed calculation and feedback control. At the aspect of software, an algorithm is designed to derive the driving signal for automatic alignment, which is capable of uncoupling the horizontal and vertical adjustment and suitable for highly accurate automatic control. Experiments are conducted to test the performance of the system. Results show that, the system implements feedback control with accuracy of $2.5\ \mu\text{m}$ and the feedback frequency about $1\ \text{kHz}$, and can obviously reduce the beam drifting with the frequency below $1\ \text{kHz}$.

Key words optical design; automatic alignment; light path model; photoelectric control

OCIS codes 220.1140; 110.2970; 330.6110

1 引 言

近年来,高功率激光技术取得了显著的发展。然而,为了充分实现目前高功率激光系统的潜力,还有许多问题需要解决,特别是激光参数的稳定性问

题,如激光光束指向的稳定性。光束的空间指向稳定性对超快激光物理实验研究有重要影响,如空心光纤脉冲压缩^[1]、脉冲载波包络相位的控制^[2-3]、超快抽运探测^[4]等都要求光束的空间指向在较长时间

收稿日期: 2013-04-02; 收到修改稿日期: 2013-05-03

基金项目: 国家 973 项目(2011CB808101)、国家自然科学基金(10734080,60908008,61078037,11204328)

作者简介: 李 耀(1988—),男,硕士研究生,主要从事光学工程方面的研究。E-mail: Issac.l.y@gmail.com

导师简介: 冷雨欣(1975—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光物理与技术等方面的研究。

E-mail: lengyuxin@mail.siom.ac.cn

内保持稳定。然而实验室环境温度变化引起的镜架热胀冷缩、各种机械动力装置引起的实验平台震动以及空气流动等因素都会使激光光束的方向发生不同程度的抖动,特别是对于复杂的激光系统,影响更加明显。因此,降低光束指向抖动性对提高激光系统性能至关重要。

为提高光束指向的稳定性,除了采取措施保持良好的实验环境(如恒温恒湿、防震光学平台、良好的通风换气系统)外,通过一定方法实现光束指向自准直也是重要手段。实现光束自准直的方法有被动方案^[6],但主要是利用主动控制的方法实时测量抖动并反馈调节^[6-9]。自由空间中,激光光束的空间方位由4个自由度决定,如图1所示,分别是位置 (X, Y) 和角度 (α, β) ,或者位置 (X, Y, X', Y') 。实际的控制系统中,光束的位置信息是通过测量光束截面能量分布进而计算其空间坐标。目前,每个测量元件最多获取2个空间自由度的信息,所以至少需要2个测量元件。对于短距离的光束传输而言,在控制精度要求不高的情况下,仅使用1个元件测得2个自由度信息进行控制也是可以接受的。

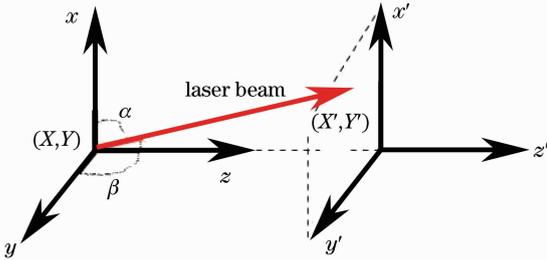


图1 激光光束空间方位坐标

Fig. 1 Spatial coordinates of a laser beam

实时测量光束抖动的元件有位置灵敏探测器(PSD)^[10],四象限光电探测器(QD)^[11]和电荷耦合器件(CCD)。QD一般具有较高的灵敏度和位置分辨率,光谱响应范围宽,响应速度快等优点,但它存在死区^[12],影响光斑定位性能。PSD是利用半导体PN结的横向电阻效应达到器件对光信号位置敏感的目的,其光电输出线性良好,分辨率高,响应快,光敏面上无死区,可以获得连续的位置检信号,但其灵敏度较低,边缘线性较差^[13]。PSD和QD技术虽然有采样频率高的优点,但需要配备复杂高端的信号处理电路,成本很高,应对较差的光斑质量时,误差较大^[14]。CCD由于像素较多,存在像素性能不均匀的问题,影响了其探测精度。对于实时测量光束抖动的探测器来说,并不需要很高的全帧数据速率。互补金属氧化物半导体(CMOS)图像传感器的工作

