自适应光学技术在天文观测中的研究进展

胡立发^{1*}, 刘超^{2,3}, 申文¹, 李大禹², 徐焕宇², 杨程亮², 张佩光², 张杏云², 王玉坤²,
王少鑫², 穆全全², 曹召良², 鲁兴海², 朱华新¹, 苏宙平¹, 宣丽²

1. 江南大学理学院, 无锡 214122;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 应用光学国家重点实验室, 长春 130033;

3. 中国科学院大学, 北京 100049

*联系人, E-mail: hulifa@ciomp.ac.cn; lightimage@163.com

收稿日期: 2016-10-10; 接受日期: 2016-11-15; 网络出版日期: 2017-03-29

国家自然科学基金(编号: 61475152, 11174274, 61205021, 61405194)资助项目

摘要 自适应光学技术克服大气湍流的干扰, 使大口径光学望远镜的角分辨率不再受限于大气相干长度, 成像接近光学系统的衍射极限. 自适应光学技术在波前探测、校正和提高成像视场等方面的不断进步, 极大地促进了天文学的发展. 目前, 天文观测中的自适应光学技术按应用主要分为三类: 传统的大视场高分辨率天文观测、系外行星观测和太阳观测等. 它们对自适应光学技术的要求各不相同, 本文分别对自适应光学技术在这三方面的应用和其他关键单元技术的进展, 进行了详细的总结与展望, 这些对未来我国发展大口径自适应光学望远镜有参考价值.

关键词 自适应光学, 激光导星, 天文, 波前探测

PACS: 94.80.+g, 95.85.-e, 96.90.+c, 07.05.Pj

1 前言

没有自适应光学系统的大口径地基光学望远镜, 其成像质量受到大气湍流的干扰, 当它的口径 D 大于大气相干长度 r_0 后, D 继续增加不会提高图像的分辨率. 因此, 1953年Babcock^[1]提出了自适应光学的概念: 基于实时的波前探测、校正和成像, 补偿大气湍流引起的波前畸变, 使大口径望远镜的分辨率恢复到接近它的衍射极限分辨力水平. 美苏冷战期间, 美国军方一方面希望利用地基大口径光学望远镜对人造卫星、

导弹等空间目标成像, 但大气的扰动使成像模糊; 另一方面, 美国军方对利用激光武器摧毁来袭导弹的设想也非常感兴趣, 但高功率的激光通过大气远距离传输时受大气扰动激光光斑会弥散, 降低激光武器的攻击能力. 在美国军方支持下, 为实现这些需求人们研究建立了自适应光学技术, 这些项目极大地推动了自适应光学技术的发展. 20世纪70年代随着项目的解密, 美国公开报道了第一个自适应光学系统: 实时大气补偿系统RTAC^[2]. 该系统采用波前剪切干涉仪作为波前探测器, 21单元的压电陶瓷变形镜作为校正器, 校正速

引用格式: 胡立发, 刘超, 申文, 等. 自适应光学技术在天文观测中的研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 084202
Hu L F, Liu C, Shen W, et al. Advancement of adaptive optics in astronomical observation (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2017, 47: 084202, doi: [10.1360/SSPMA2016-00425](https://doi.org/10.1360/SSPMA2016-00425)

度达到千赫兹, 标志着自适应光学技术的实现. 这引起了天文学家的极大兴趣, 20世纪80年代开始, 欧洲南方天文台(ESO)以法国多家单位为主启动了COME-ON项目^[3], 它采用19单元的变形镜, 先后在ESO的1.5和3.6 m望远镜上测试了自适应光学系统, 在2.2 μm 波长获得了接近衍射极限的角分辨率图像, 该项目验证了自适应光学技术在天文学中应用的巨大价值, 确立了它在天文观测方面的应用价值并引起了人们广泛关注. 20世纪70年代人们将自适应光学技术引入太阳观测中, 1979年Hardy^[4]在Dunn太阳望远镜上进行了第一次自适应光学成像实验, 所用的是波前剪切干涉仪和21单元的变形镜, 尽管性能有限, 但实验十分成功. 因此20世纪80年代, 美国国家太阳天文台(National Solar Observatory)启动了太阳自适应光学项目, 开发观测太阳的自适应光学系统. 1979年开始中国科学院光电技术研究所开始独立自主地研究自适应光学技术, 取得了令人瞩目的成就. 为了满足扩大视场的要求, 1985年Foy和Labeyrie^[5]首次提出使用激光导星作为人造信标, 来扩大校正后的成像视场, 从而导致了激光导星技术的迅速发展. 1994年Angel^[6]在*Nature*上撰文提出可以利用基于自适应光学技术的地基大口径光学望远镜对系外行星成像, 导致了超高对比度自适应光学概念(Extreme Adaptive Optics, ExAO)的出现. 21世纪初美国NSF支持加州理工大学自适应光学中心启动了XAOPI计划, 开启了首次利用ExAO技术对系外行星进行探索的研究. 以上这些里程碑式的事件标志着自适应光学技术在天文学中的不断进步, 目前自适应光学技术仍然在飞速发展中.

世界上装备或计划装备自适应光学系统的大口径光学望远镜有很多, 如表1所示^[7-14], 其中NGS: nature guide star自然导星; LGS: laser guide star激光导星. Keck有两台10 m口径的望远镜Keck I和Keck II, 它们既可独立使用, 也可以合起来进行相干成像. MMT望远镜在1998年经过技术升级, 由主镜原来的6块1.8 m首次使用的共相技术拼接镜替换为一块6.5 m的主镜; 它还首次采用大口径的变形镜次镜(Deformable Secondary Mirror, DSM)替代传统变形镜(Deformable Mirror, DM), 大大地简化了光路, 提高了入射光能量利用效率. LBT采用角锥波前探测器 (Pyramid Wavefront Sensor, PWFS)替代了传统的夏克哈特曼波前探测器 (Shack-Hartmann Wavefront Sensor, SHWFS), 提高了探测能力. VLT也采用DSM, 驱动单元为音圈驱动器. 日本的Subaru望远镜采用188单元的双压电变形镜 (Bimorph Deformable Mirror, BDM)作为校正器; 采用曲率波前探测器 (Curvature Sensor, CS)探测高阶畸变, 用SHWFS探测低阶畸变. Gemini South首次采用钠激光导星, 在所用的多重共轭自适应光学系统中采用了多个变形镜, 变形镜的驱动单元数最多的是324个. AEOS被美国空军用来对卫星、空间碎片等空间目标进行光学监视, 也用来进行系外行星观测试验. Hale和Shane两个望远镜虽然建造年代久远, 但在探索自适应光学新技术方面却处于引领地位, 第一个LGS就是在Shane望远镜上进行试验验证的.

