

文章编号: 0253-2239(2007)01-0052-6

# 基于目标和点扩展函数联合估计的点源目标 图像近视解卷积

赵文倩<sup>1,2</sup> 饶长辉<sup>1</sup> 耿则勋<sup>3</sup>

1 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209  
2 中国科学院研究生院, 北京 100039  
3 解放军信息工程大学, 郑州 450002

**摘要:** 在传统的基于波前探测的解卷积方法中,由波前探测得到的点扩展函数被认为是精确的,并用维纳滤波进行复原,但是点扩展函数不可避免地存在误差,所以最终的复原目标图像质量不佳。为了解决该难题,提出了基于目标和点扩展函数联合估计的图像近视解卷积算法。它运用了点扩展函数和目标的先验信息,对点扩展函数和目标进行了规整和进一步约束,从而得到更优的恢复图像质量。对该方法的原理和实现过程进行了阐述,并将其运用于室内点源目标数据中。实验结果证明,与维纳滤波方法相比,该方法使图像恢复的效果得到明显改善。

**关键词:** 图像处理; 图像复原; 近视解卷积; 联合估计; 波前探测

中图分类号: TN911.73 文献标识码: A

## Myopic Image Deconvolution of Point Source Based on Joint Estimation of Object and Point Spread Function

Zhao Wenqian<sup>1,2</sup> Rao Changhui<sup>1</sup> Geng Zexun<sup>3</sup>

1 Institute of Optics and Electronics, the Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209  
2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039  
3 The Chinese People's Liberation Army Information Engineering University, Zhengzhou 450002

**Abstract:** In the classical deconvolution based on wave-front sensing (DWFS), point spread function (PSF) is considered to be accurately achieved and therefore Wiener filter can be used in retrieval. However, for the inevitable noise with PSF, the object image cannot be restored perfectly. A myopic deconvolution method based on joint estimation of the object and PSF to overcome this limitation is proposed. It takes into account the available a priori information on the object to be restored as well as on PSF. The a priori information is used as constraint of the object and PSF, and therefore a better estimation of the restored object can be obtained. The principles and experimental procedure are presented. The experimental results for the indoor point source show that the myopic DWFS can give a better object restoration than Wiener filter method.

**Key words:** image porcessing; image restoration; myopic deconvolution; joint estimation; wave-front sensing

## 1 引 言

在大型地基光学成像系统中,高分辨力成像的性能受到大气湍流的严重影响,所以过去人们提出很多种方法来克服这个影响,以便有效地达到望远镜的衍射极限。天文散斑干涉术最早被提出来,其

原理是基于一系列曝光时间实际足够短的图像,这样可以认为曝光瞬间“冻结”了大气。另一种方法自适应光学技术<sup>[1]</sup>,它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。一个典型的自适应光学

作者简介: 赵文倩(1981—),女,重庆人,硕士研究生,主要从事数字图像处理方面的研究。E-mail: zznk@sohu.com

导师简介: 饶长辉(1971—),男,江西东乡人,研究员,主要从事自适应光学方面的研究。E-mail: chrao@ioe.ac.cn

耿则勋(1958—),男,河南孟州人,教授,主要从事数字图像恢复与重建方面的研究。E-mail: lj62006@126.com

收稿日期: 2006-03-03; 收到修改稿日期: 2006-05-31

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。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得到的图像质量,通常采用“事后处理”的方法,对畸变光斑图像进行恢复。“事后处理”的方法有很多种,基于波前探测<sup>[2]</sup>的图像解卷积就是一种很有效的方法,其中经典的算法就是维纳滤波<sup>[3,4]</sup>。但是当点扩展函数(Point spread function)不够精确时,解卷积算法就很难达到理想的效果。

