

文章编号 : 0253-2239(2002)07-0789-05

基于哈特曼-夏克波前探测的图像解卷积 : 室内结果*

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: 在简要介绍哈特曼-夏克波前传感器原理和基于波前传感的目标图像解卷积恢复技术的基础上, 分别给出了室内模拟点源和扩展源情况时畸变目标光斑图像解卷积处理的实验结果。结果表明, 基于波前探测的图像解卷积事后处理能够有效地对畸变目标图像进行恢复。

关键词: 哈特曼-夏克波前传感器; 事后处理; 图像恢复; 扩展目标

中图分类号: TN911.73 文献标识码: A

1 引 言

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相位波前, 从而在天文观测、激光传输等领域得到广泛应用^[1,2]。一个典型的自适应光学系统主要由波前探测、波前重构和波前校正三部分组成。为了取得接近衍射极限的光学性能, 系统的技术要求非常高, 因而系统比较复杂, 成本昂贵。另外在一定的条件下, 自适应光学系统中不可避免地存在波前校正残余误差而使系统校正后的像质受到一定影响。为了简化系统和降低成本以及进一步提高自适应光学系统校正后的图像像质, 通常采用“事后处理”的办法, 对畸变光斑图像进行恢复^[3]。“事后处理”的方法有很多种, 其中基于波前探测的图像解卷积就是一种非常有效的办法。

哈特曼-夏克波前探测器^[2]是一种常见的波前探测器, 并在自适应光学系统中广泛采用。本文基于哈特曼-夏克波前传感器的图像恢复技术, 针对室内模拟点源和模拟扩展源两种信标, 分别对畸变光斑图像进行了图像解卷积处理。

2 哈特曼-夏克波前传感器原理

哈特曼-夏克波前传感器^[2]主要由微透镜阵列、匹配透镜和 CCD 相机组成, 如图 1 所示。一般情况下, 通常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阵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。

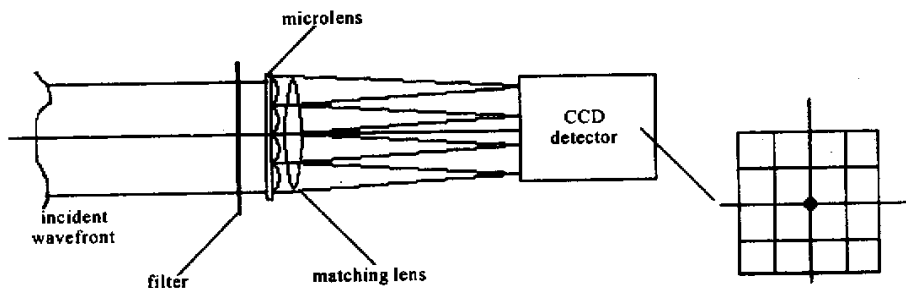


Fig. 1 Block diagram of Hartmann-Shack wavefront sensor

3 泽尼克模式波前复原

在自适应光学系统中, 通常根据哈特曼-夏克波

前传感器测量光波前在各个子孔径两个正交方向上的波前斜率来间接测量波前相位, 用矩阵形式表示为

$$g = Za, \quad (1)$$

其中 $g = [g_{1x}, g_{1y}, g_{2x}, g_{2y}, \dots, g_{Mx}, g_{My}]^T$ 是波前斜率向量, Z 是维数为 $2M \times N$ 的泽尼克模式斜率

* 国家自然科学基金(19789301)资助课题。

收稿日期 2001-05-17; 收到修改稿日期 2001-07-23

响应矩阵 $\mathbf{a} = [a_2, a_3, \dots, a_{N+1}]^T$ 为 N 阶泽尼克模式系数矩阵。

于是可以根据哈特曼-夏克波前传感器测量的波前斜率复原出各阶泽尼克模式系数,用矩阵形式表示为

$$\mathbf{a} = \mathbf{Z}^+ \mathbf{g}, \quad (2)$$

其中模式复原矩阵 \mathbf{Z}^+ 是模式斜率响应矩阵 \mathbf{Z} 的伪逆矩阵,维数为 $N \times 2M$ 。

$$\tilde{H}(f) = \int dx W(x) W(x - \lambda d_i f) \exp\{i[\tilde{\phi}(x) - \tilde{\phi}(x - \lambda d_i f)]\} / \int dx |W(x)|^2, \quad (3)$$

式中 λ 为成像光波长, d_i 为成像系统焦距, f 为空间频率, $\tilde{\phi}(x)$ 是根据哈特曼-夏克波前传感器测量的波前斜率所重构的波前相位, $W(x)$ 是瞳函数

$$W(x) = \begin{cases} 1, & |x| \leq D/2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

