

噪声情况下模型式无波前探测自适应光学系统 扩展目标成像校正

马良^{1,2}, 徐奇¹, 吴阳², 杨慧珍^{2*}, 杨海波³, 周渊深²

¹ 中国矿业大学信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221116;

² 淮海工学院电子工程学院, 江苏 连云港 222005;

³ 中国电子科技集团公司第五十三研究所光电信息控制和安全技术重点实验室, 天津 300308

摘要 利用 88 单元变形镜及电荷耦合器件成像器件, 以扩展目标为校正对象, 建立了带有噪声的无波前探测自适应光学系统模型。在噪声情况下, 验证了扩展目标成像时掩模探测器信号和波前相位的平均梯度平方和之间存在线性关系。将基于此线性关系的算法作为无波前探测自适应光学系统的控制算法, 通过仿真, 检验了模型式无波前探测自适应光学系统在噪声情况下对扩展目标成像的校正能力。结果表明, 相同湍流条件、不同信噪比下的校正效果接近。按照湍流条件从小到大的顺序, 与信噪比为 20 dB 的结果相比, 信噪比为 5 dB 时校正后的平均均方根相对误差分别为 3.71%, 2.94% 和 2.42%, 说明基于该线性关系的模型控制算法具有较强的抗噪能力。

关键词 成像系统; 成像噪声; 扩展目标; 自适应光学系统; 抗噪能力

中图分类号

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0405003

Extended Object Imaging Correction for Model-Based Wavefront Sensorless Adaptive Optics System Under Noise

Ma Liang¹, Xu Qi¹, Wu Yang², Yang Huizhen^{2*}, Yang Haibo³, Zhou Yuanshen²

¹ School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

² Department of Electronic Engineering, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang, Jiangsu 222005, China;

³ Key Laboratory of Electro-Optical Information Control and Security Technology, The 53th Research Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Tianjin 300308, China

Abstract The wavefront sensorless adaptive optics (WFSless AO) system under noise is established using an 88-element deformable mirror and a charge coupled device imaging device and with an extended object as a correction object. The linear relationship between the masked detector signal and the mean-square wavefront gradient of the extended object imaging under noise is verified. The algorithm based on this linear relationship is used as the control algorithm of the WFSless AO system. The simulation experiment is carried out to check the correction ability of the model-based WFSless AO system for extended object imaging under noise. The results show that the correction effects are very close under the same turbulence condition but different signal-to-noise ratios. According to the order of turbulence conditions from small to large, the averaged root mean square relative errors after correction under a signal-to-noise ratio of 5 dB are 3.71%, 2.94% and 2.42%, respectively, if compared with the results under a signal-to-noise ratio of 20 dB. The above results indicate that the model-based control algorithm with this linear relationship has a relatively good anti-noise capability.

Key words imaging systems; imaging noise; extended object; adaptive optics system; anti-noise capability

OCIS codes 110.1085; 110.6915; 010.7350; 220.1080

收稿日期: 2018-10-31; 修回日期: 2018-12-16; 录用日期: 2019-01-18

基金项目: 国家自然科学基金(11573011, 61601194)、江苏省高校“青蓝工程”中青年学术带头人资助项目、江苏省“六大人才高峰”高层次人才项目(KTHY-058)、连云港市“521 高层次人才培养工程”项目(LYG52105-2018025)

* E-mail: yanghz526@126.com

1 引 言

在扩展目标成像系统中,光学系统的内部会产生静态随机像差,大气湍流将造成动态随机像差,目前常采用自适应光学技术实时校正波前像差来提高成像质量。常规自适应光学系统需要实时波前测量,波前测量主要测量的是波前相位,但复杂环境(如光强调制比较强的应用环境)中闪烁现象的存在会破坏光强及其相位,造成相位不连续,这使得波前测量变得非常困难。另外使用的波前传感器会消耗一部分来波信号,这给光电探测器探测光波信号带来了难度,使校正效果受到限制。而无波前探测自适应光学系统无需波前测量及相位重构,具有结构简单、可靠性高及体积小等特点,已在军事^[1]、人眼视网膜成像^[2]、显微成像^[3-4]、相干光束合成^[5]和扩展目标^[6-7]等领域得到广泛应用。