为了解决这个难题,九十年代后期,法国的 ONERA 小组提出了图像近视解卷积<sup>[5,6]</sup>的方法,并应用此方法对实际的天文观测目标进行了事后处理,取得了很好的恢复结果。这种算法很好地改善了由波前探测器所得的数据不精确而导致的图像复原效果不佳。在近视解卷积算法中,同时考虑了图像和波前探测器的误差,并且引入了被还原的目标和波前的先验信息。

文献[7]采用维纳滤波方法(基于波前探测的图像解卷积)对室内模拟点源进行了恢复,取得了较好的恢复结果。而文献[8]在其基础上,用增量维纳滤波法对畸变光斑进行了进一步的图像复原解卷积处理,也得到了较好的图像质量。

本文在此基础上,提出了基于目标和点扩展函数联合估计的图像近视解卷积算法,此算法在复原过程中考虑了图像的误差和点扩展函数的不精确信息,同时引入了观测目标和点扩展函数的先验信息,并且运用点扩展函数的正值约束,估计均值和功率谱密度<sup>[9]</sup>作为点扩展函数的先验信息。

## 2 图像模型

在线性平移不变系统中,若图像为短曝光,在第  $t$  帧时,退化图像<sup>[10]</sup>可表示为

$$i_t = o * h_t + n_t, \quad 1 \leq t \leq M \quad (1)$$

其中  $*$  表示卷积,  $h_t$  表示第  $t$  帧时的点扩展函数,  $n_t$  表示第  $t$  帧时的附加噪声,  $M$  是图像总的采集帧数。

一般认为,如果每张图像的曝光时间足够短,在此时间内,大气湍流被认为是不变的。假设天体的闪烁对图像的影响可以忽略,在第  $t$  帧时点扩展函数可以表示为

$$h_t = |\mathcal{F}[P \exp(j\varphi_t)]|^2, \quad (2)$$

其中  $P$  表示光瞳函数(在其范围内部就为 1,在外部为 0),  $\mathcal{F}$  表示傅里叶变换,  $\varphi_t$  表示此时的波前(波前是由自适应光学系统中的哈特曼-夏克传感器得到的)。

假设目标和图像在规则的光栅上采样,因此可以将(1)式改写成矢量形式:

$$i_t = o * h_t + n_t = \mathbf{H}_t o + n_t, \quad (3)$$

其中  $o, i_t$  和  $n_t$  分别表示目标,观测图像和零均值白噪声,  $\mathbf{H}_t$  是由点扩展函数卷积对应的 Toeplitz 矩阵。

## 3 基于目标和点扩展函数联合估计的图像近视解卷积

在传统的基于波前探测的图像解卷积中,通常假设得到的点扩展函数是准确的。但是,波前探测数据不可避免地存在噪声,并且此时的点扩展函数仅包含了来自波前探测器的数据,并没有来自观测图像的信息。所以在对点扩展函数的估计中加入点扩展函数本身的先验信息约束和观测图像的信息就很有必要了。

实现图像解卷积的方法有很多,如最小二乘法、Richardson-Lucy 算法、极大似然估计等,但是实验证明,在这些方法中,最大后验估计(Maximum A Posteriori)是最理想的方法。

根据贝叶斯(Bayes)定理<sup>[11]</sup>,目标的后验估计由目标的先验分布  $p(o)$  和先验概率  $p(i|o)$  的贝叶斯估计结合而成,即  $p(o|i) \propto p(i|o) \times p(o)$ 。

假设点扩展函数是精确时,被复原的目标可以表示为

$$o_{\text{map}} = \arg \max_{o,h} p(o|i) = \arg \max_o p(i|o) \times p(o). \quad (4)$$

如上所述,点扩展函数是存在噪声的,所以在进行图像近视解卷积复原时,需要加入目标和点扩展函数的先验信息到最大后验估计中。而事实上,大气湍流所形成的点扩展函数可以被认为是一个随机过程,所以(4)式可修正为

$$[o,h] = \arg \max_{o,h} p(o,h|i) = \arg \max_{o,h} p(i|o,h) \times p(h) \times p(o) = \arg \min_{o,h} [J_n(o,h) + J_h(h) + J_o(o)], \quad (5)$$

