多层共轭自适应光学系统性能

张至诚[1],张晓芳[1],高 雪[2],宋 杰[3],王 潇[4]

(1. 北京理工大学 光电学院,北京 100081; 2. 中国白城兵器试验中心,吉林 白城 137001;
3. 京东方科技集团有限公司,北京 100015; 4. 中国兵器工业导航与控制技术研究所,北京 100089)

摘 要:多层共轭自适应光学系统被广泛应用于地基大型天文望远镜,其可以改善大气非等晕的影响,并有效扩大校正视场。基于 MAOS 软件,在仅考虑大气非等晕影响的情况下,研究了在可见光波段(0.6 μm)和红外光波段(2 μm)下两种自适应光学系统的对比,多层共轭自适应光学系统相比传统自适应光学系统在可见光波段性能提升显著;以及双层共轭系统中,当第一个变形镜共轭于入瞳处时,第二个变形镜共轭高度变化对系统性能的影响,在可见光波段确定最佳共轭高度对提升性能十分重要,并初步探讨了在单层自适应光学系统中,变形镜致动器个数对系统性能的影响。

关键词:多层共轭自适应光学; 地基天文望远镜; 变形镜共轭高度; 致动器阶数
中图分类号:O436 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201645.1218002

Research of multi conjugate adaptive optics performance

Zhang Zhicheng[1], Zhang Xiaofang[1], Gao Xue[2], Song Jie[3], Wang Xiao[4]

(1 School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. Baicheng Ordnance Test Center of China, Baicheng 137001, China;
3. BOE Technology Group Co., Ltd., Beijing, 100015, China;
4. Navigation and Contral Technology Institute, China North Industries Group Corporation, Beijing 100089, China)

Abstract: Multi conjugate adaptive optics (MCAO) has been widely used in the large ground-base astronomy telescope, since it can enlarge the field-of view (FOV) and reduce the effect of atmospheric anisoplanatism. Only considering the anisoplanatism, with the assistance of the multi-thread adaptive optics simulator (MAOS), the difference of a conventional adaptive optics(CAO) and a MCAO system at the wavelength of 0.6 μm and 2 μm was studied respectively, it is quite obviously that in the visible band there is a significant improvement of the MCAO system than the conventional AO system. The influence of the second deformable mirror (DM) conjugate height was also discussed which had a key influence on the performance in the visible band, while the first one conjugated at the entrance pupil, and a preliminary study of the effect of DM order in the single adaptive optics system was provided in the end.

Key words: multi conjugate adaptive optics; ground-base astronomy telescope; DM conjugate height; DM order

收稿日期:2016-04-06; **修订日期**:2016-05-08
基金项目:国家自然科学基金(61471039)
作者简介:张至诚(1992-),男,硕士生,主要从事自适应光学方面的研究。Email:bitursa@163.com
导师简介:张晓芳(1973-),女,副教授,博士,主要从事自适应光学方面的研究。Email:zhangxf@bit.edu.cn

0 引 言

自适应光学(Adaptive Optics,AO)已经成为现代大型地基天文望远镜不可或缺的工具，是一种可以实时校正、补偿由大气湍流引起的图像像质退化的技术[1],但是其效果主要受限于大气的非等晕性[2]。对传统自适应光学系统来说，使用单个变形镜的条件下,其性能受限于 $\exp[-(\theta/\theta_0)^{5/3}]$,其中 θ 为视场角,θ_0 为大气等晕角[3]。即使在良好的观测条件下,有效视场角也仅为几个弧秒，无法满足对许多大型目标(如太阳)的观测。为了有效扩大校正视场,采用多层共轭自适应光学技术 (Multi Conjugate Adaptive Optics,MCAO)可以满足大视场的校正需求。

MCAO 技术基于湍流分层理论将大气湍流分成若干层，并使用多个变形镜共轭在相应湍流层的位置上以校正该层大气波前畸变，进而有效扩大校正视场[4]。虽然 MCAO 技术已提出 20 多年,但是由于系统设计较为复杂，对观测条件和波前传感精度要求较高等因素,MCAO 技术的发展也较为缓慢[5]。近年来，美国和欧洲的科学家对该领域的研究做出了重要的贡献,开展了相关的理论和实验研究,如欧洲的 1.5 m GREGOR 太阳望远镜使用了三个变形镜(Deformable Mirror,DM)和两个相关夏克-哈特曼波前传感器,校正视场达到了 1′以上[6];美国大熊天文台的 New Solar Telescope(NST)也使用三个 DM,设计了一种新的系统,有效的视场角增大到了 75″[7]。

