

文章编号:1007-2780(2015)01-0001-09

## 液晶自适应光学在天文学研究中的应用展望

宣 丽\*, 李大禹, 刘永刚

(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, 吉林 长春 130033)

**摘要:**液晶波前校正器作为一种高单元密度的新型波前校正器件,通过相息图的衍射可以轻松实现十微米的波前位相校正量。因此,基于液晶波前校正器的自适应光学(LCAO)系统是 21 世纪天文观测领域非常有希望普及的系统。但是液晶波前校正器存在响应速度慢( $>10$  ms)、能量利用率低的双重问题,国际上一直处于探索研究中。本课题组不但解决了能量问题,而且在速度方面不断取得进步,所研制的 LCAO 系统与 1.23 m 口径望远镜连接,清晰观测到土星及其环绕的光环带,分辨出 4.8 和 5.5 视星等的  $\alpha$ -Com 双星,成像分辨率达到 1.8 倍衍射极限分辨率;目前系统延迟时间只有 2 ms,可以说已达到工程应用水平,在装备 8~10 m 级大口径天文学望远镜方面极具应用潜力。

**关键词:**液晶波前校正器;自适应光学;望远镜

中图分类号:TN141.9; O439; TH743 文献标识码:A doi:10.3788/YJYXS20153001.0001

## Prospect of liquid crystal adaptive optics in astronomy application

XUAN Li\*, LI Da-yu, LIU Yong-gang

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** Liquid crystal wavefront corrector can easily achieve 10  $\mu$ m phase stroke correction through kinoform diffraction pattern. Therefore, the liquid crystal adaptive optics (LCAO) system is very promising in the field of astronomical observations in the 21st century. Disadvantages of the liquid crystal wavefront corrector are low response speed and low energy efficiency. Our group not only solves the energy problem, but also continuously improves the performance of speed. The LCAO system developed by our group is connected to the 1.23 m telescope. As a result, Saturn and its planetary ring was clearly observed, and the  $\alpha$ -Com binary was also resolved. The imaging resolution is up to 1.8 times of the diffraction limit of the 1.23 m telescope. Currently the system is only a 2 ms delay, and it has entered the engineering stage. Therefore, the LCAO system has potential applications in 8 to 10 m large diameter astronomy telescope.

**Key words:** liquid crystal wavefront corrector; adaptive optics; telescope

收稿日期:2014-07-21;修订日期:2014-08-15.

基金项目:国家自然科学基金(No. 60736042,11174274,1174279, 61205021,11204299,61377032,61378075)

\* 通信联系人, E-mail: xuanli@ciomp.ac.cn

## 1 引言

近十年,人类对年轻星座与褐矮星群的观测、尤其是探讨星球起源搜寻可能存在生命的类似地球的行星/类星体成为最令人振奋的天文学成果,从而对望远镜的观测能力提出了越来越高的要求。

望远镜的观测能力由 2 个指标决定,一是成像分辨率,二是集光效率。为提高这 2 个指标,增大望远镜口径是最有效的技术手段。20 世纪 90 年代以后,发达国家已研制十几台 8~10 m 口径望远镜,如欧洲南方天文台的 4 台单口径 8.2 m 甚大望远镜 VLT、美国 2 台 10 m 凯克望远镜(由 36 块 1.8 m 口径的六角形镜面构成)以及单口径 8 m 的双子望远镜、日本 8.2 m 的 SUBARU 望远镜、南非 9 m 的 SALT 望远镜。30~40 m 拼接式望远镜的建设也已在策划启动中,如多国联合、包括我国参与建设的 30 m TMT 望远镜,还有欧洲台正在建设的 GMT(由 7 个 8.4 m 子镜组成)、主镜直径达到 39 m 的 E-ELT。

然而地基望远镜在观测星体状态和星系结构时,必须透过地面上约 10~20 km 厚的大气层,大气中折射率不均匀、在风力作用下形成湍流干扰成像光束的传播,使得波前畸变,图像完全失去结构特征,甚至区分不开角间距在 1" 以内的双星。虽然理论上光学系统的成像分辨率( $1.22 \lambda/D$ ,  $\lambda$  为波长,  $D$  为通光口径)随口径增大而提高,但受大气的衍射极限( $1.22 \lambda/r_0$ ,  $r_0$  为大气相干长度  $\sim 10 \text{ cm}$  @  $\lambda = 550 \text{ nm}$ ) 限制,数米大口径望远镜的分辨率并不比 10~20 cm 口径望远镜的分辨率高,口径增大的巨大代价只是增加了接收能量,自身的固有分辨率无法发挥出来,只有结合自适应光学波前校正技术才能恢复大口径望远镜的成像分辨率。

## 2 自适应光学对天文学研究的贡献

自适应光学(Adaptive Optics, 缩写 AO)系统中有 2 个关键器件,如图 1 所示,一是波前探测器,二是波前校正器,二者形成闭环,高速校正波前畸变,实现高分辨率成像。现阶段所用的波前

