

CNIC-01328

CAEP-0016

四象限-快速剪切反射镜精跟踪 系统研制及实验

张家如 万 敏 聂文杰 周克恩 于 真 张 蓉

(中国工程物理研究院, 成都, 610003)

摘 要

研究了一个以四象限光电探测器和快速剪切反射镜为主要功能块的光束精瞄准闭环控制系统。用一个频率和幅度均可调的扰动源模拟目标的漂移对该系统的性能进行了测试, 结果表明在较低频率的扰动下该系统有良好的精跟踪能力。同时, 结合一个望远镜跟踪系统对 550 m 距离的一个动态合作目标进行了精跟踪实验, 该系统在望远镜跟踪的基础上可以把跟踪精度提高约 90%。

Study and Experiment of Precise Pointing System of Quarter Sensor and Fast Steering Mirror

(In Chinese)

ZHANG Jiaru WAN Min NIE Wenjie ZHOU Keen

YU Zhen ZHANG Rong

(China Academy of Engineering Physics, Chengdu, 610003)

ABSTRACT

A precise pointing system, mainly composed of a quarter optic-electronic sensor and fast steering mirror, have been successfully deployed. A vibration source which frequency and amplitude could be adjusted is applied to simulate the vibration of object, and the performance of the system is tested, the results showed that the system can obtain a high precision at rather low vibrating frequency. The system with a telescope tracking system is used to point a vibrating object 550 m away, and the precision raises 90% based on the working of the telescope tracking system.

引言

用激光束可以把能量送到较远距离的目标上去, 这需要用望远镜对目标进行跟踪和瞄准。但望远镜的机械驱动系统对目标的快速抖动难以奏效。快速剪切反射镜 FSM (Fast Steering Mirror) 的驱动器由压电陶瓷制成, 通过压电陶瓷的电致伸缩效应驱动镜面, 使镜面快速转动。由于压电效应是一个很快的过程, 可使 FSM 转动很快, 从而在一定的视场内可以实现对目标的快速跟踪。

四象限探测器由四个光电探测器按一定的空间位置关系组合而成, 可以用它测量光斑的空间位置, 并且, 恰当地使用它, 可以获得较高的空间测量精度。

本文用四象限探测器和 FSM 一起构成一个快速闭环精跟踪系统, 介绍了该系统的研制及实验应用情况。

1 系统组成

1.1 四象限探测器

光电四象限探测器一般是圆形的, 中间有两条正交的分割线, 这两条分割线相当于平面直角坐标的 x, y 轴, 把一个圆形探测器分成了四个互为独立的光电管, 它们仅仅通过空间位置关系联系在一起, 如图1。当一束光打到四象限上, 通过四个光电管产生的电信号的强弱对比来求得光斑的空间位置即光斑中心 (x, y) 。四象限探测器的视场和探测系统的光学特性相关。考虑到光斑中心处于四象限边缘时仍然能被有效探测, 因此, 如果聚光透镜到达四象限的距离为 L , 则视场可表达为: ϕ/L , 单位是弧度, ϕ 是四象限探测器的孔径。

设四个光电管产生的电信号分别为: I_1, I_2, I_3 和 I_4 , 则用四象限加减法有下式:

$$x = k_x [(I_1 + I_4) - (I_2 + I_3)] / \sum I \quad (1)$$

$$y = k_y [(I_1 + I_2) - (I_3 + I_4)] / \sum I \quad (2)$$

其中, $\sum I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4$, k_x 和 k_y 是常数因子, 和四象限探测器的孔径 ϕ 大小有关。实际系统中, k_x 和 k_y 的选取应使 (x, y) 的最大值处在四象限探测器的视场边缘。

利用四象限加减法得到的束斑的位置偏移值与束斑中心实际位置并非成完全线性关系, 其线性程度与束斑大小有关。焦斑的增大将使束斑的位置偏移值与束斑中心实际位置曲线斜率变缓, 影响跟踪系统对运动目标的跟踪速度, 但其线性区域比较宽, 因此, 为得到比较好的跟踪效果, 必须综合考虑速度与线性度这两个因素的影响, 取四象限光敏面的半径为 R , 束斑半径为 r , 则一般应取 $r = R/2$ 。