文中仅讨论大气非等晕对 MCAO 系统性能的影响，基于 MAOS (Multi-thread Adaptive Optics Simulator)软件[8],忽略波前传感与波前校正误差,研究理想状态下、不同波段时、传统单层 AO 系统和 MCAO 系统性能的比较;双层 MCAO 系统中,当第一个 DM 共轭于入瞳处时，第二个 DM 共轭高度变化对系统性能的影响;以及研究了在不同视场下,采用单块 DM(共轭高度为 0 m)时,致动器个数与系统性能的关系。

1 MCAO 波前重构

如前所述,MCAO 的基本思想是将大气湍流分层，然后传感每层大气的湍流畸变并使用相应的 DM 进行校正。因此,如何传感大气湍流畸变和进行波前校正是重点。文中仅讨论大气非等晕对 MCAO 系统性能的影响，假设每个湍流层产生的波前畸变都能被完全传感并且变形镜的校正能力无限大。

MCAO 波前重构采用 Grill 和 Ellerbroek 提出的区域法大气层析传感重构技术[9-10]和最小方差波前重构方法[11],在每层湍流大气、DM 及望远镜入瞳处建立区域网格，通过光线追迹的方法实现湍流大气的波前传感和 DM 校正,基本原理如图 1 所示。首先计算光线穿过每层湍流大气到达入瞳处的波前,然后根据得到的入瞳处波前反向计算每层湍流大气的波前，并采用大气协方差矩阵的逆矩阵进行调整以获得重构的大气湍流波前。根据 Ellerbroek 的算法,重构的大气湍流波前可以描述为:

$$\hat{s}=(\widetilde{H}_s^{\mathrm{T}} G_a^{\mathrm{T}} C_n^{-1} G_a \widetilde{H}_s+C_s^{-1})^{-1} \widetilde{H}_s^{\mathrm{T}} G_a^{\mathrm{T}} C_n^{-1} g_{\mathrm{ol}} \tag{1}$$

式中:$\hat{s}$ 为重构后的大气湍流波前;$\widetilde{H}_s$ 为从各层湍流大气到望远镜入瞳进行光线追踪的运算器;G_a 为入瞳到波前传感器的影响函数;C_s 为大气湍流的协方差矩阵;g_{ol} 为波前传感器传感的波前斜率;C_n 为测量噪声的协方差。

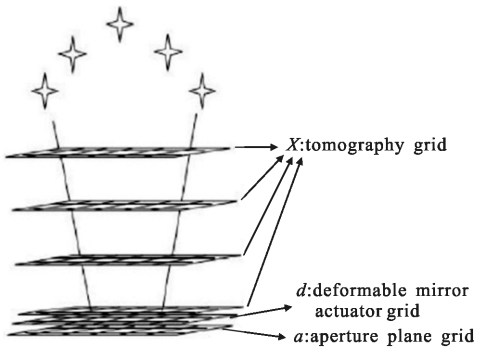

图 1 MCAO 波前重构原理

Fig.1 Grid for tomography and DM fitting

利用最小方差波前重构的方法，可以得到驱动 DM 实施校正的控制公式:

$$d=(H_d^{\mathrm{T}} W H_d)^{-1} H_d^{\mathrm{T}} W H_s \tilde{s} \tag{2}$$

式中:d 为 DM 的控制量;H_s 和 H_d 分别代表在不同传感方向上,从大气湍流层到 DM,再到望远镜入瞳进行光线追迹的运算器;W 则为不同传感方向的权重;$\tilde{s}$ 为公式(1)中重构的湍流波前。

2 MAOS 仿真工具

文中使用的仿真工具 MAOS 是针对美国 30 m

大型天文望远镜(Thirty Meter Telescope,TMT)开发的一款基于 C 语言的多线程线性 AO 仿真平台（可在 http://github.com/lianqiw/maos 上下载)。MAOS 具有模拟各种 AO 系统的能力，包括传统的单层共轭 AO 系统、多层共轭 AO 系统、激光层析系统(LTAO)以及多目标 AO 系统（MOAO）和地表层 AO 系统(GLAO),其特点为运行速度快,用户可以自定义参数进行特定的研究。

在 MAOS 中认为传感器为理想的波前斜率传感器,Zernike 多项式可以完美的拟合波前。大气湍流模型可根据已知的大气折射率结构常数 $C_n^2(h)$和各分层大气的风速构造多个分离的相位屏来模拟。再利用上节提到的区域法波前重构获得大气的波前信息,通过控制 DM 致动器对波前畸变进行校正。

