

空间目标幸运成像技术的实验研究

刘 镓 任晨纲 孙 穗 胡浩军 梁永辉

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 幸运成像技术是一种基于目标序列短曝光图像选取、配准、叠加的事后处理方法,能够有效降低大气湍流导致的成像闪烁和抖动对图像质量的影响,提高地基望远镜的成像分辨率。首先介绍了幸运成像技术的基本原理和处理流程,然后应用该项技术,对新月月面进行了幸运成像观测实验,给出了对获得的图像进行处理和分析的结果。处理结果表明,幸运成像技术能够明显地提高空间目标通过湍流大气后的成像质量。对处理结果用小波变换的方法进行了图像增强,给出了增强结果图像和像质评价,增强结果表明,图像增强能够进一步提高幸运成像结果的质量,改善结果图片的视觉效果。

关键词 图像处理; 幸运成像; 大气湍流; 像质评价; 图像配准

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP48.011002

Experimental Research of Lucky Imaging Technique for Spatial Objects

Liu Qiang Ren Chengang Sun Sui Hu Haojun Liang Yonghui

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

Abstract Lucky imaging technique is an image post-processing method based on selecting-recentring-coadding of sequence short-exposure images of objects, which can reduce the influence of image quality because of turbulence-induced imaging motion-blur restoration and reduce the resolution loss. The basic theory and flow of the lucky imaging are described and the experimental observation of crescent through atmospheric turbulence is reported. Results show that the lucky imaging technique can improve the imaging resolution of spatial objects through atmospheric turbulence. The image enhancement for lucky imaging results based on wavelet transform is processed. The results after enhancement show that the image enhancement technique can improve the imaging resolution farther and the visual effect.

Key words image processing; lucky imaging; atmosphere turbulence; image quality estimation; image co-register

OCIS codes 100.0100; 100.3020; 100.2980

1 引言

地基光学系统对目标的高分辨率成像,是利用地基光学系统对目标进行光学成像观测的基础。而由于大气湍流的存在,地基成像系统的分辨率受到很大的限制。湍流引起大气折射率分布不均匀,导致光波通过大气传输之后,波前发生畸变,极大地损害了光学系统的成像质量和分辨率。幸运成像技术是一种对目标序列短曝光图像进行选取-配准-叠加的事后处理技术。它利用高速相机拍摄大量的目标序列短曝光(曝光时间小于大气的相干时间)图像,根据合适的像质评价函数(如 brenner 算子等)选取受大气扰动相对较小时刻的图像(称为“幸运图像”),以数字图像处理的手段将选取的图像进行配准、叠加,从而得到消除了大气扰动影响的高分辨力图像。本文阐述了空间目标幸运成像技术的基本原理和处理流程,应用该处理方法对实验观测得到的新月月面序列短曝光图像进行事后处理,处理结果表明幸运成像技术能够显著提高扩展目标通过湍流大气后的成像分辨率。

收稿日期: 2010-07-19; 收到修改稿日期: 2010-09-29

作者简介: 刘 镓(1986—),男,硕士研究生,主要从事图像处理方面的研究。E-mail: liuqiang5@126.com

导师简介: 梁永辉(1972—),女,教授,博士生导师,主要从事图像处理和自适应光学方面的研究。

E-mail: yonghuiliang@sina.com

2 幸运成像技术的基本原理与处理流程

大气湍流一直是限制地基成像观测系统成像分辨率的主要因素^[1],尤其在非等晕成像条件下对成像路径上包含湍流大气的光学系统而言,系统的像差不仅包含低阶的 Piston 像差、倾斜像差,还包括离焦、像散等高阶像差^[2]。由 Labyrie 和 Fried^[3]的理论可知,目标的短曝光图像中,存在一定比例接近衍射极限的图像,它们只存在低阶像差。幸运成像技术的基本原理就是按照一定的标准,将这些好图像选取出来,并进行配准叠加^[4],从而提高图像的成像质量,使得原本无法显示的弱目标得以显示,原本无法分辨的细节得以分辨^[5]。

