

文章编号 : 0253-2239(2002)03-0285-05

太阳米粒结构相关哈特曼-夏克波前传感模拟研究*

饶长辉 张学军 姜文汉

(中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

摘要: 基于互相关因子和绝对差分算法以及哈特曼-夏克波前传感器的基本原理, 根据室内模拟太阳米粒结构研究了低对比度扩展目标情况下应用相关哈特曼-夏克波前传感器探测波前误差的可行性。结果表明, 相关哈特曼-夏克波前传感器能够有效探测光学波前误差。

关键词: 相关哈特曼-夏克波前传感器; 扩展目标; 互相关因子; 绝对差分算法

中图分类号: TP212.14 文献标识码: A

1 引 言

在许多太阳天文学研究中, 高分辨率太阳观测非常重要。由于大气湍流以及望远镜光学像质和机械跟踪抖动的影响, 地基太阳望远镜的光学成像分辨率受到限制。自适应光学技术能够实时测量并且校正受到大气湍流扰动的光学波前, 从而为高分辨率太阳观测提供了一条有效的途径。在星体目标高分辨率观测中, 自适应光学系统通常采用目标本身、暗目标邻近的亮星或激光导引星等点源信标进行波前误差探测。对于高分辨率太阳观测而言, 其波前探测所用信标只能由太阳表面米粒结构或太阳黑子等提供。太阳表面米粒结构或太阳黑子均属于低对比度扩展目标, 对于这些低对比度扩展目标的波前探测方法是一个非常重要的研究课题。根据国内外的文献^[1-4], 对于如太阳表面米粒结构这类低对比度扩展目标, 通常采用的波前误差探测方法有两种: 互相关因子算法和绝对差分算法。在以前的研究中^[5], 针对倾斜校正太阳自适应光学系统, 我们曾根据实际所采集的全孔径内的米粒结构图像研究了这两种算法的有效性, 结果表明这两种算法都能有效提取波前误差信号。在低阶校正太阳自适应光学系统(不只是一阶校正)中, 国外研究报道^[6]可以采用相关哈特曼-夏克(Hartmann-Shack)波前传感器进行波前误差探测。本文在简要介绍互相关因子和绝

对差分算法以及哈特曼-夏克波前传感器的基本原理的基础上, 根据室内模拟太阳米粒结构研究了低对比度扩展目标情况下应用相关哈特曼-夏克波前传感器探测波前误差的可行性。

2 低对比度扩展目标波前误差探测方法

对低对比度扩展目标进行波前误差信号探测时, 通常采用互相关因子算法和绝对差分算法。

2.1 互相关因子算法

这种方法首先计算不同位置偏移时参考图像和实际图像之间的互相关因子, 然后比较其值的大小, 取其最大值时所对应的位置偏移为探测波前误差信号。假设参考图像的光强为 I_R , 图像大小为 $N \times N$; 实际目标图像的光强为 I_L , 图像大小为 $M \times M$, $M < N$, 则互相关因子

$$\gamma_{LR}(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{M-1} I_R(i+u, j+v) I_L(i, j)}{\left[\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{M-1} I_R^2(i+u, j+v) \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{M-1} I_L^2(i, j) \right]^{1/2}} \quad (1)$$

为了使系统波前探测具有亚像素精度, 可采用二次曲线插值拟合, 这样所求得的波前整体倾斜信号可表示为

$$T_x = u_{\max} + \frac{1}{2} \frac{\gamma_{LR}(u_{\max} + 1, v_{\max}) - \gamma_{LR}(u_{\max} - 1, v_{\max})}{\gamma_{LR}(u_{\max} - 1, v_{\max}) + \gamma_{LR}(u_{\max} + 1, v_{\max}) - 2\gamma_{LR}(u_{\max}, v_{\max})}, \quad (2)$$

* 国家自然科学基金(19789301)重点资助课题。

收稿日期 2001-04-29; 收到修改稿日期 2001-06-04

$$T_y = v_{\max} + \frac{1}{2} \frac{\gamma_{\text{LR}}(u_{\max}, v_{\max} + 1) - \gamma_{\text{LR}}(u_{\max}, v_{\max} - 1)}{\gamma_{\text{LR}}(u_{\max}, v_{\max} - 1) + \gamma_{\text{LR}}(u_{\max}, v_{\max} + 1) - 2\gamma_{\text{LR}}(u_{\max}, v_{\max})}, \quad (3)$$