随着计算机技术、光学精密加工技术、探测器技术的迅速发展, 人们在研究波前探测方法、低噪音高量子效率探测器、高速波前校正器、波前处理算

表1 带自适应光学系统的地基大口径光学望远镜
Table 1 Large ground-based optical telescope with adaptive optics

望远镜	口径	单元数	波前探测器	导星	启用年代	站址
Keck	10 m×2	DM349	SHWFS	NGS/LGS	1993	Hawaii
MMT	6.5 m	DSM336	SHWFS	NGS/LGS	1979	Arizona
LBT	8.4 m×2	DSM672	PWFS	NGS/LGS	2006	Arizona
VLT	8.2 m×4	DSM1170	SHWFS	NGS/LGS	2001	Chile
Subaru	8.2 m	BDM188	CS/SHWFS	NGS/LGS	1999	Hawaii
Gemini North	8.19 m	DM177	SHWFS	NGS/LGS	1999	Hawaii
Gemini south	8.19 m	DM324	SHWFS	NGS/LGS	2000	Chile
AEOS	3.67 m	DM941	SHWFS	LGS	1997	Hawaii
Hale	5.1 m	DM3388	SHWFS	LGS	1948	California
Shane	3 m	MEMS	SHWFS	LGS	1959	San Jose

法、新型校正器等方面的努力仍在继续,以改善自适应光学系统性能,将成像分辨率提高到接近理论衍射极限的水平,这些技术进步将满足未来24.5 mGMT, 30 mTMT, 39.3 mE-ELT和50 mEURO50 望远镜对自适应光学技术等要求. 同时,自适应光学技术也越来越引起人们的广泛关注,除了在天文观测方面的应用外,在医疗(如眼底成像)、大功率激光器和自适应光学显微镜等方面也有广泛的研究和应用^[15-18].

自适应光学技术在天文中的应用主要分为3个方面: (1) 激光导星自适应光学系统LGAO, 用于观测恒星、星系等, 由于要求自适应光学系统具备大视场、高角分辨率、高误差抑制带宽, 因此, 引入了瑞利导星、激光导星, 开发了新型探测器和探测、控制方法; (2) 用于观测太阳的自适应光学系统, 太阳属于面光源, 因此, 它需要使用相关算法的夏克哈特曼波前探测器; (3) 用于寻找太阳系外的系外行星, 也叫超高对比度自适应光学系统(Extreme Adaptive Optics System, ExAO), 由于观测的是系外行星, 因此要求用到日冕仪, 另外, 所使用的波前校正器的驱动单元数需要更多, 成像对比度要更高. 本文针对LGAO, ExAO和太阳自适应光学技术这3个方面的国内外最新进展分别进行叙述, 同时, 对未来自适应光学技术的发展给出了展望.

2 多激光导星大视场自适应光学技术

天空中亮的自然导星数量少, 因此1985年Foy和Labeyrie^[5]首次提出使用激光导星作为人造信标. 激光导星主要有瑞利导星和钠导星, 前者利用大气的后向散射, 高度约为10–30 km; 后者利用约90 km高度处钠原子D₂线对589 nm激光的共振, 产生后向散射荧光, 获得钠导星. 激光导星有限的高度导致锥光效应, 也就是聚焦非等晕(Focus Anisoplanatism, FA), 如图1(a)中深色部分所示, 导星(五角所示)发出的光呈锥形到达望远镜. 由于FA引起的波前畸变方差可由下式表示:

$$\sigma^2 \propto n^{-5/6} (D/d_0)^{5/3}, \quad (1)$$

$$d_0 = \lambda^{6/5} \cos^{3/5}(\psi) \left[\int C_n^2(h) F(h/H) dh \right]^{-3/5}, \quad (2)$$

其中, n 是所使用的激光导星数目; D 是望远镜的口径;

图1 (网络版彩图)激光导星示意图. (a) 单个瑞利导星示意图; (b) 多个钠导星示意图

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of LGS. (a) Single Rayleigh guide star; (b) multiple sodium guide star.

d_0 是有效直径; ψ 是天顶角; $C_n^2(h)$ 是折射率结构常数, 它是高度 h 的函数; H 是导星的高度. 函数 F 与 $(h/H)^{5/3}$ 成正比. 由公式(1)和(2)可见增加激光导星数目 n 、提高激光导星的高度 H 、目标具有小的天顶角 ψ 都可以减小FA引起的方差 σ^2 . 因此, 为了获得高的成像分辨率, 一般不再使用瑞利导星, 而使用多个钠激光导星, 如图1(b)所示, 多个激光导星的使用, 减少了未探测的区域, 减少了非等晕误差. 以下从理论和几个关键应用方面对目前激光导星自适应光学系统的进展进行总结.