本系统的四象限探测器由几个部分组成, 包含高灵敏度硅PIN四象限探测器、高灵敏度光电流放大器、线性电压放大器等。为提高探测的灵敏度, 硅探测器工作在零偏压状态, 输出光电流与入射功率在 $10^{-4} \sim 10^{-10}$ W范围内有良好的线性关系。噪声及温漂电流低于1 pA, 测量的电流分辨率和功率分辨率可保证在0.1 pA和 10^{-10} W。可探测到nW级的光强并用于信号处理。

1.2 快速剪切反射镜

该系统所用FSM有三个压电陶瓷驱动器, 其中一个驱动器位于镜面的中央, 并且不加电压, 仅作为一个支撑点, 另外两个成直角分布, 通过加压, 分别使镜面发生x向及y向转动, 在 ± 700 V的驱动电压作用下, 其最大转动量可达 ± 110 角秒。

FSM的本征谐振频率及镜架刚度是影响整个系统闭环带宽的重要因素。用信号源产生不同频率的正弦波振荡信号, 经高压放大器放大后控制FSM, 使其产生振动, 并用一稳定的激光束照射FSM, 由四象限探测器探测经FSM后光束的漂移情况, 从而得到FSM(包含其镜架)的频率特性曲线。如图2, 其中, 横坐标为振动频率, 纵坐标为四象限探测器得到的光斑漂移幅度。测试工作做了两次, 分别选用不同幅度的正弦波振荡信号, 以得到FSM对不同强度信号的响应。由图可知, FSM的谐振频率点约在320 Hz附近, 大信号时发现在200 Hz附近有个小的谐振点。小信号的频率响应曲线比大信号的线性度稍好。

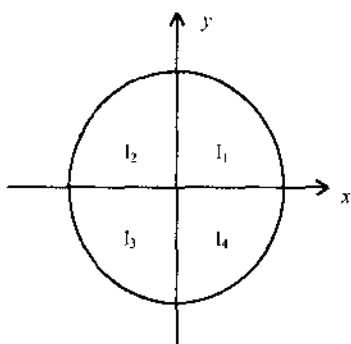


图1 四象限探测器光敏面分布图

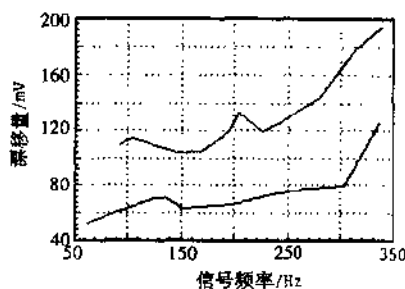


图2 FSM频率特性曲线

1.3 闭环控制器

系统的闭环控制器采集由四象限探测器输出的四路光电压信号, 按照(1)、(2)式所示的四象限加减法处理它们, 求得光斑的位置信号并输出以供对校正效果的监视, 同时按照PID控制方法解算出对FSM的两路控制信号。PID控制参数须结合实验调整以求达到最好。

2 性能测试

2.1 束斑位置信号对输入电压的响应

利用高压放大器输出的电压信号 V_x 和 V_y 控制快速倾斜镜的偏转大小及方向, 用一稳定的光束经FSM反射, 由四象限探测器探测光束的偏转, 得到束斑中心在 x 和 y 方向的偏差值 Δx 和 Δy 。如图3为束斑位置信号对输入电压的响应。图中四象限探测器半径归一化为1。左图 y 向电压为0, x 向为 $0 \sim 600 \sim 0 \sim -600 \sim 0$ V; 右图 x 向电压为0, y 向为 $0 \sim 600 \sim 0 \sim -600 \sim 0$ V。由于焦斑中心在电压为0时并未对准四象限中心, x 向电压加到200 V时焦斑几乎全部移到 x 向正向, 并有部分光斑落于四象限外损失掉。因此只有当焦斑位置在四象限中心附近时线性度比较好。

