

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2015.03.06

幸运成像技术在天文观测中的应用

向 娥^{1,2}, 卢晓猛¹, 毛永娜¹, 姜晓军¹

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

摘要: 由于大气湍流的影响, 传统地基望远镜难以获得高空间分辨率的图像。天文学家为了在天文成像、测光观测、天体测量等领域的研究中得到更好的结果, 不断追求克服地球大气的影响, 获得更高空间分辨率的方法。幸运成像技术是一种能够使地面望远镜获得接近其衍射极限分辨能力的技术方案, 具有成本低、设备简单的优点。介绍了幸运成像技术的发展趋势和基本原理, 总结了国际上目前在用的幸运成像系统及其设备参数。结合幸运成像技术在国际上成功应用实例, 综述了含系外行星多恒星系统的观测研究、双星系统轨道测量、球状星团中变星搜寻等天文观测获得的大量研究成果。随着新数据处理方法的应用, 近年来蓬勃发展的幸运成像与自适应光学复合技术, 将进一步拓展幸运成像技术的应用前景。

关键词: 幸运成像技术; 高分辨率成像; 大气湍流

中图分类号: P111.2 **文献标识码:** A

1 引言

在地基天文观测中, 星光穿越大气层时受到湍流的影响会产生光束波前误差, 使星像出现不同程度的平移、扭曲和模糊, 难以达到大多数望远镜的衍射极限^[1], 降低望远镜的探测极限和空间分辨能力。空间望远镜、自适应光学 (Adaptive Optics, AO)、光学干涉、倾斜校正 (Tip/Tilt) 和事后图像处理等多种技术手段被证明可以有效地消除或减小大气湍流的影响。幸运成像技术属于事后处理技术, 具有设备构成简单、造价低廉等优点。

1966年, Fried^[2]在研究大气湍流对地基望远镜成像质量的影响时, 发现决定系统光学传递函数特性的关键因素是曝光时间, 即短曝光图像的分辨率比长曝光图像的分辨率高。Hufnagel^[3]初步讨论了在短曝光条件下, 望远镜获得较好像质图像的概率与望远镜口径的关系。1970年, Labeyrie^[4]研究表明短曝光图像呈现散斑结构, 在一定程度上保留高频信息, 通过重建目标平均功率谱可得到双星的衍射极限, 因此地基天文观测能够通过短曝光成像和散斑干涉方法^[5], 使大口径望远镜短曝光图像的空间分辨率超越大气视宁度的限

收稿日期: 2014-12-30; 修回日期: 2015-03-30

通讯作者: 向娥, xiange@nao.cas.cn

制。1974 年, Labeyrie^[6] 利用散斑干涉技术测量了角距离为 $0.049'' \sim 0.29''$ 的 12 个近距离双星系统, 由此频域重建天文图像的散斑成像方法逐渐发展起来, 如斑点掩膜法^[7, 8] (Speckle masking), 相位差异法^[9, 10] (Phase-Diverse, Phase Diversity) 和重谱法^[11-13] (Bispectrum) 等, 主要用于太阳、双星和多星系统的观测研究。但是频域重建法的算法复杂, 不能有效抑制噪声, 于是逐渐发展出空间域的图像重建方法, 主要有简单位移叠加法^[14] (Shift-And-Add, SAA)、迭代位移叠加法^[15] (Iterative Shift-and-Add, ISA) 等, 其优点是不再需要大量的傅里叶相位复原计算。1978 年, Fried^[1] 研究发现小于大气相干时间的短曝光图像中, 存在一定概率的几乎达到衍射极限分辨率的“幸运图像”, 并推算出其概率与望远镜口径、观测站大气相干长度的关系, 为幸运成像技术的发展奠定了理论基础。

早期的“幸运成像系统”主要有两种类型: 一是通过光学或者电子设计, 在曝光过程中选择和重新定位图像, 如应用于 Canada-France-Hawaii Telescope (CFHT, 3.6 m) 上的高分辨率相机 (HRCam), 使图像的分辨率提高了 $10\% \sim 20\%$ ^[16]; 二是直接获得短曝光成像, 进行后期图像重建, 如应用于 CFHT 上的欧洲空间局 (European Space Agency, ESA) 光子计数探测器 (Photon-Counting Detector, PCD), 使图像分辨率提高 $10\% \sim 20\%$ ^[17]。

幸运成像技术的发展与成熟, 与探测器技术在天文观测中的应用息息相关。由于机械快门带来的快门效应、较低的量子效率和较高的读出噪声等技术限制, 早期的探测器难以采用短于大气相干时间的曝光时间, 无法获得真正意义上的短曝光图像; 因此, 图像分辨率虽有明显提高, 但是难以发挥幸运成像技术的潜力——获得接近望远镜衍射极限的分辨本领。随着 CCD, 特别是电子倍增 CCD (EMCCD)^[18] 技术的发展和在天文观测领域的广泛应用, 在带来更高帧频、更高量子效率和更小读出噪声的同时, 为幸运成像技术的发展创造了更好的条件, 使其在天文研究中有了更多的应用。