原理与随机存储器(RAM)相似,所有的存储位均可单独读出。CMOS传感器的二次采样虽然提供的分辨率较低,但其帧速率较高;而开窗口则允许随机选择一块感兴趣的区域。另外在现代CMOS图像传感器中,一个重要的发展趋势是其光谱灵敏度扩展到了近红外区(约1100 nm的波长),因此,相对于其他传感器,CMOS适用范围更广。

本文设计了一套全新的自动准直系统,采用了新型探测器和新的校正光路的方法。新型探测器以CMOS器件为核心^[15],利用了CMOS器件帧频快,价格低廉的优点。同时,系统中使用了由小孔衍射放大光束抖动的光路,可以大幅放大光斑位置漂移量,从而克服CMOS器件精度低的缺点。为提高系统控制光束漂移的可靠性,采用了两个相同的COMS探测器测量光束不同位置的偏移信号。以这些偏移信号为输入,经自动定标的算法计算得到反馈控制信号。实验结果表明,设计装置的调整精度为 $2.5 \mu\text{m}$,反馈控制频率约为1 kHz,可明显降低频率在1 kHz以下的光束抖动。

2 系统设计与实现

2.1 系统结构

实验时,受实验室中垂直方向空调气流的影响,激光光束指向性在垂直方向抖动较大,而在水平方向则基本不受影响(平移抖动为 $\pm 10 \mu\text{m}$),所以仅针对垂直方向的抖动进行反馈控制,且该系统方案可以直接拓展到需要同时控制水平和垂直方向抖动的场合。激光光束实时监测与自动准直装置的系统结构如图2所示。入射光束经过一个压电陶瓷驱动镜(PM)后由分束器BS分出一束弱光用于指向探测,其余光则导入实验系统。被分出的弱光进一步经1:1的分束器P1分为两束,导入不同的探测器

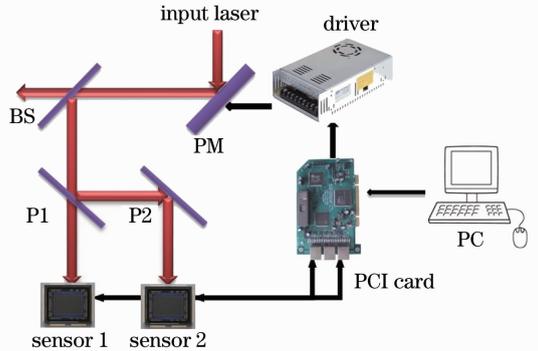


图2 激光光束自动准直装置示意图

Fig. 2 Schematic of laser beam automatic alignment system

sensor 1 和 sensor 2 进行探测。探测器输出的位置信号在外部控制器接口 (PCI) 卡^[16]上的现场可编程门阵列 (FPGA) 芯片中进行处理,生成压电陶瓷驱动镜的控制信号。控制信号经 PCI 卡输入驱动器,进而控制驱动镜调整光束指向,实现自准直功能。系统的状态在 PC 上显示。

