

用于扩展目标自适应光学校正的相关波前传感器的理论和实验*

邓罗根

(北京理工大学应用物理系, 北京 100081)

曹根瑞 俞 信 周仁忠

(北京理工大学工程光学系, 北京 100081)

摘 要 研究了使用非相干、扩展光源的波前误差测量技术, 分析了使用强度透过率型像面掩模的扩展目标相关波前探测原理, 讨论了模拟目标的选择问题, 探讨了根据目标图像生成像面掩模图像、进而制作像面掩模的方法, 给出了所生成的像面掩模图像的典型结果, 进行了以强度透过率型掩模为特征的单子孔径扩展目标波前传感器原理实验, 比较了两种不同掩模的波前探测效果, 获得了与理论分析一致的实验结果。

关键词 波前探测, 自适应光学, 相关技术, 太阳天文学, 光学信息处理, 图像处理。

1 引 言

自从 Babcock 提出自适应光学概念以来^[1], 作为自适应光学系统基本单元的波前传感器已得到广泛研究^[2~4]。这些传感器大多需要自然(或人造)导星那样的点参考光源进行波前探测。对于扩展目标作为信标的场合, 现有的波前传感器或者性能下降, 或者不能直接工作。

von der Lübe 首先研究非相干扩展目标的波前探测问题^[5,6]。其工作可归纳为以下四点: 1) 提出了利用像面调制掩模解决扩展目标波前误差测量问题的概念; 2) 以振幅透过率型掩模为例进行了所提出原理的分析处理; 3) 进行了一维数值模拟; 4) 考察了以所建议方法为基础构造实际器件的可能性。

本文在 von der Lübe 关于使用像面调制掩模获取波前误差信息的思想启发下, 对使用强度透过率型像面掩模的扩展目标波前传感器理论进行了分析, 探讨了根据目标像获得像面掩模图像、进而制作像面掩模的方法, 进行了以强度透过率型掩模为特征的扩展目标单子孔径波前传感器原理实验, 获得了与理论分析一致的实验结果。

2 原 理

* 国家 863 高技术计划 308 主题研究基金资助的项目。

收稿日期: 1994 年 2 月 5 日; 收到修改稿日期: 1994 年 4 月 14 日

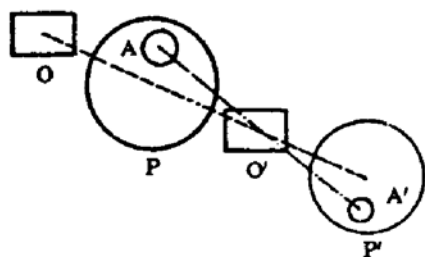


Fig. 1 The principle of correlation wavefront sensing. The target structure is located in the plane O. An optical system whose entrance pupil is in the plane P forms an image of target O in the focal plane O'. The entrance pupil plane P is reimaged to P' by additional optics. A denotes a subaperture in the position z and A' is the image of the subaperture A

考虑图 1 所示的光学系统。P 是入射光瞳，O 是扩展光源，O' 是焦平面。假设在没有波前扰动的条件下，目标 O 经入射光瞳在焦平面 O' 上所形成的像的光强度分布为 $i(x)$ ，则在存在波前扰动的情况下，目标 O 经入射光瞳上的子孔径 A 在焦平面 O' 上所形成的像的光强分布可表示为 $A(z)i(x - \zeta_z)$ ，此处， $A(z)$ 是与子孔径 A 的面积和位置有关的常数。 ζ_z 是入射光瞳 P 上子孔径 A 处的平均波前倾斜相对应的、目标在 O' 平面上的像位移量， z 是光瞳面 P 和 P' 上的两维坐标*。如果假设掩模的强度透过率分布与目标(像)的强度分布的关系为

$$m(x) = B + C[i(x + \Delta/2) - i(x - \Delta/2)] \quad (1)$$

式中 B 和 C 是在 0 和 1 之间限制透明掩模的常数， Δ 是图像自身移位相减所采用的相对位移量(简称掩模位移量)，那么可以通过测量 P' 面上 A' 处的积分强度来探测像位置。由于掩模插在焦面上，所以与子孔径 A 对应的掩模后表面上的光强分布为

$$I(x, \zeta_z, \Delta) = m(x) \cdot A(z)i(x - \zeta_z) \\ = B' \cdot i(x - \zeta_z) + C' [i(x + \Delta/2)i(x - \zeta_z) - i(x - \Delta/2)i(x - \zeta_z)] \quad (2)$$

