

基于普适模型的无波前探测自适应光学系统仿真与分析

王志强^{1,2} 张鹏飞¹ 乔春红¹ 张京会¹ 范承玉¹

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

摘要 为了提高基于普适模型的无波前探测自适应光学(AO)算法的收敛性能,建立了一套基于 Zernike 模式的 127 单元变形镜 AO 系统仿真模型。以峰值斯特列尔比(S_r)和提出的快速稳定收敛百分比为评价标准,研究不同湍流强度下扰动系数、Zernike 模式数、斜率因子对校正效果和收敛速度的影响,验证了该仿真系统对静态畸变波前良好的校正能力。结果表明,扰动系数小于 0.01 时系统可以稳定收敛;增加 Zernike 模式数可以提高系统收敛时的 S_r ,但同时收敛速度会有所降低。提出的改进矢量化斜率因子,可以有效提升系统在一次迭代后的校正效果,特别是对大畸变波前具有较强的适应性。

关键词 大气光学; 自适应光学; 波前校正; 无波前探测; Zernike 模式; 变形镜

中图分类号 TP273.2 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201643.0905002

Simulation and Analysis of General Model-Based Wave-Front Sensorless Adaptive Optics System

Wang Zhiqiang^{1,2} Zhang Pengfei¹ Qiao Chunhong¹ Zhang Jinghui¹ Fan Chengyu¹

¹Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract To improve the convergence ability of a wave-front sensorless adaptive optics (AO) algorithm using a general model-based approach, an AO system simulation model based on Zernike modes is established with a 127-elements deformable mirror (DM). Using peak Strehl ratio (S_r) and the proposed fast-steady-convergence percentage as evaluation criterion, good correction capability for static distorted wave-front is verified by analyzing the impact of different perturbation coefficient, the number of Zernike modes, and slope factor on correction effect and convergence speed under different turbulence intensity. The results show that when the perturbation coefficient is less than 0.01, the system can converge steadily and increasing the number of Zernike modes can ascend S_r of the convergence while it will sacrifice some convergence speed. A modified vector slope factor is put forward, and the system correction can be improved efficiently after the first iteration. For the large distorted wavefront has strong adaptability especially.

Key words atmospheric optics; adaptive optics; wave-front correction; wave-front sensorless; Zernike mode; deformable mirror

OCIS codes 010.1080; 220.1000; 010.1285; 010.7350

收稿日期: 2016-04-01; 收到修改稿日期: 2016-05-16

基金项目: 国家自然科学基金(61405205)

作者简介: 王志强(1990—),男,博士研究生,主要从事激光大气传输和自适应光学校正等方面的研究。

E-mail: matlab@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 范承玉(1965—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事强激光大气传输及其校正等方面的研究。

E-mail: cyfan@aiofm.ac.cn(通信联系人)

1 引言

在透过大气的激光能量传输和光学成像系统中,系统内部和外部存在各种静态和动态像差,降低了光束传输质量和成像分辨率。常规的自适应光学(AO)系统通过波前的实时探测和重构,再利用波前校正器施加补偿相位来校正畸变波前,但当激光传输路径上湍流较强或水平传输距离较长时,在接收平面上会出现较强的光强起伏,波前探测困难便成为限制常规 AO 校正技术更广泛应用的一个因素^[1-2]。近年来出现的无波前探测 AO 校正技术成为解决这一问题的可行方案^[3-15]。

按照控制算法的不同,无波前探测 AO 系统可分为无模型优化和有模型优化两大类。无模型优化算法如随机并行梯度下降算法^[3-7]、遗传算法^[8-9]、模拟退火算法^[10]等,都是以迭代方式对系统关心的性能指标进行盲优化,收敛速度慢且容易陷入局部极值,在实际应用中对硬件的要求较高^[6]。有模型优化算法是基于不同的原理建立系统模型,收敛速度相对较快,有望实现低成本的像差实时校正,如校正 n 阶 Zernike 像差时,模式法^[11]最少仅需测量 $n+1$ 次远场光斑、非线性优化算法^[12]最少仅需测量 $n+4$ 次远场光斑、几何光学近似算法^[13-15]最少仅需测量 $n+1$ 次远场光斑即可达到满意的收敛效果。与其他有模型优化算法相比,几何光学近似算法不依赖具体的基函数类型,不需要事先清除系统像差,实现过程简单。文献^[13-14]给出了基于几何光学近似的普适模型无波前探测 AO 算法的理论分析和初步仿真结果,但未对系统参数的选取及其适用范围做深入细致的探讨。本文以 127 单元变形镜(DM)作为波前校正器建立 AO 系统仿真模型,研究算法的收敛效果及其对静态波前的校正能力,重点考察扰动系数 α 、Zernike 模式数、斜率因子 C 。对校正效果和收敛速度的影响,并根据各阶 Zernike 像差占总像差的权重不同提出了矢量化的斜率因子,为普适模型的无波前探测 AO 算法应用于实际 AO 系统进行了较为深入的分析 and 探讨。

