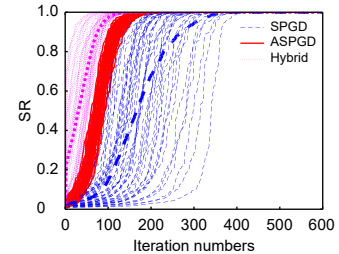


DOI: 10.12086/oe.2022.220020

混合模型算法在无波前传感自适应光学中的应用

刘武杰, 元秀华*, 周泽宇, 李奇, 赵茗

华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074



摘要: 应用 Lukosz 预校正模型算法可以校正波前畸变的低阶像差, 缩小迭代算法的搜寻范围; 应用自适应余弦衰减的随机并行梯度下降 (AcSPGD) 算法可以补偿波前畸变的高阶像差, 提升迭代算法的校正精度。本文提出了一种基于预校正模型和 AcSPGD 算法的混合模型算法, 并将其应用于无波前传感自适应光学系统中校正湍流大气产生的畸变波前, 最后搭建实验光路验证了算法的有效性。结果表明, 混合模型算法的校正速率是常用的随机并行梯度下降 (SPGD) 算法的 3 倍, 且校正精度比传统的 Lukosz 模型算法更高, 应用于无波前传感自适应光学系统中有效减小了光场波前的相位起伏, 提高了远场光斑斯特列尔比 (SR), 使自由空间光通信 (FSO) 系统的通信性能得到有效提升。

关键词: 自由空间光通信; 无波前传感自适应光学; 随机并行梯度下降算法; Lukosz 模型

中图分类号: TN929.1; O439

文献标志码: A

刘武杰, 元秀华, 周泽宇, 等. 混合模型算法在无波前传感自适应光学中的应用 [J]. 光电工程, 2022, 49(12): 220020

Liu W J, Yuan X H, Zhou Z Y, et al. Application of hybrid modal algorithm in wavefront sensorless adaptive optics[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(12): 220020

Application of hybrid modal algorithm in wavefront sensorless adaptive optics

Liu Wujie, Yuan Xiuhua*, Zhou Zeyu, Li Qi, Zhao Ming

School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract: The Lukosz pre-correction modal algorithm can correct low-order aberrations of wavefront distortion and narrow the search range of iterative algorithms. The adaptive cosine-decay stochastic parallel gradient descent (AcSPGD) algorithm can compensate for high-order aberrations of wavefront distortion and improve the correction accuracy of iterative algorithms. In this paper, a new hybrid modal algorithm based on the pre-correction model and AcSPGD algorithm is applied to correct wavefront distortion in wavefront sensorless adaptive optics, and the feasibility of the optimization algorithm is also verified by the experiments. Experimental results show that the correction speed of the hybrid modal algorithm is two times faster than the commonly used stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm, and the correction accuracy of the hybrid modal algorithm is better than the traditional Lukosz modal algorithm. Applied to wavefront sensorless adaptive optics, the optimization algorithm effectively reduces the phase fluctuation of the wavefront and improves the far-field Strehl ratio (SR), thus improving the communication performance of the free-space optical communication (FSO) system.

收稿日期: 2022-03-18; 收到修改稿日期: 2022-08-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (62005088)

*通信作者: 元秀华, yuanxh@hust.edu.cn。

版权所有©2022 中国科学院光电技术研究所

Keywords: free-space optical communications; wavefront sensorless adaptive optics; stochastic parallel gradient descent algorithm; Lukosz model

1 引言

空间光通信具有容量大、数据传输速率高、抗电磁干扰能力强、安全保密性好等一系列优点,是构建空天地通信网络的不可或缺的信息传输方式之一。然而,在星-地自由空间光通信中,湍流大气效应给光学系统引入畸变像差,不仅会造成传输光束扩展、漂移及闪烁^[1-5],还会导致通信系统耦合效率下降、信噪比降低、误码率增加。因此,校正光场相位随机变化引起的波前畸变像差,是自由空间光通信面临的关键技术问题^[6-10]。

在空间光通信系统中,引入无波前传感自适应光学技术,是校正湍流大气产生的畸变波前的有效方案。近些年对无波前传感自适应光学系统的研究中,各种寻优算法相继被提出:2015年,牛超君^[11]分别采用差异进化(DE)算法、模拟退火(SA)算法和SPGD算法对不同湍流强度下波前畸变的校正过程进行了仿真,当大气相干长度 $r_0 = 0.04 \text{ m} \sim 0.1 \text{ m}$ 时,处于NRZ-OOK调制下的FSO系统的误码率均能够降低到 10^{-6} 以下满足通信要求;2018年,顾海军^[12]将粒子群优化(PSO)算法应用到无限电力传输系统中,通过自适应光学(adaptive optics, AO)技术使光伏面板的光电转换效率从40.58%提升到79%,大幅提升了能量利用率;2020年,杨奎星^[13]利用随机并行梯度下降模型(M-SPGD)算法对8 km城市自由空间链路中的激光传输进行了实验,在 $D/r_0 = 9.5$ 的大气湍流下,FSO系统接收端的耦合效率提升了约3.7 dB,使其在远程量子通信中得到了发展;胡琴涛^[14]提出了一种ASPGD算法利用动量和自适应的增益系数加快收敛速度,使迭代次数减少了50%,该算法对参数具有极强的鲁棒性,且可以避免陷入局部极值点。除了上述这些无模型优化算法,有模型的优化算法也拥有极大的应用价值。2018年,单月^[15]借助线性相位分集法将可变形镜的驱动电压和远场图像之间构建起线性模型,显著增强了AO系统的成像质量;何旭^[16]和崔莹^[17]分别利用Martin模型算法和JA(Jacopo Antonello)模型算法补偿低阶像差,用SPGD算法校正高阶像差,成功恢复出原始光斑,从而验证了混合算法提升光纤耦合效率的可行性;任虹禧^[18]对