式中 u_{\max} 和 v_{\max} 为互相关因子值最大时所对应的 x 方向和 y 方向上的位移量。

2.2 绝对差分算法

这种方法首先计算不同位置偏移时参考图像和实际图像之间的绝对差分之和,然后比较其值的大小,取其最小值时所对应的位置偏移为探测波前误

差信号。即

$$D_{\text{LR}}(u, v) = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{M-1} |I_{\text{R}}(i+u, j+v) - I_{\text{L}}(i, j)|. \quad (4)$$

同样可采用二次曲线插值拟合使波前探测具有亚像素精度,这样波前整体倾斜信号可表示为

$$T_x = u_{\min} + \frac{1}{2} \frac{D_{\text{LR}}(u_{\min} + 1, v_{\min}) - D_{\text{LR}}(u_{\min} - 1, v_{\min})}{D_{\text{LR}}(u_{\min} - 1, v_{\min}) + D_{\text{LR}}(u_{\min} + 1, v_{\min}) - 2D_{\text{LR}}(u_{\min}, v_{\min})}, \quad (5)$$

$$T_y = v_{\min} + \frac{1}{2} \frac{D_{\text{LR}}(u_{\min}, v_{\min} + 1) - D_{\text{LR}}(u_{\min}, v_{\min} - 1)}{D_{\text{LR}}(u_{\min}, v_{\min} - 1) + D_{\text{LR}}(u_{\min}, v_{\min} + 1) - 2D_{\text{LR}}(u_{\min}, v_{\min})}, \quad (6)$$

式中 u_{\min} 和 v_{\min} 为绝对差分和最小时所对应的 x 方向和 y 方向上的位移量。

3 相关哈特曼-夏克波前传感器

哈特曼-夏克波前探测器^[7]广泛应用于自适应光学系统中。相关哈特曼-夏克波前传感器与传统的哈特曼-夏克波前传感器的基本组成完全相同,如图1所示,它主要由微透镜阵列、匹配透镜和 CCD 相机组成。传统的哈特曼-夏克波前传感器一般是采用重心算法测量阵列透镜焦面上畸变波前所成像斑的质心坐标位置与参考波前质心位置之差,再根据简单的几何关系就可以求出畸变波前上被各列透镜分割的子孔径范围内波前的平均斜率,进而可求得全孔径波前的相位分布。相关哈特曼-夏克波前传感器则是采用互相关因子或绝对差分算法计算子孔径波前斜率,再求出全孔径波前的相位分布。其具体过程是这样的:首先选取某一子孔径中的一个子区域作为参考图像,然后将此参考图像与各子孔径的光斑图像进行相关运算(互相关因子或绝对差分)得到各个子孔径中不同位置偏移时的相关值,再比较其大小得到各子孔径光斑相对参考图像的位

置偏移,根据偏移位置与参考波前质心位置之差正比于子孔径波前斜率可求出各子孔径的波前斜率。

4 模拟太阳米粒结构室内实验结果

为了正确判断相关哈特曼-夏克波前传感器的可行性,我们在室内进行了一系列光学波前探测实验。图2给出了实验光路布局图。实验中利用模拟米粒结构扩展源作为信标。该信标源通过透镜 L_1 准直后,再经透镜 L_2 和透镜 L_3 缩束变倍后耦合到阵列透镜上,经阵列透镜分割后,会聚到 CCD 探测器上进行图像采集。当引入光学像差时,我们在透镜 L_1 和透镜 L_2 之间插入像差板。在实验中还采用 $0.6328 \mu\text{m}$ 的 He-Ne 激光器作为哈特曼-夏克波前传感器(H-S WFS)标定光源。He-Ne 激光器光源和模拟米粒结构扩展源之间的切换是通过反射镜 M_1 的高低升降调整实现的。实验中系统主要参数为:口径 $D = 88 \text{ mm}$;子孔径数为 8×8 ,子孔径尺寸 $d = 10.39 \text{ mm}$,CCD 像素数为 128×128 ,系统采样率为 419 Hz ,CCD 数据位数为 12 位。