2 普适模型无波前探测 AO 算法仿真模型

2.1 仿真模型的建立

普适模型无波前探测 AO 系统如图 1 所示,该系统主要包括光传输、主控计算机和变形镜三大模块。光经过大气传输,受畸变波前入射到变形镜镜面上,经反射后残余畸变波前通过透镜聚焦到相机靶面,主控计算机把采集到的相机靶面上的光强信息经过分析处理、算法控制和数/模(D/A)转换输出为模拟电压,模拟电压通过高压放大器来驱动变形镜校正像差。

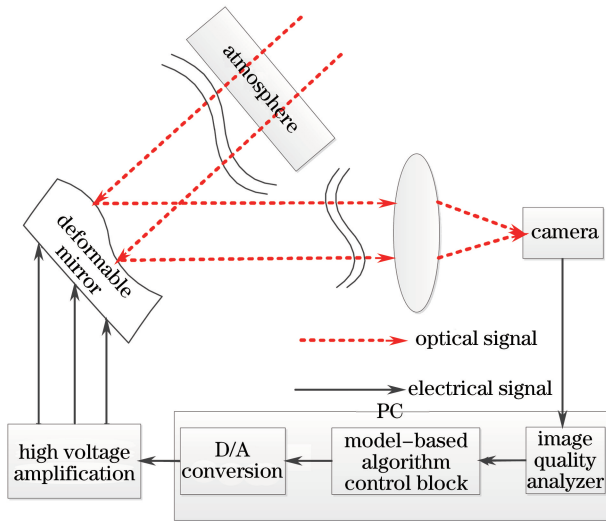


图 1 基于模型的无波前探测 AO 系统仿真示意图

Fig. 1 Simulation schematic diagram of a model-based wavefront sensorless AO system

2.2 变形镜单元数和 Zernike 模式数的关系

校正时 Zernike 模式数与变形镜单元数的选取是个关键问题。Zernike 模式数越少,则系统控制参量越少,收敛速度也越快。但是当 AO 系统被用于中等或强湍流情况下时,波前校正器单元数至少需满足 $n =$

$(D/r_0)^2$, 式中 D 为望远镜直径, r_0 为 Fried 参数, 即大气相干长度。这样当望远镜口径迅速增大或湍流增强时, 需要的单元数迅速增加, 甚至到几千以上^[3]。

若把校正后残余方差 $\sigma^2 = 1 \text{ rad}^2$ 作为评价标准, 即峰值斯特列尔比 $S_r = \exp(-\sigma^2) = 1/e$, 可以得到校正畸变所需的 Zernike 模式数 n ^[16] 和变形镜单元数 m ^[3] 与 D/r_0 的关系为:

$$n = 0.244 (D/r_0)^{1.92}, \quad (1)$$

$$m = 1 + 0.72(D/r_0) + 0.17 (D/r_0)^2. \quad (2)$$

(1) 式和 (2) 式中 n 、 m 的对比如图 2(a) 所示, 图中可见, 随着 D/r_0 的增大, 校正残差要达到 1 rad^2 , 所需的变形镜单元数和 Zernike 模式数都有所增加, 但是变形镜单元数明显比 Zernike 模式数增加得更快。仿真中使用的是 127 单元的三角形方式排布的变形镜, 其影响函数为高斯形式, 设耦合系数 $p = 0.08$, 高斯指数设为 2^[13], 排布方式如图 2(b) 所示, 同时结合变形镜的最大行程问题, 设置变形镜电压变化范围为 $[-5 \text{ V}, 5 \text{ V}]$ ^[7]。考虑到变形镜拟合 Zernike 多项式的能力^[17], 文中选用 4~21、4~36、4~66 阶 Zernike 多项式来进行分析。