无波前探测自适应光学系统的控制算法可分为无模型控制算法和基于模型的控制算法。前者是将系统性能指标(光能量和成像清晰度等)作为波前校正器控制信号的目标函数,典型的无模型控制算法包括遗传算法(GA)^[8]、模拟退火算法(SA)^[9]和随机并行梯度下降(SPGD)算法^[10]等。收敛速度慢是无模型控制算法最大的缺点,此外这些控制算法容易出现局部收敛现象。后者基于某种原理建立系统模型,收敛速度相对较快,如模式法、非线性控制算法和基于几何光学原理的控制算法。模式法需要事先定义不同类型的基函数,常采用变形镜(DM)测得的影响函数构造的各种正交基作为基函数,实现过程相对复杂^[11]。非线性控制算法需要清除系统像差,建立输入与输出之间的非线性方程,然后基于建立的方程读取光强信息,最后利用最小二乘法求解^[12]。该控制算法对数据点有要求,数据点太多或太少都会影响系统的校正效果,且实现过程较复杂。基于几何光学原理的控制算法需要事先定义基函数,但它不依赖于基函数的具体类型,无需清除系统像差,简单方便,适用于不同程度的像差^[13]。

将基于几何光学原理的控制算法用于成像校正时,现有文献只是研究了噪声情况下的点目标成像校正^[14],而扩展目标成像校正中,大部分文献没有考虑到噪声的影响^[15],但实际成像系统中不可避免地存在噪声干扰。成像噪声主要来源于图像传感器,噪声具有分布不均匀、大小不规则和随机性等特点,而现有无波前探测自适应光学系统控制算法大都依赖于图像传感器信息。噪声的存在,使得读取

的图像光强信息存在误差,控制算法计算出的波前控制信号存在误差,进而影响到自适应光学系统校正质量。有两种可减小成像系统噪声的途径:一是采用高质量、高性能的图像传感器,从硬件方面上减弱噪声对成像效果的干扰,但这将大大增加系统成本;二是采集到图像信息后,从软件方面先使用去噪算法对图像进行降噪处理,再利用控制算法计算波前校正器的驱动信号,但如何选择合适的去噪算法还有待于进一步研究。值得说明的是,自适应光学系统只能校正波前像差,无法去除噪声,因此探索抗噪能力强的无波前探测自适应光学系统控制算法非常必要。

本文以 88 单元变形镜作为校正器,在噪声情况下验证扩展目标成像时掩模探测器信号(MDS)与波前相位的平均梯度平方和(MSG)之间的线性关系。并分析不同湍流条件及不同信噪比下该模型控制算法对扩展目标成像校正的能力,为实际应用提供理论基础。

2 仿真模型

2.1 无波前探测自适应光学系统模型

无波前探测自适应光学系统模型如图 1 所示,待校正的波前畸变 $\varphi(r)$ 经过变形镜反射到成像透镜上,并聚焦在电荷耦合器件(CCD)成像装置上。CCD 通过图像采集卡将采集的光强信号读取到计算机(PC),控制算法根据光强信号计算出变形镜的控制信号,再经数模(D/A)转换器转换成模拟信号,高压放大器对模拟信号放大后并行输出来驱动变形镜校正像差。其中 CCD 成像装置用来记录成像函数,变形镜的单元数为 88,驱动器位置排布如图 2 所示,各驱动器间呈正方形排布。

2.2 成像过程

天体目标到望远镜成像面的传输过程中将会受到大气湍流的影响,为了方便研究,把目标到成像面的成像过程看作一个完整的光学系统。光学系统中的图像传感器夹杂着光子噪声、暗噪声、复位噪声和读出噪声等,本研究的图像传感器以 CCD 为例,其产生的噪声满足加性高斯模型。

在实际光学系统中的点扩散函数反映了成像过程的传输特征,通过目标函数与点扩散函数的卷积($*$)可得到目标图像:

$$f(x, y) = k(x, y) * h(x, y) + w(x, y), \quad (1)$$

式中: (x, y) 表示 CCD 成像面的坐标, $k(x, y)$ 表示目标函数, $h(x, y)$ 表示成像系统中的点扩散函数,

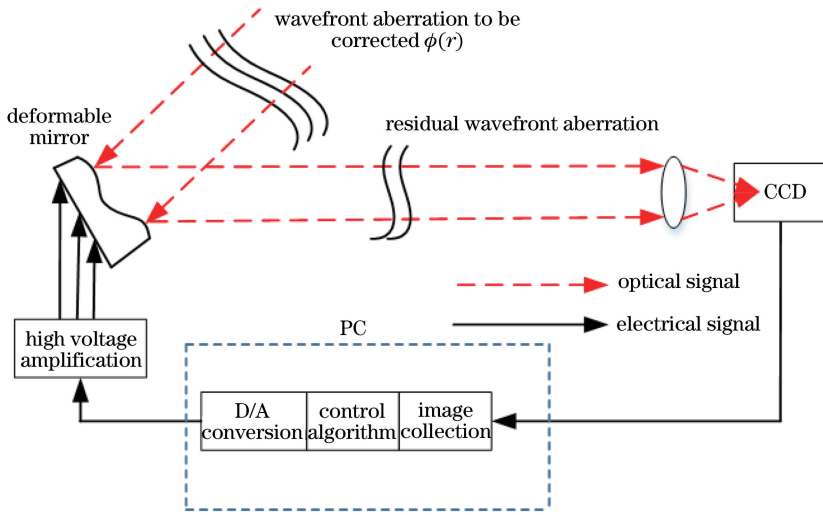


图 1 无波前探测自适应光学系统

Fig. 1 Wavefront sensorless adaptive optics system

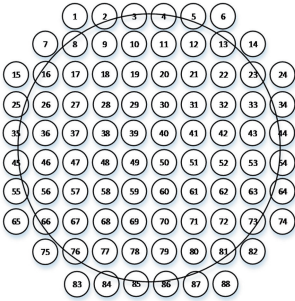


图 2 变形镜各驱动单元位置排列

Fig. 2 Position arrangement of DM driving units

$w(x, y)$ 表示噪声函数, $f(x, y)$ 表示目标函数受大气湍流影响后的成像函数。在仿真过程中, 本研究将原有的清晰图像作为 $k(x, y)$, 通过波前畸变的快速傅里叶变换得到 $h(x, y)$, 利用高斯噪声模拟 $w(x, y)$ 。其中, $k(x, y)$ 和 $f(x, y)$ 为灰度图像, 即像素值在 0~255 pixel 之间。 $w(x, y)$ 是均值为 0, 方差分别为 0.00095, 0.0034, 0.012 和 0.041 等不同程度的噪声, 对应的信噪比 R_{SN} 分别为 20 dB, 15 dB, 10 dB, 5 dB, 信噪比的计算公式为

$$R_{SN} = 10 \lg \left\{ \frac{\sum_{(x,y)} [k(x,y) * h(x,y)]^2}{\sum_{(x,y)} [w(x,y)]^2} \right\} \quad (2)$$

像差则采用不同湍流强度的相屏来模拟, 相屏由前 104 阶 Zernike 像差生成^[16], 这种方法生成的相屏符合 Kolmogrov 谱, 且各相屏间没有相关性。一般情况下, 系统中的倾斜分量由倾斜镜单独校正, 本研究模拟的相屏没有倾斜分量。用 D/r_0 代表湍流强度的大小, 其中 D 为望远镜的口径, r_0 为大气

相干长度。

仿真中使用的原清晰图像如图 3(a) 所示, 对应的图像像素为 128 pixel × 128 pixel, 波前像差通过快速傅里叶变换得到点扩散函数, 再将质心为中心截取得到的 320 pixel × 320 pixel 大小的区域作为 $h(x, y)$, 然后对 $k(x, y)$ 和 $h(x, y)$ 进行卷积运算, 得到 $f(x, y)$ 。根据通常的望远镜成像系统参数的范围, 假定光学成像系统的衍射极限角对应 5 个像素点, 图 3(b) 为此成像系统下无像差及无噪声时扩展目标理想成像的效果。

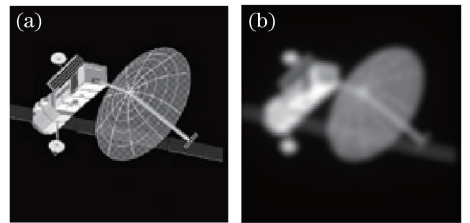


图 3 原清晰图像及无像差和噪声时的成像效果。

(a) 原始图像; (b) 成像效果

Fig. 3 Original clear image and imaging effect without aberration and noise. (a) Original image; (b) imaging effect

2.3 基于模型的控制算法

基于模型控制算法分为预处理部分和迭代部分。

1) 预处理部分利用测得的影响函数计算 MSG, 构成矩阵 S 。

$$S(i, j) = \frac{1}{D} \iint_D \left\{ \left[\frac{\partial \mathbf{E}_i(x, y)}{\partial x} \cdot \frac{\partial \mathbf{E}_j(x, y)}{\partial x} \right] + \left[\frac{\partial \mathbf{E}_i(x, y)}{\partial y} \cdot \frac{\partial \mathbf{E}_j(x, y)}{\partial y} \right] \right\} dx dy, \quad (3)$$

式中: $\mathbf{E}_i(x, y)$ 为第 i 个影响函数, $\mathbf{E}_j(x, y)$ 为第 j 个影响函数, D 为通光孔径。

2) 计算矩阵 \mathbf{S} 的逆 \mathbf{S}^{-1} 和其对角向量 \mathbf{S}_m , 它们与待校正的波前无关, 因此在预处理部分计算。

