基于兴隆观测基地 50 cm 望远镜的幸运成像系统

向 娥[1,2],卢晓猛[1],姜晓军[1]

(1. 中国科学院光学天文重点实验室(国家天文台),北京 100012; 2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要:大气湍流会在很大程度上降低地基望远镜的空间分辨率,而幸运成像技术以较低的成本、简单的设备、易实现的算法可以有效修正大气湍流的影响,从而提高了地基望远镜开展天体成像和密集星场高精度测光观测的能力。基于兴隆观测基地 50 cm 望远镜研制了幸运成像系统,该系统包括滤光片、望远镜增焦子系统、数据采集子系统和数据处理子系统。在视宁度良好的晴夜对月球、大行星、球状星团和双星进行了观测,成功获取了月球表面的清晰图像,恒星星像的半高全宽(FWHM)达到0.6″,好于 2 倍望远镜衍射极限。观测结果表明,该幸运成像系统能够有效提高地基望远镜的空间分辨本领,为下一步的高分辨天文观测研究奠定了基础。

关键词:幸运成像; 高分辨率成像; 大气湍流

中图分类号:P111 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2015)04-1278-06

Lucky imaging system on the 50 cm telescope at Xinglong observatory

Xiang E[1,2], Lu Xiaomeng[1], Jiang Xiaojun[1]

(1. Key Laboratory of Optical Astronomy, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The spatial resolution of ground-based telescopes was greatly limited by the effects of atmospheric turbulence. Lucky imaging can efficiently reduce the blurring effects of atmospheric turbulence with low cost, uncomplicated instrument and easy actualizing solution. Lucky imaging system is based on the 50cm telescope at Xinglong Observatory. It consists of filters, subsystem of barlow lens which increases the focal length of telescope, subsystem of data acquisition and subsystem of data reduction. The moon, globular clusters and close binary stars were observed in good seeing conditions, by using the lucky imaging system. Sharp images of the lunar surface, and FWHM of 0.6″ of stars which is two times better than the diffraction of the 50cm telescope were obtained successfully. The experimental results show that this system can greatly improve the spatial resolution of ground-based telescopes, and it would play an important role in subsequent high resolution astronomical observations.

Key words: lucky imaging; high resolution imaging; atmospheric turbulence

收稿日期:2014-08-10; **修订日期**:2014-09-11

作者简介:向娥(1986-),女,博士生,主要从事幸运成像技术及其在天文观测中的应用方面的研究。Email:xiange@nao.cas.cn

导师简介:姜晓军(1970-),男,研究员,博士生导师,主要从事天文技术与方法方面的研究。Email:xjjiang@nao.cas.cn

0 引　言

在传统的地基天文观测中，大气湍流会引起光束波前误差,使观测图像存在不同程度的平移、扭曲和模糊,难以达到大多数望远镜的衍射极限[1]。为了修正大气湍流的影响，针对地基望远镜发展了多种技术,如自适应光学技术、散斑干涉技术、Tip/Tilt 技术和幸运成像技术[2]。自适应光学采用波前修正的方法校正大气湍流的影响，使大口径望远镜实时获得高分辨率图像,系统相对复杂,造价昂贵;Tip/Tilt 技术采用增加摆镜的方式，可以较好地修正低阶大气湍流的影响，较自适应光学和望远镜干涉技术造价便宜、简单易行,但在光学波段难以达到望远镜的衍射极限；散斑干涉技术使用事后处理的方法获得高分辨率图像,但其算法比较复杂,耗费时间;幸运成像技术是从大量短曝光图片中选取部分受大气湍流影响较小的图像,进行配准、叠加,最后得到高空间分辨率、高信噪比的图像用于天文研究。虽然幸运成像技术是事后处理技术,存在实时性较差、无法修正望远镜的静态像差、等晕区和需要较亮参考星导致目标天空覆盖范围较小[3]等缺点,但是相对于前述几种高分辨成像技术,它能以较低的成本、简单的设备和易实现的算法有效地提高地基中小型望远镜的空间分辨本领,使其接近或达到衍射分辨极限。