这样得到一个迭代准则:

$$J = J_n + J_h + J_o, \quad (6)$$

其中  $J_n = -\ln p(i|o,h)$ ,  $J_n$  表示了得到的目标图像数据的逼真度,  $J_n(o, h_t; i_t)$  为带有高斯噪声的第  $t$  帧图像的负对数:

$$J_n(o, h; i) = \frac{1}{2} (h * o - i)^T C_n^{-1} (h * o - i);$$

$J_o = -\ln p(o)$ ,  $J_o$  为目标的先验信息;

$J_h = -\ln p(h)$ ,  $J_h$  为点扩展函数的先验信息。

对(6)式的最小化就是对目标和点扩展函数的联合最大后验概率估计,通常用共轭梯度法对其进行最小化。由于目标和对点扩展函数的梯度是不同数量级的,在进行最小化时存在困难,所以提出了分部优化,即将(6)式分为对目标和对点扩展函数的最小化两个部分,首先在一个部分进行一定次数的共轭梯度极小化迭代(目标或是点扩展函数),然后再转向另一个部分。最终我们得到了计算量最小的迭代算法:

首先对点扩展函数进行共轭梯度极小化,即

$$h = \arg \min_h [J_{\text{MAP}}(o, h)] = \arg \min_h [J_n(o, h; i) + J_h(h)], \quad (7)$$

然后对目标进行共轭梯度极小化,即

$$o = \arg \min_o [J_{\text{MAP}}(o, h)] = \arg \min_o [J_n(o, h; i) + J_o(o)], \quad (8)$$

得到新的目标值后再转向对点扩展函数的估计,如此迭代下去,直到达到迭代停止条件。在最小化过程中,目标的初始值取用一次维纳滤波的结果,点扩展函数的初始值由哈特曼-夏克波前探测器得到的波前相位计算得到。

图像近视解卷积算法的目的就是将所有的信息同时运用在目标和点扩展函数的估计中,通过共轭梯度法最小化迭代准则,最终得到优于传统解卷积的目标恢复质量。下面我们将具体介绍迭代准则中参量的设定。

### 3.1 噪声统计

如果噪声是零均值的高斯噪声,同时有协方差矩阵  $C_n$ , 这时准则  $J$  的第一部分可表示为

$$J_n(o, h) = \frac{1}{2} (h * o - i)^T C_n^{-1} (h * o - i), \quad (9)$$

如果噪声是稳定的白噪声,方差为  $\sigma_n^2$ , 这时(9)式可以简化为近似最小二乘的形式:

$$J_n(o, h) = \frac{1}{2\sigma_n^2} \|h * o - i\|^2 = \frac{1}{2\sigma_n^2} \sum_{l, m} |[h * o](l, m) - i(l, m)|^2, \quad (10)$$

对于  $\sigma_n^2$  的选择,可以根据一次维纳滤波的处理结果(目标  $o$ ) 来估计:

$$\sigma_n^2 = \frac{1}{l * m} \sum_{l, m} [i(l, m) - h(l, m) * o(l, m)]. \quad (11)$$

### 3.2 基于降质图像的点扩展函数估计

由于图像近视解卷积的目的是解决由波前信息不精确而导致的图像恢复效果不佳,所以在该算法

中对扩散函数的约束是不可忽略的。

我们认为点扩展函数的先验估计是服从高斯分布的,同时假设点扩展函数和它的均值之间的差值是稳定的,这时  $J_h$  可以表示为

$$J_h(h) = \frac{1}{2} \mathcal{F}^{-1} \sum_f \frac{|\tilde{h}(f) - \tilde{h}_m(f)|^2}{D_h(f)}, \quad (12)$$