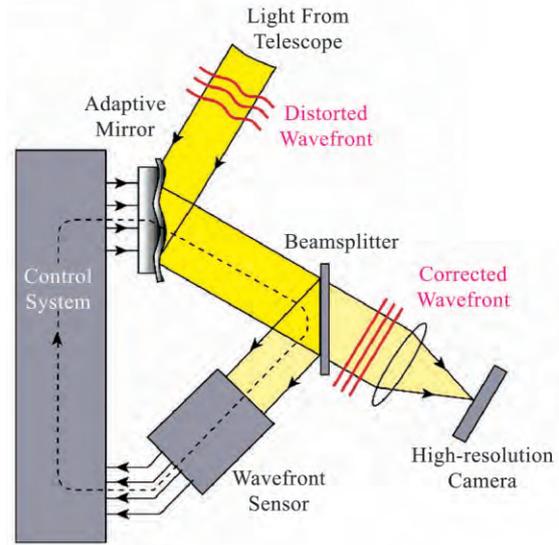


图 1 自适应光学系统的结构说明图<sup>[1]</sup>

Fig. 1 Schematic diagram of AO system

探测器几乎都是哈特曼波前探测器,波前校正器为变形镜。国际上 10 m 级以下的地基望远镜在近十几年内大多配备了 AO 系统,使这些大口径天文光学望远镜的图像分辨能力比配备 AO 之前提高 10 倍或 10 倍以上,角分辨率恢复至 0.1" 左右。这无疑给天文学家提供了新的研究手段,可以在恒星和行星形成区进行以前所不能开展的研究,特别是那些被掩盖的年轻天体和恒星演化中的质量损失。年轻天体通常伴随着丰富的盘状物、壳层、喷流、耀斑和伴星等,提供了恒星形成与早期演化过程的证据。如近年通过观测银河系最内层区域恒星的动态特征,使得银心存在黑洞的证据不断增多,趋于更加清晰合理的天体机理与模型将呈现出来,促使天文研究工作进入一个新的发展时期。

1988~1990 年法国 CILAS 公司第一个为欧洲南台(ESO)1.52 m 天文望远镜研制了变形镜波前校正器,并由科学家们装配为 AO 系统,之后该 AO 系统移植到 3.6 m 望远镜上;1991 年 1 月首次用 AO 系统在 2.2  $\mu\text{m}$  波长为中心的红外 K 波段获得小行星 1 号 Ceres 和小行星 2 号 Pallas 带有细节的表面图像,测出其自转轴的空间取向<sup>[2-3]</sup>;1991 年 5 月又在 1.96~2.14  $\mu\text{m}$  红外窄波段观测了太阳系中惟一已知拥有大气的土卫六 Titan,看到其低层大气云和地表特征<sup>[2]</sup>,揭示了在其南半球存在着明亮的陆地,并在不断地扩

展<sup>[4]</sup>;对木卫一 Io 不同时期的红外观测表明, Io 的头侧有显著的热斑,而尾侧则有众多的火山,形成所谓的火环<sup>[5]</sup>。图 2 是由凯克激光引导星 AO 系统拍摄的蛋云翳(Egg Nebula)近红外波段的合成图片,这是一个原行星云翳,在生命的最后阶段云翳最外部有垂死恒星在脱落,当恒星表面越来越多的物质脱离,其表面变得更加炽热,产生紫外光电离气体,呈现出美丽的色彩,该区域几千年后可以形成行星;对 Seyfert 星系 NGC 1068 的多波段 AO 观测建立了一个具有衍射极限角精度的天体测量参考架;以角分辨率优于  $0.15''$  的多波段成像研究<sup>[6]</sup>,揭示了 Markarian 星系 273 的核由两个主要子源组成,一子源可能是一个被掩盖的星爆区。

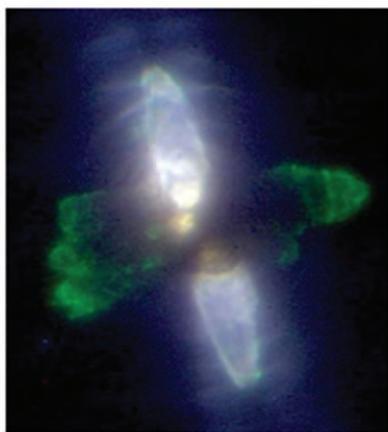


图 2 由凯克自适应系统拍摄的蛋云翳

Fig. 2 Egg Nebulas taken by Keck AO system

### 3 变形镜自适应光学技术面临的挑战

以上结果可以发现,用于天文大望远镜(2 m 口径以下的除外)的 AO 系统都是工作于红外波段,而不能实现在星体辐射强度较高的可见光波段的高分辨率观测成像。究其原因,可见光的波长比红外波长短,大气湍流强度正比于  $\lambda^{-6/5}$  ( $\lambda$  为波长),所以可见光波段的大气湍流频率高、大气相干长度  $r_0$  短,要求 AO 系统的变形镜驱动频率更快、驱动点密度更高,技术难度显著增大,即使是变形镜制造实力最强的 CILAS 公司至今也没有提供过可见波段的用于天文大望远镜的高驱

