

变形镜高斯函数指数对迭代法自适应光学系统的影响

程生毅 陈善球 董理治 王帅 杨平 敖明武 许冰

Influence of Gaussian function index of deformable mirror on iterative algorithm adaptive optical system

Cheng Sheng-Yi Chen Shan-Qiu Dong Li-Zhi Wang Shuai Yang Ping Ao Ming-Wu Xu Bing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 094207 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.094207

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094207>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I9>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

多波长激光雷达探测多种天气气溶胶光学特性与分析

Detections and analyses of aerosol optical properties under different weather conditions using multi-wavelength Mie lidar

物理学报.2014, 63(24): 244206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.244206>

Mach-Zehnder干涉仪条纹成像多普勒激光雷达风速反演及视场展宽技术

Wind velocity retrieval and field widening techniques of fringe-imaging Mach-Zehnder interferometer for Doppler lidar

物理学报.2014, 63(22): 224205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.224205>

激光波长对拉曼散射水温遥感系统测温精度及探测深度的影响

Effects of laser wavelength on both water temperature measurement precision and detection depth of Raman scattering lidar system

物理学报.2014, 63(16): 164209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.164209>

功率谱反演大气湍流随机相位屏采样方法的研究

Sampling methods of power spectral density method simulating atmospheric turbulence phase screen

物理学报.2014, 63(10): 104217 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.104217>

交连值对斜率响应矩阵和迭代矩阵稀疏度的影响

Influence of coupling coefficient on sparseness of slope response matrix and iterative matrix

物理学报.2014, 63(7): 074206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.074206>

变形镜高斯函数指数对迭代法自适应光学系统的影响*

程生毅¹⁾²⁾³⁾ 陈善球¹⁾³⁾ 董理治¹⁾³⁾ 王帅¹⁾³⁾ 杨平¹⁾³⁾
敖明武⁴⁾ 许冰^{1)†}

1)(中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

2)(中国科学院大学, 北京 100049)

3)(中国科学院自适应光学重点实验室, 成都 610209)

4)(电子科技大学, 成都 610054)

(2014年10月8日收到; 2014年11月12日收到修改稿)

基于613单元自适应光学系统, 描述了迭代矩阵和斜率响应矩阵的特性. 在变形镜驱动器间距和交连值不变的情况下, 研究了变形镜高斯函数指数对迭代矩阵和斜率响应矩阵稀疏度的影响, 对自适应光学系统稳定性和校正能力的影响. 研究表明, 迭代矩阵和斜率响应矩阵的稀疏度随着变形镜高斯函数指数的增大而减小. 高斯函数指数过大或者过小都会影响自适应光学系统的稳定性和校正能力. 最后, 综合迭代矩阵和斜率响应矩阵的稀疏度、自适应光学系统的稳定性和校正能力, 给出了合理的变形镜高斯函数指数的取值范围.

关键词: 变形镜高斯函数指数, 迭代矩阵, 斜率响应矩阵, 稀疏度

PACS: 42.68.Wt, 95.75.Qr, 07.05.Tp

DOI: 10.7498/aps.64.094207

1 引言

自适应光学(AO)技术被广泛应用于天文观测、激光大气传输等光学系统中, 实时校正由大气湍流引起的波前扰动^[1-5]. AO系统中, 根据波前传感器所探测的子孔径斜率信号计算波前校正器驱动电压信号的过程称为波前复原^[6]. 波前复原算法是自适应光学中的关键技术问题之一, AO系统工作稳定性和校正能力与波前复原算法密切相关, 国内外研究人员对此做了很多研究并提出了多种算法, 主要有模式法、区域法、直接斜率法等算法^[7], 直接斜率法因其省去了求波前误差的步骤而成为应用最广泛的波前复原算法. 在AO系统单元数较低的情况下, 直接斜率法可以较快的计算出变形镜驱动器上所加的驱动电压. 但随着AO