在前人散斑成像研究的基础上, 2000 年, 英国剑桥大学 Macky^[19] 和他所在的小组, 在口径为 2.5 m 的 Nordic Optical Telescope (NOT) 上进行天文观测实验, 率先使用了高帧频低噪声的 EMCCD 作为探测仪器, 以光子计数模式进行短曝光成像, 采用选择—配准—叠加技术获得高分辨率图像, 大大降低了数据处理的计算量。2004 年, 他们正式称这一技术为“幸运成像 (Lucky Imaging)”。在视宁度较好的条件下, 幸运成像技术使 NOT 望远镜在 I 波段 (中心波长 850 nm) 的成像分辨率提高至 $0.1'' \sim 0.2''$; 在视宁度较差的条件下, 幸运成像图像的空间分辨率好于传统长曝光图像的 3 倍。2005 年, 在幸运成像技术取得较好结果的基础上, Mackay^[18] 首次分析了将幸运成像技术应用到更大口径望远镜上的可能性, 并提出了两种新方法用于提高大口径望远镜的空间分辨率。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^[20], 使海尔望远镜 (Hale Telescope, HT) 在 I 波段的图像分辨约为 $0.04''$, 为哈勃空间望远镜的 3 倍 (由于哈勃空间望远镜在可见光波段获得的图像欠采样, 因此其可见光波段的图像分辨率约为 $0.12''$ ^[21])。

在国内, 云南天文台于 1984 年开始天文高分辨率成像的研究工作, 刘忠、邱耀辉等人^[15, 22-25] 以双星系统为实验目标对天文斑点图像的复原算法进行了深入的研究, 发展了斑点掩模算法, 并提出了迭代位移叠加法, 促进了国内高分辨率成像的发展。中国科学院光电技术研究所沈忙作、杨连臣等人也对散斑成像技术进行了理论和实验室模拟^[26-28]。上海天文

台刘媛媛^[29]也利用散斑干涉技术对一批角距离为 $0.1'' \sim 1.4''$ 的亮双星系统进行了观测, 数据处理结果基本达到余山 1.56 m 望远镜的衍射极限。2006 年开始, 国防科技大学梁永辉、杨忠良等人^[30, 31]对幸运成像技术进行了数值模拟和实验研究, 并深入研究了扩展目标的分块处理算法。2010 年, 本文作者在兴隆观测基地利用 18 cm 望远镜搭建了一套幸运成像系统, 对月球、大行星和华盛顿双星星表 (WDS) 中的部分双星进行了观测, 结果表明幸运成像技术可以有效提高该望远镜的空间分辨率。该套系统已应用于兴隆观测基地 50 cm 望远镜上, 观测了球状星团 M13 和 M15、WDS 星表中的近距离双星等目标, 获得了 $0.6''$ 的空间分辨率。2012 年, 长春光学精密机械与物理研究所张世学^[32, 33]基于 1.23 m 望远镜研制了一套幸运成像系统, 对月球、木星等目标进行了观测, 获得较好的结果。国内高分辨率成像的事后处理方法研究多以图像复原方法为主, 其在天文观测中的应用还有待进一步发展。

目前国际上有多套用于天文研究的幸运成像系统, 如 LuckyCam^[34, 35]、Astralux^[37, 53]、FastCam^[38]、AO+LI 系统^[20, 39, 40]等, 先后应用于多台大口径望远镜上, 使其获得了接近衍射极限的高分辨率图像, 取得了丰硕的成果。在建的国际合作项目 Stellar Observations Network Group (SONG) 项目^[41, 42], 在设计中即加入了幸运成像终端, 以期利用微引力透镜效应搜寻类地系外行星^[43]。幸运成像技术不仅可应用于球状星团非核心区域高精度测光和双星搜寻等天文研究, 还可应用于双星轨道参数测定等天体测量研究。

2 幸运成像技术

2.1 幸运成像技术的基本原理

大气湍流是大气层一种不规则的随机运动。大气折射率是随时间和三维空间变化的随机向量场函数, 因此光波在大气中传播时, 其相位会受到大气随时间和空间位置变化的影响而产生随机扰动。如果某一区域内, 同一时刻相位在不同空间位置相位偏差的均方根在 1 弧度以内, 就称这个区域的半径为大气相干长度 (r_0)。大气相干长度的数值能够表达光波在大气传输中的空间相干性和大气湍流扰动的综合强度, 数值越小, 大气湍流扰动越强烈, 其范围在几厘米到几十厘米。如果在一段时间范围内, 同一空间位置的相位在不同时刻相位偏差的均方根在 1 弧度以内, 就称这个时间长度为大气相干时间。大量研究发现, 小于大气相干时间的短曝光成像会“冻结”大气湍流的影响, 大量图像中会存在一定概率的、受大气影响较小的、接近望远镜衍射极限的“幸运图像”。

幸运成像技术采用短曝光成像 (小于大气相干时间), 通过像质评价函数选取其中的“幸运图像”进行配准和叠加, 从而获得高信噪比、高空间分辨率的图像用于天文研究。“幸运图像”的获取概率^[1]与望远镜口径 (D) 和大气相干长度有关:

$$P = 5.6 \exp[-0.1557(D/r_0)^2], \quad D/r_0 \geq 3.5,$$

由上式可知, 幸运成像技术的应用与望远镜口径和当地大气视宁度密切相关。

如图 1 所示, Tubbs^[44]数值模拟了不同口径望远镜在短曝光时获得不同斯特列尔比

(Strehl ratio, 星像中心强度与理想条件下星像的中心强度之比) 及其概率的关系。从图中可以看出, 望远镜的口径越大, 获得较大斯特列尔比的图像概率就越低, 即获得“幸运图像”的概率就越小。在视宁度很好的台址, 可选择较大口径望远镜应用幸运成像技术, 能够获得 2 m 级望远镜接近衍射极限的高分辨率图像, 如夏威夷的 Mauna Kea、智利的 Paranal、La Silla、西班牙的 La Palma 等地。在视宁度稍差的台址, 依照概率公式可选用口径较小的望远镜, 既可保证获得“幸运图像”的概率, 也可获得接近望远镜衍射极限的高分辨率图像。