Lukosz模型算法提出了改进,不仅使图像采集次数从原来的 $2N+1$ 减少到 $N+2$,还大幅提升了扩展物体的成像分辨率。

然而这些算法都有一定的局限性:无模型算法虽然可以全频域校正波前像差,但是往往迭代数百次才会收敛,校正速率较低;而有模型算法虽然校正速度快,但是只能校正部分低阶像差,校正精度不够高。因此,为了能够同时获得高校正精度和快校正速率,本文提出了一种混合模型算法,利用像差先验知识改进传统的Lukosz模型,对低阶Lukosz模式像差进行评估和补偿,然后通过余弦衰减(cosine_decay)算子修正ASPGD算法,进一步校正其余的高阶像差和低阶残差。

本文先通过数值仿真随机模拟出50组Kolmogorov湍流功率谱下、大气湍流强度均是 $D/r_0 = 5$ 的波前畸变,然后分别采用SPGD算法、ASPGD算法和混合模型算法进行校正,并对仿真结果进行了定量的对比分析,最后在FSO系统的光接收机端引入无波前传感自适应光学系统,应用混合模型算法对动态变化的畸变波前实施实时校正,通过实验验证了算法的有效性。混合模型算法对近地面光链路、地-空链路、空-地链路的无线光通信系统的通信性能的提升有一定的帮助。

2 理论推导

2.1 ASPGD算法

SPGD算法的基本思想是利用性能指标 J 的变化量 ΔJ 和控制电压 u 的变化量 Δu 进行控制电压的梯度估计,通过迭代的方式在梯度下降方向上进行控制电压的搜索^[19],直至性能指标 J 搜索出极大值。而ASPGD算法则是在SPGD算法的基础上采用Adam算子^[20]进行修正,突破了SPGD算法在迭代初期搜索极其缓慢的局限性,获得了更高的校正效率。

如果对性能指标函数 J 的差值 ΔJ 进行泰勒近似并忽略掉高阶项,那么下降梯度增益 g_k 可以近似表示成:

$$g_k = \frac{\partial J}{\partial u_k} = \frac{\Delta J \cdot \Delta u_k}{2(\Delta u)^2}, \quad (1)$$

其中: $\Delta u_k = \pm \Delta u$ 属于随机生成的电压微扰项。应用 Adam 算子对传统的 SPGD 算法进行修正, 则有:

$$\begin{cases} m_k^t = \beta_1 m_k^{t-1} + (1 - \beta_1) g_k^t \\ v_k^t = \beta_2 v_k^{t-1} + (1 - \beta_2) (g_k^t)^2 \\ \hat{m}_k^t = \frac{m_k^t}{1 - \beta_1^t} \\ \hat{v}_k^t = \frac{v_k^t}{1 - \beta_2^t} \end{cases}, \quad (2)$$

其中: t 是迭代次数, m_k^t 和 v_k^t 是引入的动量项因子, 分别代表下降梯度的一阶矩和二阶矩, β_1 和 β_2 是相应的指数衰减率常数, 通常取 0.2 和 0.999, \hat{m}_k^t 和 \hat{v}_k^t 分别是 m_k^t 和 v_k^t 的偏差修正项。

对控制电压 u_k 进行迭代更新, 得到:

$$u_k^t = u_k^{t-1} + \eta \cdot \frac{\hat{m}_k^t}{\sqrt{\hat{v}_k^t + \varepsilon}}, \quad (3)$$

其中: η 是学习速率, 它控制了权重的更新比率, η 越大, 那么初始的搜索速率越快, η 越小, 那么最终的收敛性能会越好。 ε 是无穷小量, 通常取 10^{-8} 。

相比于 SPGD 算法, ASPGD 算法的校正速率是它的 2 倍, 且对迭代步长的敏感度更低^[14], 校正精度也更高。尽管如此, ASPGD 算法盲搜索的迭代次数依旧需要上百次, 其收敛时间理论上存在改进之处。

2.2 Lukosz 模型算法

Lukosz 多项式是 Zernike 多项式的线性叠加, 且具有导数正交的特性^[21], 因此前 N 阶 Lukosz 模式的线性组合也可以完备地描述大气湍流产生的畸变波前:

$$\Phi = \sum_{i=1}^N l_i L_i, \quad (4)$$

其中: l_i 是第 i 阶 Lukosz 多项式 L_i 的模式系数。

对于不包含倾斜项的波前像差, 当评估第 i 阶 Lukosz 多项式模式系数的校正量时, 可以利用可变形镜向光学系统中分别添加偏移量为 $+b_i L_i$ 和 $-b_i L_i$ 的模式像差, 然后测量相对应的系统评价函数分别为 G_+ 和 G_- , 那么评价函数和模式系数之间将满足以下二次方程组的关系:

$$\begin{cases} G_0 = q_0 + q_1 \sum_{k \neq i} l_k^2 + q_1 l_i^2 \\ G_+ = q_0 + q_1 \sum_{k \neq i} l_k^2 + q_1 (l_i + b_i)^2 \\ G_- = q_0 + q_1 \sum_{k \neq i} l_k^2 + q_1 (l_i - b_i)^2 \end{cases}, \quad (5)$$