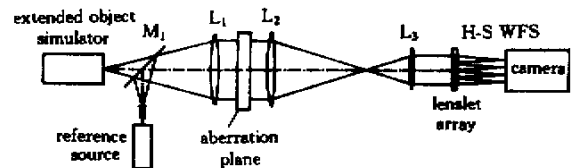


Fig. 2 The experimental setup for correlating Hartmann-Shack wavefront sensing

实验中实时采集存储 1024 帧 CCD 光斑图像,计算子孔径波前斜率,再经 35 阶策尼克模式波前复原出所测量的波面。图3给出了模拟米粒结构信标

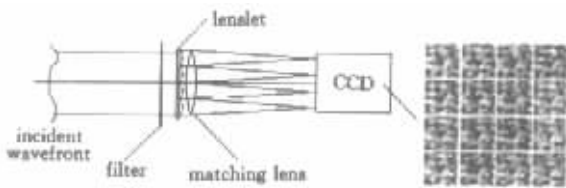


Fig. 1 Block diagram of correlating Hartmann-Shack wavefront sensor

情况下利用哈特曼-夏克传感器所采集的单帧 CCD 光斑图像。

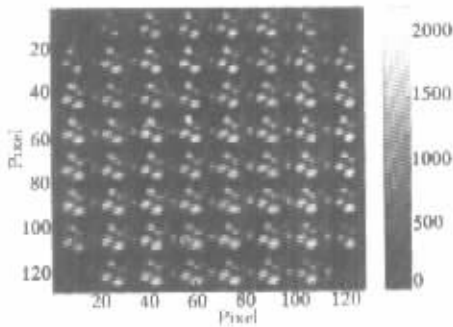


Fig. 3 The Hartmann-Shack spots of solar granulation simulator

为了评价在相关哈特曼-夏克波前传感器中,互相关因子和绝对差分这两种低对比度扩展目标波前误差探测方法的有效性,首先利用 Zygo 干涉仪对像差板进行波面误差标定,然后与模拟米粒结构信标情况下应用这两种算法所探测到的波面进行比较。图 4 给出了利用 Zygo 干涉仪所测量得到的像差板各阶模式系数和波面图。结果表明,此像差板的波面均方根误差约为 1.31λ , 峰谷值误差约为 6.17λ 。