系统规模的扩大, 波前处理的数据量急剧增大, 直接斜率法波前复原算法所需的存储空间和计算时间急剧增大^[8,9]. 为解决该问题, 美国夏威夷的大望远镜自适应光学系统和欧洲南方天文台的多层共轭自适应光学系统中应用迭代算法进行波前复原^[10,11]. 迭代算法波前复原算法的运算复杂度和所需存储空间与迭代矩阵和斜率响应矩阵的稀疏度有直接关系, 迭代矩阵和斜率响应矩阵的稀疏度越高, 迭代算法所需的存储空间越小, 运算复杂度越低^[8,9,12]. 稀疏度定义为矩阵中零元素占矩阵总元素的比例^[13]. AO系统中, 迭代矩阵和斜率响应矩阵的稀疏度与系统参数密切相关, 因而研究系统参数的选取对迭代法AO系统的影响很有必要. 本文基于613单元AO系统, 分析了变形镜高斯函数指数对迭代矩阵和斜率响应矩阵稀疏度的影响, 研

* 国家重大科研装备研制项目(批准号: ZDYZ2013-2)、国家自然科学基金(批准号: 11173008)和四川省杰出青年学术技术带头人资助计划(批准号: 2012JQ0012)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: bing_xu_joe@163.com

究了变形镜高斯函数指数对AO系统稳定性和校正能力的影响,给出了高斯函数指数的合理取值范围.

2 迭代矩阵和斜率响应矩阵

AO系统中,变形镜驱动器电压到哈特曼波前传感器子孔径平均斜率之间的关系矩阵称为斜率响应矩阵,斜率响应矩阵的广义逆矩阵为传统波前复原算法的复原矩阵,斜率响应矩阵的转置矩阵与斜率响应矩阵的乘积为迭代算法波前复原算法的迭代矩阵.本节以613单元AO系统为例,给出了上述矩阵之间的关系.

图1给出了613单元AO系统的匹配关系,其中哈特曼波前传感器的子孔径呈正方形排布;变形镜中,距离任意一个驱动器最近的六个驱动器呈六边形排布;外围圆圈表示AO系统光束口径.

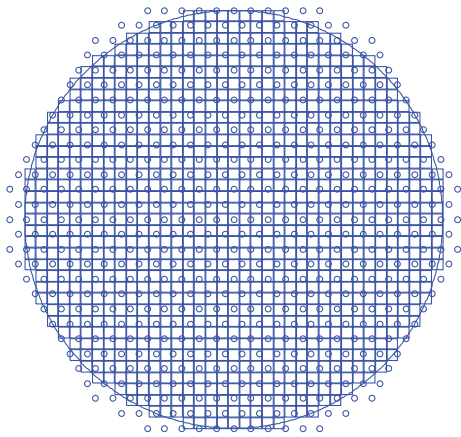


图1 613单元AO系统变形镜驱动器与哈特曼波前传感器子孔径匹配关系图

Fig. 1. Matching relation of the 613-actuator deformable mirror and the sub-apertures of Shack-Hartmann wavefront sensor.

AO系统中,哈特曼波前传感器子孔径的平均斜率量 G 与变形镜驱动器上所加电压 V 呈线性关系^[7]:

$$G = R_{xy}V, \quad (1)$$

矩阵 R_{xy} 为AO系统的斜率响应矩阵,图2给出了613单元AO系统的斜率响应矩阵 R_{xy} 的非零元素分布情况.其中,白色部分表示非零元素,黑色部分表示零元素.由于 R_{xy} 中绝对值小于最大值百分之一的元素对波前复原的影响可以忽略,因而将这部分元素按零元素处理.可以看出613单元AO系统的 R_{xy} 是一个稀疏矩阵.

设 g 为需要校正的波前像差斜率测量值,运用传统方法进行波前复原时,复原关系表示如下:

$$v = R_{xy}^+g, \quad (2)$$

其中, R_{xy}^+ 为传统波前复原算法的复原矩阵,它是矩阵 R_{xy} 的广义逆矩阵, v 为控制系计算需要施加到变形镜驱动器上的电压.图3给出了运用传统算法进行波前复原时的复原矩阵,复原矩阵 R_{xy}^+ 的黑色部分表示零元素,白色部分表示非零元素,可以看出613单元AO系统的复原矩阵是一个非稀疏矩阵.