其中 D 为观测系统口径。

假设所记录的短曝光像的频谱为 $I(f)$,则在没有噪声的情况下的单帧目标频谱 $\tilde{O}(f)$ 可表示为

$$\tilde{O}(f) = \frac{I(f) \tilde{H}^*(f)}{|\tilde{H}(f)|^2}. \quad (4)$$

在实际有噪声的情况下,为了提高所恢复图像的信噪比,抑制测量噪声对恢复图像高频成分的影响,可以采用以下方法进行图像恢复^[3]:

$$\tilde{O}(f) = \frac{E\{I(f) \tilde{H}^*(f)\}}{E\{|\tilde{H}(f)|^2\} + \chi(f)}, \quad (5)$$

式中 $E\{\cdot\}$ 表示取数学期望, $\chi(f)$ 为抑制测量噪声对恢复图像高频成分的影响的一个函数。

5 室内实验结果

为了正确判断基于哈特曼-夏克波前传感器的

4 基于哈特曼-夏克波前传感器的图像解卷积

基于哈特曼-夏克波前传感器的图像解卷积^[3]是根据哈特曼-夏克波前传感器测量所获得的系统瞬时光学传递函数和同时记录的系统短曝光像进行解卷积运算的一种图像恢复技术。

在光学系统中,根据哈特曼-夏克波前传感器测量所获得的系统瞬时光学传递函数可以表示为^[3]

图像解卷积方法的可行性,我们在室内进行了一系列光学波前探测和成像实验。图 2 给出了实验光路布局图。实验中利用 He-Ne 激光点源和模拟扩展源作为样本。模拟点源和模拟扩展之间的切换是通过反射镜 M_1 的高低升降调整实现的。信标源通过透镜 L_1 准直后,引导到分光镜 BS_1 上,其反射光再经成像透镜 L_2 会聚到成像相机上,其透射光传递到哈特曼-夏克波前传感器上,由 CCD 探测器记录阵列透镜分割后的子孔径光斑图像,进行波前探测。当引入光学像差时,我们在透镜 L_1 和分光镜 BS_1 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-夏克波前传感器标定光源。实验中系统主要参数为:口径 $D = 88 \text{ mm}$;子孔径数 8×8 ;子孔径尺寸 $d = 10.39 \text{ mm}$;CCD 像素数: 128×128 ;系统采样率: 419 Hz ;CCD 数据位数: 12 位;成像相机:像素数 512×512 ,像素大小 $24 \mu\text{m}$,曝光时间可以调整。

在实验中由于波前传感器的采样时间和成像曝光时间不一致,因而无法做到波前传感器和成像数据的采集同时进行。但是由于系统中只存在光学静

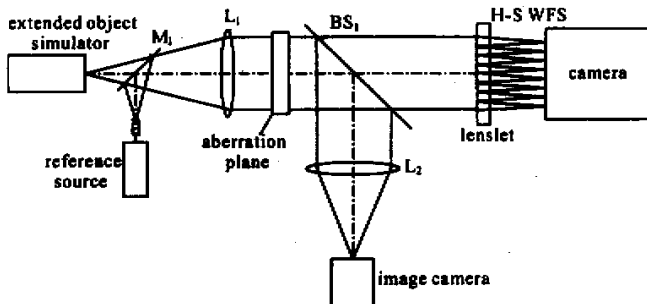


Fig. 2 The experimental setup for image deconvolution from wavefront sensing

态像差,因此在短时间内这并不影响波前传感器数据和成像数据的对应关系。实验过程和数据处理如下:

1) 在无像差情况下,用点源信标(由 $0.6328 \mu\text{m}$ 的 He-Ne 激光器产生,经透镜会聚和针孔滤波)作为系统标定光,采集哈特曼-夏克波前传感器图像(应用高帧频 CCD 图像采集卡)数据,计算哈特曼-夏克波前传感器各子孔径标定光斑位置。

2) 在系统中加入像差板,分别应用点源目标和模拟扩展源作为信标,采集哈特曼-夏克波前传感器图像和成像数据。根据所采集的波前传感器图像数据计算各子孔径光斑相对于标定光斑位置的偏移量,进而得到各子孔径波前斜率(此偏移量与波前斜率成正比)。

3) 根据波前斜率应用 35 阶泽尼克模式波前复原得到波前相位分布 $\varphi(x)$,并进而得到规格化瞳函数 $P(x) = W(x) \exp[j\varphi(x)]$ 对于非相干光,点扩散函数(PSF)为

$$F_{ps}(u) = |\mathcal{F}\{P(x)\}|,$$

其中 $\mathcal{F}\{\cdot\}$ 表示傅里叶变换。再根据系统光学传递函数(OTF)是点扩散函数的傅里叶变换关系,可以计算得到系统光学传递函数 $H(f)$ 。