幸运成像基本策略首先采用高分辨率高帧频相机捕获空间目标序列短曝光图像^[6],降低被记录图像的运动模糊程度,然后根据像质评价函数选取每一帧图像中同属于一个等晕窗口中较为清晰的部分,配准叠加后输出一幅清晰度显著提高的图像^[7]。幸运成像技术主要包括图像的选取、配准、叠加3个过程,点目标幸运成像中像质评价一般选用斯特列尔比作为评价因子^[8],对于扩展目标的成像观测,图像清晰度评价的算法有很多,在幸运成像处理中,要根据所拍摄目标的特征选择合适的像质评价函数,基于图像灰度的梯度函数由于计算简单,准确性高,使用的也最为广泛。图像边缘是图像最基本的特征,图像的轮廓、细节基本都存在于图像的边缘部分,而图像越清晰,则图像包含的细节越丰富,边缘更锐利,用数字图像计算得到的灰度梯度值越大。在本文的研究中使用了图像灰度梯度平方和的 Brenner 算法。Brenner 算法采用 2×2 的差分算子,其方向模板为水平或垂直方向的梯度,如图 1 所示。

$$\begin{array}{cc} \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \\ \text{horizontal} & \text{vertical} \end{array}$$

图 1 Brenner 算法的方向模板
Fig. 1 Directional template of Brenner operator

在实际处理中,采用了垂直方向的模板进行灰度梯度平方和的统计,使用

$$Q_{BR} = \sum \sum [f(x+1, y) - f(x, y)]^2 \quad (1)$$

作为短曝光图像的像质评价函数,式中 $f(x, y)$ 表示图像灰度矩阵。图像的配准叠加是幸运成像处理中关键的一步^[9],在此采用灰度相关的方法,两幅图进行相关配准,基准图为 $f(x, y)$,待配准的子图为 $\omega(x, y)$ (可称为掩模或者模板),二者均表示图像的灰度矩阵。在基准图上寻找与子图像(掩模) $\omega(x, y)$ 最佳匹配位置,即将 $\omega(x, y)$ 作为空间滤波器在 $f(x, y)$ 中的每个位置计算它们的乘积的和(或者归一化后的值),记为两者的相关系数。当得到相关系数达到最大的时候,即为 $\omega(x, y)$ 在 $f(x, y)$ 最佳匹配位置。相关系数的计算公式为

$$\eta_{\text{corr}} = \sum \sum f'(x, y) * \omega(x, y) / \sqrt{[\sum \sum f'^2(x, y)] * [\sum \sum \omega^2(x, y)]}, \quad (2)$$

式中 $f'(x, y)$ 为在基准图中截取的和子图 $\omega(x, y)$ 相同大小的一块子区域。

另外,在对序列短曝光图应用该项技术之前,一般情况下,要根据系统的随机噪声和低频背景干扰等特点,对图像进行噪声滤除和背景抑制等预处理^[10]。综上所述,空间目标的幸运成像处理流程可以用图 2 表示。图中 N 为所采集序列短曝光图像的帧数, $F_k(x, y)$ 为图像的灰度矩阵,选出的“幸运图像”用相关配准方法叠加得到结果图像^[11]。

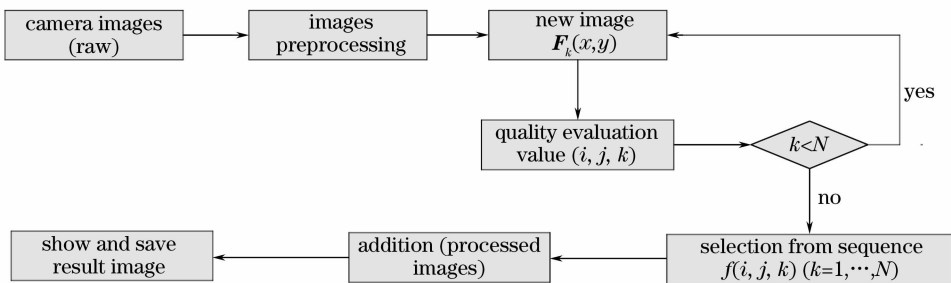


图 2 空间目标幸运成像处理流程图

Fig. 2 Flow chart of lucky imaging processing for spatial objects

3 空间目标幸运成像观测实验及结果

基于空间目标幸运成像的基本原理^[12],为了验证幸运成像技术能够在空间目标的成像观测上显著提高

成像分辨率,探索如何根据大气湍流条件选择合适的望远镜口径、拍摄帧频、曝光时间等拍摄参数以及研究在事后处理中选取不同比例对幸运叠加结果的影响,进行了应用幸运成像技术的空间目标成像观测和事后处理实验^[13]。