2.1 光子信号估算

人造信标首先要解决的问题是激光导星的亮度, 因为它决定了光学波前的探测精度, 因此, 能输出合适光强的589 nm激光就显得非常重要^[19]. 我们假设每个钠原子在D₂能级自发辐射时产生一个光子, 且在各向同性辐射和不考虑饱和现象的情况下, 下式给出了计算激光功率与每秒每平方米面积上的光子数之间的关系:

$$F = \eta_{\text{Atm}} \eta_{\text{CCD}} \eta_{\text{tel}} \frac{NA_{\text{rad}}}{4\pi z^2} \cdot \frac{P}{E_{\text{phon}}} \cos(\psi), \quad (3)$$

其中, P 为激光的平均功率, E_{phot} 为光子能量; η_{Atm} 为激光从地面到钠层的大气透过率, 约为60%; η_{CCD} 为相机的量子效率; η_{tel} 为望远镜光学系统的透过率; A_{rad} 为在钠层的激光辐照面积; z 是导星的平均高度; N 是天顶处的钠原子的平均柱密度, 约为 $5 \times 10^{13} \text{ m}^{-2}$, 它的幅度随时间变化, 没有明显规律. 根据以上关系, 可以计算出夏克哈特曼波前探测器的每个子区域 A_{wfs} 内每秒接收到的光子可以用下式表示:

$$\frac{dN_{ph}}{dt} \leq 0.67 f_d \eta_{Atm} \eta_{CCD} \eta_{tel} \frac{A_{wfs}}{4\pi z^2} (A_{rad} N / \tau_n), \quad (4)$$

其中, f_d 是激光的占空比; τ_n 是钠原子激发态的寿命, 约为 16 ns. 根据以上公式可以估算出所用的夏克哈特曼波前探测器的信噪比; 或者按它的信噪比要求估算所需要的激光导星能量.

目前已经研制出了多种钠导星激光器, 国内中国工程物理研究院应用电子学研究所、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所和中国科学院理化技术研究所等多家单位, 已经研制出了满足波前探测所需功率的钠导星激光器^[20-22].

发射的 589 nm 激光不可避免引起后向瑞利散射在探测器中产生的杂光, 目前有两种方式来解决该问题: (1) 对于激光导星发射和接收共光路的系统采用合理的距离选通门; (2) 对于激光导星单独发射的系统, 选择合理的发射角度使瑞利散射的杂光和目标信号分开, 这样可以用空间滤波的方法去掉瑞利散射的影响.

2.2 大气湍流畸变的三维重构

目前, 人们对各种自适应光学系统进行了研究, 由于应用的目的不同, 各种 AO 系统的视场和斯特涅尔比 SR 差别比较大. 这些自适应光学系统在近红外 NIR 波段的典型性能如图 2 所示. ExAO 主要用于寻找类地行星, 不要求大视场; 传统的单重共轭的自适应光学系统 SCAO 受到等晕角的限制, 随视场的增加 SR 迅速减小, 已经不能满足大视场的应用. 大气湍流引起的畸变波前的三维重构算法, 则成为了各种类型大视场自适应光学系统校正的核心之一, 这些自适应光学系统包括多重共轭自适应光学系统 (Multi-Conjugation Adaptive Optics, MCAO), 多目标自适应光学系统 (Multi-Object Adaptive Optics, MOAO), 地面层自适应光学系统 (Ground Layer Adaptive Optics, GLAO), 激光层析自适应光学系统 (Laser Tomography Adaptive Optics, LTAO) 等; 对于这 4 种类型的大视场自适应光学系统来说, 大气湍流波前三维探测和重构的算法不同、补偿光路的不同, 直接导致了他们的 FOV 和 SR 有了明显的差别. 另外, 大视场和高 SR 很难兼顾, 而且系统的建造成本随着 FOV 或 SR 的提升而大幅增加.

图 2 (网络版彩图) 各种自适应光学系统比较

Figure 2 (Color online) Comparison of different kinds of AO systems.

随着望远镜口径 D 的大幅增加和激光导星的引入, MCAO, MOAO, GLAO 和 LTAO 等系统中探测器的子区域和变形镜驱动器的密度保持不变时, 夏克哈特曼波前探测器的子区域、变形镜的驱动单元都需要大幅度增加, 这使湍流波前的三维层析计算量随着望远镜口径 D 的六次方增加, 常规的矢量-矩阵积的波前重构方法速度慢, 越来越不适用, 人们提出了一系列新的波前重构算法 CuReD (Cumulative Reconstructor with Domain Decomposition)^[23], P-CuReD^[24], FEWA (Finite Element-Wavelet Hybrid Algorithm)^[25] 和三步法^[26]; 其中, 三步法比较灵活, 它为了避免大的稀疏矩阵-矢量乘积运算, 就把这一过程分解为三步: 首先是利用激光导星探测各个视场方向的畸变波前, 在这一步需要对夏克哈特曼波前探测器子区域中拉长的激光导星光斑进行预处理, 减少测量误差; 第二步, 从各个激光导星探测的波前重构离散的多层大气湍流畸变, 这一步实际上是逆问题, 可以采用多种方法, 例如, 在这一步利用 Kaczmarz 法等迭代方法进行计算避免了矩阵-矢量乘积^[26], 提高了计算速度; 最后, 将大气湍流畸变投影到变形镜上进行波前校正; 所有三个步骤都是独立的, 可以对其中某一步的算法进行改进, 例如, 利用快速傅里叶变换、人工神经网络来进行波前重构研究, 甚至利用 GPU 实现大规模的并行计算. 总之, 这些算法在保证波前测量精度、提高计算速度方面的改进使它们具有特殊的优势. 2016 年本组何斌博士^[27]从理论上对激光导星和校正器的位置等参数进行了优化, 并提出了平面加权重构算法, 对多颗导星波前进行加权融合, 提高了测量精度. 总之, 近十年来, 随着大口径望远镜项目的进展, 国外在激光导星大气层析算法的精度和速度方面进行了持续的研究和改进, 发展迅速.

