

钠导星星群分布对 MCAO 系统大气层析性能影响研究

黄建¹, 王功长^{2*}¹重庆工商大学机械工程学院, 制造装备机构设计与控制重庆市重点实验室, 重庆 400067;²中国人民解放军 32037 部队, 云南 姚安 675300

摘要 基于钠导星星群的多层共轭自适应光学(MCAO)系统是目前大口径地基望远镜获得大视场高分辨成像质量的关键部分。其中,钠导星数量及排布方式是影响MCAO系统性能的关键参数。为了明确钠导星星群分布对MCAO系统大气层析效果的影响,首先,根据层析的基本原理,建立了MCAO系统层析两层大气湍流的模型。随后,基于OOMAO仿真平台,验证了3颗钠导星星群对两层大气湍流层析结果。最后,利用视场内斯特列尔比的平均值($\overline{R_s}$)和归一化标准差作为校正效果和均匀性的评价指标,讨论了3~6颗钠导星放置于正多边形顶点或者正多边形顶点结合视场中心的排布方式对湍流层析效果的影响。研究表明,针对丽江高美谷天文台大气条件(550 nm 波长大气相干长度为8 cm),10 m口径望远镜视场为1',大气分为两层的情况,当正多边形的半径大于26"时,钠导星的数量达到4颗就能使系统校正后 $\overline{R_s}$ (H波段)达到0.45。特别地,采用5颗钠导星放置在正五边形顶点并在视场中心放置1颗钠导星的星群方式层析湍流最优,MCAO系统校正后 $\overline{R_s}$ 最高,能达到0.53,且系统均匀性较好。

关键词 自适应光学; 钠导星星群; 层析; 多层共轭; 大口径地基望远镜

中图分类号 P427.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221553

1 引言

2020年10月,Reinhard Genzel和Andrea Ghez被授予诺贝尔物理学奖,以表彰其近30年来利用甚大望远镜(VLT)和Keck望远镜测量银河系中心黑洞质量、研究其形成过程以及在宇宙演化中的作用等重大问题方面做出的先驱性贡献。然而,由于地球上空近30 km大气层对恒星平面波前产生的随机扰动,使大口径地基望远镜的分辨率与衍射极限相比下降了2~3个数量级。为了克服大气随机扰动导致的成像质量退化,获得近衍射极限的成像,利用自适应光学(AO)系统探测畸变波前并对其进行实时补偿几乎成为了目前大口径地基望远镜不可或缺的关键部分^[1]。

当AO系统进行波前探测时,首先需要在观测目标附近区域寻找一颗亮星作为信标。对于10 m口径望远镜,信标的亮度大于14等星且距离目标需要小于10"才能使AO系统校正后的斯特列尔比(SR, R_s)达到0.4^[2],但是满足要求的自然星在近红外波段的天空覆盖率仅能达到1%,所以利用人造钠导星(LGS)进行波前探测成为了扩大AO系统天空覆盖率的主要手段^[3-4]。但是,单颗钠导星探测湍流时由于“圆锥效应”导致其等晕区仅为几角秒(可见光波段)至十几角秒

(红外波段),限制了AO系统所能校正的视场角(FOV)。为了进一步提升AO系统校正的视场角,利用基于钠导星星群的多层共轭自适应光学系统(MCAO)对湍流进行三维校正成为了目前大口径地基望远镜的关键部分^[5]。2011年Gemini South望远镜利用5颗钠导星星群的MCAO系统,对H波段在85"×85"范围内获得了分辨率0.08"的图像^[6]。Gemini North, VLT UT4 Yepun以及Keck等目前正在使用的大口径望远镜,其单钠导星AO系统也即将升级为基于钠导星星群的MCAO系统^[7-8]。目前正在建的下一代大口径望远镜,如30 m望远镜(TMT)和欧洲极大望远镜(E-ELT),在建设之初就已经将基于钠导星星群的MCAO系统归为核心部件^[9]。因此,研究钠导星MCAO系统,不仅能够提升我国天文观测以及天体测量方面的水平,还能推动我国下一代大口径地基望远镜[如我国12 m大型光学/红外望远镜(LOT)^[10]]的发展。

钠导星MCAO系统提出后,国内外各研究单位对其开展了大量理论和实验分析。最初研制的MCAO系统主要用于对太阳表面进行观测,太阳表面的黑子可以作为验证MCAO实验的理想信标^[11],如德国VTT^[12]和GREGOR^[13]望远镜MCAO系统,美国的

收稿日期: 2022-12-21; 修回日期: 2023-01-12; 录用日期: 2023-02-08; 网络首发日期: 2023-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(62105047)、中国博士后科学基金(2021M703593)、重庆市自然科学基金面上项目(cstc2020jcyj-msxmX0727)

通信作者: *wh-99@126.com

NST^[14]望远镜 MCAO 系统。2000 年, Fusco 等^[15]分析了 3 颗导星之间分离距离对 MCAO 系统性能影响。2010 年, Gilles 等^[16]分析了钠导星发射望远镜位置对 TMT 的 MCAO 系统性能的影响。2011 年, 电子科技大学 Zhang 等^[17]研究了共轭高度对 MCAO 系统性能的影响。2013 年, 中国科学院光电技术研究所张兰强等^[18]对模式层析技术的模式混淆和模式耦合误差进行了分析。2015 年, Basden^[19]利用蒙特卡罗算法, 分析了变形镜(DM)数量和共轭高度、导星数量对 MCAO 系统性能的影响。2016 年, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所宣丽(Xuan)等^[20]研究了共轭高度以及导星数量对 MCAO 系统层析性能的影响。2022 年, 中国科学院理化技术研究所卞奇等^[21]利用 20 W 微秒脉冲激光器, 在丽江天文台成功激发不同分布形状的钠导星星群, 为我国钠导星 MCAO 系统的外场实验奠定了基础。但是, 前期的研究主要集中在 MCAO 系统层析原理、湍流相位屏的最佳等效、变形镜共轭高度、导星类型及导星回光强度等方面, 而钠导星数量、星群排布方式作为影响夜天文 MCAO 系统层析性能的关键因素, 国内外对其研究还比较少。

本文基于目前世界上现存大口径以及我国正在筹建的下一代 10 m 量级口径望远镜, 并以观测尘埃碎盘

需要的 1' 视场^[22]为对象进行研究分析。首先论述基于星向模式法的 MCAO 层析算法基本原理。其次, 利用钠导星星群对两层大气层析进行了仿真验证和性能分析。最后, 以视场内 H 波段 SR 均值 $\overline{R_s}$ 和归一化标准差作为评价指标, 针对不同钠导星数量以及排布进行优化, 得出的一套优化钠导星星群分布的普适方法。这将为钠导星星群发射系统和后续 MCAO 系统设计奠定理论基础。

