

# 自适应光学图像的频域幸运成像实验研究

任晨纲 梁永辉 于起峰 蒋鹏志

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 幸运成像技术是自适应光学(AO)图像高分辨率重建的一种事后处理技术。传统的幸运成像算法要先对短曝光图像进行像质评价,并选取像质最好的一些图像进行配准、叠加来重建目标图像,最终使得图像分辨率达到地基光学望远镜的衍射极限。但是传统幸运成像算法未考虑图像某些方向上的高分辨率信息,而频域幸运成像算法则在傅里叶频域内对每帧图像进行信息选取,可更有效地利用短曝光图像在不同方向上的高分辨率信息。仿真实验结果表明频域幸运成像算法与 AO 系统结合能克服大气湍流影响,明显提高望远镜的分辨能力。在没有 AO 校正的情况下对真实天文图像进行了处理,结果表明,频域幸运成像算法重建图像的分辨率高于传统幸运成像算法。

**关键词** 大气光学; 自适应光学; 高分辨率; 幸运成像; 图像融合

中图分类号 O438 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.s109004

## Experiment Research of Lucky Imaging in Frequency Domain with Adaptive Optics Images

Ren Chengang Liang Yonghui Yu Qifeng Jiang Pengzhi

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** Lucky imaging is a post processing technique which can reconstruct a high resolution image for adaptive optics. In classic lucky imaging algorithm, only a few images which meet the image quality criterion are selected, shifted and added to reconstruct a final image, with image resolution reaching diffraction limited resolution of the large ground-based optical telescopes. However, high resolution information in given direction of the unselected images is rejected as a result. As to the lucky imaging in frequency domain algorithm, the information is selected in Fourier domain for every frame. It selects Fourier complex values with highest amplitude values at each spatial frequency below the cut-off frequency. Therefore, it makes a more efficient use of high resolution information contained in the short exposure images. Simulation results show that lucky imaging in frequency domain can overcome the effect of the atmosphere turbulence and improve the ability of the telescope. The results on real world astronomical images show that the lucky imaging in frequency domain often yields final image of better quality than classic lucky imaging algorithm at an equivalent selection ratio without an adaptive optics system.

**Key words** atmospheric optics; adaptive optics; high resolution; lucky imaging; image fusion

**OCIS codes** 100.3010; 100.3020; 100.3190

## 1 引言

由于大气湍流导致大气折射率在空间分布和时间上随机变化,因此成像系统的点扩散函数不仅是空

变函数,还随着时间而演变。当利用地基光学望远镜对空间目标进行观测时,长曝光图像由于存在时间平均,会不可避免地丢失目标的许多高频信息,使得目

收稿日期: 2013-10-09; 收到修改稿日期: 2013-11-14

基金项目: 国家 863 计划(2011AA20118080333)

作者简介: 任晨纲(1984—),男,博士研究生,主要从事自适应光学图像后处理方面的研究。

E-mail: ren\_chengang@163.com

导师简介: 于起峰(1958—),男,博士生导师,教授,主要从事基于光测图像的精密测量与运动测量、遥感图像技术等方面的研究。E-mail: yuqifeng@vip.sina.com

标最高空间频率通常小于  $r_0/\lambda$  ( $r_0$  为大气相关长度,  $\lambda$  为光波波长)。相比之下,短曝光图像则保留了目标的高频信息,其频率上限可以达到望远镜的衍射截止频率,即  $D/\lambda$  ( $D$  为望远镜主镜直径)<sup>[1-3]</sup>。

如何利用短曝光图像所蕴含的高频信息来重建目标的清晰图像,并使其分辨率接近望远镜的衍射极限,在天文观测和空间目标监视等相关领域有着非常重要的意义。目前,国内外常用的研究方法有以下四种:散斑成像、盲解卷积、相位差法和幸运成像。散斑成像利用图像的高阶统计量(常为 2 阶或 3 阶)来分别复原图像的幅度谱和相位谱,然后将两者相乘再利用傅里叶逆变换得到复原后的图像<sup>[4]</sup>。盲解卷积通常采用交替迭代的方式,分别计算点扩散函数和复原图像,在计算时通过施加不同的约束和先验知识,并利用优化算法来实现图像的高分辨率复原<sup>[5-6]</sup>。相位差法则是在成像系统的焦面和离焦面上同时采集两幅图像,在已知离焦量的前提下算出波前相位分布并恢复出目标<sup>[7]</sup>。幸运成像技术首先利用像质评价函数计算每帧图像的像质因子,然后按照一定比例选出像质因子较大的图像,再对选取的图像进行配准、叠加得到目标重建图像<sup>[8]</sup>。相对于前三种方法,幸运成像技术具有算法简单、计算时间短的优点,尤其是当原始图像的帧数达到几百帧甚至上千帧时,则幸运成像算法在计算速度方面具有明显的优势。另外散斑成像和多帧盲解也将利用选图结果来进行计算。