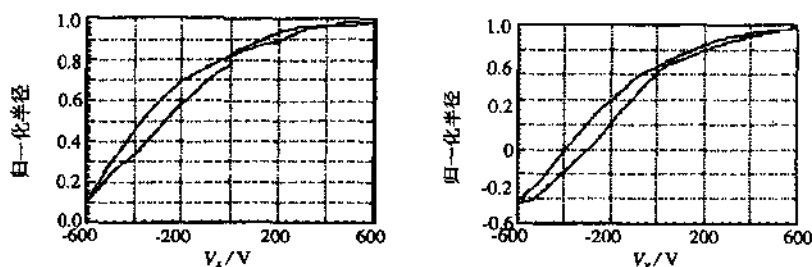


图3 束斑位置信号对输入电压的响应曲线

2.2 动态范围和精度要求

由湍流引起的光束整体漂移的方差可由下式估算:

$$\sigma_a^2 = 0.184(D/r_0)^{5/3} \cdot (\lambda/D)^2 (\text{rad})^2 \quad (3)$$

对 $r_0 = 5$ cm, 设望远镜孔径 D 为 450 mm, 波长 λ 为 500 nm, 并令最大波前倾斜动态范围 5 倍于方差 σ_a , 则最大波前倾斜是 $\pm 7.4 \mu\text{rad}$, 要求 FSM 倾斜 $\pm 3.7 \mu\text{rad}$, 实际所需的机械倾斜为 $\pm 3.7 \mu\text{rad} \times 4.5 \approx \pm 16.7 \mu\text{rad} \approx \pm 3.44''$ 角秒。其中的 4.5 是 FSM (束径 100 mm) 与望远镜孔径 450 mm 之间的放大倍数。因为还需计入对光学系统固有像差等误差因素的修正, $\pm 110''$ 的修正量已经远远超出动态要求。考虑到激光束的精度要求, 需要调整 FSM 聚焦系统的有效焦距以满足要求。设有效焦距为 3 m, 四象限光敏面半径为 1 mm, A/D 变换取 8 位, 则精度可达到 0.54 角秒。

2.3 测试结果

测试系统原理图如图4。He-Ne 激光经扩束为 $\phi 60$ mm 的准直束到达 FSM, FSM 的反射光经衰减后聚焦于四象限探测器光敏面, 四个象限上的光强信息经前放后被闭环控制器采

样处理,求得光斑的位置信号并输出以供对校正效果的监视,同时按照PID控制方法解算出对FSM的两路控制信号,经高压放大器放大后用以控制FSM偏转,使FSM的反射光聚焦于四象限探测器光敏面的中心,从而实时补偿光束的漂移。采用激振器为扰动源,产生可变频率和幅度的扰动来使光束漂移。

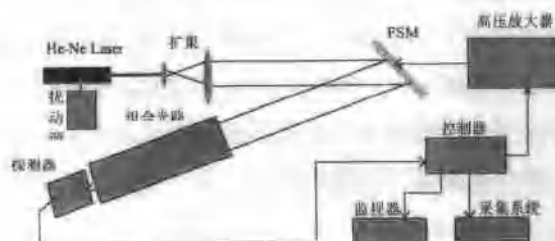


图4 性能测试系统实验原理图

在峰-峰值为5.5角秒的扰动幅度下不断增加扰动频率,测量闭环修正后的扰动余量,并计算修正量大小,其计算方法为:先计算初始扰动的方差 Dr ,再计算闭环修正后扰动余量的方差 Cr ,则:修正量 $= (Dr - Cr) / Dr$,测量结果示于图5。