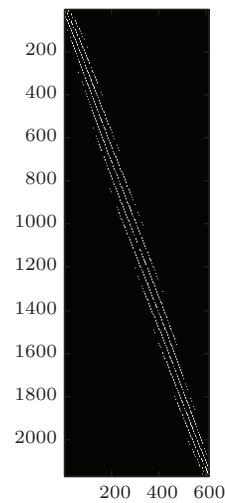


图2 613单元AO系统斜率响应矩阵

Fig. 2. Slope response matrix of the 613-actuator AO system.

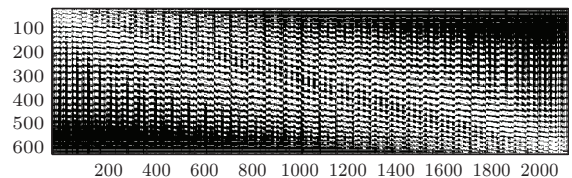


图3 613单元AO系统复原矩阵

Fig. 3. Reconstruction matrix of the 613-actuator AO system.

当AO系统单元数较大时,传统的复原方法运算量较大,现有的计算系统将难以满足大运算量的要求,因而我们运用迭代算法波前复原算法替代传统波前复原算法,复原关系如下:

$$R_{xy}^T R_{xy}v = R_{xy}^T g, \quad (3)$$

其中, R_{xy}^T 为矩阵 R_{xy} 的转置矩阵, $R_{xy}^T R_{xy}$ 为迭代矩阵, v 和 g 的定义与(2)式相同.从(2)式和(3)式可以看出,迭代算法波前复原算法通过迭代法求解加到变形镜驱动器上的电压值^[13],从而省去了对

斜率响应矩阵 R_{xy} 求广义逆矩阵. 图4给出了613单元AO系统迭代矩阵的非零元素分布情况, 其中白色部分表示非零元素, 黑色部分表示零元素, 可以看出613单元AO系统的迭代矩阵是一个稀疏矩阵.

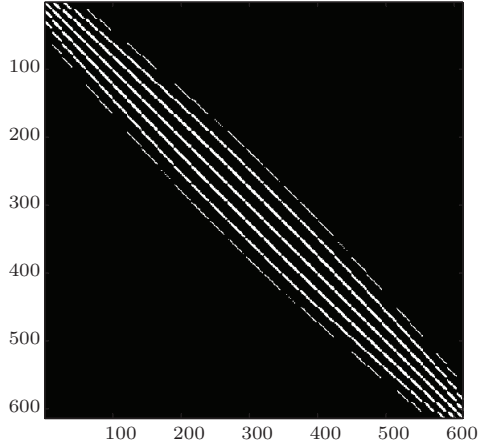


图4 613单元AO系统迭代矩阵

Fig. 4. Iterative matrix of the 613-actuator AO system.

从(2)式和(3)式可得, 传统复原算法的运算复杂度主要与复原矩阵 R_{xy}^+ 有关, 而迭代算法波前复原算法的运算复杂度主要与迭代矩阵 $R_{xy}^T R_{xy}$ 和斜率响应矩阵 R_{xy} 有关. 从图2、图3和图4可得, 613单元AO系统的斜率响应矩阵 R_{xy} 和迭代矩阵 $R_{xy}^T R_{xy}$ 中, 大部分元素为零, 而复原矩阵 R_{xy}^+ 是一个非稀疏矩阵. 对于单元数较多的AO系统, 运用迭代算法进行波前复原时, 应用稀疏矩阵向量乘的技术, 可远远降低算法的运算量和所占的存储空间[14,15]. 迭代矩阵 $R_{xy}^T R_{xy}$ 和斜率响应矩阵 R_{xy} 的稀疏度越高, 两矩阵所占的存储空间就越小, 运用迭代算法进行波前复原的运算复杂度也就越低.

3 高斯函数指数对迭代矩阵和斜率响应矩阵稀疏度的影响

变形镜的面形影响函数一般近似为高斯或超高斯函数[12,16]:

$$V_i(x, y) = \exp[\ln \omega (\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} / d)^\alpha], \quad (4)$$

其中 $V_i(x, y)$ 为变形镜第 i 个驱动器施加单位控制电压后变形镜的面形影响函数, (x_i, y_i) 为变形镜上第 i 个驱动器的位置, α 为变形镜高斯函数指数, ω 为变形镜驱动器交连值, d 为变形镜驱动器间距.