实验以新月作为观测目标,实验中采用卡塞-格林望远镜作为观测设备;采用外接在望远镜上、具有较高拍摄帧频的相机配合图像采集卡作为图像采集设备;计算机作为图像的存储和显示设备。在实验中选用的望远镜口径为 254 mm,焦距为 2.5 m,相机像元尺寸 $12\ \mu\text{m}\times 12\ \mu\text{m}$,帧频为每秒 500 帧。得到新月月面原始短曝光图像 2000 幅。图 3 给出 brenner 算子像质评价后最好图和最差的图。括号中为归一化 brenner 算子评价值。

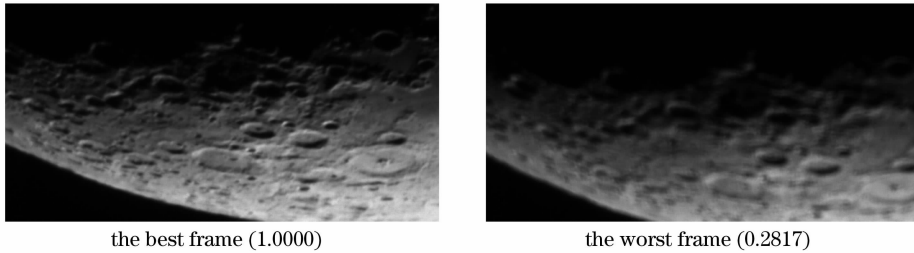


图 3 新月原始图像

Fig. 3 Original images of crescent

从拍摄的结果可以看出,原始的短曝光图像中,成像效果最好的图,月面细节分辨比较明显,而成像效果最差的图,图像受湍流的影响较严重,图像比较模糊。从像质评价因子来看,最差图的像质评价值不到最好图的 $1/3$,也说明了大气湍流引起了图像质量的明显下降。按照前述的空间目标幸运成像处理方法,分别以不同的选取比例进行幸运叠加处理,处理结果如图 4 所示。

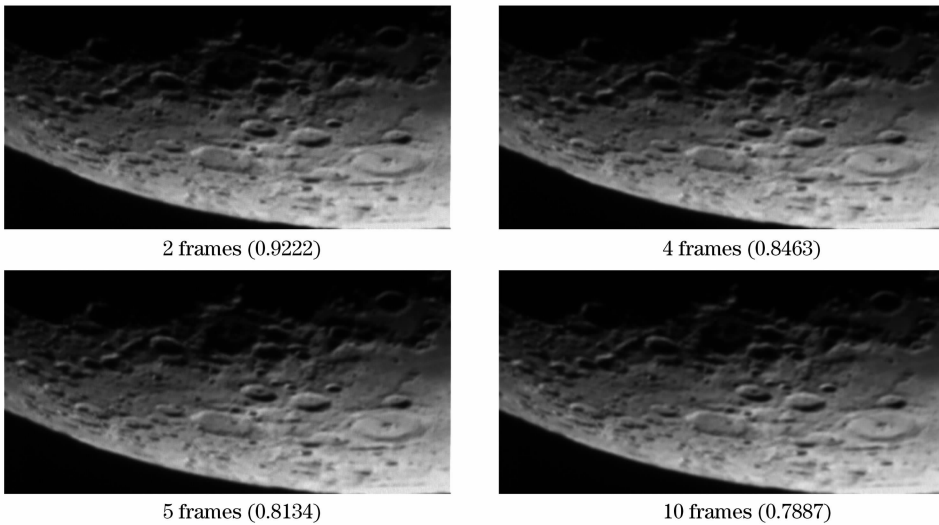


图 4 幸运成像处理结果

Fig. 4 Results of lucky imaging processing

从图 4 可以看出,随着叠加帧数的增加,图像清晰度评价函数呈现一个下降的趋势,从主观上也会觉得叠加比例增大后,图像细节更加不明显。叠加后的图像质量均不超过原始图最好的一帧,这是因为叠加时总需要将次好的一帧叠加到最好图上,而且原始图像本身存在除大气湍流影响之外的原因造成的图像质量下降。这样多帧叠加后会造成图像的锐利度下降,分辨细节更加困难。但是叠加后的图像所包含的信息与单帧图像相比,具有可靠性、冗余性和互补性。利用冗余信息可以改善信噪比,利用互补性信息可以获得更全面、更丰富、包含更多细节的信息。经过图像增强,将多帧叠加的图像数据进行提取综合,增强图像可以显示出叠加图像中更丰富的信息,改善图像的视觉效果。

