

# 动态波前误差的自适应光学实时校正

姜 文 汉

(中国科学院光电技术研究所, 成都)

## 提 要

本文报道了在实验室里用由21元面阵变形反射镜、横向剪切干涉仪和平行控制系统构成的自适应光学系统实时校正动态波前误差的原理和实验结果。

关键词: 自适应光学; 波前测量; 变形反射镜。

## 一、引 言

光学仪器除了由设计、加工、装调等环节带来的静态波前误差使其性能降低以外,还经常受到随时间变化的动态波前误差的影响,例如,大气湍流对光学成像系统和激光传输的影响,大型光学设备的镜面和支承结构受温度和重力等条件变化而引起变形和失调,激光谐振腔内介质不均匀等引起光束质量降低,强激光在大气传输中受湍流和热晕影响造成光束发散等。传统的光学技术对这些问题是无能为力的。

随着自适应光学技术的出现和发展,使动态光学波前误差的实时校正成为可能<sup>[1,2]</sup>。自适应光学系统实时测量出波前误差,由控制电路反馈控制波前校正器对误差进行实时校正。如波前探测和校正子孔径小于波前扰动的相干尺度,系统的控制带宽大于扰动变化频率就可能实现动态波前的实时校正。我们在实验室内用自适应光学技术进行了21单元面阵控制的实时光学波前误差校正试验。目的是在实验室内检验校正大气湍流等动态因素对望远镜系统造成的波前误差,使望远镜的观测分辨率接近衍射极限所需的技术。现将系统原理和实验结果报道如下。

## 二、实验装置和原理

能够校正动态波前误差的极限分辨率望远镜原理如图1所示。

我们实验用的光学系统如图2所示。He-Ne激光器发出的激光束经扩束,滤波和准直再经过变形反射镜后分成三路。其中两路为 $x$ 向和 $y$ 向波前误差探测光路,另一路用于像质检查。

### 1. 变形反射镜

本实验用的变形反射镜为组合式压电变形镜,它有高频率响应、高灵敏度、变形量大和滞后小等优点。变形镜有21个驱动器用于波前误差校正,每两个驱动器之间距决定了波前探测子孔径的尺寸。21个驱动器分别在 $x, y$ 方向把入瞳分割成16个子孔径。图3中标

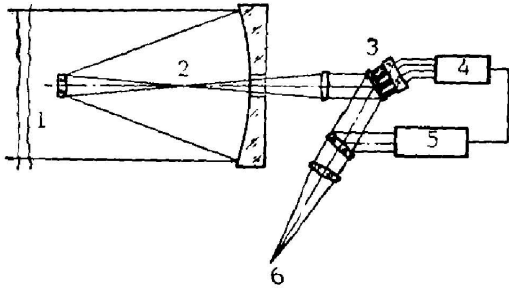


Fig. 1 Schematic layout of the diffraction-limited telescope

1—atmospheric turbulence; 2—uncorrected image; 3—deformable mirror; 4—controller; 5—wavefront error detector; 6—corrected image

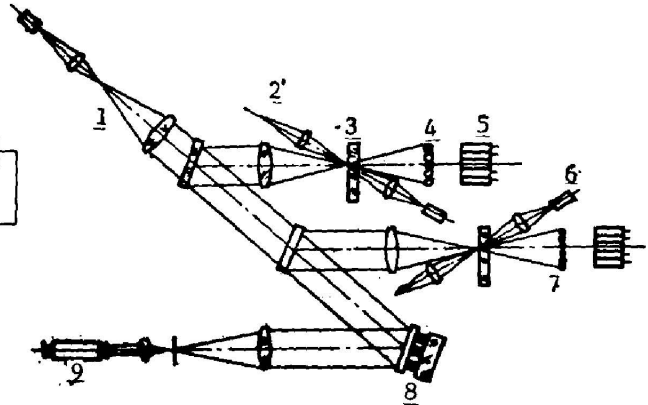


Fig. 2 Optical layout used in experiments

1—image-quality checking optics; 2—reference optical path; 3—grating; 4—lens; 5—detector array; 6—y direction detecting optical path; 7—x direction detecting optical path; 8—deformable mirror; 9—laser

