

爬山法自适应光学波前校正系统

姜文汉 黄树辅 吴旭斌

(中国科学院光电技术研究所)

提要: 利用一个19单元变形反射镜、远场能量集中度探测器和高频振动控制(1)系统,它可以校正静态的和缓慢变化的动态波前误差。实验结果表明该系统可以校正大型激光工程的波前误差,改善其远场能量集中度。

Hill-climbing adaptive optics wavefront correction system

Jiang Wenhan, Huang Shufu, Wu Xubin

(Institute of Optics and Electronics, Academia Sinica, Chengdu)

Abstract: A 19-element serial hill-climbing adaptive optics system is introduced. By using a 19-element deformable mirror, a detector for sharpness of far-field spot and a dither control system, it can correct static and vary slow dynamic wavefront error. The hill-climbing control algorithm, experimental setup and correction effect are reported. Experimental result shows that this system can be used in large laser engineering system for wavefront error compensation and far field sharpness improvement.

引言

自适应光学技术提供了实时校正波前误差提高系统性能的手段,它实时测量出波前误差通过波前校正元件(变形反射镜)加以校正^[1~2],使系统保持在理想的工作状态。一般的自适应光学系统,由于要校正的波前误差变化比较快,需要用多路平行的工作方式,因而控制系统比较复杂。而对一些大型激光工程,静态误差和缓变的动态误差都比较大。如能对这部分误差实施校正,就能大大改善系统的性能。由于有足够的校正时间,就有可能不用并行校正而用串行工作、多次迭代的

方式,因而可大大简化自适应光学系统的结构^[3,4]。

我们建立了一套自适应光学系统,采用19单元变形反射镜,以通过焦面上小孔的能量为远场能量集中度(即波前误差校正程度)的探测指标,用串行工作的高频振动爬山法控制系统实现闭环控制,取得了一定的实验结果。

爬山法控制原理

爬山法控制系统中,通过在控制单元上施加试验扰动,检测被控参数变化的大小和

收稿日期:1986年10月4日。

方向,用它来判断在控制单元上应加的校正量的方向,在此方向上不断施加校正,直到被控参数达到极大值。控制单元是变形反射镜各驱动器的变形量,用它改变经过镜面反射后的波前相位。被控参数是通过焦面上小孔的光能量。波前误差被校正得越完善,则焦斑越接近衍射极限,通过小孔的能量也越大,因此可以用此能量作为检验波前误差的间接指标。

施加试验扰动的方式可有两种:1. 间断的正负增量,2. 连续的小振幅的高频振动^[2]。由于后者能够通过锁相放大器来消除噪声,具有更高的灵敏度。我们采用高频振

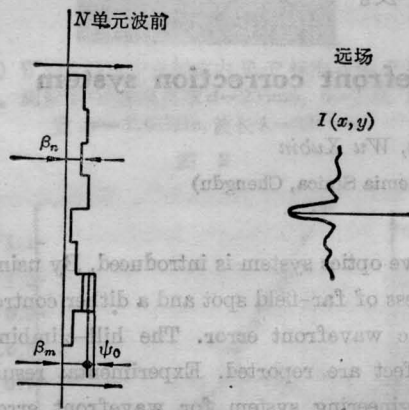


图1 爬山法自适应光学系统。由 N 个单元组成,各单元的光学相位 β_n ,在第 m 元上施加振幅为 ψ_0 的试验扰动。远场光强分布 $I(x, y)$

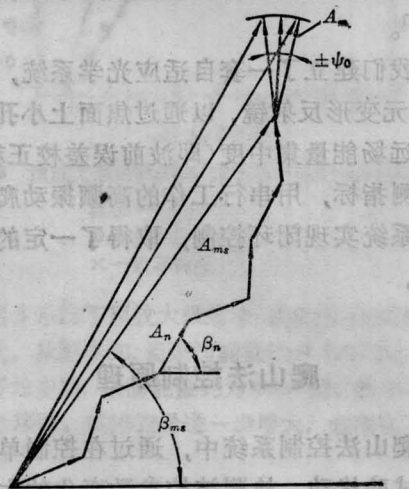


图2 光扰动向量

动法。

如光学系统的孔径由 N 个单元组成,各个孔径上的光学相位为 β_n ,其中第 m 个孔径上施加正弦相位扰动 $\psi_0 \sin \omega t$ 。各个孔径上的光振幅 A_i ,则在远场 O 点上的光强为