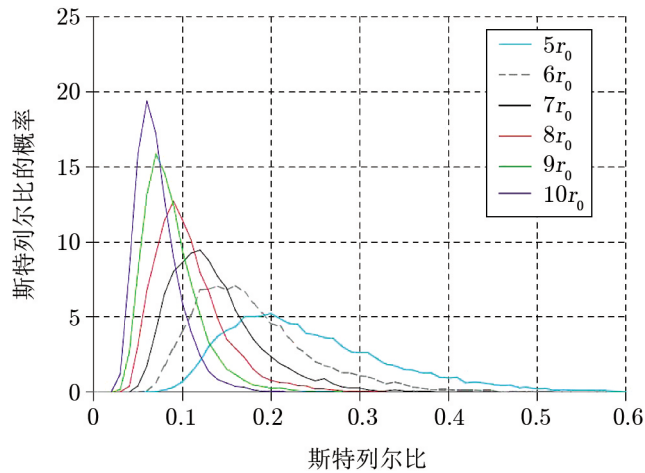


图 1 数值模拟不同口径 ($(5 \sim 10)r_0$) 望远镜短曝光图像的斯特列尔比^[44]

幸运成像技术中“冻结”大气湍流的必要条件是曝光时间比大气相干时间短。天文学家对大气相干时间进行了多次测量, 不同观测站的测量结果变化较大。在 500 nm 波段, 大气相干时间的测量结果一般在几毫秒到几十毫秒范围内。短曝光图像呈散斑结构, 是未经时间积分的随机起伏的波前在望远镜焦平面上产生的复杂干涉图样, 其中含有望远镜衍射极限分辨率的信息。长时间积分图像中, 大气湍流会模糊散斑结构中的高分辨率信息。随着曝光时间的增加, 幸运成像技术获得图像的空间分辨率明显降低, 因此在实际观测中, 我们需要高帧频低噪声的相机进行数据采集, 并视具体情况确定帧频、图像选取比率等。

幸运成像技术成功应用的另一个必要条件是需要有足够亮的参考星, 用于评价像质、并作为基准点配准和叠加图像。Law^[45]数值模拟 EMCCD 获取数据和实际观测数据在不同大气视宁度条件下, 幸运图像选取率为 10% 时, 随着参考星探测光子数变化, 图像的空间分辨率随之变化的情况, 如图 2 所示, 参考星随着探测光子数的增加, 幸运成像技术获得图像的空间分辨率会明显提高。数值模拟和实验结果表明, 使用幸运成像技术时参考星需要满足 150 光子/帧, 即在视宁度不好的条件下像质最好的图像能满足近似高斯分布, 否则泊松噪声会成为基于斯特列尔比选择“幸运图像”的主要限制因素, 从而降低合成图像的空间分辨率。

幸运成像技术能以较低的成本、简单的设备和易实现的算法有效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极限。但由于幸运成像的等晕区较小, 且需要较亮参考星, 因此目标的天空覆盖范围相对较小; 相对于自适应光学、倾斜校正等方法, 幸运成像

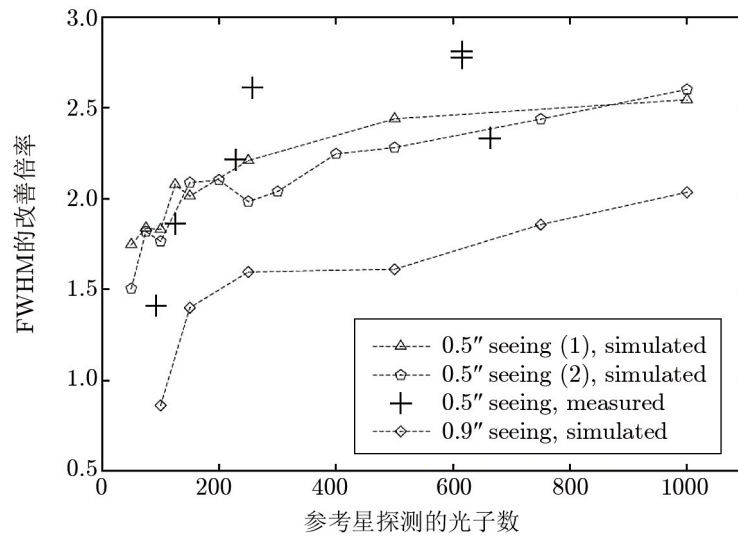


图2 选取比率为10%时目标星的半高全宽(FWHM)随其参考星探测光子数量的变化^[45]
虚线连接为数值模拟的数据,模拟星像在亮星的PSF上增加了电子倍增噪声;“+”表示大气视宁度为0.5''时的实测数据。

作为事后处理技术,存在实时性较差,无法修正望远镜静态像差的缺点,因此幸运成像技术的天文应用需要考虑其局限性和适用条件。

2.2 天文幸运成像系统

2.2.1 单一幸运成像系统

在天文观测中,除望远镜口径、大气条件和观测帧频外,幸运成像系统设计还需考虑大气色散、像元匹配等因素。为了获得高分辨率成像结果,幸运成像系统一般采用大气色散改正镜(ADC)实时补偿不同天顶距的大气色散效应;使用增焦设备使成像系统的像元空间张角满足奈奎斯特定理(Nyquist Theorem);并选择EMCCD作为探测终端,其电子倍增技术大大降低读出噪声的影响,对观测目标进行高帧频低噪声成像^[46, 47]。单一幸运成像系统的示意图如图3所示,主要包括大气色散改正系统(ADC)、滤光片系统(Filter)、光学增焦系统(Barlow Lens)、高帧频低噪声的CCD探测器以及数据采集设备(Data acquisition)等。

