

文章编号: 0253-2239(2004)10-1305-5

增量维纳滤波法在波前探测解卷积中的应用

胡 边 饶长辉

(中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

摘要: 一个常规的自适应光学系统通常包含三个重要环节:波前探测、波前校正和波前重构。因此对系统的技术要求非常高,造成系统复杂,成本昂贵。基于哈特曼-夏克波前探测的图像解卷积处理就是“事后”处理的一种,它省去了波前校正环节,使常规的自适应光学系统得到简化,降低了系统成本。其基本原理为对瞬时波面进行短时间曝光探测,同时记录相应的短时间曝光图像,来进行解卷积处理。将增量维纳滤波法应用于基于哈特曼-夏克波前探测的解卷积中,并对室内模拟点源情况下的三组畸变光斑图像数据进行了解卷积恢复处理。结果表明,将增量维纳滤波法应用于基于波前探测的解卷积是完全可行的,在室内模拟点源情况下,恢复的图像可以达到衍射极限分辨力。与维纳滤波相比,它扩展了噪声抑制因子的选取范围,在噪声抑制因子选取不正确的情况下,仍能得到比维纳滤波更好的结果。

关键词: 自适应光学; 解卷积; 增量维纳滤波; 图像恢复; 波前探测

中图分类号: TP202+.7 文献标识码: A

The Application of Incremental Wiener Filters in Image Deconvolution of Wavefront Sensing

Hu Bian Rao Changhui

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

(Received 4 August 2003; revised 29 December 2003)

Abstract: An adaptive-optics system usually contains wavefront sensing, wavefront correction, wavefront reconstructing. So the system is complex and expensive. Deconvolution based on Hartmann-Shack wavefront sensing is a kind of “post-processing”, for it does not need wavefront correction and the system is less complex and less expensive. The principle is sensing wavefront in short exposure and recording blurred images at the same time, which are used in deconvolution. Incremental Wiener filter is first applied to image deconvolution from wavefront sensing. Images of point sources indoors with aberration are processed and restored by incremental Wiener filters. The results show that incremental Wiener filters can efficiently be used in image deconvolution from wavefront sensing. The resolution of restored images can reach a diffraction limit in terms of point sources indoors. Compared with Wiener filter, it extends the selection range of noise restrain coefficient. Even the noise restrain coefficient is not properly chosen, it still has better restored image quality than Wiener filters.

Key words: adaptive optics; deconvolution; incremental Wiener filters; image restoration; wavefront sensing

1 引 言

在光波的大气传输过程中,由于大气湍流的随

机影响,导致光波质量下降。为了克服大气湍流对光波的干扰,通常有自适应光学(Adaptive optics)和“事后处理”(Post-processing)两种方法。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^[1,2],但系统比较复杂,成本昂贵。而“事后处理”方法则可简化系统并降低成本。“事

E-mail: hubian@21cn.com

收稿日期:2003-08-04;收到修改稿日期:2003-12-29

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^[3]。

在基于波前探测的图像解卷积中,噪声抑制因子的选取是最终恢复图像质量好坏的关键。在文献[4]中,对基于波前探测的图像解卷积的常规方法进行了实验验证,但对噪声抑制因子只作常数处理。在其他的改进方法中,如常规维纳滤波算法和最佳滤波算法^[5],通常需要事先知道目标物的功率谱,在实际情况下一般难于实现。在增量维纳滤波^[6]中,则不需要知道目标物的功率谱,并且放宽了对噪声抑制因子的选取范围。

本文将增量维纳滤波运用到基于哈特曼-夏克波前传感器探测的图像恢复技术中。并针对室内模拟点源时的畸变光斑图像进行了图像解卷积处理。

2 基于波前探测的图像解卷积

基于波前探测的图像解卷积^[3]是根据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。

在非相干光学成像系统中,

$$i(\mathbf{x}) = o(\mathbf{x}) * h(\mathbf{x}) + \xi(\mathbf{x}), \quad (1)$$

(1) 式中, $i(\mathbf{x})$ 为经大气扰动的目标物体所成的像, $h(\mathbf{x})$ 为系统的点扩展函数, $o(\mathbf{x})$ 为目标物体的未失真图像, $\xi(\mathbf{x})$ 是零均值的白噪声。

在没有噪声 $\xi(\mathbf{x})$ 时,

$$\hat{O}(u, v) = \frac{I(u, v)H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2}, \quad (2)$$

(2) 式中, $\hat{O}(u, v)$, $I(u, v)$, $H(u, v)$ 分别是 $o(\mathbf{x})$, $i(\mathbf{x})$, $h(\mathbf{x})$ 的频谱。