有数字的小圆圈代表驱动器,  $x_1 \sim x_{16}$  为  $x$  向探测子孔径,  $y_1 \sim y_{16}$  为  $y$  向探测子孔径。在各个驱动器上加不同的控制电压, 它就能可控地改变贴在驱动器上的薄镜面的面形, 实现对波前的补偿。

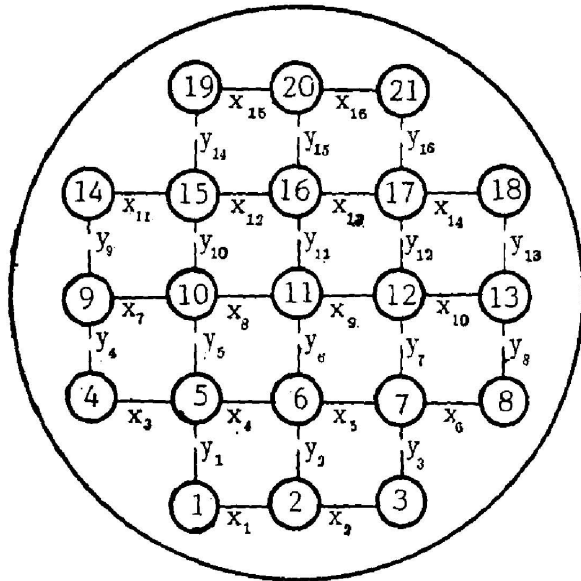


Fig. 3 Arrangement of the actuators of deformable mirror and the subapertures of wavefront sensor

整个变形镜由另外两个驱动器推动, 可自动地作两轴倾斜, 进行整体倾斜校正。变形反射镜通光孔径  $\phi 50 \text{ mm}$ , 最大变形量  $\pm 0.8 \mu\text{m}$ , 工作电压范围  $\pm 700 \text{ V}$ , 谐振频率  $> 7 \text{ kHz}$ 。

2. 波前误差实时探测

我们采用交变横向剪切干涉仪(如图4所示)探测动波前误差<sup>[3,4]</sup>。这里朗奇光栅具有两个重要的作用:

(1) 由衍射效应产生波前横向剪切, 形成自为基准的干涉仪。

(2) 旋转光栅时, 产生信号调制。信号的相位角表示波前斜率。

可以证明对波前  $W(x, y)$  在  $x$  方向剪切的干涉仪的调制信号中的基频成分为:

$$I(x, y, t) = \frac{2}{\pi} \cos \left[ \frac{\pi s^2}{\lambda} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right] \cos \left[ \omega t + \frac{2\pi}{\lambda} s \frac{\partial W}{\partial x} \right] \quad (1)$$

式中, 调制频率

$$\omega = 2\pi v/p \quad (2)$$

$x, y$ ——瞳面上坐标;  
 $v$ ——光栅旋转线速度;

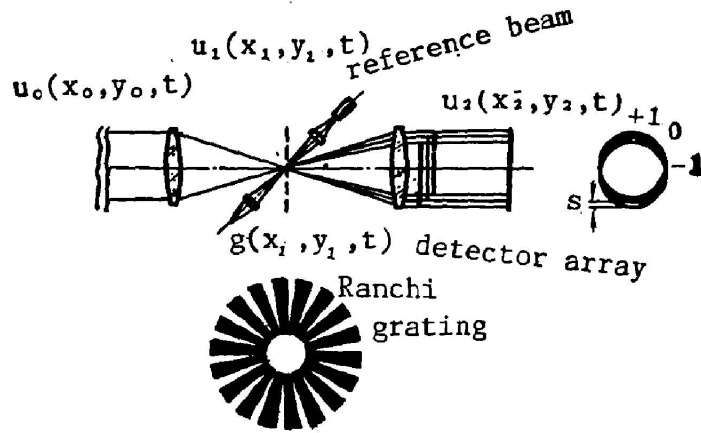


Fig. 4 Shearing interferometer

$p$ ——光栅刻划周期。

相位角

$$\theta = \frac{2\pi}{\lambda} s \frac{\partial W}{\partial x} \quad (3)$$

$s$ ——波前剪切量

探测器阵列中的光电接收器要和被测子孔径位置相对应,如图3所示。

为了提取波前相位差信息,在剪切干涉仪中用另外一束稳定的光线作为参考光路、为电学比相提供参考信号。经比相后得到相位角  $\theta$ , 代表该探测孔径范围内的平均波前斜率,由此得相邻子孔径间的波前差  $\phi$ 。