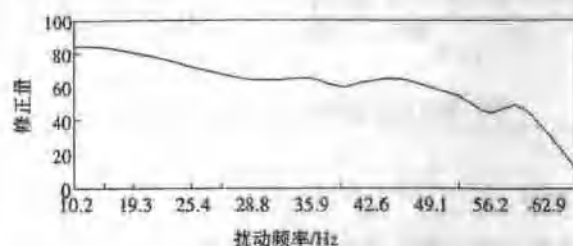


图5 在约5.5角秒扰动下修正量随扰动频率的变化曲线

从图中看出,当扰动频率小于26 Hz时,修正量大于70%,所以,该系统的3 dB点是26 Hz。在26~49 Hz的扰动频率范围内,系统的修正量大于60%。扰动频率大于60 Hz以后,修正量下降较快,达到67 Hz以后,修正量已下降10%以下。

固定扰动频率,加大扰动幅度,测量修正量如图6所示。

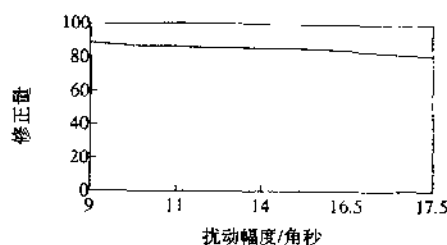


图6 修正量随扰动幅度(峰-峰值)的变化曲线(扰动频率为 12.4 Hz)

从图 6 中可以看出, 在 12.4 Hz 的扰动频率下, 即便扰动幅度达到 17.5 角秒(峰-峰值), 修正量仍然大于 80%。由于作为扰动源的激振器和激光器难于紧密连接的原因, 难以产生更大幅度的扰动, 所以, 没能对更大幅度的扰动进行测试。

从图 7 中可以看到校正过程中闭环修正的起始点。该图中纵坐标为电压, 它和扰动角度的关系为 1 V 对应 25 角秒(峰-峰值)。

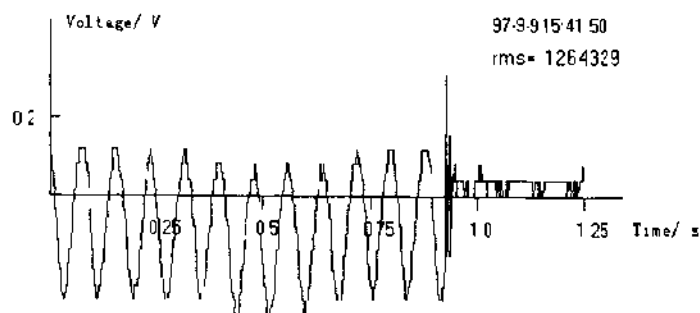


图7 在扰动频率为12.4 Hz时的校正过程, 图中的突变点为闭环修正的起始点

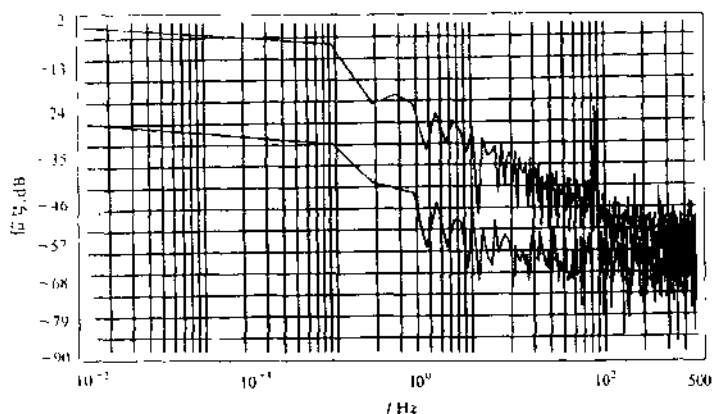


图8 一个扰动信号在被修正前后的功率谱

图8给出了一个扰动量分别在校正前后的功率谱, 从图中可见, 该系统对低频扰动有较好的修正效果, 而对于80 Hz以上扰动信号没有修正效果。

3 应用情况

配合我们实验室的望远镜跟踪系统进行了动态合作靶的跟踪实验。在 550 m 远的地方设置一个光源, 该光源安装在一个转动的圆盘上用来模拟漂移目标。在望远镜跟踪的基础上, FSM 系统进行了闭环对光斑的漂移实时补偿。用视频 CCD 对补偿后的远场光斑漂移情况进行采集, 图 9 和图 10 分别给出对 x 向漂移和 y 向漂移的修正结果, 采集频率为 25 帧/秒。几种情况下漂移量的均方值分别为:

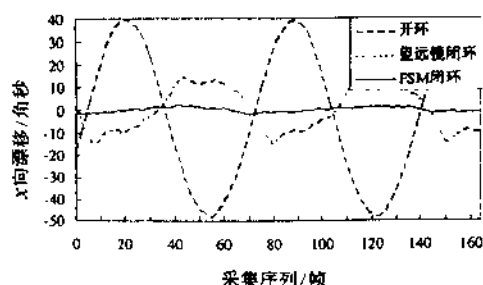


图9 x 向漂移修正情况

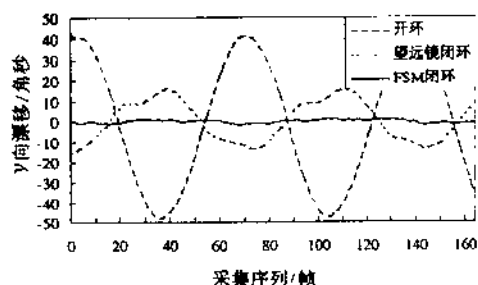


图10 y 向漂移修正情况

x 向漂移均方值 (角秒): 开环 30.64, 望远镜闭环而 FSM 开环 9.72, 望远镜和 FSM 都闭环 1.11。

y 向漂移均方值 (角秒): 开环 31.05, 望远镜闭环而 FSM 开环 9.62, 望远镜和 FSM 都闭环 0.80。

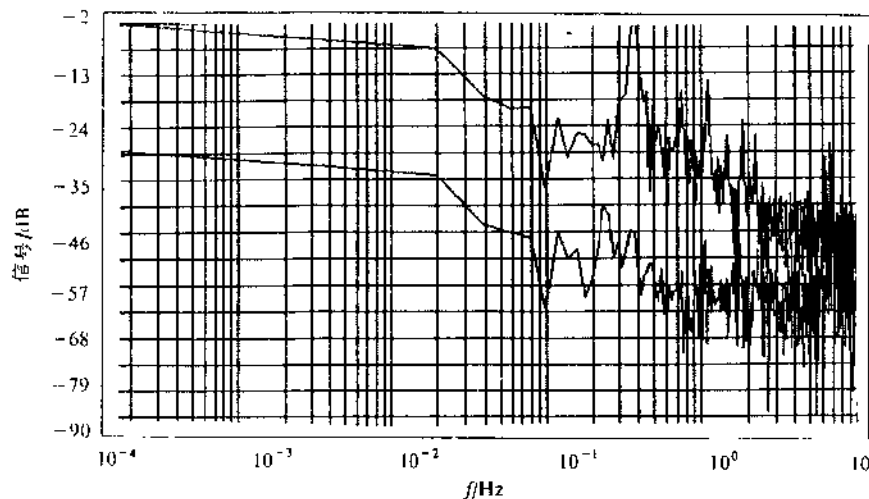


图11 望远镜闭环时FSM开、闭环时的功率谱

图11给出了上述相应条件下的功率谱，两条线分别代表望远镜闭环而FSM开环以及望远镜和FSM都闭环时的情况。

从上述实验结果可以得出结论：该四象限-快速剪切反射镜精跟踪系统能够配合望远镜跟踪系统对移动目标实现进一步的精确跟踪。

本工作得到了相关课题组的大力协作，特表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 孟宪如，万敏等 四象限快镜器的视场和空间分辨率，强辐射文集（1995~1996），1997
- 2 Watson J, et al Fast Steering Mirror Systems for the U-AVLIS Program at LLNL, SPIE Conferences, 1995, 2375: 96~102