2 基本原理

基于钠导星的 MCAO 系统基本原理如图 1 所示。利用多颗离轴的钠导星, 并对每颗钠导星配备一台哈特曼波前传感器(WFS), 通过对不同视线方向上的湍流像差积分, 得到每个钠导星视线方向的湍流信息。再利用大气层析技术, 通过投影矩阵重构出视场内不同高度的湍流信息。最后利用多个变形镜, 对湍流进行分层共轭校正, 从而达到扩大 FOV 的目的。考虑到探测器的发展和加工工艺成熟性、求解重构矩阵的计算维度的复杂性以及能否扩展到非圆型瞳面(如中心遮拦的瞳面)等方面^[23], 本文主要对基于星向探测方式结合模式层析技术的 MCAO 系统进行分析。

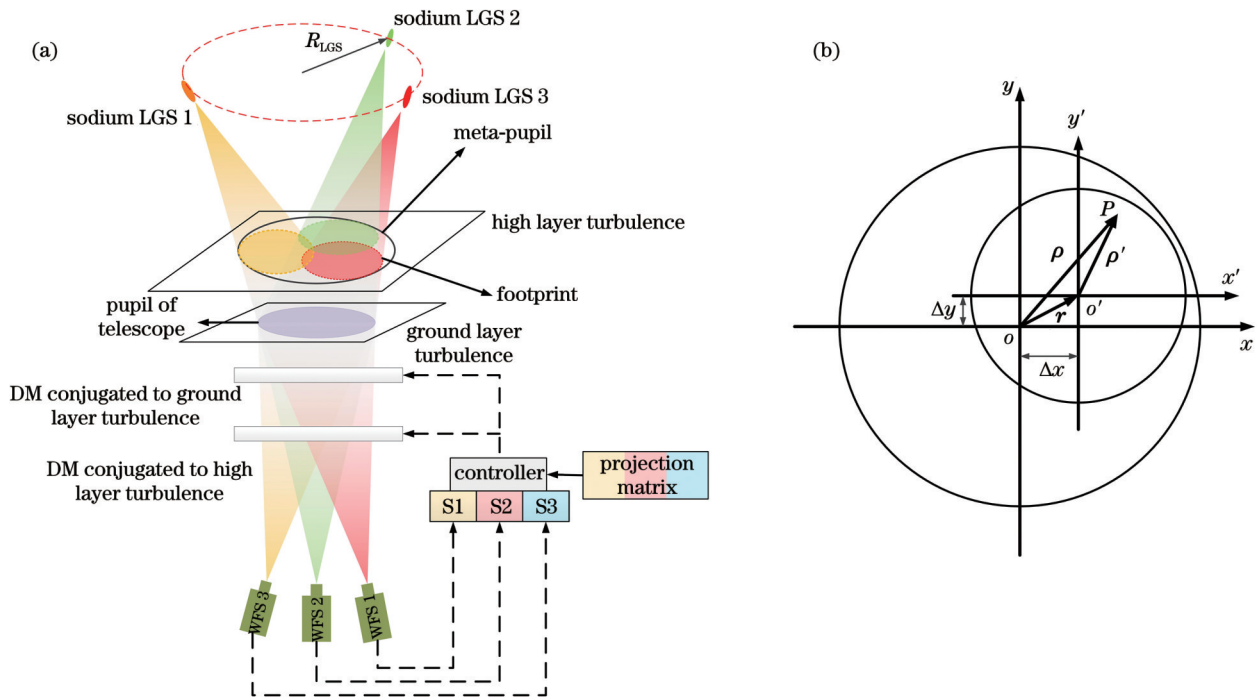


图 1 基于钠导星的 MCAO 系统基本原理。(a) 三颗钠导星层析两层湍流示意图; (b) 视场内足迹区与元瞳面坐标变换关系示意图, 其中 xoy 是元瞳面坐标系, $x'o'y'$ 为足迹区坐标系

Fig. 1 Principle of MCAO system based on sodium LGSs. (a) Schematic diagram for two-layer turbulent tomography by MCAO system with three sodium LGSs constellation; (b) transformation of coordinates between footprint and meta-pupil, where xoy is for meta-pupil coordinates and $x'o'y'$ is for footprint coordinates

口径为 D 的望远镜在某一高度为 h 的湍流上视场包含的大区域称为元瞳面, 其直径为 $D_M = D + h \times \theta_{FOV}$, θ_{FOV} 为望远镜视场角。钠导星在该层

湍流上覆盖的圆形区域称为足迹区, 其直径为 $D_f = (H_{Na} - h)/H_{Na}$, 其中 H_{Na} 为钠导星的高度, 一般取 90 km。

2.1 MCAO 层析湍流基本原理

假设大气分为 M 层, 共 N 颗钠导星 ($N > M$), 波前探测器探测到第 i 颗钠导星视线路径上累积的波前像差用泽尼克多项式系数表示为^[24]

$$\mathbf{L}_i = [a_4 a_5 \cdots a_P]^T, \quad (1)$$

式中: a_k 表示第 k 阶泽尼克多项式系数。第一阶平移像差无法被哈特曼探测器探测, 钠导星无法探测第二阶和第三阶倾斜信息, 因此本项目中钠导星能探测的像差从第 4 项离焦像差至第 P 阶, 共 $P-3$ 阶泽尼克像差。

第 i 颗钠导星在第 j 层湍流层上经历的像差泽尼克展开系数可以记为 \mathbf{L}_{ij} 。由于足迹区内的像差泽尼克展开式可以用元瞳面内像差泽尼克展开式线性表示, 因此有

$$\mathbf{L}_i = \sum_{j=1}^M \mathbf{L}_{ij} = \sum_{j=1}^M \mathbf{A}_{ij} \mathbf{W}_j, \quad (2)$$

式中: \mathbf{A}_{ij} 为投影矩阵; \mathbf{W}_j 为第 j 层湍流上元瞳面内像差的泽尼克系数。

每颗钠导星探测到的像差与每一层湍流上元瞳面内像差的关系如下式所示:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{L}_1 \\ \mathbf{L}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{L}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} & \cdots & \mathbf{A}_{1M} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} & \cdots & \mathbf{A}_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{A}_{N1} & \mathbf{A}_{N2} & \cdots & \mathbf{A}_{NM} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{W}_1 \\ \mathbf{W}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{W}_M \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: 投影矩阵可以表示为

$$\mathbf{A}_{ij} = \begin{bmatrix} a_{44} & a_{45} & \cdots & a_{4P} \\ 0 & a_{55} & \cdots & a_{5P} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & a_{PP} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