幸运成像算法通过软硬件相结合,已经应用到大口径光学望远镜的实际观测中并取得巨大成就。英国剑桥大学的幸运成像研究小组研制了以 E2V 公司生产的 L3CCD 为成像探测器的幸运成像图像采集与处理系统 LuckyCam,先后应用于西班牙帕尔玛 2.5 m 口径的 NOT 望远镜、智利拉西拉 3.6 m 口径的 NTT 望远镜和美国加利福尼亚的帕洛莫 5.1 m 口径的望远镜上,均获得了接近望远镜衍射极限分辨率的天文观测结果<sup>[9-10]</sup>。在 2007 年于 5.1 m 口径的帕洛莫望远镜上的实验中,LuckyCam 与该望远镜的低阶自适应光学(AO)系统联合,尽管该自适应光学系统只有 12 个校正单元,但成像分辨率首次达到了望远镜系统的设计目标——哈勃太空望远镜最高分辨率的 2 倍。

但传统幸运成像算法存在两个缺陷:1) 像质评价函数自身的局限,虽然目前像质评价函数较多,但不存在一种通用的评价函数<sup>[11]</sup>;2) 传统幸运成像算法是以整帧或者部分区域为单位进行图像选

取<sup>[12]</sup>,可能导致图像某些方向上的细节信息被舍弃。

为克服传统幸运成像算法的不足之处,Vincent Garrel 等<sup>[13]</sup>提出了基于幅度值选取的图像合成算法,其不利用像质评价函数进行选图,而是将所有图像配准后再进行傅里叶变换,然后对每个频率点根据幅度值大小选取一定比例的傅里叶复数值累加后作为该点的值,最后进行逆傅里叶变换得到重建后图像。由于图像信息的选取和融合都是在傅里叶频域内完成的,本文将该算法称为频域幸运成像算法。在以上的研究基础上介绍了频域幸运成像算法的原理和处理流程,并给出对模拟扩展目标和真实天文图像的处理结果。

## 2 理论基础

图像的傅里叶频谱  $I(f)$  是目标傅里叶频谱  $O(f)$  与成像系统的光学传递函数  $F_{OT}(f)$  之间的乘积,

$$I(f) = O(f) \cdot F_{OT}(f), \quad (1)$$

光学传递函数可分解为光学系统决定的静态传递函数  $F_{OT\_DL}(f)$  和大气湍流引起的动态传递函数  $F_{OT\_atmo}(f)$ , 即

$$F_{OT}(f) = F_{OT\_DL}(f) \cdot F_{OT\_atmo}(f). \quad (2)$$

因此,短曝光图像的傅里叶频谱可表示为衍射极限图像的傅里叶频谱  $I_{DL}(f)$  与  $F_{OT\_atmo}(f)$  的乘积,

$$I(f) = I_{DL}(f) \cdot F_{OT\_atmo}(f). \quad (3)$$

光学传递函数的幅度为调制传递函数(MTF),对(3)式取模:

$$|I(f)| = |I_{DL}(f)| \cdot F_{MT\_atmo}(f), \quad (4)$$

式中  $F_{MT\_atmo}(f)$  由于大气湍流引起的傅里叶幅度谱衰减。由于 MTF 不大于 1<sup>[14]</sup>, 即

$$F_{MT\_atmo}(f) = \frac{|I(f)|}{|I_{DL}(f)|} \leq 1, \quad (5)$$

由(5)式可知,最大限度地减轻大气湍流引起的傅里叶幅度谱衰减,等价于求取  $|I(f)|$  最大值,幅度值越大表明该空间频率处的目标信息受大气湍流的影响越小。

图像在高频处的幅度值容易受到图像噪声干扰。图像噪声主要分为加性噪声和光子噪声,加性噪声来源于成像设备,可以采用具有较低读取噪声的相机来克服。光子噪声是一种随机泊松噪声,其分布只取决于图像的总光子数,而与图像的空间频率值大小无关,故可以在频域内利用高斯函数对图像幅度谱进行卷积运算来平滑光子噪声<sup>[13]</sup>。