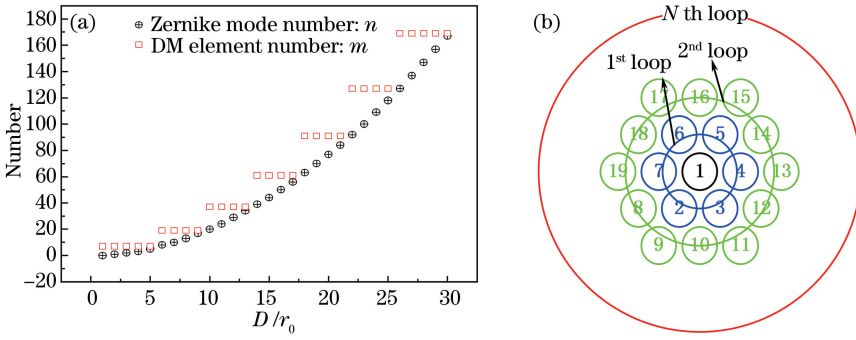


图 2 (a) $\sigma^2 = 1 \text{ rad}^2$ 时的 n 、 m 随 D/r_0 的变化对比; (b) 变形镜排布方式示意图

Fig. 2 (a) Comparisons of n and m under different D/r_0 when $\sigma^2 = 1 \text{ rad}^2$; (b) schematic diagram of arrangement of deformable mirror

2.3 算法实现模块

待校正畸变波前 $\Phi(x, y)$ 可以分解成一系列在圆域正交的 Zernike 多项式形式:

$$\Phi(x, y) = \sum_{i=1}^n a_i Z_i(x, y), \quad (3)$$

式中 $Z_i(x, y)$ 和 a_i 分别为第 i 阶 Zernike 多项式及其系数。

根据文献^[13], 由几何光学原理, 待校正畸变波前梯度的平方均值 S_{MG} 与成像平面上光强分布的二阶矩之间存在近似线性关系^[13]:

$$\iint_{x,y} \left\{ \left[\frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial x} \right]^2 + \left[\frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial y} \right]^2 \right\} dx dy \propto \iint_{x',y'} I(x', y') (x'^2 + y'^2) dx' dy'. \quad (4)$$

每次迭代时依次施加扰动系数为 α 的第 i 阶 Zernike 像差 $Z_i(x, y)$ 到待校正像差 $\Phi(x, y)$, 并采集和计算像差 $\Phi(x, y) + \alpha Z_i(x, y)$ 的修正探测信号 M_{DSi} , $i = 1, 2, \dots, n$, 可得到:

$$\mathbf{M} = - \left\{ \begin{array}{c} M_{DS1} - M_{DS0} \\ M_{DS2} - M_{DS0} \\ \vdots \\ \vdots \\ M_{DSn} - M_{DS0} \end{array} \right\}, M_{DS} = \frac{\iint_{x',y'} I(x', y') \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) dx' dy'}{\iint_{x',y'} I(x', y') dx' dy'}, \quad (5)$$

式中 M_{DS} 由 (4) 式右侧进行恒等变化得到, M_{DS0} 为未施加扰动时的修正探测信号, \mathbf{M} 为 n 维行向量, 故每次迭代只需测量 $n + 1$ 次远场光强分布。修正探测范围定义为 $1 - r^2/R^2$ ($r \leq R$) 和 0 ($r > R$), $r = \sqrt{x'^2 + y'^2}$, R 为可选的远场光斑探测半径, 模拟中一般取系统衍射极限的整数倍。

利用可事先计算的畸变波前梯度的平方均值 S_{MG} 的可逆积分矩阵 \mathbf{S} (P 为有效通光孔径的面积),

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} s_{1,1} & s_{1,2} & \cdots & s_{1,n} \\ s_{2,1} & s_{2,2} & \cdots & s_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{n,1} & s_{n,2} & \cdots & s_{n,n} \end{pmatrix},$$

$$S_{i,j} = \frac{1}{P} \iint_{x,y} \left\{ \left[\frac{\partial}{\partial x} Z_i(x,y) \frac{\partial}{\partial x} Z_j(x,y) \right] + \left[\frac{\partial}{\partial y} Z_i(x,y) \frac{\partial}{\partial y} Z_j(x,y) \right] \right\} dx dy$$

$$i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, n, \quad (6)$$

可得到 Zernike 模式系数,即 n 维列向量 $\mathbf{A} = \{a_i\}$, $i = 1, 2, \dots, n$ 的近似表达式:

$$\mathbf{A} = \frac{\mathbf{S}^{-1}(C_0 \mathbf{M} - \alpha^2 \mathbf{S}_m)}{2\alpha}, \quad (7)$$

式中向量 \mathbf{S}_m 为 \mathbf{S} 的主对角线元素, C_0 为斜率因子,是一个与 R 的选取有关的常数。设 $R=16$,拟合得到斜率因子 $C_0 = -107.8035$ 。