$$\phi = \frac{\lambda \theta d_i}{2\pi s}, \quad (4)$$

其中,  $d_i$  为  $\theta$  子孔径大小。

### 3. 电学控制系统

电学控制系统的方框图如图5所示。

被测光路和参考光路接收器接收到的信号经适当的处理后由乘法器鉴相。因为剪切干涉仪探测到的是子孔径内的波前平均斜率或波前差,必需由波前重构器将其换算为波前值,才能对被测的波前实施校正。波前重构计算可由计算机进行,也可用模拟网络来完成,后者具有简单、快速的特点。所以我们采用模拟网络来计算波前值,其原理简述如下:

设变形镜各驱动器对应的波前为  $W$ , 相邻各驱动器波前差为  $\phi$ , 对于  $N \times N$  个驱动器阵列就有  $N^2$  个波前值  $W$  和  $2N(N-1)$  个相位差  $\phi$ 。如以图6(a)所示的  $(j, k)$  点为例,可得:

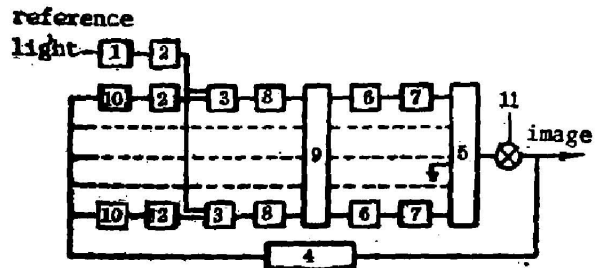


Fig. 5 Block diagram of the electrical control system

- 1—signal detector; 2—signal processor; 3—phase detection; 4—shearing interferometer; 5—deformable mirror; 6—correction network; 7—high voltage amplifier; 8—low pass filter; 9—wavefront reconstruction network; 10—wavefront slope detector; 11—analog turbulence signal

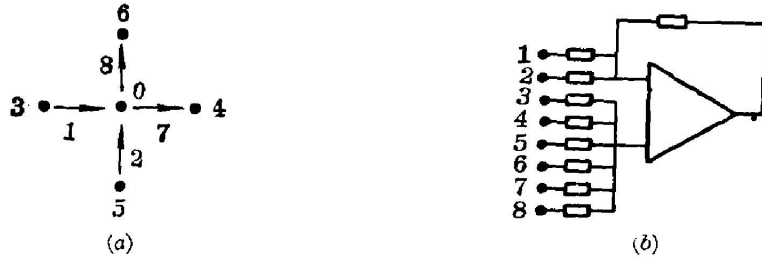


Fig. 6 Principle schema of the wavefront reconstruction analogue network

0— $W_{j,k}$ ; 1— $\phi_{j-1,k}$ ; 2— $\phi_{j,k-1}$ ; 3— $W_{j-1,k}$ ; 4— $W_{j+1,k}$ ; 5— $W_{j,k-1}$ ;  
6— $W_{j,k+1}$ ; 7— $\phi_{j+1,k}$ ; 8— $\phi_{j,k+1}$

$$\left. \begin{aligned} \phi_{j-1,k} &= W_{j-1,k} - W_{j,k} \\ \phi_{j+1,k} &= W_{j,k} - W_{j+1,k} \\ \phi_{j,k-1} &= W_{j,k-1} - W_{j,k} \\ \phi_{j,k+1} &= W_{j,k} - W_{j,k+1} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

显然  $2N(N-1) > N^2$ , 所以可用最小二乘法解矛盾方程组, 此矛盾方程组的法方程组有如下形式:

$$4W_{j,k} - W_{j-1,k} - W_{j+1,k} - W_{j,k-1} - W_{j,k+1} = -\phi_{j-1,k} - \phi_{j,k-1} + \phi_{j+1,k} + \phi_{j,k+1} \quad (6)$$