系统中使用的压电陶瓷偏摆镜是 PI 公司的高精度三维压电陶瓷偏摆镜 (S-325Piezo Tip/Tilt Platform),驱动器为配套的线性电压放大器 (E-610LVPZT controller/Amplifier)。压电陶瓷偏摆镜自身带有传感器,可实现带有闭环反馈的高精度运动,其闭环偏摆角范围约为 $0\sim 4$ mrad,精度约为 $0.01\ \mu\text{rad}$ 。闭环平移范围约为 $0\sim 30\ \mu\text{m}$,精度为 $0.5\ \text{nm}$ 。传感器为 $30\ \text{pixel}\times 30\ \text{pixel}$ 的 CMOS 阵列,单个像素尺寸为 $2.5\ \mu\text{m}$ 。PCI 总线控制卡由 Xilinx 公司的 FPGA^[17] 芯片 XC3S500E、PLX 公司的 PCI 接口芯片 PCI9052 和 ADI 公司的 AD5764R 组成,其中 FPGA 芯片是控制卡的主控模块,负责通信和信号处理。PCI 控制卡的软件部分使用 VHDL^[18] 语言进行 FPGA 数字电路设计。FPGA 芯片内部数字电路实现了与传感器通信的 SPI 总线协议、与板载数模 (DA) 转换模块通信的 SPI 总线协议、PCI9052 的 PCI 本地总线协议以及比例-积分-微分 (PID)^[19] 控制算法和光路自动定标过程中的一系列算法。计算机软件使用 VC++ 程序编写,该软件负责光斑图像显示以及对光路自动定标过程和反馈控制过程的控制。VC++ 程序中调用 PLX 公司提供的 PCI9052 的驱动程序,通过 PCI9052 实现与 FPGA 芯片的通信,从而实现系统的定标和对反馈过程的监测。PCI 卡通过计算机主板 PCI 插槽与计算机相连。该控制卡接受传感器的信号,然后根据

PID 控制原理进行数据处理,处理后的数据控制 DA 芯片输出合适的电压,此电压经过高精度的线性放大器放大后,驱动压电陶瓷偏摆镜进行主动反馈控制。

为了克服 CMOS 比 CCD 精度低的缺点,在 CMOS 前添加了利用小孔衍射放大光束抖动的光路,如图 3(a)所示。激光光束经过焦距为 $5\ \text{cm}$ 的透镜 1 聚焦在针孔光阑 (光阑半径为 $30\ \mu\text{m}$ 左右,约为入射激光束腰半径的 $1/2$) 附近,光阑后得到出射的衍射光斑,经透镜 2 准直,由 CMOS 传感器接收。将激光光束的抖动转化为衍射光斑形状的变化后,可实现抖动信号的放大。

利用衍射效应放大光斑抖动的原理如图 3(b)所示,其中点 A 为实际光斑,点 B 为抖动放大后的光斑, l 为实际光斑距小孔的距离, L 为放大后光斑距小孔的距离, Δx 为实际光斑尺寸, Δy 为放大后光斑尺寸。在满足 $L\gg l$, $L\gg d$, $l\gg d$ 的条件下,得

$$\Delta y = \frac{L}{l} \Delta x, \quad (1)$$

即抖动被放大了 L/l 倍。实际的系统利用的是小孔衍射,涉及到球差等多种效应,分析过程较复杂。但是本系统使用了自动定标的软件算法,即在系统运行前首先驱动各个镜子并测量参考光束的偏移量,然后计算得到镜子驱动信号与光束偏移量的定量关系,用以实际控制。这个定量关系包含了系统组成特征,如各镜子的排列方式和其之间的间距、小孔衍射导致的抖动放大等因素。放大光束抖动的光路不仅解决了 CMOS 感光阵列分辨率与帧频速度的矛盾,而且可以方便地调节整套系统的分辨率 (放大倍数可调节,可实现数百倍以上的放大)。软件控制流程图如图 4 所示。

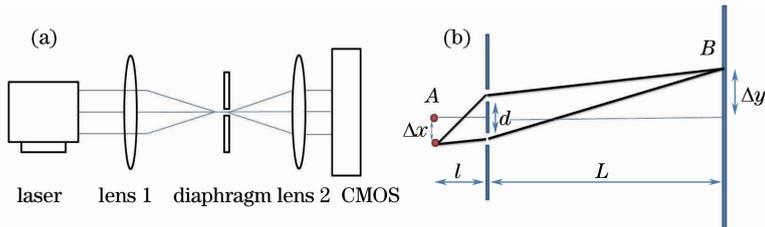


图 3 (a) 传感模块装置示意图; (b) 通过衍射放大光斑抖动的原理图

Fig. 3 (a) Schematic of sensing module; (b) schematic of beam drift amplifying through diffraction

