

基于大气相干长度的湍流模糊图像复原

温昌礼^{1,2} 徐 蓉^{1,2} 门 涛^{1,2} 刘长海^{1,2}

(¹ 宇航动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710043)
(² 西安卫星测控中心, 陕西 西安 710043)

摘要 利用地基光学望远镜观测空间目标时,大气湍流是影响成像质量的主要因素。由于大气湍流引起成像波面的畸变,导致望远镜所获得的图像模糊。为了从模糊图像中复原出目标的原始图像,提出了一种基于大气相干长度的湍流点扩展函数估计方法,进行了理论推导,并利用 Sobel 方法对迭代相同次数后的盲卷积复原图进行像质评价,找出像质评价结果峰值处对应的大气相干长度;再将此值代入点扩展函数的估计公式中,得到点扩展函数更加准确的估计;然后利用此点扩展函数对湍流模糊图像进行盲卷积图像复原,最后得到目标的复原图像。从多种像质评价结果来看,该方法无需测量大气相干长度,且复原效果较理想。

关键词 大气光学;点扩展函数;大气湍流;大气相干长度;图像复原

中图分类号 TP391.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0301002

Atmosphere Turbulence Blurred Image Restoration Based on Atmosphere Coherent Length

Wen Changli^{1,2} Xu Rong^{1,2} Men Tao^{1,2} Liu Changhai^{1,2}

(¹ State Key Laboratory of Astronautic Dynamics, Xi'an, Shaanxi 710043, China)
(² Xi'an Satellite Control Center, Xi'an, Shaanxi 710043, China)

Abstract Atmosphere turbulence is one of the main causes of degraded image quality in the area of detecting space objects based on optical telescope on earth. Atmosphere turbulence results in distortion of wavefront, and it causes different kinds of blurred images. In order to recover original images from blurred images, a method to evaluate point spread function based on atmosphere coherent length is proposed, and the theoretical formula is deduced. Sobel method is used to evaluate the image qualities of recovered images after same times of blind convolution, and the value of atmosphere coherent length is found out when the value of image quality is maximal. This atmosphere coherent length is applied to point spread function and the restored image is got after blind convolution. With many kinds of image quality evaluation indices, it is proved that this method can make us get a good restored image without measuring the value of atmosphere coherent length.

Key words atmospheric optics; point spread function; atmosphere turbulence; atmosphere coherent length; image restoration

OCIS codes 010.1330; 100.2960; 100.2000; 100.1830; 100.3005

1 引 言

利用地基望远镜探测空间目标,主要受到大气湍流的影响,导致所得图像产生不同程度的模糊。长期以来,人们通过各种不同的方式对大气湍流进行补偿,如利用波前传感器探测波前信息,重构出波前,再利用变形镜补偿波前相位,得到湍流相位补偿

以后的观测图像。但是,此补偿方法不能完全消除掉大气湍流对成像质量的影响。图像后处理技术特别是图像盲卷积(BID)复原技术,可以利用模糊图像本身进行图像恢复,从而得到目标图像的清晰原始图像,具有非常重要的价值。Ayers等^[1]提出了基于单帧迭代的盲卷积方法,并将其应用于大气湍

收稿日期: 2013-09-17; 收到修改稿日期: 2013-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(61307038)

作者简介: 温昌礼(1982—),男,博士,工程师,主要从事光学工程方面的研究。E-mail: wcl100@163.com

流退化图像的复原中。此后,国内外研究者对基于大气湍流退化图像的点扩展函数估计进行了大量研究,但所提的模型仅包含大气传输部分的点扩展函数,而忽略了望远镜设备本身的点扩展函数。其中或者没有提出基于模糊图像本身的对于大气相干长度的稳定有效的估计方法,或者仅仅遍历点扩展函数的初值尺度范围,但并未提出有效的点扩展函数的估计方法^[2-20]。盲卷积图像复原方法关键在于复原过程中如何合理引入先验信息。本文针对地基望远镜系统的实际情况,对望远镜系统点扩展函数进行了理论分析,得到基于大气相干长度的点扩展函数解析表达式,并利用不同大气相干长度的取值,得到不同的点扩展函数,再通过盲卷积迭代相同次数得到不同的复原图像,利用 Sobel 方法得到复原图像评价结果峰值处对应的大气相干长度,利用此相干长度初值得到较为准确的点扩展函数的估计,

