

基于 YAO 软件的太阳地表层自适应光学系统的仿真

刘思臻^{1,2,3}, 任德清^{1,2,4}

¹中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042;

²中国科学院天文光学技术重点实验室, 江苏 南京 210042;

³中国科学院大学, 北京 100049;

⁴加利福尼亚州立大学北岭分校物理与天文学院, 加利福尼亚州 91330

摘要 目前太阳活动观测存在视场小和分辨率低的问题。单共轭自适应光学系统可校正的视场范围较小, 多层共轭自适应光学系统使用三维重构的方法, 耗时长且过程繁琐; 而太阳地表层自适应光学系统只校正地表层湍流, 效率高, 能快速获得大视场、高分辨率图像。利用 YAO 软件, 在四导星阵列分布情况下, 应用平均算法对太阳, 地表层自适应光学系统在 40" 和 60" 优化视场、J 和 H 波段的性能进行数值仿真, 并与相同条件下仿真得到的单共轭自适应光学系统性能结果进行比较。结果表明, 在 60"~120" 成像视场内, 地表层自适应光学系统的斯特列尔比比单共轭自适应光学系统提高了 130%~210%, 该结果与太阳自适应光学领域其他软件得到的仿真结果一致。

关键词 大气光学; 主动或自适应光学; 波前传感; 大气湍流; 地表层自适应光学; YAO 软件

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.090101

Simulation on Solar Ground-Layer Adaptive Optics System Based on YAO Software

Liu Sizhen^{1,2,3}, Ren Deqing^{1,2,4}

¹*Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China;*

²*Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China;*

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

⁴*Physics & Astronomy Department, Northridge, California State University, California 91330, USA*

Abstract The observation of solar activity has problems of small field of view and low resolution. The field of view corrected by a single-conjugated adaptive optics system is small, and a multi-conjugated adaptive optics system based on the method of three-dimensional reconstruction is time-consuming and complex. However, a solar ground-layer adaptive optics system, which corrects ground-layer turbulence, can achieve high efficiency and large field of view, and obtain high-resolution images. In the case of the distribution of four star array and with the average algorithm, the YAO software is used to the numerical simulation of the solar ground-layer adaptive optical system with 40" and 60" optimized field of view in J and H bands, and the simulation results are compared with that of single-conjugated adaptive optics system simulation under the same conditions. The results show that Strehl ratio of the ground-layer adaptive optics system increases 130%-210% compared with that of single-conjugated adaptive optics system within imaging field of view of 60"-120", which is consistent with the results obtained by other softwares in solar adaptive optics.

收稿日期: 2017-03-17; 收到修改稿日期: 2017-04-20

基金项目: 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(11220101001)

作者简介: 刘思臻(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事太阳自适应光学模拟方面的研究。E-mail: szliu@niaot.ac.cn

导师简介: 任德清(1963—), 男, 博士, 研究员, 主要从事太阳自适应光学及高对比度星冕仪方面的研究。

E-mail: ren.deqing@csun.edu

Key words atmospheric optics; active or adaptive optics; wave-front sensing; atmospheric turbulence; ground-layer adaptive optics; YAO software

OCIS codes 010.1080; 010.7350; 010.1330

1 引言

太阳活动的典型区域通常在 $60'' \times 60''$ 视场(FOV)范围内,但由于大气湍流的扰动,望远镜观测太阳时的分辨率受到很大的限制,因此太阳自适应光学系统对提高太阳观测分辨率有着重要作用。单共轭自适应光学(SCAO)系统仅可测量单颗导星的波前,且只能校正小视场范围内的大气扰动。随着视场的增大,系统的斯特列尔比(SR, f_{SR})迅速减小^[1]。利用真空塔望远镜和邓恩太阳望远镜等由多个波前传感器(WFS)和多个变形镜(DM)组成的多层共轭自适应光学(MCAO)系统可增大视场范围^[2-3]。MCAO系统利用不同视线方向上的多个导星(GS)进行多视线波前探测,获得了多个视线方向上光波穿过大气层时累积的波前像差;利用大气层析技术对探测数据进行层析重构,获得了不同高度层湍流引起的波前误差^[4];将多个变形镜分别置于不同高度湍流层的共轭位置,并对大气湍流进行分层校正,最终实现大视场范围内的高分辨率成像,该过程比较复杂且耗时长。研究表明,在大视场范围内,地表层的湍流对整个大气扰动有较大的影响^[5-7]。为了简化校正过程,可采用只校正地表层大气扰动的地表层自适应光学(GLAO)系统。层向 MCAO 系统中的两组可变形镜和波前传感器可分别校正近地层和高层大气扰动,GLAO系统可被认为是一种特殊的层向 MCAO 系统,即仅采用一组可变形镜和波前传感器校正近地层大气扰动^[8-9],它利用来自所有导星的光能量来提高系统的信噪比。