3) MDS 的表达式为

$$S_{MDi} = \frac{\iint_{|r| \leq R} I(x, y) m(r) dx dy}{\iint_{|r| \leq R} I(x, y) dx dy}, \quad (4)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, 88$; $m(r)$ 为掩膜, $r \leq R$ 时, $m(r) = r^2/R^2$, $r > R$ 时, $m(r) = 0$, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$; R 为掩膜半径; $I(x, y)$ 为 CCD 像平面上 (x, y) 处的光强。利用(4)式计算待校正波前的 MDS 值, 对应 S_{MD0} , 再分别对各驱动器单元施加电压, 待校正波前叠加影响函数面形后, 分别计算各驱动器的 MDS 值, 分别对应 $S_{MD1}, S_{MD2}, \dots, S_{MD88}$ 。

4) 当前迭代的变形镜控制电压的表达式为

$$\mathbf{V} = \frac{\mathbf{S}^{-1}(c_0 \mathbf{M} - \beta^2 \mathbf{S}_m)}{2\beta}, \quad (5)$$

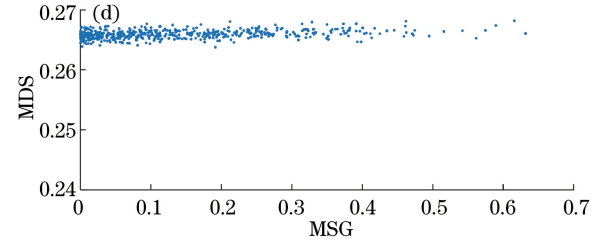
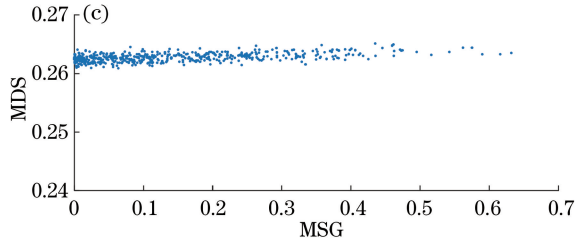
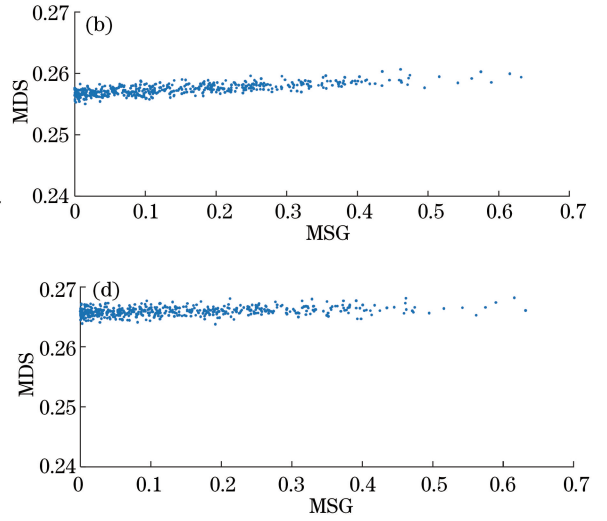
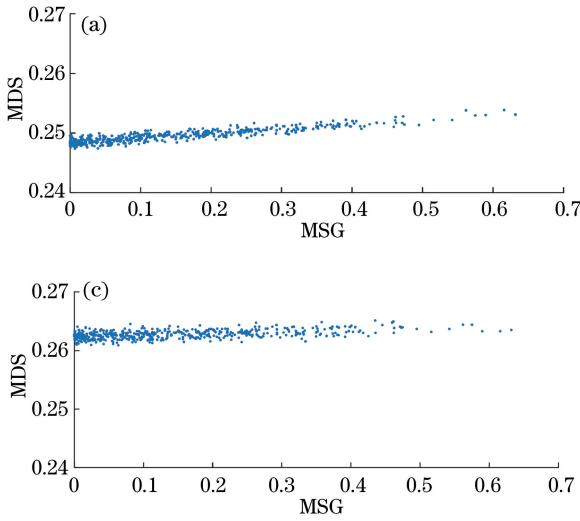


图 4 不同信噪比下扩展目标成像时 MDS 与 MSG 的线性关系。(a) 20 dB; (b) 15 dB; (c) 10 dB; (d) 5 dB

Fig. 4 Linear relationship between MDS and MSG for extended object imaging under different signal-to-noise ratios.