2.2 光束自准直算法原理

根据两点确定一线的原理,采用两个探测器采集光路偏移信号。驱动镜为一个压电陶瓷偏摆镜,偏摆镜的位置由三根压电陶瓷棒的长度决定,而每

根压电陶瓷棒的长度变化等比例于其上所加的电压。所以,建立数学模型,令探测器上的偏移信号作为压电陶瓷上所加电压的函数,在一阶近似条件下,得到

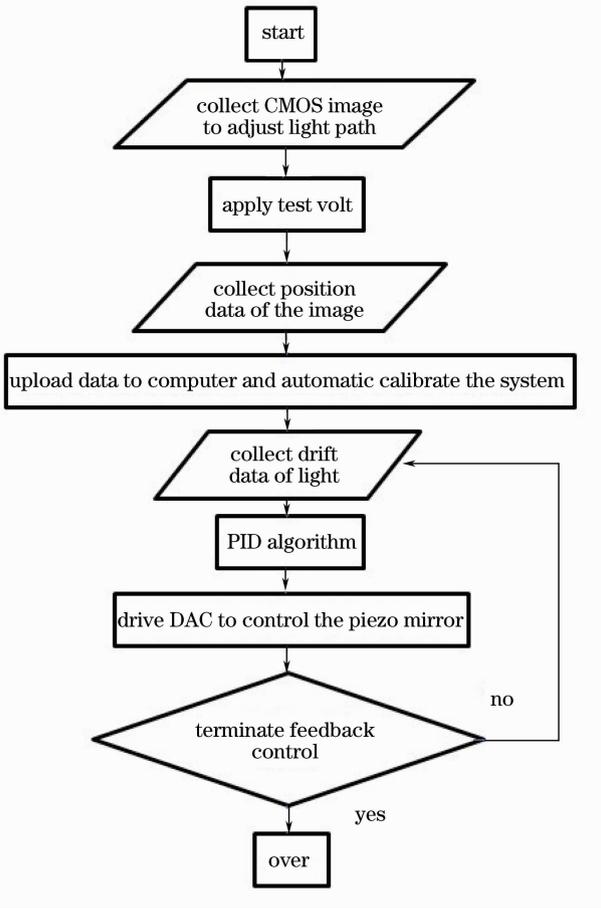


图 4 软件控制流程图

Fig. 4 Software control flow chart

$$\Delta x_1 = \frac{\partial x_1}{\partial v_1} \Delta v_1 + \frac{\partial x_1}{\partial v_2} \Delta v_2 + \frac{\partial x_1}{\partial v_3} \Delta v_3, \quad (2)$$

$$\Delta y_1 = \frac{\partial y_1}{\partial v_1} \Delta v_1 + \frac{\partial y_1}{\partial v_2} \Delta v_2 + \frac{\partial y_1}{\partial v_3} \Delta v_3, \quad (3)$$

$$\Delta x_2 = \frac{\partial x_2}{\partial v_1} \Delta v_1 + \frac{\partial x_2}{\partial v_2} \Delta v_2 + \frac{\partial x_2}{\partial v_3} \Delta v_3, \quad (4)$$

$$\Delta y_2 = \frac{\partial y_2}{\partial v_1} \Delta v_1 + \frac{\partial y_2}{\partial v_2} \Delta v_2 + \frac{\partial y_2}{\partial v_3} \Delta v_3, \quad (5)$$