2.3 多重共轭自适应光学系统MCAO

1988年Beckers^[28]首次提出MCAO的概念, 目的是扩大大气湍流畸变的自适应光学补偿后的成像视场FOV. MCAO是利用视场FOV中多个激光导星LGS, 探测望远镜上方的体大气湍流, 完成大气湍流的三维位相重构, 然后将校正信号施加到与不同高度大气湍流层光学共轭的变形镜上, 利用MCAO在整个大视场内都进行了有效校正. 一般来说, MCAO系统比经典的AO系统视场要大10–20倍. 为了在第二代VLT和100 m的OWL等大口径望远镜上升级自适应光学技术, 21世纪初ESO联合意大利阿塞缇天文台INAF-OAA、意大利伯杜瓦天文台INAF-OAPD和葡萄牙里斯本大学科技学院FCUL研发MAD (MCAO Demonstrator) 系统^[29], 其中INAF-OAA负责开发光机系统, INAF-OAPD负责观测和控制软件的开发, FCUL负责研发红外成像相机.

MAD系统目的是用来验证MCAO技术及关键单元技术的可行性, 设计的MAD系统包括两个变形镜, 一个与望远镜入瞳共轭, 另一个与8.4 km高度的湍流层共轭; MAD还包括夏克哈特曼波前探测器和角锥波前探测器两种类型的波前探测器, 前者用在验证星导向MCAO系统(Star Oriented MCAO, SOMCAO)中, 即多个夏克哈特曼波前探测器分别对导星目标直接探测得到各自视场方向的畸变波前; 后者用在验证层导向的MCAO系统(Layer Oriented MCAO, LOMCAO)中, 即角锥波前探测器探测不同共轭高度处湍流层的畸变波前. MAD系统的设计性能如下: 自适应光学校正后在K波带(中心波长 $2.2\ \mu\text{m}$)达到 $2''$ 的视场, 斯特尔比SR达到0.50. 2007年MAD开始安装在VLT望远镜上, 2008年Bouy等人^[30]报道了利用刚安装调试完毕的MAD系统获得的图像, 在大约一分的视场内, 某些细节MAD获得的图像甚至比哈勃太空望远镜获得的图像更清晰, 效果更佳.

2011年Rochau等人^[31]报道了MAD安装在VLT望远镜上的观测结果, 校正后大视场内SR值均匀一致, H和Ks波带平均SR分别达到0.060和0.059, PSF明显改善. 基于MAD成功的设计、建设经验和优异的结果, 2015年底INAF和ESO签署协议, 由ESO为E-ELT望远镜建造MAORY系统(Multi-Conjugate Adaptive Optics RelaY for E-ELT, MAORY). 除了ESO外, 美国主导立

项了GeMS系统^[32], 即在Gemini South天文台安装的MCAO系统, 与MAD用多个自然导星不同, 它是第一个使用多钠导星的MCAO系统, 在近红外($0.96\text{--}2.2\ \mu\text{m}$)波段校正后FOV达到 $2'$, 且校正后分辨率接近衍射极限. 另外, ELT和TMT等大望远镜在设计阶段就考虑研发MCAO系统. 与其他系统不同, Keck望远镜上的NGAO系统第一次作为设备装备在望远镜上使用, 而不是进行技术验证, 也使用了钠激光导星的MCAO技术^[33].

2.4 多目标自适应光学系统MOAO

为了研究早期星系的形成过程, 天文学家需要对几个星系进行同时研究, 这使所需要的视场FOV更大, 甚至超出了MCAO的范围, 如图2所示, 但与MCAO不同, 它的目的并不是需要对大FOV内进行全部AO校正, 只需要校正其中几个感兴趣的区域, 这就是多目标自适应光学系统MOAO的起源和基本思想.

MOAO系统中对每个目标匹配一个变形镜, 结构如图3所示. 其中, 图3(a)给出了激光层析自适应光学系统LTAO原理, 它利用激光导星和自然导星来探测大气湍流畸变, 用一个变形镜对观测方向的大气湍流进行校正. 多激光导星的使用可以基本覆盖整个目标路径上的湍流, 消除了聚焦非等晕性. 因此, 尽管没有增大成像视场, 但比传统的单重共轭激光导星自适应光学系统有更高的角分辨率. MOAO系统原理如图3(b)图所示, 与LTAO不同, 为了扩大视场, LGS之间的角间距更大, 因此, 湍流畸变波前的重构误差也比LTAO的

图3 (网络版彩图)自适应光学系统原理图. (a) LTAO; (b) MOAO

Figure 3 (Color online) Principle diagram of adaptive optics system. (a) LTAO; (b) MOAO.

大,分辨率不会超过LTAO;但MOAO类似于多个LTAO的组合,它采用开环校正,使用多个波前校正器;具有线性响应特性的液晶波前校正器适合于这种开环控制的应用.

目前已经有多个MOAO系统,这些包括巴黎天文台的SESAME测试平台^[34]、日本8 m口径Subaru望远镜上的RAVEN系统^[35]、加拿大Dominion天文台1.2 m望远镜上测试的VOLT系统^[36],以及巴黎天文台联合杜汉姆大学开发的CANARY系统^[37]. CANARY作为一套探索验证系统,为未来装备到E-ELT上的EAGLE多目标自适应光学系统系统进行技术验证,预期EAGLE能达到10'的视场. Keck的NGAO系统也包括了MOAO的技术,也就是说系统设计时就同时考虑了MCAO和MOAO的共存. MOAO技术非常重要,以至于一些大型望远镜TMT、ELT等也都考虑了MOAO的功能. 2014年RAVEN测试了无自适应校正、自适应校正、GLAO、MOAO和SCAO的结果^[35],对不同AO校正下两个成像支路结果进行了比较,MOAO的大视场高分辨优势十分明显,尽管从测试来看传统的SCAO校正效果最好,但它的视场一般不超过10",所得到的两个目标的图像是分别校正得到的.

MOAO技术的难点在于其使用开环控制,与传统AO系统波前探测器探测变形镜的残差不同,在MOAO系统中,波前探测器探测的是湍流波前畸变,这种开环的结构,对于具有磁滞响应特性的变形镜或倾斜镜来说,会导致校正效果变差,要得到清晰的像,势必会增加控制的难度和复杂性. 而液晶波前校正器基于分子转动导致的有效折射率发生改变,从而改变了光程,基于液晶的波前校正器没有机械运动部件,避免了磁滞响应引起的校正误差,在使用中可以采用开环控制^[17],因此,如果液晶校正器应用在MOAO系统中时具有自身校正精度高的独特优势.