式中 $B' = B \cdot A(z)$ ， $C' = C \cdot A(z)$ 。按几何光学处理，忽略衍射效应，认为来自子孔径 A 的光线通过光学系统后，全部进入其像孔径 A'。这样(2)式所表示的强度分布在子孔径 A 的像 A' 处所产生的总功率为

$$P_A(\zeta_z, \Delta) = \iint I(x, \zeta_z, \Delta) dx \quad (3)$$

式中，积分是对整个像面 O' 进行的。把(2)式代入(3)式，得

$$P_A(\zeta_z, \Delta) = B' F(0) + C' [r_i(\zeta_z + \Delta/2) - r_i(\zeta_z - \Delta/2)] \quad (4)$$

式中 $F(0) = \iint i(x) dx$ 是目标(像)的平均功率。 $r_i(x)$ 是目标(像)强度分布 $i(x)$ 的自相关函数，

$$r_i(x) = \iint i(\zeta) \cdot i(\zeta - x) d\zeta \quad (5)$$

根据 Wiener-Khintchine 定理，

$$r_i(x) = \iint |F(z)|^2 \exp(i2\pi x \cdot z) dz \quad (6)$$

$$F(z) = \iint i(x) \exp(-i2\pi x \cdot z) dx \quad (7)$$

式中 $|F(z)|^2$ 是目标强度分布的功率谱， $F(z)$ 是目标强度分布的两维傅里叶变换。对于功率谱不同的目标，其对应的目标强度分布的自相关函数 $r_i(x)$ 一般也不同。然而，对于一般的目标统计特性来说，功率谱随空间频率值 $|z|$ 的增加而平滑地减少的假定是良好的。所以，可以

* 为简单起见，用 x 表示物面 O 和焦面 O' 上的两维坐标 (x_1, x_2) ；用 z 表示光瞳面 P 和 P' 上的两维坐标 (z_1, z_2) 。另外，在(1)式中，如果 Δ 是 x_1 方向的，那么式中的 x 表示 x_1 ，如果 Δ 是 x_2 方向的，那么 x 表示 x_2 。余类推。

认为目标功率谱的函数分布形式介于矩形函数、圆域函数、三角函数和高斯函数的分布形式之间、考察这些函数的傅里叶逆变换，可以看出一个共同的特点，即它们在 $x = 0$ 处均有峰值，随着 $|x|$ 的增加，其值下降。最后以单调和减幅振荡方式趋近于零。无论上述那种形式的功率谱分布，都完全有理由认为在 $x = 0$ 附近的一个不太大的范围内，功率谱的傅里叶逆变换（即目标的自相关函数 $r_i(x)$ 随 $|x|$ 的增加是单调递减的。若把 $r_i(x)$ 单调递减到零所对应的 x 的变化区间称为目标结构的自相关宽度，则在自相关宽度范围内， $r_i(x)$ 的函数形式如图 2 所示，图中所示的是一维情况。事实上，根据实变函数之自相关函数的一般性质：(1) $r_i(x) \leq r_i(0)$ ；(2) $r_i(-x) = r_i(x)$ ；(3) $\lim_{|x| \rightarrow \infty} r_i(x) = 0$ ，所以亦有理由假设目标自相关函数 $r_i(x)$ 在其自相关宽度 l_c 范围内具有图 2 所示的曲线形式。

下面讨论子孔径强度信号 P_A 与波前倾斜所对应的目标像移量（简称波前倾斜） ζ_s 和掩模位移量 Δ 之间的关系。根据(4)式，忽略直流基底和比例常数，得：

$$P_A(\zeta_s, \Delta) = r_i(\zeta_s + \Delta/2) - r_i(\zeta_s - \Delta/2) \quad (8)$$

当 $\zeta_s = \pm \Delta/2$ 时， $P_A(\zeta_s, \Delta)$ 出现峰值。图 3(a)、(b) 和 (c) 分别描述了当 $\Delta > l_c$ ， $\Delta = l_c$ 和 $\Delta < l_c$ 时， $P_A(\zeta_s, \Delta)$ 与波前倾斜 ζ_s 之间的关系。

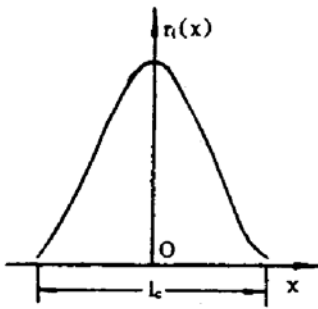


Fig. 2 The generic form of autocorrelation function of an extended incoherent target