2000年,英国剑桥大学天文小组^[34]为NOT望远镜设计了幸运成像系统LuckyCam(图4)。该幸运成像系统采用短曝光采集图像,经过选取—配准—叠加的数据处理后有效提高了望远镜的空间分辨率。NOT望远镜LuckyCam观测结果表明,地基望远镜也能获得可与哈勃空间望远镜(Hubble Space Telescope, HST)媲美的高分辨率图像。由此,越来越多的幸运成像系统(如表1所示)被研制成功并应用于天文观测。

单一幸运成像系统由硬件(光学系统)和软件(观测策略和数据处理算法)组成。其一般工作流程是:(1)根据观测设备口径、探测器性能和大气条件,选择合适的曝光时间,采集观测目标的短曝光图像之后,选择较亮的恒星作为参考,比较大气湍流对每幅图像的模糊效应;(2)对图像进行重采样(一般使用Drizzle算法^[45]),以精确确定最亮点的位置;(3)针

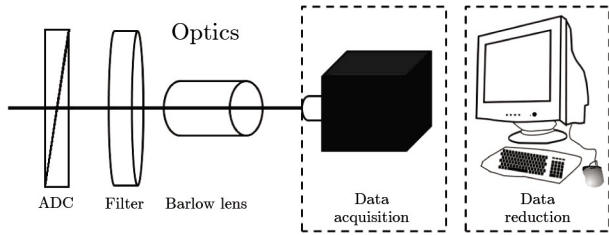


图 3 幸运成像系统结构图

图 4 2005 年 11 月研制的幸运成像系统 LuckyCam^[34]表 1 单一幸运成像系统性能参数^[35, 37, 38, 45, 53]

	LuckyCam	quad-LuckyCam	FastCam		AstraLux	
观测波段	0.6~1 μm	I	I	I	SLOAN i',z'	I
CCD	CMCCD, 536 × 528	4×EMCCD, 1024 × 1024	CMCCD, 512 × 512	CMCCD, 512 × 512	CMCCD, 512 × 512	CMCCD, 512 × 512
像元尺寸 / μm	13	13	16	16	16	16
读出速度 /MHz	7	30	10	10	10	10
scale /(")·pix ⁻¹	0.04	0.03	0.03, 0.05, 0.07	0.03,0.05	0.047	0.031
图像分辨率 /(")	<0.15	0.075	0.2	0.08	0.11	0.1
视场/(")	20 × 20	30 × 120	16 × 16, 25 × 25, 35 × 35	16 × 16, 35 × 35	24 × 24	16
导星星等 /mag	16	17~17.5	12	—	15.5	—
Seeing/(")	0.8	0.73	1.2	0.5	0.6~0.85	1~2.5
望远镜	NOT	NOT	TCS	NOT	Calar Alto 2.2 m	NTT

对不同的观测类型选择合适的像质评价函数 (对点目标来说, 一般使用亮星的斯特列尔比 (Strehl ratio) 作为像质评价函数), 计算每幅图像的像质; (4) 权衡图像的分辨率和目标的信噪比, 确定像质标准, 选取像质符合标准的部分图像; (5) 最后将选取的图像按照最亮点的位置进行配准和叠加, 获得高分辨率、高信噪比的图像。

2.2.2 复合幸运成像系统

为了更好地发挥幸运成像技术的潜力, 在使用 LuckyCam 取得高分辨率观测结果的基础上, 英国剑桥大学 Mackay^[18] 提出将幸运成像技术应用到更大口径的望远镜上。针对口径越大望远镜获得幸运图像概率越小的局限, 提出了两种新方法: (1) 将幸运成像系统作为终端安装于已有自适应光学系统的望远镜进行幸运成像观测。国际上的大型望远镜一般都配备自适应光学系统, 但是由于大气湍流的复杂性, 难以实现每个点的连续实时校正, 而幸运成像技术的加入, 可以排除其中未校正或校正效果不好的部分图像, 保留像质好的部分, 从而提高大口径望远镜的空间分辨本领。(2) 将大口径望远镜分成多个子口径, 利用幸运成像技术监视每个子口径的成像质量, 选择性用于最终图像合成。由于大气湍流会导致干涉条纹亮度变化, 利用幸运成像技术可以选择其中干涉条纹最明显的部分图像进行干涉成像, 从而获得高分辨率图像。

2007 年 7 月, Law 等人^[20] 将幸运成像系统安装到 Paloma 天文台海尔望远镜 (Hale Telescope, HT) 上, 结合望远镜已有的自适应光学系统 (PALMAO), 分别在中心波长为 500 nm、710 nm 和 950 nm 的三个波段 (带宽都为 10 nm) 进行了观测。该系统在大气视宁度为 $0.8'' \pm 0.15''$ 的条件下, 使用 50 Hz 帧频对恒星 HD 235089 进行了观测, 每个波段观测了 320 s。图 5 所示为海尔望远镜利用自适应光学和自适应光学结合幸运成像技术 (AO+LI) 获得的恒星星像的斯特列尔比和半高全宽 (FWHM), 其中 AO+LI 技术将恒星星像的斯特列尔比从 0.06 提高到 0.17, FWHM 从 76 mas 提高到 37 mas (海尔望远镜的衍射极限分辨率), 有效地增强了自适应光学系统获取高分辨率图像的能力, 将望远镜的分辨本领提高为原自适应光学系统的 2 倍。