(a) 20 dB; (b) 15 dB; (c) 10 dB; (d) 5 dB

为了方便观察, 图 4 中纵坐标取值范围为 $[0.24, 0.27]$ 。从图 4 中可以看出, 有噪声情况下扩展目标成像时 MDS 和 MSG 之间线性关系依然成立。随着信噪比的降低, 相同的 MSG 对应的 MDS 增加。四幅图的直线斜率都大于 0, 信噪比越小对应的斜率越小。综上所述, 基于该线性关系的模型控制算法理论上仍可以应用于噪声情况下扩展目标的成像校正。

3.2 不同湍流条件、不同噪声水平下 RMS 曲线

分别选取湍流强度为 $D/r_0 = 5, D/r_0 = 15,$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} S_{MD1} + S_{MD0} \\ S_{MD2} + S_{MD0} \\ \dots \\ S_{MD88} + S_{MD0} \end{bmatrix}, c_0 \text{ 为调整参数, } \beta \text{ 为各驱}$$

动器电压的调整系数。

5) 将校正之后的残余波前像差作为待校正波前, 重复步骤 3)~5), 直到算法满足终止条件。

3 结果与分析

3.1 不同信噪比下扩展目标的 MDS 与 MSG 的线性关系验证

随机生成 500 帧相屏, 其均方根(RMS)取值范围为 $0.0119\lambda \sim 1.7841\lambda$ (λ 为波长)。对成像函数添加均值为 0, 方差分别为 0.00095, 0.0034, 0.012 和 0.041 的高斯白噪声(对应的信噪比分别为 20 dB, 15 dB, 10 dB, 5 dB), 分析在不同像差和噪声情况下扩展目标成像时 MDS 与 MSG 之间的关系。线性关系仿真结果如图 4 所示, 横坐标为 MSG, 纵坐标为 MDS。

$D/r_0 = 25$ 三种强度像差, 每种像差各取 100 帧, 对应的平均 RMS 值分别为 $0.21\lambda, 0.54\lambda$ 和 0.84λ 。在信噪比分别为 20 dB, 15 dB, 10 dB, 5 dB 的情况下, 利用基于 MDS 与 MSG 之间线性关系的模型控制算法校正带有不同程度像差的扩展目标。图 5 为 100 帧像差的平均校正结果(在湍流强度分别为 $D/r_0 = 5, D/r_0 = 15, D/r_0 = 25$ 时对该模型控制算法施加不同噪声后 RMS 的变化情况), 其中 RMS 用来衡量校正后的波前像差, 为便于对比, 图 5 中同时给出了不施

加噪声时 RMS 随迭代次数的变化情况,算法共迭代了 15 次。从图 5 可以看出,在噪声情况下经过一定的

迭代次数后算法的 RMS 逐渐收敛,最终收敛时同一湍流强度、不同信噪比下的 RMS 接近。

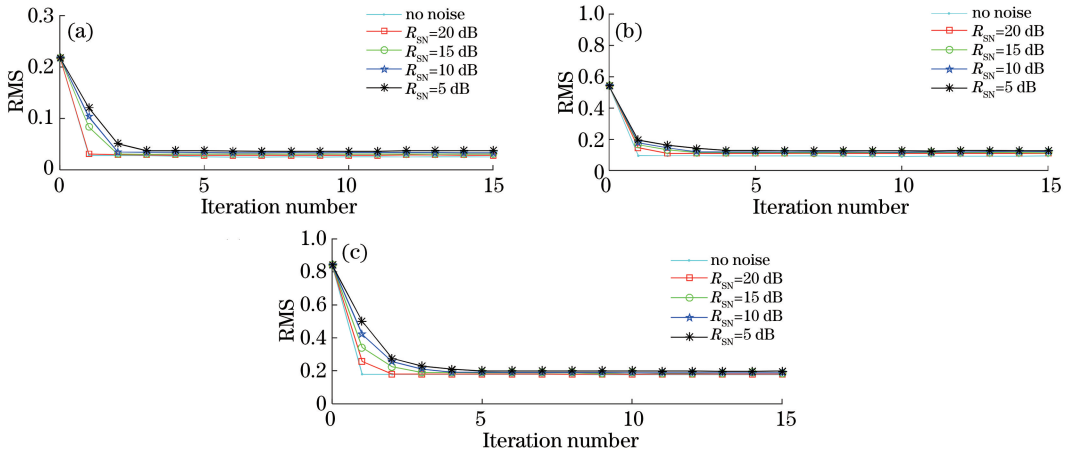


图 5 基于模型的控制算法在对应像差和信噪比下的 RMS 曲线。(a) $D/r_0=5$; (b) $D/r_0=15$; (c) $D/r_0=25$
Fig. 5 RMS curves by model-based control algorithms under corresponding aberrations and signal-to-noise ratios.