国外针对自适应光学系统性能进行理论分析和数值仿真的研究已有诸多报道。Diolaiti 等^[10]通过解析数学的方法对比分析了层向和星向 MCAO 系统的性能;Nicolle 等^[11]通过解析数学的方法分析了导星亮度对 MCAO 系统性能的影响;Tokovinin^[12]使用瑞利导星和钠导星对 GLAO 系统进行仿真模拟,均得到 $0.63''$ 的半峰全宽;Hart 等^[13]利用多重激光导星的 GLAO 系统进行仿真,得到系统的半峰全宽由来自适应光学系统的 $0.61''$ 降至 $0.2''$,但是都没有对自然导星情况下的 GLAO 系统进行仿真;Le Louarn 等^[14]基于 CIBOLA 软件对 MCAO 系统进行仿真,得到 $f_{SR} = 0.85$ 和最大为 $3'$ 的成像视场(IFOV);Kellerer^[15]用 YAO 软件对太阳 MCAO 系统进行模拟,得到了较好的结果,但 MCAO 系统在实际操作中仍然面临较大的挑战。

本文使用的 YAO 软件是用 Yorick 语言编写的用于自适应光学系统仿真的最新软件。相对于其他软件,目前使用 YAO 软件对各类自适应光学系统仿真的研究文献较少。该软件可以根据系统要求的算法或者自定义波前传感器进行模拟,提供清晰明了的交互式界面,有较好的自适应光学系统仿真能力。使用 YAO 软件对太阳 GLAO 系统进行仿真,可以避免波前重构的复杂过程,在实际应用中难度较小,并且可获得较大的视场范围和高分辨率的图像。

2 太阳 GLAO 系统的平均算法

大部分的湍流集中在地表层,地表层自适应光学系统作为一种特殊的层指向多层共轭自适应光学系统,在大视场内的性能较好。由于地表层自适应光学系统只探测和校正地表层的湍流,所以可以用相对简单的平均算法来实现。平均算法示意图如图 1 所示,图中 3 个导星分别对应 3 个视场方向, θ 表示探测的半视场。由图 1 可以看出,不同方向的导星通过高层湍流层后经过不同位置,并在瞳面完全重叠。

根据 Kolmogorov 局部各项性理论,不同高度的薄层大气引起的相位相互独立并服从同一分布。由中心极限定律可知,所有层大气叠加引起的最终的相位近似符合高斯分布,并且该高斯分布的均值为零。同理,其他视场引起的相位也满足零均值的高斯分布。假设各视场方向的湍流彼此相互独立,则瞳面上叠加的大气湍流倾斜像差是均值为零的高斯随机变量,大概率情况下倾斜像差在零值附近引起的误差较小,可忽略不计;倾斜像差较大时引起的误差较大,此时该方法性能较差,但这种情况出现的概率较小,对整个波前探测的精度影响有限^[16-18]。基于此,对各个视线方向的波前探测信息进行平均,即可获得地表层湍流信息。

将大气湍流分为高层和地表层湍流,分别记为 Φ_H 和 Φ_h , H 为高层湍流的高度, h 为地表层湍流的高度。假设共有 N 个导星,第 j 个导星视线方向上的波前传感器的探测波前记为 φ_{gs} ,各个方向上探测波前的平均值为