投影矩阵中各元素主要由相应钠导星足迹区与对应的湍流层上的元瞳面位置决定^[25]:

$$a_{mm} = \pi^{-1} \cdot \int Z_n(\Delta x + kx, \Delta y + ky) \cdot Z_m(x, y) dx dy, \quad (5)$$

式中: Δx 、 Δy 为足迹区坐标系原点与元瞳面坐标系原点在 x 、 y 方向上偏移的距离, 如图 1(b) 所示; Z_n 和 Z_m 分别代表第 n 阶和第 m 阶泽尼克多项式; k 为足迹区直径与元瞳面直径的比值。

由于每颗钠导星在每一层湍流上的位置不同, 根据每颗钠导星在每一层湍流上的投影位置, 可以逐一计算出投影矩阵 \mathbf{A}_{ij} , 其尺寸为 $(P-3) \times (P-3)$ 。因此, 式 (3) 中 \mathbf{A} 矩阵的尺寸为 $[N \cdot (P-3)] \times [M \cdot (P-3)]$ 。由于元瞳面内任意一阶泽尼克项只能由足迹区内径向频率更低的项来表示, 当足迹区所覆盖的范围特别小的时候, 仅需要前几阶泽尼克多项式即能很好地拟合波前畸变, 此时投影矩阵 \mathbf{A}_{ij} 是一个上三角矩阵。当足迹区与元瞳面重合的时候, 元瞳面波前畸变泽尼克展开系数与足迹区泽尼克展开系数相同, 此时 \mathbf{A}_{ij} 变成了单位矩阵。由于足迹区总属于元瞳面的子集, 即 k 永远小于等于 1, 因此, 投影矩阵中所有元素

的绝对值小于 1。

式 (3) 可以写为

$$\mathbf{L} = \mathbf{A} \mathbf{W}. \quad (6)$$

复原出来的每一层湍流可以表示为

$$\mathbf{W} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{L}, \quad (7)$$

式中: \mathbf{A}^{-1} 为 \mathbf{A} 矩阵的逆。

2.2 MCAO 系统复原性能评价指标

评价 MCAO 系统的主要指标为斯特列尔比, 计算时将 $1'$ 内的视场平均划分为有限个离散点, 每个离散点的方向上放置一颗无限远观测目标, 然后计算出每颗目标方向上的 SR, 即可得到整个视场内的 SR 分布。另一方面, 由于 MCAO 主要实现大视场内湍流校正, 因此, 评价 MCAO 校正湍流的性能除了考虑单点的校正效果, 还需要考虑整个视场内校正效果的均匀性。本文主要采用视场内平均 SR 和视场内 SR 分布的归一化标准差 (STD, D_{ST}) 来对系统性能进行评价。

视场内平均 SR 表示为

$$\overline{R_s} = \frac{\sum_{i=1}^N R_s(i)}{N}, \quad (8)$$

式中: $R_s(i)$ 代表视场内第 i 个网格点上的 SR 值, 视场内的区域一共被划分为了 N 个网格点。

STD 可以表示为

$$D_{ST} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [R_s(i) - \overline{R_s}]^2}{N}} / \overline{R_s}. \quad (9)$$

STD 值越小, 表示视场内 MCAO 系统校正的均匀性越好。

3 层析仿真

为了保证钠导星星群的采样能覆盖整个视场内湍流, 考虑将 3 颗钠导星放置于视场边缘呈正三角形分布, 钠导星星群分布半径 (即正三角形外接圆半径) 用 R_{LGS} 表示。湍流模型采用 Hufnagle-Valley 模型来描述大气湍流的垂直分布, 该模型对国内天文台站址较为合适^[26-27], 其特征是在地表层 (0 km 处) 和对流层 (8 km 处) 由于有风的剪切运动导致较强的扰动, 所以本文仿真中将湍流等效为 2 层。

首先, 根据钠导星分布位置计算投影矩阵。其次, 利用 OOMAO 仿真程序包^[28] 完成大气湍流相位屏生成、激光传输、哈特曼波前传感器波前探测等功能, 该程序包是欧南台开发的基于 MATLAB 的仿真平台, 已经用于大麦哲伦和 E-ELT 等大望远镜自适应光学系统分析。第三, 利用层析算法, 对湍流进行分层复原。最后, 根据复原后视场内残差, 得到整个视场内的 SR 分布, 并计算 $\overline{R_s}$ 和归一化后 STD 值。

3.1 仿真条件

仿真时, 地表层湍流被离散为 250×250 个网格

点。为了保证相同采样尺度,高层湍流被离散为 308×308 个网格点。具体仿真条件设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数及典型值
Table 1 Main parameters for simulation

Type	Variable	Value	Description
Atmosphere	r_0 / cm	8	Fried parameter (@550 nm)
	F_{sampling} / Hz	500	Sampling frequency
	H_i / km	0, 8	Turbulent layer altitude
	S_i	0.7, 0.3	Turbulent layer relative strength
Telescope	D / m	10	Diameter of telescope
	θ_{FOV} / (')	1	Field of view
	λ	H band	Observation band
	θ_T / ($^\circ$)	0	Zenith angle of telescope
Sodium LGS	H_{LGS} / km	90	Altitude of LGSs
	n	3	Number of LGSs
	R_{LGS} / (")	41.459	Zenith angle of each LGS
	Azimuth angle / ($^\circ$)	0, 120, 240	Azimuth angle of each LGS
	λ_{LGS} / nm	589.159	Wavelength of sodium LGS
	M	0	Magnitude of LGS
WFS	d / m	0.4	Diameter of sub-aperture of WFS
	Sub-aperture resolution / pixel	10×10	Number of pixel in each sub-aperture
	Zernike order	105	Order for Zernike polynomials decomposition
	K	25×25	Sub-aperture number of WFS

3.2 仿真结果

首先,根据每颗钠导星在两层湍流上足迹区与元瞳面的位置关系,计算出投影矩阵 \mathbf{A} ,结果如图 2 所示。由于湍流只分为两层,一共 3 颗钠导星,泽尼克像差校正至 105 阶,因此,整个投影矩阵的尺寸为 306×204 ,其中左侧 102 列表示 3 颗钠导星在高层湍流上的投影关系,右侧 102 列表示 3 颗钠导星在地表层湍流上的投影关系。