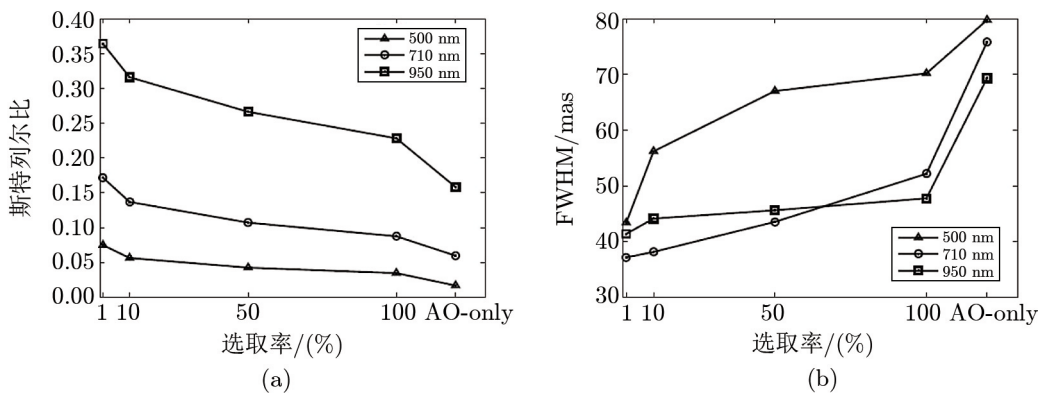


图 5 AO+LI 系统获得图像在不同波段的斯特列尔比 (a) 和 FWHM(b) 随选取比率的变化^[20]

2008 年, War 等人^[48] 理论分析了地基望远镜利用幸运成像技术辅助合成孔径成像的可

行性。合成孔径成像的关键技术之一是相位同步技术,通过去除或减小大气扰动、系统误差等因素的影响,保证来自不同子孔径的光束满足干涉条件,从而达到提高分辨率的目的。结合幸运成像技术,可选取每个子孔径获得的“幸运图像”进行相位同步,可使用更大的子孔径进行合成孔径成像,从而提高整个光学系统的空间分辨率和集光能力。

同年, Gladysz 等人^[49]在 Lick 天文台 3 m 沙因望远镜 (Shane Telescope, ST) 2.0 μm 波段和 Palomar 天文台 5 m 海尔望远镜 670 nm 和 950 nm 波段,结合自适应光学和幸运成像技术对临近双星 (HD 8799, HD 170648, HD 202444, β Cyg 等) 进行了实测,获得了高分辨率图像。在此基础上,提出了一种基于统计规律的发现暗伴星的新方法 (Stochastic speckle discrimination),这种方法大大提高了暗源的探测能力。

为了在更大口径望远镜上应用幸运成像技术, Femenia 等人^[50]利用 R 和 I 波段图像的斯特列尔比进行像质评价,使用 Monte-Carlo 数值模拟方法分析了 10 m 望远镜结合自适应光学和幸运成像技术在不同大气相干长度、曝光时间和选取比例的条件下,获得高分辨率和高对比度图像的能力。为验证复合系统的能力,使用 William Herschel 望远镜 (WHT) 对褐矮星双星系统 GJ569Bab 进行了测光观测和轨道修正^[39],数据分析结果表明,虽然图像的斯特列尔比明显低于数值模拟值,但是 AO+LI 复合系统在高精度天体测量、高精度较差测光和高对比度成像中有很潜力。此项研究证明了自适应光学和幸运成像复合系统应用于 8~10 m 级望远镜上的可行性。

此外,一批复合幸运成像系统也被研制和应用,如 Calar Alto 天文台 2.2 m 望远镜单一幸运成像系统获得成功后, Aceituno 等人^[40]为该望远镜研制了低成本的自适应光学系统 SAOLIM,不仅有效提高了幸运图像的选取率和图像空间分辨本领,也使幸运成像技术能够在大气视宁度较差的条件下获得有效观测结果。目前较成熟的复合成像系统及其性能参数如表 2 所示。

表 2 自适应光学和幸运成像复合系统的性能参数^[20, 39, 40]

	AO+LI		
	PALMAO+LuckyCam	NAOMI+FastCam	SAOLIM
观测波段/nm	500, 700, 950	I, (824,175)	(1030,10)
CCD	EMCCD, 528 \times 512	EMCCD, 512 \times 512	EMCCD, 1024 \times 1024
像元尺寸/ μm	13	16	24
读出速度/MHz	7	10	—
scale/($''$) \cdot pix ⁻¹	0.02	0.014	0.08
图像分辨率/($''$)	0.035	0.08	0.32
视场/($''$)	11 \times 11	7 \times 7	90 \times 90
导星星等/mag	16	—	11.5
Seeing/($''$)	1	0.49	1
望远镜	HT	WHT	Calar Alto 2.2 m

综上所述, AO+LI 复合系统的应用使得地基望远镜的空间分辨率已经大大超越了 HST,

但由于目前复合系统中自适应光学均使用自然导星且需亮于 17 mag, 因此该系统的可观测天区远小于 HST。

3 幸运成像技术在天文观测中的应用

由于大气湍流的影响, 在全球最优秀的天文台址, 传统地基大中型望远镜在光学波段的空间分辨本领只相当于 40 cm 口径望远镜的衍射极限, 难以开展有高分辨率观测需求的天文研究。幸运成像技术的优势在于它以较低的成本、简单的设备和易实现的算法, 将 2 m 级望远镜的空间分辨率提高至接近衍射极限的水平。自 2000 年剑桥大学开始将幸运成像技术应用于 2.5 m 的 NOT 望远镜上以来, 越来越多的幸运成像系统应用于天文观测中, 在双星系统、球状星团和银道面密集星场等的观测以及天体测量领域获得了显著成果。