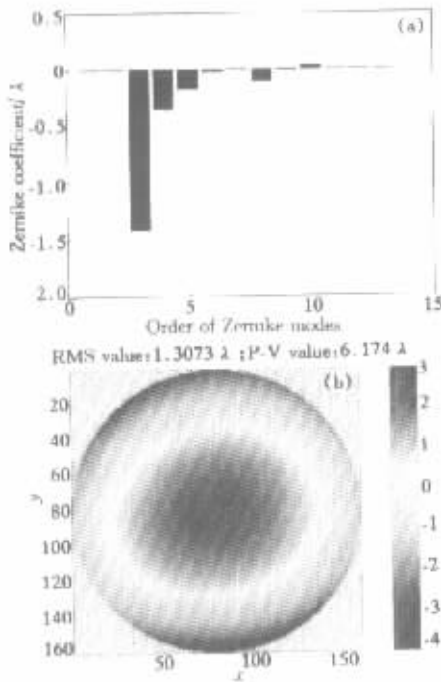


Fig. 4 The Zernike coefficient and the wavefront measured by Zygo interferometer

图 5 和图 6 分别给出了在系统中插入此像差板时应用互相关因子和绝对差分算法时所测量得到的波像差各阶模式系数和波面图以及与 Zygo 干涉仪

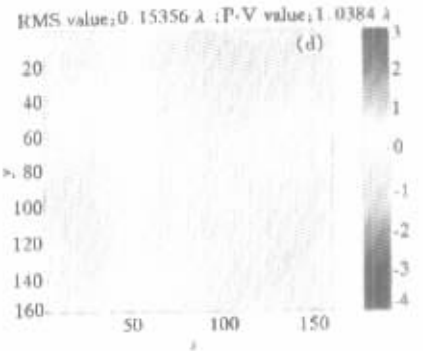
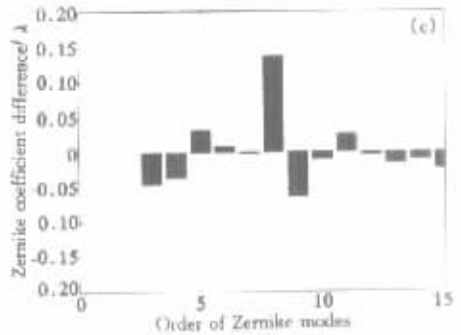
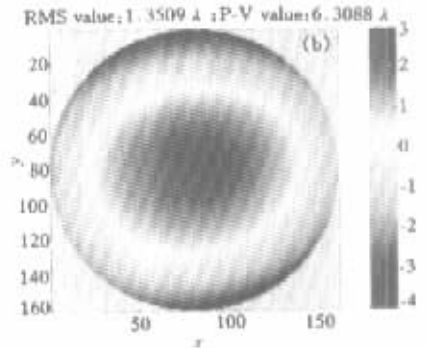
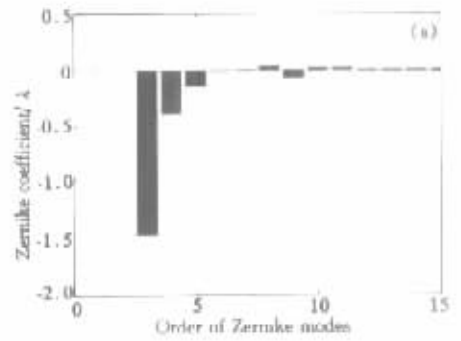


Fig. 5 The experimental results with the use of cross-correlation coefficient algorithm for correlating Hartmann-Shack wavefront sensor. (a) The measured Zernike modes coefficient; (b) The reconstructed wavefront; (c) The difference between the Zernike modes coefficients measured by H-S WFS and those measured by Zygo interferometer; (d) The difference between the wavefront measured by H-S WFS and those measured by Zygo interferometer

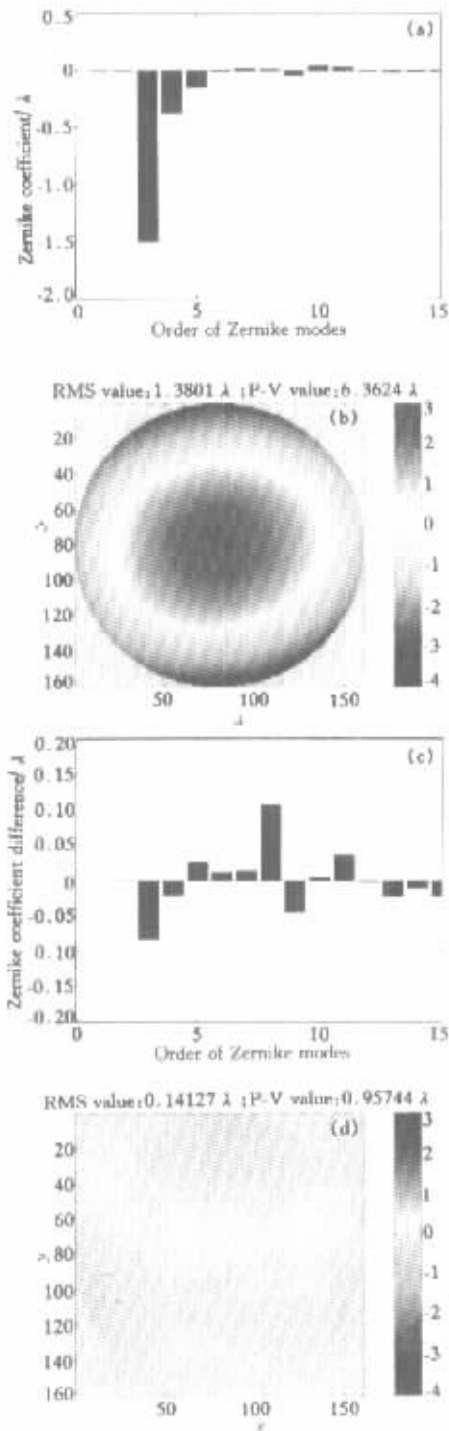


Fig.6 The experimental results with the use of absolute difference algorithm for correlating Hartmann-Shack wavefront sensor. (a) The measured Zernike modes coefficient;(b) The reconstructed wavefront;(c) The difference between the Zernike modes coefficients measured by H-S WFS and those measured by Zygo interferometer;(d) The difference between the wavefront measured by H-S WFS and those measured by Zygo interferometer