变形镜的面形可认为是各个驱动器加电压后产生的面形的线性叠加.

基于613单元AO系统, 设驱动器间距为归一化间距, 具体间距根据实际系统而定, 变形镜驱动器交连值为0.09, 在 $[0, 5]$ 范围内按0.1的抽样率选取变形镜高斯函数指数[12,16,17].

针对613单元AO系统, 分析变形镜高斯函数指数对迭代矩阵 $R_{xy}^T R_{xy}$ 和斜率响应矩阵 R_{xy} 稀疏度的影响. 图5给出了迭代矩阵 $R_{xy}^T R_{xy}$ 的稀疏度随高斯函数指数变化的曲线, 图6给出了斜率响应矩阵 R_{xy} 的稀疏度随高斯函数指数变化的曲线. 从图中可以得到以下结论: 迭代矩阵和斜率响应矩阵的稀疏度随高斯函数指数的增大而增大, 即高斯函数指数越大, 迭代矩阵和斜率响应矩阵越稀疏, 反之亦然. 这是由于当高斯函数指数较小时, 驱动器加单位电压时对整个镜面的影响范围较大, 高斯函数指数较大时, 驱动器加单位电压时对镜面的影响范围较小.

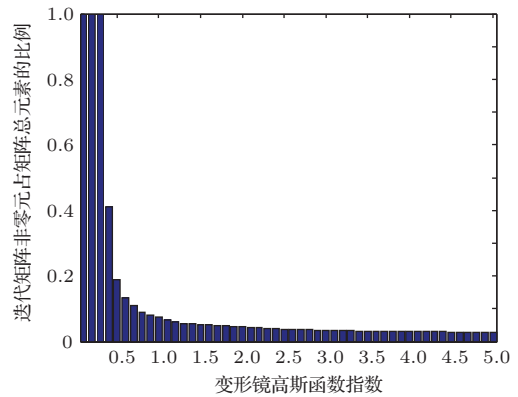


图5 高斯函数指数与迭代矩阵稀疏度的关系

Fig. 5. Influence of Gaussian function index on sparseness of the iterative matrix.

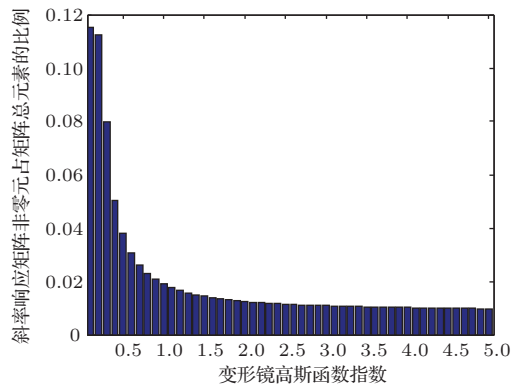


图6 高斯函数指数与斜率响应矩阵稀疏度的关系

Fig. 6. Influence of Gaussian function index on sparseness of the slope response matrix.

为了清楚显示迭代矩阵和斜率响应矩阵的稀疏度与高斯函数指数的关系,图7给出了它们的稀疏度随高斯函数指数变化的曲线。

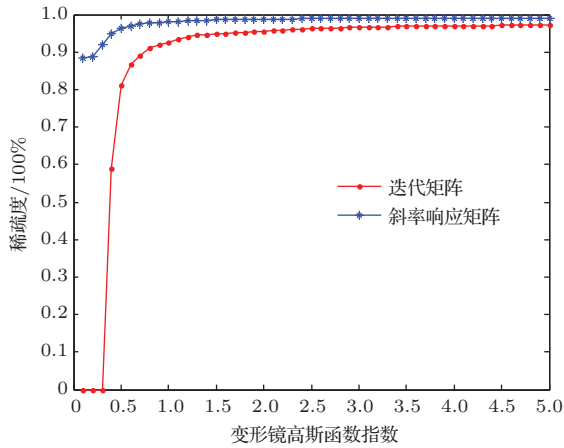


图7 (网刊彩色) 迭代矩阵与斜率响应矩阵稀疏度对比
Fig. 7. (color online) Comparison of sparseness between iterative matrix and slope response matrix.