式中 $\Delta x_1, \Delta y_1, \Delta x_2, \Delta y_2$ 分别为图 2 中 sensor 1 和 sensor 2 输出的竖直 (x_1, x_2) 和水平 (y_1, y_2) 方向的偏移信号。 $\Delta v_1, \Delta v_2, \Delta v_3$ 分别为三根压电陶瓷棒上加的电压的变化量。对于单根压电陶瓷棒, 压电陶瓷长度伸缩变化量 Δl 正比于其所加电压的变化量 Δv , 所以(2)~(5)式的探测器偏移信号 Δx 在一阶近似下也正比于压电陶瓷长度伸缩变化量 Δl 或驱动镜的偏转角 θ , 近似关系如图 5 所示。但是探测器实际探测到的偏移为 $\Delta x'$, 所以(2)~(5)式的误差为 $\Delta x' - \Delta x = S(\tan\theta - \theta) \approx (S\theta^3/3) \propto \Delta v^3$, 其中, S 为压电陶瓷驱动镜到探测器的距离, $\tan\theta$ 作泰勒级数展开。因为实际的 θ 为微弧度量级, S 在 1 m 左右, 相应误差远小于 CMOS 传感器像素尺寸, 所以一阶近似不会

影响系统性能。

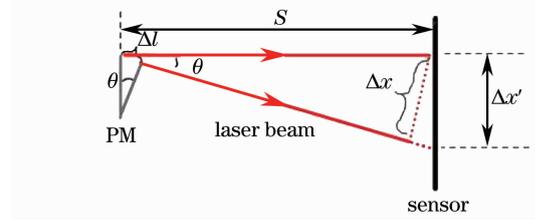


图 5 光束驱动的光路图

Fig. 5 Schematic of beam driving

为方便表示, 以下将 $\Delta x_1, \Delta y_1, \Delta x_2, \Delta y_2$ 分别改写为 x_1, y_1, x_2, y_2 , 将 $\Delta v_1, \Delta v_2, \Delta v_3$ 分别改写为 v_1, v_2, v_3 , 并转换为矩阵表示, 即

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ x_2 \\ y_2 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中 a_{ij} 对应(2)~(4)式中的偏微分系数。为了对系统进行定标获得偏微分系数矩阵 C , 需要对系统施加三组试探电压, 得到探测器上的三组偏移数据 $(x_{10} \ y_{10} \ x_{20} \ y_{20})'$, $(x_{11} \ y_{11} \ x_{21} \ y_{21})'$, $(x_{12} \ y_{12} \ x_{22} \ y_{22})'$, 利用

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{10} & v_{20} & v_{30} \\ v_{11} & v_{21} & v_{31} \\ v_{12} & v_{22} & v_{32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{10} & x_{11} & x_{12} \\ y_{10} & y_{11} & y_{12} \\ x_{20} & x_{21} & x_{22} \\ y_{20} & y_{21} & y_{22} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

可以得到矩阵

$$C = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

在反馈控制中如果测得信号 $(x_1 \ y_1 \ x_2 \ y_2)'$, 则将 $(-x_1 \ -y_1 \ -x_2 \ -y_2)'$ 带入(6)式, 可以得到需要的反馈控制电压。由于仅考虑垂直方向的抖动, 水平方向不受影响, 因此

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & (a_{21}v_1 + a_{22}v_2 + a_{23}v_3)^2 + \\ & (a_{41}v_1 + a_{42}v_2 + a_{43}v_3)^2 = 0, \end{aligned} \quad (10)$$

为使(9)、(10)式有解,进行坐标变换,

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ x_2 \\ y_2 \end{pmatrix} = \mathbf{D} \begin{pmatrix} x_{11} \\ y_{11} \\ x_{21} \\ y_{21} \end{pmatrix}, \quad (11)$$

使得矩阵 \mathbf{C} 的第 4 行变为 0。坐标变换后,对应矩阵第 4 行的 y_2 可能不为零,其原因是在施加三组试探电压时系统参数出现了变化,可以将该矩阵 \mathbf{C} 的第 4 行和对应的 y_2 当作误差舍弃掉。因此,原来的矩阵方程(6)式变为正定方程,一定有解。如果使用两组压电陶瓷偏摆镜,以及两组相应的控制电压,可以完全实现水平和垂直方向的解耦合和校正。

