

自适应光学实时大气湍流补偿实验

姜文汉 严佩英 李明全 戴子昌

(中国科学院光电技术研究所, 成都双流)

提 要

本文报道了用自适应光学系统实时探测和校正距地面约 15 m 高的 340 m 水平传输通道上的大气湍流效应的实验。实验结果表明, 用自适应光学校正后, 对点目标和一定扩展度的扩展目标都可提高成像质量。

关键词: 自适应光学、大气湍流。

一、引 言

由于大气的湍流运动, 使大气的速度、温度和折射率在时间和空间域都产生随机起伏。当光波经过湍流大气传输时, 其振幅和相位也产生随机起伏。光波的振幅起伏就是所谓的“闪烁”效应, 表征闪烁强弱的主要特征量是对数强度方差 $\sigma_{\ln I}^2$, 其定义为

$$\sigma_{\ln I}^2 = \langle (\ln I - \ln \langle I \rangle)^2 \rangle, \quad (1)$$

式中 I 为瞬时光强, 尖括号 $\langle \rangle$ 表示系综平均。 $\sigma_{\ln I}^2$ 与湍流强度、光波波长及传输距离的理论关系式^[1]:

$$\sigma_{\ln I}^2 = A C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}, \quad (2)$$

式中 C_n 为折射率结构常数, 是表征湍流强度的一个参数, $k = (2\pi/\lambda)$, λ 是波长, L 是传输距离。系数 A 对于球面波和平面波分别为 0.496 和 1.23; 相位随机起伏^[2]会引起目标像漂移、跳动和扩散, 严重影响光学系统的成像质量, 使实际成像的极限分辨率受大气湍流的限制。

传统的光学技术对这种动态的扰动是无能为力的。但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。自适应光学技术是首先为补偿大气湍流引起的相位起伏而提出来的一项新的光学技术。

本文是作者在完成室内模拟试验^[3]的基础上, 分别在 1988 年 7~10 月和 1989 年 5~6 月用 21 单元自适应光学系统完成对点目标和扩展目标成像的实时大气湍流补偿实验。当系统实现闭环控制后得到比较满意的校正, 提高了光学系统成像质量。