图 2 给出了基于 MAOS 软件的 MCAO 系统仿真流程：目标和导星发出的光经过大气湍流后进入 MCAO 系统，波前传感器传感大气湍流引起的波前畸变信息,经波前重构产生 DM 的控制命令,用以驱动 DM,实现对波前畸变的校正,最后进行系统性能评估。

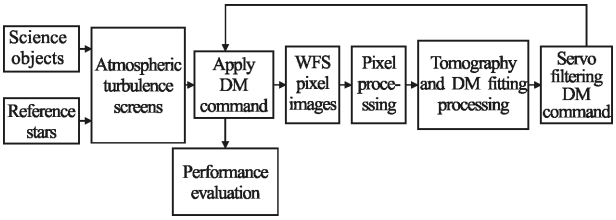

图 2 基于 MAOS 软件的 MCAO 系统仿真流程

Fig.2 Diagram of MCAO system simulations in MAOS

3 MCAO 系统仿真模型

3.1 性能评价

在 AO 系统中，通常使用斯特列尔比(Strehl Ratio,SR)来作为系统性能的评价指标。为了研究大气非等晕对 MCAO 系统性能的影响,忽略了其他因素诸如时间延迟、DM 校正误差、波前传感器噪声和重构误差的影响。

理论上,在 MCAO 系统中,光波从不同方向穿过大气湍流会引入不同的误差,因此,校正的视场角主要受限于不同高度的湍流层。随着视场角的增大,系统 SR 会降低。SR 与大气等晕角之间的关系可以表示为：

$$SR_{decrease} \propto \exp[-(\theta/\theta_0)^{5/3}] \tag{3}$$

式中：θ 为补偿视场；θ_0 为等晕角。

3.2 导星分布

在 MCAO 系统中,导星的数量和分布会影响系统的性能[12]。在仿真中,使用 17 颗导星进行传感,其中 1 颗位于视场的中心,剩下的 16 颗均匀地分布在视场内[13]。

在 0″~60″的视场内,17 颗导星可以有效覆盖对应的区域,实现充分的波前传感。

3.3 构建湍流模型

在 AO 系统中，大气湍流模型可用大气折射率结构常数 $C_n^2(h)$描述。

而大气相干长度 r_0 与 $C_n^2(h)$存在如公式(4)所示的关系,因此,可根据观测站实测的 r_0 推算出 $C_n^2(h)$[14]模型。

$$r_0=\left[0.423\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2\int_0^H C_n^2(h)\mathrm{d}h\right]^{-3/5} \tag{4}$$

式中：H 为湍流总高度（文中设 H=10 000 m)；λ 为观测波长。

文中选取大气相干长度 r_0=0.07 m 构建大气湍流模型,如公式(5)：

$$C_{ns}^2(h)=7.6231\times[22\times10^{-23}\left(\frac{h+z}{1\,000}\right)^{-10}\exp\left(-\frac{h+z}{1\,000}\right)+10^{-16}\exp\left(-\frac{h+z}{1\,500}\right)+9.056\times10^{-15}\exp\left(-\frac{h}{100}\right)] \tag{5}$$

该湍流模型大气折射率结构常数 $C_n^2(h)$随着高度的分布情况如图 3 所示。可以看出,大气湍流活动

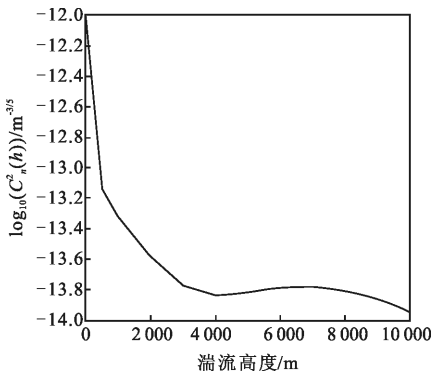

图 3 $C_n^2(h)$随高度变化分布图

Fig.3 Distribution of $C_n^2(h)$ along with the height

强烈的区域主要集中在海拔较低的位置(0、1 000、2 000 m)和中间位置(6 000、7 000 m)。

在 MAOS 软件中,依照图 3 所示的大气折射率 $C_n^2(h)$模型将湍流大气分为 12 层,每层的高度分别为 0、500、1 000、2 000、3 000、4 000、5 000、6 000、7 000、8 000、9 000 和 10 000 m,设定每层的风速分别为 5.6、5.77、6.25、7.57、13.31、19.06、12.14、7、9.2、10.4、5.1、3.9 m/s,并对每层湍流畸变强度分布的权重进行了配置,从而建立了由 12 个分离的相位屏所构成的大气湍流模型。