然而,使用该电压只能实现比例反馈控制,为实现高速、高精度的反馈控制,需要进行 PID 算法的处理。

对于传统的光路调校方法,由于角度偏移和平移偏移特性不同,其反馈控制措施存在差异,对光束的角度偏移和平移偏移进行分离检测和反馈校正有利于自准直效果的改进和提高^[20-24]。由上述公式推导过程中知,本调节光路的方法对角度偏移和平移偏移的矫正具有较好的稳健性,因此有更广泛的适用范围。同时,传统的近场远场交替调节适合手工调节光路,方法简单,但每次调节都需分成两步,而且调节过程中容易造成水平和垂直方向耦合,引入调节误差。而本方法是在一阶近似条件下,采用一系列的坐标变换将水平和垂直方向解耦合,调节过程可以并行,因此可以一步完成调节过程,速度较

快,精度较高,更适用于自动化控制。

本方法对系统的定标属于自动定标,即由计算机控制反馈系统输出一系列控制信号,然后通过传感器探测光路系统参数的变化,再由计算机分析整个光路系统对反馈控制信号的响应情况,即得到(8)式的系数矩阵。在得到整个系统对反馈控制信号的响应情况后,即可得到当光束受到外部因素影响而抖动时,控制系统为抵消这些影响而输出的控制信号。因此本方法自动化程度更高。

3 系统测试

系统测试使用的激光光源是光谱物理公司的钛宝石再生放大激光系统,输出中心波长为 800 nm,重复频率为 1 kHz,脉冲宽度为 40 fs。受到实验室垂直方向空调气流及光学平台的振动的影响,激光光束指向性在垂直方向抖动较大,而在水平方向则基本不受影响(平移抖动为 $\pm 10 \mu\text{m}$),所以下系统测试结果仅针对垂直方向的抖动。光路结构如图 2 所示,其中压电陶瓷驱动镜到探测器 sensor 1 和 sensor 2 的距离分别为 1 m 和 2 m。

图 6(a)、(b)为反馈控制前光斑中心在 2 个 CMOS 传感器上垂直方向抖动的情况,平移偏移小于 $400 \mu\text{m}$,角度偏移小于 $400 \mu\text{rad}$ 。经傅里叶分析可知,光束抖动的频率为几十赫兹。图 6(c)、(d)为加入反馈控制后的光束抖动情况,可见抖动幅度明显减弱,平移偏移降低到 $40 \mu\text{m}$ 以下。由此换算得到的角度偏移降低到 $40 \mu\text{rad}$ 以下,光束的空间

