



DOI: 10.12086/oe.2018.170733

## 太阳自适应光学技术进展

饶长辉<sup>1,2</sup>, 朱磊<sup>1,2\*</sup>, 张兰强<sup>1,2</sup>, 饶学军<sup>1,2</sup>, 鲍华<sup>1,2,3</sup>, 孔林<sup>1,2</sup>,  
郭友明<sup>1,2</sup>, 钟立波<sup>1,2</sup>, 马学安<sup>1,2</sup>, 李梅<sup>1,2</sup>, 王成<sup>1,2</sup>, 张小军<sup>1,2</sup>,  
樊新龙<sup>1,2</sup>, 王晓云<sup>1,2</sup>, 凡木文<sup>1,2</sup>, 陈东红<sup>1,2</sup>, 冯忠毅<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;

<sup>2</sup>中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 对太阳大气进行大视场高分辨力光学成像观测是开展太阳物理、空间天气等基础与应用研究的重要前提。对于地基太阳望远镜而言, 为了消除地球大气湍流对光学系统的影响, 自适应光学是高分辨力成像观测必备的技术手段, 与此同时, 为了突破大气非等晕性对传统自适应光学校正视场的限制, 近年来多层共轭自适应光学技术等大视场自适应光学得到极大发展。本文首先梳理国外太阳自适应光学系统研制情况, 重点介绍国内太阳自适应光学技术发展及应用情况, 并进一步介绍了后续大视场太阳自适应光学技术发展情况以及目前所取得的成果。

**关键词:** 太阳观测; 自适应光学; 多层共轭自适应光学

**中图分类号:** P182

**文献标志码:** A

**引用格式:** 饶长辉, 朱磊, 张兰强, 等. 太阳自适应光学技术进展[J]. 光电工程, 2018, 45(3): 170733

## Development of solar adaptive optics

Rao Changhui<sup>1,2</sup>, Zhu Lei<sup>1,2\*</sup>, Zhang Lanqiang<sup>1,2</sup>, Rao Xuejun<sup>1,2</sup>, Bao Hua<sup>1,2,3</sup>, Kong Lin<sup>1,2</sup>,  
Guo Youming<sup>1,2</sup>, Zhong Libo<sup>1,2</sup>, Ma Xuean<sup>1,2</sup>, Li Mei<sup>1,2</sup>, Wang Cheng<sup>1,2</sup>, Zhang Xiaojun<sup>1,2</sup>,  
Fan Xinlong<sup>1,2</sup>, Wang Xiaoyun<sup>1,2</sup>, Fan Muwen<sup>1,2</sup>, Chen Donghong<sup>1,2</sup>, Feng Zhongyi<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Science, Chengdu, Sichuan 610209, China;

<sup>2</sup>Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Science, Chengdu, Sichuan 610209, China;

<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Solar images with high spatial resolution, high temporal resolution across a large field of view (FoV) are aspired for solar physics and space weather. Ground-based high spatial resolution imaging of the Sun is severely limited by wavefront disturbances induced by the Earth's atmosphere turbulence. Therefore, solar adaptive optics aims at these requirements and it has revitalized ground-based solar astronomy at existing telescopes. Meanwhile, multi-conjugate adaptive optics has been proved to overcome the anisoplanatism and obtain the high resolution images with a large field of view in solar observation by compensating for the turbulence with several deformable mirrors conjugated to different heights. In this review, we give some summarization of the development of solar

收稿日期: 2017-12-28; 收到修改稿日期: 2018-02-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11178004, 11727805)

作者简介: 饶长辉(1971-), 男, 博士, 研究员, 主要从事大口径高分辨力光学成像望远镜技术研究和系统研制工作。

E-mail: chrao@ioe.ac.cn

通信作者: 朱磊(1980-), 男, 博士, 研究员, 主要从事太阳自适应光学技术研究和系统研制工作。E-mail: zhulei\_cas@aliyun.com

adaptive abroad, and emphatically introduce several adaptive optics systems in China and the progress of large FoV adaptive optics.

**Keywords:** solar observation; adaptive optics; multi-conjugate adaptive optics

**Citation:** Rao C H, Zhu L, Zhang L Q, *et al.* Development of solar adaptive optics[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(3): 170733

## 1 引言

太阳活动是空间天气的源头，太阳耀斑和日冕物质抛射等活动体在日冕表现为大尺度的爆发现象，但其能量积累、加速和触发的根源却在更低层的色球和光球。太阳活动区的演变受太阳大气内等离子体和磁场的相互作用影响，监测其发生、发展和消亡的过程需要分辨等离子体和磁场的基本结构。等离子体的结构和演化特征由压力标高和光子平均自由程所控制，这两个尺度的大小都在 70 km(在日心处的角尺度为 0.1")左右；磁场的基本单元磁流管的空间尺度更小，故需要优于 0.1"的高空间分辨力观测。同时，由于典型的太阳活动区的跨度达  $1' \sim 2''$ <sup>[1]</sup>，研究其演变过程还需要大视场的高分辨力监测，以获得太阳活动区高度动态化的精细结构，发现太阳耀斑和日冕物质抛射等太阳爆发活动的动力学起源。

受到技术发展水平的限制，国际上空间太阳观测设备的口径有限，因此地基大口径太阳望远镜仍然是目前研究太阳及其活动区超精细结构的最佳选择，日益成熟的自适应光学(adaptive optics, AO)<sup>[2]</sup>系统则保

障了地基望远镜能够进行接近衍射极限的高分辨力观测。为了突破大气非等晕性对传统自适应光学(classical adaptive optics, CAO)校正视场的限制，近年来基于分层探测和校正的大视场自适应光学技术得到极大发展并在太阳高分辨力观测中成功运用，如多层共轭自适应光学<sup>[3]</sup>(multi-conjugate adaptive optics, MCAO)、地表层自适应光学<sup>[4]</sup>(ground layer adaptive optics, GLAO)等。

图 1 所示为三种自适应光学技术的原理示意图。图 1(a)为传统自适应光学，其针对某一方向的探测信标(图示为中心视场方向)，探测该方向上累积的大气湍流波前像差，并在瞳面位置设置变形镜共轭校正相应波前像差。由于大气湍流的非等晕性，CAO 的校正视场有限，图 1(a)中仅在中心视场 A 具有较好的校正结果，周边视场 B, C 等成像质量迅速下降。GLAO 是实现 MCAO 的第一步，可以看做 MCAO 技术的衍生品，如图 1(b)所示。图 1(c)为 MCAO 技术，该技术通过对大气湍流进行三维波前探测，获得不同高度大气湍流层引起的波前像差，设置多波前校正器分别共轭于不同高度的大气湍流层高，对大气湍流引起的波