二、实验装置

1. 自适应光学系统

用于校正大气湍流引起的动态波前误差的自适应光学系统如图 1 所示。主要由接收望

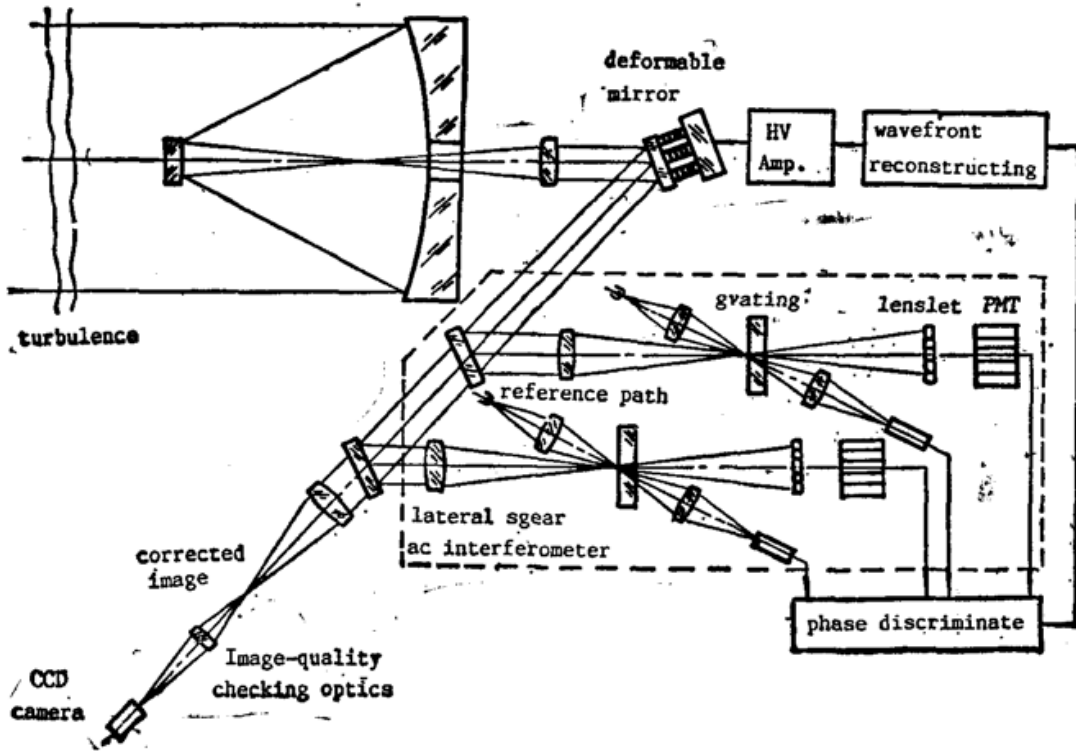


Fig. 1 The adaptive optical system for correcting atmospheric turbulence in real-time

远镜、交变横向剪切干涉仪、变形反射镜、电路控制系统和像质检查系统组成^[3]。

氦氖激光光源($\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$, 2.5 mW 功率)和自适应光学成像实验装置分别位于相距约 340 m 的二幢大楼的楼顶,离地面约 15 m。一台孔径为 200 mm,中心遮拦比为 1:3 的卡塞格林望远镜接收经过 340 m 水平大气通道传输的光波。

作为波前校正器的 21 单元分立式压电变形镜具有响应频率高、灵敏度高、变成量大和滞后小等优点。其具体参数为:控制单元数:21 单元(直角布置),直径:50 mm,最大变形量: $\pm 0.8\ \mu\text{m}/\pm 600\ \text{V}$,谐振频率 $\geq 7\ \text{kHz}$ 。

两个横向剪切干涉仪分别实时探测 X 、 Y 向波前相位差。光学波前 $w(x, y)$ 经朗奇光栅衍射形成自为基准的干涉场。当旋转光栅时产生信号调制。两组光电倍增管阵列分别接收输出的调制信号。对于点目标而言,其基频成分为^[4](以 X 向为例):

$$\left. \begin{aligned} I(x, y, t) &= \frac{2}{\pi} \cos \left[\frac{\pi s^2}{\lambda} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right] \cos(\omega t + \theta), \\ \theta &= \frac{2\pi}{\lambda} s \frac{\partial w}{\partial x}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 ω 为调制频率, s 为剪切量, λ 为波长, θ 为相位角。将其与没有扰动影响的参考信号相比,得到的相位差就是子孔径内波前斜率的量度。再经过波前重构网络,将波前斜率归算为波前误差。这些信号经适当的电学处理、放大后用于控制变形反射镜。电学控制系统带宽可达 300 Hz^[3]。

对于扩展目标*, 根据 Van Cittert-Zernike 定理^[5], 剪切干涉仪输出信号与光源的扩展度有关。由于目标扩展引起的信号减弱项是光源辐照度分布的傅里叶变换,其值与剪切

* 实验中用双点源作为扩展目标。

量有关。

设双点目标在光瞳面 (x_0, y_0) 的复振幅分别为:

$$\left. \begin{aligned} U_0(x_0, y_0, t) &= A_0(x_0, y_0, t) \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda} w(x_0, y_0, t)\right], \\ V_0(x_0, y_0, t) &= B_0(x_0, y_0, t) \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} \alpha x_0\right) \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda} w(x_0, y_0, t)\right], \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中 $A_0(x_0, y_0, t)$ 和 $B_0(x_0, y_0, t)$ 是光瞳函数, $W(x_0, y_0, t)$ 是波前分布, α 是两点角间距。可以证明,剪切干涉仪输出基频信号为

$$\begin{aligned} I(x, y, t) &= \frac{2}{\pi} \left[A_0^4(x, y, t) + B_0^4(x, y, t) + 2A_0^2(x, y, t)B_0^2(x, y, t) \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \alpha s\right) \right]^{1/2} \\ &\quad \times \cos\left(\frac{\pi s^2}{\lambda} \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right] \cos\left[\omega t + \frac{2\pi}{\lambda} s \frac{\partial w}{\partial x} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \tan^{-1} \frac{B_0^2(x, y, t) \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \alpha s\right)}{A_0^2(x, y, t) + B_0^2(x, y, t) \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \alpha s\right)} \right] \right), \end{aligned} \quad (5)$$

