

# 幸运成像技术的发展现状及启示<sup>\*</sup>

高 昕<sup>1</sup>, 唐 嘉<sup>1</sup>, 胡浩军<sup>2</sup>, 梁永辉<sup>2</sup>

(1. 北京跟踪与通信技术研究所·北京·100094; 2. 国防科技大学光电科学与工程学院·长沙·410073)

**摘 要:** 幸运成像技术可以消除大气湍流对光学测量图像的影响, 获得空间目标的高分辨力图像。在空间目标探测与天文目标观测领域有着良好的应用前景。本文在综述幸运成像技术国内外研究现状的基础上, 归纳了“幸运成像”的技术特点, 并据此对我国幸运成像技术的应用和发展提出了个人建议, 认为将幸运成像技术用于自适应光电望远镜, 用于靶场高帧频图像的事后处理, 并实现其准实时化, 是该技术的应用和发展重点。

**关键词:** 幸运成像; 高分辨率; 大气湍流

中图分类号: O439; V556.5

文献标识码: A

文章编号: 1674-5620(2011)05-0029-04

## Development of Lucky Imaging Technology and Reflections

GAO Xin<sup>1</sup>, TANG Jia<sup>1</sup>, HU Haojun<sup>2</sup>, LIANG Yonghui<sup>2</sup>

(1. Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094;

2. College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

**Abstract:** Lucky Imaging technology can eliminate the impact of atmospheric turbulence and improve the performance of imaging obtained by theodolites for space objects. The technology has a promising prospect in the field of space object surveillance and identification. This paper summarizes development of lucky imaging technology and its technological characteristics. Suggestions are given on application and development of lucky imaging technology in China. A key area is its application in adaptive optics telescope to achieve quasi-real-time post processing of high frame rate range imaging data.

**Keywords:** Lucky Imaging (LI); High Resolution; Atmospheric Turbulence

## 0 引 言

在利用地基光电望远镜进行目标观测时, 大气湍流一直是限制观测系统分辨力的主要因素之一。幸运成像(LI)技术是一种用于消除大气湍流影响的事后图像处理技术, 它利用目标的短曝光图像(高帧频), 在曝光时间内“冻结”大气湍流的影响; 通过“选图→配准→叠加”的图像处理方法, 从目标的短曝光序列图像中, 获得分辨率接近光学系统极限的目标图像<sup>[1]</sup>, 在空间目标探测与天文目标观测领域有着良好的应用前景。

该技术自20世纪60年代在国际上被提出以后, 已经逐渐由理论研究阶段走向工程应用阶段, HRCam<sup>[2]</sup>、LuckyCam<sup>[3]</sup>、FastCam<sup>[4]</sup>均是实用幸运成像系统的典型代表。作为一种减小大气湍流影

响、提高图像分辨率的图像处理技术, 它具有成本低、实现便捷的优点, 被称为“穷人的自适应光学”。随着图像处理算法的优化以及高速数字信号处理(DSP)、现场可编程门阵列(FPGA)等硬件技术的应用, 该技术有望实现准实时处理, 在工程上有着广泛的应用前景。在国内, 已经有多家单位开展了幸运成像技术的研究工作, 但目前还未见有工程应用的相关报道。本文总结了“幸运成像”技术的发展现状和技术特点, 并在借鉴国外发展经验和思路的基础上, 对我国幸运成像技术的发展方向提出建议。

## 1 国外研究情况

### 1.1 幸运成像技术的提出及理论研究阶段

幸运成像技术的渊源最早可追溯到20世纪60年代。1966年, Fried<sup>[5]</sup>指出大气湍流通过对成像系

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2011-02-28; 修回日期: 2011-03-22

第一作者简介: 高昕(1973—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事航天器光学测量总体设计及研究工作; gaoxin526@sina.com

统(含大气传输介质和望远镜系统)光学传递函数的高空间频率分量的衰减而影响系统的成像质量,其中成像的曝光时间是决定系统光学传递函数特性的关键因素。

1970 年,Labeyrie<sup>[6]</sup>对短曝光图像进行研究,发现空间目标的短曝光图像中包含目标的高频信息,而不存在长曝光;图情况下积分效应引起的图像模糊。根据这一特点,事后处理一系列短曝光图像可以消除大气湍流影响,获得目标的高分辨率信息。