从图7可以看出,迭代矩阵和斜率响应矩阵的稀疏度随着高斯函数指数的增大呈增大趋势,在(0, 0.5)区间内,两个矩阵的稀疏度增大幅度较为明显,当高斯函数指数大于1时,两矩阵稀疏度均已超过90%,之后随高斯函数指数的增大,迭代矩阵和斜率响应矩阵的稀疏度增长较为缓慢。

综合图5、图6和图7可得,高斯函数指数越大,迭代矩阵和斜率响应矩阵的稀疏度越高,迭代算法的优势就会越明显.因而在理想情况下,高斯函数指数越大越好,但对于一个实际的AO系统,变形镜高斯函数指数的取值范围还要根据系统的拟合能力和系统的稳定性等多方面因素来确定。

4 613单元AO系统最优高斯函数指数取值范围

由上一节分析可知,高斯函数指数的大小对迭代矩阵和斜率响应矩阵的稀疏度有直接影响,而AO系统的稳定性和校正能力与高斯函数指数的大小直接相关。

4.1 高斯函数指数的大小对AO系统校正能力的影响

AO系统的校正能力主要体现在校正后残余波前RMS值的大小,残余波前的RMS值越小, AO系

统的校正能力越好.由于AO系统对高阶像差和低阶像差的校正能力不同,本节对1到65阶Zernike像差分别进行校正,研究AO系统对每一阶像差的校正能力.设各阶像差的初始RMS值均为 $1\mu\text{m}$ ^[18],校正后残余波前的RMS值如图8所示.从图中可以看出,高斯函数指数取值在0或2.1附近时,变形镜对低阶像差的校正能力较好;高斯函数指数取值在(1.5, 3)区间内时,变形镜对于高阶像差的校正能力较好,高斯函数指数取值过大或者过小都会影响变形镜对高阶像差的校正效果。

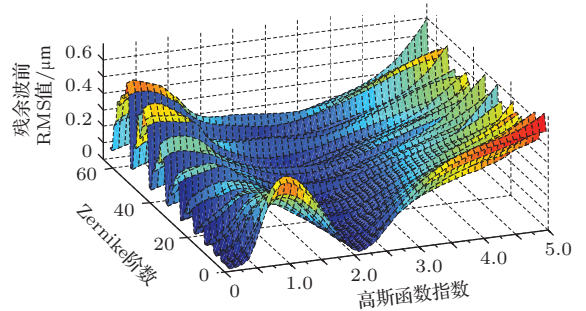


图8 高斯函数指数和Zernike阶次对残余波前RMS值得影响(μm)
Fig. 8. Influence of Gaussian function index and the number of Zernike polynomials on RMS of residual wavefront (μm).

为了可以更清楚的显示高斯函数指数的取值对低阶像差和高阶像差的校正能力的影响,图9给出了高斯函数指数取不同值时,变形镜对四组不同Zernike像差校正效果的曲线.从图中可以明显看出,高斯函数指数的取值在区间(2.0, 2.4)内时,变形镜对低阶像差和高阶像差的综合校正能力最强。

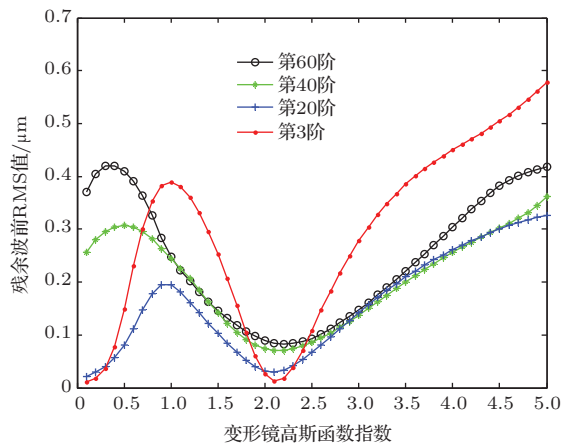


图9 (网刊彩色) 残余波前RMS值与高斯函数指数的关系
Fig. 9. (color online) Influence of Gaussian function index on RMS of residual wavefront.