$$I = \left\{ \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^N A_n \exp(i\beta_n) + A_m \exp[i(\beta_m + \psi_0 \sin \omega t)] \right\}^2$$

$$= \{ A_{ms} \exp(i\beta_{ms}) + A_m \exp[i(\beta_m + \psi_0 \sin \omega t)] \}^2$$

$$= A_{ms}^2 + A_m^2 + 2A_{ms}A_m \cos(\beta_{ms} - \beta_m - \psi_0 \sin \omega t) \quad (1)$$

式中 $A_{ms} \exp(i\beta_{ms})$ 是除 m 外各孔径光扰动的向量和(图2)

$$A_{ms} = \left\{ \left[\sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^N A_n \cos \beta_n \right]^2 + \left[\sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^N A_n \sin \beta_n \right]^2 \right\}^{1/2}$$

$$\beta_{ms} = \tan^{-1} \frac{\sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^N A_n \sin \beta_n}{\sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^N A_n \cos \beta_n} \quad (2)$$

用贝塞尔-傅里叶级数展开(1)式

$$I = A_{ms}^2 + A_m^2 + 2A_{ms}A_m \{ J_0(\psi_0) \cos(\beta_{ms} - \beta_m) - 2J_1(\psi_0) \sin(\beta_{ms} - \beta_m) \sin \omega t + 2J_2(\psi_0) \cos(\beta_{ms} - \beta_m) \cos 2\omega t + \dots \}$$

$$= I_- + I_{\sim} \quad (3)$$

式中 $J_i(\psi_0)$ —— ψ_0 的 i 阶贝塞尔函数

$$I_- = A_{ms}^2 + A_m^2 + 2A_{ms}A_m J_0(\psi_0) \cos(\beta_{ms} - \beta_m)$$

$$I_{\sim} = -4A_{ms}A_m [J_1(\psi_0) \sin(\beta_{ms} - \beta_m) \sin \omega t - J_2(\psi_0) \cos(\beta_{ms} - \beta_m) \cos 2\omega t + \dots] \quad (4)$$

即在光强 I 中含有直流成分 I_- 和被调制的交流成分 I_{\sim} 。在 I_{\sim} 中,基频 ω 的调制振幅为

$$I_{\sim 1} = -4A_{ms}A_m J_1(\psi_0) \sin(\beta_{ms} - \beta_m) \quad (5)$$

当 $\beta_m = \beta_{ms} \pm k\pi$ (k 为整数), $I_{-1} = 0$, I_{-} 达到极值, 同时二次谐波的幅值也达到极值。

如将探测到的光强信号与正弦扰动的驱动信号进行同步检测, 即可取出基频成分

$$U_{\omega} \propto -J_1(\psi_0) \sin(\beta_{ms} - \beta_m) \quad (6)$$

将此信号反馈, 推动第 m 单元驱动器使 β_m 趋近 β_{ms} , 从而使 I_{-} 达到极值。对各个控制单元顺次实行爬山, 经过 N 次迭代, 即可使各控制单元的光学相位 β_n 实现同相, 即消除波前误差, 实现自适应光学波前校正。

对于连续表面的变形反射镜, 变形区内的变形是个渐变函数, 与前面分析的平移式的波前校正器有所不同。焦面上以有限大小的小孔为探测面积时, 探测到的光强将是

$$I_s = \int_{\text{小孔}} I(x, y) dx dy \quad (7)$$

情况比上述简化了的单点探测复杂。但基本规律仍然不变。

实验装置

实验装置光路如图 3。波前校正元件是 19 元变形反射镜(图 4)。用 19 个压电陶瓷驱动器推动面板产生变形, 驱动器按六边形布置。变形反射镜直径 $\phi 70\text{mm}$, 极间距离 15mm , 最大变形量 $\pm 1.5\mu\text{m}/\pm 600\text{V}$ 。谐振频率大于 2kHz 。