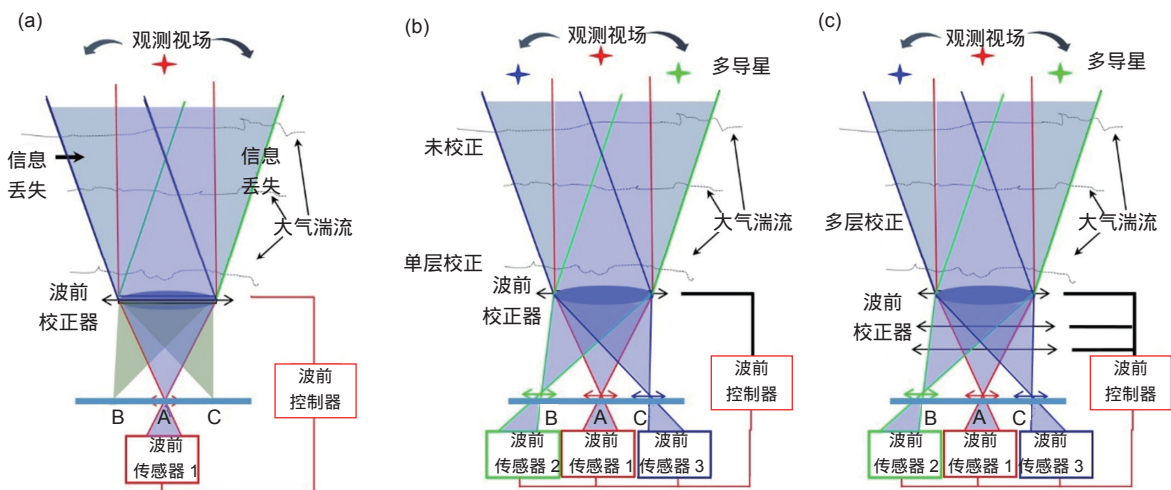


图 1 (a) 传统自适应光学, (b) 地表层自适应光学以及(c) 多层共轭自适应光学基本概念和校正效果

Fig. 1 Principle diagram and the correction results of (a) classical adaptive optics, (b) ground layer adaptive optics and (c) multi-conjugate adaptive optics

前畸变进行分层校正,从而实现大视场接近衍射极限的高分辨力成像。由于大气湍流主要分布于地表层, GLAO 在对大气湍流进行分层探测以后,只设置一块波前校正器,对地表层大气湍流进行补偿校正。这种技术可以获得更大的成像校正视场,但是由于其没有补偿高层大气湍流的影响,因此校正效果相对较差。

相比于夜天文自适应光学技术,太阳自适应光学技术面临两个方面的新挑战:首先是受限于白天更差的大气视宁度条件,太阳自适应光学系统需要更高的空间和时间带宽,这对波前探测和校正器件提出了更高的要求,同时也要求计算能力更强的波前实时处理机;另一方面,太阳自适应光学系统需要以太阳表面低对比度扩展目标(太阳黑子、米粒等)为信标进行波前探测,基于相关算法的扩展目标波前探测不仅加大了系统波前探测的难度,也进一步加重了波前实时处理机的计算负担。

目前,是否配备自适应光学系统已逐渐成为衡量一台大口径(>1 m)太阳望远镜的性能和竞争力的重要指标。国外几乎所有 1 m 级及以上口径太阳望远镜都配备了太阳自适应光学系统。与此同时,美国国立太阳天文台、大熊湖太阳天文台和德国太阳物理研究所,均在开展太阳 MCAO 技术研究和系统研制工作。

国内太阳自适应光学技术起步较晚,1998 年开始,中国科学院光电所率先开展倾斜校正太阳 AO 系统补偿性能研究及系统研制,随后基于云南天文台 26 cm 口径精细结构太阳望远镜和 1 m 新真空太阳望远镜(new vacuum solar telescope, NVST),研制多套太阳

AO 系统。从 2009 年开始 MCAO 技术理论研究,并在后续自然科学基金项目的支持下,开展关键技术攻关和系统研制工作。此外,国内如北京理工大学、中国科学院国家天文台等均有开展太阳 AO 和 MCAO 等技术理论与实验研究。

本文首先梳理国外太阳自适应光学系统研制情况,重点介绍国内太阳自适应光学技术发展及应用情况,并进一步介绍了后续大视场太阳自适应光学技术发展情况以及目前所取得的成果。

## 2 国外太阳自适应光学进展

表 1 给出了国外曾经使用过以及正在使用的太阳 AO 系统。早期太阳自适应光学技术实验均在美国国家太阳天文台的 DST 上开展,包括 Hardy 于 1979~1980 年间最早开展的太阳自适应光学实验<sup>[5]</sup>,第一个基于相关夏克-哈特曼波前传感器(Shack-Hartman wavefront sensor, SH-WFS)的太阳自适应光学系统<sup>[6]</sup>等。相关 SH-WFS 的成功运用,使得太阳自适应光学真正走向实用化道路,并且发展成为大口径地基太阳望远镜的标准装备。下面针对两个 2 m 级太阳望远镜 GREGOR 和 GST 的太阳 AO 发展及应用情况进行简单的介绍。

### 2.1 德国 GREGOR 太阳 AO 系统

GREGOR 是德国最新也是目前世界上口径最大的同轴开放式太阳望远镜,主镜有效通光口径 1.5 m,该望远镜在 2011 年成功进行首次观测<sup>[7]</sup>,由于自适应

表 1 国外曾经使用过以及正在使用的太阳 AO 系统

Table 1 Developed/developing solar AO systems

望远镜/自适应光学	子孔径数	驱动器数	采样频率/kHz	硬件架构	首次观测/年
76 cm DST/Lockheed	19	57	2	Analog circuits	1986
76 cm DST/LOAO	24	97	<1.6	24 DSPs	1998
48 cm SVST	19	19	0.955	566 MHz alpha	1999
76 cm DST/HOAO	76	97	2.5	40 DSPs	2002
70 cm VTT/KAOS	36	35	0.955	8×900 MHz Sun	2002
1.5 m McMath-Pierce	120~200	37	0.955	1 GHz Pentium III	2002
97 cm SST	37	37	0.955	1.4 GHz Athlon	2003
65 cm BBSO/HOAO	76	97	2.5	40 DSPs	2004
1.6 m NST/HOAO	76	97	2.5	40 DSPs	2010
1.6 m NST/HOAO	308	349	2	DSP clusters	2013
1.5 m GREGOR/HOAO	156	256	2	Multiple-CPU SMP	2012
4 m ATST/HOAO	1232	1313	-	DSP clusters	-



光学是大口径望远镜必备的组成部分, GREGOR 设计时, 就将其高阶太阳 AO 系统和 MCAO 系统进行了一体化设计。GREGOR 在设计初期(2002 年左右)准备安装 80 单元(相关 SH-WFS 有 78 个子孔径)的低阶自适应光学系统(LOAO), 该系统只能在大气视宁度优于 0.55" 时获得衍射极限的分辨力。校正前约 60 项 Zernike 模式像差, 系统闭环带宽约 120 Hz。GREGOR 在 2012 年将该系统升级为 256 单元(相关 SH-WFS 有 156 个子孔径)的高阶自适应光学系统(GAOS256), 升级后系统可以在视宁度优于 1.5" 时获得衍射极限分辨力, 最高可以校正前 170 项 Zernike 像差。GREGOR 开展一系列太阳 MCAO 技术研究和试验系统研制, 最新的试验系统对大气湍流分三层校正, 2013 年 11 月, 成功获得对太阳观测的闭环实验结果<sup>[8]</sup>。