4.2 高斯函数指数对大气湍流波前校正能力的影响

上一小节分析了高斯函数指数对不同阶次 Zernike 像差的校正能力, 但实际过程中, 需要校正的像差既含低阶成分, 又含高阶成分, 因而本节就变形镜对大气湍流像差的校正能力进行研究.

一般情况下, 大气湍流引起的像差符合 Kolmogorov 统计规律^[18], 本节基于 613 单元 AO 系统, 运用前 65 阶 Zernike 多项式生成符合 Kolmogorov 统计规律的大气波前, 研究变形镜的校正能力, 如图 10 所示. 其中, 校正前大气湍流像差 RMS 值的平均值为 6.68 μm .

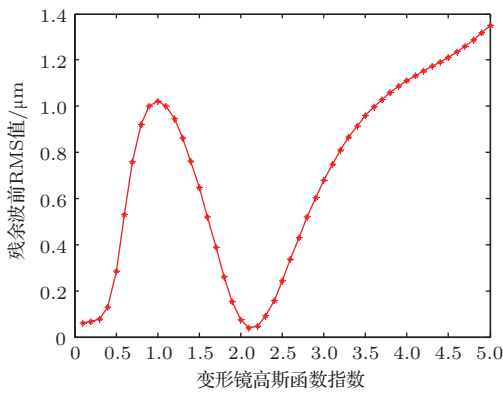


图 10 校正后大气湍流波前 RMS 值与高斯函数指数的关系 (500 组结果均值)

Fig. 10. Influence of Gaussian function index on RMS of residual wavefront induced by atmospheric turbulence (the mean value of 500 groups).

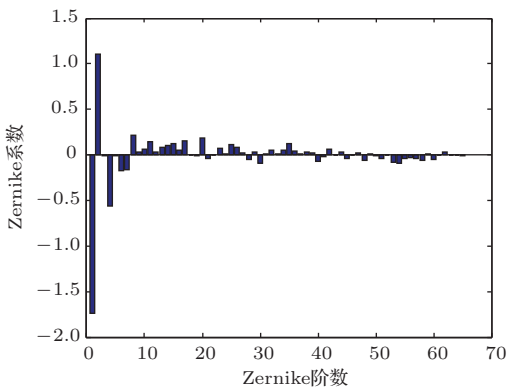


图 11 大气湍流波前 65 阶 Zernike 像差分布 (500 组结果均值)

Fig. 11. The first 65 Zernike polynomial coefficients of atmospheric turbulence induced wavefront (the mean value of 500 groups).

从图 10 可以看出, 变形镜对大气湍流波前的校正效果与图 9 中对低阶像差的校正效果类似, 当

高斯函数指数取值在区间 (0, 0.5) 和 (1.9, 2.4) 时, 变形镜的校正能力较好. 出现这种情况的主要原因是符合 Kolmogorov 统计规律的大气湍流像差中, 高阶像差的分量较小, 低阶像差的分量较大. 图 11 给出了对应大气湍流像差前 65 阶 zernike 系数分布图, 图中的结果为 500 组结果的平均值. 可以看出大气湍流像差中, 像差阶次越高, 像差分量相对越小.

4.3 高斯函数指数对 AO 系统稳定性的影响

AO 系统是否能稳定工作的的一个重要判据是斜率响应矩阵的矩阵条件数的大小. 斜率响应矩阵的矩阵条件数越小, AO 系统的稳定性越好. 图 12 给出了斜率响应矩阵条件数随变形镜高斯函数指数变化的曲线. 由于斜率响应矩阵条件数较大时, AO 系统几乎不能稳定工作, 而高斯函数指数过小或者过大时, 斜率响应矩阵条件数过大, 因而在作图时, 去除了高斯函数指数过小和过大的情况. 一般情况下, 斜率响应矩阵的条件数越小, AO 系统的工作稳定性越高. 从图 12 中可以看出, 高斯函数指数在区间 (0.5, 0.7) 和 (1.7, 2.3) 内时, 斜率响应矩阵的条件数相对较小, AO 系统可稳定工作.