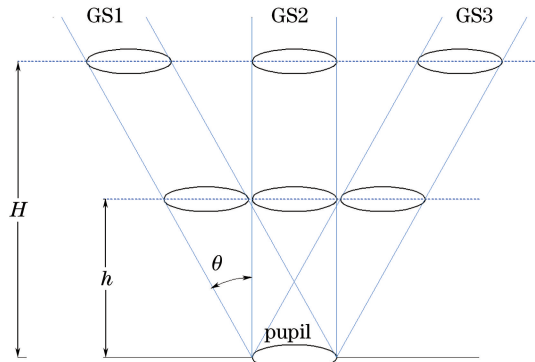


图 1 平均算法示意图

Fig. 1 Diagram of average algorithm

$$\Phi_{ave} = \frac{1}{N} \sum_j^N \varphi_{gs} \quad (1)$$

不同视线方向的波前传感器的探测波前经过地表层时通过相同区域,则有

$$\Phi_h \approx \Phi_{ave} \quad (2)$$

GLAO 系统利用以上平均算法对地表层湍流进行预测并控制共轭于地表层的变形镜^[19]。

3 系统仿真结果

3.1 仿真参数与评价标准

使用 YAO 软件并基于美国大熊湖天文台的视宁度数据对 GLAO 系统进行仿真,数据显示大气湍流分为 4 层,大气相干长度 r_0 在不同高度下的层因子 $f(i)$ 的值如表 1 所示^[9]。表 1 中的视宁度数据是通过太阳差分像运动大气视宁度监测仪测量得到的^[20]。

表 1 不同高度下的大气相干长度

Table 1 Atmospheric coherence length at different heights

Parameter	Value			
H /km	0.2	1.0	3.0	8.0
r_0 /m	0.125	0.230	0.420	0.700
$f(i)$	0.644	0.234	0.085	0.037

$f(i)$ 表示每一层的集中湍流数。层因子 $f(i)$ 的计算公式为

$$f(i) = \left(\frac{r_{0\ total}}{r_0} \right)^{5/3} \quad (3)$$

式中 $r_{0\ total}$ 为总的大气相干长度。文献[20]给出的大气相干长度范围为 (0.07 ± 0.028) m, 设 $r_{0\ total} = 0.096$ m, 总大气相干长度是在良好视宁度状态下的典型值,也是最适宜用于太阳高分辨率图像处理的值^[9]。利用 YAO 软件对太阳 GLAO 系统进行模拟仿真的参数设置为:望远镜的直径为 1.6 m;模拟波段为位于 J 波段的 $1.25 \mu\text{m}$ 和 H 波段的 $1.65 \mu\text{m}$;波前传感器的优化视场(OFOV)为 $40''$ 和 $60''$,子孔径数为 10×10 ,导星等值为 0,共轭高度为 0;变形镜的制动器排列为 11×11 ,共轭高度为 0;迭代次数为 1000。

在 GLAO 系统中,4 颗导星采样视场如图 2 所示。图 2(a)为 4 颗导星分布阵列示意图,中心放置一颗导星,周围 3 颗均匀置于中心导星的圆周上,将导星示意图表示的视场作为优化视场,在仿真过程中分别使用 $40''$ 的优化视场和 $60''$ 的优化视场,即导星分布阵列的直径分别为 $40''$ 和 $60''$ 。图 2(b)为波前传感器测量得到的 4 颗导星的波前平均值,放大图 2(b),可以明显看出导星由 10×10 的子孔径组成。

太阳自适应光学系统通常使用视场为 $10'' \times 10''$ 的子孔径,并采用相关运算获得各导星区域的波前倾斜像差^[21],但目前没有将二维扩展结构作为导星仿真的自适应光学仿真软件。李超宏等^[22]利用质心法和视场偏移哈特曼波前传感器对 5 颗导星目标进行准确的波前探测,该研究表明质心法在太阳自适应光学系统的仿真过程中有很高的可行性和可靠性,即点源导星可认为是等同于二维扩展结构的导星。质心法因其简便性和稳健性,也被广泛用于星点定位中^[23]。因此,这里利用点源导星对 GLAO 系统进行仿真。