代入盲卷积中得到湍流模糊图像的复原图像。

2 自适应光学望远镜成像原理

图 1 为典型的自适应光学望远镜成像系统。从目标出发的光波经过大气湍流后,其波前发生了畸变,自适应光学成像系统一般采用哈特曼传感器作为波前传感器,探测出波前信息,然后利用 Zernike 多项式模式系数与所探测波前信息的关系,重构出波前,然后转化为波前矫正器的控制电压,控制波前矫正器对波前进行补偿,最后得到相位补偿后的目标图像。但目前所应用系统只能部分补偿相位畸变,无法达到光学望远镜的探测极限。图 2 为自适应光学望远镜成像系统对木星和土星所成的像,可见其相位补偿是部分的,目标图像仍比较模糊。

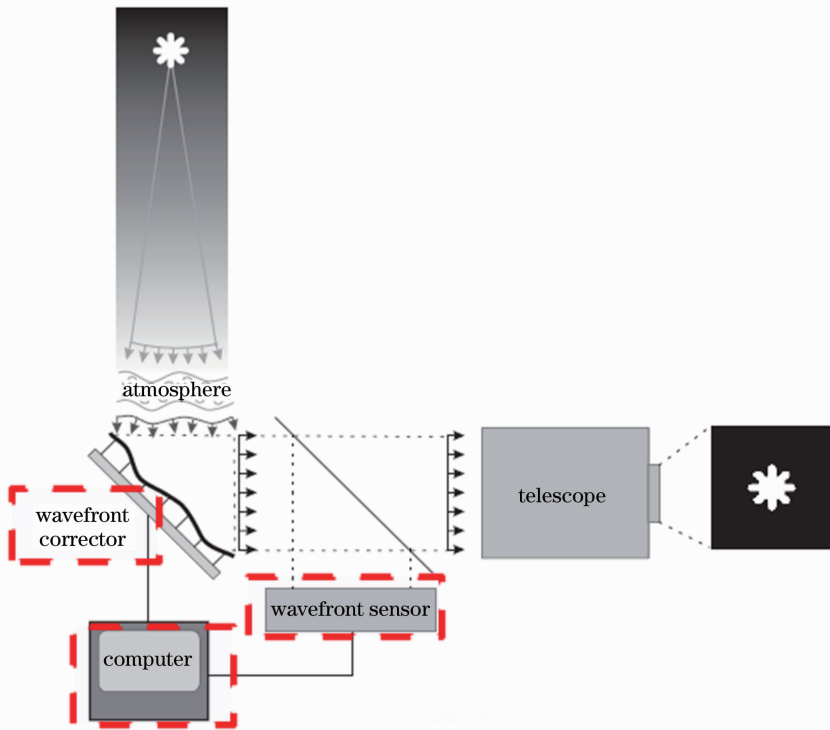


图 1 典型的自适应光学望远镜成像系统

Fig. 1 Typical adaptive optical imaging telescope system

3 大气湍流基本理论

大气的随机运动造成了大气湍流,大气湍流的主要起因是地球表面对气流拖拽形成的风速剪切、太阳辐射对地球表面不同位置加热的差异或地表热辐射导致的热对流、包含热量释放的相变过程(沉积、结晶)造成的温度场和速度场的变化等。

在空间尺度上,大气湍流对光波波前的扰动通常用大气相干长度 r_0 来表征,它是反映大气湍流强度的一个特征尺度。其物理意义是,任何光学成像系统经大气湍流扰动的光波成像,其分辨率不会超过口径为 r_0 的光学系统的衍射极限分辨率,即相位扰动的空间相干尺度不会超过 r_0 ,它表征了光波通

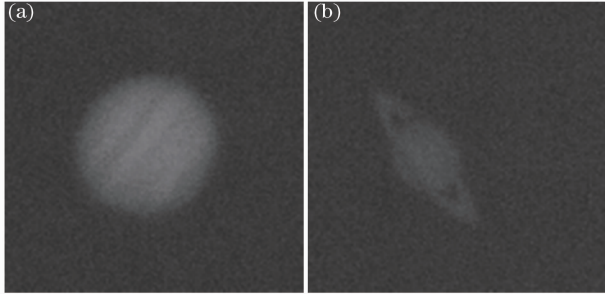


图2 自适应光学望远镜成像系统所成图像。(a)木星原始图像；(b)土星原始图像

Fig. 2 Images obtained by adaptive optical imaging telescope system. (a) Original image of Jupiter; (b) original image of Saturn