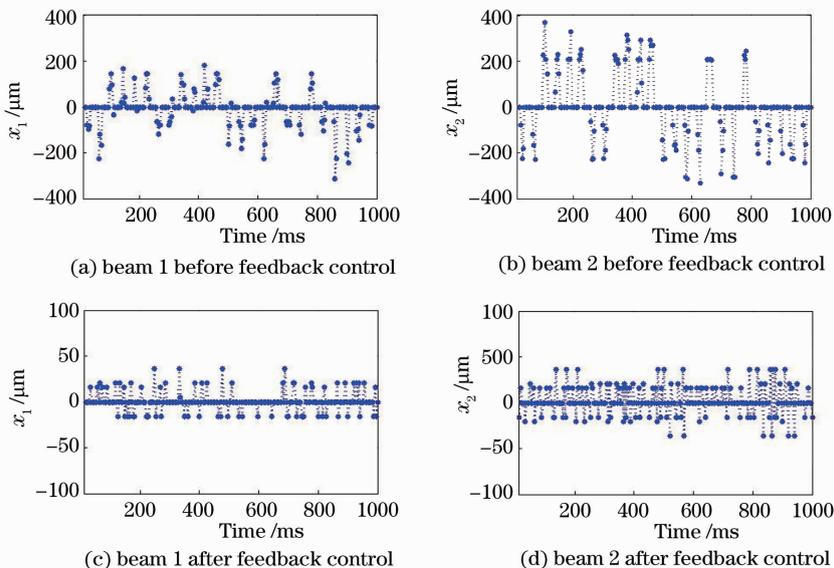


图 6 反馈控制前后的光束垂直方向漂移

Fig. 6 Vertical beam drift before and after feedback control

指向得到明显的改善。需要指出的是,将图 6(c)、6(d)数据经傅里叶分析发现,反馈控制引入了频率为 500 Hz 的高频振动,该高频振动为压电陶瓷偏摆镜对驱动电压响应的无法预测的非线性效应引起的。针对调整过程中引入的高频振动,可以采用对压电陶瓷伸缩量带有反馈控制的驱动器来减弱压电陶瓷的非线性效应。

由以上实验结果可知,本系统明显降低了垂直方向上的光束抖动。由于系统在算法设计上实现了对水平与垂直方向抖动矫正的解耦合,因此可以同时纠正光束在水平方向上、频率在 1 kHz 以下的偏移。由于自动准直装置的 PCI 控制卡采用了 FPGA 芯片,晶振频率为 40 MHz,系统包含有可配置的锁相环,因此系统的驱动时钟频率可以灵活调节(在 5~300 MHz 范围内),从而在压电陶瓷可以响应的频率范围内(最高 2 kHz),可以应对更高频的干扰信号。

4 结 论

针对中小型高重复频率激光系统,设计了一套光斑实时监测与光路自动准直装置。硬件方面,使用了由小孔衍射放大光束抖动的光路和 CMOS 传感器组成的传感模块;数字信号处理模块则使用了以 FPGA 芯片为核心的电路系统,实现了可高速计算和反馈控制功能。软件方面,采用了自动定标的算法来确定自动准直过程中所需的驱动信号,可以使光路调节过程中的水平和竖直方向解耦合,提高调节的精度和速度,并且,该算法可以实现更程度的自动化控制。实验结果表明,设计的装置的调整精度为 2.5 μm ,反馈控制频率约为 1 kHz,可明显降低频率在 1 kHz 以下的光束抖动。该装置为超快激光物理实验研究提供了一定的参考,对需要较高空间指向稳定性的激光应用也有较高使用价值。

参 考 文 献

- 1 N L Wagner, E A Gibson, T Popmintchev, *et al.*. Self-compression of ultrashort pulses through ionization-induced spatiotemporal reshaping[J]. *Phys Rev Lett*, 2003, 97(17): 173902.
- 2 E Gagnon, I Thomann, A Paul, *et al.*. Long-term carrier-envelope phase stability from a grating-based chirped pulse amplifier[J]. *Opt Lett*, 2006, 31(12): 1866-1868.
- 3 Peng Yan, Xu Han, Yang Xuan, *et al.*. Generation of carrier-envelope-phase stabilized 6 fs ultrashort pulses and their application in high-order harmonic generation[J]. *Chinese J Lasers*, 2006, 33(11): 1486-1489.

彭 滢, 徐 晗, 杨 旋, 等. 载波包络相位稳定的 6 fs 超快强激光脉冲及其在高次谐波产生中的应用[J]. *中国激光*, 2006, 33(11): 1486-1489.