记变形镜的影响函数为 $F_i(x, y)$,则变形镜引入的相位可以表示为:

$$\Psi(x, y) = \sum_{i=1}^m V_i F_i(x, y), \quad (8)$$

式中 V_i , $i = 1, 2, \dots, m$ 为施加到变形镜第 i 个驱动器上的驱动电压。

设镜面上共有 K 个采样点,每一个采样点可建立一个方程,则(1)式和(6)式可以简化为一组线性方程,其矩阵形式为:

$$\begin{cases} \Phi = \mathbf{AZ} \\ \Psi = \mathbf{VF} \end{cases}, \quad (9)$$

式中 Φ 和 Ψ 为 K 维列向量,代表被拟合的波前; \mathbf{Z} 为 $n \times K$ 维矩阵,代表各个 Zernike 模式在每个采样点的值; $\mathbf{V} = \{v_i\}$, $i = 1, 2, \dots, m$ 为变形镜驱动电压列向量, \mathbf{F} 为 $m \times K$ 维矩阵,代表各个影响函数在每个采样点的值。一般情况下, $K \gg m \geq n$,方程组中方程的个数大于未知数的个数,故此方程组为数学上的“超定方程组”^[18],可以给出其唯一的最小二乘解:

$$\mathbf{V}_{ls} = (\mathbf{AZ}) \mathbf{F}^{-1}. \quad (10)$$

结合(7)式和(10)式可得每次迭代时的变形镜驱动电压表达式:

$$\mathbf{V} = \frac{\mathbf{S}^{-1}(C_0 \mathbf{M} - \alpha^2 \mathbf{S}_m)}{2\alpha} \mathbf{Z}_{C2V}, \quad (11)$$

式中 $\mathbf{Z}_{C2V} = \mathbf{ZF}^{-1}$ 为 Zernike 模式系数和变形镜电压的转换矩阵^[3,7-8,14]。

实际校正过程中,当 Zernike 模式数和变形镜单元数确定以后,常量 α , 向量 \mathbf{S}_m , C_0 , 矩阵 \mathbf{S} , \mathbf{Z}_{C2V} 可以在预处理过程中直接求出,与系统待校正的波前畸变没有关系,每次只需要测量远场光斑的分布并计算 M_{DS} 即可,从而大大提高了收敛速度。

3 数值仿真结果分析

由折叠式快速傅里叶变换(FFT)法加 4 阶低频补偿^[19]随机生成满足修正 Von Karman 谱的湍流相位屏,用 66 阶的 Zernike 多项式进行最小二乘拟合,并将活塞项(piston)和倾斜项(tip/tilt)移除得到初始畸变相位。在实际 AO 系统中,piston 项是相位整体偏移,不影响系统成像分辨率或光束质量,倾斜项另由倾斜镜单独校正。图 3(a)、(b)中依次随机给出了一组初始畸变波前[均方根(RMS)分别为 0.2457λ 、 0.4631λ 、 0.7955λ ,峰谷值(PV)分别为 1.6493λ 、 2.2786λ 、 6.3365λ]和校正前远场光斑(归一化)。

3.1 不同湍流强度下的算法收敛速度和收敛精度

针对不同湍流强度(D/r_0 分别为 5、10 和 20)时的随机畸变波前,固定扰动系数 $\alpha = 0.0005$, Zernike 模式数 n 为 4~66 阶, $C_0 = -107.8035$, 随机运行程序 100 次。图 3(c)给出了 100 frame 随机畸变波前的峰值斯特列尔比 S_r 变化曲线(不透明曲线)、1000 frame 的平均值(黑色点线)和相应的变形镜理想校正时的平均值(红色线)。从图中可以看出,5 次迭代后,所有曲线 100% 收敛到局部极值,且与变形镜理想校正结果非

常接近,这表明基于普适模型的无波前探测 AO 系统对不同强度的畸变具有较强的适应能力。从文献[11-15]可知,一次迭代后的校正结果反映了有模型优化无波前探测 AO 算法的校正能力,故对于每一帧随机畸变波前,若把一次迭代后的峰值斯特列尔比 S_{r1} 大于等于变形镜理想校正值 S_{r_ideal} 的 60% 定义为快速稳定收敛 (F_{sc}),则可以定义有模型优化的无波前探测 AO 系统的快速稳定收敛百分比为:

$$F_{sc} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i \right) \times 100\%, \quad (12)$$