控制系统方框图见图 5, 19 元变形反射

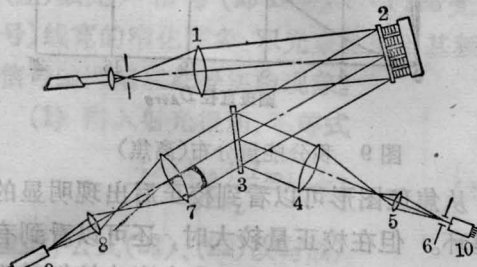


图 3 试验装置

1—扩束器; 2—变形反射镜; 3—分光镜; 4、7—会聚透镜; 5、8—显微物镜; 6—小孔; 9—电视摄像机; 10—光电管

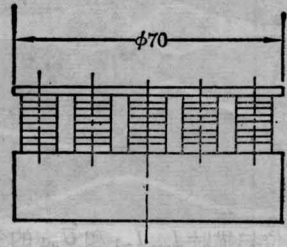


图 4 19 元变形反射镜

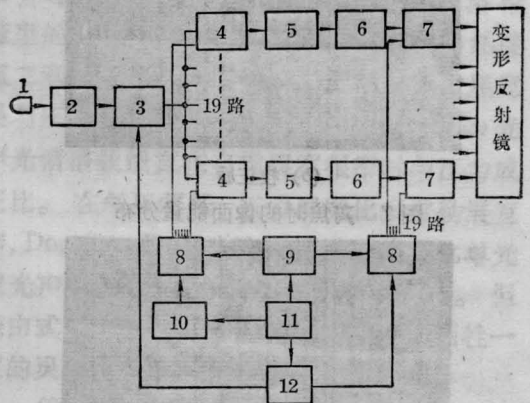
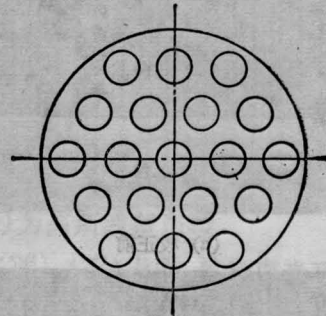


图 5 控制系统方框图

1—光电管; 2—前放; 3—锁入放大器; 4—步进机控制; 5—步进电机; 6—电位器; 7—高压放大器; 8—多路开关; 9—程序发生器; 10—步进电机信号; 11—主振荡器; 12—调制信号

镜由 19 个控制通道控制, 每个通道由步进电机驱动控制电路、步进电机、电位器和高压放大器组成。电位器由步进电机推动, 改变高压放大器输入电压, 从而改变压电陶瓷驱动器的工作电压, 使变形反射镜产生变形。19 路的工作由程序发生器控制。

实验结果

我们在变形反射镜的一个驱动器上, 除

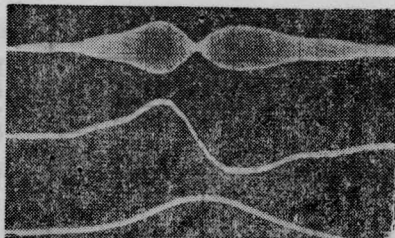
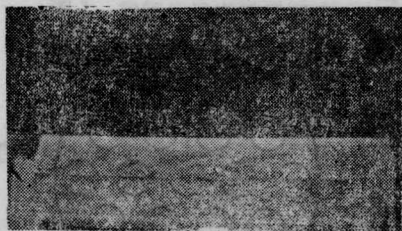
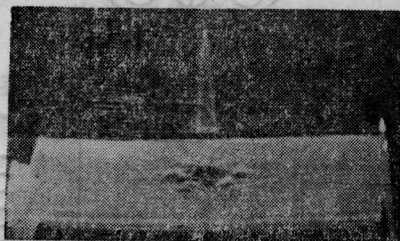


