

## 激光大气传输倾斜校正系统

谭逢富, 陈修涛, 姚佰栋, 陆茜, 侯再红, 吴毅

(中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 在目标跟踪系统中, 由于大气湍流的影响导致光波振幅和相位的起伏。为了能够精确地跟踪目标, 首先必须消除大气湍流造成的光斑抖动。文中主要介绍了一种基于压电陶瓷(PZT)的激光大气传输倾斜校正系统, 系统由两部分组成: 探测系统和校正系统。探测系统使用可以直接探测光斑重心位置的位敏传感器(PSD); 校正系统使用压电陶瓷驱动的高速倾斜镜。分析了系统的校正性能, 实验结果表明: 该系统具有良好的鲁棒性和实时性, 跟踪精度可达到  $0.6 \mu\text{rad}$ , 对大气湍流引起的信标光斑抖动有很好的抑制作用, 能够满足激光大气传输倾斜校正的精度要求。

**关键词:** 倾斜校正; 位置敏感探测器; 快速倾斜镜; 压电陶瓷

**中图分类号:** O439 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2011)03-0429-04

## Tilt correction system for laser atmospheric propagation

Tan Fengfu, Chen Xiutao, Yao Baidong, Lu Qian, Hou Zaihong, Wu Yi

(Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** In object tracking system, the amplitude and phase of the beacon light is fluctuated which is caused by the atmosphere turbulence. In order to track the target accurately, the facular vibration made by the atmosphere turbulence should be avoided. In this paper, the tilt correction system for laser atmospheric propagation based on PZT was introduced. The system was composed of detection and correction system. The position sensitive device (PSD) which could directly get the centroid of facular was used as the detector, and the fast steering mirror (FSM) driven by PZT was used by correction system. The capability of correction was analyzed. The experimental results demonstrate that the performance of robust and real time is powerful. The absolute error of correction precision is less than  $0.6 \mu\text{rad}$ . The facular vibration of beacon light is effectively suppressed. The correction precision can satisfy the requirement of the tilt correction system for laser atmospheric propagation.

**Key words:** tilt correction; PSD; FSM; PZT

收稿日期: 2010-06-12; 修订日期: 2010-07-26

基金项目: 中国科学院安徽光学精密机械研究所所长基金(Y03AG11141)

作者简介: 谭逢富(1982-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事大气探测仪器方面的研究。Email: tanfengfu@163.com

## 0 引言

激光在大气中传输时,由于光束与大气湍流的相互作用,导致光波振幅和相位的起伏。激光大气传输倾斜校正系统的目的是校正大气湍流引起的接收孔径内的波面倾斜项,其在目标跟踪、光束稳定及天文观测等领域具有广泛的应用价值。同时,系统还可以实时获取光路上的光学参数信息,尤其是大气湍流信息,这对定量地研究大气湍流对光束抖动的影响具有十分重要的意义。文中提出的倾斜校正系统由探测系统和校正系统两大主要部分组成。探测系统由位敏探测器(PSD)及处理电路构成;校正系统由快速倾斜镜(FSM)及其驱动电路构成。系统中使用两个一维的快速倾斜镜代替传统的二维快速倾斜镜,从而使倾斜镜的设计简单化,容易实现更高的谐振频率和带宽。

## 1 系统组成

如图 1 所示,首先通过 A/D 转换将 PSD 检测到的光斑位置转换为数字信号送入 DSP 进行处理,DSP 计算出光斑坐标及坐标偏差值,通过 D/A 将偏差值转换为模拟信号,再通过高压放大电路驱动压电陶瓷(PZT),改变倾斜镜的倾斜角。同时,DSP 通过串口与计算机进行通讯,用于控制系统工作。

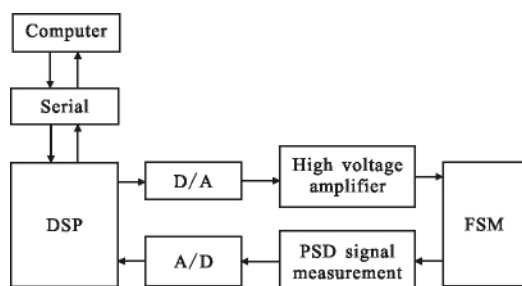


图 1 硬件系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of hardware system

### 1.1 PSD

PSD 是由 Si 光电二极管组成,输出信号为电流信号。当光敏面被非均匀光照射时,由于横向光电效应,在平行于结平面的方向形成电势差,光生电流在扩散层被分流,通过电极收集电流,由于从电极输出的电流与入射光斑的重心位置有关,因此,根据输出的电流便能连续、直接地检测出入射光斑的重心位置<sup>[1]</sup>。公式(1)