式中 p_i 为每一帧的校正判断值, $(S_{r1}/S_{r_ideal}) \geq 0.6$ 时, $p_i = 1$, 否则为 0; N 为总帧数, N 越大结果越精确。从对 1000 frame 随机畸变波前的统计结果来看, D/r_0 分别为 5、10 和 20 时能够达到快速稳定收敛的百分比依次为 100%、87.1% 和 79%, 即随着湍流强度的增大,不仅收敛速度和收敛精度均有所下降,而且收敛稳定性降低,表现为图 3(c) 中灰色曲线变化趋势的差异性增大。从平均结果来看, D/r_0 分别为 5、10 和 20 时系统收敛的迭代次数依次为 2 次、3 次和 3 次,相应的远场光斑测量次数为 128 次、192 次和 192 次,相比无模型优化的无波前探测 AO 系统控制算法,该算法所需的远场光斑测量次数大大减少^[3,7]。

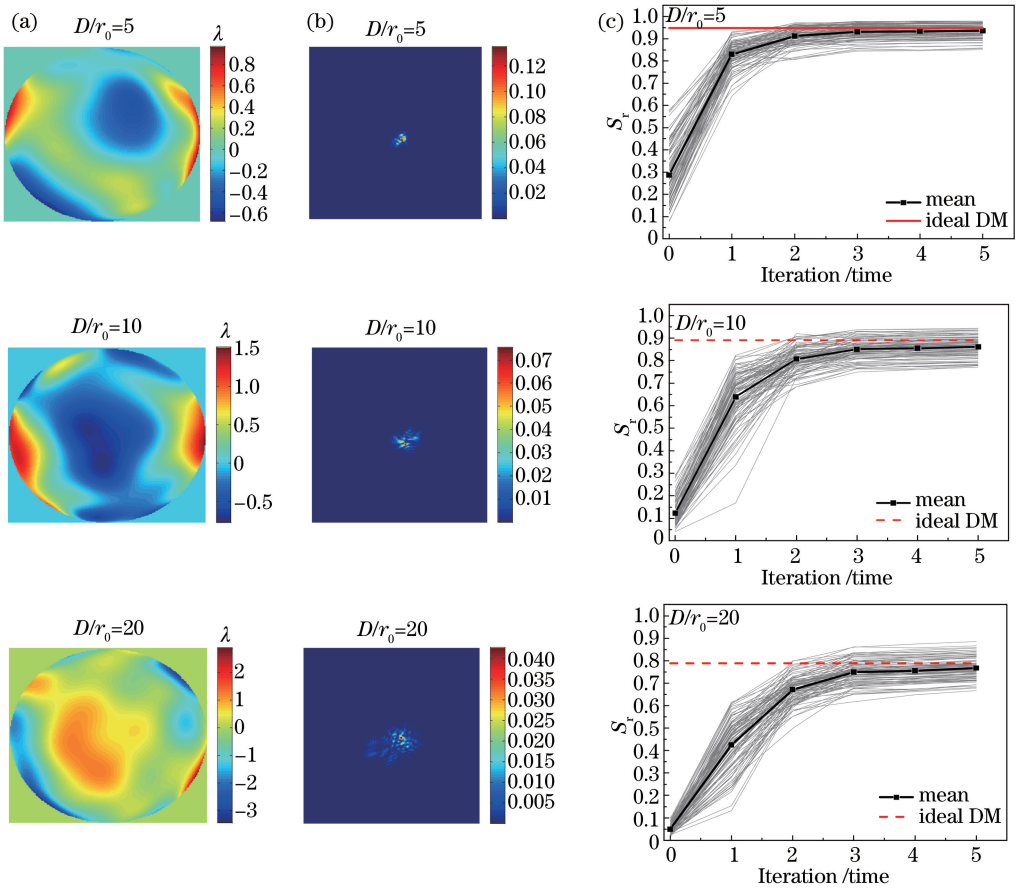


图 3 不同湍流强度下的(a)初始畸变波前示例;(b)初始远场强度分布(归一化)示例;(c)峰值斯特列尔比变化曲线

Fig. 3 (a) Initial distorted wave-front example; (b) initial normalized far-field intensity distribution example; (c) peak Strehl ratio curve under different turbulence intensities