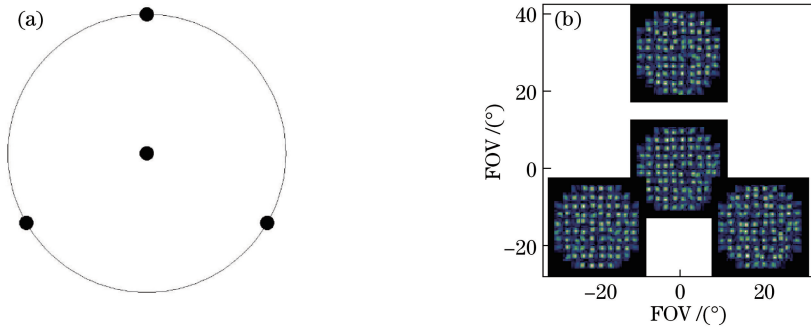


图 2 (a) 太阳 GLAO 系统中 4 颗导星的分布; (b) YAO 软件中的波前传感器

Fig. 2 (a) Distribution of four guide stars in solar GLAO system; (b) wavefront sensor in YAO software

斯特列尔比是评价自适应光学系统性能的指标之一,定义为实际峰值强度与衍射极限峰值强度之比,其与剩余波前畸变的关系可近似表示为

$$f_{\text{SR}} = \exp(-\sigma_{\varphi}^2), \quad (4)$$

式中 f_{SR} 为斯特列尔比, σ_{φ} 为剩余波前畸变 φ 的统计标准差。(4)式表明, f_{SR} 仅取决于 φ , 且对波前误差很敏感, 仿真过程中不同的成像视场对应不同的剩余波前畸变, 据此可以求出 f_{SR} 的值。

3.2 仿真结果

根据平均算法设计程序, 在 YAO 软件中设置参数后得到 GLAO 系统的仿真结果。为了更好地说明 GLAO 系统性能, 在相同条件下对由一个导星和一个变形镜组成的 SCAO 系统进行仿真。

表 2 为 J 波段下 SCAO 和 GLAO 系统分别在 IFOV 为 $40''$ 和 $60''$ 条件下的 f_{SR} 值。由表 2 可知, 虽然轴上点 SCAO 系统获得的 f_{SR} 略高于 GLAO 系统, 但是随着 IFOV 的扩大, GLAO 系统明显比 SCAO 系统具有更好的性能。在 GLAO 系统中, 优化视场为 $40''$ 时 f_{SR} 的范围为 $0.18 \sim 0.54$ (成像视场为 $0'' \sim 60''$), 优化视场为 $60''$ 时 f_{SR} 的范围为 $0.19 \sim 0.46$ (成像视场为 $0'' \sim 72''$), 略优于 $40''$ 优化视场的性能, 这是因为大的优化视场可以收集更多的湍流信息, 从而获得更好的校正效果。当优化视场分别为 $40''$ 和 $60''$ 时, 太阳 GLAO 系统的 f_{SR} 值比 SCAO 系统分别提高了 130% 和 210%。可见, GLAO 系统可以增大太阳观测图像的视场范围和提高分辨率。

表 2 SCAO 与 GLAO 系统在不同 IFOV 下的 f_{SR} 值 ($1.25 \mu\text{m}$)

Table 2 f_{SR} of SCAO and GLAO systems for different IFOV at $1.25 \mu\text{m}$

Parameter	Value											
	$0''$	$12''$	$24''$	$36''$	$48''$	$60''$	$72''$	$84''$	$96''$	$108''$	$120''$	
f_{SR} of SCAO system	0.66	0.51	0.32	0.20	0.14	0.10	0.09	0.07	0.06	0.05	0.04	
f_{SR} of GLAO system with $40''$ OFOV	0.54	0.47	0.36	0.29	0.23	0.18	0.14	0.11	0.09	0.08	0.07	
f_{SR} of GLAO system with $60''$ OFOV	0.46	0.42	0.36	0.31	0.27	0.24	0.19	0.15	0.12	0.10	0.08	