图6 相位扫描时 I_- 、 $I_{\sim 1}$ 和 U_{ω_1} 的变化情况

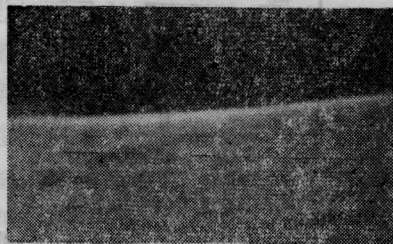


(a) 校正前

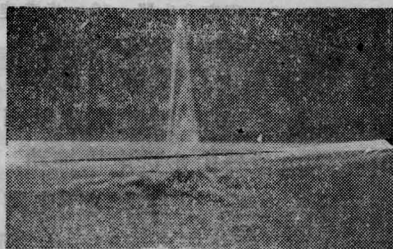


(b) 校正后

图7 离焦时的像面能量分布



(a) 校正前



(b) 校正后

图8 像散时的象面能量分布

施加正弦扰动外,还连续改变电压,使 β_m 作连续扫描。在示波器上显示有关信号(图6)。横坐标为高压放大器输出电压,反映驱动器

的变形即光学波前相位 β_m 的变化。曲线自上到下分别为光电信号中的一次谐波成分 I_{N1} , 直流成分 I_- , 锁相放大器输出 U_{ω_1} 和加在驱动器的调制信号。从图可见,在 I_- 达到极大处, $I_{\sim 1}$ 为零, U_{ω_1} 穿过零点, 在此点左右, U_{ω_1} 符号相反。用这一信号去控制步进电机驱动,使电位器向 $U_{\omega_1}=0$ 的点移动,从而使 I_- 达到极大值。

在系统中通过调节扩束器1(图3)的透镜和加入倾斜的平板,分别产生出以离焦和象散为主的波前误差。开动控制系统进行波前校正,通过电视摄像机输出进行校正效果的监测。图7、8分别是离焦和像散情况下的像面能量分布的三维立体显示图。图9、10是这两种情况下的积分能量分布曲线,横坐标是以爱里斑(Airy-disc)第一暗环直径 $d = 2.44 \frac{\lambda f}{D}$ 为单位的圆的直径,纵坐标是落入该圆内的能量百分比。从图7-10可见,校正的效果是很明显的,校正后能量集中度有很大提高,接近衍射极限。

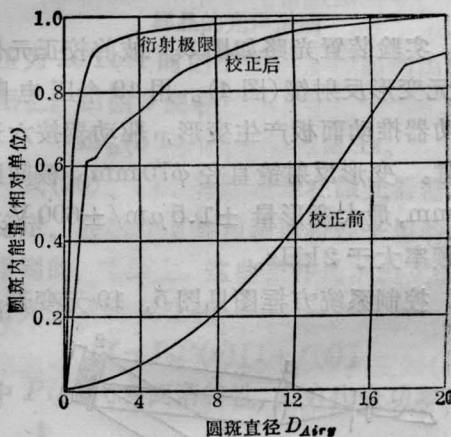


图9 积分能量分布(离焦)

从焦斑图形可以看到校正后出现明显的爱里环。但在校正量较大时,还可以看到有六角形分布的图形,能量集中度也较衍射极限为小。这是由于变形镜的驱动器呈六角形分布,在校正量较大时,残余波前误差也是六角形分布。因而造成雪花状的衍射斑。特别

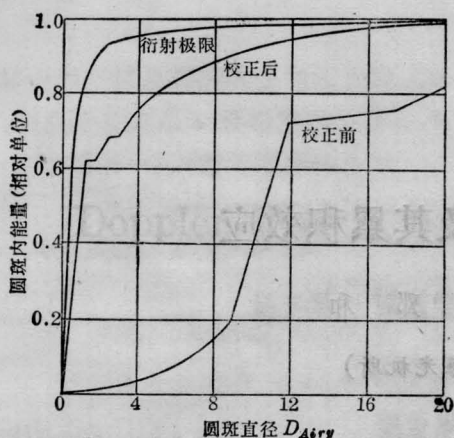


图 10 积分能量分布(像散)