3.2 同一畸变条件下不同扰动系数 α 和不同 Zernike 模式数

当 $C_0 = -107.8035$, $D/r_0 = 5$ 时,系统对不同扰动系数 α 和不同 Zernike 模式数的斯特列尔比变化曲线如图 4 所示,该曲线由 100 frame 不同相位屏的有关数据做系综平均得到。从图中可以看出当 $\alpha < 0.01$ 时,系统可以稳定地收敛到局部极值;当 $\alpha > 0.01$ 时,过大的扰动系数反而会破坏系统的近似线性关系,进而导致系统收敛速度下降,甚至有可能导致系统不稳定,斯特列尔比不升反降,且随着 Zernike 模式数的增多,这种降低趋势愈发明显,因为对于同一个 α 值,越高阶的 Zernike 像差震荡就越严重,甚至会增大误差;当 $\alpha > 0.5$ 时系统无法收敛到局部极值,起不到校正效果。实际系统工作时可以根据实验条件和本研究结果对

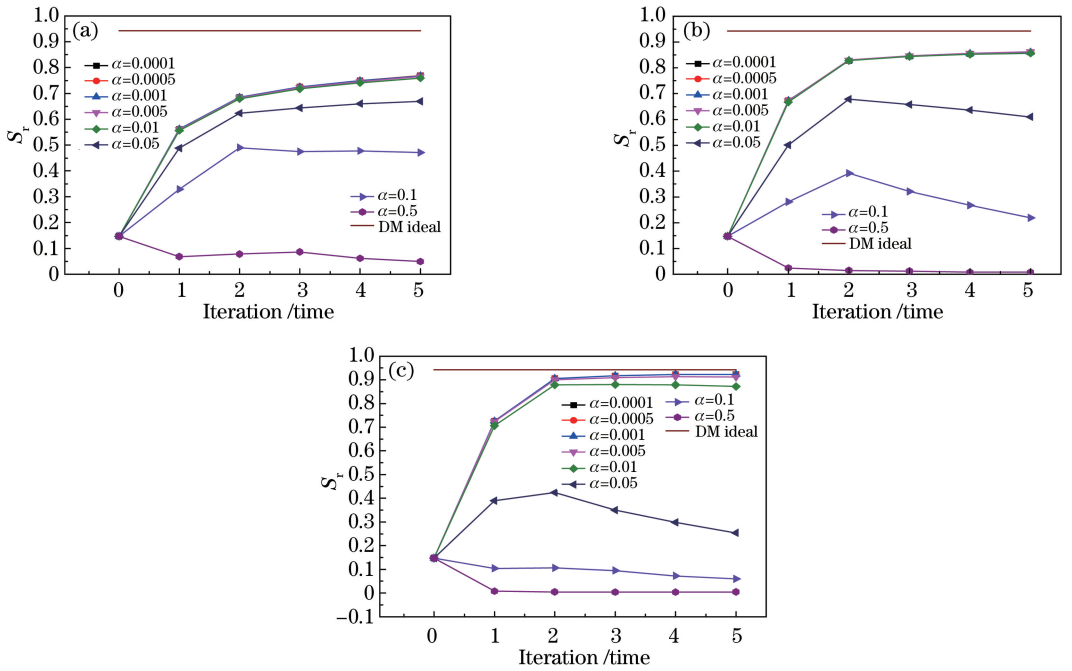


图 4 不同 Zernike 模式数和不同扰动系数 α 下的平均斯特列尔比迭代曲线。(a) Zernike 模式：4~21；
(b) Zernike 模式数：4~36；(c) Zernike 模式数：4~66

Fig. 4 Mean Strehl ratio iteration curves under different Zernike mode numbers and perturbation coefficient α .
(a) Zernike mode number: 4~21; (b) Zernike mode number: 4~36; (c) Zernike mode number: 4~66

从弱到强的湍流状况进行一定次数的尝试, 择优得到最合适的扰动系数 α 。

比较不同 Zernike 模式数对校正效果的影响可以发现, 随着 Zernike 模式数的增多, 一次迭代后的校正值和最终收敛值都明显升高。同时 Zernike 模式数的增加意味着测量次数的增加, 即收敛速度的降低, 但并不意味着收敛速度的绝对降低, 如仿真过程中, 基于 4~66 阶 Zernike 模式一次校正后 (远场光斑测量次数为 64 次) 的平均校正值与使用 4~21 阶 Zernike 模式进行 5 次校正后 (远场光斑测量次数为 95 次) 的平均校正值相当。所以在实际实验过程中, 可以根据畸变波前的像差组成, 权衡考虑收敛精度和收敛速度之间的利弊, 选取合适的 Zernike 模式数。