其中: G_0 是光学系统的初始评价函数, q_0 和 q_1 都是与远场光斑图像相关的常数。借助抛物线函数的对称轴来估计最佳校正像差位置^[22-23], 联立方程组进行求解可以得到第 i 阶 Lukosz 多项式的校正量 $l_{i, \text{correct}}$ 应该为:

$$l_{i, \text{correct}} = -l_i = -\frac{b_i(G_+ - G_-)}{2G_+ + 2G_- - 4G_0}. \quad (6)$$

可以发现在每次迭代过程中, 校正 N 阶 Lukosz 多项式的模式系数需要 $2N+1$ 次评价函数的测量。但是根据最优晶格的研究, 晶格覆盖最多只能满足 5 维^[24], 因此测量的时候只需要考虑前 5 阶 Lukosz 模式的影响, 即算法迭代一次需要测量 11 次评价函数。

由于极少的测量可以换来波前畸变极大的提升, Lukosz 模型算法的校正速率极快, 非常适合于短时间补偿起伏较小的像差, 同时由于 Lukosz 模型算法无法有效校正更高阶的模式像差, 导致其校正精度受到了一定的局限。

2.3 混合模型算法

ASPGD 算法的学习速率 η 如果太大将会导致迭代后期收敛速率的急速下跌, 适当减小 η 能够获得更好的收敛性能, 因此可以采用 cosine_decay 算子^[25] 控制学习速率的范围, 通过余弦减小的方式来避开局部收敛区域, 使最终的校正速率得到提升, 这种改进的方法称为 AcSPGD 算法。第 t 次迭代时的学习速率 η_t 可以表示成:

$$\eta_t = \eta_{\min} + \frac{1}{2}(\eta_{\max} - \eta_{\min}) \left(1 + \cos\left(\frac{t}{T}\pi\right)\right), \quad (7)$$

其中: T 是算法的总迭代次数, 被硬件条件所限制, η_{\max} 和 η_{\min} 分别是人为设置的最大学习速率和最小学习速率。

此外, Lukosz 模型算法的校正精度受初始像差的均方根 (RMS) 和测量偏移量系数 b_i 的影响极大^[26-27]: 如果初始像差很小, 模型算法在较小的测量偏差下就可以获得最佳校正精度, 但是当初始像差大于所给定的测量偏差时, 评价函数的极值点就会偏离二次曲线搜索区导致算法局部收敛, 倘若此时采用较大的测量偏差来校正, 偏置曲线在边界区域的局部斜率又会产生较大的误差, 不同模式之间的串扰就会降低像差系数的测量精度。因此, 可以根据像差先验知识改变校正模式顺序, 首先测量并校正前 4~8 阶 Lukosz 模式中较大的模式像差, 减小系统中大像差之间产生的串

扰, 使评价函数与模式像差之间尽可能满足二次关系, 然后用 Lukosz 模型算法精确补偿剩余的小残差, 这样有利于扩大测量偏移量的选取范围, 避免二次曲线区域的失真, 进而提升 Lukosz 模型算法的校正精度, 这种方法称为预校正模型算法。其中 4~8 阶 Lukosz 模式中较大的模式像差的判断方法如下:

在预测第 i 阶 Lukosz 多项式模式系数的校正量时, 可以优先利用可变形镜向光学系统中分别添加评估偏移量为 $+e_i L_i$ 和 $-e_i L_i$ 的模式像差, 然后测量相对应的系统评价函数分别为 G_+ 和 G_- , 如果假设校正方向以评价函数越大越优, 那么就选取比 G_0 更大的添加方式作为该阶模式像差的初始校正, 如果两种添加方式均不能使评价函数增大, 说明该阶模式像差实际上较小, 不需要提前添加较大的评估偏移量。

混合模型算法就是将以上两种改进的算法相结合来校正波前畸变的, 首先利用预校正模型评估出一个较优的初始 Lukosz 模式系数, 对波前畸变的低阶像差进行初步校正, 然后通过 AcSPGD 算法对低阶残差和待校正的高阶像差进行补偿, 这样既能够获得极快的起始收敛速度, 又能够提升最终的校正精度。混合模型算法的流程图如图 1 所示。

3 仿真结果

在 Kolmogorov 湍流功率谱的条件下, 利用前 15 阶 Zernike 多项式随机生成 20 个等距排列的大气相干长度为 0.04 m 的湍流相位屏, 其中前 3 阶模式像差系数均设置为 0, 并通过多相位屏模型^[28]模拟激光在大气中的传输过程, 具体仿真参数如表 1 所示。

选择 Zernike 多项式系数作为校正目标, 选择 SR 作为系统评价函数, 分别利用 SPGD 算法、ASPGD 算法和混合模型算法校正湍流强度为 $D/r_0 = 5$ 的波前畸变, 重复 50 次实验减小偶然性, 校正结果如图 2 所示, 图 3 给出了其中一次混合模型算法校正时前 4~15 阶 Zernike 多项式系数的补偿结果。仿真时, Zernike 系数的扰动幅度均选取 0.00038, SPGD 算法的增益系数 γ 选取 80000, ASPGD 算法的学习速率 η 选取 0.01, 混合模型算法的最大学习速率 η_{\max} 和最小学习速率 η_{\min} 分别选取 0.02 和 0.01, 评估偏移量系数 e_i 和测量偏移量系数 b_i 分别选取 2 和 7。