过大气湍流传播的衍射极限。 r_0 是由Fried引入的,故也称为Fried参数^[8]。

大气相干长度 r_0 主要取决于大气折射率结构常数 C_n^2 的分布^[21-22],并主要由底层大气折射率结构常数决定。平面波在大气湍流中传播的 r_0 表示为

$$r_{0_pl} = \left[0.423k^2 \int_0^L C_n^2(z) dz \right]^{-3/5}, \quad (1)$$

式中 k 为波数, $k = 2\pi/\lambda$, λ 是波长。

大气湍流对光波传播影响的本质就是改变了光波的原始波阵面。波阵面的改变可以用相位空间结

构函数描述为

$$D_\phi(r) = 2.91k^2 r^{5/3} \int_0^L C_n^2(z) dz = 6.88(r/r_0)^{5/3}. \quad (2)$$

已知大气相干长度 r_0 后,就可以通过(2)式求出平面上两点间的相位均方差。另外大气相干长度 r_0 也是决定自适应光学成像系统波前传感器子孔径大小和变形镜驱动器间距的主要因素。对于山顶天文台, r_0 的典型值可以从视见条件不太好的情况($r_0 = 5$ cm)到视见条件极好的情况($r_0 = 20$ cm),良好的视见条件下平均值约为10 cm^[23]。

4 湍流点扩展函数估计

4.1 光学系统理想的光学传递函数

空间不变光学成像系统的特性可以由一个二维光学传递函数完全确定,其定义为光学成像系统的归一化频率响应。光学成像系统的传递函数可以表示为

$$H(u, v) = T(u, v) H_a(u, v), \quad (3)$$

式中 $T(u, v)$ 为无湍流时光学系统理想的光学传递函数。根据经验公式,对于无像差系统, $T(u, v)$ 可表示为

$$T(u, v) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \left\{ \arccos\left(\frac{\lambda f U}{D}\right) - \left(\frac{\lambda f U}{D}\right) \left[1 - \left(\frac{\lambda f U}{D}\right)^2\right]^{1/2} \right\}, & \lambda f U \leq D \\ 0, & \lambda f U > D \end{cases}. \quad (4)$$

根据经验公式,大气湍流的传递函数为

$$H_a(u, v) = \exp\left\{-3.44 \left(\frac{\lambda f U}{r_0}\right)^{5/3} \left[1 - \beta \left(\frac{\lambda f U}{r_0}\right)^{1/3}\right]\right\}, \quad (5)$$

$$\beta = \begin{cases} 0, & \text{long exposure images} \\ 1, & \text{short exposure images without flicker} \\ \frac{1}{2}, & \text{short exposure images with flicker} \end{cases}, \quad (6)$$

式中 $U = \sqrt{u^2 + v^2}$ 是频率, f 是光学成像系统的焦距, D 是光学成像系统的口径。确定出光学成像系统参数后,就可以根据(3)~(6)式得到光学成像系统传递函数。

4.2 点扩展函数的估计

对于图1的理想光学望远镜成像系统,成像过程为长曝光成像过程,则根据(3)~(6)式,光学成像传递函数为

$$H(u, v) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \left\{ \arccos\left(\frac{\lambda f U}{D}\right) - \left(\frac{\lambda f U}{D}\right) \left[1 - \left(\frac{\lambda f U}{D}\right)^2\right]^{1/2} \right\} \exp\left\{-3.44 \left(\frac{\lambda f U}{r_0}\right)^{5/3}\right\}, & \lambda f U \leq D \\ 0, & \lambda f U > D \end{cases}, \quad (7)$$

可得对应点扩展函数为

$$h(x, y) = \mathcal{F}^{-1}[H(u, v)]. \quad (8)$$

式中 $\mathcal{F}^{-1}(\cdot)$ 表示逆傅里叶变换。

在推导点扩展函数表达式的过程中,将光学成像系统视为理想系统,未考虑系统本身的像差。(8)式包含了大气湍流扰动效应和光学系统本身不可避免的衍射效应,因而可以将(8)式作为大气湍流的点扩展函数的估计。

由(7)式和(8)式可知,大气湍流点扩展函数不但与大气相干长度 r_0 有关,还与光学成像系统本身的设计参数(如焦距 f 、口径 D)和成像光波平均波长 λ 有关。由成像系统的相关参数可以估计出相干长度 r_0 ,进而可以得到点扩展函数,从而实现盲卷积的图像复原,达到更好的复原效果。

5 Sobel 算法

采用 Sobel 方法进行复原图像的像质评价。利用该方法作为最优点选择方法的原因是 Sobel 方法是基于灰度梯度的算法,其对湍流模糊图像的敏感程度最高,且通过仿真实验和大量的工作实践证明,