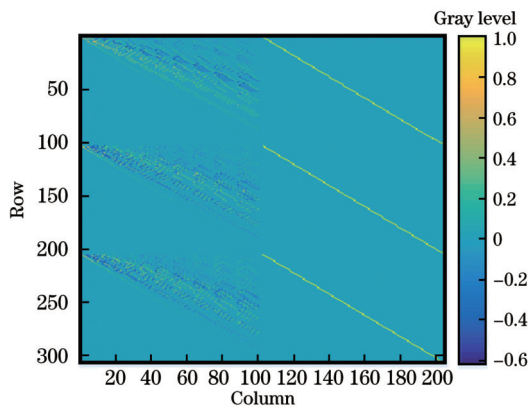


图 2 3 颗钠导星星群投影矩阵灰度分布

Fig. 2 Gray map of projection matrix for three sodium LGSs constellation

求得投影矩阵 \mathbf{A} 之后,利用式 (7) 对湍流 \mathbf{W} 进行复原。图 3 所示为某一帧大气湍流与其层析复原的结果。其中,地表层大气相位残差的峰-谷 (PV) 值为 41.8123 rad,均方根 (RMS) 值为 5.5728 rad;高层大气残差的 PV 值为 26.9733 rad, RMS 值为 14.0805 rad。可以发现,地表层复原的效果优于高层大气,其原因是每颗钠导星对地表层元瞳面内湍流采样更完备。同时,放置钠导星的方向上残差值更小。

根据层析后的残差,计算 SR 时采用对第二层湍流 (尺寸为 $308 \text{ pixel} \times 308 \text{ pixel}$) 每个网格的位置进行隔行隔列扫描,一共得到 656 个点,根据每个点的天顶角和方位角,设置一个无穷远目标,随后得到这个点的 SR 值^[29]。最后采用双线性插值的方式,得到整个视场内共 78852 个点的 SR 值。SR 分布图如图 4 所示。可以发现,在放置钠导星的视线方向 SR 值最高,可达 0.69,在两颗钠导星视线交界处 SR 较低,为 0.45 左右。

由于大气湍流是一个随机变化过程,随后,仿真了 1 s 内随大气湍流变化的 500 帧 SR 分布,并计算了 1 s 内视场内的 SR 平均值 (0.42) 和归一化 STD 平均值 (0.226),其演变过程如图 5 所示。可以

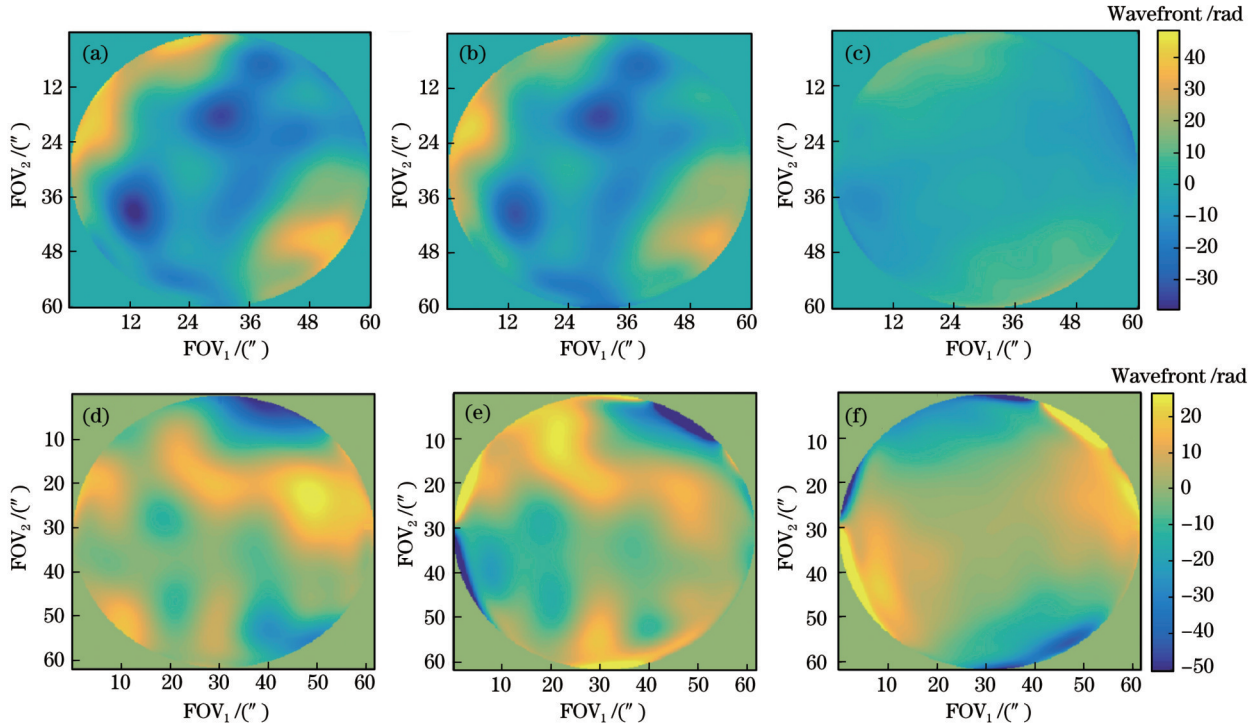


图 3 3 颗钠导星层析两层湍流仿真结果。第一行代表地表层湍流, 第二行代表高层湍流。(a), (d) 湍流原始波前; (b), (e) 层析复原的波前; (c), (f) 层析复原后残差

Fig. 3 Simulated results of wavefront reconstruction with two layers of atmospheric turbulence and three sodium LGSs through tomography. Upper row for ground layer turbulence and lower row for high layer turbulence. (a), (d) Initial distorted wavefront; (b), (e) reconstructed wavefront through tomography; (c), (f) residual error

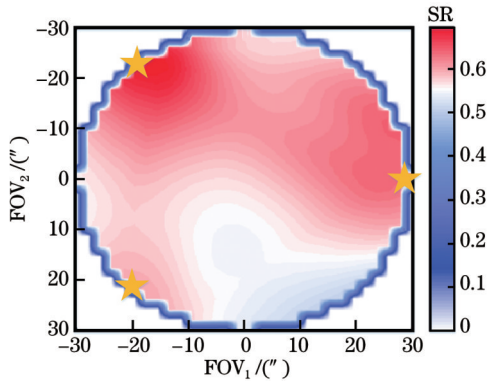


图 4 3 颗钠导星 MCAO 系统校正后 SR 分布图, 黄色的五角星代表钠导星实际位置

Fig. 4 SR map obtained by MCAO system with three sodium LGSs, with yellow pentagrams representing sodium LGSs