(a) $D/r_0=5$; (b) $D/r_0=15$; (c) $D/r_0=25$

3.3 不同湍流条件及不同噪声水平下速度分析

在无波前探测自适应光学系统中,常将 CCD 采样次数作为衡量算法校正快慢的指标。对于 88 单元变形镜,算法每迭代一次需要 88 次 CCD 数据采集,表 1 给出了基于模型的控制算法在不同湍流条件及不同噪声水平下校正扩展目标成像所需的 CCD 采样次数,其中所需的 CCD 采样次数为最初收敛时的次数。

表 1 基于模型的控制算法在不同湍流条件及不同噪声水平下校正扩展目标成像的 CCD 采样次数对比

Table 1 Comparisons of CCD sampling times for model-based control algorithm in correcting extended object imaging under different turbulence conditions and different noise levels

D/r_0	CCD sampling time				
	No noise	20 dB	15 dB	10 dB	5 dB
5	88	88	176	176	264
15	88	176	264	264	352
25	88	176	264	352	440

由表 1 可知,在相同的像差程度下,随着信噪比的降低(无噪声时可认为信噪比无穷大),该控制算法校正扩展目标收敛时所需的迭代次数呈上升趋势,如 $D/r_0=5$ 时,算法校正完后的收敛次数从 88 增加到 264。而在相同的信噪比下,随着像差程度的增大,噪声对收敛次数的影响也随之增大,如 $R_{SN}=5$ dB 时,校正不同湍流下的像差时,控制算法迭代次数从 264 增加到 440。

3.4 不同湍流条件及不同噪声水平下最终收敛时的 RMS 对比

使用待校正波前的初始 RMS 值及校正后的 RMS 值来衡量噪声情况下无波前探测自适应光学系统校正扩展目标成像的能力,RMS 值越低说明图像校正效果越好。图 6 所示为不同湍流条件和噪声水平下校正前后的 RMS 对比结果。

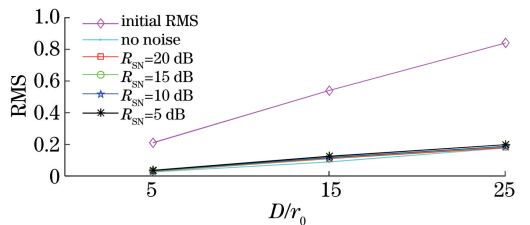


图 6 不同湍流条件和信噪比时校正前后 RMS 对比
Fig. 6 RMS comparison before and after correction under different turbulence conditions and signal-to-noise ratios

从图 6 可以看出,在相同的像差程度下,随着信噪比的降低,该控制算法校正扩展目标成像收敛时的 RMS 随之增大。如 $D/r_0=5$ 时,算法校正后的 RMS 从 0.0252 增加到 0.0362。相同湍流条件,不同信噪比下的校正效果接近。而在相同的信噪比下,随着像差程度的增大,噪声对校正的影响也随之增大。如 $R_{SN}=5$ dB,校正不同湍流下的像差时,RMS 分别在 0.0362λ , 0.1249λ 和 0.1975λ 左右。

按照湍流条件从小到大的顺序,与信噪比为 20 dB 的结果相比,信噪比为 5 dB 时校正后的平均 RMS 相对误差分别为 3.71%, 2.94% 和 2.42%,可以明显看出随着湍流强度的增加,平均 RMS 的误

差呈下降趋势。

3.5 不同湍流条件及不同噪声水平下的校正效果图

图 7 所示为湍流较小($D/r_0=5$)时无波前探测自适应光学系统在不同信噪比下的成像效果,图 8 所示为湍流较大($D/r_0=25$)时无波前探测

自适应光学系统在不同信噪比下的成像效果。图 7 和图 8 中(a)~(e)分别为扩展目标成像校正前不施加噪声和分别施加信噪比为 20 dB, 15 dB, 10 dB 和 5 dB 时的成像效果;图 7 和图 8 中(f)~(j)分别为对应的湍流强度及信噪比较正后的扩展目标成像效果。