## 2.2 美国 GST 太阳 AO 系统

美国大熊湖太阳天文台(Big bear solar observation, BBSO) 1.6 m 口径太阳望远镜 GST 是目前投入运行的口径最大的地基太阳望远镜。GST 上先后安装或准备安装三套 AO 系统, 分别是 AO76, AO308 以及 MCAO 试验系统“Clear”。GST 建成初期, 将原 65 cm 口径

太阳望远镜上的 AO 系统 AO76 安装使用, 但是由于校正能力有限, AO76 只能在近红外波段实现衍射极限观测, 不能充分发挥 GST 大口径高分辨力观测的性能。随后 BBSO 与美国国立太阳天文台(national solar observatory, NSO)合作开展更高阶太阳 AO 技术研究与系统研制, 目前已成功研制具有 357 单元校正驱动器的高阶太阳 AO 系统 AO308, 并于 2013 年 5 月正式安装运行<sup>[9]</sup>。

BBSO 与 NSO 以及德国 KIS 合作开展太阳 MCAO 技术研究和系统实验<sup>[10]</sup>, 2017 年初, 其 MCAO 试验系统“Clear”成功试运行并获得太阳黑子和米粒的大视场高分辨力观测结果<sup>[11]</sup>, 如图 2 所示, 图中展示了系统分别工作在 MCAO、GLAO 以及 CAO 模式下对太阳米粒组织和太阳黑子的闭环结果。

## 3 中国科学院光电技术研究所太阳自适应光学技术进展

国内自适应光学技术发展较早, 中国科学院光电技术研究所于 1980 年率先成立国内第一个自适应光学研究室, 随后研制多套自适应光学系统, 成功运用

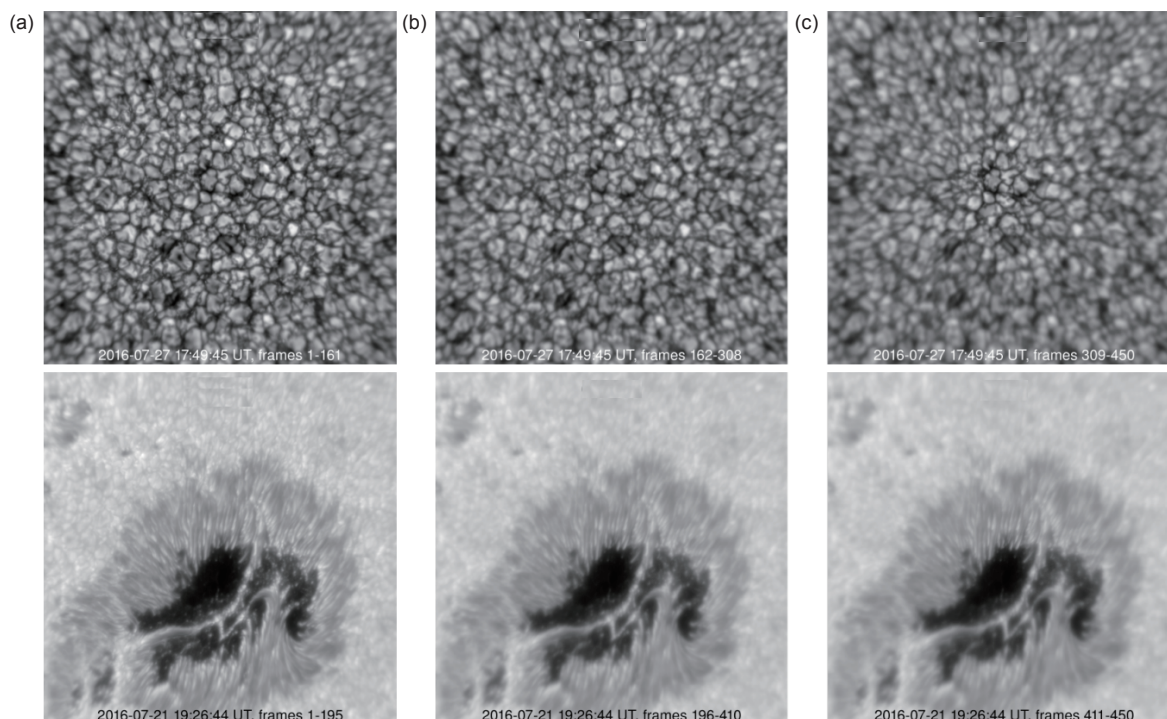


图 2 基于美国 GST 上太阳 MCAO 系统“Clear”获取的(a) MCAO, (b) GLAO 及(c) CAO 系统闭环的太阳图像<sup>[10]</sup>

Fig. 2 The Sun observed in a field of view of 53" × 53" with (a) MCAO, (b) GLAO, and (c) CAO correction with Clear on the NST<sup>[10]</sup>

于天文观测、高能激光传输、激光光束净化、人眼视网膜成像。其中，用于太阳大气高分辨力成像观测的太阳自适应光学系统起步较晚，1998年开始从事低阶倾斜校正自适应光学系统研制。后续通过一系列技术突破和经验积累，先后为云南天文台 26 cm 口径太阳精细结构望远镜和 1 m NVST 研制配备了多套自适应光学系统。于此同时，在下一代大视场自适应光学技术方面，基于太阳这一理想的观测试验平台，先后开展了一系列关键技术研究 and 试验系统研制，2016 年成功研制地表层校正自适应光学试验系统<sup>[12]</sup>，2017 年初完成多层共轭自适应光学试验系统研制等。图 3 给出了中国科学院光电所太阳自适应光学发展历程。

### 3.1 南京大学 43 cm 口径太阳塔的太阳精跟踪系统

针对白天太阳 AO 系统的技术难题，1998 年开始，中国科学院光电技术研究所与南京大学天文系合作，在国家自然科学基金重点项目“自适应光学在高分辨力太阳观测中的应用”的支持下，通过研究太阳表面米粒结构的观测对比度的影响因素<sup>[13]</sup>、互相关因子与绝对差分两种相关算法的有效性<sup>[14]</sup>、太阳目标扩展度对 AO 校正的影响<sup>[15]</sup>以及绝对差分相关算法的硬件实现等，突破了基于太阳低对比度扩展目标的相关跟踪技术，为南京大学 43 cm 太阳望远镜研制了国内首套太阳观测倾斜校正自适应光学系统，进行了低阶校正自适应光学补偿性能研究，实现了改善太阳像跟踪精