4) 根据(5)式计算目标谱,进而得到被恢复的目标光斑图像。

5.1 点源情况

实验中,我们首先对点源情况下的畸变光斑图像进行了图形解卷积恢复,图 3 分别给出了三组不同像差情况下的畸变光斑图像、点扩散函数图像以及恢复光斑图像。实验中系统的衍射极限 ω (半峰全宽) $\lambda f_1/D$ (f_1 为成像焦距)为 3.2 pixel。从图中可以看出,经解卷积处理后的恢复光斑图像都达到了衍射极限分辨率。这也说明对于点源信标在一定的像差范围内,系统波前探测精度非常高,成像系统也比较完善,此时利用基于波前探测的图像解卷积事后处理可以非常有效地恢复畸变光斑图像。

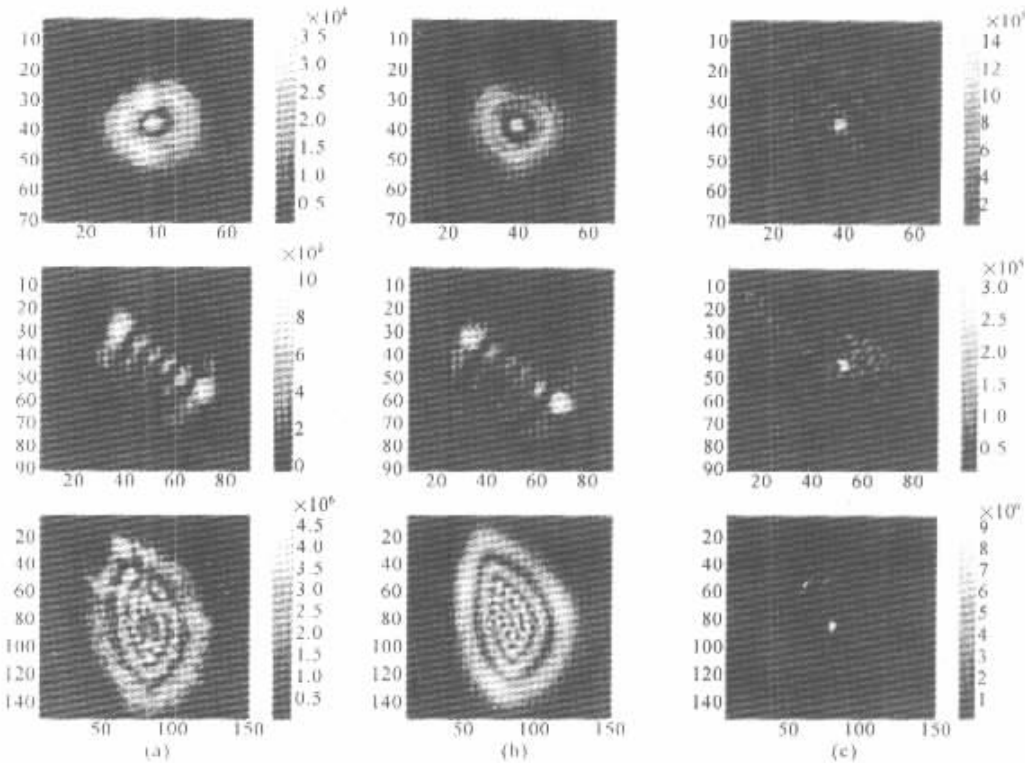


Fig. 3 Image deconvolution of three point sources with different aberration. (a) The raw blurred images ;(b) The point spread functions(PSF) derived from the Hartmann-Shack wavefront measurements ;(c) The deconvolved images. Unit in all figures is pixel

5.2 模拟扩展源情况

实验中,我们还对模拟扩展源情况下的畸变光斑图像进行了图形解卷积恢复。图 4 和图 5 分别给出

了两组不同像差情况下的畸变光斑图像、恢复光斑图像以及无像差情况时的光斑图像。在图 4 和图 5 中,目标尺寸相当于系统的衍射极限 ω 的 6.5 倍,约为

20 pixel。从图中可以看出,在像差较小(均方根误差为 0.35λ)的情况下,应用波前传感器测量的波前数据可以较好地恢复畸变光斑图像。在像差比较大(均方根误差为 0.97λ)的情况下,经解卷积事后处理后

虽然无法达到系统衍射极限,但是也可以明显改善畸变光斑像质。这也说明对于扩散信标,在一定的像差范围内,利用基于波前探测的图像解卷积事后处理也可以比较有效地恢复畸变光斑图像。