图 2 中三条粗线分别代表着三种算法的 50 次校正结果的平均变化曲线: 混合模型算法经过 1 次大像差评估后, 第 4、7、8 阶 Zernike 模式像差得到了有

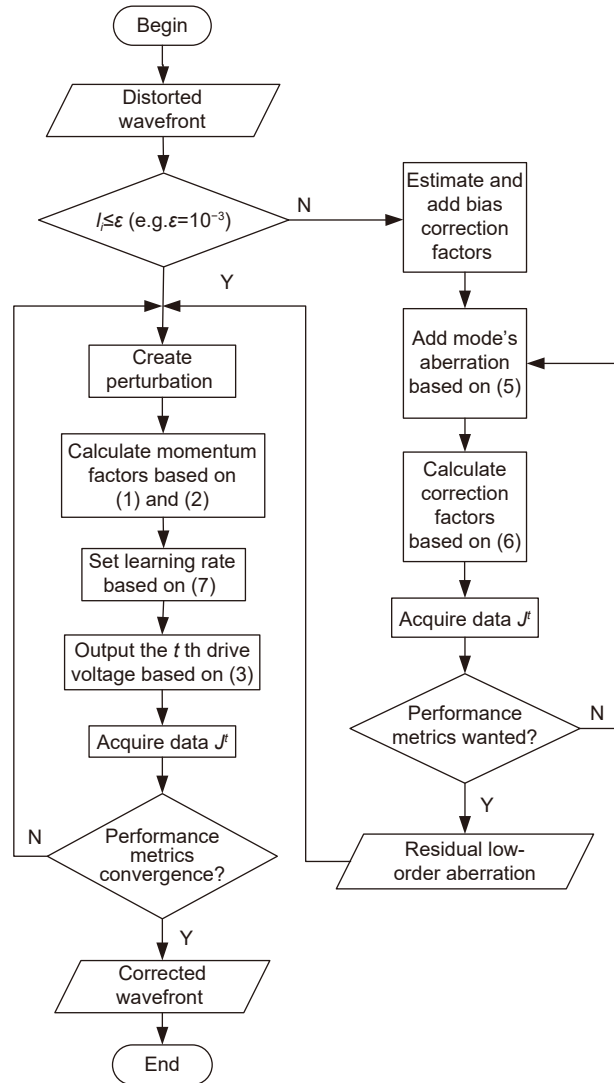


图 1 混合模型算法流程图

Fig. 1 Flow chart of the hybrid modal algorithm

效的初次校正, 此时 SR 从 0.03 提升到 0.05, RMS 也相应从 1.51 rad 减小到 1.43 rad, 然后再借助 Lukosz 抛物线模型估测最佳校正偏移量, 经过 2 次迭代, 前 4~15 阶 Zernike 模式像差均有所减小, SR 从 0.05 迅速提升到 0.23, RMS 也从 1.43 rad 大幅减小到 0.77 rad, 表明预校正模型有助于缩小横向搜寻区域, 提升算法的收敛速度; 忽略不同算法计算量的差异从收敛时间上来对比, 混合模型算法、ASPGD 算法和 SPGD 算法的迭代次数分别达到了 119 次、169 次和 351 次, 说明混合模型算法的收敛速率大约是 ASPGD 算法的 1.5 倍, 是 SPGD 算法的 3 倍, 同时也验证了文献 [9] 中 ASPGD 算法的校正速率是 SPGD 算法的 2 倍的结论。

表 1 湍流大气传输数值仿真参数列表
Table 1 System parameter settings in the simulation

Parameters	Values
Distance/km	2
Wavelength/m	1550×10^{-9}
Beam waist/m	2×10^{-2}
Sampling number	256

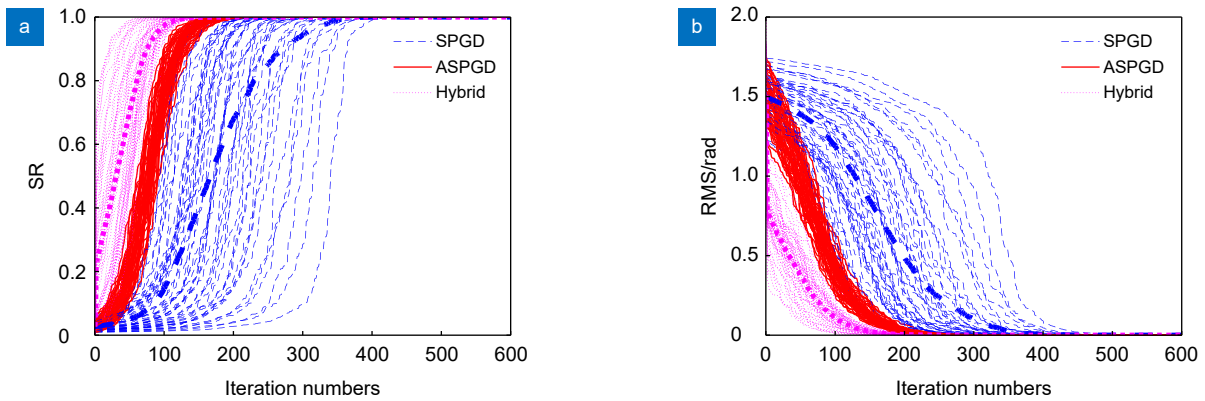


图 2 不同算法校正结果对比图。(a) SR 变化曲线; (b) RMS 变化曲线
Fig. 2 Correction results of different optimization algorithms. (a) SR varies; (b) RMS varies