度和减小图像抖动的目标<sup>[16]</sup>。

### 3.2 云南天文台 26 cm 口径精细结构望远镜的太阳自适应光学试验系统

在中国科学院云南天文台的大力协助和支持下，中国科学院光电技术研究所基于云南天文台 26 cm 精细结构望远镜，开展高阶校正太阳自适应光学技术研究。突破了太阳低对比度扩展目标波前探测、高速相关波前实时处理、太阳 AO 系统优化控制等一系列关键技术，建立了国内首套用于太阳高分辨力成像观测的 37 单元太阳 AO 试验系统。该系统于 2009 在云南天文台 26 cm 精细结构望远镜上实现对太阳目标的 AO 校正，成功获得太阳等低对比扩展目标的高分辨观测结果<sup>[17]</sup>，AO 校正前后太阳表面图像观测结果见图 4。

### 3.3 云南天文台 1 m 新真空太阳望远镜的太阳自适应光学系统

在国家高技术计划和国家自然科学基金天文联合基金支持下，中科院光电所在前述关键技术突破基础上，先后研制了两套太阳自适应光学系统。两套系统主要技术参数如表 2 所示。

#### 3.3.1 37 单元低阶太阳自适应光学系统

2010~2013 年，基于原 37 单元太阳自适应光学试验系统变形镜等关键器件，开展大口径太阳望远镜自

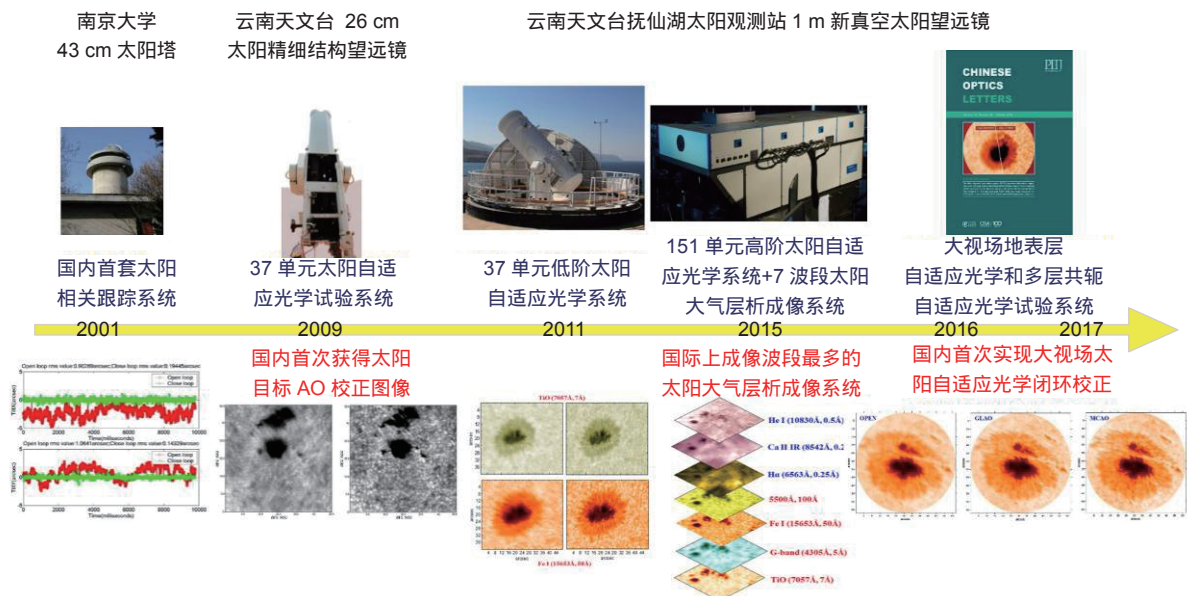


图 3 中国科学院光电技术研究所太阳自适应光学发展历程  
Fig. 3 The development of solar adaptive optics in Institute of Optics and Electronics, CAS

适应光学关键技术攻关,研制 37 单元低阶太阳自适应光学系统<sup>[18]</sup>,系统由精跟踪和高阶校正两个回路组成,如图 5 所示。精跟踪回路基于 37 单元 AO 试验系统进行升级,更新了倾斜镜和实时控制器算法,新倾斜镜谐振频率可达 1100 Hz,闭环后跟踪精度约为

0.04"(RMS),误差抑制带宽约为 110 Hz。同时进一步优化波前传感器性能,SH-WFS 的微透镜阵列排布由原来的方形排布改为正六边形排布。实验结果表明,受到波前校正器单元数的限制,37 单元低阶太阳自适应光学系统在很好的视宁度条件下工作并针对近红外

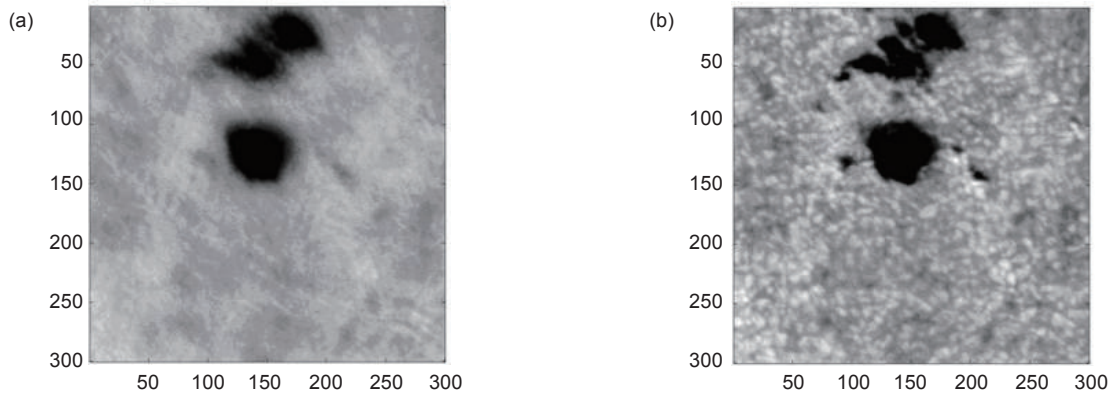


图 4 26 cm 太阳望远镜 AO(a)校正前和(b)校正后太阳表面图像观测结果<sup>[17]</sup>  
 Fig. 4 Solar sunspot images (a) without and (b) with the AO experiment system<sup>[17]</sup>

表 2 NVST 上两套自适应光学系统主要技术参数

Table 2 The main parameters of the two generation solar adaptive optic systems

系统参数	一代 37 单元低阶 AO 系统	二代 151 单元高阶 AO 系统
校正阶数	20	65
波前探测子孔径数	30	102
探测器视场	12"×10"	24"×20"
探测像素分辨率/"	0.5	1
探测相机	MC1362	Phantom V311
探测帧频/Hz	2100	3500
校正器单元数	37	151
波前探测算法	Absolute difference	Absolute difference square
处理机架构	Xilinx FPGA V6 + TI DSP C6747	Xilinx FPGA K7 + TI DSP C6678