如果 $A_0(x, y, t) = B_0(x, y, t)$,则(5)式可写为

$$\begin{aligned} I(x, y, t) &= \frac{4}{\pi} A_0^2(x, y, t) \cos\left(\frac{\pi \alpha s}{\lambda}\right) \cos\left(\frac{\pi s^2}{\lambda} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right) \\ &\quad \times \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{\lambda} s \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\pi \alpha s}{\lambda}\right), \end{aligned} \quad (6)$$

式中 $\cos(\pi \alpha s / \lambda)$ 是由于双点目标的扩展引起的信号减弱项,它是双点源辐照度分布的傅里叶变换。该对比度降低项减小了基频信号的能量,降低了相位测量的信噪比,增加了自适应光学系统中的测量误差。值得注意的是,当 $(\pi \alpha s / \lambda) = (\pi / 2)$ 时,即 $\alpha = (\lambda / 2s)$ 时,基频 ω 的相位差信号调制度为零,不能探测出波前信息,系统不能实现闭环控制。

校正前后的目标像由 CCD 相机获取,由计算机和电视图像数据采集系统定量地分析像面的能量分布,测量爱里斑第一暗环内的环围能量与衍射极限时的理论值之比 S ,作为校正效果的判据。对于中心遮拦比为 1:3 的圆环形孔径,像面爱里斑直径 $d_s = (2.23 \lambda f / D)$, D 和 f 分别是望远镜口径和焦距。衍射极限时,爱里斑内能量占总能量的 68.2%。

2. r_0 测量系统

为了测量不同大气湍流条件下自适应光学的实时补偿能力,作者建立了测量大气相关长度 r_0 的装置。根据 Fried 定义^[2],相关长度 r_0 为

$$\left. \begin{aligned} r_{0 \text{ 平面波}} &= \left[\frac{6.88}{2.91} K^2 \int_0^L C_n^2(L) dL \right]^{3/5}, \\ r_{0 \text{ 球面波}} &= 1.8 r_{0 \text{ 平面波}}, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

当波长和传输距离一定时, r_0 只与 C_n 有关。而同一高度上的 C_n 可视为相同。因此,只要测出 C_n 就可计算 r_0 。又根据式(1)和式(2),通过测传输通道上激光强度起伏来测 C_n ^[3]。

作为光源的氦氖激光器以 1 mrad 发散角辐射。在卡塞格林望远镜前(中心遮拦处)加了闪烁接收装置。其光栏直径 0.8 mm,避免了孔径平滑效应而可视为点接收。光电倍增管将接收的闪烁信号送计算机采样,经 A/D 转换,计算光强对数方差 $\sigma_{\ln I}^2$ 、 C_n 和 r_0 。

三、实验结果

1. 点目标试验

点目标实验于 1988 年 7~10 月进行,共采集了 283 幅数据,其中开环 107 幅,闭环 176 幅。大气折射率结构常数的范围在 $2 \times 10^{-16} \sim 2 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 之间,大气相关长度在 20~340 mm 之间。图 2 表示补偿结果。图中横坐标为 r_0 mm,纵坐标为实测爱里斑内环围能量与衍射极限时的比。开环和闭环数据的最小二乘法拟合曲线方程分别为:

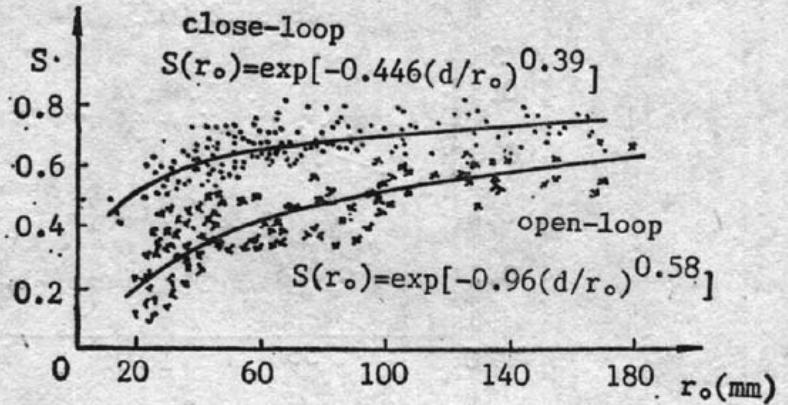


Fig. 2 The compensation effect for point source

$$\left. \begin{aligned} S_{\text{open}} &= \exp[-0.96(d/r_0)^{0.58}], \\ S_{\text{close}} &= \exp[-0.446(d/r_0)^{0.39}], \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中 d 为子孔径直径($d=50$ mm)。开环和闭环数据拟合的标准偏差分别为 0.055 和 0.075。当 $r_0=d=50$ mm 时,上两式的值分别为