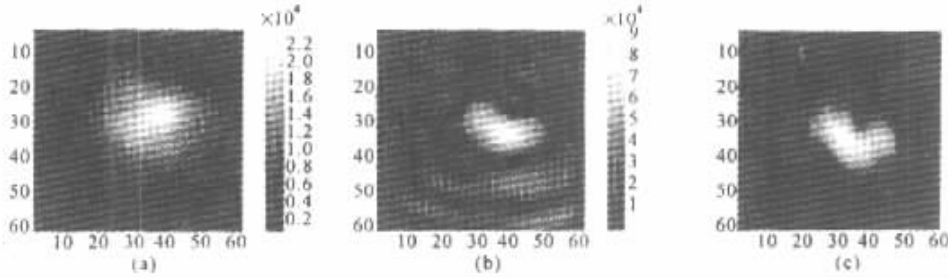


Fig. 4 Image deconvolution of extended source with 0.35λ rms aberration. (a) The raw blurred images ;(b) the deconvolved images ;(c) The extended object without aberration. Unit in all figures is pixel

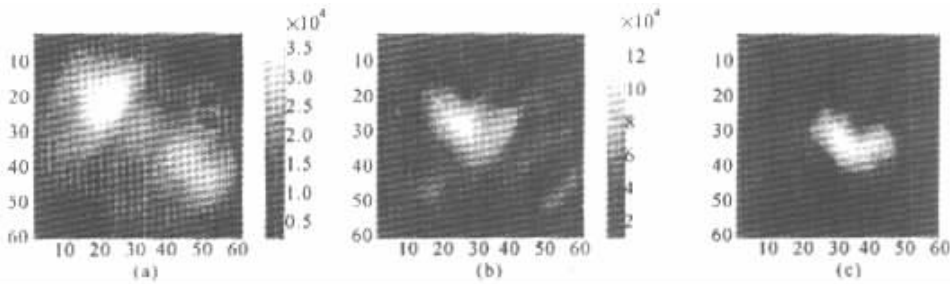


Fig. 5 Image deconvolution of extended source with 0.97λ rms aberration. (a) The raw blurred images ;(b) The deconvolved images ;(c) The extended object without aberration. United in all figures is pixel

5.3 结果分析

在本文对畸变光斑图像进行解卷积图像恢复中,我们对于图像高频成分抑制函数 $\chi(f)$ 的选取是取其为一常数。很显然, $\chi(f)$ 越大,图像高频成分抑制越多,同时实际图像的高频成分也没有得到相应恢复。

在点源情况下,由于系统探测非常准确,因此 $\chi(f)$ 取得非常小。这样图像的大部分频率成分都能够得到有效恢复,因此恢复后的光斑图像像质非常好。当然它也存在一些高频影响成分。

在扩展信标情况下,系统探测精度有所下降,相对低频成分而言,系统所探测到的高频成分准确度下降,因此 $\chi(f)$ 不能取得太小,实际处理时比点源时要大得多。这样实际图像的高频成分没有得到有效恢复,从而导致图像改善程度比点源时要差一些。并且像差越大(尤其是高频成分),改善程度越小。

结论 本文基于哈特曼-夏克波前传感器的图像恢复技术,针对室内模拟点源和模拟扩展源两种信标,分别对畸变光斑图像进行了图像解卷积处理。结果表明,对于点源信标,在一定的像差范围内,利用基

于波前探测的图像解卷积事后处理可以非常有效地恢复畸变光斑图像,对于扩展信标,利用基于波前探测的图像解卷积事后处理也可以较有效地恢复畸变光斑图像。

必须指出,本文的研究均是在信标光能比较强且只存在系统静态像差时进行的。在实际对大气湍流畸变光斑图像进行解卷积时,其影响因素要复杂一些,比如大气闪烁等,此时波前探测精度将受到一定影响,因而图像恢复效果也要受到一些影响。对于这方面的研究将在以后的工作中进行。

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] Jiang Wenhan, Tang Guomao, Li Mingquan *et al.*. Adaptive optical image compensation on stellar objects. *Opt. Engng.*, 1995, **34**(1):15~20
- [2] Jiang Wenhan, Li Huagui. Hartmann-Shack wavefront sensing and wavefront control algorithm. *Proc. SPIE*, 1990, **1237**:64~70
- [3] Roggemann M C, Welsh B M. *Imaging Through Turbulence*. New York: CRC Press, 1996

Image Deconvolution from Hartmann-Shack Wavefront Sensing : Indoors Experimental Results

Rao Changhui Zhang Xuejun Jiang Wenhan

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

(Received 17 May 2001 ; revised 23 July 2001)

Abstract : Based on the brief introduction of Hartmann-Shack wavefront sensor and image deconvolution from wavefront sensing , the experimental results of image restoration of the objects with aberration by deconvolving from wavefront sensing are presented for point sources and extended sources respectively. The results show that the post-processing technique of deconvolution from wavefront sensing can efficiently be used to restore the image with aberration.

Key words : Hartmann-Shack wavefront sensor ; post-processing ; image restoration ; extended object