2.5 地面层自适应光学系统GLAO

为确定恒星形成过程中环境的影响,天文学家需要观察大量年轻恒星团内部奇特的现象,大多数星团超过了1',因此需要大视场观察,空基成像望远镜目前无法满足这种要求,为满足这种需求,2002年Rigaut^[38]提出在地基大口径光学望远镜上配备GLAO系统. 大多数天文台站,地面以上几百米的高度内集中了较大一部分的湍流扰动,这一高度内的畸变满足等晕条件,

对它们的校正在全部视场内有效,而且这种高度内的畸变可以用多个激光导星LGS比较准确地测出来. 因此, GLAO放弃了达到衍射极限的目标,而是尽量提高全部波段的成像质量. GLAO只使用一个变形镜,通过测量不同方向上导星的波前,然后取简单平均得到地面层的大气湍流畸变,进行AO校正后, GLAO系统能在大视场内提供中等质量的校正效果, Rigaut^[38]的模拟表明GLAO的最佳工作波段在近红外. 2010年Hart等人^[39]报道了GLAO的对M3星团观测的结果,视宁度0.7"时在2'的视场内2.2 μm 波长处分辨率达到0.3".

德国、美国、意大利三国为大双筒望远镜LBT研制的先进瑞利导星GLAO系统ARGOS (Advanced Rayleigh guided Ground layer adaptive Optics System for the LBT (Large Binocular Telescope), ARGOS), GLAO只对地面上500 m高度内的大气湍流进行波前探测和校正,因此这里使用了貌似低端的瑞利激光导星,但实际上对GLAO来说完全够用,而且相对钠导星节省了大量成本. 2016年Orban de Xivry等人^[40]报道了ARGOS对天空目首次成像标获得的结果,在超过4'×4'的视场内FWHM提高了2倍,为自适应光学系统的后续光谱、成像设备提供了高质量的光束.

GLAO一般和MOAO结合,在GLAO的变形镜对地面层校正后,MOAO的其他变形对高层的大气湍流进行进一步的校正,目前大多数大口径望远镜也同时在研制和装备GLAO系统,这样可以获得更高分辨率的图像和更好的能量集中度. MCAO, MOAO和GLAO三种类型的自适应光学系统各有优点,针对在天文领域里的应用场景不同,互补性强,因此,大口径的望远镜都在同时研究这几种AO系统,在光机设计和AO算法方面进行综合考虑,以最大限度满足大口径光学望远镜的应用需求.

3 太阳自适应光学系统

与传统自适应光学相比,太阳自适应光学比较特殊: 首先,太阳是面光源,不能使用其他自适应光学系统中的计算一阶矩的波前探测方法来探测畸变,因此,人们提出并研究了相关夏克哈特曼波前探测;其次,大气湍流剧烈,太阳表面米粒结构的观测只能在白天进行,而白天视宁度更差. 国内外已有的太阳望

望远镜口径在1 m左右, NST望远镜净口径1.7 m, 有效口径是1.6 m^[41], 是目前在使用的最大口径太阳望远镜, 2009年首次观测的结果显示了较好的分辨力. 美国在建设中的Daniel K. Inouye Solar Telescope, 即DKIST望远镜, 其口径达到4 m^[42], 是未来最大口径的太阳望远镜, 预期2018年在夏威夷毛伊岛建成. 国内以中国科学院光电技术研究所、中国科学院国家天文台南京天文学技术研究所为代表在太阳自适应光学研究领域也进行了大量研究, 获得了很好的成果. 2011和2015年中国科学院光电技术研究所饶长辉等人^[43]先后报道了在昆明抚仙湖太阳观测站1 m NVST望远镜上自适应光学系统的测试结果, 也获得了高分辨率的图像. 近年来, 国内外研究组基于MCAO的研究进展, 在太阳自适应光学系统中也开展了基于MCAO的大视场自适应光学系统的研究.

太阳自适应光学系统中最关键的是相关哈特曼波前探测器. 和常规计算点光源在夏克哈特曼波前探测器子区域中心的一阶矩方法不同, 针对面光源太阳的质心计算方法人们进行了大量研究, 包括互相关算法、傅里叶变换算法^[44,45]. 除此之外, 还有平方差分函数法(Square Difference Function)、图像域的协方差函数法(Covariance Function in Image Domain)、傅里叶域的协方差函数法(Covariance Function in Fourier Domain)、绝对差分函数法(Absolute Difference Function)、绝对差分函数平方方法(Absolute Difference Function, Squared), 利用这些方法得到二维相关函数, 但精度还比较低, 因此, 人们还引入插值的方法进一步提高偏移量计算的精度^[46].

在未来的太阳自适应光学系统中, PD算法有可能替代目前唯一有效算法的相关哈特曼波前算法进行波前探测^[47], 即未来的太阳自适应光学系统中有可能不再需要相关哈特曼波前探测器, 而采用PD算法探测太阳面光源的波前. PD算法的精度和速度近年也进展明显^[48], 特别是多通道并行读出的EMCCD探测器技术和大规模并行计算的GPU硬件技术的快速发展, 已有市售的2 kHz 240×240采样速率的法国OCAM2 EMCCD相机, 在2×2 binning模式下采样速率能达到3.7 kHz; 英伟达公司的GPU采用了与CPU完全不同的架构^[49], 获得几十甚至百倍于GPU的计算能力; 这些为PD算法的高速实时应用打下了坚实基础.