动密度快速变形镜。

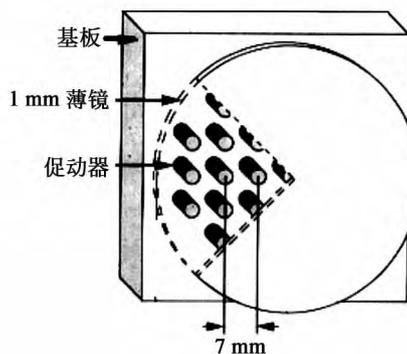


图 3 变形镜波前校正器的示意图

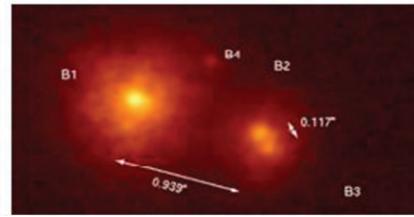
Fig. 3 Scheme of deformable mirror

变形镜波前校正器如图 3 所示,是由薄镜及其后面的很多驱动其变形的促动器构成,促动器的数目即所谓变形镜单元数,与望远镜口径  $D$  和大气相干长度  $r_0$  匹配的变形镜单元数  $= (D/r_0)^2$ 。就 8 m 口径望远镜而言,取可见光的  $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$ ,  $r_0 = 10 \text{ cm}$ ,则所需变形镜单元数为 6 400,驱动频率至少要 1 kHz 以上,促动器的密度不能做得太高(间隔一般 5~10 mm,甚至可以几十 mm)<sup>[7]</sup>,因为邻近促动器的相干性太强则无法保证补偿面形和足够的变形量,也容易谐振造成驱动频率受限,如果用增大变形镜口径来降低驱动密度,则不仅要付出天文数字的经济代价,机械制造的难度也达到极限。因此具备 8~10 m 望远镜红外 AO 系统制造实力的厂家国际上屈指可数(一是法国 CILAS 公司,二是美国 Xinetics 公司,三是意大利的 Microgate 和 ADS),配备在天文望远镜上的变形镜大多为数百单元、工作于  $2.2 \mu\text{m}$  波长为中心的红外波段(K 波段)。虽然 CILAS 公司 2007 年 11 月又为欧南台的 8.2 m VLT 望远镜递交了  $41 \times 41$  单元的变形镜波前校正器,并且正在设计 40 m 口径望远镜 E-ELT 的 8000 单元变形镜,不过其驱动密度还都是仅适用于短波红外波段(K 波段前后)。近年已提出同时在系统中利用 2 个变形镜分低阶和高阶分别对湍流波前进行校正,弥补千单元变形镜位相调制量不足的问题,如美国 5.1 m 海尔望远镜 PALM-3000 自适应项目,其中校正低阶畸变的变形镜驱动单元只有 241 个,驱动器间距 8 mm,校正深度可达  $4 \mu\text{m}$ ,而校正高阶畸变的变形镜驱动单元有 3 388 个(Xinetics 公司),能够应对 5 m

口径上的高阶畸变,由于高阶畸变的 PV 值比较小,3 388 个驱动器的变形镜位相调制量达到  $1 \mu\text{m}$  即可,驱动器间距  $1.8 \text{ mm}$ ,这使得该变形镜也具备高频响应能力,有希望在可见波段校正成像。PALM-3000 自适应系统在 2012 年 6~8 月期间获得了  $2.2 \mu\text{m}$  波长为中心的红外 K 波段斯特列尔比高达 0.8 的校正效果( $r_0 = 9 \text{ cm}@550 \text{ nm}$ )<sup>[8]</sup>,但是还不能应对太差的视宁度,该系统的应用还在研究中。

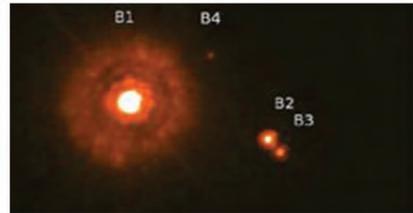
从光学仪器角度来说,波长越短,望远镜的衍射极限分辨率越高,而且高灵敏度的成像相机也是可见波段的最为成熟,量子转化效率可高达 90%,J 波段(以  $1.6 \mu\text{m}$  为中心)就要下降到 50% 以下,K 波段(以  $2.2 \mu\text{m}$  为中心)则低到不足 30%,因此可见波段的成像观测很可能会触发现代天文学的更多突破。这个预言已经开始被证实:美国 Star fire 光学靶场的  $1.5 \text{ m}$  口径 AO 望远镜,借助激光引导星节省了目标在波前探测器上的分光能量,1997 年就在可见光边缘 I 波段( $700\sim 900 \text{ nm}$ )清楚观测到海王星同温层云的旋转<sup>[9]</sup>;2013 年 8 月 20 日,APJ 期刊正式报道了以美国亚利桑那大学为主的研究团队研制成功全球首个  $0.6\sim 1.1 \mu\text{m}$  可见光波段成像的 585 单元变形镜 AO 系统(VisAO),采样频率  $1 \text{ kHz}$ ,已服役于坐落在智利阿塔卡马沙漠高处的  $6.5 \text{ m}$  口径麦哲伦 II 望远镜,依赖阿塔卡马地区  $0.5''$  的优良视宁度和部分幸运成像技术弥补了该变形镜单元数不足的缺陷,获得了最好为  $0.02''$  的分辨率,比配备了近红外 AO 系统的  $8\sim 10 \text{ m}$  口径地基望远镜的成像分辨率提高  $2\sim 3$  倍,比哈勃空间望远镜(无大气干扰)在相同波段的成像分辨率提高  $2.7$  倍,如图 4,其中 B2 和 B3 双星在哈勃空间望远镜中只能勉强被识别,而在具有 VisAO 系统的  $6.5 \text{ m}$  麦哲伦 II 望远镜中被完全分开。这样的高分辨率可以用于观测年轻星云团中极低质量的褐矮星族形成,观测其中丰富的双星出没,测量这些褐矮星的半径速度与轨道弧度变化以证明它们互相吸引,从而理解至今还未解开的星体形成机理。看得出来,伴随着首个(对应望远镜口径大于  $5 \text{ m}$ )可见光波段天文成像 AO 系统的问世,令世人瞩目的天文学成果将迅速呈现出来。