3.1 双星系统的观测研究

Law 等人^[51]指出, 成功的恒星形成模型必须对双星系统及其物理参数 (距离、偏心率等) 做出合理解释, 这些参数的变化是双星系统质量的函数, 而双星系统中伴星质量的计算依赖于高精度的测光和光谱观测结果。M 型矮星作为银河系中样本最多的恒星, 其物理属性及其形成环境还有很多不确定性, 而双星系统和多星系统的观测研究, 能够有助于确定其质量随恒星类型 (类太阳恒星、超低质量恒星和褐矮星) 的变化区域, 为低质量恒星和褐矮星的形成提供约束。M 型超低质量 (Very Low Mass, VLM) 双星系统轨道半径较小, 截止到 2005 年, 已知的 45 颗 VLM 双星系统的轨道半径都小于 10 AU^[51], 因此传统地基望远镜观测难以对其进行细致研究, 需要利用高分辨率成像观测才能有效分辨双星系统。Law 等人^[51, 52]首次利用幸运成像技术对 M 型矮星进行巡天观测, 结合 LSPM-North 和 2MASS 星表, 选取了 91 颗 M5 M8、自行大于 $0.15''/\text{a}^{-1}$ 、距离小于 40 pc、角距为 $0.1''\sim 1.5''$ 的双星样本。使用 NOT 望远镜的幸运成像系统 LuckyCam 进行了两次观测, 观测了其中 32 个样本, 新发现了 5 个角距为 $0.13''\sim 1.12''$ 的双星系统, 并首次对单光谱、贫金属双星系统 Ross530 进行成像, 角距为 $0.13''$ 。

在幸运成像系统 LuckyCam 获得成功应用后, Hormuth 等人^[53]为 Calor Alto 天文台 2.2 m 望远镜研制了一套幸运成像系统 AstraLux (参考表 1), 并使用其对近邻高自行的星团成员进行直接成像观测, 结合 2MASS、Hipparcos 星表和 HST 等望远镜的历史测光和光谱数据, 获得了双星系统 HD160934 的自行、质量、光谱型和轨道根数。2012 年, Ginski 等人^[54]从利用视向速度法确认的系外行星系统中选择适合北半球观测、高自行的行星寄主恒星样本, 利用 Calar Alto 天文台 2.2 m 望远镜的幸运成像终端 AstraLux 对 71 颗行星寄主恒星进行了细致的观测研究。通过对观测数据进行自行分析, 从而确定图像中的伴星是否为目标星的物理双星。研究发现距离恒星 HD185269 约 $4.5''$ 的地方存在一颗低质量伴星 ($(0.239 \pm 0.022)M_{\odot}$)。

Kepler 卫星发现了数以千计的系外行星候选体, 需要地面望远镜后续观测确认, 其中小部分已通过视向速度法等方法确认。Kepler 观测数据的点扩散函数 (PSF) 为 $6''\sim 10''$ ^[55]。地

基望远镜利用幸运成像技术能够获得高分辨后随观测结果,用以探测和分析 KOIs (Kepler Object of Interest) 的光变曲线是否是由临近伴星引起的,帮助证实 KOIs 中是否有其他天体存在,研究由无法分辨开天体引起恒星和行星参数的变化,研究行星寄主恒星候选体的双星比例,并统计候选样本中存在临近伴星的比例等^[55]。2012 年, Lillo-Box 等人^[55]利用 AstraLux 对 98 颗 KOIs 源进行了观测,发现可探测极限范围内 58.2% 的行星寄主恒星在半径 6'' 之内不存在伴星, 17 个 KOIs 存在 19 颗伴星, 8 颗行星寄主恒星可能为物理双星。2014 年, Lillo-Box 等人^[56]对 77 个 KOIs 进行了进一步观测研究,结合前述观测,在探测极限范围内发现 111 颗行星寄主恒星候选体为单星系统, 35 颗候选体在 3''~6'' 内存在至少一颗伴星, 30 颗候选体在 3'' 内存在伴星。研究提出的 BSC 参数 (Background Source Confidence) 能够高置信度地在一定星等差和角距范围内确定 KOI 为单星,从而排除了 56 颗 KOIs,结果显示利用幸运成像系统观测可以有效排除 KOIs 为食双星或者光变来源于其他天体的影响。

双星系统轨道的精确测量对各伴星质量等物理参数的确定起着重要作用。由于缺乏高精度天体测量手段,目前大多数目视双星的轨道根数数据精度较差。幸运成像技术能够对更小角距离、更大动态范围的双星系统进行观测,获得高精度数据。Rica 等人^[57]计划利用幸运成像技术 (FastCam, TCS) 完成一项长期的双星观测研究,从 WDS 星表 (USNO) 中选择角距在 0.2''~1.5'' 之间的样本,已对 147 颗双星进行了 424 次观测,确认了 18 颗 Hipparcos 双星,发现了 2 颗新的双星系统 (J621 B, BVD 36 A),并结合其他天体测量数据重新推算出双星的轨道根数。