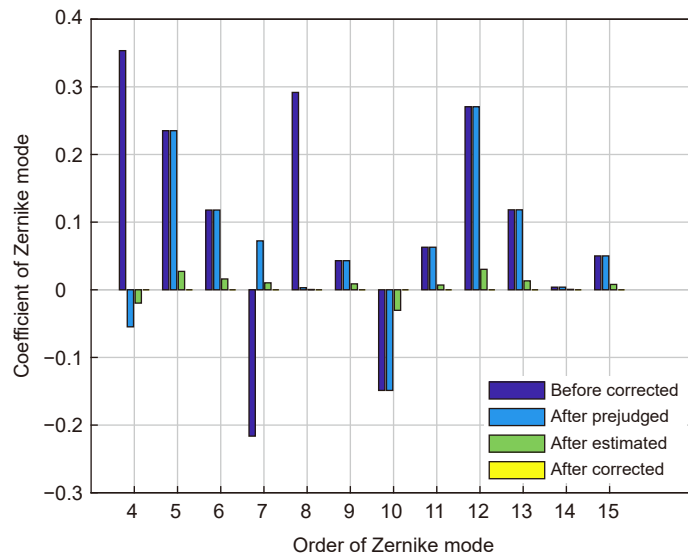


图 3 混合模型算法校正前后 Zernike 系数柱状对比图
Fig. 3 Histogram of Zernike coefficients between hybrid algorithm correction

4 实验验证

本文搭建了一套无波前传感自适应光学实验系统进行算法验证, 实验系统如图 4 所示, 主要由 1550 nm 激光光源、光扩束系统、静相位屏、可变形镜和红外相机组成。其中, LEXITEK 静相位屏的光窗直径为 100 mm, 内部光程差范围在 5 μm~30 μm, 能够产生相干长度为 3 cm 的大气湍流, 相位分布满足

Kolmogorov 湍流理论; DMP40 可变形镜是美国 Thorlabs 公司旗下具有 40 个可驱动单元的压电式变形镜, 光瞳直径为 1 cm, 响应频率为 2 kHz, 可以通过前 15 阶 Zernike 多项式系数或者 40 个促动器单元的分段电压来直接控制镜面面型。

在图 4(a) 的原理图中, 实线表示光信号路径, 虚线表示电信号路径。由 1550 nm 激光器发出的基模高

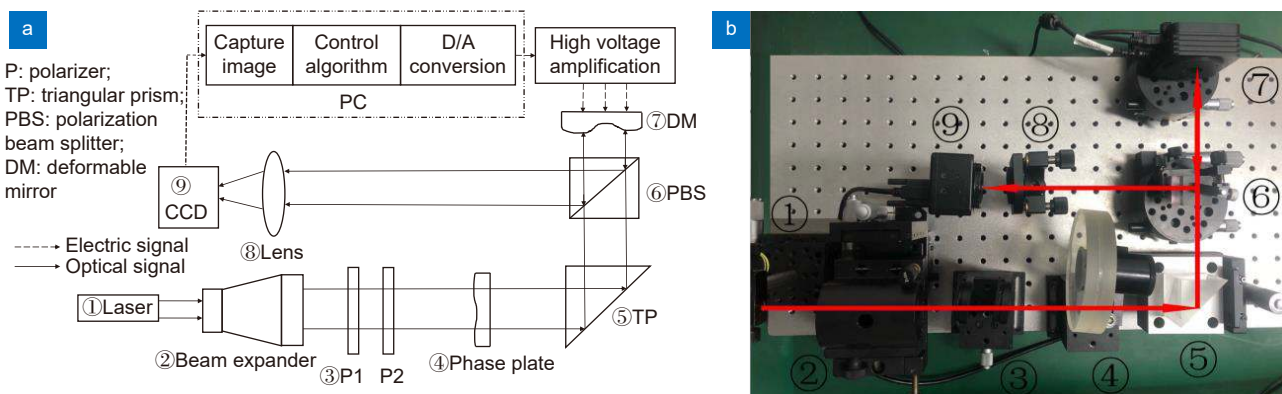


图 4 无波前传感自适应光学系统。(a) 原理图; (b) 实物图
Fig. 4 The wavefront sensorless adaptive optical system. (a) Schematic; (b) Experiment

斯光束先通过扩束镜扩束 6 倍, 接着通过偏振片组降低光强避免接收端的相机采样过曝, 再经过静相位屏产生随机相位畸变, 然后经过三棱镜的反射垂直入射到可变形镜的镜面上进行波前校正, 最后反射光经过分光棱镜的反射后被焦距为 50 mm 的凸透镜聚焦, 接收端采用红外相机采集远场光斑, 并通过混合模型算法处理图像信息, 实时产生迭代的驱动电压来控制可变形镜的镜面, 从而实现无波前传感自适应光学系统的闭环校正。实物图如图 4(b) 所示。

实验中, 随机采集远场光斑图像, 将像清晰度函数作为系统的评价函数, 即图像像素的归一化矩阵的平方和, 并利用 SPGD 算法和混合模型算法分别校正波前畸变, 光斑的光场分布如图 5 所示。

从图 5 可以看出, 校正前的远场光斑受静相位屏散射的影响较大, 光强分布弥散不均匀, 而校正后的光斑半径更小、能量更集中, 形状也更接近于圆形。远场光斑沿纵轴方向的光场分布如图 6 所示。