是 PSD 的光斑重心计算公式:

$$x = [(i_1 + i_2) - (i_3 + i_4)] / (i_1 + i_2 + i_3 + i_4)$$

$$y = [(i_1 + i_3) - (i_2 + i_4)] / (i_1 + i_2 + i_3 + i_4) \quad (1)$$

式中: $i_1$ 、 $i_2$ 、 $i_3$ 、 $i_4$  为 PSD 输出 4 路电流信号。由于 PSD 的输出为电流信号,而处理机处理的为电压信号,因此需要将信号进行电流电压转换放大。

### 1.2 处理机系统

系统中使用的处理机为 dsPIC33 系列带 DSP 处理器的 16 位单片机,主要完成 A/D 转换、重心计算、PID 控制算法及 D/A 转换等功能。

dsPIC33 系列单片机具有 40 MIPS 的工作速度,可以实现快速的数据处理。采用逐次比较式 A/D 转换,可实现自动通道选择模式采样,拥有 16 个结果缓冲器。系统中使用 125 K 的采样速率对 4 路模拟信号进行采样,当 16 个结果缓冲器装满后,产生一次中断,并对每路信号取 4 次结果平均值。实现通道的自动选择可以保证采集 PSD 4 路信号的同时性,采取 4 次采样取平均值的方法,可以减小采样误差。

PID 控制采用的是增量式 PID 控制<sup>[1]</sup>,具体理论不再赘述。

### 1.3 高压驱动电路<sup>[2]</sup>

系统中,高压放大器是一个重要的组成部分,能够直接影响系统的整体性能。因此,系统对高压放大器有很高的要求。具体包括以下几点:

(1) 要求高压放大器的电源稳定性好,纹波小<sup>[3]</sup>。文中系统的纹波在 20 mV 以内。

(2) 要求高压放大器具有大的电流输出能力,一般不小于 150 mA。文中系统的最大输出电流为 1 A。

(3) 要求高压放大器有冲、放电回路,且充放电时间要短。文中系统的充放电时间小于 1 ms。

(4) 要求高压放大电路有较高的带宽。文中系统的带宽为 1.4 kHz。

### 1.4 执行装置<sup>[3-5]</sup>

PZT 在外部电场的作用下,内部的正负电荷中心产生相对位移,使压电体产生形变,表现为 PZT 具有一定的伸缩能力。利用此伸缩能力可以实现对倾斜镜的角度控制。

倾斜镜的谐振频率是其对系统闭环带宽影响的主要因素。倾斜镜谐振频率的测量<sup>[5]</sup>方法可概括如下:用信号发生器产生 1~700 Hz 的扫描信号,经高压放

大电路放大,驱动 PZT 使倾斜镜产生抖动,用激光器发射一束光束经倾斜镜反射到接收屏上,并用高速 CCD 采集光斑信息。对光斑的质心进行频谱分析,便可以得到倾斜镜的谐振频率。经测量,倾斜镜的谐振频率为 520 Hz。图 2 为倾斜镜的结构图及其频率特性曲线。

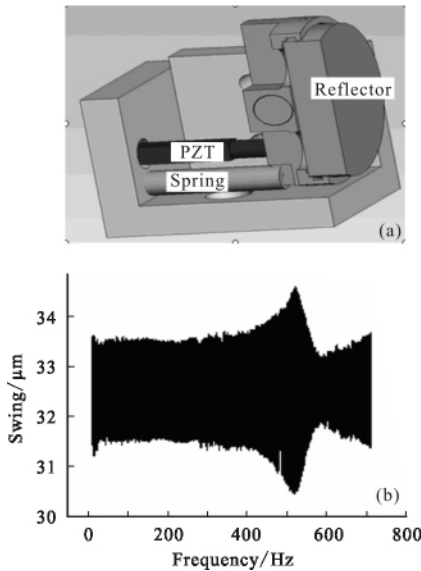


图 2 倾斜镜系统及其频率特性

Fig.2 Reflector and its frequency character

### 2 控制模型

倾斜校正系统的控制模型如图 3 所示。其中,  $r(t)$  为光斑抖动信号,  $n(t)$  为系统的噪音信号,  $c(t)$  为倾斜校正之后的残余信号。  $W(s)$  为 PSD 的传递函数,  $P(s)$  为处理机的传递函数,  $D(s)$  为 D/A 转换、高压放大器和倾斜镜的传递函数。