3.3 改进的矢量化斜率因子 C_0

从统计意义上, 去除 piston 项和倾斜项后的畸变波前残差为 $0.134(D/r_0)^{5/3}$; 去除 1~11 阶 Zernike 像差项后的畸变波前残差为 $0.0377(D/r_0)^{5/3}$, 同比下降了 71.87%; 去除 1~21 阶 Zernike 像差项后的畸变波前残差为 $0.0208(D/r_0)^{5/3}$, 同比下降了 84.48%^[19]。鉴于此特点, 提出矢量化的斜率因子 C_0 来提高系统的收敛性能。当畸变波前仅由一特定阶的 Zernike 模式组成时, 其修正后的探测信号与畸变波前梯度的平方均值的关系如图 5 所示。对每条曲线进行选择性的线性拟合, 以拟合斜率的标准差小于 0.1 为拟合标准, 可

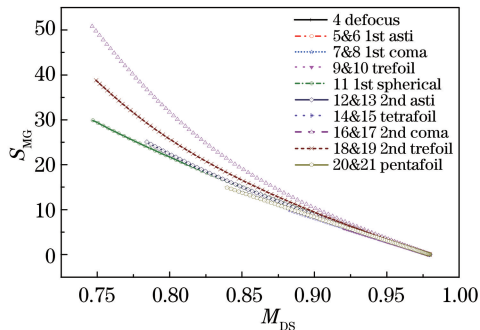


图 5 4~21 阶 Zernike 像差的 S_{MG} 与 M_{DS} 的关系曲线

Fig. 5 Relationship curves between S_{MG} and M_{DS} of 4~21 orders Zernike aberration

以依次优化得到 4~21 阶 Zernike 模式的斜率因子 C_0 ，优化结果见表 1，对 21 阶以后的 Zernike 模式斜率因子 C_0 仍采用原来的值 -107.8035。

表 1 4~21 阶 Zernike 像差及其优化斜率因子 C_0

Table 1 14~21 orders Zernike aberration and its optimized slope factor C_0

Z_i	Name	C_0	Standard error
Z_4	Defocus	-99.45282	0.00524
Z_5 & Z_6	1st astigmatism	-98.28835	0.00217
Z_7 & Z_8	1st coma	-104.16791	0.05734
Z_9 & Z_{10}	Trefoil	-100.10478	0.00863
Z_{11}	Spherical	-110.56978	0.08061
Z_{12} & Z_{13}	2nd astigmatism	-108.48167	0.09173
Z_{14} & Z_{15}	Tetrafoil	-102.34164	0.02449
Z_{16} & Z_{17}	2nd coma	-117.07448	0.07448
Z_{18} & Z_{19}	2nd trefoil	-111.83911	0.07146
Z_{20} & Z_{21}	Pentafoil	-104.3524	0.04676

利用优化后的矢量化斜率因子 C_0 和原统一的斜率因子 $C_0 = -107.8035$ 分别对比计算了不同湍流强度下 4~66 阶 Zernike 模式的校正效果，曲线由 500 frame 不同相位屏的有关数据做系综平均得到，如图 6 所示。当湍流较弱时，矢量化斜率因子 C_0 和原统一的斜率因子 C_0 之间收敛效果差距不大，矢量化斜率因子 C_0 表现略好；但随着湍流强度的增大，矢量化斜率因子 C_0 的优势逐渐显现，如 $D/r_0 = 20$ 时，一次迭代后的校正值提高了 13.88%，快速稳定收敛百分比提高到 89.7%，可见矢量化斜率因子 C_0 对大畸变湍流具有更强的适应性。实际系统工作时，考虑到变形镜拟合 Zernike 像差能力有限，可能会选用不同的基底模式^[15]，对具体斜率因子 C_0 的取值通常需要通过事先的测量或计算得到，对于那些对系统性能影响较大的畸变模式，可以使用所提到的方法来优化斜率因子。

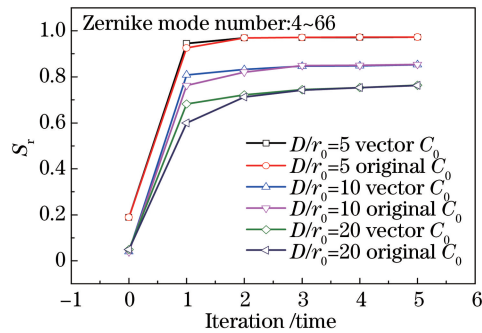


图 6 不同斜率因子 C_0 在不同湍流强度下的校正能力对比

Fig. 6 Comparisons of correction capabilities of different slope factor C_0 under variable turbulence intensities