国内的 AO 技术从中科院成都光电所起家,



(a)哈勃空间望远镜拍摄

(a)Taken by Hubble space telescope



(b)VisAO 麦哲伦 II 拍摄

(b)Taken by VisAO on Magellan telescope II

图 4 B2 和 B3 双星成像

Fig. 4 Binary star of B2 and B3

近十年逐渐形成广泛的研究趋势。中科院成都光电所应用于  $1.8 \text{ m}$  望远镜(云南天文台)的 127 单元变形镜(促动器间隔  $10 \text{ mm}$ ,校正量  $\pm 3 \mu\text{m}$ ,响应  $> 2000 \text{ Hz}$ ,探测器采样频率  $1000 \text{ Hz}$ ),可以对应  $r_0 = 15 \text{ cm}$  的较弱湍流和前 35 项 Zernike 模式的波前<sup>[10-11]</sup>,根据 2010 年饶长辉在 SPIE 上的报道:J 波段(以  $1.6 \mu\text{m}$  为中心)校正后斯特列尔比从 0.08 提高到 0.33(半高宽 FWHM =  $0.21''$ ),而 I 波段( $700\sim 1000 \text{ nm}$ )校正后斯特列尔比从 0.02 只提高到 0.07(半高宽 FWHM =  $0.11''$ )<sup>[11]</sup>,说明该变形镜校正密度与 I 波段不相适应,因为斯特列尔比达到 0.1 以上才具备分辨图像的最低对比度。中科院长春光机所王建立的研究团队 2009 年突破了变形镜的制作技术,2010 年研制出 97 单元变形镜,2011 年又做出 137 单元变形镜,先后应用于  $1.23 \text{ m}$  望远镜,可以对应  $r_0 = 10 \text{ cm}$  的中等湍流强度;2012 年研制出 961 单元变形镜<sup>[12]</sup>。

总的来说,变形镜的制作是国际顶尖制造技术,目前已经发展到极限水平,而且耗资巨大。世界上只有少数几个像 CILAS 公司、Xinetics 公司才能承担天文望远镜上的自适应系统研制,而我国位于丽江最大的  $2.4 \text{ m}$  天文成像望远镜至今还未配备 AO 系统;使得国内的天文学研究几乎

都限于光谱手段,而不涉及成像手段。

#### 4 自适应光学新技术——液晶 AO 技术的迅速突起及展望

正是由于可见光波段的大口径 AO 成像需求,90 年代后期国际上出现了高驱动单元密度波前校正器的研究热潮。为突破制作难度,发明了 MEMS 变形镜,美国 Xinetics 公司目前已有  $48 \times 48$ 、 $64 \times 64$  单元的 MEMS 变形镜产品,但至今还未有 MEMS 变形镜服役于大口径望远镜的报道,估计稳定性方面还存在问题。液晶波前校正器作为一种高单元密度的新型波前校正器件,自 20 世纪 70 年代开始就进入人们的视线。90 年代国际上联合研制单台口径 8.4 m 的大双筒望远镜 (Large Binocular Telescope, LBT) 时,就曾探讨使用液晶波前校正器的可行性。随着 TFT 及 LCOS 液晶器件制作工艺的迅速发展,液晶波前校正器可以很容易实现数十万甚至上百万的高像素密度,且像素尺寸可以小到  $10 \sim 20 \mu\text{m}$ ,各象元独立驱动,通过相息图的衍射可以轻松实现  $10 \mu\text{m}$  的波前位相校正量,而其位相的绝对调制量只须等于  $1\lambda$  ( $\lambda$  为校正波段的中心波长)。以往的研究结果表明,液晶的像素数只要达到传统变形镜驱动器数目的 25 倍就可获得同样的校正精度、达到 64 倍就能兼顾衍射能量效率<sup>[13]</sup>,那么 64 万像素液晶波前校正器(相当 1 万单元变形镜)就可以满足 10 m 级望远镜的校正密度要求。因此,基于液晶波前校正器的 AO 光学(LCAO)系统是 21 世纪天文观测领域非常有希望普及的系统。

有关液晶波前校正器,虽然稳定性良好,但由于响应速度慢( $>10 \text{ ms}$ )、工作波段窄( $600 \sim 700 \text{ nm}$ )的双重问题,一直处于探索研究中,而且在世界上也就只限于很少几个研究小组在做。其原因是,液晶物理是上世纪 70 年代刚刚兴起的新学科,到现在为止国内外还没有一本正规的教科书,虽然 1973 年诺贝尔奖获得者 de Geness 和印度科学家 Chandrasekhar 分别出版了一本液晶物理学,我国的液晶前辈谢毓章老先生 1986 年出版了中文的《液晶物理学》,但从事液晶物理研究的人数一直不多,这使得后来从事液晶应用研究的大多数人,对液晶物理的认识停留在不够确切不够规范化的文献报道层面。90 年代 TFT 液晶显

示器面市,许多人投入液晶的应用开发研究,但真正关心液晶物理问题的人并不多。这种状况造成液晶只能用于显示器而很难用于其它领域的错觉,使得液晶波前校正器的响应速度与稳定性的矛盾长时间没有人去攻克。另外液晶波前校正器驱动密度相对变形镜增大数十倍使波前探测数据处理与传输时间也大幅延长,导致误差抑制  $-3 \text{ dB}$  带宽很难高于  $30 \text{ Hz}$ 。这意味着高于  $30 \text{ Hz}$  (格林伍德频率)的大气湍流都无法校正,而一般天文台站的大气湍流总要接近  $40 \text{ Hz}$  或高于  $40 \text{ Hz}$ ;还有受响应速度限制,液晶波前校正器位相调制量( $=1\lambda$ )一般小于  $1 \mu\text{m}$ ,限定校正波段只能在波长较短的 I 波段( $700 \sim 950 \text{ nm}$ ),在红外波段由于位相调制量需大幅增加致使液晶波前校正器响应速度大幅下降而不能满足要求。估计这些障碍也是 90 年代 8.4 m LBT 望远镜没有采用液晶波前校正器的原因。