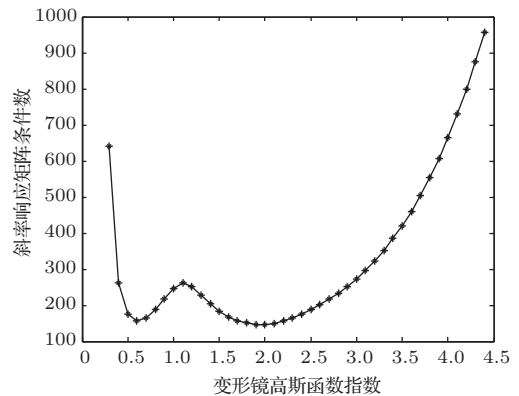


图 12 高斯函数指数与斜率响应矩阵条件数的关系曲线
Fig. 12. Influence of Gaussian function index on condition number of slope response matrix.

综合以上分析, 对于一个特定的 AO 系统, 变形镜高斯函数指数的取值有一个最优范围, 过大或者过小都会影响 AO 系统的性能. 从图 12 可得高斯函数指数的取值区间为 (0.5, 0.7) 和 (1.7, 2.3), 根据图 10 得出的高斯函数指数的取值区间为 (0, 0.5) 和 (1.9, 2.4), 取交集可得高斯函数指数的取值区间为 (1.9, 2.3), 再根据图 9 和图 8 所得出的高斯函数

指数的取值区间(2.0, 2.4), 可以得出, 高斯函数指数的最优取值范围为(2.0, 2.3). 综合迭代矩阵和斜率响应矩阵的稀疏度, 在高斯函数指数的最优取值范围内, 其值越大越好.

5 结 论

本文基于613单元AO系统, 研究了变形镜高斯函数指数对迭代矩阵和斜率响应矩阵稀疏度的影响, 对AO系统稳定性和校正能力的影响, 并且给出了高斯函数指数的最优取值范围. 研究结果显示, 迭代矩阵和斜率响应矩阵的稀疏度随高斯函数指数的增大而增大, 随之减小而减小. 针对613单元AO系统, 高斯函数指数的最优取值范围为(2.0, 2.3), 并且当高斯函数指数为2.3时, 迭代矩阵和斜率响应矩阵的稀疏度达到最高. 本文仅给出了仿真条件下高斯函数指数的取值范围, 实际AO系统中, 还需结合变形镜的生产制造工艺等多方面因素给出.

感谢中国科学院光电技术研究所的姜文汉院士对论文工作的帮助与指导.

参考文献

- [1] Jiang W H, Zhang Y D, Rao C H, Ling N, Guan C L, Li M, Yang Z P, Shi G H 2011 *Acta Optica Sinica* **31** 9 (in Chinese) [姜文汉, 张雨东, 饶长辉, 凌宁, 官春林, 李梅, 杨泽平, 史国华 2011 光学学报 **31** 9]
- [2] Jiang W H 2006 *Chinese Journal of Nature* **28** 1 (in Chinese) [姜文汉 2006 中国自然杂志 **28** 1]
- [3] Zhang L Q, Gu N T, Rao C H 2013 *Acta. Phys. Sin.* **62** 169501 (in Chinese) [张兰强, 顾乃庭, 饶长辉 2013 物理学报 **62** 169501]
- [4] Ren Z J, Liang X Y, Liu M B, Xia C Q, Lu X M, Li R X, Xu Z Z 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 124203
- [5] Yu L H, Liang X Y, Ren Z J, Wang L, Xu Y, Lu X M, Yu G T 2012 *Chin. Phys. B* **21** 014201
- [6] Li X Y, Jiang W H 2003 *Acta Optica Sinica* **23** 6 (in Chinese) [李新阳, 姜文汉 2003 光学学报 **23** 6]
- [7] Jiang W H, Li H G 1990 *Proc. SPIE The Hague, Netherlands*, March 01, 1990 p82
- [8] Feng L, Fedrigo E, Bechet C 2012 *Applied Optics* **51** 3564
- [9] Antonin H B 2010 *Proc. SPIE San Diego, CA*, August 02, 2009 p1
- [10] Luc G, Curtis R, Vogel, Brent L 2002 *J. Opt. Soc. Am. A* **19** 1817
- [11] Eric T, Michel T 2010 *J. Opt. Soc. Am. A* **27** 1046
- [12] Cheng S Y, Chen S Q, Dong L Z, Liu W J, Wang S, Yang P, Ao M W, Xu B 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 074206 (in Chinese) [程生毅, 陈善球, 董理治, 刘文劲, 王帅, 杨平, 敖明武, 许冰 2014 物理学报 **63** 074206]
- [13] Zhu Y G 2010 *Matrix Analysis and Calculation* (Beijing: National Defense Industry Press) pp160–183 (in Chinese) [朱元国 2010 矩阵分析与计算(北京: 国防工业出版社) 第160—183页]
- [14] Curtis R V 2004 *Proc. of SPIE Bellingham WA*, June 21, 2004 p1327
- [15] John M C, John G 2004 *Science, The International Journal of High Performance Computing Applications* **18** 225
- [16] Dong L Z, Yang P, Xu B 2009 *Applied Physics B* **96** 527
- [17] Ning Y, Yu H, Zhou H, Rao C H, Jiang W H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4717 (in Chinese) [宁禹, 余浩, 周虹, 饶长辉, 姜文汉 2009 物理学报 **58** 4717]
- [18] Noll R J 1976 *J. Opt. Soc. Am. A* **66** 207