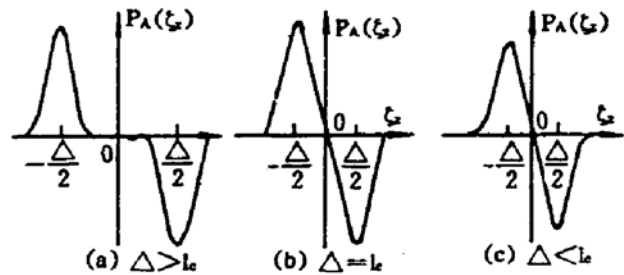


Fig. 3 The irradiance signal P_A in a subaperture versus the wavefront tilt ζ_s in the subaperture

从图 3 可以看出，为了保持信号 P_A 与波前倾斜 ζ_s 之间的线性关系，掩模位移量 Δ 不应比目标相关宽度 l_c 大。当掩模位移量 Δ 大于目标结构的自相关宽度 l_c 时，两个相关峰相距甚远，零波前倾斜附近，信号 P_A 与 ζ_s 的单调关系被破坏（见图 3(a)）；当掩模位移量 Δ 等于目标结构分布的自相关宽度 l_c 时，两个相关曲线在 $\zeta_s = 0$ 处相衔接，这时， $P_A(\zeta_s)$ 在 $\zeta_s \in (-\Delta/2, \Delta/2)$ 范围内将保持单调关系，并趋于线性。当 $\Delta < l_c$ 时， $P_A(\zeta_s)$ 与 ζ_s 的线性关系增强，灵敏度提高。容易分析，当 $\Delta \leq l_c/2$ 时，信号幅度将显著下降。在 $\Delta \leq l_c$ 的条件下，允许测量的最大波前倾斜范围为 $\pm (\Delta/2)$ 。另外，根据上述分析，为了保持信号 $P_A(\zeta_s)$ 与 ζ_s 之间的单调、线性关系，掩模位移量 Δ 不能太大，也不能过小、位移量 Δ 的取值范围为

$$l_c/2 < \Delta < l_c \quad (9)$$

3 目标选择和像面掩模的制作

选择合适的目标图像作为模拟实验的目标是相关波前传感器实验研究需要考察的重要问题之一。从上节理论分析的步骤来看，相关波前探测理论对目标的唯一要求是希望目标能在空间范围上呈现某种能被有像差光学系统分辨的结构。结构越粗糙，响应的线性度越高。在

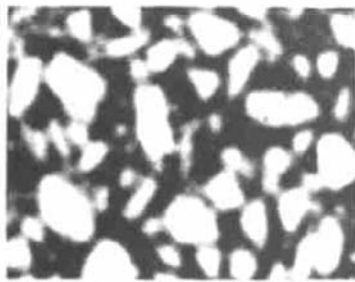


Fig. 4 A typical terrazzo floor pattern ($L_x = 65$ pixels) collected by a CCD camera

理论分析中,除了要求目标功率谱应限制在某一空间频率范围之内,并且其值随空间频率值的增加而平滑地减少之外,并没有对目标提出更特殊的要求。因此,在没有真实目标照片的情况下,利用日常生活中常见的一些准随机结构图案作为模拟实验的扩展目标,应该说是合理的。本实验中,选择实验室房间地面上水磨石自然图案作为实验用的扩展目标。图 4 是这种水磨石地面的一张典型照片。可以看出,除了对比度稍高之外,图案在空间结构上是随机的,没有明显的空间周期性。

根据所选择的目标图像,用普通照相的方法得到一张底片作为目标掩模是容易的。但是,欲想用普通照相术同时得到目标掩模和传感器中间像面上的像面掩模,并且保持目标掩模和像面掩模之间的严格比例关系就比较困难了。实验中,作者利用 CCD 相机采集目标图像,以图像处理的方法生成一定尺寸大小的像面掩模图像,然后让目标图像和像面掩模图像先后顺序地显示到同一监视器上,通过保持照相机和图像监视器的相对位置不变,用普通对屏幕照相的方法获得了尺寸比例关系比较精确的目标掩模和像面掩模底片。