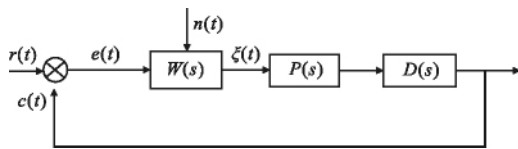


图 3 校正系统控制模型

Fig.3 Control model of correction system

由系统的控制模型可以得到系统的传递函数。

$$C(s) = \frac{H(s)}{1+H(s)} [R(s)+N(s)] \quad (2)$$

式中:  $H(s)=W(s)P(s)D(s)$  为系统开环传递函数;  $C(s)$ 、 $R(s)$ 、 $N(s)$  分别为  $c(t)$ 、 $r(t)$ 、 $n(t)$  所对应的传递函数。考虑到  $W(s)$  和  $D(s)$  可以看作是线性的传递函数, 它们的乘积用  $K$  表示, 其大小由硬件决定, 原则上是不变

的; 系统的延时为  $t_0$ , 主要由处理机产生。则公式(2)可以改写为:

$$C(s) = \frac{K \cdot P(s) \cdot e^{-j\omega t_0}}{1+K \cdot P(s) \cdot e^{-j\omega t_0}} [R(s)+N(s)] \quad (3)$$

### 3 系统性能分析<sup>[6-7]</sup>

倾斜校正系统的实验原理图如图 4 所示。

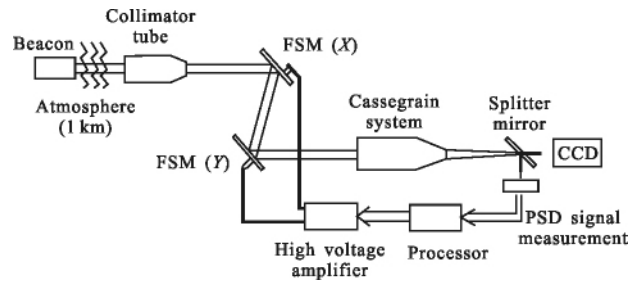


图 4 校正系统原理图

Fig.4 Schematic diagram of correction system

1 km 外的信标光经平行光管缩束、准直为平行光, 再经 X、Y 方向的倾斜镜反射进入卡塞格林系统, 出来的光经过分光镜, 一部分进入 PSD 用于计算光斑重心, 一部分进入 CCD 用于采集分析系统性能。其中, X、Y 方向倾斜镜分别用来校正 X 和 Y 方向的光斑抖动。平行光管的接收口径为 10 cm, 缩束比为 3:1; 卡塞格林系统的焦距约为 8 m, 系统的总焦距约为 25 m。

通常, 对传输光束聚焦传输特性的描述包括两点: 一是光束的方向性, 二是光束的能量集中度。

能量集中度可以用衍射极限倍数  $\beta$  表示, 当系统的焦距为 25 m 时, 系统的静态相差对应的衍射极限倍数  $\beta_0=1.77$ , 大气相干长度  $r_0=5.02$  cm。用于数据采集的 CCD 为 14 位, 采样频率为 100 Hz, 分辨率(像素尺寸)为  $8.8 \mu\text{m}$ 。图 5 为倾斜校正前后光斑的长曝光图像。其中, 图 5(a)为校正前的光斑, 图 5(b)为校正后的光斑。校正前的衍射极限倍数  $\beta=2.46$ , 峰值亮度