Influence of Gaussian function index of deformable mirror on iterative algorithm adaptive optical system*

Cheng Sheng-Yi¹⁾²⁾³⁾ Chen Shan-Qiu¹⁾³⁾ Dong Li-Zhi¹⁾³⁾ Wang Shuai¹⁾³⁾
Yang Ping¹⁾³⁾ Ao Ming-Wu⁴⁾ Xu Bing^{1)†}

1) (*The Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*)

2) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

3) (*Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Chengdu, Sichuan 610209, China*)

4) (*University of Electronic Science and Technology of China, Sichuan 610054, China*)

(Received 8 October 2014; revised manuscript received 12 November 2014)

Abstract

Among all kinds of wavefront reconstruction algorithms in adaptive optical systems, the standard and mostly used algorithm is the direct gradient wavefront reconstruction algorithm. As the number of sub-apertures in Shack-Hartmann wavefront sensor and the actuators for deformable mirror increases, the reconstruction matrix in direct gradient wavefront reconstruction algorithm takes too much space and the number of multiplication in the algorithm increases sharply. So, the iterative algorithm is adopted in wavefront reconstruction for the high-resolution adaptive optical system. The number of multiplication and the required space of the iterative algorithm are directly related to the sparseness of both iterative matrix and slope response matrix. In an adaptive optical system, the sparseness of these two matrixes is connected with the system parameters. Therefore, it is necessary to study how to choose the proper parameters for an adaptive optical system when it uses iterative wavefront reconstruction algorithm. In this paper, the sparseness of slope response matrix and iterative matrix are analyzed based on a 613-actuator adaptive optical system. The influence of the Gaussian function index of deformable mirror on the sparsenesses of slope response matrix, iterative matrix, stability and correction qualities of the adaptive optical system are also studied under the condition of constant actuator spacing and coupling coefficient. A larger Gaussian function index results in a lower sparseness of the slope response matrix and the iterative matrix. Too large or too small a Gaussian function index will degrade the stability and the correction quality of an adaptive optical system. Finally, the optimal range of the Gaussian function index is provided by balancing the sparseness of slope response matrix, the correction quality, and the stability of the adaptive optical system.

Keywords: Gaussian function index, iterative matrix, slope response matrix, sparseness

PACS: 42.68.Wt, 95.75.Qr, 07.05.Tp

DOI: [10.7498/aps.64.094207](https://doi.org/10.7498/aps.64.094207)

* Project supported by the National Key Scientific and Research Equipment Development Project of China (Grant No. ZDYZ2013-2), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11173008), and the Sichuan Province Outstanding Youth Academic Technology Leaders Program, China (Grant NO. 2012JQ0012).

† Corresponding author. E-mail: bing_xu_ioe@163.com