其中  $D_h$  是点扩展函数的空间功率谱密度,  $\tilde{h}_m(f)$  是点扩展函数的均值的傅里叶变换。 $D_h$  可以简单地表示为

$$D_h(f) = E[|\tilde{h}(f)|^2] - |\tilde{h}_m(f)|^2, \quad (13)$$

值得注意的是,当  $f$  大于望远镜的截止频率时,  $D_h$  是零的,因此在对点扩展函数的约束时,必须保证当  $f$  大于望远镜的截止频率时,对  $h(f)$  的估计要为零。

### 3.3 目标的先验信息

假设目标的先验统计是服从高斯分布的。但是事实上,由于目标均值  $o_m$  不一定是常量,因此  $o$  也有可能不是稳定的,所以为了算法的实现,假设  $(o - o_m)$  是稳定的,对应的准则可以这样表示:

$$J_o(o) = \frac{1}{2} \mathcal{F}^{-1} \sum_f \frac{|\tilde{o}(f) - \tilde{o}_m(f)|^2}{D_o(f)}, \quad (14)$$

其中  $D_o$  是目标的数字功率谱密度,  $o_m$  是观测图像的平均值。

由于在系统中,目标的均值必然是低频的,而且在高频处,规整化会使它趋于零值。所以通常会使用下面的功率谱密度模型:

$$D_o(f) = E[|\tilde{o}(f)|^2] - |\tilde{o}_m(f)|^2. \quad (15)$$

## 4 实验结果

为了验证基于目标和点扩展函数联合估计的图像近视解卷积方法的可行性,我们在室内进行了一系列光学成像实验。

### 4.1 实验系统简介

图 1 是实验光路的布局图。实验中利用 He-Ne 激光点源作为样本。信标源通过透镜 L1 准直后,引导到分光镜 BS1 上,其反射光再经成像透镜 L2 汇聚到成像相机上,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 L1 和分光镜 BS1 之间插入像差板。实验系统中主要参量为;口径  $D = 88$  mm;子孔径数:  $8 \times 8$ ;子孔径尺寸:  $d = 10.39$  mm; CCD 像素数:  $128 \times 128$ ; CCD 数据位数: 12 位;成像相机: 像素数  $512 \times 512$ , 像素大小  $24 \mu\text{m}$ , 曝光时间可以调整。

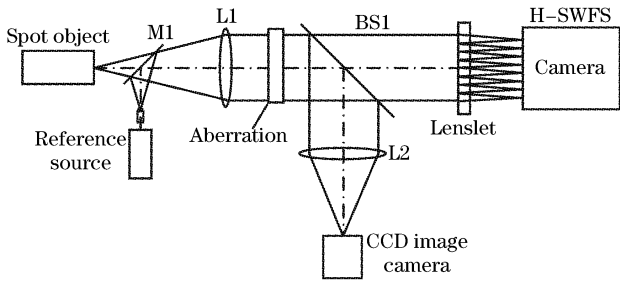


图 1 基于波前探测的图像解卷积的实验光路图  
Fig. 1 Experimental setup of image deconvolution from wave-front sensing

### 4.2 实验步骤

实验过程和数据处理如下：

由采集到的单帧波前传感器数据，计算得到波前相位分布  $\varphi$ ，根据(2)式得到多帧点扩展函数的初始值。

采集 CCD 成像相机上的成像数据，得到单帧畸变图像。

根据维纳滤波原理  $o(f) = \frac{I(f)H * (f)}{|H(f)|^2}$ ，运用单帧数据，得到了单帧目标的初始值。

运用(7)式和(8)式交替迭代实现近视解卷积，当  $\|o^q - o^{q-1}\| \leq 10^{-7} \|o^q\|$  时停止迭代，此时的目标值即为所求。其中， $q$  表示第  $q$  次迭代。