1978 年,Fried<sup>[7]</sup>分析指出,在目标的短曝光图像中存在着一定概率的“好图”,其图像质量接近于系统的衍射极限。Fried 对好图像的定义为,在望远镜入瞳面上,波前相位畸变的均方值不超过  $1 \text{ rad}^2$ 。Fried 对该好图概率进行了严格的定量分析,通过求解 Karhunen-Loeve 积分方程的特征值和采用 Monte Carlo 方法,得出获得幸运图像的概率  $P$  同光学系统口径  $D$  与大气相干长度  $r_0$  之比之间存在表 1 所示的对应关系。这一工作的重要性在于,它首次严格地证明了,根据一定的视宁条件,选择适当的望远镜口径及短曝光图像,可以大大提高光学系统透过湍流成像的性能。

表 1 不同  $D/r_0$  条件下得到幸运图像的概率

Tab.1 Probability of lucky imaging on different  $D/r_0$

$D/r_0$	概率值 $P$
2	$0.986 \pm 0.006$
3	$0.765 \pm 0.005$
4	$0.334 \pm 0.014$
5	$(9.38 \pm 0.33) \times 10^{-2}$
6	$(1.195 \pm 0.084) \times 10^{-2}$
7	$(2.87 \pm 0.57) \times 10^{-3}$
10	$(1.07 \pm 0.48) \times 10^{-6}$
15	$(3.40 \pm 0.59) \times 10^{-15}$

1985 年,Hequet 和 Coupinout<sup>[8]</sup>首次实现了图像选择有效性的实验验证。他们采用的方法为,采集目标的大量短曝光图像,利用斯特列尔比(Strehl Ratio)作为像质评价函数,选择其中最好的部分图像,将所选图像重新对准以补偿倾斜像差效应,最后对已对准的图像求平均以产生原始目标图像。他们还讨论了合并叠加不同时间拍摄的短时曝光图像的问题。在大气扰动的影响下,叠加各帧图像,由点扩

散函数产生的核会叠加在一起得到增强,而由随机变化产生的亮点会无序叠加而被削弱。Hequet 和 Coupinout 证明,当从原始图像集合中选取 10% 的图像进行以上处理时,图像的斯特列尔比可以提高 2 倍。

## 1.2 工程应用

### 1.2.1 HRCam

1989 年,McClure 等研制的 HRCam 是第一批实用幸运成像系统的代表,该系统应用于 Canada-France-Hawaii (CFHT) 望远镜上,使半高全宽值(FWHM)分辨率提高了 10%~20% (Crampton 等 1992 年观测)。

### 1.2.2 LuckyCam

“幸运成像”技术走向工程应用是由于高帧频、低噪声的 CCD 技术逐渐成熟。2000 年—2007 年,英国剑桥大学天文学院的幸运成像研究小组以及卡文迪许实验室的天文物理研究组,成功地将图像选择技术应用于近红外和可见光波段的天文观测中,得到了接近地基望远镜衍射极限分辨率的观测结果,在天文观测领域产生了重要影响。他们将图像选择技术命名为“幸运成像”技术,并研制了以 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。该系统帧频在 12~100 帧/s 之间,在 CCD 量子效率方面,达到光子计数水平。2001 年,Baldwin 等研制了第一代 LuckyCam,使用标准 CCD 相机,由于受到读出噪声的影响,只能以 6 等以上的亮星作为参考星。2002 年—2003 年,Tubbs<sup>[9]</sup>等使用 L3CCD 使探测能力大大提高,能够使用 16 等暗星作为参考星。FWHM 达到  $50''$ ,远远高于 I 波段观测的期望水平,对暗星探测效果很明显。LuckyCam 在 2.5 m NOT、3.6 m NNT、5.1 m Palomar 上均成功地开展了实验。他们应用 16 等星的自然导星,对多个星团的观测结果获得了惊人的优于“哈勃”太空望远镜的分辨率,并在 NOT 系统上完成了对超低质量(VLM)恒星对的观测<sup>[10]</sup>。通过 16 h 的观测,完成了对 110 个目标  $0.1''$  分辨率的成像。其中有 21 颗星是应用幸运成像技术的新发现。特别值得一提的是,在 2007 年的 Palomar<sup>[11]</sup> 望远镜实验中,LuckyCam 是与该望远镜的低阶自适应光学系统联合使用的。尽管该自适应光学系统只有 12 个校正单元,帧频为 20 帧/s 或略高,在与幸运成像系统复合应用后,系统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。图1~图2给出了利用传统手段以及LI与自适应技术结合对空间目标的观测效果对比。