幸运成像技术起源于美国,1978 年 Fried 研究中发现在短曝光图像中,存在一定概率的几乎达到衍射极限分辨率的“幸运图像”[1]。2004 年,Mackay 和他所在的剑桥大学天文观测小组,利用曝光选择-配准-叠加技术，在口径 2.5 m 的 Nordic Optical Telescope (NOT)上进行天文观测,并正式称这一技术为“幸运成像”(Lucky Imaging)[4]。国际上现有多套用于天文研究的幸运成像系统,如 LuckyCam[2],Astralux[5],FastCam[6],先后应用于多台大口径望远镜,使其获得了接近衍射极限的分辨率图像。2008 年,Law 等人首次结合幸运成像技术和自适应光学进行观测研究[7],使地面望远镜的分辨率提高到哈勃空间望远镜的 3 倍,随后其研究团队研制了高效率的 AOLI 系统[8]。

在国内,2008 年杨忠良等人利用幸运成像技术对扩展目标进行理论和实验研究[9],随后对宽视场自然目标进行了高分辨率成像研究[10];中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制了幸运成像系统,给出了面源的观测结果,结果表明幸运成像技术可在很大程度上提高图像的分辨率[11-12],但是在天文观测中的应用很少。

国际合作项目 SONG(Stellar Observations Network Group)计划在南北半球各建 4 台 1 m 望远镜,组成星不落观测网络,望远镜计划配备幸运成像系统,利用微引力透镜搜寻系外行星[13]。针对 SONG 项目天文研究的需求,研制了一套幸运成像预研究系统。该系统在国家天文台兴隆观测基地 50 cm 望远镜上进行了试验,成功地获得了高分辨率的图像,为下一步天文观测研究奠定了基础。同时,国内多数台站天文观测条件一般，占主流的是用于测光的小型通用天文望远镜，其空间分辨率一般都依赖于当地的大气视宁度。该工作研制的幸运成像系统能够有效应用于点源的观测研究，在几乎不改变望远镜本身硬件设备的条件下，以较低的成本使中小型望远镜在视宁度较好的情况下具备接近衍射极限的高分辨率成像能力。

1 兴隆观测基地幸运成像系统

兴隆观测基地位于河北省兴隆县，燕山主峰南麓,长城北侧,距北京 150 km,海拔 860 m。兴隆观测基地的大气视宁度(Dome Seeing)约为 2.3″[14],900 nm 处大气相干长度大约为 7.8 cm。

根据 Fried 提出的幸运成像概率公式[1],获得“幸运图像”的概率 P 为:

$$P=5.6\exp[-0.155\,7(D/r_0)^2],\ D/r_0\geqslant 3.5$$

式中:D 为望远镜的口径;r_0 为大气相干长度。根据公式可知，在兴隆观测基地的条件下应用幸运成像技术,要使幸运成像的概率达到典型的 1%[15],则适合使用幸运成像技术的望远镜口径为 50 cm,因此工作中幸运成像系统选择兴隆观测基地 50 cm 望远镜为试验平台。

兴隆观测基地 50 cm 望远镜是赤道式卡塞格林望远镜,系统焦比 F8,焦面比例尺为 51 (″)/mm,V 波段探测极限约为 17 等。

兴隆观测基地幸运成像系统主要包括滤光片、望远镜增焦子系统、数据采集子系统和数据处理子系统四个部分,如图 1 所示。

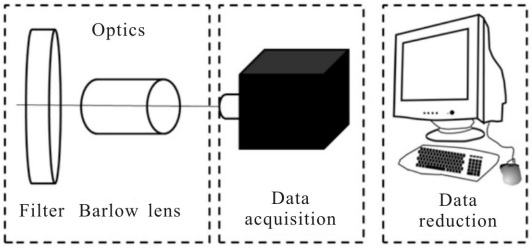


图 1 幸运成像系统结构图

Fig.1 Sketch of the system of lucky imaging

1.1 滤光片

兴隆观测基地幸运成像系统采用了 Johnson 滤光片系统。为了在相同的积分时间内获得更深的极限星等,因此试验观测时未使用滤光片。

1.2 望远镜增焦子系统

望远镜增焦子系统是可嵌入光学系统的负透镜组，能够增加原光学系统的焦比。对于大多数望远镜,在接近望远镜的衍射分辨极限成像观测时,传统观测系统获得的图像会欠采样，因此需要使用合适的增焦镜增加望远镜系统的焦距，使相机的分辨率能满足奈奎斯特采样定理。试验使用增焦镜的增焦比为 4 倍,每像元对应的天空张角为 0.17″。