噪声 $\xi(\mathbf{x})$ 存在时, 观测数据受到噪声的影响, 方程的解可能会伴随着噪声的放大, 进而偏离真实解, 为抑制噪声的影响, 常用下式:

$$\hat{O}(u, v) = \frac{I(u, v)H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + \gamma}, \quad (3)$$

(3) 式中, γ 为噪声抑制因子。

由维纳滤波知 γ 应等于未失真图像信噪比的倒数, 即

$$\gamma = \frac{N_p(u, v)}{O_p(u, v)}, \quad (4)$$

(4) 式中, $N_p(u, v)$, $O_p(u, v)$ 分别是噪声和目标的功率谱。

3 增量维纳滤波法

3.1 基本原理

该法是一种迭代方法, 在维纳滤波的前提下, 假定已经有一个估计 $O_{\text{old}}(u, v)$, 定义频域反卷积误差为

$$S(u, v) = i(u, v) - O(u, v)H(u, v). \quad (5)$$

希望找一个改进的 $O_{\text{new}}(u, v)$, 使得反卷积误差 S 的 2 范数的平方减小。记

$$S_1(u, v) = I(u, v) - O_{\text{old}}(u, v)H(u, v),$$

则维纳滤波器的估计值可以写成

$$\hat{O}(u, v) = \frac{H^*(u, v)S_1(u, v)}{|H(u, v)|^2 + \gamma} + \frac{|H(u, v)|^2}{|H(u, v)|^2 + \gamma} O_{\text{old}}(u, v), \quad (6)$$

上式右边第二项分式部分小于等于 1。增量维纳滤波法是上式的一个近似:

$$O_{\text{new}}(u, v) = O_{\text{old}}(u, v) + \frac{H^*(u, v)S_1(u, v)}{|H(u, v)|^2 + \gamma}. \quad (7)$$

3.2 增量维纳滤波的收敛性

如令 $S_2(u, v) = I(u, v) - O_{\text{new}}(u, v)H(u, v)$, 可得到

$$S_2(u, v) = \frac{\gamma}{|H(u, v)|^2 + \gamma} S_1(u, v), \quad (8)$$

由 $\gamma \geq 0$, 并且 $|H(u, v)|^2 \geq 0$, 则

$$\|S_2(u, v)\|^2 \leq \|S_1(u, v)\|^2,$$

这表明通过迭代可以使反卷积误差减小。

3.3 迭代准则

迭代标准可直接规定迭代次数, 也可以用频域反卷积误差作为迭代标准, 当反卷积误差小于某个值时停止迭代。即: 设两次相邻迭代反卷积误差分别为 S_i, S_{i+1} , 当

$$\left(\sum |S_i|^2 - \sum |S_{i+1}|^2 \right) / \sum |S_i|^2 < A$$

时停止迭代, A 为一常量。

4 室内实验结果

为了正确判断增量维纳滤波方法的可行性, 利用文献[4]中所采集的几组数据进行了事后处理。图 1 给出了实验光路布局图。实验中利用 He-Ne 激光点源作为样本。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,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。实验中系统主要参量为: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。

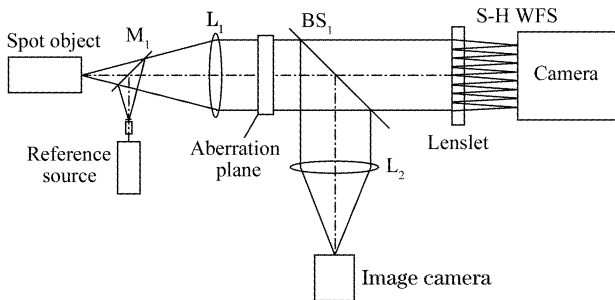


Fig. 1 The experimental setup for image deconvolution from wavefront sensing

实验过程和数据处理如下:

1) 在光学系统中,插入像差板后,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,先计算哈特曼-夏克传感器各子孔径的波前斜率,再应用 35 阶泽尼克模式波前复原得到波前,从而得到系统的点扩展函数和光学传递函数 $H(u, v)$ 。

2) 根据增量维纳滤波法,见(7)式,计算目标谱。的不同取值只会对收敛速度产生影响,在这里 γ 取为 0.0001。

实验中,对点源情况下的畸变光斑图像进行了图形解卷积恢复,图 2,图 3,图 4 分别给出了三组不同像差情况下的畸变光斑图像,点扩展函数,恢复光斑图像,以及恢复图像的一维截面强度分布图,为作对比,图中还给出了艾里斑图像的强度分布。实验中系统的衍射极限半峰全宽(FWHM) $\lambda f_i / D$ (f_i 为成像焦距)为 3.2 pixel。从图中可以看出,经增量维纳滤波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,在系统波前探测精度非常高,成像系统也比较完善时,利用增量维纳滤波方法可以非常有效地恢复畸变光斑图像。