用矩阵形式可表示为:

$$AW = B\phi \quad (7)$$

求得,

$$W = A^{-1}B\phi \quad (8)$$

式中  $A$  为波前  $W$  的系数矩阵,  $A^{-1}$  是它的转置矩阵,  $B$  为相位差  $\phi$  的系数矩阵。当用模拟网络时,  $A$ 、 $B$  取决于探测阵列的结构。

将式(5)改写成以下形式:

$$W_{j,k} = \frac{1}{4} [W_{j,k-1} + W_{j,k+1} + W_{j-1,k} + W_{j+1,k} + \phi_{j+1,k} + \phi_{j,k+1} - \phi_{j-1,k} - \phi_{j,k-1}] \quad (9)$$

如图 5(b) 所示的单元组成的网络就能根据输入的相位差  $\phi$  解算出波前  $W$ , 计算单

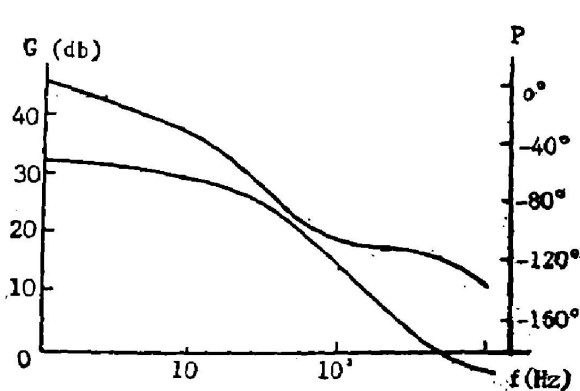


Fig. 7 Open-loop frequency response of the control system

元是由以  $W_{j,k-1}$ ,  $W_{j,k+1}$ ,  $W_{j-1,k}$ ,  $\phi_{j+1,k}$ ,  $\phi_{j-1,k}$ ,  $\phi_{j,k-1}$  (这些量来自其它点的计算电路),  $\phi_{j,k+1}$ ,  $\phi_{j+1,k}$ ,  $\phi_{j-1,k}$ ,  $\phi_{j,k-1}$  (这些量来自鉴相器的输出) 作为输入量, 放大系数为  $\frac{1}{4}$  的和差放大器计算电路构成。

为了补偿频率范围为几十到上百赫兹的大气湍流效应, 21 路并行控制系统中每路都要有相应的控制带宽。为此, 我们加了放大校正环节。控制系统的开环频率特性如图 7 所示。

#### 4. 像质检查

我们用电视测量动态波前误差校正前后的像点, 将电视视频信号经处理后得像点能量

分布的三维图形、又用电视图像信息数字采集系统和计算机对波前误差校正前后像点能量分布进行分析处理。

### 三、实验结果

在变形反射镜的驱动器上施加模拟大气湍流的干扰信号后,波前动态误差使像点质量下降、像面光能弥散,图 8 是扰动振幅分别是  $\pm 1\lambda$  和  $\pm 2\lambda$  时像面能量分布实测结果。



Fig. 8 The energy profile at image plane with perturbation, open-looped, amplitude (a)  $\pm 1\lambda$ ; (b)  $\pm 2\lambda$

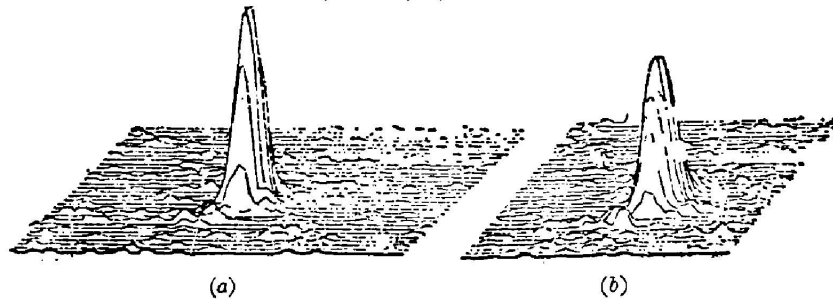


Fig. 9 The energy profile at image plane with perturbation, close-looped, frequency 50Hz (a)  $\pm 1\lambda$ ; (b)  $\pm 2\lambda$

在施加不同频率干扰的同时,开动自适应光学系统进行闭环控制,波前误差得到校正。图 9 是频率为 50 Hz, 振幅为  $\pm 1\lambda$  和  $\pm 2\lambda$  扰动下自适应光学校正后的像面能量分布的实测结果。