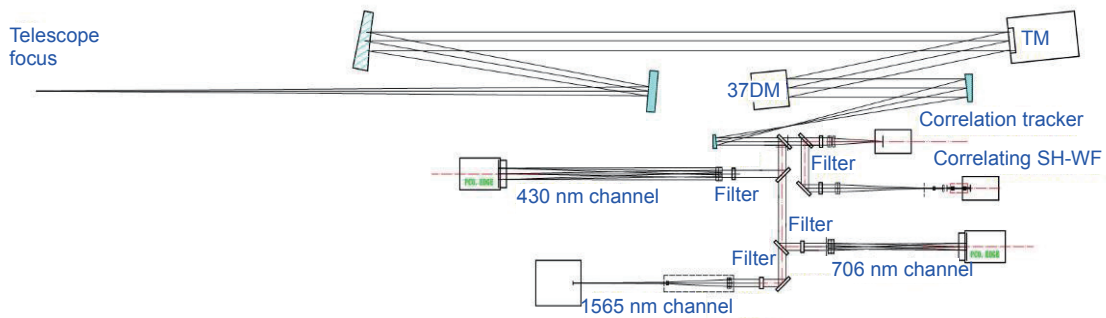


图 5 1 m NVST 37 单元低阶 AO 系统光路图  
 Fig. 5 Optical layout of the 37-element solar AO system for 1 m NVST



波段获得接近衍射极限的校正效果。

### 3.3.2 151 单元高阶太阳自适应光学系统

在前述关键技术突破基础上,中国科学院光电技术研究所太阳高分辨力光学成像研究小组针对白天太阳 AO 系统空间和时间带宽要求高、高帧频相关波前探测、高速波前实时处理和控制在技术难题,开展高阶太阳 AO 技术研究,研制成功帧频可达 3500 Hz 的 151 单元自适应光学系统<sup>[19]</sup>。为了便于对接 NVST 原有后端仪器,151 单元太阳 AO 系统采用双层结构。系统同样包含精跟踪校正子系统和高阶校正子系统两个方面,其中精跟踪子系统沿用原有 37 单元低阶太阳 AO 系统设计方案,高阶校正子系统中,相关 SH-WFS 透镜阵列由  $13 \times 13$  个子透镜组成,有效子孔径数 102,六边形排布,采用 Phantom V311 相机,探测帧频可达 3500 Hz;变形镜共有 151 单元驱动器,驱动器行程  $\pm 2.5$

$\mu\text{m}$ ,为了便于系统集成,变形镜采用微小型压电驱动器技术,驱动器极间距 6 mm。

2015 年 7 月,151 单元太阳自适应光学系统与 NVST 对接完成并投入试观测。图 6 所示为对接后系统实物照片。图 7 为 AO 系统对太阳黑子和米粒结构的观测结果。图中可以看出 AO 系统闭环后出现的等晕区,且等晕区内图像分辨率有明显提高。分析结果表明,在 TiO 波段,其闭环校正后的图像分辨率可以达到 1.1 倍至 1.5 倍衍射极限<sup>[20]</sup>。

由于太阳光的不同波长来自于太阳大气的不同高度,多波段层析成像,相当于给太阳做 CT。通过同时记录不同波段的图像,可以清楚的了解不同高度的太阳大气层中太阳活动的演化情况,也就可能在日冕物质喷射和质子事件等危害性太阳活动发生之前做出预警,同时观测数据可对建立太阳大气模型提供数据支



图 6 151 单元高阶 AO 系统与 1 m 新真空望远镜对接实物图  
Fig. 6 The photo of 151-element solar AO system

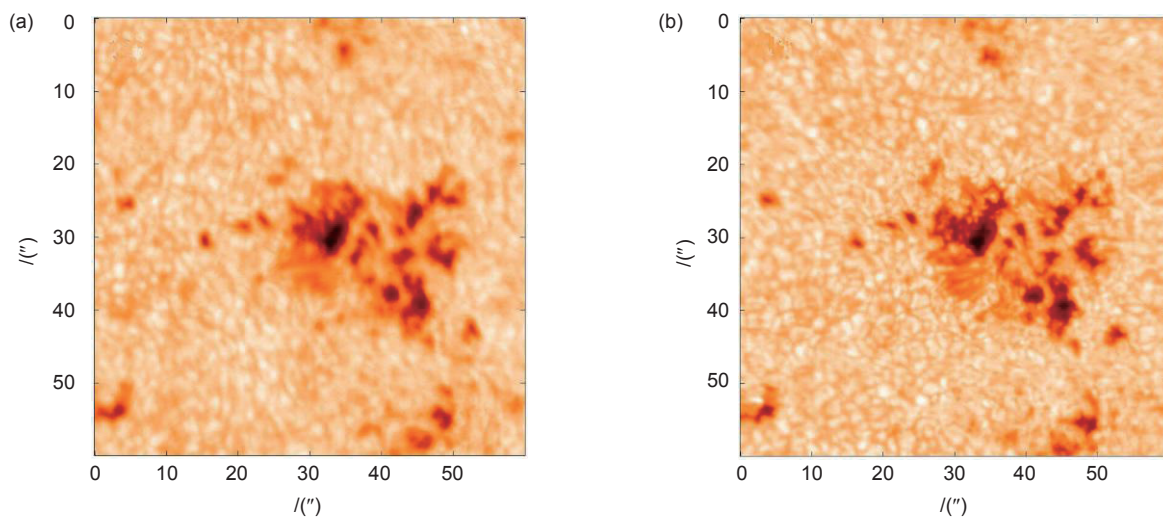


图 7 151 单元高阶 AO 系统获得的太阳黑子短曝光开闭环图像(705.7 nm@0.6 nm)。 (a) 太阳黑子开环图像; (b) 太阳黑子闭环图像

Fig. 7 The short-exposure open-loop and closed-loop images of sunspot obtained by 151-element solar AO system (705.7 nm@0.6 nm). (a) Solar sunspot images without AO; (b) Solar sunspot images with AO

撑, 实现较为准确的空间天气预报。在研制 151 单元高阶太阳 AO 系统的同时, 基于云南天文台 1 m 新真空太阳望远镜, 中国科学院光电技术研究所成功研制 7 波段太阳层析成像系统<sup>[20]</sup>。该系统是目前世界上波段最多的太阳大气多波段层析成像系统, 其成像波长对应太阳大气不同高度, 涵盖光球层、色球层底部、色球层中部和色球层顶部。该系统配合 151 单元太阳 AO 系统, 获得太阳大气可见至近红外多个波段同时层析高分辨力图像(图 8)。