利用最小二乘法对远场光斑的光场分布进行高斯拟合, 通过计算可知经过 SPGD 算法和混合模型算法校正后, 远场光斑的半高全宽从 42 pixels 分别减小到 30 pixels 和 25 pixels, 峰值光强也从 73.1 分别增

加到 131.3 和 154.3, SR 大约提升了 2 倍, 结果表明混合模型算法比 SPGD 算法的校正效果更优。

将迭代次数作为横坐标, 远场光斑的归一化平均光强作为纵坐标, 分别画出 SPGD 算法和混合模型算法在校正过程中评价函数的变化曲线对比图, 如图 7 所示。从图中可以发现, 混合模型算法和 SPGD 算法分别在迭代 28 次和 84 次以后逐渐趋于收敛, 表明混合模型算法收敛速率大约是 SPGD 算法的 3 倍; 此外比较两种算法的收敛极值, 远场光斑归一化光强分别从初始的 347 增加到了 583 和 561, 表明混合模型算法比 SPGD 算法的校正精度要更高, 这些结论都与仿真结果相符。倘若比较两种算法的初始校正速率, 以像清晰度函数校正到 500 为目标, 它们需要的迭代次数分别为 5 次和 67 次, 表明混合模型算法的初始校正速率大约是 SPGD 算法的 13 倍, 这为大气激光通信实验中需要快速实时地校正波前畸变提供了帮助。

图 8 是基于 NRZ-OOK 调制的室内大气激光通信实验的原理图。在发射端, 借助误码仪作为信号源来生成调制速率为 20 MHz、数据码型为 $2^{31}-1$ 的随机码, 并将其作为激光驱动电路的基带信号驱动半导体激光器发出 1550 nm 激光光束。携带调制信号的基模高斯

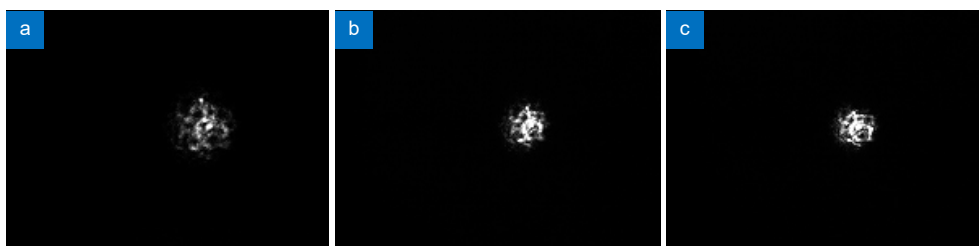


图 5 远场光斑光强分布图。(a) 叠加随机像差; (b) SPGD 算法校正后; (c) 混合模型算法校正后
Fig. 5 Captured intensity of the far-field spot. (a) Before corrected; (b) Corrected by the SPGD algorithm; (c) Corrected by the hybrid algorithm

光束先经过扩束镜扩束 6 倍, 接着通过转速约 15 r/m 的旋转相位屏产生 $D/r_0 = 0.8$ 的随机畸变, 最后被无波前传感自适应光学系统实时校正波前像差。在接收端, 采用 APD 和跨阻放大电路将探测到的光强信号转换成电压信号, 借助示波器就可以观察到实时传输的信号波形, 实验中采集到的 20 MHz 方波信号的波形如图 9 所示; 以 5 MHz 为间隔改变调制信号的传输速率, 可以得到校正前后误码率随调制速率的变化曲线, 如图 10 所示。

经过 SPGD 算法和混合模型算法的优化后, 20 MHz 方波信号的信噪比从 30.5 dB 分别提升到了

33.2 dB 和 33.4 dB, 表明混合模型算法能够获得更高的信噪比。而 2.9 dB 的性能提升能够使大气激光通信系统的传输误码率从 10^{-5} 降低到 10^{-6} , 对于 50 Mb/s 内的自由空间光通信系统, 混合模型算法均能够有效改善其通信性能。无波前传感自适应光学系统的校正带宽受红外相机采样频率的限制, 同时可变形镜促动器影响函数模拟各阶 Lukosz 模式像差时也存在拟合误差, 这些都会影响到最终的校正效果。且本文仅从光学信号的处理角度研究了光信号传输特性, 若要提升通信系统整体性能, 还可以增加向前纠错的措施来达到更高速率、更低误码的通信要求。