表 3 为 H 波段下 SCAO 系统与 GLAO 系统分别在 IFOV 为 $40''$ 和 $60''$ 的 f_{SR} 值。由表 3 可知, 虽然轴上点 SCAO 系统的性能略优于 GLAO 系统的性能, 但是随着 IFOV 的增大, GLAO 系统比 SCAO 系统的 f_{SR} 值大; GLAO 系统在 IFOV 为 $40''$ 时的 f_{SR} 值为 $0.21 \sim 0.79$, 在 IFOV 为 $60''$ 时的 f_{SR} 值为 $0.19 \sim 0.64$, 这表明 GLAO 系统在大视场下可以获得较高的图像分辨率。当 IFOV 为 $40''$ 和 $60''$ 时, GLAO 系统比 SCAO 系统的 f_{SR} 值分别提升了 150% 和 190%, 这也说明大优化视场下可获得更多湍流信息, 校正效果更好。结果表明, GLAO 系统可以增大太阳观测图像的视场范围和提高分辨率。

表 3 SCAO 与 GLAO 系统在不同 IFOV 的 f_{SR} 值 ($1.65 \mu\text{m}$)

Table 3 f_{SR} of SCAO and GLAO systems for different IFOV at $1.65 \mu\text{m}$

Parameter	Value											
	$0''$	$12''$	$24''$	$36''$	$48''$	$60''$	$72''$	$84''$	$96''$	$108''$	$120''$	
f_{SR} of SCAO	0.79	0.67	0.51	0.38	0.28	0.21	0.16	0.14	0.12	0.10	0.09	
f_{SR} of GLAO system with $40''$ OFOV	0.70	0.64	0.55	0.47	0.38	0.31	0.25	0.21	0.18	0.15	0.12	
f_{SR} of GLAO system with $60''$ OFOV	0.64	0.60	0.54	0.49	0.43	0.38	0.33	0.28	0.24	0.19	0.16	

4 结 论

介绍了太阳地表层自适应光学系统的平均算法、YAO 软件仿真参数和 4 颗导星分布阵列,对太阳 GLAO 系统进行仿真。仿真结果表明,在 $60''\sim 120''$ 成像视场内,J 波段的太阳 GLAO 系统在 $40''$ 和 $60''$ 优化视场下的 f_{SR} 值分别为 $0.07\sim 0.18$ 和 $0.08\sim 0.24$,比 SCAO 系统分别提高了 130% 和 210%;H 波段的太阳 GLAO 系统在 $40''$ 和 $60''$ 优化视场下的 f_{SR} 值分别为 $0.12\sim 0.31$ 和 $0.16\sim 0.38$,比 SCAO 系统分别提高了 150% 和 190%。运用平均算法时,太阳 GLAO 系统在大视场条件下能获得高分辨率图像,避免了 MCAO 系统的三维波前重构的复杂过程,具有更广泛的适用性,这表明 YAO 软件在太阳自适应光学系统的仿真中有较强的可行性,为太阳望远镜自适应光学系统的设计以及实际应用提供了更好的选择。