标定的像差板各阶模式系数之差和波面之差。从图5和图6可以看出,应用互相关因子和绝对差分算法所测量的波面的均方根值分别为 1.38λ 和 1.35λ 左右;此波面与Zygo干涉仪所测量得到的波面之间的波面差值的均方根值分别约为 0.14λ 和 0.15λ ;实验结果表明,从波前误差探测准确性角度来说,在相关哈特曼-夏克波前传感器中,采用互相关因子和绝对差分这两种低对比度扩展目标波前误差探测方法均可以有效提取光学波前误差信息。

此外,我们还对相关哈特曼-夏克波前传感器中,利用互相关因子和绝对差分这两种算法所探测到的波前斜率重复精度进行了计算。表1给出了实验结果,从表1可以看出所探测到的波前斜率的重复精度 σ_g 可以达到几百分之一像素。

Table 1. The detecting slope RMS error for correlating Hartmann-Shack wavefront sensor

	cross-correlation coefficient algorithm	absolute difference algorithm
σ_{gx}/pixel	0.0037	0.0054
σ_{gy}/pixel	0.0030	0.0038

结论与讨论 本文基于互相关因子和绝对差分算法以及哈特曼-夏克波前传感器的基本原理,根据室内模拟太阳米粒结构研究了低对比度扩展目标情况下应用相关哈特曼-夏克波前传感器探测波前误差的可行性。结果表明,无论从探测准确性,还是从探测重复精度来说,对于如太阳米粒结构这类低对比度扩展目标,利用相关哈特曼-夏克波前传感器可以有效探测光学波前误差。

必须指出,本文对相关哈特曼-夏克波前传感器的研究是在室内模拟进行的,没有考虑大气湍流造成的波前畸变的影响。在实际情况下,由于受到大气湍流的扰动作用,米粒结构的图像对比度将大为降低,这样势必会对系统测量造成一定的影响。这方面的研究将在以后进行。

感谢中国科学院光电技术研究所的杨泽平、饶学军和鲜浩等同志对本文工作的大力支持和帮助。

参 考 文 献

- [1] Ballesteros E, Collados M, Bonet J A *et al.*. Two-dimensional, high spatial resolution, solar spectroscopy using a correlation tracker. I: Correlation tracker description. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1996, **115** 353~365

- [2] Molodij G , Rayrole J , Madec P Y *et al.*. Performance analysis for T. H. E. M. I. S image stabilizer optical system. I. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* , 1996 , **118** :169 ~ 179
- [3] Molodij G , Rayrole J. Performance analysis for T. H. E. M. I. S image stabilizer optical system. II . Anisoplanatism limitations. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* , 1997 , **128** 229 ~ 244
- [4] von der Luhe O , Widener A L , Rimmele T *et al.*. Solar feature correlation tracker for grounded-based telescopes. *Astron. Astrophys. Ser.* , 1989 , **224** 351 ~ 360
- [5] Rao Changhui , Jiang Wenhan , Ling Ning. Tracking algorithm for low contrast extended object. *Acta Astronomica Sinica*(天文学报) , 2001 , **42**(3) :329 ~ 338 (in Chinese)
- [6] Rimmele T R , Radick R R. Solar adaptive optics at the national solar observatory. *Proc. SPIE* , 1998 , **3353** :72 ~ 81
- [7] Jiang Wenhan , Li Huagui. Hartmann-Shack wavefront sensing and wavefront control algorithm. *Proc. SPIE* , 1990 , **1271** 82 ~ 93

Simulation Study on Correlating Hartmann-Shack Wavefront Sensor for Solar Granulation

Rao Changhui Zhang Xuejun Jiang Wenhan

(*Institute of Optics and Electronics , The Chinese Academy of Sciences , Chengdu 610209*)

(Received 29 April 2001 ; revised 4 June 2001)

Abstract : Based on cross-correlation coefficient and absolute difference algorithms and the principle of Hartmann-Shack wavefront sensor , the feasibility of correlating Hartmann-Shack wavefront sensor used for low-contrast and extended object is studied according to the indoors solar granulation simulator. The results show that correlating Hartmann-Shack wavefront sensor can be efficiently used to detect wavefront aberration for low-contrast and extended object.

Key words : correlating Hartmann-Shack wavefront sensor ; extended object ; cross-correlation coefficient ; absolute difference algorithm.