发现, 当 SR 较高时, STD 相对较低, 说明校正效果较好。

4 讨论

4.1 钠导星数量及排布方式对 MCAO 层析结果影响

不同钠导星数量以及星群排布方式对湍流采样的位置、足迹区对湍流的覆盖比例以及各足迹区之间湍流相关性不同, 从而层析出每一层湍流的精度不同, 相应的 MCAO 校正效果也不同。另一方面, 虽然增加钠

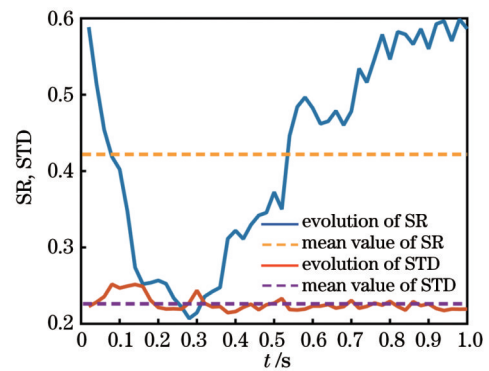


图 5 1 s 时间内 500 帧 3 颗钠导星 MCAO 系统校正效果演变过程

Fig. 5 Performance evolution of 500 frames for MCAO system with three sodium LGSs during 1 s

导星的数量对整个视场内湍流的采样更加全面, 减小了圆锥效应, 但是, 对湍流采样的比例增加量却不断减少最后收敛, 当钠导星达到一定数量之后, 再增加钠导星数量, 系统校正效果所获得的增益并不明显, 还将极大地增加系统的成本和复杂性。因此, 在 MCAO 系统校正性能和钠导星数量二者之间存在折中点。图 6 所示为 4~6 颗钠导星不同排布方式形成的星群, 其中 $n+1$ 代表 n 颗钠导星均匀分布 (正 n 边形的顶点位置) 于半径为 R_{LGS} 的圆环上 (此时 R_{LGS} 为 $41.459''$), 并在视场正中间放置 1 颗钠导星。

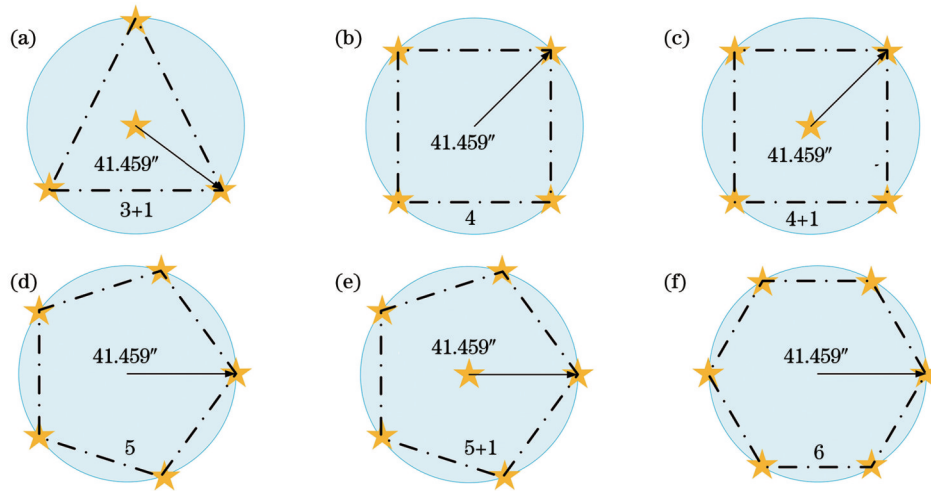


图 6 不同钠导星数量和分布的星群。(a)3+1;(b)4;(c)4+1;(d)5;(e)5+1;(f)6

Fig. 6 Constellations of sodium LGSs with different numbers and located at different positions. (a) 3+1; (b) 4; (c) 4+1; (d) 5; (e) 5+1; (f) 6

图 7 所示为以上 6 种情况下, 仿真获得的视场内的同一帧 SR 分布图。图 8 所示为以上 7 种情况中(包括 3 颗钠导星的情况), 1 s 时间内 500 帧的平均和平均 STD。可以发现, 当采用 3 颗钠导星排布的星群进行探测时, 由于对整个视场内中心区域湍流采样不足, 故整体的 SR 值较低, 为 0.42 左右。随着钠导星数量的增加, SR 值不断增加。当钠导星星群采用 3+1 和 5+1 排布方式时, 所获得的视场内平均 SR

最高, 可达 0.53; 当 4 颗钠导星呈正方形排布位于视场边缘时, 视场内平均 SR 有所下降, 随后, 随着钠导星数量的增加, 视场内平均 SR 不断增加至与 3+1 以及 5+1 排布方式相当的程度。但是, 当星群采用 6 颗钠导星分布于视场边缘时, 较 5+1 排布方式有所下降, 其原因是因为钠导星之间间距减小, 各钠导星探测的湍流相关性增加, 同时中心位置探测较为空缺。