图 5 是根据图 4 所示的目标图像经图像处理系统处理之后得到的像面掩模图像的典型结

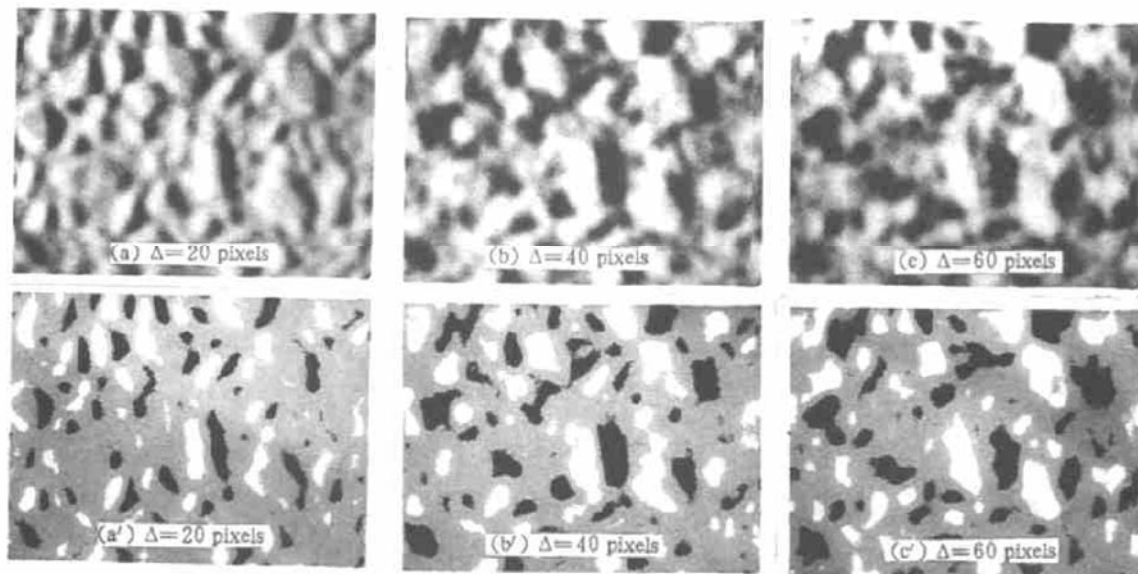


Fig. 5 The masks generated by processing the object irradiance distribution shown in Fig. 4, where (a'), (b') and (c') are the results of clipping the contrast of (a), (b) and (c), respectively. The image resolution is 512 by 512 (pixels) and the grey scale levels is 256

果。图中(a')、(b')和(c')分别是(a)、(b)、(c)经裁剪对比度之后的结果。所谓裁剪对比度就是使原图像中的灰度值发生某种变化。这里是三值化,即 $0 \sim V_m/3$ 范围内的灰度值一律置为 0; $V_m/3 \sim 2 \cdot V_m/3$ 范围内的灰度值一律取为 $V_m/2$; $2 \cdot V_m/3 \sim V_m$ 范围内的灰度值一律置为 V_m 。此处, V_m 是表示图像深度的最大灰度值。从图 5(a')、(b')和(c')可以看出,图中只有黑、白、灰三种明暗层次。后面将要说明,用裁剪掩模代替未裁剪的正常掩模,即用(a')代替(a), (b')代替(b)或用(c')代替(c),其波前探测效果是相同的。这一结果为使用灰度等级有限的液晶显示器类可寻址器件作像面掩模提供了实验依据。

4 系统布局和实验结果

单孔径相关波前传感器的模拟实验装置如图 6 所示。光源 S 、物镜 L 和位于其焦面上的目标掩模 M_1 组成无穷远扩展目标发生器。倾斜镜 M 被用来产生实验所需要的波前倾斜。透镜 L_1 接收来自目标发生器的平行光，在其像方焦面上形成目标结构 M_1 的实像。掩模 M_2 被安装在透镜 L_1 的像方焦面上，所包含的图像结构由目标移位相减产生，其有效利用尺寸（指有图像部分）与 M_1 在透镜 L_1 焦面上所形式的目标像相同。透镜 L_2 收集透过焦面掩模 M_2 的光，并把入射光瞳面 P 成像到探测器 D 上。透镜 L_1 的后焦面与透镜 L_2 的前焦面重合，两者一起组成望远系统。探测器 D 之前的斩波器把直流光信号转变为闪变光信号，以便进行后续电信号的放大处理。前置放大器把光电管 D 输出的光电流信号转变为一定幅度的电压信号。该电压信号被分成两路：一路接示波器显示波形，一路送锁定放大器实现相关检测。锁定放大器的参考信号由斩波器的驱动器提供，其频率等于瞬时斩波频率。信号大小从锁定放大器上的模拟电压数字显示面板读出。当倾斜镜 M 在 PZT 或手动干预下产生波前倾斜时，目标 M_1 在透镜 L_1 后焦面上的像相对于像面掩模 M_2 移动，致使透过 M_2 的光辐照度分布和到达探测器 D 的光通量发生变化。测出与特定波前倾斜对应的探测器输出信号大小，即可获得在目标 M_1 情况下，与像面掩模 M_2 对应的波前传感曲线。