对实测的像面能量分布进行计算机数据采集和分析,计算出像斑上不同直径圆内光能量占总能量的百分数,得像面能量分布积分曲线。图 10 是频率为 100 Hz, 振幅为  $\pm 1\lambda$  波前扰动时校正前后的积分能量曲线。曲线中横坐标是以爱里斑第一暗环直径  $D = 2.44\lambda f/d$  为单位。 $d$  和  $f$  分别是光学系统口径和焦距。纵坐标是该直径圆内光能百分比。

施加不同频率的扰动(幅值  $\pm 1\lambda$ ),测得校正前后爱里斑第一暗环以内的能量百分数如表 1。衍射极限时爱里斑内能量占总能量的 83.8%。表中也列有实测值与理论衍射极限值之比。

由此可以看到通过自适应光学系统的校正,能量集中度有很大提高,接近理论衍射极限。

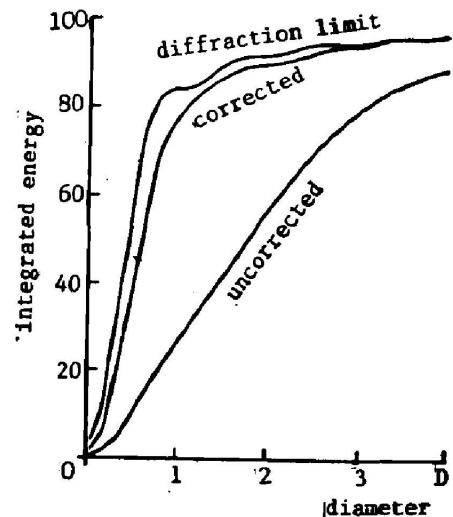


Fig. 10 Comparison of the integral energy at image plane with/without perturbation and diffraction limit

Table 1 Energy of image spot with  $D=2.44 \frac{\lambda}{\alpha} f$ 

perturbation frequency	without correction		with correction	
	measured value	measured value/ diffraction limit	measured value	measured value/ diffraction limit
50 Hz	26%	31%	80%	96%
100 Hz			78%	93.5%
300 Hz			60%	71%

此外,我们用频率响应分析仪测到,对振幅为一个波长,频率为 1 Hz, 10 Hz, 100 Hz, 300 Hz 的模拟信号,波前误差校正能力分别为 -35, -33, -17, -10, -6 dB。

#### 四、结 论

通过建立 21 元面阵自适应光学系统和波前误差校正试验,证明该系统可以对 300 Hz 以下的圆形孔径内的动态波前误差实施校正,校正效果是明显的;面阵动态波前误差的探测,波前复原模拟计算网络的原理是正确的;控制系统的带宽是足够的;21 元变形反射镜工作正常。

研制实验装置和进行实验的主要人员还有:李明全、王文明、严佩英、戴子昌、郝沛明。凌宁、余蓓文提供变形反射镜。荣志钧、李梅、肖时江等进行了计算机数据采集和处理工作,此外还得到许多同志的帮助。本工作由中国科学院资助。在此一并致谢。

#### 参 考 文 献

- [1] J. W. Hardy; *Proc. IEEE*, 1978, **66**, No. 6 (Jun), 651~679.
- [2] J. E. Pearson, *et al.*; *Appl. Opt. & Opt. Eng.*, **7** (edited by R. R. Shannon & J. C. Wyant, Academic Press, New York, 1979), 245~340.
- [3] C. L. Koliopoulos; *Appl. Opt.*, 1980, **19**, No. 9 (May), 1523~1528.
- [4] W. H. Southwell; *J. O. S. A.*, 1980, **70**, No. 8 (Aug), 998~1005.

## Adaptive optics correction in real-time for dynamic wavefront errors

JIANG WENHAN

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

(Received 3 October 1986; revised 29 December 1986)

### Abstract

The principle of an adaptive optics system for correcting dynamic wavefront errors in real-time is introduced. This system consists of a 21-element deformable mirror, a lateral shearing interferometer and a parallel electrical control system. The experimental results show that it can effectively compensate dynamic wavefront errors with a bandwidth of 300 Hz.

**Key words:** adaptive optics; wavefront sensing; deformable mirror.