Sobel 方法对湍流模糊图像的评价结果和人眼的评价结果较为吻合。

基于 Sobel 边缘算子的 Tenenbaum Grad 函数定义为

$$J = \sum_x \sum_y [H_x^2 + H_y^2], \quad (9)$$

式中 J 为评价结果, H_x^2 和 H_y^2 分别为 x 方向和 y 方向根据 Sobel 算子计算得到的梯度平方,且 $\sqrt{H_x^2 + H_y^2} > T_{th}$,其中 T_{th} 为选定的阈值。图 3 为二方向 Sobel 算子 H_x 和 H_y 矩阵表达式,图 4 为 4 方向 Sobel 算子的矩阵表达式。

| | | | |
|-----|----|---|---|
| (a) | -1 | 0 | 1 |
| | -2 | 0 | 2 |
| | -1 | 0 | 1 |

| | | | |
|-----|----|----|----|
| (b) | 1 | 2 | 1 |
| | 0 | 0 | 0 |
| | -1 | -2 | -1 |

图 3 二方向 Sobel 算子。(a) x 方向; (b) y 方向
Fig. 3 Sobel method of 2 directions. (a) x direction; (b) y direction

| | | | |
|-----|----|----|----|
| (a) | -1 | -2 | -1 |
| | 0 | 0 | 0 |
| | 1 | 2 | 1 |

| | | | |
|-----|----|----|---|
| (b) | -2 | -1 | 0 |
| | -1 | 0 | 1 |
| | 0 | 1 | 2 |

| | | | |
|-----|----|---|---|
| (c) | -1 | 0 | 1 |
| | -2 | 0 | 2 |
| | -1 | 0 | 1 |

| | | | |
|-----|----|----|---|
| (d) | 0 | 1 | 2 |
| | -1 | 0 | 1 |
| | -2 | -1 | 0 |

图 4 四方向 Sobel 算子。(a) 0° 方向; (b) 45° 方向; (c) 90° 方向; (d) 135° 方向
Fig. 4 Sobel method of 4 directions. (a) 0° direction; (b) 45° direction; (c) 90° direction; (d) 135° direction

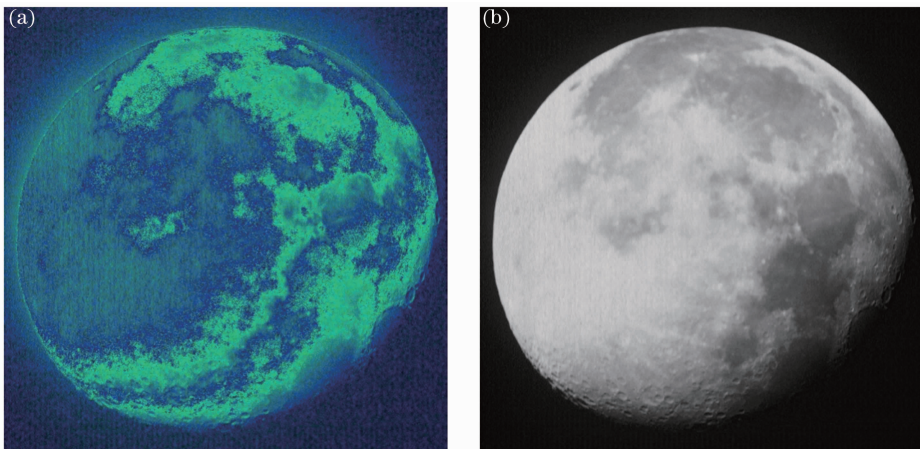


图 5 月亮原始图像 1。(a) 16 位图; (b) 8 位图
Fig. 5 Original image 1 of moon. (a) 16 bit image; (b) 8 bit image

6 利用模糊图像获得大气相干长度 r_0 取值

测量大气相干长度相对比较麻烦,而且无法获得

模糊图像成像时刻成像位置处大气相干长度的准确值。为了避开这个难点,且考虑到对于良好的天文观测台,大气相干长度的取值范围为 $5 \sim 20$ cm,尝试盲卷积法,遍历大气相干长度的所有取值 $5 \sim 20$ cm,利