1.3 数据采集子系统

幸运成像系统相机为 Andor DU-888 EMCCD (Electron Multiplying CCD),这款相机使用了低噪声读出电路设计和背照式芯片,具有高灵敏度、高动态范围、高帧频和低噪声的特点。EMCCD 的电子倍增过程可以有效减小读出噪声对信号的影响，因此可以高速读出提高帧频。使用 10 MHz 读出,图像的帧频可达到 8.9 fps,在选择自己感兴趣的区域(开窗)的条件下帧频可达到更高。表 1 为相机的具体性能参数,图 2 为其量子效率曲线,从图中可以看出相机在可见光和近红外波段响应较好。

表 1 Andor DU-888 性能参数

Tab.1 Performance parameter of Andor DU-888

Performance parameter of Andor DU-888	
Pixel size	1 024×1 024, 13 μm×13 μm
Frame frequency	8.9 frame/s
Dynamic range	1750:1; 6884:1
Well depth	88 000e-; 730 000e-
EM gain*	1-300
Read noise	<1/47e-@10 MHz
Dark	0.33 e-/pixel·s^{-1} @×300 EM gain@-85 ℃
Peak QE	97%@570 nm

*EM gain is electron multiplication gain of Electron Multiplying CCD.

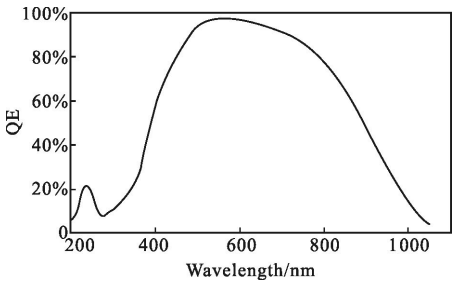


图 2 DU-888 的量子效率曲线

Fig.2 Quantum efficiency curve of DU-888

数据采集软件是基于 Andor 公司相机控制软件开发包,根据幸运成像观测要求开发的。软件集成滤光片控制、CCD 参数配置、图像采集和数据存储等功能,以便进行幸运成像观测。

1.4 数据处理子系统

数据处理子系统包括图像预处理、图像选取、配准和叠加等模块,数据处理流程如图 3 所示。首先对原始图像进行预处理,预处理包括本底改正、平场改正和去除宇宙线等步骤。其次对预处理后的图像根据像质评价函数进行选取和配准，最后利用 Drizzle 算法进行图像叠加,提高图像的信噪比,并通过图像增强算法有针对性地强调图像的整体或局部特性,从而获得高分辨率图像用于天文研究。数据处理时根据不同的观测目标分别进行处理:对于面源,以灰度梯度和亮度相似性作为像质评价函数，选取受大气湍流影响最小的部分图像，利用快速傅里叶变换的相关性进行图像配准;对于点源,以斯特列尔比作为像质评价函数,利用最亮点法进行图像配准。

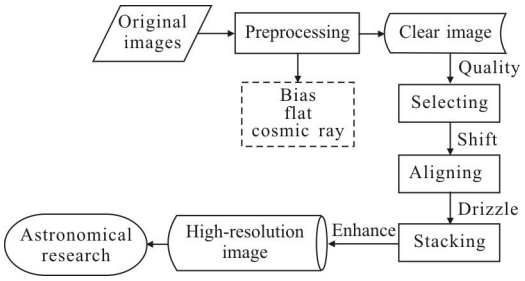


图 3 幸运成像系统数据处理流程

Fig.3 Pipeline of lucky imaging system

面源的像质评价函数通过像素滑动窗口计算不同图像中的选取区域的梯度和亮度相似性，获得整

个区域的相似性分布，从而获得图像像质评价函数如下[16]:

$$q(x_i,y_i)=(1-W)\cdot g(x_i,y_i)+W\cdot e(x_i,y_i)$$

式中:$q(x_i,y_i)$、$g(x_i,y_i)$和 $e(x_i,y_i)$分别为区域 x 和区域 y 中第 i 个像素的像质、梯度相似度和亮度相似度;W 为灰度相似度和亮度相似度的权重，一般小于 0.5。像质评价函数的算法如图 4 所示,首先计算区域 x 和 y 的梯度，评估两个区域的对比度和结构相似度;计算区域 x 和 y 的亮度相似度。然后结合这两种相似度获得图像相似度测量。

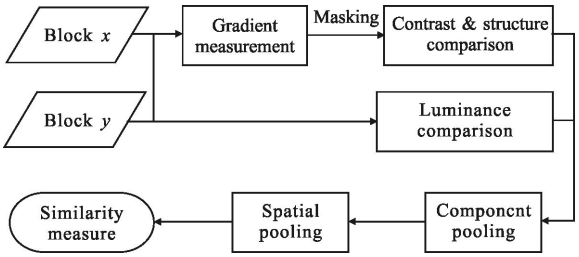


图 4 相似性像质评价函数框图

Fig.4 Block diagram of the proposed scheme

一般来说，幸运成像系统还应包括大气色散改正镜 (Atmospheric Dispersion Corrector,ADC)，从 EMCCD 的量子效率曲线可以看出，设备在 V、R 波段响应较好,50 cm 望远镜在 900 nm 的衍射极限为 0.45″，观测目标高度角大于 60°时，大气色散小于 0.40″,因此观测时可不采用 ADC。

综上所述，幸运成像系统参数如下:EMCCD 的单像元对应的天空张角为 0.17″,约为望远镜衍射极限的 1/3,视场为 2.87′。

2 天文观测试验及数据处理结果

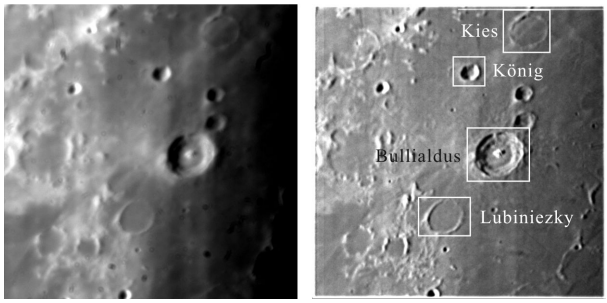
2.1 观测试验

在前期系统搭建、软件调试、测试试验的基础上,申请了兴隆基地 50 cm 望远镜的正式观测时间,在 2013 年 9 月 27 日和 10 月 11 日安装幸运成像系统进行了天文观测,以验证幸运成像系统的能力。观测时天气晴朗，两个观测夜的视宁度分别为 1.7″和 1.4″。根据望远镜和幸运成像系统的参数,选取了月球、大行星、球状星团和近距离双星进行了观测。

2.2 试验结果分析

2.2.1 面源目标

太阳系大行星和月球都是典型的面源，以月球为例，利用 50 cm 望远镜幸运成像系统拍摄月球表面云海附近的环形山，图 5 中由上到下的四个环形山分别为 Kies、König、Bullialdus 和 Lubiniezky 环形山。设置曝光时间为 5 ms,获得原始图像 500 帧,观测时高度角 61°。图 5(a)为 25 ms 曝光(连续 5 幅图像直接叠加)的图像,图 5(b)为利用相似度算法选取像质最好的 1%(5 幅图像)进行配准和叠加,提高信噪比得到的幸运成像图像,等效曝光时间 25 ms。幸运成像系统获得的图像更清晰,细节更丰富,可以清晰地分辨出更多的小环形山。



(a) 25 ms 曝光图像　　(b) 幸运成像图像

(a) Long exposure image　　(b) Lucky imaging image

图 5 月球图像(2013 年 9 月 28 日)