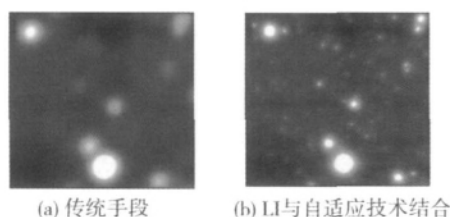


图1 观测到的M13球状星团

Fig. 1 Image of M13 spherical star cluster: (a) by traditional way; (b) by adaptive-optics telescope combined with LI

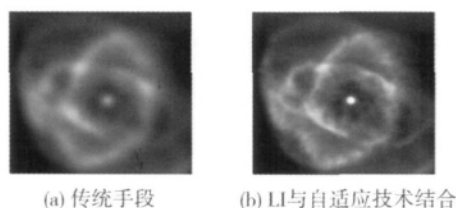


图2 观测到的猫眼星云

Fig. 2 Image of cat eye nebula: (a) by traditional way; (b) by adaptive-optics telescope combined with LI

剑桥大学天文学院的 Sijiong Zhang<sup>[12]</sup>等人,应用图像分割的方法将扩展目标的短曝光图像分割成一系列的子块,对每一子块应用幸运成像技术进行处理,最后拼接成完整的图像。应用这种处理方法,他们开展了非等晕成像条件下的“幸运成像”技术研究,有效提高了目标的成像分辨率。剑桥大学扩展目标幸运成像实验结果如图3所示。



图3 剑桥大学扩展目标幸运成像实验结果

Fig. 3 Result of LI processing for extended objects by Cambridge University: (a) the best of original images; (b) processing with LI technology

### 1.2.3 FastCam

另外一个新的针对中等尺寸望远镜的幸运成像设备 FastCam 是由 The Spanish IAC 和 UPCT 联合设计的。它不仅可以获得高空间分辨率成像的效果,而且还实现了实时的功能。这套设备使用了 EMCCD 低噪声高速相机,能够在 500—850 nm 波段达到中等尺寸望远镜的衍射极限值,并结合 FPGA 实现了图像保存和评价的实时性。该小组从 2006 年开始,分别在 1.5 m TCS、2.5 m NOT 和 4.2 m WHT 三种不同口径的望远镜上进行了初步实验,在 I、V、R 三个波段分别达到了接近衍射极限的分辨率。FastCam 开发团队结合 EMCCD 探测器、FPGA 和大气散射校正(ADC),并开发了一系列的图像获取、选取和处理软件包,实现了对所拍摄图像实时分析处理的功能。该团队下一步的工作是把 FastCam 系统安装在 10.4 m GTC 上。

目前,国际上幸运成像技术正在快速发展。通过搭建合理的硬件系统,“幸运成像”技术逐渐达到了在线实时处理的效果,观测目标也从点目标逐渐延伸到扩展目标。

## 2 幸运成像技术特点

幸运成像技术作为一种用于消除大气湍流影响的图像处理技术,具有以下特点:

1) 仅能用于改善因大气湍流引起的图像模糊,对于光学元件的离轴、位移、倾斜,镜面面形误差以及光学设计像差及色差等光学系统引起的图像模糊无效。

2) 当成像分辨力受限于大气湍流,且  $D/r_0$  处于合适的范围(几至几十)的时候,可以考虑采用“幸运成像”技术提高成像系统的分辨力。对于大口径望远镜,如果  $D/r_0$  过大,则获得高分辨率短曝光图像的概率将会下降。