4 MCAO 系统性能仿真结果

4.1 传统单层 AO 系统与 MCAO 系统的性能对比

基于 MAOS 软件建立了 D/r_0=28.57(D=2 m,r_0=0.07 m)的望远镜系统,在 0~60"的视场内均匀分布 17 颗导星(如 3.2 节所述),仿真计算了单层 AO系统和 MCAO 系统在可见光(0.6 μm)和红外光(2 μm)的情况下,不同视场时系统的 SR,如图 4 所示。单层 AO 系统 DM 共轭在入瞳处,MCAO 系统采用双层共轭,两个 DM 分别共轭在 0 m 和 7 000 m(最佳共轭高度)。

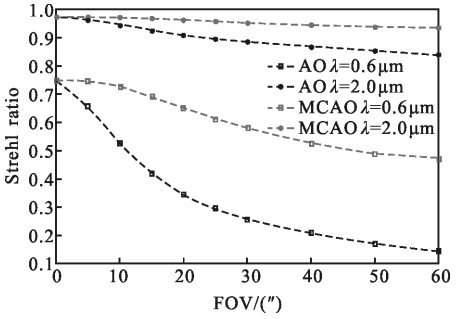

图 4 CAO 系统和 MCAO 系统的性能对比

Fig.4 Performance comparison between CAO and MCAO system

一般情况下,SR>0.5 时可以满足观测需求。可以看出,在可见光波段,MCAO 系统的视场角比传统 AO 系统扩大了 4 倍,性能有明显提升。而在红外波段,理论上在 60"视场内,采用单层 AO 系统即可达到观测需求。

4.2 DM 共轭高度对 MCAO 系统 SR 的影响

为了研究 DM 共轭高度对 MCAO 系统 SR 的影响,以双层 MCAO 系统为例,仿真计算了在可见光(0.6μm)和红外光(2 μm)的情况下,当第一块 DM 共轭在 0 m 处,第二块 DM 分别共轭在 2 000、4 000、6 000、8 000 m 处时 MCAO 系统 SR 随视场的变化情况,如图 5、图 6 所示。

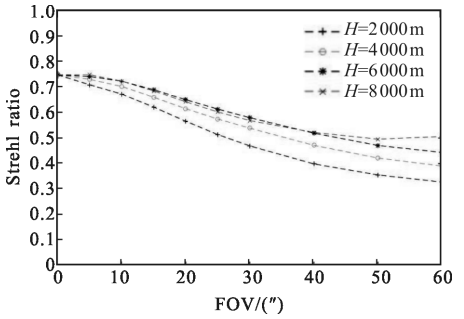

图 5 λ=0.6 μm 时,DM 共轭高度对 MCAO 系统性能的影响

Fig.5 Performance of MCAO system on different DM conjugate height at λ=0.6 μm

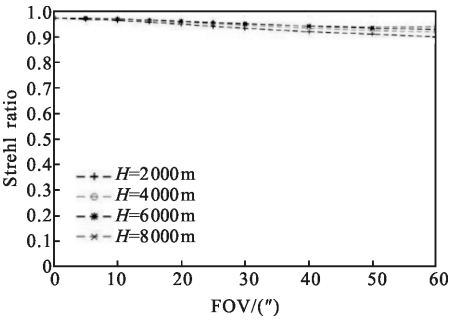

图 6 λ=2 μm 时,DM 共轭高度对 MCAO 系统性能的影响

Fig.6 Performance of MCAO system on different DM conjugate height at λ=2 μm

可以看出,在红外波段,当第一块 DM 共轭高度确定的情况下,随着第二块 DM 共轭高度在 2 000~8 000 m 内变化,MCAO 系统 SR 的变化较小,由此可见,在红外波段 MCAO 系统中,第二块 DM 的共轭高度可以在很大的范围内选择;而在可见光波段情况则大为不同,第二块 DM 共轭高度的变化对 SR 的影响较大,如当视场角为 30″时,第二块 DM 共轭在 8 000 m 处比在 2 000 m 处的系统 SR 增加了近一半。可见在可见光波段,寻找 DM 最佳共轭高度对提升 MCAO 系统的性能十分重要。

4.3 DM 致动器个数对系统性能的影响

DM 作为自适应光学系统的核心器件,其校正单元数即 DM 的致动器个数对 MCAO 系统的性能十分重要。为研究 DM 致动器个数与 AO 系统性能之间的关系,利用 MAOS 仿真平台初步研究了在可