液晶自适应光学(LCAO)技术里程碑式的进展要属 2002 年美国应用技术协会与空军实验室获得的结果<sup>[14]</sup>。他们采用双频液晶材料制备出了响应时间约  $0.8 \text{ ms}$  的快速液晶波前校正器,使 AO 光学系统误差抑制  $-3 \text{ dB}$  带宽达到  $40 \text{ Hz}$  (对应闭环校正频率  $\sim 280 \text{ Hz}$ ,即探测环节到校正完成的延时为  $3.57 \text{ ms}$ );该系统在毛伊岛观测站与一个等效通光口径  $1.12 \text{ m}$  的望远镜对接,在  $700 \sim 950 \text{ nm}$  可见光边缘 I 波段,大气相干长度约  $15 \text{ cm}$ 、湍流格林伍德频率约  $40 \text{ Hz}$  的良好大气条件下,对  $400 \text{ km}$  轨道上的国际空间站进行了 AO 成像观测,获得了如图 5 所示的国际空间站太阳能帆板清晰图像。该结果首次证明了 LCAO 的速度能够提高到应用于望远镜成像水平。但是,这个结果中也存在很多缺陷,如双频液晶需要高频、高压驱动( $30 \text{ V}/38 \text{ kHz}$ ),因此该液

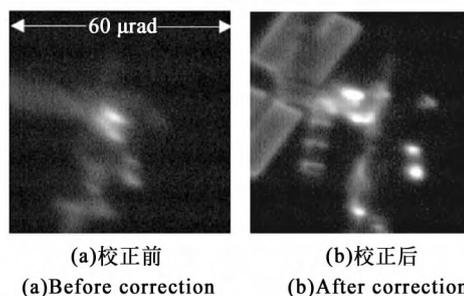


图 5 400 公里轨道上的国际空间站  
Fig. 5 International space station on 400 km orbit

晶校正器不能与成熟的大规模集成电路匹配,像元数只做出 127 个;由于像元数少,衍射效率低,干脆放弃相息图技术,而采用分立镜的较低级校正模式,位相条质量只有  $1.8 \mu\text{m}$ ;该系统还没有考虑能量利用率问题,从探测到校正成像两部分能量都来源于  $700\sim 950 \text{ nm}$  波段,分别为该波段的 P 偏振光和 S 偏振光,因此观测对象选择了很亮的零视星等的国际空间站。

尽管如此,基于美国的这一进步,国际上许多研究组开展了双频液晶波前校正器的研究。2003 年美国 BNS 公司报道了  $256 \times 256$  高密度像素 ( $>65\,000$ )、亚毫秒响应时间的双频液晶波前校正器<sup>[15]</sup>;2005 年美国应用技术协会的研究组改进了液晶校正器的电子学接口,驱动信号传输速度大幅提高,可使系统的误差抑制  $-3 \text{ dB}$  带宽提高到  $70 \text{ Hz}$ <sup>[16]</sup>,但未做成像实验。然而,双频液晶波前校正器的技术水平强烈依赖于高压高频集成电路技术的发展<sup>[17-18]</sup>,而这种技术即使在美国也不成熟。尽管美国 BNS 公司、Rockwell Scientific 公司、Meadowlark Optics 公司以及英国的 Durham 大学一直在坚持双频液晶波前校正器的研发,由于西方经济近 10 年整体疲软,这方面的研发经费投入不足,因此,没有再看到双频液晶的 AO 成像进展报道。不过美国 BNS 公司、德国 Holo Eye 公司、Meadowlark Optics 公司、日本滨松公司都在坚持液晶波前校正器的产品研发,其中性能指标与价格最高的液晶波前校正器是美国 BNS 公司研发的产品。美国 BNS 公司可出售的最快的液晶波前校正器,响应时间略小于  $5 \text{ ms}$ ,而相对望远镜上的天文观测应用需要亚毫秒才行。

本研究团队具有液晶物理与液晶材料研发的基础,因此 2002 年抓住能匹配  $8\sim 10 \text{ m}$  大口径的 LCAO 系统的热点研究契机,拟解决其速度慢和能量利用率低的问题。研究组认为,双频液晶虽然速度快,但对温度敏感,要求工作环境苛刻;更重要的是国内不具备双频高压的集成电路技术;因此应该绕开双频液晶波前校正器的技术壁垒,另辟蹊径,采用能与大规模集成电路匹配的向列相液晶材料(液晶显示器中所用的同类材料),研究出提高其响应速度以及 LCAO 系统能量利用率的途径。