- 4 R Velotta, N Hay, M B Mason, *et al.*. High-order harmonic generation in aligned molecules[J]. *Phys Rev Lett*, 2001, 87(18): 183901.
- 5 Y Wu, D French, I Jovanovic. Passive beam pointing stabilization[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(2): 250-252.
- 6 F Breitling, R S Weigel, M C Downer, *et al.*. Laser pointing stabilization and control in the submicroradian regime with neural networks[J]. *Rev Sci Instrum*, 2001, 72(2): 1339-1342.
- 7 I Yamada, K Narihara, K Yamauchi, *et al.*. Active control of laser beam direction for LHD YAG Thomson scattering[J]. *Rev Sci Instrum*, 2001, 72(1): 1126-1128.
- 8 T Kanai, A Suda, S Bohman, *et al.*. Pointing stabilization of a high-repetition-rate high-power femtosecond laser for intense few-cycle pulse generation[J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 92(6): 061106.
- 9 D Liu, F Lv, J Cao, *et al.*. Design and application of a laser beam alignment system based on the imaging properties of a multi-pass amplifier[J]. *Chin Opt Lett*, 2006, 4(10): 601-604.
- 10 W Wang. Clover Design Lateral Effect Position-Sensitive Device; US, 4887140[P]. 1989-12-12.
- 11 Feng Longling, Deng Renliang. Study on optical tracking with four-quadrant photodetector[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1996, 25(1): 16-21.
- 12 Ma Xiaoyu, Mu Jie, Rao Changhui. Error analysis of four-quadrant-based tracking sensor when dead zone is inevitable[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(7): 072903.

马晓焯, 母 杰, 饶长辉. 死区对四象限跟踪传感器跟踪精度的影响[J]. *物理学报*, 2012, 61(7): 072903.

- 13 Chen Dongyan, Lin Bin, Chen Yuqing. Development and progressing of position sensitive detector [J]. *Optical Instruments*, 2004, 26(4): 68-71.
- 14 Ding Xiaokun, Liu Tiegeng, Song Dianyou. Impact of accuracy of laser spot quality in laser triangulation long-term continuous measuring based on PSD[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(2): 0208006.

丁小昆, 刘铁根, 宋殿友. 激光光斑质量对基于 PSD 的激光三角法长时间连续测量精度的影响[J]. *中国激光*, 2012, 39(2): 0208006.

- 15 Zhou Ya, Yan Lei. CMOS image sensor and its application in camera technique-technical achievements of information recording materials in imaging fields (5) [J]. *Information Rerecording Materials*, 2002, 3(3): 43-47.
- 16 W E Jennings, R G Chan, J L Wong. Computer System with Cascaded Peripheral Component Interconnect (PCI) buses; US, 5632021[P]. 1997-5-20.
- 17 G Smith. FPGAs 101: Everything You Need to Know to Get Started[M]. London: Newnes, 2010.
- 18 Z Navabi. VHDL: Analysis and Modeling of Digital Systems [M]. New York: Mcgraw-Hill College, 1997.
- 19 K J Åström, T Hägglund. Advanced PID Control[M]. London: The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006.
- 20 Zhao Weiqian, Tan Jiubin, Qiu Lirong, *et al.*. Laser beam collimation method and technology in given beam direction[J]. *J Optoelectronics • Laser*, 2004, 15(1): 61-64.
- 21 J Uchikoshi, S Shimada, N Ikawa, *et al.*. Straightness measurement using laser beam straight datum[C]. *SPIE*, 1995, 2576: 315-322.
- 22 Liu Daizhong, Xu Renfang, Fan Dianyuan. Design and

- performance of a video-based laser beam automatic alignment system[J]. *Chin Opt Lett*, 2004, 2(2): 92–94.
- 23 Guo Zhongping, Hu Qian, Gao Bingning, *et al.*. Automatic alignment for optical route control system by computer[J]. *Computer Measurement & Control*, 2002, 10(7): 456–458.
 魏仲平, 胡 倩, 高炳宁, 等. 计算机光路自动准直控制系统的控制问题研究与分析[J]. *计算机测量与控制*, 2002, 10(7): 456–458.
- 24 Guo Zhongping, Hu Qian, Gao Bingning. The automatic alignment system for optical route by computer[J]. *Computer Measurement & Control*, 2003, 39(8): 208–210.
 魏仲平, 胡 倩, 高炳宁. 光路自动准直计算机控制系统[J]. *计算机工程与应用*, 2003, 39(8): 208–210.

栏目编辑: 张 腾