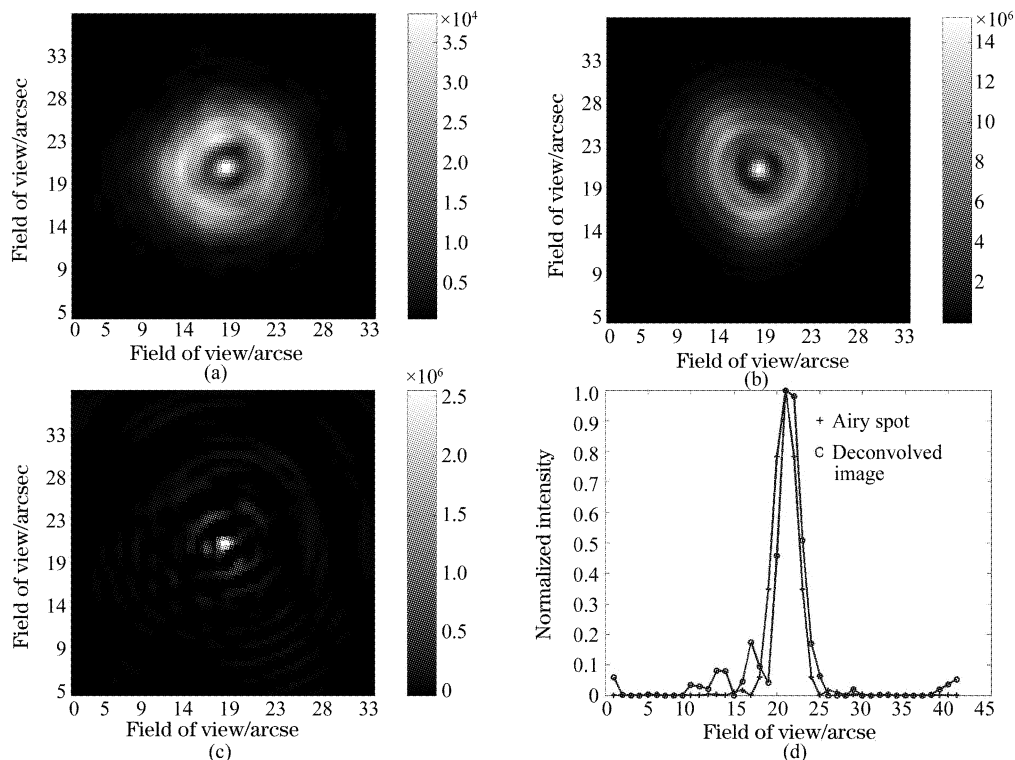


Fig. 2 Image deconvolution of point source (a) the raw blurred image, (b) the PSF derived from the Shack-Hartmann wavefront measurements, (c) the deconvolved image, (d) the normalized intensity of the deconvolved image in contrast with Airy spot