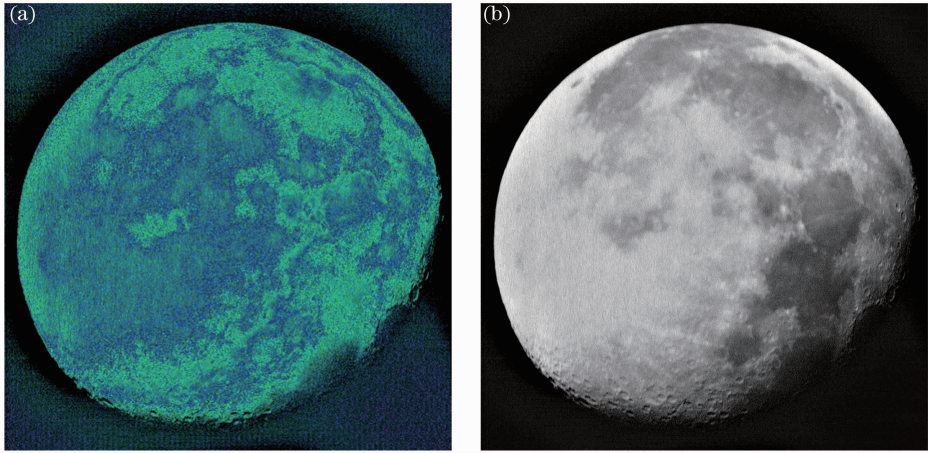


图 6 月亮复原图像 1。(a) 16 位图；(b) 8 位图

Fig. 6 Recovered image 1 of moon. (a) 16 bit image; (b) 8 bit image

用 Sobel 像质评价方法,可以得到对应评价结果峰值处的大气相干长度 r_0 处的值。将此值作为大气相干长度的估计值,代入(7)式和(8)式中,即可得到点扩展函数的较为准确的估计。

7 图像复原结果

图 5 和图 8 分别为图 1 所示的光学系统所拍摄的月亮图片的原始图,其中包括 16 位图和对应的 8 位图。图 6 和图 9 分别为将设备已知参数代入,利用湍流点扩展函数估计方法估计出点扩展函数较为准确的值后,盲卷积迭代 100 次的复原结果。而图 7 和图 10 为点扩展函数未知情况下,利用随机矩阵

作为点扩展函数的普通盲卷积复原结果。表 1 和表 2 对比了用 Entropy、Sobel、Fisher、均方误差 (MSE)、非均方误差 (NMSE)、梯度平方和、几何多重网格 (GMG)、最小二乘法 (LS) 等几种方法评价的复原结果。从表 1 和表 2 的多种像质评价结果来看,利用 Sobel 法图像复原后图像质量得到了较大的提高,而利用普通盲卷积方法的复原结果,有可能比原始图像更差(如图 7 所示),也有可能图像质量提高不大(如图 10 所示)。相对于普通盲卷积方法的复原结果,该方法的图像复原结果比较稳定且效果更好。且基于大气湍流理论的图像复原技术同样适用于波前相位部分补偿后的自适应光学图像。

表 1 图像 1 复原前后像质评价结果

Table 1 Results of images of image 1 evaluation before and after recovering

| Name of image | Entropy | Sobel | Fisher | MSE result | NMSE result | Sum of grads square | GMG result | LS result |
|---|---------|-------------------------|----------|-------------------------|-------------|------------------------|------------|--------------------|
| 16 bit original image 1 of moon | 0.0054 | 5.85×10^{12} | 284.7788 | 9.00×10^{11} | 0.3394 | 6.72×10^{10} | 203.8176 | 1.17×10^3 |
| 16 bit recovered image 1 of moon | 0.8128 | 6.73×10^{12} | 399.5435 | 1.07×10^{12} | 0.3796 | 9.30×10^{10} | 246.9477 | 1.42×10^3 |
| 16 bit recovered image 1 of normal BID method of moon | 0.0030 | 2.91×10^{11} | 195.8765 | 6.5341×10^{10} | 0.1910 | 1.879×10^{10} | 105.8877 | 1.04×10^3 |
| 8 bit original image 1 of moon | 7.3901 | 1.4206×10^{10} | 283.5033 | 6.027×10^9 | 0.3332 | 1.05×10^8 | 16.8626 | 96.6058 |
| 8 bit recovered image 1 of moon | 3.3817 | 2.7795×10^{10} | 405.7376 | 6.5019×10^9 | 0.3783 | 1.12×10^8 | 19.8226 | 114.8696 |
| 6 bit recovered image 1 of normal BID method of moon | 4.2544 | 1.1943×10^{10} | 159.5417 | 3.5421×10^9 | 0.3196 | 6.20×10^7 | 10.2619 | 76.3170 |