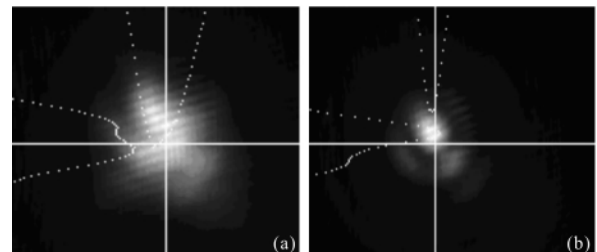


图 5 倾斜校正前后的光斑对比

Fig.5 Contrast of facula before and after correction

为 3 318。校正后的衍射极限倍数  $\beta=1.99$ ，峰值亮度 10 357。可见，校正后的光斑能量集中度明显提高。

从光束的方向性来看，校正前的光斑抖动为  $4.5 \mu\text{rad}$ ，校正后的残余抖动小于  $0.6 \mu\text{rad}$ 。

图 6 为校正前后的倾斜功率谱对比图，直线为斜率为  $-8/3$  次方线，实线代表校正前大气抖动的频谱，虚线代表校正后的残余抖动的频谱。由于 CCD 的采集频率只有 100 Hz，所以只能分析 50 Hz 以内的信号。从图 6 可以看出，系统对 50 Hz 以内的倾斜抖动有非常好的校正效果。

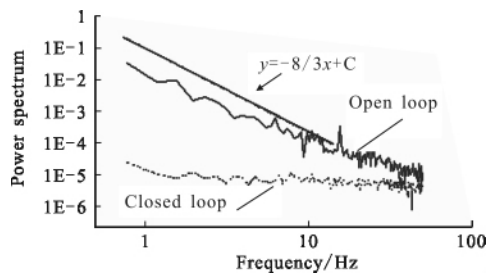


图 6 开环和闭环倾斜数据功率谱

Fig.6 Power spectrum of tilt data for open-loop and closed-loop

#### 4 总结

文中设计了一种利用 PSD 采集光斑位置，用 PZT 驱动倾斜镜的激光大气传输倾斜校正系统，精简了系统结构，提高了系统的处理速度，并分析了系统的性能，结果表明：本系统具有较高的校正精度和带宽。

#### 参考文献：

[1] Li Hongwen, Li Yuanchun. Neural network PID control based on model identifier for theodolite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35 (Z1): 442-446. (in Chinese)

- 李洪文, 李元春. 基于模型辨识的神经网络 PID 控制在经纬仪中的应用[J]. 红外与激光工程, 2006, 35 (Z1): 442-446.
- [2] Feng Xiaoguang, Zhao Wansheng, Li Yan, et al. An available method for abating the ripple voltage of the power supply for piezoelectric microdisplacement actuators [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 1997, 29(5): 108-111. (in Chinese)
- 冯晓光, 赵万生, 栗岩, 等. 减小压电陶瓷驱动电源纹波的一种有效方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1997, 29(5): 108-111.
- [3] Sun Lining, Sun Shaoyun. Micro-drive positioning system based on PZT and its control [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(1): 55-58. (in Chinese)
- 孙立宁, 孙绍云. 基于 PZT 的微驱动定位系统及控制方法的研究[J]. 光学精密工程, 2004, 12(1): 55-58.
- [4] Li Ming, Huang Yong, Ai Yong. Design of fine tracking controller for free space optical communication [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4): 270-274. (in Chinese)
- 黎明, 黄勇, 艾勇. 空间光通讯中精跟踪控制器的设计[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 270-274.
- [5] Wu Xinmin, Chen Jinbang, Zhu Rihong, et al. Measuring the dynamic frequency response of piezoelectric ceramic by interference method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, 31(6): 257-260. (in Chinese)
- 吴新民, 陈进榜, 朱日宏, 等. 用干涉法测量压电陶瓷的动态频率响应特性[J]. 红外与激光工程, 2002, 31(6): 257-260.
- [6] Wu Bilin, Rao Changhui, Zhang Yudong. Performance analysis for fine tracking loop for adaptive optics system with closed-loop residual tilt data [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(4): 487-490. (in Chinese)
- 吴碧琳, 饶长辉, 张雨东. 应用闭环残余倾斜数据分析自适应光学系统精跟踪回路性能 [J]. 光学学报, 2006, 26(4): 487-490.
- [7] Rao Changhui, Jiang Wenhan, Zhang Yudong, et al. Performance on the 6l -element upgraded adaptive optical system for 1.2 m telescope of the Yunnan observatory [C]// SPIE, 2004, 5639: 11-20.