$$S_{\text{open}}=0.38, \quad S_{\text{close}}=0.64. \quad (9)$$

图 3 表示了校正前后的像点及其三维能量分布。

2. 扩展目标实验

扩展目标实验在 1989 年 5~6 月间进行。为了尽可能少地改变实验系统,用两个氩氦激光器组成的双点源作为扩展目标。目标扩展度和剪切量之间的关系通过调节两激光束的间距变化。

对三种不同间距的双点目标(分别为 1.4 mm、3 mm、6.3 mm,对应的角间距分别为

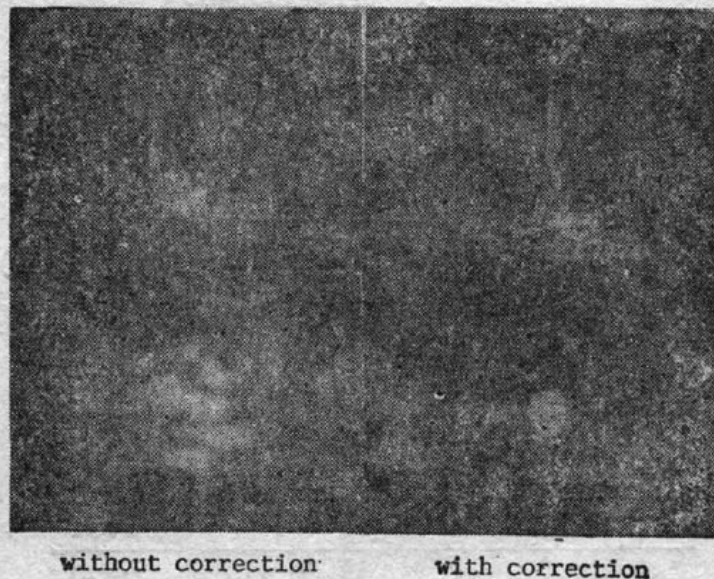


Fig. 3 The image and its 3-D energy distribution with and without correction for point source

0.85", 1.82", 3.82")进行了实验, 仍用上述的定量分析方法评价补偿效果。实验数据及其最小二乘法拟合曲线分别如图 4~6 所示。

当 $r_0 = d = 50$ mm 时, 爱里斑环围能量与衍射极限时的比值如表 1 所示。

校正前后的像点及其能量三维分布分别如图 7~9 所示。

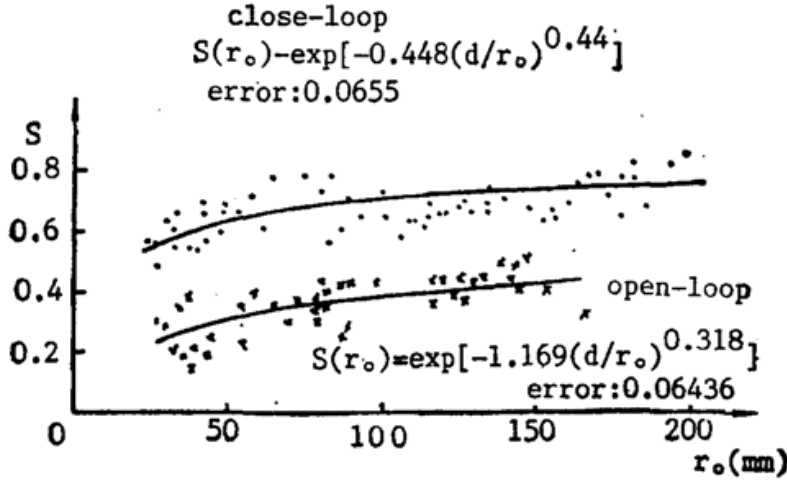


Fig. 4 The compensation effect for double source with space 1.4 mm ($\alpha=0.85''$)