图 5 显示了图 4 中幸运叠加的结果经过图像增强后的效果。采取的图像增强的方法是计算图像的二维小波变换^[14],将第一级的变换系数增大 1 倍,然后计算反变换得到增强后的图像。相当于凸显了主要代表

图像边缘细节的高频信息。从图 5 可见,经过了图像增强,图像包含的信息得以更加充分的显示^[15]。从主观方面,随着叠加比例的增大,图像的清晰度明显的提高,能够分辨的细节越来越多,处理后的图像质量均好于原始图中最好的一帧,也均好于原始图中最好的一帧经过相同的图像增强后的结果。可以认为经过幸运成像技术处理后图像的分辨率提高;从客观方面,从图像清晰度评价函数的评价价值看,随着叠加帧数的增加,图像的 brenner 算子也逐渐增大。多帧叠加后图像的像质评价参数均好于最好的单帧,也说明了幸运成像技术的有效性。

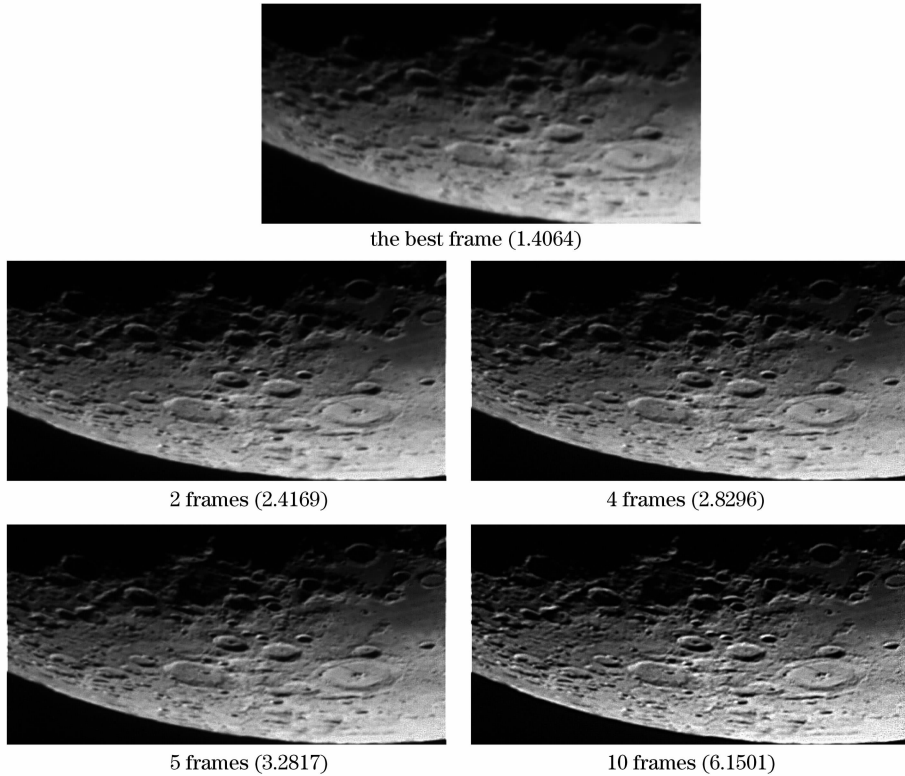


图 5 处理结果图像增强

Fig. 5 Results after image enhancement

对于空间运动目标比如国际空间站(ISS)以及卫星等,难点在于序列短曝光原始图像的获取。它的处理步骤与新月月面成像是一样的,只是在配准叠加时除了考虑目标在序列图像中的偏移之外,还需要考虑目标的旋转。从已经完成的实验中可以看出幸运成像技术依然可以改善其成像质量。