为了说明噪声抑制因子选取对恢复图像的影响,图 5 给出了对于数据 3(与图 4 相对应),噪声抑制因子选为 0.1 和 0.0001 时,分别采用维纳滤波和

增量维纳滤波方法时恢复的图像。由图 5 可以看出,在噪声抑制因子选取相同的情况下,用增量维纳滤波恢复的图像明显好于用维纳滤波恢复得到的图

像。对于维纳滤波方法,当选取比较大时,由于系统高频成分得不到很好的恢复,因此恢复图像效果很差;然而采用增量维纳滤波方法时,即使选取比较大

也能够恢复出较好的图像。因此增量维纳滤波相对于维纳滤波而言,扩展了噪声抑制因子的选取范围。

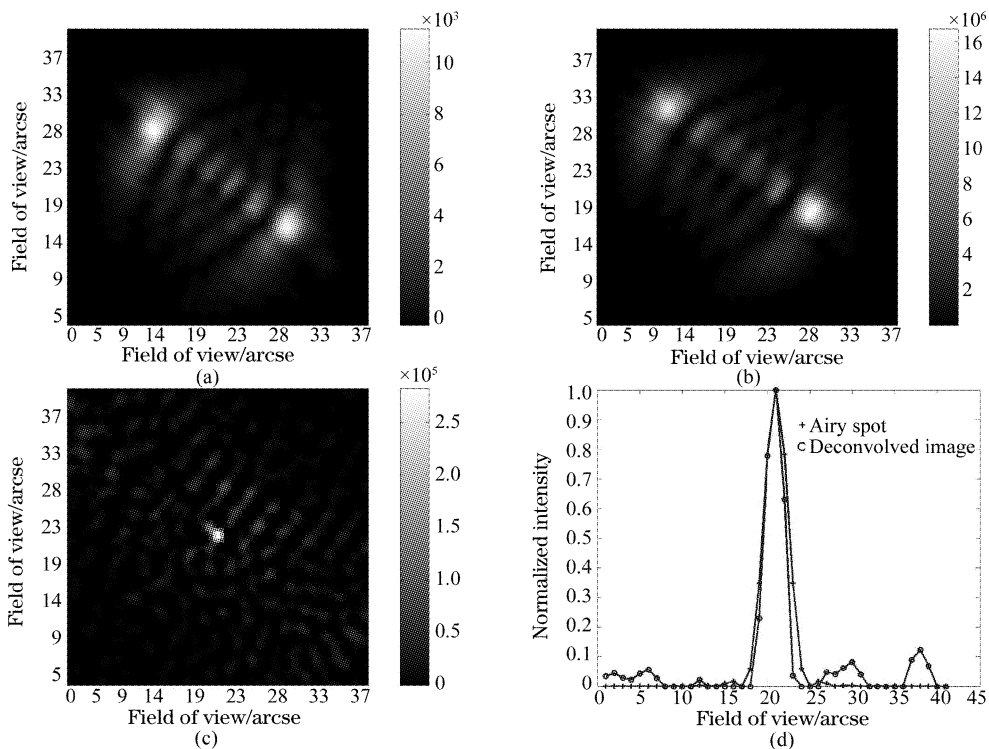


Fig. 3 Image deconvolution of point source (a) the raw blurred image, (b) the PSF derived from the Shack-Hartmann wavefront measurements, (c) the deconvolved image, (d) the normalized intensity of the deconvolved image in contrast with Airy spot

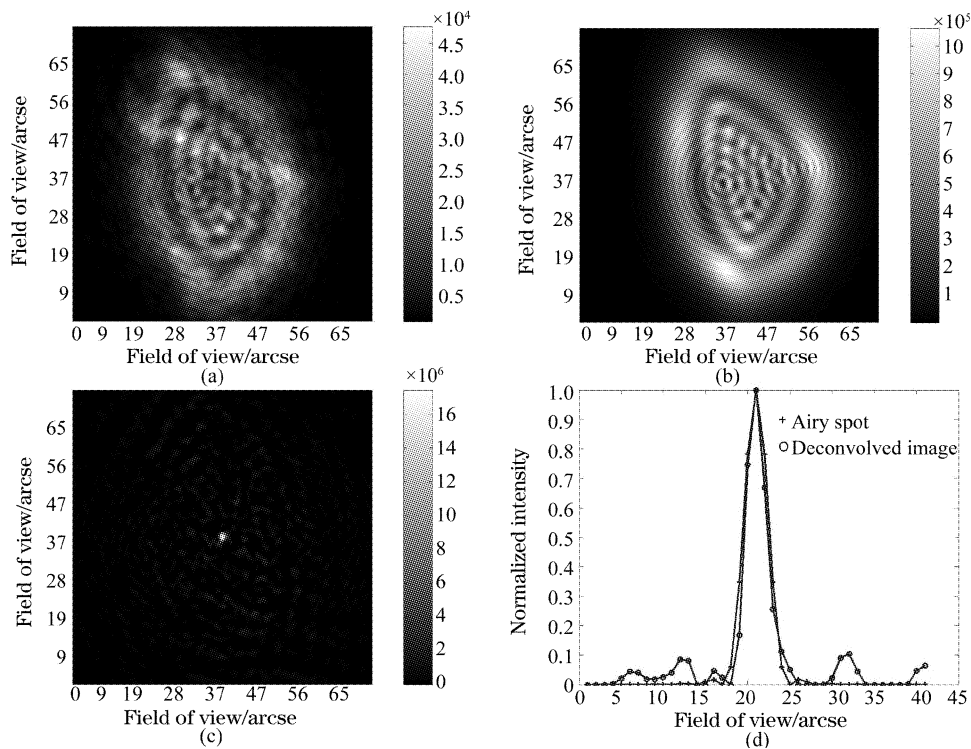


Fig. 4 Image deconvolution of point source (a) the raw blurred image, (b) the PSF derived from the Shack-Hartmann wavefront measurements, (c) the deconvolved image, (d) the normalized intensity of the deconvolved image in contrast with Airy spot