### 4.3 实验结果

实验中，对点源情况下的单帧畸变光斑图像进

行了近视解卷积复原，图 2 和图 3 分别给出了两组图像的斜率矢量图，图 4，图 5 分别给出了两组不同像差情况下的畸变光斑图像、点扩展函数、维纳滤波

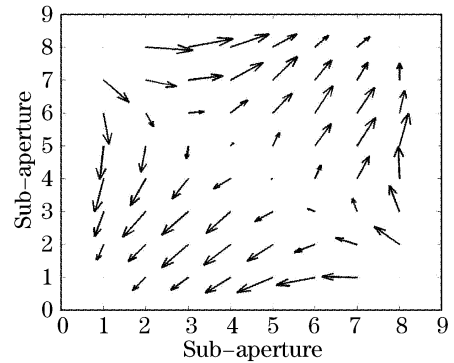


图 2 由波前探测得到的斜率矢量图  
Fig. 2 Slope vector from Hartmann-Shack wave-front sensor

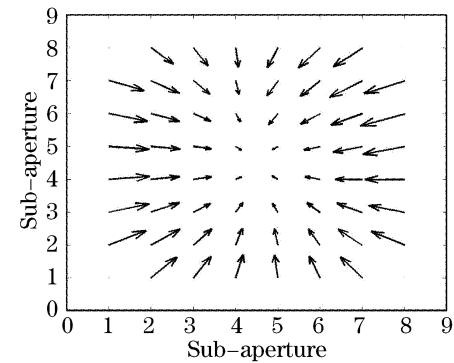


图 3 由波前探测得到的斜率矢量图  
Fig. 3 Slope vector from Hartmann-Shack wave-front sensor

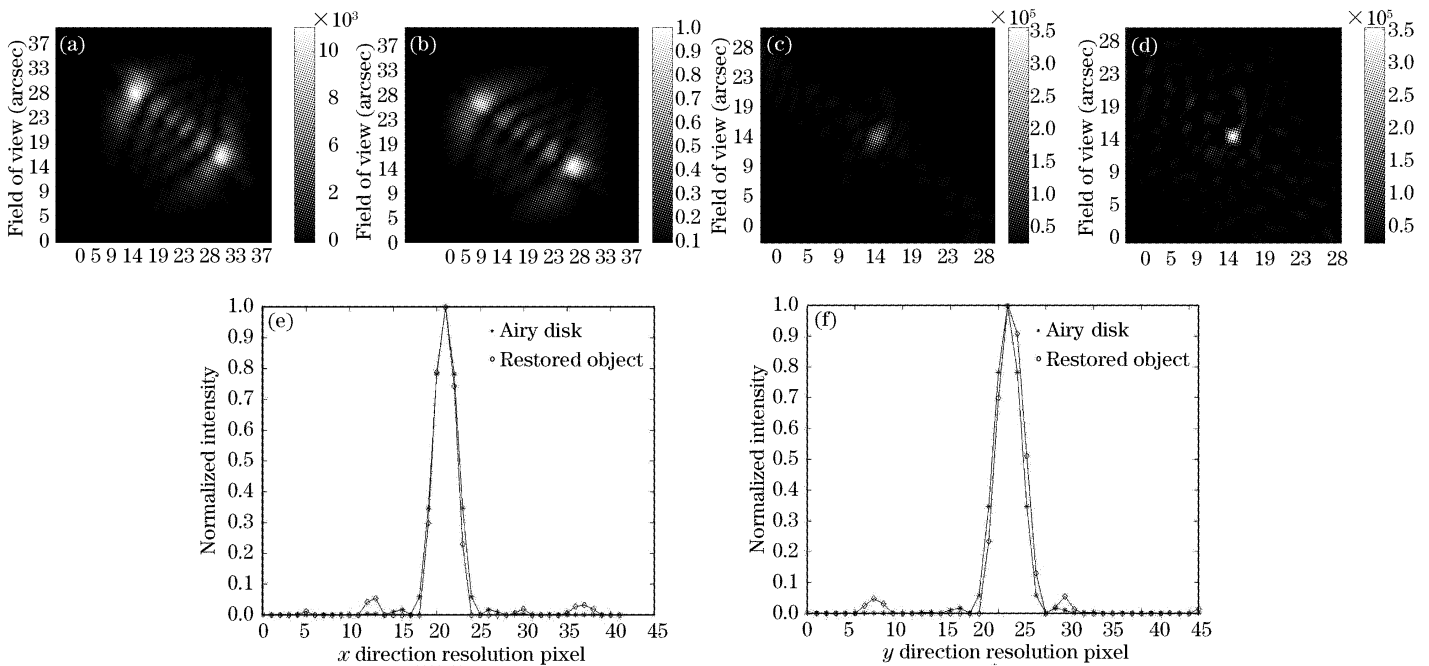


图 4 点源的图像解卷积。(a) 原始畸变图像，(b) 由哈特曼探测数据计算得到点扩展函数，(c) 维纳滤波恢复结果，(d) 图像近视解卷积恢复结果，(e)、(f) 与艾里斑相比的复原点目标的一维截面强度分布图  
Fig. 4 Image deconvolution of point source. (a) Raw blurred image, (b) PSF derived from the Shack-Hartman wave-front measurements, (c) object restored by the Wiener filter, (d) object restored by the myopic deconvolution, (e), (f) intensity distribution for one-dimensional cross section of the restored object in contrast with Airy disk in  $x$  and  $y$  axis

恢复光斑图像、近视算法恢复光斑图像以及近视算法恢复目标图像的一维截面强度分布图,图中还给出艾里斑图像的强度分布用于比较。实验中系统的衍射极限半峰全宽  $\lambda f_1/D$  为 3.2 pixel。

对比图 4 和图 5 中的(c)图和(d)图,可看出在这两组数据中近视解卷积的恢复图像质量明显优于维纳滤波的恢复质量,经近视解卷积处理后的图像能量也更为集中,经近视解卷积处理后的能量峰值

与经维纳滤波处理后的能量峰值之比分别为 2.57 和 2.67。从(e)和(f)中可以看到,与艾里斑的强度分布图相比,两组近视解卷积的恢复光斑图像都达到了衍射极限分辨率,从而达到了恢复图像的系统精度要求。实验结果证明,在系统波前探测精度不高时,基于目标和点扩展函数联合估计的图像近视解卷积方法对室内模拟点源目标的图像复原是可行的,而且得到了优于维纳滤波的图像恢复质量。