4 超高对比度自适应光学系统ExAO

为了观测系外行星, 特别是亮目标周围的暗弱行星, 人们提出超高分辨率的自适应光学系统ExAO, 这里Ex代表了两重含义: 首先, 它代表extro-planet, 即太阳系以外其他恒星的类似地球的行星, 即可能存在生物类地行星, 因此它并不要求成像系统有大的视场; 其次, ExAO系统成像性能极其卓越, 它的所有单元均采用建造时能够采用的最好技术: 采用最高单元数的变形镜、最多子窗口的哈特曼波前探测器、哈特曼探测器采用最快的电子倍增相机EMCCD, 采用最高性能的实时处理机, 最终获得最高斯特涅尔比SR的图像, 在下文中给出了部分代表性系统的具体性能参数. 另外, 为了提高暗弱系外行星的成像对比度, 一方面提高点光源像的峰值强度, 将系统的斯特涅尔比SR提高到接近1, 同时, 用日冕仪去掉大气和望远镜的散射光, 两者结合及大地提高了成像对比度和观测系外行星的能力.

ExAO系统最典型的代表是SAXO系统(Sphere AO for eXoplanet Observation)^[50], 它具有如下特点: 变形镜DM有41×41单元, 口径180 mm, 驱动器之间调制深度 $>\pm 1\ \mu\text{m}$, 最大调制深度 $>\pm 3.5\ \mu\text{m}$ (Mechanical); 倾斜镜TTM, 分辨率 $\pm 0.5\ \text{mas}$; 夏克哈特曼波前探测器40×40, 每个子区域6×6像素(Shannon sampling@ $0.65\ \mu\text{m}$), 工作波长0.45–0.95 μm , 采样频率2 kHz像素240×240; 全部时间延迟(包括CCD读出、实时计算机的数据处理)小于1 ms(目标0.666 ms); 非共光路畸变采用事先PD测量, 然后在线补偿; 辅助的红外倾斜探测器和瞳孔探测器测量校正光轴和瞳孔的偏移. Fusco等人^[51]报道了利用VLT望远镜上SAXO获得的图像, 验证了它高对比度成像的能力. Gemini望远镜上GPI (Gemini Planet Imager)是另一个直接针对系外行星成像的装置^[52].

哈雷望远镜(Hale Telescope)上的PALM-3000 AO系统是也是用来探测系外行星的装置^[53], 其性能更强: 采用双变形镜, 分别具有350和3380驱动器, 是目前最多单元数的变形镜; 采用64×64单元子孔径的夏克哈特曼波前探测器; PALM-3000系统采用高度自动化的测量方式, 是未来天文自适应光学系统的发展方向之一. 2011在帕洛玛天文台(Palomar Observatory)首次安装在5.1 m Hale望远镜上进行测试以来, 取得了较好的成果.

5 结论

尽管给出了近年来国际上自适应光学系统在天文学中的进展,但是由于篇幅所限,应用不能一一列举、算法不能详细讨论,特别是大气湍流的三维层析算法,在以后会详细总结给出. 值得一提的,尽管麦哲伦克雷望远镜(The Magellan Clay Telescope)的MagAO系统没有列入上述分类中,但它使用了三项新的技术^[54]: 第一,采用变形镜次镜直接将大口径望远镜的次镜做成变形镜,即同时具备变形镜和次镜的功能,极大地减化了系统,减少了镜片个数,提高了光通量,这对天文应用非常关键;第二,采用调制型的角锥波前探测器替代夏克哈特曼波前探测器,提高了波前探测的信噪比;第三,变形镜不使用常规的压电陶瓷材料,而使用音圈驱动器,避免了基于压电陶瓷的变形镜的磁滞非线性响应和印透效应. 这些技术在工程上的突破如果被验证成功,可以代表未来技术发展方向,特别是大口径望远镜的次镜的发展方向.

大口径望远镜的建造耗费巨大、选址苛刻,世界上主要的大口径望远镜选址集中在智利北部和美国夏威夷. 美国、法国、英国、意大利、加拿大和德国为首的西欧、北美国家在大口径望远镜、自适应光学技术上合作紧密,以天文学的科学需求,带动大口径望远镜的发展,大口径望远镜不仅是大科学平台,也是技术平台,它促进了天文学的发展,也带动了大口径望远镜、自适应光学的发展,促进了光学玻璃、支撑技术、子镜共相技术、高性能EMCCD、新的波前测量方法、新型波前校正器、新的大功率钠导星激光技术、高速数据处理等单元技术不断突破. 国内参与国外大望远镜工程项目少,但TMT的建设为这种合作带来了突破^[55],中国科学院参与研制钠激光导星、三镜、波前探测器等.

我们国家大口径望远镜建造也在研讨、规划中,相对来说国内在这方面的投入较少,需要有更多的项目促进这方面的发展,特别是促进某些单元技术、算法上的突破.