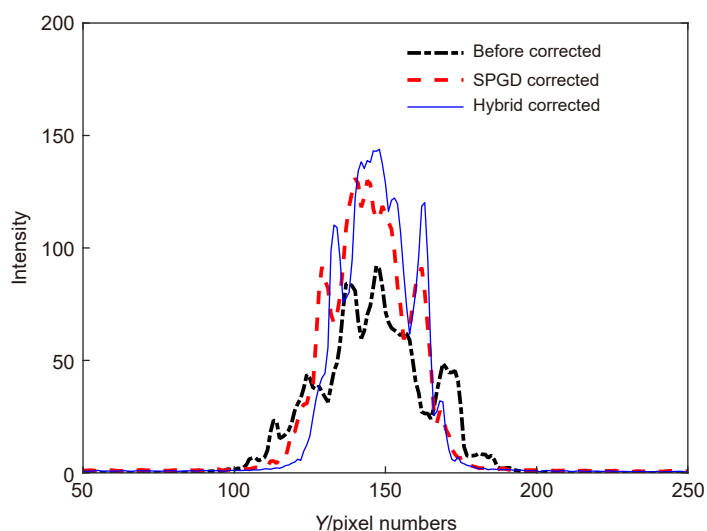


图 6 远场光斑光强纵向分布图

Fig. 6 Fitted intensity of the far-field spot on the horizontal axis

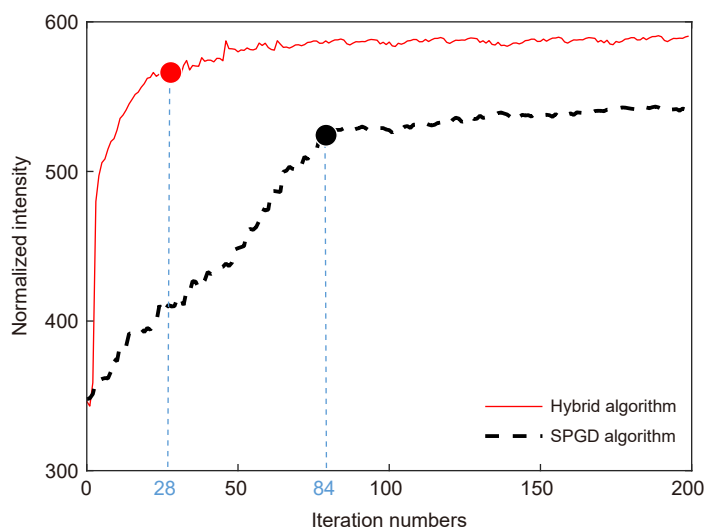


图 7 评价函数的变化曲线对比图

Fig. 7 Improvement of normalized intensity for different algorithms

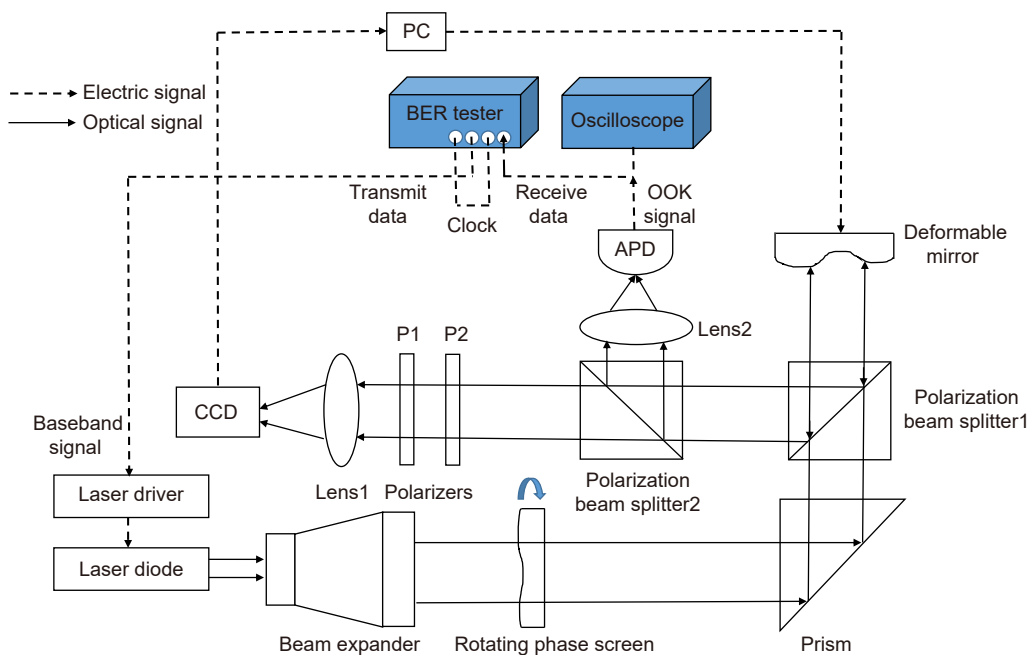


图 8 大气激光通信实验光路图

Fig. 8 Experiment of data transmission in atmospheric laser communications

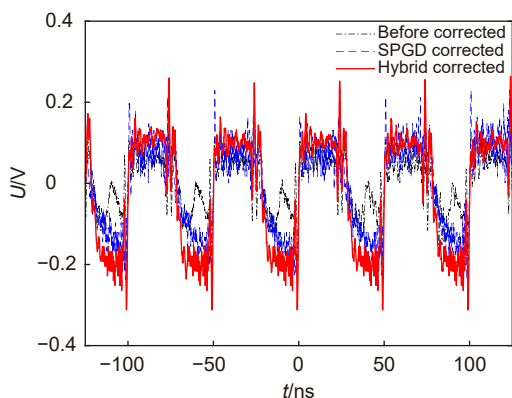


图 9 大气湍流传输实测波形

Fig. 9 Waveform measured in atmospheric turbulence

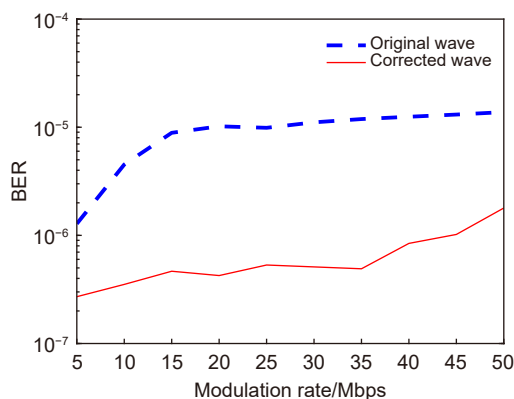


图 10 误码率随调制速率的变化曲线

Fig. 10 Variation curve of BER with modulation rate

5 结论

本文提出了一种应用于无波前传感自适应光学系统的混合模型算法, 以补偿大气湍流造成的像差畸变, 采用 Lukosz 预校正模型和 AcSPGD 算法分别校正了低阶和高阶像差, 并提升了迭代算法的校正精度和收敛速度。实验结果表明, 混合模型算法的收敛速度是传统的 SPGD 算法的 3 倍, 且可以获得更高的信噪比; 将该算法应用在 50 Mb/s 的大气激光通信系统中, 系统误码率下降到 10^{-6} , 通信质量有了较大改善。

参考文献

- [1] Zhou Z Y, Zhou X X, Yuan X H, et al. Research on characteristics of Bessel-Gaussian Schell-model beam in weak turbulence[J]. *Opt Commun*, 2020, **474**: 126074.
- [2] Li Q, Yuan X H. Experimental study on compensation of beam distortion caused by turbulence using a phase conjugate beam[J]. *J Mod Opt*, 2021, **68**(11): 573-578.
- [3] Zhou X X, Zhou Z Y, Yuan X H. Research on performance of convex partially coherent flat-topped beams in vertical atmospheric turbulent paths[J]. *Opt Commun*, 2021, **482**: 126577.
- [4] Wang M H, Yuan X H, Li J, et al. Propagation of radial partially coherent beams in anisotropic non-Kolmogorov turbulence[J].

- Acta Opt Sin*, 2018, **38**(3): 279–289.
王铭渠, 元秀华, 李军, 等. 径向部分相干光束在各向异性非Kolmogorov湍流中的传输[J]. *光学学报*, 2018, **38**(3): 279–289.
- [5] Li J, Luo J H, Yuan X H. Influence of water surface wave disturbance on wireless optical communication[J]. *Acta Opt Sin*, 2021, **41**(7): 47–54.
李军, 罗江华, 元秀华. 水表面波扰动对无线光通信影响[J]. *光学学报*, 2021, **41**(7): 47–54.
- [6] Guo Y M, Zhong L B, Min L, et al. Adaptive optics based on machine learning: a review[J]. *Opto-Electron Adv*, 2022, **5**(7): 200082.
- [7] Zhou X, Li X Y. Wavefront distortion prediction method based on motion estimation[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, **48**(10): 210288.
周鑫, 李新阳. 基于运动估计的波前畸变预测方法研究[J]. *光电工程*, 2021, **48**(10): 210288.