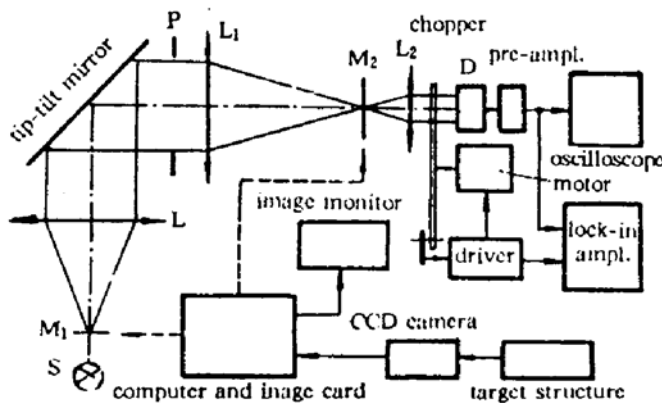


Fig. 6 Experimental setup

图 6 中，以计算机为中心的图像处理系统负责采集目标和产生制作掩模 M_2 所需的特定灰度级分布的图像（细节如上节所述）。

图 7 是在上述实验系统上测得的一组反映传感器输出信号与波前倾斜关系的曲线。不同的曲线对应相同的目标掩模和不同的像面掩模。图中，不同像面掩模用掩模位移量 Δ 区分。另外，曲线 b 是正常掩模的波前传感曲线，曲线 a 是与之对应的裁剪掩模的相应结果。

5 结 论

根据理论分析和图 7 所示的实验结果，可得出下列几点结论：

1) 在掩模位移量 Δ 满足(9)式的条件下，在零波前倾斜附近的一个相当大范围内，传感器输出信号与波前倾斜之间具有良好的线性关系。

2) 波前探测的线性范围 R 由掩模位移量 Δ 决定。 Δ 越大， R 也越大。但当 Δ 增加到一定数值，即当 $\Delta > l_c$ 后，传感器输出信号与波前倾斜的线性关系被破坏，这时从波前探测曲线上可看到两个分离的正、负相关峰。