4 结 论

地基光学系统对空间目标成像时,在成像路径上大气湍流的时间尺度和空间尺度变化频繁,地基成像观测系统的分辨率因此受到很大的限制。非等晕条件下,扩展目标幸运成像技术通过短曝光技术能够冻结大气湍流的影响,经过评价选取-配准叠加能够克服大气湍流引起的非等晕性,通过多幅图像信息的互补,得到包含更丰富信息的结果图像,能够有效提高系统的成像分辨率。

通过理论研究和实验观测,应用幸运成像技术对空间扩展目标的序列短曝光图像进行事后处理,并对处理结果进行分析,验证了幸运成像技术能够有效降低大气湍流导致的成像闪烁和运动模糊对图像质量的影响。在不需要昂贵的硬件设备和繁杂的数学运算的前提下,可以有效提高扩展目标通过大气湍流成像的质量,提高光学系统的成像分辨率。

参 考 文 献

- 1 Rao Ruizhong. Light Propagation in the Turbulent Atmosphere[M]. Hefei: Anhui Science And Technology Press, 2005
- 饶瑞中. 光在湍流大气中的传播[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2005

- 2 Li Yuqiang, Xiong Yaoheng. Observation accuracy analysis of space debris[J]. *Astronomical Research & Technology*, 2006, **3**(1): 21~27
李语强,熊耀恒. 空间碎片观测精度分析[J]. 天文科学与技术, 2006, **3**(1): 21~27
- 3 D. L. Fried. Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1966, **56**(10): 1372~1379
- 4 N. M. Law, C. D. Mackay, J. E. Baldwin. Lucky Imaging: High Angular Resolution Imaging in the Visible from the Ground[D]. Cambridge: Astron & Astrophysics, 2005
- 5 R. N. Tubbs. Lucky Exposures: Diffraction Limited Astronomical Imaging through the Atmosphere[D]. Cambridge: Cambridge University, 2003
- 6 Yang Wenxia, Cai Chao, Ding Mingyue *et al.*. Characterization of aero-optic effects and restoration of aero-optical degraded images[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 347~352
杨文霞,蔡超,丁明跃等. 气动光学效应分析与气动模糊图像复原[J]. 光学学报, 2009, **29**(2): 347~352
- 7 A. Glindemann, S. Hippler, T. Berkefeld *et al.*. Adaptive optics on large telescopes[J]. *Exp. Astron.*, 2000, **10**: 13~16
- 8 Bao Jianghong. The Experimental Study on Lucky Imaging Technology[D]. Changsha: National University of Defense Techonlogy, 2008
鲍江宏. 幸运成像技术的实验研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2008
- 9 C. Mackay, J. Baldwin, N. Law *et al.*. High resolution imaging in the visible from the ground without adaptive optics: new techniques and results[C]. *SPIE*, 2004, **5492**: 128~135
- 10 M. I. Charnotskii. Anisoplanatic short-exposure imaging in turbulence[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1993, **10**(3): 492~501
- 11 D. L. Fried. Probability of getting a lucky short-exposure image through turbulence[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1978, **68**(12): 1651~1658
- 12 Yang Zhongliang, Liang Yonghui, Hu Haojun *et al.*. Theoretical and experimental research of lucky imaging technique about extended objects[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(5): 051004
杨忠良,梁永辉,胡浩军等. 扩展目标幸运成像技术的理论和实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(5): 051004
- 13 Huang Jianming, Shen Maozuo. Multiframe blind deconvolution restoration of atmospheric turbulence-degraded images based on noise characteristic[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1686~1690
黄建明,沈忙作. 基于噪声特性的大气湍流退化图像多帧盲反卷积复原[J]. 光学学报, 2008, **28**(9): 1686~1690
- 14 Weng Xiaoguang, Wang Huinan, Tao Ling. Contrast enhancement algorithm for medical images based on wavelet transform [J]. *J. Sichuan University*, 2010, **47**(1): 96~101
翁晓光,王惠南,陶玲. 一种基于小波变换的医学图像增强新算法[J]. 四川大学学报, 2010, **47**(1): 96~101
- 15 Sijiong Zhang, Frank F. Suess, Craig D. Mackay. Anisoplanatic Lucky Imaging for Surveillance [D]. Cambridge: University of Cambridge, 2006