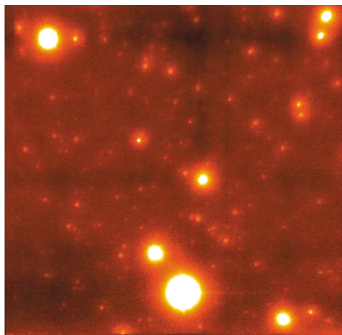


图 6 海尔望远镜利用 AO+LI 复合系统获得的球状星团 M13^[35]
幸运成像选取率为 10%, 星像 FWHM 为 0.04''。

3.2 球状星团的观测研究

Djorgovski 等人^[58]对近百个球状星团进行了初步巡天,发现 1/5 的球状星团存在“核心坍缩”现象。利用幸运成像技术对球状星团进行高分辨率成像观测 (见图 6)^[21, 35, 47, 59, 60],不仅能够对球状星团核心部分进行精确的测光观测和天体测量,可更细致地研究“核心坍缩”现象,长期观测还能发现新的变星^[60],获得球状星团成员星的运动速度^[61],为星团动力学模型的建立提供依据;获得成员星的视星等和色指数,绘制赫罗图^[62],为恒星的演化、星团的年龄和距离估算提供依据。

4 结 论

幸运成像技术是一种使地面望远镜在可见光波段获得接近衍射极限分辨率的有效方法。截止到 2014 年底,已发表约 200 篇利用幸运成像技术研制幸运成像系统,或利用其进行测光和天体测量研究的文章。目前国际上常用的幸运成像系统主要包括 LuckyCam, FastCam, AstraLux, 其研究成果证明幸运成像技术在天文观测应用中取得了显著成功。近几年幸运成

像技术结合自适应光学和新的数据处理算法, 很大程度上提高了地面望远镜的空间分辨本领, 轻松超越了 HST 的图像分辨率, 大大推动了幸运成像在近距离双星系统和球状星团观测研究中的应用。在建 SONG 项目的幸运成像终端的应用将为利用微引力透镜效应^[63] 搜寻宜居带系外行星乃至类地系外行星^[64] 提供有力的支持。随着数据处理算法的不断更新和计算机性能的不断发展, 自适应光学和幸运成像的复合技术将会成为天文观测的通用技术。随着更大口径望远镜的建造, 如 30 m 望远镜 (TMT), 巨型麦哲伦望远镜 (GMT), 欧洲极大望远镜 (E-ELT) 等, 幸运成像技术也将会为搜寻暗弱伴星、密集星场巡天和高精度测光、天体测量等领域的研究提供有力的支持, 结合自适应光学技术, 有望将地基望远镜的空间分辨本领提高到一个前所未有的高度。

参考文献:

- [1] Fried D L. *Optical Society of America*, 1978, 68: 1651
- [2] Fried D L. *Optical Society of America*, 1966, 56(10): 1372
- [3] Hufnagel R. *Restoration of Atmospherically Degraded Images: Woods Hole Summer Study*, 1966, 2: Appendix 2
- [4] Labeyrie A. *Astronomy and Astrophysics*, 1970, 6: 85
- [5] Gezari D Y, Labeyrie A, Stachnik R V. *AJ*, 1972, 173: L1
- [6] Labeyrie A, Bonneau D, Stachnik R V, et al. *AJ*, 1974, 194: L147
- [7] Weigelt G P. *Optics Communications*, 1977, 21(1): 55
- [8] Lohmann A W, Weigelt G, Wirmitzer B. *Applied Optics*, 1983, 22: 4028
- [9] Seldin J H, Paxman R G. *Proc. SPIE*, 1994, 2302: 268
- [10] Gonsalves RA. *Proceedings of the SPIE*, 2014, 9148: 10
- [11] Hofmann K H, Weigelt G. *Astronomy and Astrophysics*, 1993, 278(1): 328
- [12] Tuthill P G, Men'shchikov A B, Schertl D. et al. *Astronomy and Astrophysics*, 2002, 389: 889
- [13] Yoshinoya Y, Kuwamura S, Miura N, et al. *Proceedings of the SPIE*, 2009, 7439: 825448
- [14] Bates R, Sinton A, Minard R. *International Conference on Speckle*, 1985, 556: 263
- [15] 邱耀辉, 刘忠, 卢汝为, 等. *光学学报*, 2001, 21(2): 186
- [16] Robert D, McClure, Walter A, et al. *Astronomical Society of the Pacific*, 1989, 101: 1156
- [17] Nieto J L, Llebaria A, di Serego Alighieri S. *Astronomy and Astrophysics*, 1987, 178 (1-2): 301
- [18] Mackay C D. *Scientific Detectors for Astronomy 2005*. Jenna E B, James W B, Paola A, eds. Berlin: Springer Dordrecht, 2006: 93
- [19] Mackay C D, Baldwin J, Law N M. *Proceedings of the SPIE*, 2004, 5492: 128
- [20] Law N M, Mackay C D, Dekany R G, et al. *The Astrophysical Journal*, 2008, 692(1): 924
- [21] Mackay C D, Rebolo-López R, Femenia C B, et al. *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV. Proceedings of the SPIE*, 2012, 8446: 10
- [22] 邱耀辉, 刘忠, 卢汝为, 等. *云南天文台台刊*, 2002(4): 29
- [23] 刘忠, 邱耀辉, 楼柯, 等. *云南天文台台刊*, 1997(4): 42
- [24] 邱耀辉, 刘忠, 卢汝为, 等. *光学学报*, 2000, 20(4): 501
- [25] 金振宇, 刘忠, 邱耀辉. *光学学报*, 2009, 29(5): 1205
- [26] 沈忙作, 王伟建. *天文学报*, 1984, 25(3): 293
- [27] 杨连臣, 沈忙作. *光电工程*, 2001, 27(4): 7
- [28] 李强, 沈忙作. *天文学报*, 2007, 48(1): 113
- [29] 刘媛媛, 唐正宏, 王燕. *天文研究与技术*, 2012, 9(3): 308