### 3.3.3 太阳 MCAO 技术研究

中国科学院光电技术研究所从 2009 年开始 MCAO 技术理论研究, 并在后续自然科学基金项目的

支持下, 开展关键技术攻关, 2016 年, 成功研制国内首套太阳 GLAO 试验系统<sup>[12, 21]</sup>, 该系统基于原有 151 单元太阳自适应光学系统的变形镜, 并由项目团队专门研制了 1 套大视场多视线相关 SH-WFS 和波前实时处理机。波前传感器采用 7×7 微透镜阵列, 每个子孔径对应望远镜 1' 探测视场, 帧频 800 Hz; 波前实时处理机采用 FPGA+多核 DSP 架构, 可以同时处理五个视场方向上的波前信息, 并控制系统进行闭环校正。2016 年 10 月, 项目团队以大黑子为目标开展 GLAO 试验系统的闭环校正试验, 图 9 为 GLAO 试验系统开环和闭环时的太阳黑子图像。可以看出, GLAO 虽然达不到接近衍射极限的成像效果, 但是在大气视场范围

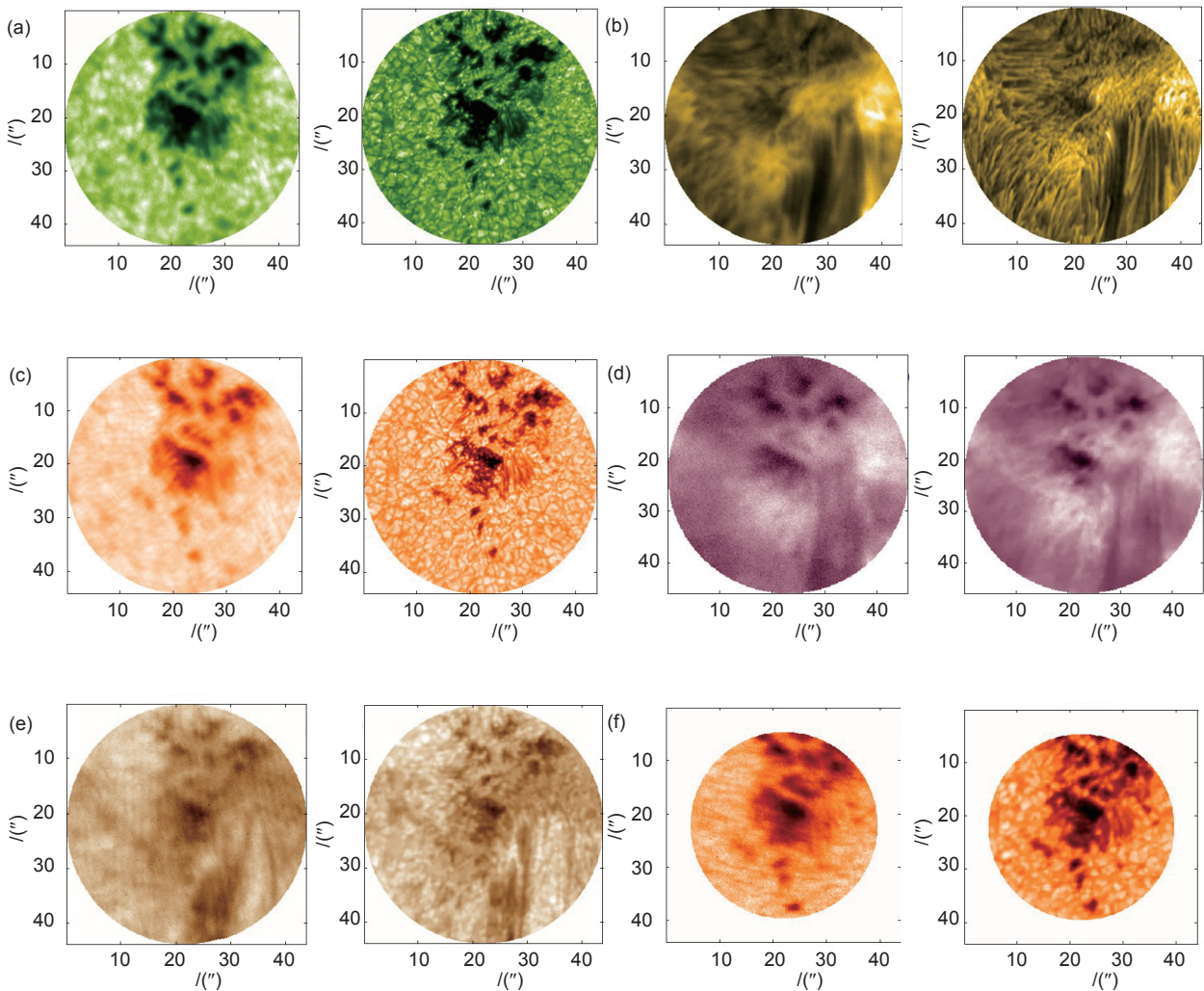


图 8 太阳多波段层析成像系统采集的 151 单元太阳 AO 校正前后太阳观测结果。图中展示了 6 个通道的成像结果, (a) G band; (b) H $\alpha$  line; (c) TiO band; (d) Ca II IR line; (e) He I line; (f) Fe I line<sup>[21]</sup>

Fig. 8 Comparison of the observed results between without SAO and with speckle reconstruction of SAO image. These images were taken from the six imaging channels. (a) G band; (b) H $\alpha$  line; (c) TiO band; (d) Ca II IR line; (e) He I line; (f) Fe I line<sup>[21]</sup>



内明显提高了成像分辨力。

为了获得大视场高分辨力太阳活动区观测图像,在 MCAO 技术方面,项目团队先后突破了大气湍流三维波前层析探测<sup>[22]</sup>、三维波前复原和最优控制等关键技术,建立仿真模型<sup>[23]</sup>,成功研制 MCAO 试验系统,系统基于现有 151 单元 AO 系统,配备 37 单元高层校正变形镜和大视场多视线夏克-哈特曼波前传感器,对大气湍流开展两层闭环校正。高层变形镜共轭于 6 km 处,MD-WFS 为 7×7 的子孔径阵列,最大探测视场 60",其探测信号用于控制两个变形镜。对大气湍流引起的波前像差分 2 层进行闭环校正,在国内首次获得太阳目标大视场高分辨力闭环校正图像(图 10)。该研究已

获得 2017 年度国家自然科学基金重大科研仪器项目的支持,项目团队将在未来 5 年内为云南天文台 1 m 新真空太阳望远镜配备一套专用的 MCAO 系统,从而实现该技术的成功运用。

#### 4 结 论

太阳高分辨力成像观测是自适应光学技术的重要应用领域之一。国内太阳自适应光学研究主要集中在中国科学院光电技术研究所,本文在梳理太阳自适应光学技术特点的基础上,系统介绍了国内太阳自适应光学技术发展历程,囊括了多套太阳自适应光学系统,并进一步介绍了下一代大视场自适应光学技术进