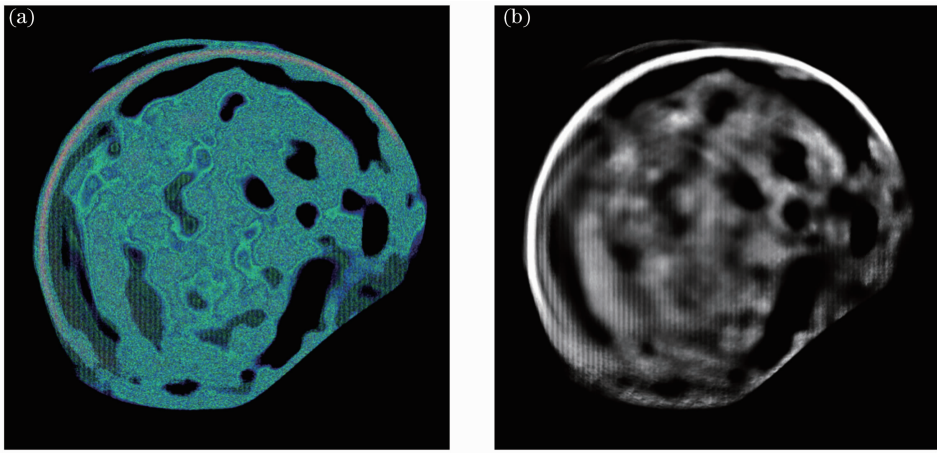


图 7 月亮常规盲卷积复原图像 1。(a) 16 位图；(b) 8 位图

Fig. 7 Recovered image 1 of normal BID method of moon. (a) 16 bit image; (b) 8 bit image

表 2 图像 2 复原前后像质评价结果

Table 2 Results of images of image 2 evaluation before and after recovering

| Name of image | Entropy | Sobel | Fisher | MSE result | NMSE result | Sum of grads square | GMG result | LS result |
|---|---------|------------------------|---------|-------------------------|-------------|-----------------------|------------|-----------|
| 16 bit original image 2 of moon | 0.0546 | 4.37×10^{12} | 14.9023 | 2.58×10^{10} | 0.0927 | 1.53×10^{10} | 14.7987 | 187.9349 |
| 16 bit recovered image 2 of moon | 0.2974 | 5.14×10^{12} | 23.2257 | 7.18×10^{10} | 0.2226 | 5.82×10^9 | 69.0812 | 396.2048 |
| 16 bit recovered image 2 of normal BID method of moon | 0.0508 | 4.001×10^{10} | 0.7533 | 3.3474×10^{10} | 0.1179 | 1.71×10^8 | 33.8886 | 228.7190 |
| 8 bit original image 2 of moon | 4.0055 | 4.87×10^7 | 0.9441 | 1.5157×10^7 | 0.0066 | 1530 | 0.4208 | 9.9141 |
| 8 bit recovered image 2 of moon | 3.8737 | 1.8439×10^9 | 8.2098 | 1.9683×10^8 | 0.2019 | 2.63×10^6 | 3.6739 | 26.6573 |
| 6 bit recovered image 2 of normal BID method of moon | 3.9341 | 1.25×10^8 | 0.9265 | 1.0425×10^8 | 0.1179 | 5745 | 1.9216 | 13.0144 |