### 3 频域幸运成像算法处理流程

频域幸运成像算法主要分为 5 部分: 图像预处理

理、图像配准、频域信息选取、频域信息累加和图像增强, 整个计算流程见图 1 所示。

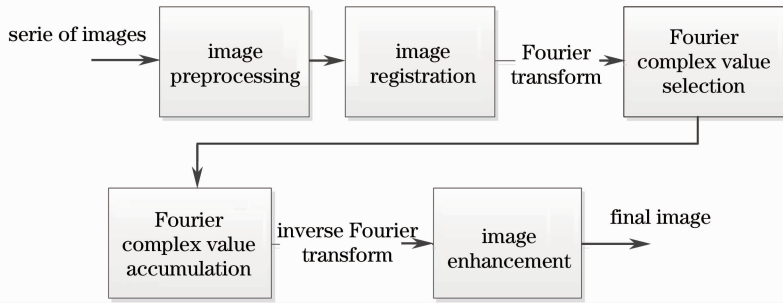


图 1 频域幸运成像算法

Fig. 1 Lucky imaging algorithm in frequency domain

#### 3.1 图像预处理

为减小相机像素的不均匀光敏度, 相机和放大电路的噪声都会给图像带来偏差, 在处理前需对图像进行预处理。预处理通常需要暗场、偏差场、平场和平暗场图像来获得目标校正后的图像。校正后图像可以用分式表示: 分子为目标图像减去暗场和偏差场图像; 分母则为平均图像减去平暗场和偏差场图像。

#### 3.2 图像配准

由于目标在图像中的旋转和平移会影响图像幅度和相位分布, 因此有必要通过图像配准来减小目标在不同帧间位置变化对最终图处理结果的影响。

针对点目标和扩展目标采用不同的配准算法: 对于点目标, 选择某帧图像的最亮点为基准, 然后将其余图像的最亮点对准该基准并对图像进行平移即实现配准; 对于扩展目标, 利用相位相关算法和图像相关算法分别对目标的平移和旋转进行配准<sup>[15-16]</sup>。

#### 3.3 频域信息选取、累加与图像增强

频域信息选取与累加是利用配准后序列图像的信息来重构图像傅里叶谱。先计算配准后所有图像的傅里叶变换结果, 并针对截止频率以内的每个空间频率点选取最大幅度值对应的复数值, 再将选取的复数值分别进行累加得到融合后的图像傅里叶谱, 并对其进行逆傅里叶变换得到图像, 最后对该图像进行增强处理得到最终的重建图像。

图像经过增强处理可以改善图像的视觉效果。图像增强方法有很多种, 这里利用高斯高频增强滤波器来锐化图像<sup>[17]</sup>。在图像增强时需要根据不同的目标进行参数调整, 但对同一目标的不同算法处理结果采用相同的参数设置。

### 4 数值模拟实验

为比较传统幸运成像算法和频域幸运成像算法

的性能, 分别利用两种算法对模拟 AO 校正后图像进行处理。传统幸运成像算法采用的像质评价函数为 sobel 算子,

$$S = \sqrt{\left[ \sum \nabla_{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ} I(x, y) \right]^2}. \quad (6)$$

(6)式表明 sobel 算子实际是图像沿水平、垂直以及两个对角线方向的梯度平方和统计, 而图像细节越丰富其梯度值就越大。因此 sobel 算子在一定程度上反映了图像质量, 其值越大, 图像蕴含的细节就越多<sup>[18]</sup>。

采用 CAOS 软件对常规 AO 系统的完整进行模拟<sup>[18]</sup>。利用海洋卫星模拟图进行 AO 校正实验, 系统模拟的参数设置如表 1 所示。

表 1 AO 系统的模拟参数

Table 1 Simulation parameters of AO system

| Parameter                       | Value         |
|---------------------------------|---------------|
| Spectrum model                  | Kolmogorov    |
| Turbulence layers               | 2             |
| Fried parameter / m             | 0.1           |
| Effective size of telescope / m | 1.2           |
| Central obstruction / m         | 0.12          |
| Star brightness                 | $m_v = 4$     |
| Central wavelength / nm         | 700           |
| Spectral bandwidth / nm         | 30            |
| Exposure time / ms              | 20            |
| Wavefront sensor                | Shack-Hartman |
| Number of actuators             | 12×12         |