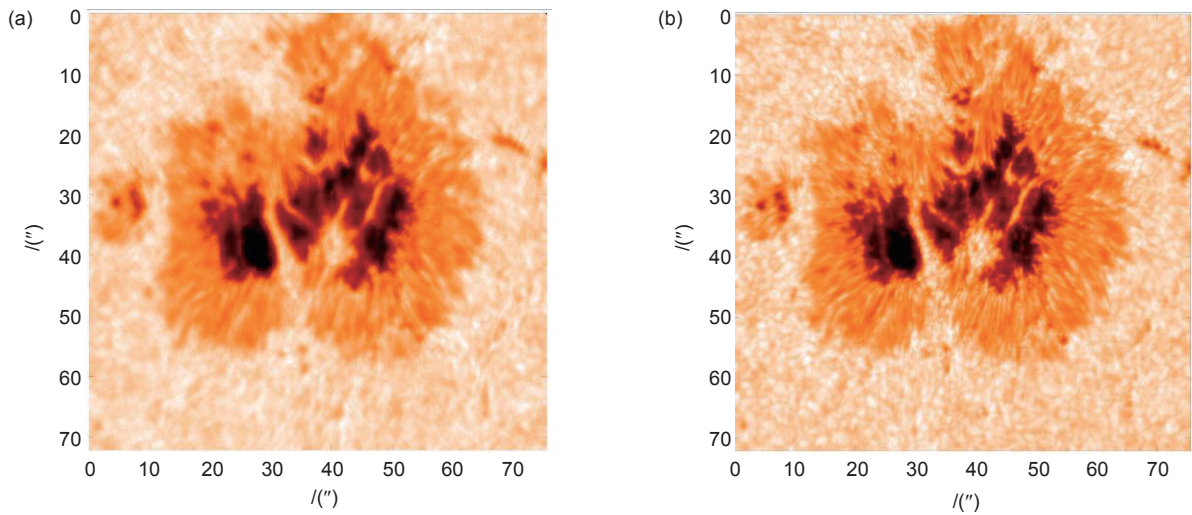


图 9 活动区 NOAA 12599 的 GLAO (a) 开环和(b) 闭环图像(705.7@0.6 nm)  
Fig. 9 Sunspot (a) without AO and (b) with GLAO closed loop for active area NOAA 12599 (705.7 at 0.6 nm)

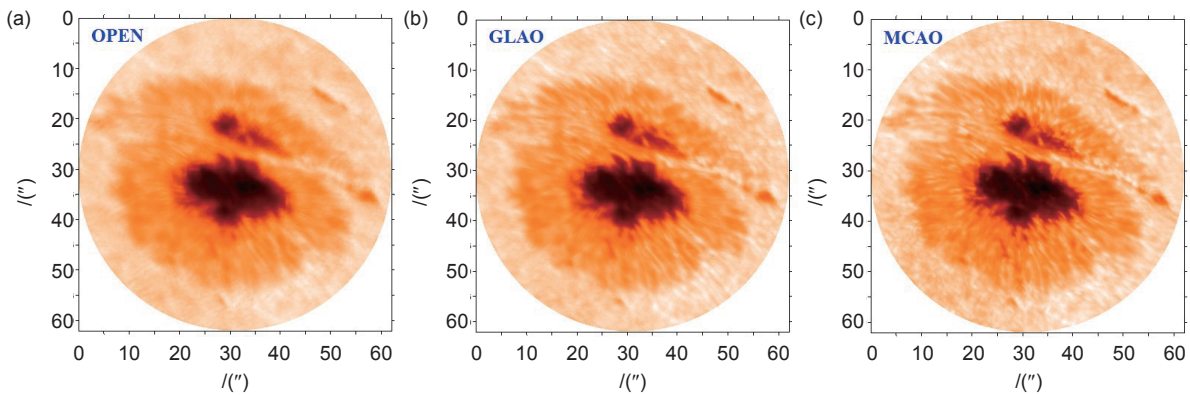


图 10 太阳活动区 NOAA 12683 的(a) 开环、(b) GLAO 闭环以及(c) MCAO 闭环短曝光图像(705.7@0.6 nm)  
Fig. 10 The short exposure sunspots images of (a) the uncorrected, (b) GLAO and (c) MCAO-corrected for active area NOAA 12683 (705.7@0.6 nm)

展情况。

太阳自适应光学技术的顺利突破,使我国在太阳高分辨力成像观测领域再添利器,利用太阳 AO 获得的高质量观测数据,太阳物理学家有望进一步完善对太阳活动现象的物理本质的了解,促进太阳物理研究的进一步发展。此外,太阳 MCAO 技术验证实验的成功,标志着我国太阳自适应光学技术的重大突破。利用该技术,太阳物理学家可以对大视场太阳活动区的演化过程进行高分辨力观测,为太阳磁场的结构、产生和演化等物理问题的深入研究以及太阳风暴预警等提供高质量的数据支持和科学依据。

## 参考文献

- [1] Rimmele T R. Solar adaptive optics[J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, **4007**: 218–232.
- [2] Jiang W H. Adaptive optical technology[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2006, **28**(1): 7–13.  
姜文汉. 自适应光学技术[J]. 自然杂志, 2006, **28**(1): 7–13.
- [3] Esposito S. Introduction to multi-conjugate adaptive optics systems[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2005, **6**(10): 1039–1048.
- [4] Hubin N, Arsenault R, Conzelmann R, et al. Ground layer adaptive optics[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2005, **6**(10): 1099–1109.
- [5] Hardy J W. Solar imaging experiment: final report[R]. Lexington, MA: Air Force Geophysics Laboratory, 1980.
- [6] Acton D S, Smithson R C. Solar imaging with a segmented adaptive mirror[J]. *Applied Optics*, 1992, **31**(16): 3161–3169.
- [7] Berkefeld T, Schmidt D, Soltau D, et al. The GREGOR adaptive optics system[J]. *Astronomische Nachrichten*, 2012, **333**(9): 863–871.
- [8] Dirk S, Thomas B, Frank H, et al. GREGOR MCAO looking at the Sun[J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, **4007**: 218.
- [9] Shumko S, Gorceix N, Choi S, et al. AO-308: the high-order adaptive optics system at Big Bear Solar Observatory[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, **9148**: 914835.
- [10] Schmidt D, Berkefeld T, Heidecke F, et al. GREGOR MCAO looking at the Sun[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014: **9148**: 91481T.
- [11] Schmidt D, Gorceix N, Goode P R, et al. Clear widens the field for observations of the Sun with multi-conjugate adaptive optics[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2017, **597**: L8.
- [12] Kong L, Zhang L Q, Zhu L, et al. Prototype of solar ground layer adaptive optics at the 1 m New Vacuum Solar Telescope[J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, **14**(10): 100102.
- [13] Rao C H, Jiang W H, Ling N, et al. Analysis of the observed R. M. S. contrast in solar granulation[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2001, **42**(2): 134–139.  
饶长辉, 姜文汉, 凌宁, 等. 太阳表面米粒结构观测对比度分析[J]. 天文学报, 2001, **42**(2): 134–139.
- [14] Rao C H, Zhang X J, Jiang W H. Simulation study on correlating Hartmann-Shack Wavefront sensor for solar granulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(3): 285–289.  
饶长辉, 张学军, 姜文汉. 太阳米粒结构相关哈特曼-夏克波前传感模拟研究[J]. 光学学报, 2002, **22**(3): 285–289.
- [15] Rao C H, Jiang W H, Ling N. Adaptive-optics compensation by distributed beacons for non-Kolmogorov turbulence[J]. *Applied Optics*, 2001, **40**(21): 3441–3449.
- [16] Rao C H, Jiang W H, Fang C, et al. A tilt-correction adaptive optical system for the solar telescope of Nanjing University[J]. *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics*, 2003, **3**(6): 576–586.
- [17] Rao C H, Zhu L, Rao X J, et al. Performance of the 37-element solar adaptive optics for the 26 cm solar fine structure telescope at Yunnan Astronomical Observatory[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(31): G129–G135.
- [18] Rao C H, Zhu L, Rao X J, et al. First generation solar adaptive optics system for 1-m New Vacuum Solar Telescope at Fuxian Solar Observatory[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2016, **16**(2): 023.
- [19] Rao C H, Zhu L, Rao X J, et al. Instrument description and performance evaluation of a high-order adaptive optics system for the 1 m new vacuum solar telescope at Fuxian solar observatory[J]. *The Astrophysical Journal*, 2016, **833**(2): 210.
- [20] Rao C H, Zhu L, Gu N T, et al. A high-resolution multi-wavelength simultaneous imaging system with solar adaptive optics[J]. *The Astronomical Journal*, 2017, **154**(4): 143.
- [21] Kong L, Zhu L, Zhang L Q, et al. Real-time controller based on FPGA and DSP for solar ground layer adaptive optics prototype system at 1-m NVST[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, **9**(2): 7801411.
- [22] Zhang L Q, Gu N T, Rao C H. Analysis of modal tomography for three-dimensional wavefront sensing of atmosphere turbulence[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(16): 169501.  
张兰强, 顾乃庭, 饶长辉. 大气湍流三维波前探测模式层析算法分析[J]. 物理学报, 2013, **62**(16): 169501.
- [23] Zhang L Q, Guo Y M, Rao C H. Solar multi-conjugate adaptive optics based on high order ground layer adaptive optics and low order high altitude correction[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(4): 4356–4367.