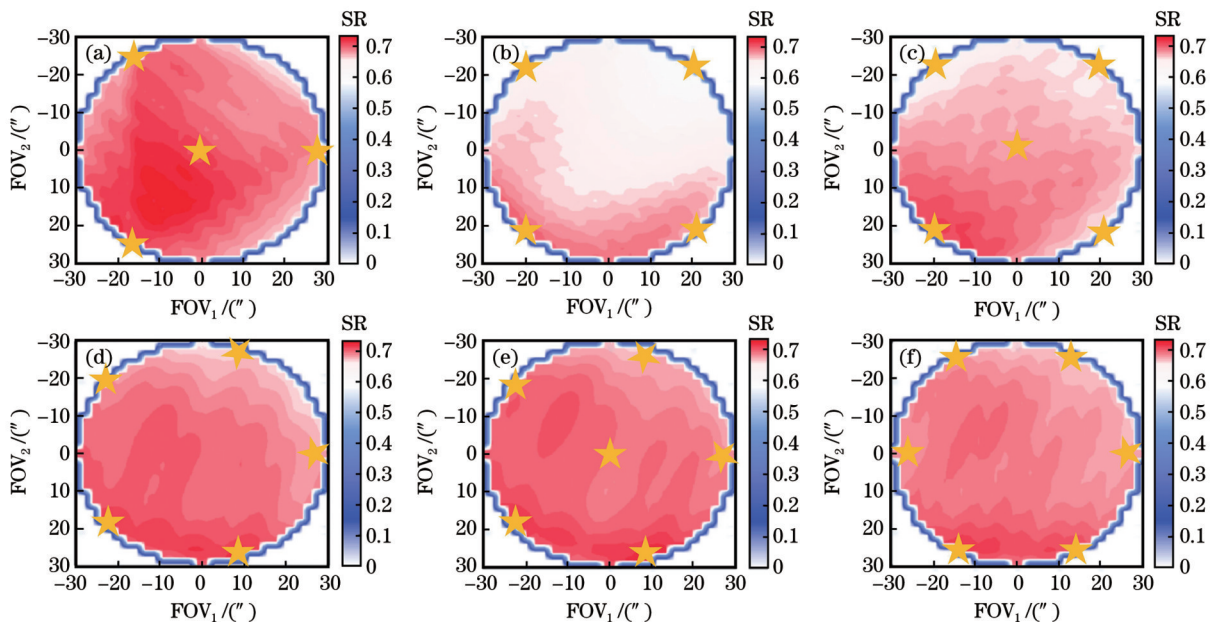


图 7 不同钠导星数量和排布的 MCAO 系统校正后 SR 分布图, 黄色的五角星代表钠导星实际位置。(a)3+1;(b)4;(c)4+1;(d)5;(e)5+1;(f)6

Fig. 7 SR maps obtained by MCAO systems for sodium LGS constellations with different numbers and configurations, with yellow pentagrams representing sodium LGSs. (a) 3+1; (b) 4; (c) 4+1; (d) 5; (e) 5+1; (f) 6

在所有排布方式中, 视场内的 STD 值波动都不大, 且取值较小, 在 0.22~0.23 范围内, 足以说明当采用以上 7 种排布方式的钠导星阵列对两层湍流进行探测时, 能够保证 1' 视场内湍流校正的均匀性。

4.2 钠导星星群分布天顶角 R_{LGS} 对 MCAO 层析结果的影响

当钠导星分布的位置从视场边缘逐渐向中心汇聚时, 每颗钠导星探测的湍流之间的相关性也在不断增

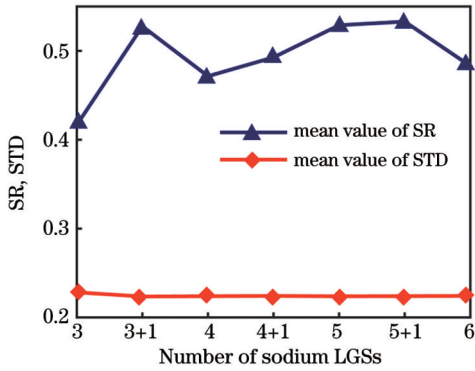


图8 不同钠导星数量和分布的星群MCAO系统校正后SR平均值和STD平均值

Fig. 8 Mean values of SR and STD obtained by MCAO systems for sodium LGS constellations with different numbers and configurations

加,因此,钠导星星群分布天顶角也是影响系统性能的重要指标。本节主要针对4.1节中7种钠导星排布方式, R_{LGS} 分别为 $41.459''$, $38''$, $34''$, $30''$, $26''$, $22''$, $18''$, $14''$, $10''$, $6''$ 几种情况,计算1s内500帧图像SR的平均值,并对其结果进行了三次多项式拟合,其结果如图9所示。

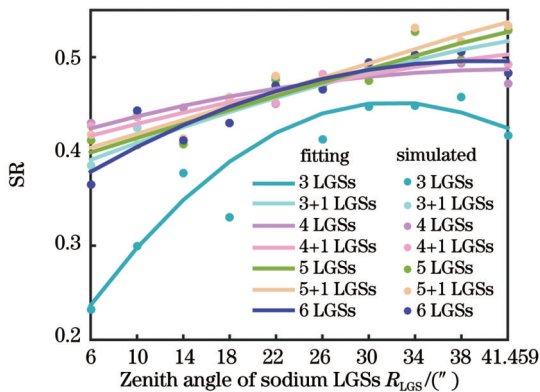


图9 星群导星天顶角对系统性能的影响

Fig. 9 Influence of zenith angle of sodium LGSs on performance of MCAO system

从图9可以发现,当仅有3颗导星时,无论 R_{LGS} 为多少,SR均小于其他排布方式相应 R_{LGS} 的情况,原因就是3颗钠导星对湍流的采样不如其他情况完备。若钠导星星群采用此种排布,存在一个最优的 R_{LGS} ,这个最优值在 $26''\sim 30''$ 之间,即为望远镜观测视场大约一半的位置。当 R_{LGS} 小于最优值时,每颗钠导星足迹区之间重叠部分较多,导致相关性特别强,但是高层湍流边缘部分没有被钠导星的足迹区覆盖,因此复原出来的湍流与实际湍流差别较大;当 R_{LGS} 大于最优值时,虽然钠导星足迹区把高层湍流边缘部分的湍流覆盖了,由于各导星之间相关性太差,因此复原出来的效果也会降低。

当采用其他钠导星排布方式时,随着星群中钠导星天顶角的增加,1'视场内SR呈现增加的趋势,位于 $0.4\sim 0.55$ 之间。当天顶角大于 $26''$ 时,视场内SR平均

值基本大于0.45,采用5+1颗导星排布时整个视场内SR最高;当天顶角小于 $26''$ 时,视场内SR平均值位于 $0.4\sim 0.45$ 之间,采用4颗导星的排布方式时整个视场内SR最高。可以发现,当钠导星分布的天顶角较大时,采用中心放置钠导星的排布方式增加各导星探测湍流之间的相关性,能明显增强MCAO系统校正的效果。

随后计算了钠导星分布天顶角对视场均匀性的影响,结果如图10所示。从图10可以发现,对于同一种钠导星星群排布方式,随着导星天顶角的增加,STD逐渐降低。其原因是当天顶角较小时,对高层湍流采样不完备,导致视场内中心处SR较高,但是边缘由于未采样而SR较低,整个视场内SR起伏较大;天顶角的增加将使星群对高层湍流采样的完备性增加,提升边缘处的SR,减小SR的起伏。天顶角为 $26''$ 附近为分界点,即望远镜视场一半的位置附近:当钠导星天顶角小于 $26''$ 时,4颗钠导星的排布方式视场内均匀性最好;当钠导星天顶角大于 $26''$ 时,采用4+1颗钠导星时视场内均匀性最好。当导星放置于视场边缘时,采用3+1、4、4+1、5和5+1排布方式,视场内STD值已经非常接近,均匀性基本相当。其原因是各钠导星之间间隔已经较小,对整个视场内湍流覆盖较完备,整个视场内校正效果的均匀性均较好。因此,对于1'观测视场,采用4颗及以上钠导星星群,校正后的均匀性就已经较好。