2007 年本研究组提出开环控制的液晶自适

应光路<sup>[19]</sup>,能够解决 LCAO 偏振光能量损失的问题<sup>[20]</sup>,并为快速校正控制奠定了基础。2011 年底,完成了一项国家自然科学基金重点项目“可见-近红外宽波段快速液晶自适应光学系统”,研制出  $400\sim 950 \text{ nm}$  可见光全波段能量接收的 LCAO 系统,如图 6 所示,图中分色滤光片 1 和分色滤光片 2 均为  $700 \text{ nm}$  波长处分光的长波通分色片,LC1 和 LC2 分别为校正 S 偏振光和 P 偏振光的液晶波前校正器,PBS 为偏振分束棱镜。该系统不但没有偏振光损失,同时能够像变形镜 AO 系统那样将  $400\sim 700 \text{ nm}$  高能量的短波段分配给哈特曼探测器,使探测曝光时间可以短至  $1 \text{ ms}$ 、甚至亚毫秒,而  $700\sim 950 \text{ nm}$  能量较弱的长波段分配给液晶波前校正器,然后到达成像 CCD,恰到好处地发挥成像 CCD 能 30 倍于探测时间进行曝光的优势,同时长波处的大气湍流强度减弱( $r_0 \propto \lambda^{6/5}$ )使液晶波前校正器的压力降低。另外该系统中的液晶波前校正器使用的是自行合成出的快速向列相液晶材料<sup>[21]</sup>,并提出灰度级过量驱动方法,使液晶波前校正器在  $785 \text{ nm}$  位相调制量下的响应时间缩短到  $1.15 \text{ ms}$ ;发掘了 GPU 专门处理器的 CUDA 计算功能,提出 Zernike 基函数的四象限对称算法<sup>[22]</sup>,解决了数据传输速度与计算速度的矛盾,减少了  $3/4$  的计算延迟;LCAO 系统从波前探测到校正完成的时间延迟(系统延迟)从研究初始的  $30 \text{ ms}$  减少到  $4 \text{ ms}$ (美国的双频 LCAO 系统是  $3.57 \text{ ms}$ <sup>[14]</sup>)。在重点基金的研究过程中,课题组将研制的 LCAO 系统与兴隆观测站的  $2.16 \text{ m}$  望远镜连结,2008 年 3 月做了第一次恒星观测实验,当时的系统延迟  $20 \text{ ms}$ ,看不出任何校正效果;2010 年 4 月 22 日,系统延迟缩短到  $8 \text{ ms}$ ,采样频率  $500 \text{ Hz}$ ,再次在  $2.16 \text{ m}$  望远镜上对  $0.15$  视星等的  $\alpha \text{ Boo}$  星进行了观测,兴隆站平均  $r_0$  约  $7 \text{ cm}$ ,由于刚下过雨,当晚相对湿度一直处于  $60\%$  以上,平均风速  $1.5$

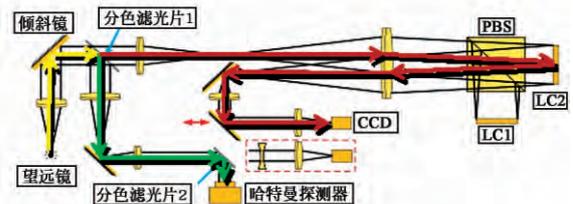
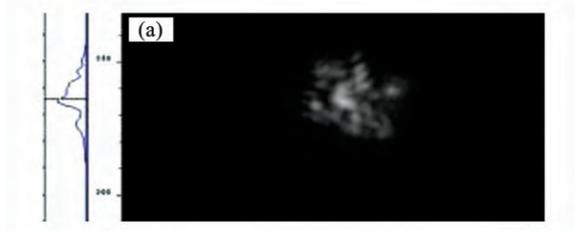


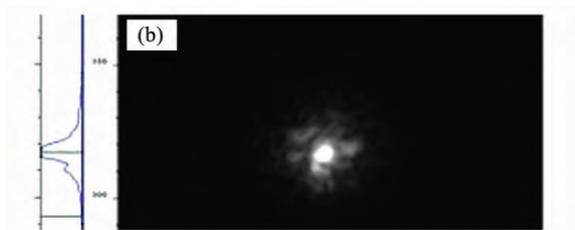
图 6  $400\sim 950 \text{ nm}$  可见光波段 LCAO 系统光路图

Fig. 6 LCAO system working in  $400\sim 950 \text{ nm}$  waveband

m/s,但 LCAO 校正仍取得了较明显效果,如图 7,(a)为校正前,(b)为校正后,验证了原理可行。



(a)校正前  
(a) Before correction



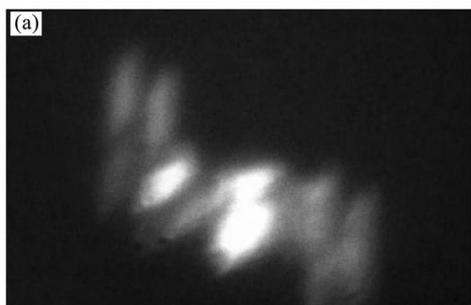
(b)校正后  
(b) After correction

图 7 2010/04/22, 2.16 m 望远镜上  $\alpha$ Boo 星的 LCAO 成像

Fig. 7 2010/04/22, the image of  $\alpha$ Boo star taken by LCAO on 2.16 m telescope

2010 年本所研制的 1.23 m 口径望远镜在本所园区(平均  $r_0$  约 6 cm)投入使用,2010 年 10 月 18 日液晶系统延迟缩短到 7 ms,与 1.23 m 口径望远镜连接,即时检测  $r_0$  约 8 cm,湍流格林伍德频率约 50 Hz,观测了国际空间站如图 8,成像效果改善,校正前后图像边界的锐利程度差别很大,说明分辨率的提高。