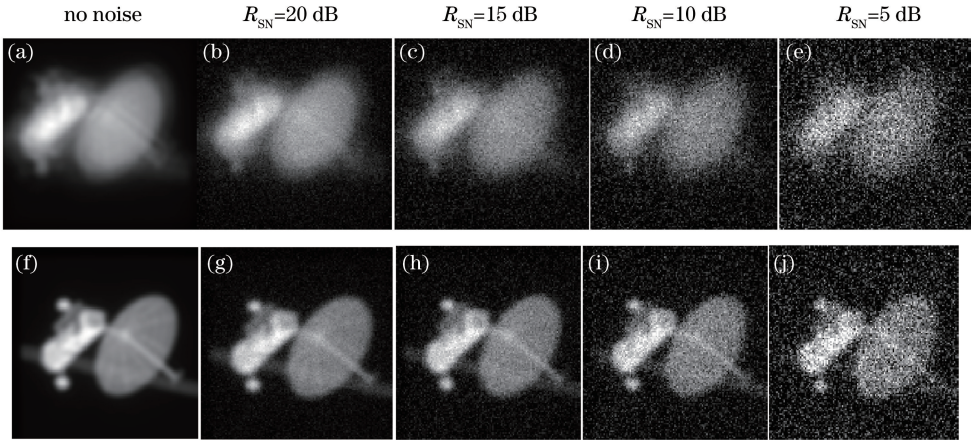


图 7 $D/r_0=5$ 时无波前探测自适应光学系统在不同条件下的扩展目标成像效果。(a)~(e)校正前;(f)~(j)校正后
Fig. 7 Extended object imaging effect for wavefront sensorless adaptive optics system under different conditions at $D/r_0=5$. (a)~(e) Before correction; (f)~(j) after correction

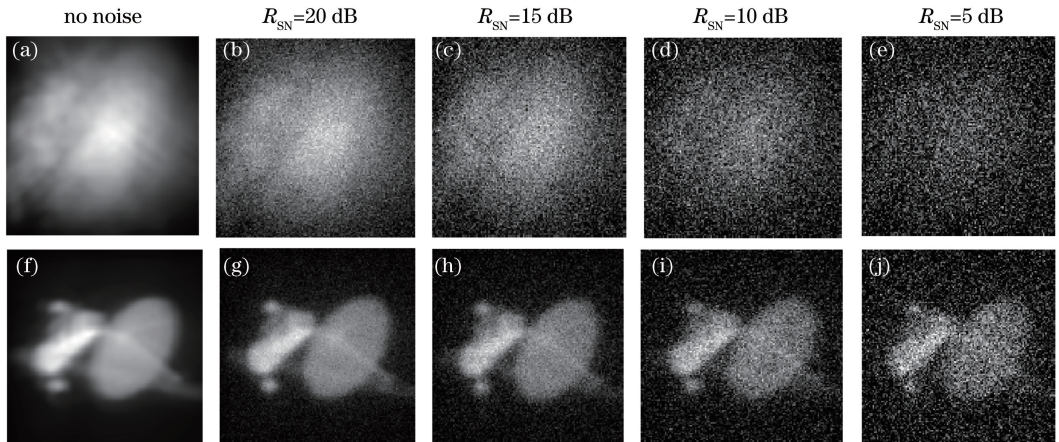


图 8 $D/r_0=25$ 时无波前探测自适应光学系统在不同条件下的扩展目标成像效果。(a)~(e)校正前;(f)~(j)校正后
Fig. 8 Extended object imaging effect for wavefront sensorless adaptive optics system under different conditions at $D/r_0=25$. (a)~(e) Before correction; (f)~(j) after correction

由图 8 可知,当湍流较强时,不管有无噪声,成像效果图都是一片模糊。对比图 8 中无噪声校正前后的(a)和(f),即使在 $D/r_0=25$ 时,该模型算法仍然具备良好的校正效果,能够去除图像中的主要畸变。当信噪比较大时,扩展目标成像校正效果较明显,而当信噪比较小时,校正效果就很微弱,说明噪声在一定程度上影响了无波前探测自适应光学系统的校正效果。但是通过该模型控制算法校正扩展目标成像之后,在一定程度上依然可以看出扩展目标

的外观轮廓。虽然变形镜无法校正噪声,但通过算法有效地去除了波前像差,即使存在噪声的干扰,成像效果也比校正前有了很大的改善。以上的分析证实了基于模型的控制算法仍然适用于在噪声情况下扩展目标成像的校正。