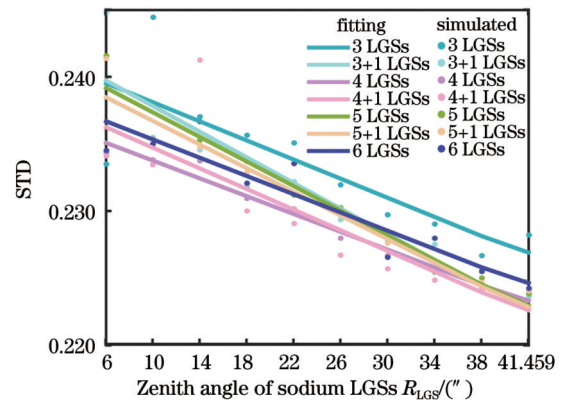


图10 星群导星天顶角对系统校正均匀性的影响

Fig. 10 Influence of zenith angle of sodium LGSs on uniformity of MCAO system

5 结 论

本文根据大气层析的基本原理,建立了MCAO系统基本模型。随后,基于OOMAO仿真平台,以视场内SR和STD为评价指标,分析了不同钠导星数量对MCAO系统性能的影响。最后,分析了钠导星星群排布方式对MCAO系统性能的影响。得到以下结论:

(1) 当星群中的导星均匀排布于视场边缘时,在钠导星视线方向上SR值较高,两颗钠导星视线交界处SR值较低。

(2) 对于 1' 观测视场, 4 颗钠导星能比较全面地探测视场内的湍流信息。其中, 当钠导星放置于天顶角较大的位置时, 中心放置 1 颗钠导星, 其余 3 颗均匀分布在圆周上的排布方式能够明显提升系统的性能。

(3) 当星群分布的半径小于视场一半时, 采用 4 颗钠导星呈正方形排布的形式, 视场内 SR 最优; 当星群半径大于视场一半时, 采用 5+1 颗钠导星的排布方式视场内 SR 最优。

(4) 在 1' 的观测视场内, 当星群内导星分布方式固定时, 随着星群分布半径的增大, 视场内均匀性增加, 同时, 当导星数量达到 4 颗时, 整个视场内均匀性就已经较好。

参 考 文 献

- [1] 冯麓, 张玉佩, 宋菲君, 等. 夜天文中的自适应光学[J]. 物理, 2018, 47(6): 355-366.
Feng L, Zhang Y P, Song F J, et al. Adaptive optics for night astronomy[J]. Physics, 2018, 47(6): 355-366.
- [2] Wizinowich P, Le Mignant D, Bouchez A, et al. The W. M. Keck Observatory laser guide star adaptive optics system: overview[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2006, 118(840): 297-309.
- [3] 董若曦, 李敏, 晋凯, 等. 夏克-哈特曼波前传感器双星波前误差测量计算大气非等晕误差的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(21): 2101001.
Dong R X, Li M, Jin K, et al. Research on double star wavefront error detection with Shack-Hartmann wavefront sensor to calculate piston-removed anisoplanatic error[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(21): 2101001.
- [4] 陈天江, 王锋, 李新阳, 等. 基于多种激光参数泵浦的钠导星回光强度研究[J]. 中国激光, 2020, 47(8): 0801001.
Chen T J, Wang F, Li X Y, et al. Return intensity of sodium guide star based on pumping under multiple laser parameters[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(8): 0801001.
- [5] Rigaut F, Neichel B. Multiconjugate adaptive optics for astronomy[J]. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 2018, 56: 277-314.
- [6] D'Orgeville C, Diggs S, Fesquet V, et al. Gemini South multi-conjugate adaptive optics (GeMS) laser guide star facility on-sky performance results[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8447: 84471Q.
- [7] Gaetano S, David P, Julia S, et al. Gemini North Adaptive Optics (GNAO): an MCAO system for Gemini North towards conceptual design[EB/OL]. [2022-10-06]. <https://www.gemini.edu/files/gemma/AO4ELT6%20Proceedings/GNAO%20Conceptual%20Design.pdf>.
- [8] Advanced image search[EB/OL]. [2022-10-06]. https://www.eso.org/public/images/archive/search/list/13/?adv=&subject_name=Very+Large+Telescope.
- [9] Shah S, Subramanian S, Anupama G C, et al. Towards the development of the Infrared Guide Star Catalogue for the adaptive optics observations by the Thirty Meter Telescope[J]. Proceedings of SPIE, 2022, 12185: 1218506.
- [10] Ma D L. Recommended conceptual optical system design for China's Large Optical-infrared Telescope (LOT) [J]. Optics Express, 2018, 26(1): 108-119.
- [11] 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.
Rao C H, Zhu L, Zhang L Q, et al. Development of solar adaptive optics[J]. Opto-Electronic Engineering, 2018, 45(3): 170733.
- [12] Berkefeld T, Soltau D, von der Luehe O. Multiconjugate adaptive optics at the Vacuum Tower Telescope, Tenerife[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4839: 544-553.
- [13] Berkefeld T, Soltau D, von der Luehe O. Multi-conjugate solar adaptive optics with the VTT and GREGOR[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6272: 627205.
- [14] Langlois M, Moretto G, Richards K, et al. Solar multiconjugate adaptive optics at the Dunn Solar Telescope: preliminary results[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5490: 59-66.
- [15] Fusco T, Conan J M, Michau V, et al. Isoplanatic angle and optimal guide star separation for multiconjugate adaptive optics[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4007: 1044-1055.
- [16] Gilles L, Wang L Q, Ellerbroek B L. Impact of laser launch location on the performance of laser tomography and multiconjugate adaptive optics for extremely large telescopes[J]. Applied Optics, 2010, 49(31): 114-119.
- [17] Zhang X H, Rong J, Wang Z J, et al. The stratified altitude which is suitable for four seasons is further identified[C] // 2011 International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC), September 9-11, 2011, Ningbo, China. New York: IEEE Press, 2011: 4028-4030.
- [18] 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.
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.
- [19] Basden A G. Monte Carlo modelling of multiconjugate adaptive optics performance on the European Extremely Large Telescope [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2015, 453(3): 3035-3042.
- [20] Xuan L, He B, Hu L F, et al. Configuration optimization of laser guide stars and wavefront correctors for multi-conjugation adaptive optics[J]. Chinese Physics B, 2016, 25(9): 094216.
- [21] 卞奇, 薄勇, 彭钦军, 等. 微秒脉冲激光钠导引星群技术研究(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(6): 11-16.
Bian Q, Bo Y, Peng Q J, et al. Technology of microsecond-pulse sodium laser guide stars asterism (Invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(6): 11-16.
- [22] Andersen M, Zinnecker H, Hirschauer A S, et al. The stellar content of H72.97-69.39, a potential super star cluster in the making[J]. The Astronomical Journal, 2021, 161(4): 206.
- [23] 颜召军, 杨朋千. 星向多层共轭自适应光学大气湍流三维波前模式复原算法分析[J]. 中国激光, 2015, 42(11): 1113002.
Yan Z J, Yang P Q. Modal reconstruction for three-dimensional wavefront of atmosphere turbulence in star oriented multi-conjugate adaptive optics[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(11): 1113002.
- [24] Roberto R, Enrico M, François R. Modal tomography for adaptive optics[J]. Astronomy and Astrophysics, 1999, 342: L53-L56.
- [25] Dong B, Ren D Q, Zhang X. Numerical analysis of modal tomography for solar multi-conjugate adaptive optics[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2012, 12(4): 465-471.
- [26] 王红帅, 姚永强, 钱璇, 等. 大气光学湍流模型计算方法[J]. 天文学报, 2012, 53(6): 527-537.
Wang H S, Yao Y Q, Qian X, et al. The method of modeling atmospheric optical turbulence[J]. Acta Astronomica Sinica, 2012, 53(6): 527-537.
- [27] 青春, 吴晓庆, 李学彬, 等. WRF 模式估算丽江高美古大气光学湍流廓线[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0913001.
Qing C, Wu X Q, Li X B, et al. Estimation of atmospheric optical turbulence profile by WRF model at Gaomeigu[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(9): 0913001.
- [28] Conan R, Correia C. Object-oriented MATLAB adaptive optics toolbox[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9148: 91486C.
- [29] 颜召军. 自适应光学系统预测控制及多层共轭技术研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2013: 92-93.
Yan Z J. Research on predictive control and multilayer conjugation technology of adaptive optical system[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2013: 92-93.