图 2 所示为未考虑噪声情况下的模拟实验结果, 图 2(a)为 AO 系统未工作时的模拟原始图, 图 2(b)为 AO 系统工作后得到的校正图像; 图 2(e)与 (f)分别为对应时刻的波前相位分布图, 可知, 校正后波前的均方误差从 287 减小到 87.2; 在模拟实验中总共生成 100 frame 校正后图像, 图 2(c)与 (d)分别为两种算法当选取比例为 10% 时的处理结果, 相对于处理前的图像, 两者的清晰度有明显提高, 表明幸运成像技术能提高望远镜的观测能力。

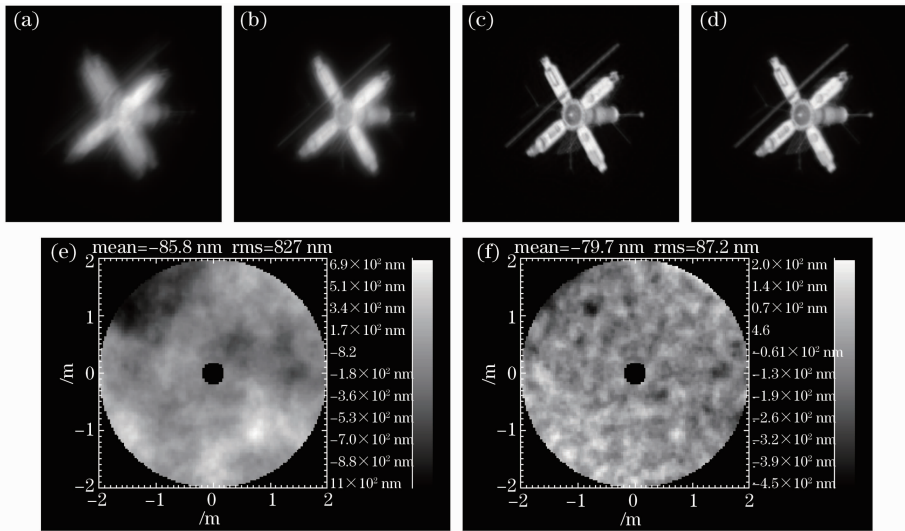


图 2 模拟实验。(a) AO 校正前图像;(b) AO 校正后图像;(c) 传统幸运成像算法复原像;  
(d) 频域幸运成像算法复原像;(e) 未校正波前;(f) 校正后波前

Fig. 2 Simulation experiment. (a) Image with AO off; (b) image with AO on; (c) restored image using classic lucky imaging algorithm; (d) restored image using lucky imaging in frequency domain

当定量比较两种算法的图像复原质量时,分别计算图 2(c)、(d)与原始图像的归一化均方误差(NMSE,  $E_{NMS}$ ):  $E_{NMS} = \|I - I_0\|_2^2 / \|I_0\|_2^2$ ,其中  $I_0$  为归一化的原始图像,  $I$  为归一化的复原图像,下标 2 为矩阵的 2 阶范数。计算结果分别为 0.2790 和 0.2717,表明频域幸运成像算法要优于传统幸运成像算法。

### 5 天文图像复原实验

本节介绍对实际天文目标图像的处理结果,由于未能得到 AO 校正后图像,实验时只能对实际拍摄的短曝光图像进行处理。望远镜为 Meade 公司

制造的 LX200R 施密特-卡塞格伦型,其口径为 25.4 cm,焦距为口径的 10 倍。

#### 5.1 土 星

土星的观测地点为湖南长沙(经纬度为  $28^{\circ}15'34''N, 112^{\circ}58'49''E$ )。成像相机为德国 Optronis 公司的 CamRecord CL600×2 CMOS 相机。采集图像时在相机与望远镜的连接处安装了放大倍数为 2 的巴洛镜,相机曝光时间为 19 ms,帧频为 50 frame/s,数据总共有 1100 frame,每帧图像的尺寸为 1024 pixel×1024 pixel,处理时只截取了大小为 128 pixel×128 pixel 的目标区域,然后经过预处理、图像配准后再分别采用不同的算法进行计算。