参 考 文 献

- [1] Rimmele T R. Solaradaptive optics[C]. SPIE, 2000, 4007: 218-231.
- [2] Lühe O V D, Berkefeld T, Soltau D. Multi-conjugate solar adaptive optics at the Vacuum Tower Telescope on Tenerife [J]. Comptes Rendus Physique, 2005, 6(10): 1139-1147.
- [3] Langlois M, Moretto G, Richards K, *et al.* Solar multiconjugate adaptive optics at the Dunn solar telescope: Preliminary results[C]. SPIE, 2004, 5490: 59-66.
- [4] Beckers J M. Increasing the size of the isoplanatic patch with multiconjugate adaptive optics[C]. European Southern Observatory Conference and Workshop Proceedings, 1988, 30: 693-703.
- [5] Nicolle M, Fusco T, Michau V, *et al.* Optimization of star-oriented and layer-oriented wavefront sensing concepts for ground layer adaptive optics[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2006, 23(9): 2233-2245.
- [6] Racine R, Ellerbroek B L. Profiles of nighttime turbulence above Mauna Kea and isoplanatism extension in adaptive optics[C]. SPIE, 1995, 2534: 248-257.
- [7] Chen Xiaowei, Sun Gang, Liu Qing, *et al.* Contribution of the surface layer to the integral turbulence in northwest plateau[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(11): 1101006.
陈小威, 孙刚, 刘庆, 等. 近地面湍流对整层湍流的贡献及相关研究[J]. 光学学报, 2015, 35(11): 1101006.
- [8] Jolissaint L, Véran J P, Conan R. Analytical modeling of adaptive optics: Foundations of the phase spatial power spectrum approach[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2006, 23(2): 382-394.
- [9] Ren D Q, Jolissaint L, Zhang X, *et al.* Solar ground-layer adaptive optics[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2015, 127(951): 469-478.
- [10] Diolaiti E, Ragazzoni R, Tordi M. Closed loop performance of a layer-oriented multi-conjugate adaptive optics system [J]. Astronomy & Astrophysics, 2001, 372(2): 710-718.
- [11] Nicolle M, Fusco T, Michau V, *et al.* Ground layer adaptive optics: Analysis of the wavefront sensing issue[C]. SPIE, 2004, 5490: 858-869.
- [12] Tokovinin A. Seeing improvement with ground-layer adaptive optics[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2004, 116(824): 941-951.
- [13] Hart M, Milton N M, Baranec C, *et al.* A ground-layer adaptive optics system with multiple laser guide stars[J]. Nature, 2010, 466(7307): 727-729.
- [14] Le Louarn M, Hubin N, Sarazin M, *et al.* New challenges for adaptive optics: Extremely large telescopes[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2000, 317(3): 535-544.
- [15] Kellerer A. Wide-field solar adaptive optics in a layer-oriented approach[C]. Adapting to the Atmosphere Conference, 2015: arXiv: 1410.1362
- [16] Charnotskii M. Sparse spectrum model for a turbulent phase[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2013, 30(3): 479-488.
- [17] Glindemann A, Hippler S, Berkefeld T, *et al.* Adaptive optics on large telescopes[J]. Experimental Astronomy, 2000, 10(1): 5-47.
- [18] Feng Fan, Li Changwei. Simulation of atmospheric turbulence phase screen based on wavelet analysis[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(1): 0101004.
丰帆, 李常伟. 基于小波分析的大气湍流相位屏模拟[J]. 光学学报, 2017, 37(1): 0101004.

- [19] Zhang Lanqiang. Solar multi-conjugate adaptive optics for high resolution imaging[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2014.
张兰强. 太阳高分辨力成像多层共轭自适应光学技术研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2014.
- [20] Kellerer A, Gorceix N, Marino J, *et al.* Profiles of the daytime atmospheric turbulence above big bear solar observatory [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2012, 542: A2.
- [21] Sidick E, Morgan R M, Green J J, *et al.* Adaptive cross-correlation algorithm and experiment of extended scene shack-hartmann wavefront sensing[C]. *SPIE*, 2007, 6687: 68710.
- [22] Li Chaohong, Xian Hao, Jiang Wenhan, *et al.* Analysis of wavefront measuring method for daytime adaptive optics [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(7): 4289-4296.
李超宏, 鲜浩, 姜文汉, 等. 用于白天自适应光学的波前探测方法分析[J]. *物理学报*, 2007, 56(7): 4289-4296.
- [23] Liu Nannan, Xu Shuyan, Cao Xiaotao, *et al.* Application of adaptive weighted centroid algorithm in high accuracy star localization[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 0812002.
刘南南, 徐抒岩, 曹小涛, 等. 自适应加权质心算法在高精度星点定位中的应用[J]. *光学学报*, 2016, 36(8): 0812002.