参考文献

- Babcock H W. The possibility of compensating astronomical seeing. *Publ Astron Soc Pac*, 1953, 65: 229–236
- Hardy J W, Lefebvre J E, Koliopoulos C L. Real-time atmospheric compensation. *J Opt Soc Am*, 1977, 67: 360–369
- Rigaut F, Rousset G, Kern P, et al. Adaptive optics on a 3.6 m telescope: Results and performance. *Astron Astrophys*, 1991, 250: 280–290
- Hardy J W. Solar Imaging Experiment. Final Report, AFGL-TR-80-0338, Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, 1980
- Foy R, Labeyrie A. Feasibility of adaptive telescope with laser probe. *Astron Astrophys*, 1985, 152: L29–L31
- Angel J R P. Ground-based imaging of extrasolar planets using adaptive optics. *Nature*, 1994, 368: 203–207
- Wizinowich P L, Le Mignant D, Bouchez A H, et al. The W. M. Keck observatory laser guide star adaptive optics system: Overview. *Publ Astron Soc Pac*, 2006, 118: 297–309
- Brusa G, Riccardi A, Wildi F P, et al. MMT adaptive secondary: First AO closed-loop results. *Proc SPIE*, 2003, 5169: 26–36
- Esposito S, Riccardi A, Pinna E, et al. Large binocular telescope adaptive optics system: New achievements and perspectives in adaptive optics. *Proc SPIE*, 2012, 8149: 814902
- Dekany R, Roberts J, Burruss R, et al. PALM-3000: Exoplanet adaptive optics for the 5 m Hale telescope. *Astrophys J*, 2013, 776: 130–132, arXiv: 1309.1216
- Minowa Y, Hayano Y, Oya S, et al. Performance of Subaru adaptive optics system AO188. *Proc SPIE*, 2010, 7736: 77363N
- Ellerbroek B L. First-order performance evaluation of adaptive optics systems for atmospheric turbulence compensation in extended field of view astronomical telescopes. *J Opt Soc Am A*, 1994, 11: 783–805
- Rigaut F, Neichel B, Boccas M, et al. Gemini multiconjugate adaptive optics system review-I. Design, trade-offs and integration. *Mon Not R Astron Soc*, 2014, 437: 2361–2375, arXiv: 1310.6199
- Martin H M, Allen R G, Burge J H, et al. Fabrication and testing of the first 8.4 m off-axis segment for the Giant Magellan Telescope. *Proc SPIE*, 2010, 7339: 73390A
- Baranec C, Riddle R, Law N M, et al. High-efficiency autonomous laser adaptive optics. *Astrophys J Lett*, 2014, 790: L8–L13
- Jiang W H, Zhang Y D, Rao C H, et al. Progress on adaptive optics of institute of optics and electronics. *Chin Acad Sci (in Chinese)*. *J Opt*, 2011, 31: 0900106 [姜文汉, 张雨东, 饶长辉, 等. 中国科学院光电技术研究所的自适应光学研究进展. *光学学报*, 2011, 31: 0900106]

- 17 Xuan L, Li D Y, Liu Y G, et al. Prospect of liquid crystal adaptive optics in astronomy application (in Chinese). *Chin J Liquid Crystal Displays*, 2015, 30: 1–9 [宣丽, 李大禹, 刘永刚, 等. 液晶自适应光学在天文学研究中的应用展望. *液晶与显示*, 2015, 30: 1–9]
- 18 Skorsetz M, Artal P, Bueno J M. Performance evaluation of a sensorless adaptive optics multiphoton microscope. *J Microscopy*, 2016, 261: 249–258
- 19 Xu Z Y, Bo Y, Peng Q J. Progress on sodium laser guide star (in Chinese). *Infrared Laser Eng*, 2016, 45: 0101001 [许祖彦, 薄勇, 彭钦军. 激光钠导引星技术研究进展. *红外与激光工程*, 2016, 45: 0101001]
- 20 Liu J, Wang J L, Lv T Y, et al. All-solid-state 589 nm laser and the brightness of excited sodium guide star (in Chinese). *Opti Prec Eng*, 2014, 22: 3199–3204 [刘杰, 王建立, 吕天宇, 等. 全固态589 nm激光器及其钠导星激发亮度. *光学精密工程*, 2014, 22: 3199–3204]
- 21 Fan T, Zhou T, Feng Y. Improving sodium laser guide star brightness by polarization switching. *Sci Rep*, 2016, 6: 19859
- 22 Wang P Y, Xie S Y, Bo Y, et al. 33 W quasi-continuous-wave narrow-band sodium D_{2a} laser by sum-frequency generation in LBO. *Chin Phys B*, 2014, 23: 094208
- 23 Rosenstainer M. Wavefront reconstruction for extremely large telescopes via CuRe with domain decomposition. *J Opt Soc Am A*, 2012, 29: 2328–2336
- 24 Shatokhina I, Obereder A, Rosenstainer M, et al. Preprocessed cumulative reconstructor with domain decomposition: A fast wavefront reconstruction method for pyramid wavefront sensor. *Appl Opt*, 2013, 52: 2640–2652
- 25 Yudytskiy M, Helin T, Ramlau R. A frequency dependent preconditioned wavelet method for atmospheric tomography. In: *Proceeding of Third AO4ELT Conference-Adaptive Optics for Extremely Large Telescopes*. Florence: Euro South Observatory, 2013. 1–8
- 26 Rosenstainer M, Ramlau R. Kaczmarz algorithm for multiconjugated adaptive optics with laser guide stars. *J Opt Soc Am A*, 2013, 30: 1680–1686
- 27 He B. Wavefront Reconstruction Algorithm for Multiple Laser Guider Adaptive Optics System (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016. 47–98 [何斌. 自适应光学系统的多激光导星波前重构算法研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 2016. 47–98]
- 28 Beckers J M. Increasing the size of the isoplanatic patch size with multi-conjugate adaptive optics. In: *Proceedings of ESO conference on Very Large Telescopes and their instrumentation*. Garching: Euro South Observatory, 1988. 693–703
- 29 Hubin N, Marchetti E, Fedrigo E, et al. The ESO demonstrator MAD: A European collaboration. In: *Proceedings of the Venice Conference on Beyond Conventional Adaptive Optics*. Venice: Euro South Observatory, 2002. 27–38
- 30 Bouy H, Kolb J, Marchetti E, et al. Multi-conjugate adaptive optics images of the Trapezium cluster. *Astron Astrophys*, 2008, 477: 681–690, arXiv: 0709.3994
- 31 Rochau B, Brandner W, Stolte A, et al. A benchmark for multiconjugated adaptive optics: VLT-MAD observations of the young massive cluster Trumpler 14. *Mon Not R Astron Soc*, 2011, 418: 949–959, arXiv: 1108.0905
- 32 Neichel B, Rigaut F, Vidal F, et al. Gemini multiconjugate adaptive optics system review II: Commissioning, operation and overall performance. *Mon Not R Astron Soc*, 2014, 440: 1002–1019, arXiv: 1402.6906
- 33 McGrath E, Gavel D, Mignant D L, et al. The science case for the next-generation AO system at W. M. Keck Observatory. *Proc SPIE*, 2008, 7015: 701507
- 34 Mark Ammons S, Johnson L, Laag E A, et al. Laboratory demonstrations of multi-object adaptive optics in the visible on a 10 meter telescope. *Proc SPIE*, 2008, 7015: 70150C
- 35 Lardire O, Andersen D, Blain C, et al. Multi-object adaptive optics on-sky results with Raven. *Proc SPIE*, 2014, 9148: 91481G
- 36 Andersen D R, Fischer M D, Vran J P, et al. VOLT: The victoria open loop testbed. *Proc SPIE*, 2008, 7015: 70150H
- 37 Morris T, Hubert Z, Myers R, et al. CANARY: The NGS/LGS MOAO demonstrator for EAGLE. In: *Proceeding of 1st AO4ELT Conference*. Paris: EDP Sciences, 2010. 08003
- 38 Rigaut F. Ground-conjugate wide field adaptive optics for the ELTs. In: *Proceedings of Beyond Conventional Adaptive Optics*. Garching: Euro South Observatory, 2002. 58: 11–16
- 39 Hart M, Milton N M, Baranec C, et al. A ground-layer adaptive optics system with multiple laser guide stars. *Nature*, 2010, 466: 727–729
- 40 Orban de Xivry G, Rabien S, Busoni L, et al. First on-sky results with ARGOS at LBT. *Proc SPIE*, 2016, 9909: 990936
- 41 Goode P R, Coulter R, Gorceix N, et al. The NST: First results and some lessons for ATST and EST. *Astron Nachr*, 2010, 331: 620–623
- 42 Upton R, Cho M, Rimmele T. Force-optimized alignment for optical control of the Advanced Technology Solar Telescope. *Appl Opt*, 2010, 49: G105–G113
- 43 Rao C H, Zhu L, Rao X L, et al. Second generation solar adaptive optics for 1-m New Vacuum Solar Telescope at the Fuxian Solar Observatory. *Chin Opt Lett*, 2015, 13: 120101
- 44 Lukin V P, Botygina N N, Emaleev O N, et al. Wavefront sensors for adaptive optical systems. *Measure Sci Rev*, 2010, 10: 102–107