3) 无需导星,具有广泛的应用场合。

4) 既对点目标成像有效,也对扩展目标成像有效。

## 3 思考与启示

根据幸运成像的技术特点,结合国外幸运成像技术的发展历程,对国内幸运成像技术的发展方向进行了思考,得到如下启示:

1) 幸运成像技术的优点是结构简单、成本低,其缺点是当光学系统口径远大于大气相干长度时,获

取幸运图像的概率很低;如果能将幸运成像技术和自适应成像技术结合起来,则对于大口径光学系统,既可以提高幸运图像的获取概率,又可以减少自适应单元数量,从而简化系统结构,降低系统研制成本。

2)靶场获取的可见光高速图像和红外图像的共同特点是积分时间较短,通常在几 ms 以内,这符合幸运成像技术所要求的“短曝光”这一应用条件。根据表 1,对于口径在 600 mm 以下的光电望远镜,在大气条件较好的情况下, $D/r_0$  基本在 10 以内,具备获得一定概率好图的基本条件。因此靶场光电设备获取的可见光高速图像和红外图像基本具备了幸运成像技术的应用前提,可利用幸运成像技术对其进行事后或准实时处理,以获取接近光学系统极限的高分辨率图像。

3)幸运成像利用短曝光图像通过“选图→配准→叠加”获取高分辨率图像的原理决定了该技术不可能做到完全实时化,但是从优化选图方法入手,同时利用 DSP 和 FPGA 等高速处理硬件尽量缩短处理时间,使“幸运成像”技术从完全事后处理向准实时方向发展是非常有意义的。

综上所述,幸运成像技术与自适应光电望远镜平台相结合,将幸运成像技术用于靶场高帧频图像的事后处理、幸运成像技术的准实时化应是我国幸运成像技术发展的重点。

### 参考文献

- [1] Tubbs R N. Lucky Exposures: Diffraction Limited Astronomical Imaging Through the Atmosphere[D]. Cambridge: Cambridge University, 2003
- [2] Tokovinin A, Cantarutti R, Tighe R. High-resolution Am-aging as the SOAR Telescope[EB/OL]. (2010-10)[2010-12-20]. arxiv. org/ps. cache/arxivpdf/1010/1010. 4176V1. pdf
- [3] Baldwin J E, Tubbs R N. Diffraction-limited 800 nm Imaging with the 2.56 m Nordic Optical Telescope[J]. Astronomy & Astrophysics, 2010, 368(1): L1-L4
- [4] Alejandro O, Rafael R. FastCam: A New Lucky Imaging Instrument For Media-Sized Telescopes[C]//Proc. of SPIE, 2008, Vol. 7014: 701447-12
- [5] Fried D L. Optical Resolution Through a Randomly Inhomogeneous Medium for Very Long and Very Short Exposures [J]. J. Opt. Soc. Am. , 1966, 56(10): 1372-1379
- [6] 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
- [7] Fried D L. Probability of Getting a Lucky Short Exposure Image Through Turbulence[J]. Optical Society of America Journal, 1978, 68(12): 1651-1658
- [8] Hecquet J, Coupinot G. A Gain in Resolution by the Superposition of Selected Recentered Short Exposures[J]. Journal of Optics, 1985, 16(1): 21-26
- [9] Tubbs R N. Lucky Exposures: Diffraction Limited Astronomical Imaging Through the Atmosphere[D]. Cambridge: Cambridge University, 2003
- [10] Law N M. Lucky Imaging: Diffraction Limited Astronomy from the Ground in the Visible[D]. Cambridge: Cambridge University, 2006
- [11] Law N M, Hodgkin S T, Mackay C D. The LuckyCam Survey for Very Low Mass Binaries II: 13 New M4.5-M6.0 Binaries[J]. Royal Astronomical Society, 2008, 384(1): 150-160
- [12] Zhang Sijiong, Suess F F, Mackay C D. Anisoplanatic Lucky Imaging for Surveillance [D]. Cambridge: University of Cambridge, 2008