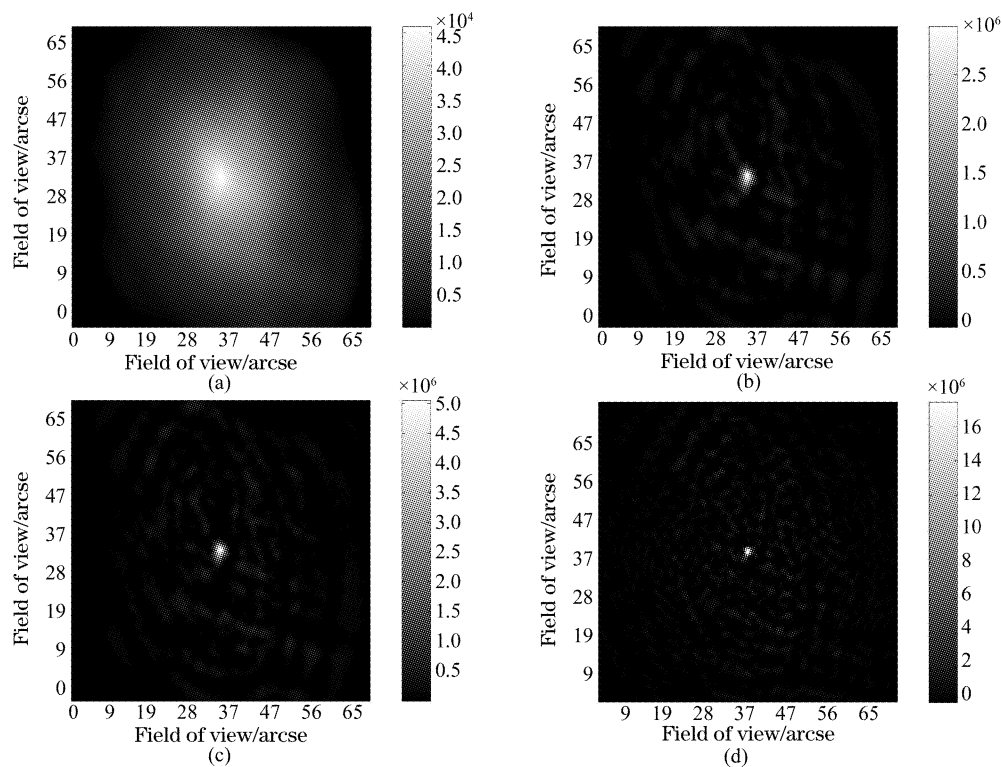


Fig. 5 Image deconvolution of point source corresponding to the Fig. 4. (a) Wiener, $r=0.1$, (b) wiener, $r=0.0001$, (c) incremental Wiener, $r=0.1$, (d) incremental Wiener, $r=0.0001$

结论 在解卷积的过程中,噪声抑制因子的大小直接关系到最终恢复图像的质量。若选取不当,很难获得质量好的恢复图像。在增量维纳滤波中,不需要知道目标物的功率谱,并且放宽了对噪声抑制因子的选取范围。本文针对模拟点源,在哈特曼传感器探测精度很高的情况下,应用增量维纳滤波法,对畸变光斑图像进行恢复,恢复的图像可以达到衍射极限分辨率,说明该法在基于波前探测的解卷积处理中是可行的。

此外必须指出,无论是采用维纳滤波方法还是采用增量维纳滤波方法,恢复图像质量均与哈特曼波前传感器的测量精度密切相关。只有当哈特曼传感器测量非常准确的情况下,才能够恢复出较好的图像。对于基于哈特曼波前探测的解卷积恢复图像质量与哈特曼波前测量精度的关系,还需进一步研究。

致谢 在本文完成过程中,作者与中国科学院电子学研究所邹谋炎同志进行了有意义的讨论,在此表示诚

挚的谢意。

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. 247~268
- 4 Rao Changhui, Zhang Xuejun, Jiang Wenhan. Image deconvolution from Hartmann-Shack wavefront sensing: indoors experimental results. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(7): 789~793 (in Chinese)
- 5 Larichev A V, Irochnikov N G, Ivanov P *et al.*. Deconvolution of color retinal images with wavefront sensing. *Proc. SPIE*, **4251**: 102~116
- 6 Zou Mouyan. *Deconvolution and Signal Recovery* (反卷积和信号复原). Beijing: National Defense Industrial Publishing Company, 2001. 96~97 (in Chinese)