- 45 Peng X F, Li M, Rao C H. Design of correlating Hartmann Shack wavefront processor based on absolute difference algorithm (in Chinese). *Optic-Electronic Eng*, 2008, 35: 18–22 [彭晓峰, 李梅, 饶长辉. 基于绝对差分算法的相关HS波前处理机设计. *光电工程*, 2008, 35: 18–22]
- 46 Löfdahl M G. Evaluation of image-shift measurement algorithms for solar Shack-Hartmann wavefront sensors. *Astron Astrophys*, 2010, 524: A90, arXiv: [1009.3401](https://arxiv.org/abs/1009.3401)
- 47 Korkiakoski V, Keller C U, Doelman N, et al. Joint optimization of phase diversity and adaptive optics: Demonstration of potential. *Appl Opt*, 2012, 51: 102–113
- 48 Yu H, Yang C, Xu Z, et al. Analysis and reduction of errors caused by Poisson noise for phase diversity technique. *Opt Express*, 2016, 24: 22034
- 49 Hu L, Xuan L, Li D, et al. Real-time liquid-crystal atmosphere turbulence simulator with graphic processing unit. *Opt Express*, 2009, 17: 7259–7268
- 50 Sauvage J F, Fusco T, Petita C, et al. SAXO, the extreme adaptive optics system of sphere: Overview and calibration procedure. *Proc SPIE*, 2010, 7736: 77360F
- 51 Fusco T, Sauvage J F, Petita C, et al. Final performance and lesson-learned of SAXO, the VLT-SPHERE extreme AO From early design to on-sky results. *Proc SPIE*, 2014, 9148: 91481U
- 52 Poyneer L A, Palmer D W, Macintosh B, et al. Performance of the Gemini Planet Imager's adaptive optics system. *Appl Opt*, 2016, 55: 323
- 53 Roberts J E, Dekany R G, Burrussa R S, et al. Results from the PALM-3000 high-order adaptive optics system. *Proc SPIE*, 2012, 8447: 84470Y
- 54 Morzinski K M, Males J R, Skemer A J, et al. Magellan adaptive optics first-light observations of the exoplanet β pic b. ii. 3–5 μ m direct imaging with magao+clio, and the empirical bolometric luminosity of a self-luminous giant planet. *Astrophys J*, 2015, 815: 108, arXiv: [1511.02894](https://arxiv.org/abs/1511.02894)
- 55 Simard L. The thirty-meter telescope: Science and instrumentation for a next-generation observatory. *J Astrophys Astron*, 2013, 34: 97–120

Advancement of adaptive optics in astronomical observation

HU LiFa^{1*}, LIU Chao^{2,3}, SHEN Wen¹, LI DaYu², XU HuanYu², YANG ChengLiang²,
ZHANG PeiGuang², ZHANG XingYun², WANG YuKun², WANG ShaoXin²,
MU QuanQuan², CAO ZhaoLiang², LU XingHai², ZHU HuaXin¹,
SU ZhouPing¹ & XUAN Li²

¹ School of Science, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

² State Key Lab of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Adaptive optics is used to compensate the atmospheric turbulence aberration for diffractive limit images, which makes the angular resolution of large aperture telescope not limited by the seeing or atmospheric coherence length. The continuous improvements of wavefront sensing, correctors and enlarged FOV for adaptive optics accelerate the development of astronomy. The main adaptive optics techniques include classical FOV and high resolution astronomical observation, extro-planet observation and solar observations and so on. And they have different technique requirements for adaptive optics. In the paper, we give some summarization and expectation of the advancement in the above three fields, especially in some new elemental techniques in detail, which will be helpful for our national adaptive optics development in large aperture telescopes.

adaptive optics, laser guide star, astronomy, wavefront sensor

PACS: 94.80.+g, 95.85.-e, 96.90.+c, 07.05.Pj

doi: [10.1360/SSPMA2016-00425](https://doi.org/10.1360/SSPMA2016-00425)