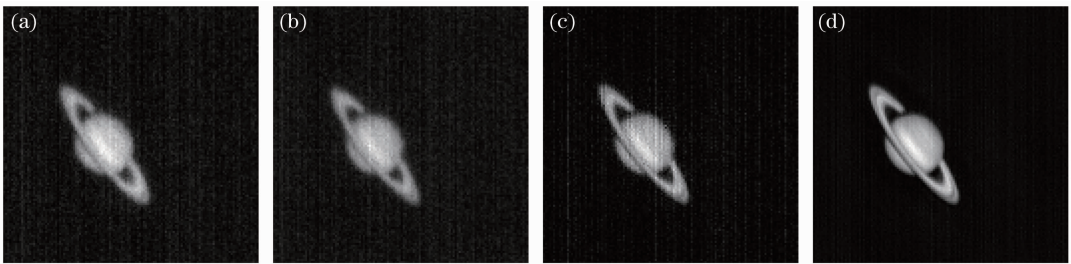


图 3 土星图像。(a) 原始图像最好帧;(b) 原始图像最差帧;(c) 传统幸运成像算法复原像;(d) 频域幸运成像算法复原像  
Fig. 3 Images of the saturn. (a) Best frame of original images; (b) worst frame of original images; (c) restored image using classic lucky imaging algorithm; (d) restored image using lucky imaging in frequency domain

图 3(a)与(b)分别为原始土星图像的最好帧和最差帧;图 3(c)和(d)分别为不同幸运成像算法的处理结果,选取比例均为 20%。图 3(c)和(d)表明图像经过幸运成像处理不仅使背景噪声得到一定抑

制,还使原来隐藏的目标细节信息得以显现。相比之下,频域幸运成像算法得到的图像分辨率更高,该图像显示出了土星环中的卡西尼缝。

## 5.2 月球

月球图像利用瑞士 PhotonFocus 公司的 MV2-D1280-640 CMOS 相机进行采集,相机曝光时间为 19 ms,帧频为 20 frame/s,数据总共有 200 frame,图像尺寸为 512 pixel×512 pixel。

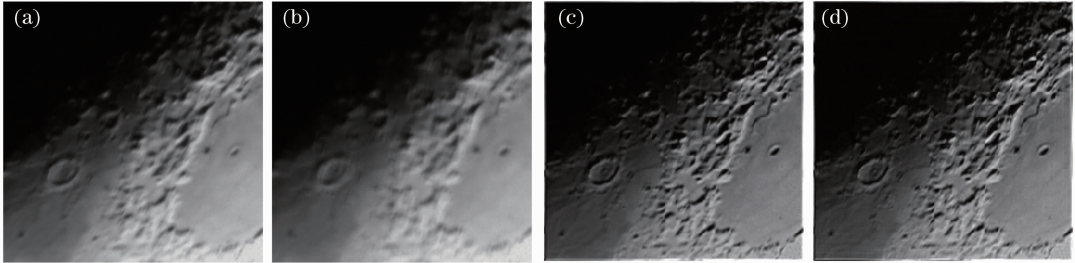


图 4 月球图像。(a) 原始图像最好帧;(b) 原始图像最差帧;(c) 传统幸运成像算法;(d) 频域幸运成像算法

Fig. 4 Images of the moon. (a) Best frame of original images; (b) worst frame of original images; (c) restored image using classic lucky imaging algorithm; (d) restored image using lucky imaging in frequency domain

利用 sobel 算子对复原前后图像的像质评价,在评价不同目标时分别以其最大值进行归一化。表 2 所示为土星和月球通过不同算法得到复原图像

表 2 不同算法图像复原质量定量比较

Table 2 Quantitative comparison for restored images

| Object | Worst frame | Best frame | Classic lucky imaging | Lucky imaging in frequency domain |
|--------|-------------|------------|-----------------------|-----------------------------------|
| Saturn | 0.149       | 0.286      | 0.584                 | 1                                 |
| Moon   | 0.004       | 0.019      | 0.893                 | 1                                 |

## 6 结 论

介绍了频域幸运成像算法的原理和处理流程,并将其与传统幸运成像算法通过模拟实验和实际实验进行了比较。

相比于传统幸运成像算法,频域幸运成像算法不对图像进行选取而是让所有图像均参与计算,并在每个空间频率处根据幅度值大小进行信息选取与融合,因此其不需要利用像质评价函数,也不需要图像进行分块处理,从而使得整个算法更加简单易行。模拟实验结果表明,相对于传统幸运成像算法,频域幸运成像算法更加有效地利用了短曝光图像在各个方向上的高分辨率细节信息,其与 AO 系统联合能明显提高望远镜的观测能力。