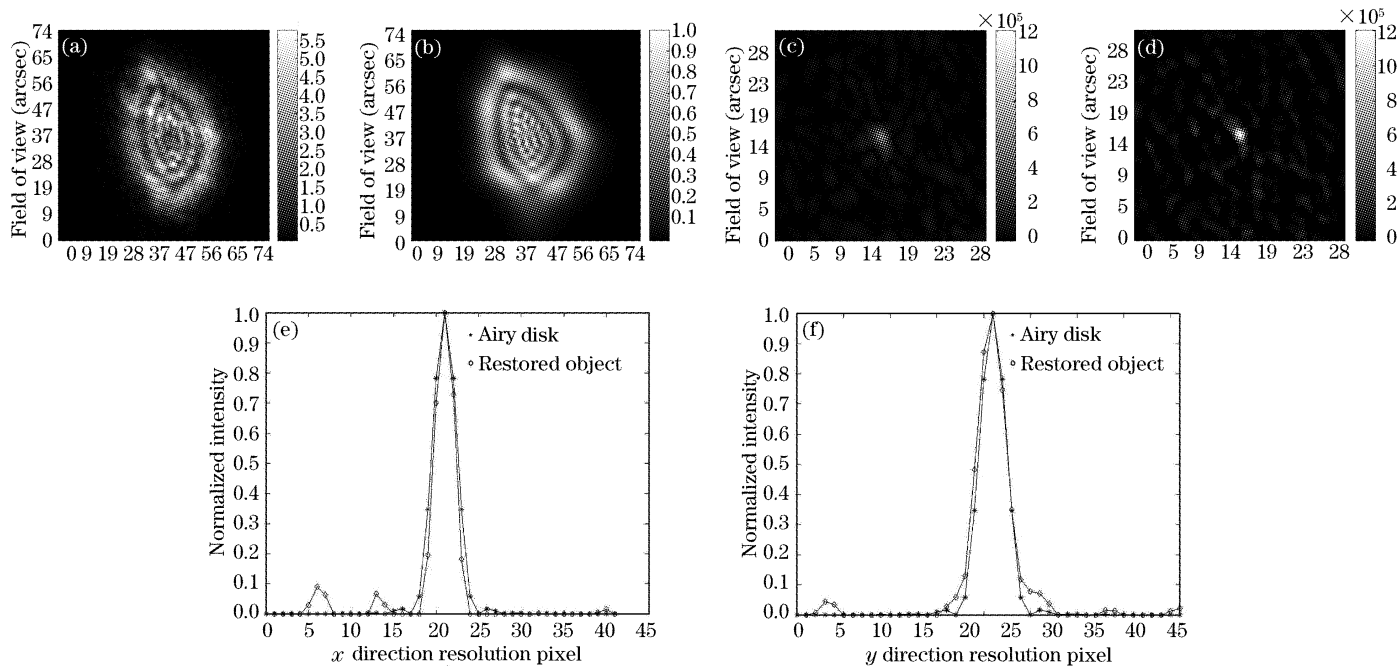


图 5 点源的图像解卷积。(a) 原始畸变图像,(b) 由哈特曼探测数据计算得到点扩展函数,(c) 维纳滤波恢复结果 (d) 图像近视解卷积恢复结果,(e),(f) 与艾里斑相比的复原点目标的一维截面强度分布图

Fig. 5 Image deconvolution of point source. (a) Raw blurred image, (b) PSF derived from the Shack-Hartman wave-front measurements, (c) object restored by the Wiener filter, (d) object restored by the myopic deconvolution, (e), (f) intensity distribution for one-dimensional cross section of the restored object in contrast with Airy spot in  $x$  and  $y$  axis

## 5 结 论

在传统的图像解卷积方法中,当波前探测器得到的数据不精确时,图像的恢复质量明显下降。而图像近视解卷积方法中,通过加入目标和点扩展函数的先验信息,对不精确的波前数据进行了修正和约束,从而弥补了传统图像解卷积方法的缺陷。本文针对室内模拟点源,应用图像近视解卷积方法对畸变光斑图像进行复原。该方法以对点扩展函数和目标的最大的后验联合估计的原理为基础,以共轭梯度法为手段极小化代价函数,得到的恢复图像达到了衍射极限分辨率,说明该方法在波前数据不精确时是可行的。

值得注意的是,在图像近视解卷积中,恢复图像的质量与算法中的变量选择有密切关系。一个合理的变量,可以使图像的恢复质量更加精确,这方面的

进一步研究将在以后进行。

## 参 考 文 献

- 1 Wenhan Jiang, Mingguan Li, Guomao Tao *et al.*. Adaptive optical image compensation experiments on stellar objects[J]. *Opt. Engng.*, 1995, **34**(1): 15~20
- 2 R. C. Cannon. Global wavefront reconstruction using Shack-Hartmann sensors[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(9): 2031~2039
- 3 Zou Mouyan. *Deconvolution and Signal Recovery* [M]. First Edition, Beijing: National Defense Industrial Publishing Company, 2001. 93~97 (in Chinese)  
邹谋炎. 反卷积和信号复原[M]. 第一版,北京:国防工业出版社,2001. 93~97
- 4 Liu Xiaohui, Guo Cheng'an, Hu Jiasheng. A modified Wiener filter for restoration of ring-coded aperture images in inertial confinement fusion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1045~1050 (in Chinese)  
刘晓辉,郭成安,胡家升. 惯性约束聚变中环孔编码图像恢复的改进维纳滤波方法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1045~1050
- 5 L. M. Mugnier, C. Robert, J.-M. Conan *et al.*. Regularized