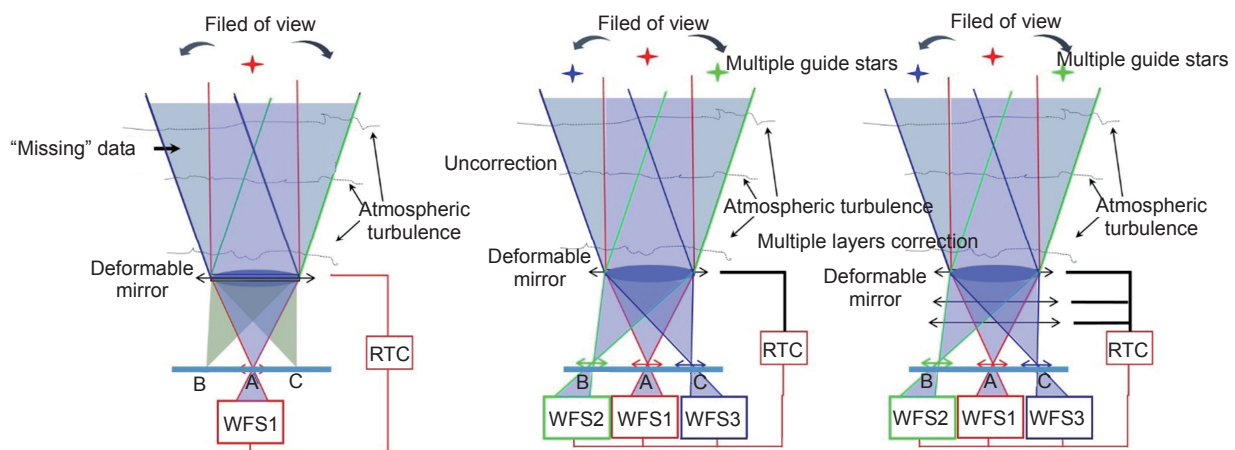
# Development of solar adaptive optics

Rao Changhui<sup>1,2</sup>, Zhu Lei<sup>1,2\*</sup>, Zhang Lanqiang<sup>1,2</sup>, Rao Xuejun<sup>1,2</sup>, Bao Hua<sup>1,2,3</sup>, Kong Lin<sup>1,2</sup>, Guo Youming<sup>1,2</sup>, Zhong Libo<sup>1,2</sup>, Ma Xuean<sup>1,2</sup>, Li Mei<sup>1,2</sup>, Wang Cheng<sup>1,2</sup>, Zhang Xiaojun<sup>1,2</sup>, Fan Xinlong<sup>1,2</sup>, Wang Xiaoyun<sup>1,2</sup>, Fan Muwen<sup>1,2</sup>, Chen Donghong<sup>1,2</sup>, Feng Zhongyi<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Science, Chengdu, Sichuan 610209, China;

<sup>2</sup>Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Science, Chengdu, Sichuan 610209, China;

<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China



Principle diagram and the correction results of (a) classical adaptive optics, (b) ground layer adaptive optics and (c) multi-conjugate adaptive optics

**Overview:** High spatial resolution imaging of the Sun is severely limited by the Earth’s atmosphere turbulence for ground-based solar telescope. Solar adaptive optics (AO) aims at the problems and has revitalized ground-based solar astronomy at existing telescopes. Meanwhile, multi-conjugate adaptive optics (MCAO) and ground layer adaptive optics (GLAO) have been proved to overcome the anisoplanatism and obtain the high resolution images with a large field of view in solar observation by compensating for the turbulence with several deformable mirrors conjugated to different heights. Over the three decades AO systems have been deployed at major ground-based solar telescopes and become an indispensable tool for obtaining high-resolution solar images today. Now the AO308 at the 1.6 m Goode Solar Telescope (GST) represents the highest level of solar AO, which consists of a 308-subaperture correlating Shack-Hartmann wavefront sensor, a 357-element deformable mirror and a high-order wavefront correction controller. The first solar MCAO system *Clear* which is built at the GST saw the first light in 2017. In China, the development of solar AO dates back to 2002, in which the tip/tilt correction system was developed by Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, and built at the 43-cm Solar Telescope of Nanjing University. After that, a 37-element AO experiment system was designed for the 26-cm solar fine structure telescope at Yunnan Astronomical Observatory. During 2012 to 2015, based on 1-m New Vacuum Solar Telescope (NVST) at Fuxian Solar Observatory, two generation solar AO systems were successfully developed. Meanwhile, MCAO and GLAO were under research to widen the correction field of view, a GLAO and MCAO prototype system were developed and built for the NVST. In this review, we give some summarization of the development of solar adaptive abroad, and emphatically introduce several adaptive optics systems in China and the progress of large FoV adaptive optics.

**Citation:** Rao C H, Zhu L, Zhang L Q, *et al.* Development of solar adaptive optics[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(3): 170733

Supported by National Natural Science Foundation of China (11178004, 11727805)

\* E-mail: zhulei\_cas@aliyun.com