2011 年 3 月 2 日,LCAO 系统延迟缩短到 4.8 ms,再次在所园区与 1.23 m 口径望远镜连



(a)校正前  
(a) Before correction

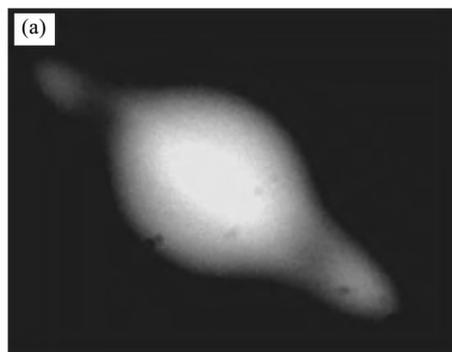


(b)校正后  
(b) After correction

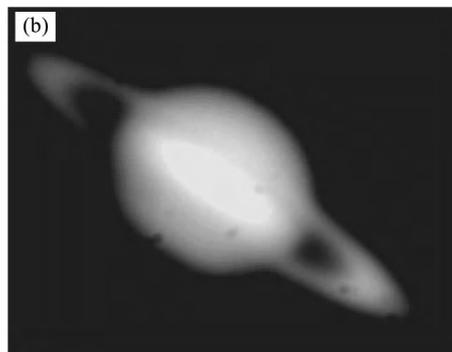
图 8 2010/10/18,1.23 m 望远镜上国际空间站的 LCAO 成像

Fig. 8 2010/10/18, the image of International Space Station taken by LCAO on 1.23m telescope

接,即时检测  $r_0$  约 6 cm,湍流格林伍德频率约 75 Hz,观测了土星如图 9 所示,校正后土星上环绕的光环带明显展现出来。



(a)校正前  
(a) Before correction

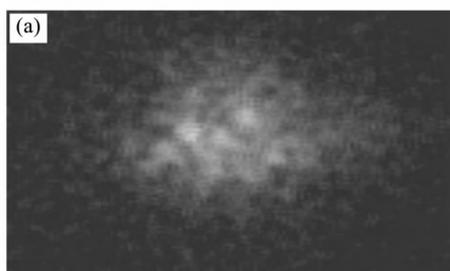


(b)校正后  
(b) After correction

图 9 2011/3/2 日 1.23 m 望远镜上土星的液晶 AO 成像

Fig. 9 2011/03/02, the image of Saturn taken by LCAO on 1.23 m telescope

2011年6月17日即时检测  $r_0$  约 6.5 cm, 湍流格林伍德频率约 45 Hz, 观测了东上将 ( $\alpha$ -Com) 双星如图 10 所示, 其亮度分别为 4.85 和 5.53 视星等, 检测 LCAO 成像分辨率达到 0.3'' (1.23 m 口径望远镜的衍射极限分辨率为 0.17''), 斯特列尔比达到 0.17。虽然跟理想结果还略有差距, 但目标已经非常清楚了: 只要 LCAO 系统延迟缩短到 3 ms, 就可以将成像分辨率提高到 1.23 m 口径望远镜的衍射极限。



(a) 校正前

(a) Before correction



(b) 校正后

(b) After correction

图 10 2011/06/17, 1.23 m 望远镜上  $\alpha$ -Com 双星的 LCAO 成像

Fig. 10 2011/06/17, the image of  $\alpha$ -Com binary star taken by LCAO on 1.23 m telescope

近两年, 课题组在校正速度方面又取得进步: 实验室制备的液晶校正器在 700~950 nm 的 I 波段响应时间可短于 0.6 ms, 已与美国制备的双频

液晶校正器的响应时间持平; 相对 2 m 口径望远镜, 采样频率 1 kHz 的条件下, 系统延迟时间只有 2 ms (-3dB 误差抑制带宽约 70 Hz), 可以说已达到工程应用水平<sup>[23-26]</sup>。

尽管液晶 AO 光学研究已取得突破性进展, 但是在与 4 m 及其更大口径望远镜匹配中还需解决以下问题: (1) 大口径下红外波段的接收能量也大幅增强, 利用这部分能量不仅有利于空间目标识别、更是天文观测的亟需; 而液晶 AO 系统的成像基本被限定在 700~950 nm 的 I 波段, 因为红外波长长, 校正器的位相调制量要等于波长, 而位相调制量每增加 30% 都会使液晶校正器的响应时间明显延长, 如果波段扩展到 K 波段 (以 2.2  $\mu$ m 为中心), 液晶校正器的位相调制量要增到 3 倍, 其响应时间无论如何都很难满足要求; (2) 随着望远镜口径增大, 不仅校正器的像素数需要按口径增大的平方比增加, 而且波前重构的 Zernike 模式数也需数倍增加, 造成信号传输和计算延迟, 校正频率降低。

因此, 针对制约液晶 AO 技术的这两个瓶颈问题还需开展更深层次的研究: 探讨系统中加入低单元密度 ( $\sim 200$ ) 的变形镜, 实现 I、(J+K) 双波段的快速校正成像; 同时进一步提高液晶材料的响应速度、数据处理速度, 改进自动控制方法。

## 5 结 论

液晶 AO 技术在大口径天文学望远镜上极具应用潜力, 有希望发展到装备 8~10 m 级望远镜的水平, 为开展突破性天文研究提供技术平台。另外, 液晶 AO 系统的研究涉及大规模集成电路技术、精密仪器光学、功能液晶材料的研发以及计算机数据处理等多个学科内容的交叉集成, 将会带动这些学科的发展, 其科学意义也是重大的。

## 参 考 文 献:

- [1] Pierre Lena. Adaptive optics: a breakthrough in astronomy [J]. *Exp. Astron.*, 2009, 26, :35-48.
- [2] Saint-Pe O, Combes M, Rigaut F, *et al.* Demonstration of AO for resolved imagery of solar system objects: preliminary results on pallas and titan [J]. *ICARUS*, 1993, 105:263-270.
- [3] Saint-Pe O, Combes M, Rigaut F. Ceres surface properties by high resolution imaging from earth [J]. *ICARUS*, 1993, 105:271-281.