见光波段、不同视场下、单块 DM(共轭高度为0 m)时致动器个数与系统 SR 的关系,如图 7 所示。

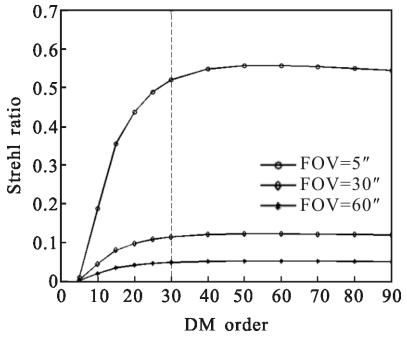

图 7 在不同视场下,系统 SR 随致动器阶数变化情况

Fig.7 Relationship between SR and DM order in different FOV

从图 7 可以看出,在虚线左侧,系统 SR 随着致动器个数的增加明显提高, 这是因为随着致动器个数的增加,DM 校正波前畸变的能力也随之增加;而在虚线右侧,即使致动器个数不断增加,系统 SR 基本保持不变, 其主要原因在于当致动器个数高于波前畸变所对应的波前像差阶数时, 系统的校正性能达到饱和, 甚至由于致动器过多会引入多余的高阶像差,导致系统 SR 略微下降。可见,在 MCAO 系统中,DM 致动器个数的合理选择对 MCAO 系统波前畸变的校正能力起着至关重要的作用。

5 结 论

在仅考虑大气非等晕误差下研究了传统单层 AO 系统与 MCAO 系统的性能, 以及在不同波段下 DM 的共轭高度对 MCAO 系统性能的影响, 同时初步探讨了 DM 致动器个数对 AO 系统的影响, 得出如下结论:在可见光波段,MCAO 系统较 AO 系统可以显著提升 SR,并且 DM 的共轭高度和致动器个数对系统的影响较大。因此, 对于应用于太阳观测的 MCAO 系统, 将 DM 共轭在最佳高度可以有效提升系统 SR,同时,选择合适的 DM 致动器个数可以避免资源浪费。

参考文献:

[1] Roddier F. Adaptive Optics in Astronomy [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.

[2] Roddier F, Northcott M J, Graves J E, et al. One-dimensional spectra of turbulence-induced Zernike aberrations: time-delay and isoplanicity error in partial adaptive compensation[J]. ***OSA-A***, 1993, 10(5): 957-965.

[3] Fried D L. Anisoplanatism in adaptive optics [J]. ***Opt Soc Am***, 1982, 72(1): 52-61.

[4] Beckers J M. Increasing the size of the isoplanatic patch with multiconjugate adaptive optics[C]//ESO Conference and Workshop Proceedings, 1998: 693-703.

[5] Berkefeld T, Soltau D, Schmidt D, et al. Adaptive optics development at the German solar telescopes [J]. ***App Opt***, 2010, 49(31): G155-G166.

[6] Schmidt D, Berkefeld T, Heidecke F, et al. GREGOR MCAO looking at the Sun[C]//SPIE, 2014, 9148: 91481T.

[7] Schmidt D, Gorceix N, Zhang Xianyu, et al. The multi-conjugate adaptive optics system of the New Solar Telescope at Big Bear Solar Observatory[C]//SPIE, 2014, 9148: 91482U.

[8] Wang Lianqi, Ellerbroek B. Computer simulations and real-time control of ELT AO systems using graphical processing units [C]//SPIE, Astronomical Telescopes +Instrumentation International Society for Optics and Photonics, 2012, 8447: 844723.

[9] Ragazzoni R, Marchetti E, Rigaut F. Modal tomography for adaptive optics[J]. ***Astron Astrophys***, 1999, 342: L53-L56.

[10] Grill L, Ellerbroek B L. Split atmospheric tomography using laser and natural guide stars [J]. ***Journal of the Optical Society of America A***, 2008, 25(10): 2427-2435.

[11] Ellerbroek B L. Efficient computation of minimum-variance wave-front reconstructors with sparse matrix technique [J]. ***Opt Soc Am***, 2002, 19(9): 1803-1816.

[12] Fusco T, Conan J M, Michau V, et al. Phase estimation for large field of view: application to multiconjugate adaptive optics [C]//SPIE′s International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation, International Society for Optics and Photonics, 1999, 3763: 125-133.

[13] Zhang Xiaofang, Wang Lianqi. Improvement in the performance of solar adaptive optics [J]. ***Research in Astronomy and Astrophysics***, 2014, 14(4): 471-484.

[14] Jing Xu, Hou Zaihong, Qin Lai′an, et al. Measurement of whole layer atmospheric coherence length by observing stars in daytime [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2011, 40 (7): 1352-1355. (in Chinese)
靖旭, 侯再红, 秦来安, 等. 白天观测恒星测量整层大气相干长度[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1352-1355.