Fig.5 Image of Moon(Sep.28, 2013)

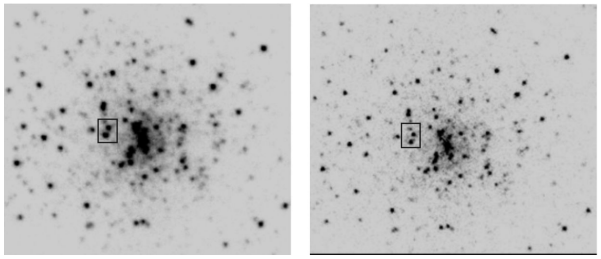
观测时月球接近远地点，测站到月亮表面的距离约为 39.8×10^4 km。Bullialdus 环形山,直径 61 km,深 3.5 km[17],其直径对应的天空张角约为 31.6″。从图 5(b)中不仅可以清晰地看到该环形山形貌，还能分辨出内壁梯状分布和外侧的毯状分布。

2.2.2 点源目标

除面源观测外,还利用 50 cm 望远镜幸运成像拍摄了球状星团和近距离双星,用以验证该系统对传统天文测光观测较为困难的密集星场和密近双星等的观测能力。以球状星团M15 和双星 HD23865 为例。

球状星团 M15(赤经:$21^h29^m58^s$,赤纬:+12°10′01″),位于飞马座，距离 33600 光年。设置曝光时间为 30 ms,电子倍增增益(EM gain)为 300,获得 1000 幅原始图像。图 6 (a) 为 5 s 曝光获得的球状星团 M15 (EM gain 为 200),图中标出的星像半高全宽为 1.3″;图 6(b)为利用斯特列尔比从原始图像中选取像质最好 1%进行配准叠加获得的幸运成像图像,等效曝光时间 300 ms。图 6(b)中标出的星像半高全宽为 0.6″,幸运成像系统使望远镜的分辨本领提高了 2 倍多,

幸运成像图像中两颗恒星的信噪比和 5 s 曝光图像的信噪比相当。近距离双星 HD23865(赤经:$03^h48^m58^s$,赤纬:+14°58′31″),角距离 1.1″,设置曝光 10 ms,共获得 2 000 幅原始图像。图 7(a)中左图为 20 s 曝光(2 000 幅图像叠加)获得的双星图像,右图为该双星的星像轮廓;图 7(b)中左图为利用斯特列尔比从原始图像中选取像质最好 1%进行配准叠加获得的幸运成像图像,等效曝光时间 200 ms,右图为该双星的星像轮廓,星像半高全宽为 0.6″。可以看出,传统的测光观测长曝光图像无法分辨角距为 1.1″的双星,而幸运成像系统由于提高了望远镜的分辨本领,从而可以完全分辨出角距大于 0.6″的近距离双星。

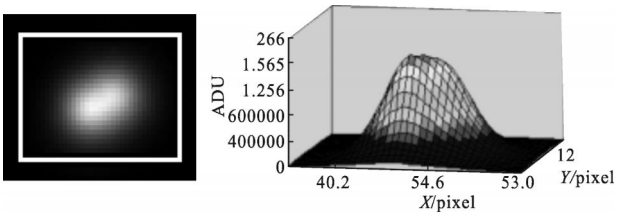


(a) 长曝光图像 (b) 幸运成像图像

(a) Long exposure image (b) Lucky imaging image

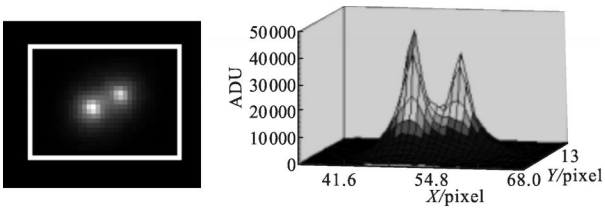
图 6 球状星团 M15

Fig.6 Globular cluster M15



(a) 长曝光图像及其星像轮廓

(a) Long exposure image and its profile



(b) 幸运成像图像及其星像轮廓

(b) Lucky imaging image and its profile

图 7 近距离双星 HD23865

Fig.7 Close binary HD23865

利用幸运成像系统对月球进行观测,清晰地获得了环形山及其周围的结构分布图像;对球状星团和近距离双星的观测,获得了星像半高全宽为 0.6″的图像。以上观测结果表明该幸运成像系统能够有效提高望远镜的空间分辨率,可对面源和点源目标进行高分辨率观测。