- [4] Combes M, Vapillon L, Gendron E, *et al.* Spatially resolved images of titan by means of AO [J]. *ICARUS*, 1997, 129:482-497.
- [5] Christou J C, Ageorges N, Bonaccini D, *et al.* Deconvolution of ADONIS AO images [C]. *Proc. SPIE*, 1998, 3353:984-993.
- [6] Knapen J H, Laine S, Yates J A, *et al.* Resolved structure in the nuclear region of the ultraluminous infrared galaxy Mrk 273 [J]. *ApJ.*, 1997, 490 :L29.
- [7] Jean-Christophe S, Jean-Marie L, Claude G. Deformable mirror technologies for astronomy at CILAS [C]. *Proc. of SPIE*, 2008, 7015:7015O-1-7015O-12.
- [8] Jennifer E R, Richard G D, Rick S B, *et al.* Results from the PALM-3000 high-order adaptive optics system [C]. *Proc. of SPIE*, 2012, 8447:8447O-1-8447O-8.
- [9] Glenar D A, Hillman JJ, Lelouan M *et al.* Multispectral Imagery of Jupiter and Saturn Using AO and Acousto-Optics Tuning [J]. *PASP*, 1997, 109:326-337.
- [10] Rao C H, Jiang W H, Zhang Y D, *et al.* Progress on the 127-element adaptive optical system for 1.8 m telescope [C]. *Proc. of SPIE*, 2008, 7015:7015Y-1-7015Y-9.
- [11] Rao C H, Wei K, Zhang X J, *et al.* First observations on the 127-element adaptive optical system for 1.8 m telescope [C]. *Proc. of SPIE*, 2010, 7654:7654H-1-7654H-8.
- [12] 林旭东, 刘欣悦, 王建立, 等. 961 单元变形镜研制及性能测试 [J]. *光学学报*, 2013, 33(6):0601001.  
Lin X D, Liu X Y, Wang J L, *et al.* Development and performance test of the 961-element deformable mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6):0601001. (in Chinese)
- [13] Cao Z L, Mu Q Q, Xuan L, *et al.* A simple method for evaluating the wavefront compensation error of diffractive liquid-crystal wavefront correctors [J]. *Opt. Express*, 2009, 17(11):9330-9336.
- [14] David D, John G, Sergio R, *et al.* Demonstration of new technology MEMS and liquid crystal adaptive optics on bright astronomical objects and satellites [J]. *Optics Express*, 2002, 10(25):1508-1519.
- [15] Steve S, Xia X W, Owais M, *et al.* High-resolution phase-only spatial light modulators with submillisecond response [C]. *Proceedings of SPIE*, 5106, 2003:138-145.
- [16] Gu D F, Winker B, Wen B, *et al.* Wavefront control with a spatial light modulator containing dual-frequency liquid crystal [C]. *Proceedings of SPIE*, 5553, 2004:68-82.
- [17] David D, Steve B, John G. Increasing the bandwidth of a liquid crystal phased array adaptive optics system [C]. *Proc. SPIE*, 5894, 2005:5894M-1-5894M-6.
- [18] Gu D F, Winker B, Wen B, *et al.* Calibration of a spatial light modulator containing dual frequency liquid crystal [C]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5894:5894J-1-5894J-10.
- [19] Mu Q Q, Cao Z L, Xuan L, *et al.* Open loop adaptive optics testbed on 2.16 meter telescope with liquid crystal corrector [J]. *Optics Communications*, 2012, 285:896-899.
- [20] 宣丽, 曹召良, 胡立发, 等. 无偏振光能量损失的液晶自适应光学系统: 中国, ZL 200610173382.3[P]. 2009.
- [21] Peng Z H, Liu Y G, Xuan L, *et al.* Improvement of the switching frequency of a liquid-crystal spatial light modulator with optimal cell gap [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(18):3608-3610.
- [22] 宣丽, 李大禹, 曹召良, 等. 适用于液晶自适应光学系统的快速波前重构方法: 中国, ZL201110079066.0[P]. 2012.
- [23] Xuan L, Cao Z L, Mu Q Q, *et al.* Chapter 4(Liquid crystal wavefront correctors), *Adaptive Optics Progress* [M]. InTech Press, 2012:67-97.
- [24] Xuan L. Liquid crystal adaptive optics system, symposium liquid crystal photonics [C]. *Proceedings of SLCP*, 2012, 2012: 18-18.
- [25] Mu Q Q, Cao Z L, Xuan L, *et al.* Novel spectral range expansion method for liquid crystal adaptive optics [J]. *Optics Express*, 2010, 18(21):21687-21696.
- [26] Hu L F, Xuan L, Liu Y J, *et al.* Phase-only liquid crystal spatial light modulator for wavefront correction with high precision [J]. *Optics Express*, 2004, 12(26):6403-6409.

作者简介:宣丽(1957—),女,江苏常州人,博士,研究员,主要从事液晶自适应光学系统与液晶光学器件的研究。E-mail: xuanli@ciomp.ac.cn

李大禹(1979—),男,吉林长春人,博士,副研究员,主要从事液晶自适应光学波前处理的研究。E-mail: li-dayu@ciomp.ac.cn

刘永刚(1973—),男,吉林集安人,硕士,副研究员,主要从事液晶光学器件的研究。E-mail: liuyg@ciomp.ac.cn