频域幸运成像算法只根据幅度值大小来选取频域复值而未考虑相位信息,而相对于幅度谱,相位谱包含了图像更多的“细节和特征”信息。在进一步的研究中需要引入相位信息以提高复原图像质量,或者采用更有效的算法来利用图像信息,如利用小波变换的多层多分辨率原理对图像进行分解,然后利用不同分辨率下的有用信息进行图像融合。

图 4(a)与(b)分别为 200 frame 原始图像中的最好帧和最差帧;图 4(c)与(d)分别为相应算法在选取比例为 10% 的计算结果,两种算法的重建图像相对于原始图像显示了月球表面的更多细节信息。

的定量分析结果,结果表明频域幸运成像算法优于传统幸运成像算法。

## 参 考 文 献

- 1 D L Fried. Probability of getting a lucky short-exposure image through turbulence[J]. J Opt Soc Am, 1978, 68(12): 1651-1658.
- 2 A Labeyrie. Attainment of diffraction limited resolution in large telescopes by Fourier analyzing speckle patterns in star images [J]. Astron Astrophys, 1970, 6(1): 85-87.
- 3 M C Roggemann, B M Welsh. Imaging Through Turbulence [M]. Boca Raton: CRC Press, 1996. 11-42.
- 4 Luo Lin, Liao Sheng, Fan Min, *et al.*. Effects of large telescope aberration on speckle imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(11): 1447-1451.  
罗林,廖胜,樊敏,等.天文望远镜像差对斑点成像技术的影响[J].光学学报,2005,25(11):1447-1451.
- 5 Luo Lin, Wang Li. Restoration of anisoplanatic astronomical image by using blind deconvolution[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(s2): s209007.
- 6 Zhao Yanyan, Yuan Yan, Su Lijuan. Point spread function estimation of blurring due to uniform linear motion in arbitrary direction[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0809003.  
赵妍妍,袁艳,苏丽娟.任意方向匀速直线运动模糊的点扩展函数估计[J].中国激光,2012,39(8):0809003.
- 7 Qiang Li, Sheng Liao, Honggang Wei, *et al.*. Restoration of solar and star images with phase diversity-based blind deconvolution[J]. Chin Opt Lett, 2007, 5(4): 201-203.
- 8 Liu Qiang, Ren Chengang, Sun Sui, *et al.*. Experiment research of lucky imaging technique for spatial objects [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(1): 011002.  
刘强,任晨纲,孙穗,等.空间目标幸运成像技术的实验研究[J].激光与光电子学进展,2011,48(1):011002.

- 9 N M Law, C D Mackay, J E Baldwin. Lucky imaging: high angular resolution imaging in the visible from the ground[J]. *Astron & Astrophys*, 2006, 446: 739–745.
- 10 N M Law, C D Mackay, R G Dekany, *et al.*. Getting lucky with adaptive optics: fast adaptive optics image selection in the visible with a large telescope[J]. *The Astrophysical Journal*, 2009, 692(1): 924–930.
- 11 Emil Dumic, Sonja Grgic, Mislav Grgic. New image-quality measure based on wavelets[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2010, 19(1): 011018.
- 12 Carmen J Carrano. Speckle imaging over horizontal paths[C]. *SPIE*, 2002, 4825: 109–120.
- 13 Vincent Garrel, Oliver Guyon, Pirre Baudoz. A highly efficient lucky imaging algorithm: Image synthesis based on Fourier amplitude selection[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2012, 124(918): 861–867.
- 14 J W Goodman. *Introduction to Fourier Optics*(2nd edition)[M]. New York: McGraw-Hill, 1996. 137–140.
- 15 H Foroosh, J B Zerubia. Extension of phase correlation to sub-pixel registration[J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 2002, 11(3): 188–200.
- 16 Manuel Guizar-Sicairos, Samuel T Thurman, James R Fienup. Efficient subpixel image registration algorithms[J]. *Opt Lett*, 2008, 33(2): 156–158.
- 17 Marcel Carillet, Christophe Vérinaud, Mario Guarracino, *et al.*. CAOS—a numerical simulation tool for astronomical adaptive optics[C]. *SPIE*, 2004, 5490: 637–648.
- 18 Rafael C Gonzalez, Richard E Woods. *Digital Image Processing* (2nd section)[M]. Ruan Qiuqi. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 148–150.
- 冈萨雷斯, 伍 兹. *数字图像处理(第二版)*[M]. 阮秋琦 译. 北京: 电子工业出版社, 2002. 148–150.

栏目编辑:李志兰