3 结 论

基于50 cm 望远镜成功研制了一套幸运成像系统,该系统造价低,在不改变望远镜本身的条件下使望远镜的空间分辨率获得明显提高。通过对球状星团和双星的观测表明,该幸运成像系统成功地将望远镜的空间分辨本领提高到 0.6″,好于望远镜 2 倍衍射极限,为下一步天文观测研究奠定了基础。同时,作为 SONG 幸运成像终端的预研究系统,该系统的相关技术在进一步升级和完善后可直接移植至 SONG 项目,也可推广到国内其他台站的通用型测光望远镜上。

参考文献:

[1] Fried D L. Probability of getting a lucky short-exposure image through turbulence [J]. ***Optical Society of America***, 1978, 68: 1651-1658.

[2] Law N M. Lucky Imaging: Diffraction-limited astronomy from the ground in the visible [D]. UK: Cambridge University, 2006.

[3] Law N M, Mackay C D, Baldwin J. Lucky Imaging: high angular resolution imaging in the visible from the ground [J]. ***Astronomy & Astrophysics***, 2006, 446(2): 739-745.

[4] Mackay C D, Baldwin J, Law N M. High-resolution imaging in the visible from the ground without adaptive optics: new techniques and results [C]//Proceedings of the SPIE, 2004, 5492: 128-135.

[5] Hormuth F. AstraLux: High angular resolution astronomy with an electron multiplying CCD [D]. German: University of Heidelberg, 2007.

[6] Oscoz A, Rebolo R, López R, et al. FastCam: a new lucky imaging instrument for medium-sized telescopes [C]// Proceedings of the SPIE, 2008, 7014: 701447.

[7] Law N M, Mackay C D, Dekany R G, et al, Getting lucky with adaptive optics: fast AO image selection in the visible with a large telescope [J]. ***The Astrophysical Journal***, 2008, 692(1): 924-930.

[8] Mackay C D, Rebolo-López R, Bruno F C, et al. AOLI-Adaptive Optics Lucky Imager: diffraction limited imaging in

the visible on large ground-based [C]//Proceedings of the SPIE, 2012, 8446: 844621.

[9] 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): 51004. (in Chinese)

[10] Yang Zhongliang, Li Junsheng, Yang Weijun. High-resolution wide-area imaging of natural targets with lucky imaging technique [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2012, 41(7): 1821–1825. (in Chinese)

[11] Zhang S, Zhao J, Wang J. An efficient lucky imaging system for astronomical image restoration [C]//Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2011.

[12] Zhao Jinyu, Zhang Shixue, Wang Bin. Restoration of astronomical images using lucky imaging technique on ground-based large telescope [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2012, 41(5): 1396–1400. (in Chinese)

[13] Grundahl F, Christensen-Dalsgaard J, Jørgensen U G, et al. SONG-getting ready for the prototype [C]//***Journal of Physics: Conference Series***, 2011, 271(1): 012083.

[14] Zhai M, Zheng W, Wei J Y. Multi-colour optical variability of the blazar 3C 454.3 in 2007–2010 [J]. ***Astronomy & Astrophysics***, 2011, 531: A90.

[15] Keremedjiev M, Eikenberry S S. A comparison between lucky Imaging and speckle stabilization [J]. ***Publications of the Astronomical Society of the Pacific***, 2011, 123(900): 213–222.

[16] Liu A, Lin W, Narwaria M. Image quality assessment based on gradient similarity [J]. ***IEEE Transactions on Image Processing***, 2012, 21(4): 1500–1512.

[17] Tompkins S, Pieters C M, Mustard J F. Distribution of excavated by the lunar crater bullialdus and implications for the geologic history of the nubium region [J]. ***Icarus***, 1994, 110: 261–274.