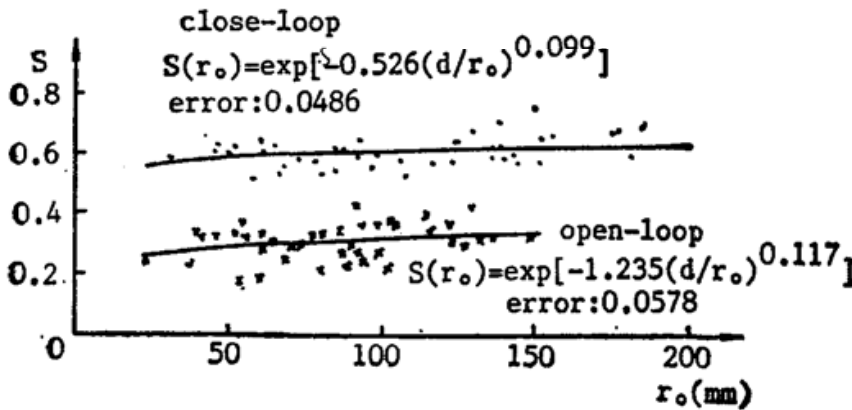


Fig. 5 The compensation effect for double source with space 3 mm ($\alpha=1.82''$)

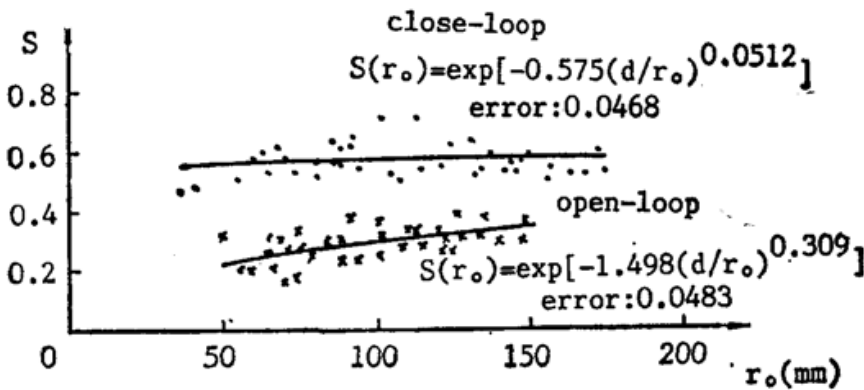
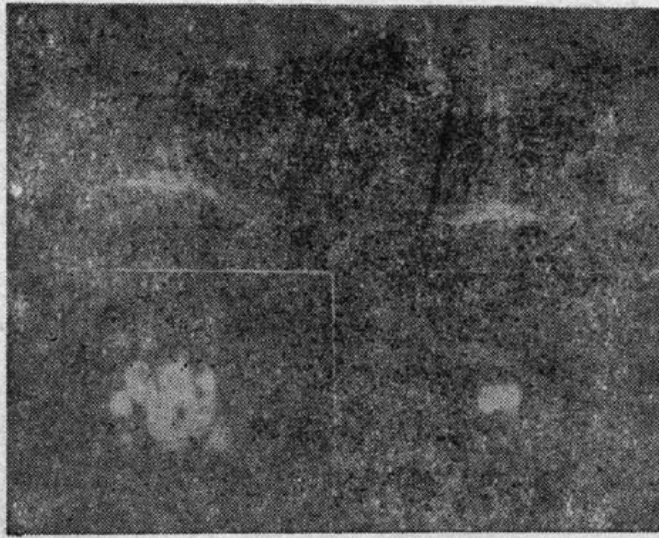


Fig. 6 The compensation effect for double source with space 6.3 mm ($\alpha=3.82''$)

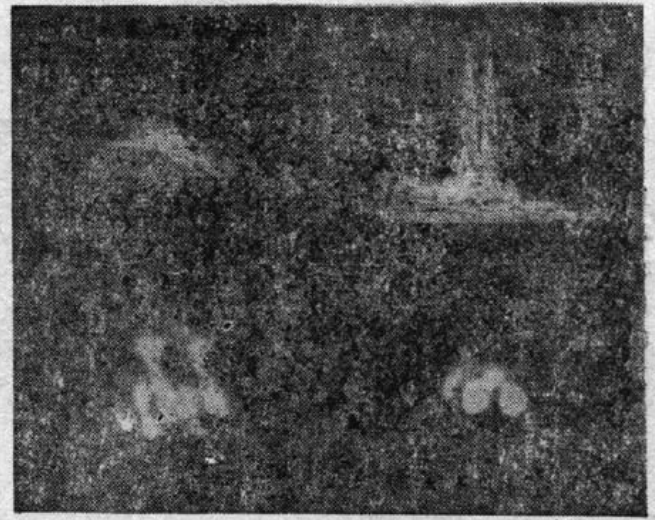
Table 1

space (mm)	$\alpha (")$	S_{close}	S_{open}
1.4	0.85	0.64	0.31
3	1.82	0.59	0.29
6.3	3.82	0.56	0.22