- [30] 杨忠良, 梁永辉, 胡浩军, 等. 激光与光电子学进展, 2010, 47(5): 51004
- [31] 杨忠良, 刘镭, 任晨纲, 等. 红外与激光工程, 2011, 40(10): 2044
- [32] 赵金字, 张世学, 王斌. 红外与激光工程, 2012, 41(5): 5
- [33] Zhang S, Zhao J, Wang J. Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, held in Wailea, Maui, Hawaii, September 13-16, 2011. Ryan S, ed. The Maui Economic Development Board, 2011: 82
- [34] Law N M. Dissertation. Cambridge University, UK, 2006
- [35] Mackay C D. Mon. Not. R. Astron. Soc., 2013, 432: 702
- [53] Hormuth F. Dissertation. German: University of Heidelberg, 2007
- [37] Hippler S, Bergfors C, Brandner W, et al. The Messenger. 2009, 137: 14
- [38] Oscoz A, Rebolo R, López R, et al. Proceedings of the SPIE, 2008, 7014: 12
- [39] Femenia B, Rebolo R, Perez-Prieto J A, et al. Mon. Not. R. Astron. Soc., 2011, 413: 1524
- [40] Aceituno J, Sanchez S F, Ortiz J L, et al. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2010, 122(894): 924
- [41] Grundahl F, Kjeldsen H, Frandsen S, et al. Memorie della Società Astronomica Italiana, 2006, 77: 458
- [42] Grundahl F, Christensen-Dalsgaard J, Pallé P L, et al. Precision Asteroseismology, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, 2014, 301: 69
- [43] Grae J U. UK: Iop Publishing Physica Scripta, 2008: 130
- [44] Tubbs R N. Dissertation. UK: Cambridge University, 2003
- [45] Law N M, Mackay C D, Baldwin J. Astronomy and Astrophysics, 2006, 446(2): 739
- [46] Mackay C, Weller K, Suess F. High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy V. Proceedings of the SPIE, 2012, 8453: 9
- [47] Harpoe K B W, Jorgensen U G, Andersen M I, et al. Astronomy and Astrophysics, 2012, 542(A23): 9
- [48] Ward J E, Rhodes W T, Sheridan J T. Proceedings of the SPIE, 2008, 7072: 6
- [49] Gladysz S, Christou J, Law N M, et al. Proceedings of the SPIE, 2008, 7015: 12
- [50] Femenía C B, Labadie L, Rebolo L R, et al. Proceedings of the SPIE, 2010, 7736: 11
- [51] Law M N, Hodgkin S T, Mackay C D, et al. Astronomische Nachrichten, 2005, 326(10): 1024
- [52] Law M N, Hodgkin S T, Mackay C D. Mon. Not. R. Astron. Soc., 2006, 368: 1917
- [53] Hormuth F, Brandner W, Hippler S, et al. Astronomy and Astrophysics, 2007, 463(2): 707
- [54] Ginski C, Mugrauer M, Seeliger M, et al. Mon. Not. R. Astron. Soc., 2012, 421(3): 2498
- [55] Lillo-Box J, Barrado D, Bouy H. Astronomy and Astrophysics, 2012, 546(A10): 15
- [56] Lillo-Box J, Barrado D, Bouy H. Astronomy and Astrophysics, 2014, 566(A103): 32
- [57] Rica F M, Barrena R, Vázquez G, et al. Mon. Not. R. Astron. Soc., 2012, 419(1): 197
- [58] Djorgovski S, King I R. Astrophysical Journal, Part 2 - Letters to the Editor (ISSN 0004-637X), 1986, 305: L61
- [59] Skottfelt J, Bramich D M, Figuera J R, et al. Astronomy and Astrophysics, 2013, 553(A111): 4
- [60] Kains N, Bramich D M, Jaimes R F, et al. Precision Asteroseismology, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, 2014, 301: 435
- [61] <http://www.spacetelescope.org/news/heic0616/>
- [62] D'Antona F. The Galactic Halo: From Globular Cluster to Field Stars, Proceedings of the 35th Liege International Astrophysics Colloquium, held 5-8 July, 1999. Noels A, Magain P, Caro D, et al. eds. Belgium: Institut d'Astrophysique et de Geophysique, 2000: 433
- [63] Mao S, Paczynski B. Astrophysical Journal, 1991, 374: L37
- [64] Bond Ian A. New Astronomy Reviews, 2012, 56(1): 25

Application of Lucky Imaging Technology in Astronomical Observation

Xiang E^{1,2}, LU Xiao-meng¹, MAO Yong-na¹, JIANG Xiao-jun¹

(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: It is difficult for traditional ground-based telescopes to achieve high spatial resolution, due to the influence of atmospheric turbulence. Lucky imaging is a simpler and cost-effectively solution to enable ground-based telescopes to obtain nearly diffraction-limited resolution. This paper introduces the principle and progress of lucky imaging, and reviews some existing lucky imaging systems. Several researches on crowded fields by using lucky imaging, such as multiplicity studies of stars with exoplanets, orbital measurements of close binary stars, and surveys of variable stars in globular clusters, are discussed. With the development of data reduction methods, the application of lucky imaging will be further extended by the composite technology of lucky imaging and adaptive optics.

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