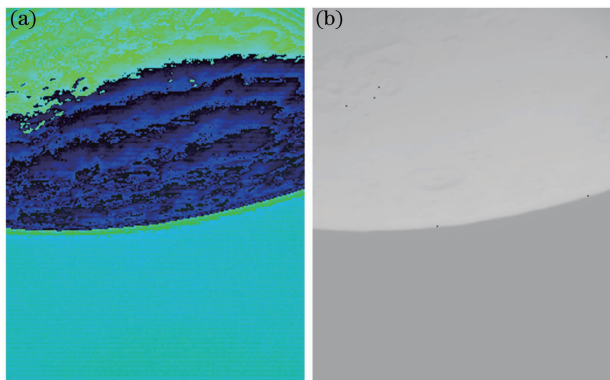


图 8 月亮原始图像 2。(a) 16 位图；(b) 8 位图

Fig. 8 Original image 2 of moon. (a) 16 bit image; (b) 8 bit image

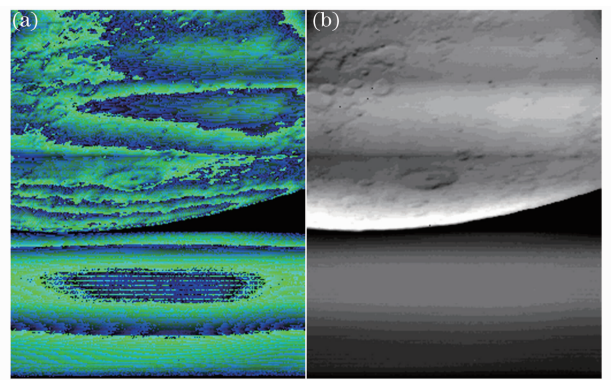


图 9 月亮复原图像 2。(a) 16 位图；(b) 8 位图

Fig. 9 Recovered image 2 of moon. (a) 16 bit image; (b) 8 bit image

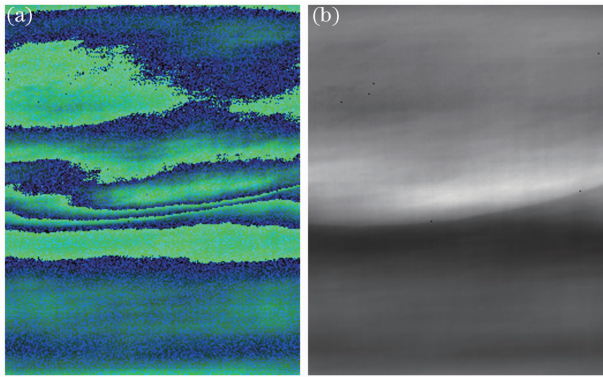


图 10 月亮常规盲卷积复原图像 2。(a) 16 位图；
(b) 8 位图

Fig. 10 Recovered image 2 of normal BID

method of moon. (a) 16 bit image; (b) 8 bit image

8 结 论

大气湍流是制约地基望远镜成像系统的主要因素。为了达到望远镜的衍射极限，科学家们提出了自适应成像技术等。但是，这些技术目前只能实现部分的相位波前畸变补偿，要进一步提高系统的成像质量，采用图像后处理技术具有非常重要的意义。提出了一种新的方法，利用大气相干长度取值范围有限的特征，采用盲卷积迭代相同次数后，用 Sobel 方法评价复原结果，利用峰值处对应的大气相干长度，估计出点扩展函数较为准确的值，然后再次利用盲卷积方法最终得到图像的复原结果。从多种像质评价方法的评价结果来看，Sobel 方法的复原效果比较理想。且该方法不需测量大气相干长度即可实现好的图像复原效果。

参 考 文 献

- 1 G R Ayers, J C Dainty. Iterative blind deconvolution method and its applications [J]. *Opt Lett*, 1988, 13(7): 547—549.
- 2 Zhang Tianxu, Hong Hanyu, Sun Xianghua, *et al.*. Restoring turbulence-degraded images based on estimation of turbulence point spread function values [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2003, 29(4): 573—581.
- 3 Hong Hanyu, Zhang Tianxu, Yu Guoliang. Iterative multi-frame restoration algorithm of turbulence-degraded images based on Poisson model [J]. *J Astronautics*, 2004, 25(6): 649—654.
洪汉玉, 张天序, 余国亮. 基于 Poisson 模型的湍流退化图像多帧迭代复原算法[J]. *宇航学报*, 2004, 25(6): 649—654.
- 4 Hong Hanyu, Zhang Tianxu. Investigation of restoration algorithm for degraded images caused by aero-optics effects using multi-resolution blind deconvolution [J]. *Chinese J Computer*, 2004, 27(7): 952—963.
洪汉玉, 张天序. 基于多分辨率盲目去卷积的气动光学效应退化图像复原算法[J]. *计算机学报*, 2004, 27(7): 952—963.
- 5 Yu Guoliang, Zhang Tianxu, Hong Hanyu, *et al.*. Investigation on restoration method for turbulence-degraded image using Bayes theorem [J]. *J Image and Graphics*, 2005, 10(9): 1171—1177.