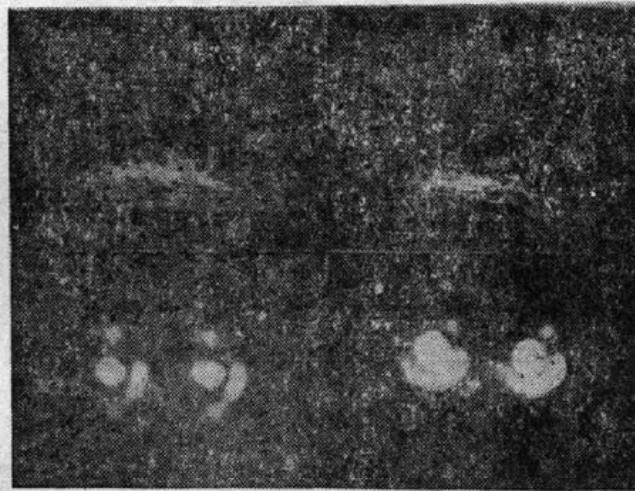
without correction with correction

Fig. 7 The image and its 3-D energy distribution with and without correction for double source with space 1.4 mm ($\alpha=0.85''$)



without correction with correction

Fig. 8 The image and its 3-D energy distribution with and without correction for double source with space 3 mm ($\alpha=1.82''$)



without correction with correction

Fig. 9 The image and its 3-D energy distribution with and without correction for double source with space 6.3 mm ($\alpha=3.82''$)

四、结 束 语

(1) 用自适应光学系统可以有效地补偿大气湍流效应,使光学系统成像质量大大地提高。对点目标和角间距小的扩展目标,闭环时的像质接近衍射极限。

(2) 用横向剪切干涉仪作为波前误差探测器时,对有一定扩展度(与干涉仪的剪切量、光源波长有关)的扩展目标仍能有效地工作。对目标扩展度的要求。

(3) 当大气相关长度 r_0 小于系统校正子孔径时,由于该系统对湍流中的低频成分仍有一定的补偿能力,所以闭环时像点能量集中度仍比开环时高。当大气相关长度 r_0 和系统校正子孔径相当或大于其值时,补偿效果更趋稳定。

研制该实验装置和参加过实验的主要人员还有王文明、李梅、李斌成、郝沛明。陵宇及其小组成员为实验提供了变形反射镜。一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] В. И. Татарский; «湍流大气中波的传播理论», (科学出版社, 北京, 1978), 164~185.
- [2] D. L. Fried; *J. O. S. A.*, 1965, **55**, No. 11 (Nov), 1427~1435.
- [3] 姜文汉; «光学学报», 1988, **8**, No. 5 (May), 441~447.
- [4] C. L. Koliopoulos; *Appl. Opt.*, 1980, **19**, No. 9 (May), 1523~1528.
- [5] M. Born, E. Wolf; «*Principles of Optics*», (Pergamon, Oxford, 1970), 508.
- [6] 宋正方等; «应用激光», 1982, **2**, No. 4 (Aug), 22~25.

Experiments of real-time atmospheric turbulence compensation with adaptive optical system

JIAN WENHAN, YAN PEIYING, LI MINGGUAN AND DAI ZICHANG
(*Institute of Optics & Electronics, Academia Sinica, Chengdu*)

(Received 5 December 1989; revised 13 February 1990)

Abstract

The experiments of using adaptive optical system to detect and correct the atmospheric turbulence effect in real-time along a 340 m horizontal path about 15 m above ground are reported. The results show that the image quality for point source and extended source with certain extension after corrected by adaptive optics is improved.

Key words: adaptive optics; atmospheric turbulence.