- multiframe myopic deconvolution from wavefront sensing [C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3763**: 134~144
- 6 Laurent M. Mugnier, Clelia Robert, Jean-Marc Conan. Myopic deconvolution from wave-front sensing[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2001, **18**(4): 862~872
- 7 Rao Changhui, Zhang Xuejun, Jiang Wenhan *et al.*. Image deconvolution from Hartman-Shack wavefront sensing: indoors experimental result[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(7): 789~793 (in Chinese)  
饶长辉, 张学军, 姜文汉. 基于哈特曼-夏克波前探测的图像解卷积: 室内结果[J]. *光学学报*, 2002, **22**(7): 789~793
- 8 Hu Bian, Rao Changhui. The application of incremental Wiener filters in image deconvolution of wavefront sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10): 1305~1309 (in Chinese)  
胡 边, 饶长辉. 增量维纳滤波法在波前探测解卷积中的应用 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(10): 1305~1309
- 9 Jean-Marc Conan, Laurent M. Mugnier, Thierry Fusco *et al.*. Myopic deconvolution of adaptive optics images by use of object and point-spread function power spectra[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(21): 4614~4622
- 10 Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods, Ruan Qiuqi, Ruan Yuzhi transl. *Digital Image Processing* [M]. Second Edition, Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003 175~220 (in Chinese)  
Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods, 阮秋琦, 阮宇智 译. *数字图像处理* [M]. 第二版, 北京: 电子工业出版社, 2003. 175~220
- 11 William Hadley Richardson. Bayesian-based iterative method of image restoration[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1972, **62**(1): 55~59

## 中国科学院上海光学精密机械研究所光学设计高级讲习班教材征订

中国科学院上海光学精密机械研究所光学设计高级讲习班于 2006 年 10 月 27 日胜利闭幕。现有少量讲习班辅导教材征订,数量有限,欲购从速。四本教材主要内容包括:

### 1) 王之江院士、徐文东研究员主讲光学系统设计

光学设计中的基本概念和问题: 光学系统的基本要求及指标、高斯光学、像差理论、成像质量和发展各种不同结构的光学系统的意义等的阐述,结合现在流行的光学软件设计的基本功能进行介绍,立足于当前具有代表性的产品设计进行实例的分析和讲解。

### 2) 朱健强研究员主讲光机系统设计和光学加工

本课程的内容涵盖了光机设计的原理、设计方法及常规内容。介绍各类光学元件加工的各个环节及其相关测控技术,培养光学工程师所需掌握的必要光学加工工艺知识。平面、球面、透镜、棱镜等光学加工技术、非球面加工技术,特种光学元件加工技术,光学检测技术。

### 3) 范正修研究员主讲光学薄膜

从光学薄膜的一般性质出发,讲述光学薄膜在激光系统,光通信系统,显示系统中的应用,介绍极紫外和软 X 射线薄膜,功能性光学薄膜。分析激光对光学薄膜的破坏过程。

### 教材目录:

《光学加工与检测技术》、《光学机械设计》、《光学设计》、《光学薄膜及其应用》。

### 征订形式:

- 1) 全套教材或电子版: 400 元
- 2) 全套教材+电子版: 500 元
- 3) 单本教材+电子版: 150 元

### 优惠办法:

中国光学期刊网会员购买全套教材赠送价值 100 元的期刊阅读卡一张。

### 征订办法:

联系人: 高老师 电话: 021-69918253 邮箱: gfhai@siom.ac.cn

### 邮购方法:

请直接汇款到以下地址:

邮编: 201800 地址: 上海市嘉定区清河路 390 号 收款人: 光学期刊联合编辑部