4 结 论

分析了在不同信噪比下扩展目标成像时 MDS 和 MSG 之间的线性关系,发现随着信噪比的降低,

线性关系越不明显,校正效果越差;但噪声情况下 MDS 与 MSG 之间仍然存在线性关系,说明基于该线性关系的控制算法理论上仍可用于噪声情况下的扩展目标成像校正。以扩展目标为校正对象,利用 88 单元变形镜及 CCD 成像器件,建立了带有噪声的无波前探测自适应光学系统仿真模型。结果表明:相同湍流条件、不同信噪比下的校正效果相近。通过控制算法能有效去除波前像差,即使存在噪声的干扰,成像效果也比校正前有了很大的改善。按照湍流条件从小到大的顺序,与信噪比为 20 dB 的结果相比,信噪比为 5 dB 时校正后的平均 RMS 相对误差分别为 3.71%, 2.94% 和 2.42%,说明该模型控制算法具有较强的抗噪能力。下一步将对校正后的图像进行处理,消除噪声,使图像更清晰。

参 考 文 献

- [1] Chen B, Yang Y, Geng Z X. Adaptive optics and its military application [J]. *Fire Control & Command Control*, 2011, 8(8): 160-163.
陈波, 杨阳, 耿则勋. 自适应光学技术及其军事应用 [J]. *火力与指挥控制*, 2011, 8(8): 160-163.
- [2] Pircher M, Zawadzki R J. Review of adaptive optics OCT (AO-OCT): principles and applications for retinal imaging [J]. *Biomedical Optics Express*, 2017, 8(5): 2536-2562.
- [3] Bonora S, Jian Y, Zhang P, *et al.* Wavefront correction and high-resolution in vivo OCT imaging with an objective integrated multi-actuator adaptive lens [J]. *Optics Express*, 2015, 23 (17): 21931-21941.
- [4] Zhao Q, Shi X, Gong W, *et al.* Large field-of-view and deep tissue optical micro-imaging based on parallel wavefront correction algorithm [J]. *Chinese Journal Lasers*, 2018, 45(12): 1207001.
赵琪, 石鑫, 龚薇, 等. 基于并行波前校正算法的大视场深穿透光学显微成像 [J]. *中国激光*, 2018, 45 (12): 1207001.
- [5] Zhang S, Zhang J W, Mu J, *et al.* Dynamical phase error control and bandwidth analysis for coherent beam combination based on stochastic parallel gradient descent algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(5): 0514003.
张森, 张军伟, 母杰, 等. 基于随机并行梯度下降算法的相干合成动态相差控制与带宽分析 [J]. *光学学报*, 2018, 38(5): 0514003.
- [6] Yang H Z, Soloviev O, Verhaegen M. Model-based wavefront sensorless adaptive optics system for large aberrations and extended objects [J]. *Optics Express*, 2015, 23(19): 24587-24601.
- [7] Yang H Z, Li X Y. Effects of imaging system noise on the correction capability of adaptive optics without a wavefront sensor [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(10): 2520-2521.
杨慧珍, 李新阳. 成像系统噪声对无波前探测自适应光学校正效果的影响 [J]. *中国激光*, 2010, 37(10): 2520-2521.
- [8] Yang H Z, Li X Y. Comparison of several stochastic parallel optimization algorithms for adaptive optics system without a wavefront sensor [J]. *Optics & Laser Technology*, 2011, 43(3): 630-635.
- [9] Yao R, Templeton A K, Liao Y X, *et al.* Optimization for high-dose-rate brachytherapy of cervical cancer with adaptive simulated annealing and gradient descent [J]. *Brachytherapy*, 2014, 13(4): 352-360.
- [10] Piatrou P, Roggemann M. Beaconless stochastic parallel gradient descent laser beam control: numerical experiments [J]. *Applied Optics*, 2007, 46 (27): 6831.
- [11] Bonora S, Zawadzki R J. Wavefront sensorless modal deformable mirror correction in adaptive optics: optical coherence tomography [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(22): 4801.
- [12] Song H, Fraanje R, Schitter G, *et al.* Model-based aberration correction in a closed-loop wavefront-sensor-less adaptive optics system [J]. *Optics Express*, 2010, 18(23): 24070-24084.
- [13] Yang H Z, Zhang Z, Wu J. Performance comparison of wavefront-sensorless adaptive optics systems by using of the focal plane [J]. *International Journal of Optics*, 2015, 1-8.
- [14] Yang H Z, Wang B, Liu R M, *et al.* Analysis of anti-noise capability of model-based wavefront sensorless adaptive optics system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(8): 0817002.
杨慧珍, 王斌, 刘瑞明, 等. 模型式无波前探测自适应光学系统抗噪能力分析 [J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(8): 0817002.
- [15] Wen L H, Yang P, Wang S, *et al.* Fast restoration of aberration-degraded extended object based on local region abstraction [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(4): 6900613.
- [16] Roddier N A. Atmospheric wavefront simulation using Zernike polynomials [J]. *Optical Engineering*, 1990, 29(10): 1174-1180.