4 结 论

介绍了基于普适模型的无波前探测 AO 系统的基本原理。以 127 单元变形镜作为波前校正器，建立了基于普适模型的无波前探测 AO 系统仿真模型，研究了不同湍流强度下扰动系数 α 、Zernike 模式数、斜率因子 C_0 对算法校正效果和收敛速度的影响。为了表征系统的校正效果，提出了快速稳定收敛的概念，该概念可适用于所有的有模型优化无波前探测 AO 系统。仿真结果验证了普适模型的无波前探测 AO 系统较快的收敛速度及对静态波前的校正能力，同时发现系统对扰动系数 α 是敏感的，过大的扰动系数会破坏校正效果，且 Zernike 模式数越高，破坏越严重。提出的矢量化斜率因子 C_0 可以有效提升系统在一次迭代后的收敛值，特别是对大畸变湍流具有更强的适应性。该研究结果对基于普适模型的无波前探测 AO 系统应用于实际 AO 系统具有重要意义，为实验参数的选取和进一步研究提供了理论依据。

参 考 文 献

- 1 Tyson R K. Principles of adaptive optics[M]. San Diego: Academic Press, 1991.
- 2 Gong Zhiben. Some research progress on high-energy laser propagation in atmosphere[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 1998, 15(2): 114-133.
龚知本. 激光大气传输研究若干问题进展[J]. 量子电子学报, 1998, 15(2): 114-133.
- 3 Ma Huimin. Numerical simulation research of SPGD adaptive correction for laser propagation in the atmosphere[D]. Hefei: Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, 2012: 59-70.
马慧敏. 激光大气传输 SPGD 自适应光学校正仿真研究[D]. 合肥: 中国科学院合肥物质科学研究院, 2012: 59-70.
- 4 Vorontsov M A, Carhart G W. Adaptive phase-distortion correction based on parallel gradient-descent optimization[J]. Optics Letters, 1997, 22(12): 907-909.
- 5 Carhart G W, Ricklin J C, Sivokon V P, *et al.* Parallel perturbation gradient descent algorithm for adaptive wavefront correction[C]. SPIE, 1997, 3126: 221-227.
- 6 Vorontsov M A, Carhart G W, Cohen M, *et al.* Adaptive optics based on analog parallel stochastic optimization: analysis and experimental demonstration[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2000, 17(8): 1440-1453.
- 7 Yang Huizhen, Chen Bo, Li Xinyang, *et al.* Experiment demonstration of stochastic parallel gradient algorithm for adaptive optics system[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(2): 205-210.
杨慧珍, 陈 波, 李新阳, 等. 自适应光学系统随机并行梯度下降控制算法实验研究[J]. 光学学报, 2008, 28(2): 205-210.
- 8 Yang P, Ao M W, Liu Y, *et al.* Intracavity transverse modes controlled by a genetic algorithm based on Zernike mode coefficients[J]. Optical Express, 2007, 15(25): 17051-17062.
- 9 Yang Ping, Ao Mingwu, Liu Yuan, *et al.* Adaptive optics genetic algorithm based on Zernike mode coefficient [J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(3): 367-372.
杨 平, 敖明武, 刘 渊, 等. 基于 Zernike 模式系数的自适应光学遗传算法[J]. 中国激光, 2008, 35(3): 367-372.
- 10 Zommer S, Ribak E N, Lipson S G, *et al.* Simulated annealing in ocular adaptive optics[J]. Optics Letters, 2006, 31(7): 939-941.
- 11 Booth M J. Wave front sensor-less adaptive optics: a model-based approach using sphere packing[J]. Optics Express, 2006, 14(4): 1339-1352.
- 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 Huang L H, Rao C H. Wavefront sensorless adaptive optics: a general model-based approach[J]. Optics Express, 2009, 19(1): 371-379.
- 14 Yang Huizhen, Wu Jian, Gong Chenglong. Model-based sensorless adaptive optics system[J]. Acta Optics Sinica, 2014, 34(8): 0801002.
杨慧珍, 吴 健, 龚成龙. 基于模型的无波前探测自适应光学系统[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0801002.
- 15 Huang L H. Coherent beam combination using a general model-based method[J]. Chinese Physics Letters, 2014, 31(9): 094205.
- 16 Noll R J. Zernike polynomials and atmosphere turbulence[J]. Journal of the Optical Society of America, 1976, 66(3): 207-211.
- 17 Jiang M S, Zhou C Q, Wang W C, *et al.* Comparative analysis of Zernike aberrations generation with deformable mirrors for ocular adaptive optics[J]. Journal of Modern Optics, 56(18): 1741-1746.
- 18 张韵华, 奚梅成. 数值计算方法和算法[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 63-73.
- 19 Schmidt J D. Numerical simulation of optical wave propagation with examples in Matlab[M]. Washington D C: SPIE Press, 2010: 150-183.