Study on Tomography Performance of Multi-Conjugated Adaptive Optics Affected by Configuration of Sodium Laser Guide Star Constellation

Huang Jian¹, Wang Gongchang^{2*}

¹Chongqing Key Laboratory of Manufacturing Equipment Mechanism Design and Control, School of Mechanical Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China;

²No. 32037 Unit of PLA, Yaoan, Yunnan 675300, China

Abstract

Objective Sodium laser guide star (LGS) adaptive optics (AO) mitigates the aberrations induced by atmospheric turbulence to achieve a near diffraction limited image, and acts as an essential setup for large ground-based optical telescopes. Unfortunately, the classical AO system with a single sodium LGS achieves good resolution within a field of view (FOV) smaller than several arcseconds in the visible wavelength range, which severely limits the application of AO system for observations of more objects. In order to increase the FOV, multi-conjugated adaptive optics (MCAO) was proposed. In MCAO, the atmosphere turbulence is sensed by sodium LGSs in different sights with independent wavefront sensors respectively, then a three-dimensional map of the atmosphere is reconstructed by tomography, and finally, the turbulence at different altitudes are compensated by a series of deformable mirrors (DMs), enhance the photon return of the LGSs, and so on. However, the number and configuration of the sodium LGSs are the main factors which can affect the tomography performance of the MCAO system. In our study, we report a method to optimize the number and configuration of the LGSs to maximize the tomography performance and uniformity within the FOV. We hope this work will be of guiding significance to the engineers of AO systems.

Methods In order to study the influence of sodium LGS constellation on the atmosphere turbulence tomography performance of the MCAO, for a 10 m diameter telescope with a FOV of $1'$, an atmosphere model for Lijiang Gaomeigu [median value of Fried parameter (r_0) is 8 cm at a wavelength of 550 nm] with a two-layer MCAO system is established, with the two layers located at 0 km and 8 km. The projection matrix for three sodium LGSs equispaced at the edge of the FOV can be calculated. Then, the LGSs are seen by three 25×25 Shack-Hartmann wavefront sensors independently to compute the MCAO high-order correction. At last, tomography is performed for the two turbulent layers. The research is numerically studied by using the OOMAO simulation platform. The Strehl ratio (SR) map at H band in the FOV is obtained, as shown in Fig. 4. The mean value of SR, $\overline{R_s}$, and the normalized standard deviation (STD) of the SR map are used to evaluate the tomography performance and uniformity of the MCAO.

Results and Discussions For the three sodium LGSs equispaced at the edge of the FOV, the simulation results show that the reconstructed wavefront at the ground layer is more accurate than that at the high layer. The reason is that the footprint from each LGS illuminates only a portion of the meta-pupil at the high layer, while the footprint and the meta-pupil are equal at the ground layer. Meanwhile, the maximum SR along the sight of LGS reaches 0.69, and the minimum SR 0.45 appears at the intersection of two LGS sights. At the same time, the performance evolution of 500 frame images for the MCAO system tomography with three sodium LGSs during 1 s is simulated. The mean values of SR and STD are 0.42 and 0.226, respectively.

Then, the turbulence tomography is performed for 3–6 sodium LGSs located at the vertices of regular polygons or the vertices combined with the center of FOV (Fig. 7), and the influence of the zenith angle of the regular polygons is also analyzed. Under the condition that the zenith angle is $41.459''$, the maximum value of $\overline{R_s}$ is 0.53 for the configurations of 3+1 and 5+1 LGSs. For all configurations of the constellations, the values of STD in the FOV range from 0.22 to 0.23. For the zenith angles ranging from $6''$ to $41.459''$, the performance of three LGSs located at the vertices of a triangle reaches the optimum when the zenith angle is half of the FOV. For other constellations, the SR is improved from 0.4 to 0.55 with the increase of the zenith angle (Fig. 9) and the STD is decreased when the zenith angle is increased (Fig. 10).

Conclusions In our study, for a MCAO with several LGSs, the SR reaches the maximum along the sight of LGS while the minimum appears at the intersection of two LGS sights. For the FOV of $1'$, the turbulence can be detected comprehensively by the constellation of 3+1 LGSs with a large zenith angle of the regular polygons. For the zenith angle of the regular polygons less than half of the FOV, the SR reaches the maximum with the constellation pattern of 4 LGSs, while for the zenith angle larger than half of the FOV, the optimal performance is reached with the constellation configuration of 5+1 LGSs. For all the configurations of constellations, the uniformity is improved with the increase of the zenith angle, and for the configuration of constellation of 4 LGSs, a preferable uniformity can be obtained.

Key words adaptive optics; sodium laser guide star constellation; tomography; multi-conjugation; large ground-based telescope