3) 裁剪掩模和正常掩模具有类似的波前传感曲线，并且裁剪掩模的波前传感信号恒大

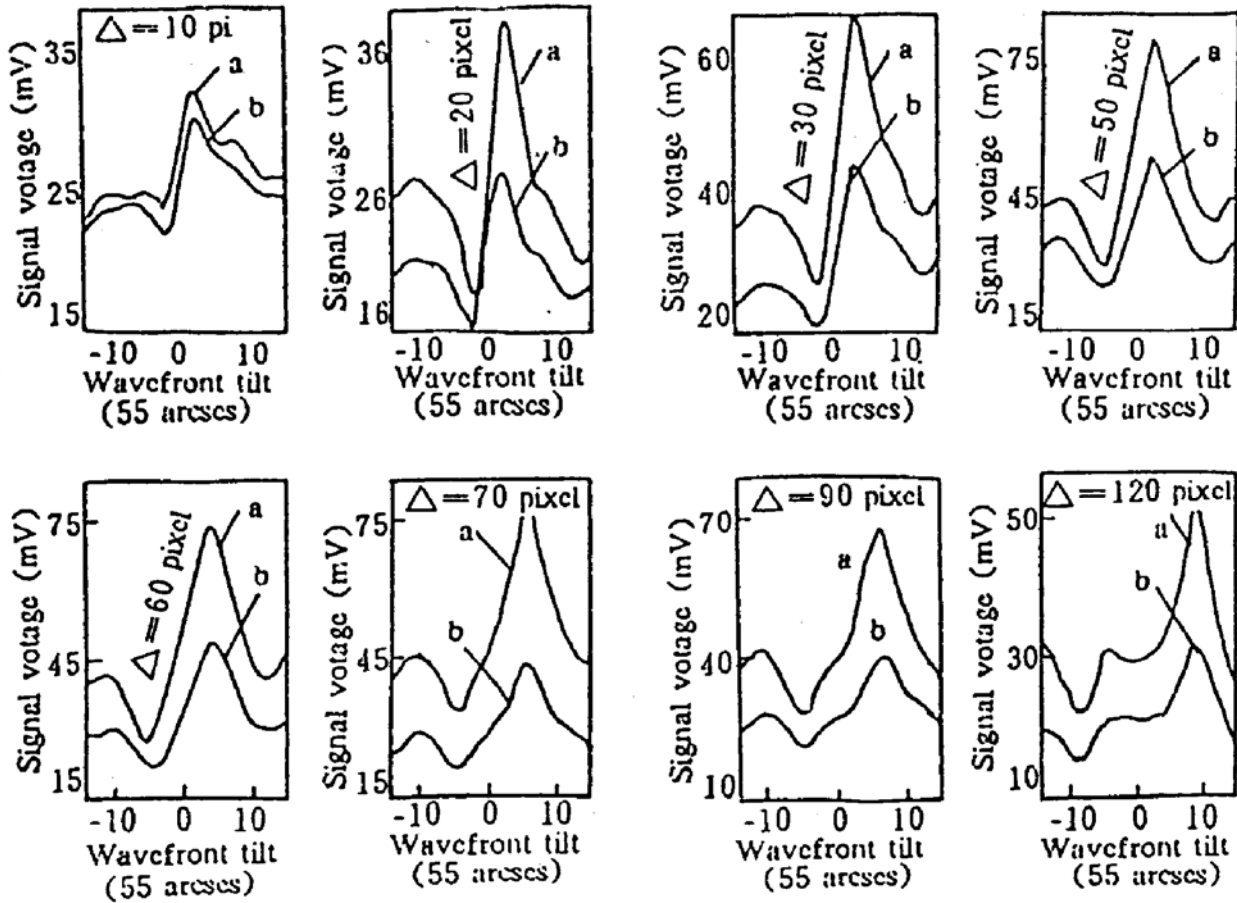


Fig. 7 The wavefront sensing curves plotted by the experimental data (a: clipping mask, b: normal mask)

于正常掩模的波前传感信号(曲线 a 高于曲线 b, 见图 7), 这说明裁剪掩模更有效地利用了信号光, 可以用裁剪掩模代替正常掩模而不影响波前探测效果。

相关波前传感器利用像面掩模和目标结构的空间和时间相关性获取波前误差信息, 适合于扩展、有结构目标的波前探测。为了获取波前误差的完整信息, 必须使用两个位移 (Δ_1, Δ_2) 方向正交的掩模和相应的光学系统来进行两个正交方向的波前探测。与传统的波前传感器(如 Hartmann-Shack 波前传感器和剪切干涉式波前传感器)相比, 相关波前探测方法充分利用了来自扩展目标的入射光信息, 不需要用光阑隔离方法选择亮点目标。在某些应用场合(如太阳天文学), 相关波前传感器将是传统波前传感器不可替代的重要器件。

参 考 文 献

- [1] H. W. Babcock, The possibility of compensating astronomical seeing. *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 1953, **65**: 229~236
- [2] C. L. Koliopoulos, Radial grating lateral shear heterodyne interferometer. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(9): 1523~1528
- [3] R. K. Tyson, *Principles of Adaptive Optics*, Academic Press, Boston, 1991, 117~182
- [4] F. Roddier, Curvature sensing and compensation: a new concept in adaptive optics. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(7): 1223~1225
- [5] O. von der Lühse, Wavefront error measurement technique using extended, incoherent light sources. *Opt. Eng.*, 1988, **27**(12): 1078~1087
- [6] R. B. Dunn, NSO/SP adaptive optics program. *Proc. SPIE*, 1990, **1271**: 216~231

Theory and Experiments on the Correlation Wavefront Sensor for Extended Object Adaptive Optics Corrections

Deng Luogen

(*Department of Applied Physics, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081*)

Cao Genrui Yu Xin Zhou renzhong

(*Department of Optical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081*)

(Received 5 February 1994; revised 14 April 1994)

Abstract Wavefront error measurement technique using an extended incoherent light source is investigated. The principle of extended target correlation wavefront sensing employing an irradiance-transmittance type of mask is analysed. The problems of simulation and selection of a target in laboratory experiments are discussed. The methods of generating the mask images from the target structure and of preparing the experimental masks from the mask image are explored. Typical results of the mask images generated by processing the object images are given. The effects of two different mask on wavefront sensing are compared. The experimental results which are agreement with the theory analyses are obtained.

Key words wavefront sensing, adaptive optics, correlation technique, solar astronomy, optical information processing, image processing.