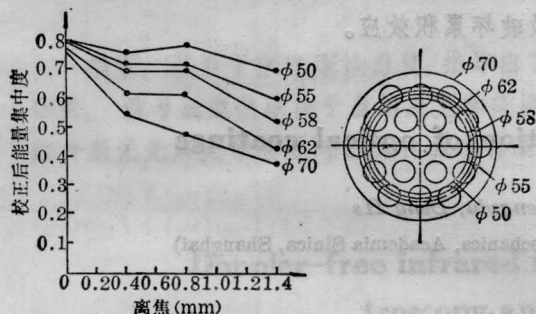


图 11 不同通光孔径下的校正效果

是最外层的致动器外侧的变形影响曲线与内

圈有较大的不同(图4),对衍射斑将有较大的影响。

我们在系统中加入光阑,分别缩小通光孔径。在不同的像差量下,测量校正后的能量集中度,以爱里斑直径内能量为代表得曲线(图11)。从图中可见,当通光孔径缩小到外圈致动器中心时,能量集中度就有很大改善,雪花状衍射斑也基本消失,说明主要是外圈驱动器外侧与被校正波前拟合不够造成残余波前误差。

实验证明,系统经过二、三次循环后即可实现最佳控制。

实验中所用的变形反射镜由凌宁提供,高压放大器由李明全提供;与上海光机所邓锡铭、余文炎、胡绍衣、范滇元等同志进行了有益的讨论。特此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 Pearson J E et al. *Applied Optics and Optical Engineering*, 1979; **7**: 245~340
- 2 Pearson J E et al. *JOSA*, 1977; **67**: 325~333
- 3 Viswanathan V K. *Proc. SPIE*, 1979; **190**: 251~257
- 4 Budgor A B. *Proc. SPIE*, 1981; **288**: 83~92

(上接第4页)

$$\begin{aligned} \Pi_3 = & -\frac{e^6 A_0^3 A_s^3}{4M^8 c^6 \gamma_{s0}} \\ & \times \left[\frac{1}{\sqrt{\gamma_{s-}} \gamma_{s+} \sqrt{\gamma_{s-}} \sqrt{\gamma_{s+}} (E_- - E_0 + \hbar\omega_s)} \right. \\ & \quad \times (E_+ - E_0 - 2\hbar\omega_s) \\ & \quad \times (E_+ - E_+ - \hbar\omega_s) \left. \right] \\ & + \frac{1}{\sqrt{\gamma_{s+}} \gamma_{s-} \sqrt{\gamma_{s+}} \sqrt{\gamma_{s-}} (E_+ - E_0 - \hbar\omega_s)} \\ & \quad \times (E_- - E_0 + 2\hbar\omega_s) \\ & \quad \times (E_- - E_- + \hbar\omega_s) \end{aligned} \quad (46)$$

其中 E_+ 、 E_- 、 γ_+ 、 γ_- 为 $p=p_0 \pm 2K\hbar$ 时的能量和 γ 值。注意, Π_1 与 G 的符号相反。因此(44)式给出了一阶退聚束项和三阶聚束项。因为这一项是给增益饱和的项。因此,

增益饱和来源于: ①退聚束效应降低了增益,产生饱和; ②三阶聚束的出现,它给出三次谐波的产生,从而降低了基波的增益,也产生饱和。

参 考 文 献

- 1 Colson W B. *Phys. Lett.*, 1977; **64A**: 190
- 2 Al-Abawi et al. *Phys. Rev. A*, 1977; **16**: 666
- 3 Fnedland L. *Phys. Fluids*, 1980; **23**: 2376
- 4 Fang H, Fu S. *Scientia Sinica A*, 1986; **20**: 290
- 5 Hopf F A et al. *Opt. Commun.*, 1976; **18**: 413
- 6 Abramowith M, Stegun I A. *Handbook of Mathematical Functions*. New York: Dover Pub., 1980: 722