- 6 余国亮, 张天序, 洪汉玉, 等. 基于贝叶斯理论的湍流退化图像复原方法[J]. *中国图象图形学报*, 2005, 10(9): 1171—1177.
- 6 Zhang Kun, Hong Hanyu, Sun Xiechang, *et al.*. Survey of image deconvolution from wave-front sensing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 131—134.
张 坤, 洪汉玉, 孙协昌, 等. 基于波前测量的图像复原技术综述[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(1): 131—134.
- 7 Ao Jinrong, Hu Shaohai. Image restoration algorithm based on blind convolution filter [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2007, 43(S): 44—46.
敖锦蓉, 胡绍海. 基于盲卷积滤波图像复原算法[J]. *计算机工程与应用*, 2007, 43(S): 44—46.
- 8 Xie Shenghua, Zhang Qiheng, Su Ding. Study on image restoration method based on prior information and regularization technique [J]. *Chinese J Quantum Electronics*, 2007, 24(4): 429—433.
谢盛华, 张启衡, 宿 丁. 基于先验信息和正则化技术的图像复原算法的研究[J]. *量子电子学报*, 2007, 24(4): 429—433.
- 9 Hong Hanyu, Lin Zhimin, Zhang Xiuhua. Restoration algorithm for infrared turbulence-degraded images with complex background [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(12): 1270—1273.
洪汉玉, 林志敏, 章秀华. 复杂背景红外湍流退化图像复原算法研究[J]. *激光与红外*, 2008, 38(12): 1270—1273.
- 10 Zhang Yaxin, Geng Zexun, Chen Bo, *et al.*. Image restoration based on NSWT and point spread function estimation [J]. *J Geomatics Science and Technology*, 2008, 25(1): 64—67.
张亚新, 耿则勋, 陈 波, 等. 基于 NSWT 模极大值的 PSF 估计 [J]. *测绘科学技术学报*, 2008, 25(1): 64—67.
- 11 Fang Shuai, Huang Honghua, Huang Yinbo, *et al.*. Image restoration based on atmospheric modulation transfer function [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S): 642—645.
方 帅, 黄宏华, 黄印博, 等. 基于大气调制传递函数的大气退化图像复原[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(S): 642—645.
- 12 Hong Hanyu. Fast restoration for turbulence-degraded images based on second-order weighted difference [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2008, 44(31): 15—19.
洪汉玉. 基于二阶加权差分的湍流退化图像快速复原[J]. *计算机工程与应用*, 2008, 44(31): 15—19.
- 13 Huang Jianming, Shen Mangzuo. Blind deconvolution of atmospheric turbulence-degraded images based on total variation [J]. *Optical Technique*, 2008, 34(4): 525—531.
黄建明, 沈忙作. 基于总变分的湍流退化噪声图像盲反卷积复原 [J]. *光学技术*, 2008, 34(4): 525—531.
- 14 Chang Xiang, Li Rongwang, Xiong Yaoheng. Predicted space-varying point spread function model for anisoplanatic adaptive optics imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(12): 1201001.
常 翔, 李荣旺, 熊耀恒. 基于自适应光学成像非等晕效应的空变点扩展函数估计模型[J]. *光学学报*, 2011, 31(12): 1201001.
- 15 Li Qingfei, Zhu Zhichao, Fang Shuai. Research on atmospheric turbulence degraded image restoration [J]. *J Heifei University of Technology*, 2011, 34(1): 80—82.
李庆菲, 朱志超, 方 帅. 大气湍流退化图像的复原研究[J]. *合肥工业大学学报*, 2011, 34(1): 80—82.
- 16 Yang Yanwei, Xu Rong, Niu Wei, *et al.*. A multi-frame blind image restoration algorithm for atmospheric turbulence [J]. *J Spacecraft TT & C Technology*, 2012, 31(5): 36—39.
杨彦伟, 徐 蓉, 牛 威, 等. 大气湍流退化图像多帧盲复原 [J]. *飞行器测控学报*, 2012, 31(5): 36—39.
- 17 Zhu Hao, Lu Yu, Wu Qinzhang. Blind image deconvolution subject to bandwidth and total variation constraints [J]. *Opt Lett*, 2007, 32(17): 2550—2552.
- 18 Charles L Matson, Kathy Borelli, Stuart Jefferies, *et al.*. Fast and optimal multiframe blind deconvolution algorithm for high-resolution ground-based imaging of space objects [J]. *Appl Opt*, 2009, 48(1): A75—A92.

- 19 Douglas A Hope, Stuart M Jefferies. Compact multiframe blind deconvolution [J]. Opt Lett, 2011, 36(6): 867–869.
- 20 Mamdouh F Fahmy, Gamal M Abdel Raheem, Usama S Mohamed, *et al.*. A new fast iterative blind deconvolution algorithm [J]. J Signal and Information Processing, 2012, 3(1): 98–108.
- 21 Rao Ruizhong. Atmospheric Optics of Modern Times [M]. Beijing: Science Press, 2012.
- 饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- 22 L C Andrews. Field Guide to Atmospheric Optics [M]. Bellingham; SPIE Press, 2007.
- 23 D L Fried. Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very short exposures [J]. J Opt Soc Am, 1966, 56(10): 1372–1379.

栏目编辑: 王晓球