- [8] Guo T, Zhang B, Gu N T, et al. Research on polarization Hartmann wavefront detection technology[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, **48**(7): 210076.
郭庭, 张彬, 顾乃庭, 等. 偏振哈特曼波前探测技术研究[J]. *光电工程*, 2021, **48**(7): 210076.
- [9] Zhang L H, Shen F, Lan B. Characteristic analysis of orbital angular momentum of vortex beam propagating in atmospheric turbulent[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, **47**(4): 190272.
张利宏, 沈锋, 兰斌. 涡旋光束轨道角动量在大气湍流传输下的特性分析[J]. *光电工程*, 2020, **47**(4): 190272.
- [10] Guo Q, Song P, Zhang Z Q, et al. Research on the key technology of turbulence suppression for atmospheric optical laser communication based on OFDM[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, **47**(3): 190619.
郭倩, 宋鹏, 张周强, 等. 基于OFDM的大气激光通信湍流抑制关键技术研究[J]. *光电工程*, 2020, **47**(3): 190619.
- [11] Niu C J, Yu S J, Han X E. Analysis about effect of wavefront sensorless adaptive optics on optical communication[J]. *Laser Optoelectron Prog*, 2015, **52**(8): 080102.
牛超君, 于诗杰, 韩香娥. 无波前探测自适应光学对光通信性能影响分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, **52**(8): 080102.
- [12] Gu H J, Gu J J, Liu W, et al. Model-free correction algorithm for wireless power transmission with adaptive optics system[J]. *Optik*, 2018, **172**: 368–382.
- [13] Yang K X, Abulizi M, Li Y H, et al. Single-mode fiber coupling with a M-SPGD algorithm for long-range quantum communications[J]. *Opt Express*, 2020, **28**(24): 36600–36610.
- [14] Hu Q T, Zhen L L, Mao Y, et al. Adaptive stochastic parallel gradient descent approach for efficient fiber coupling[J]. *Opt Express*, 2020, **28**(9): 13141–13154.
- [15] Yue D, Nie H T, Li Y, et al. Fast correction approach for wavefront sensorless adaptive optics based on a linear phase diversity technique[J]. *Appl Opt*, 2018, **57**(7): 1650–1656.
- [16] He X, Zhao X H, Cui S Y, et al. A rapid hybrid wave front correction algorithm for sensor-less adaptive optics in free space optical communication[J]. *Opt Commun*, 2018, **429**: 127–137.
- [17] Cui S Y, Zhao X H, He X, et al. A quick hybrid atmospheric-interference compensation method in a WFS-less free-space optical communication system[J]. *Curr Opt Photon*, 2018, **2**(6): 612–622.
- [18] Ren H X, Dong B. Improved model-based wavefront sensorless adaptive optics for extended objects using $N + 2$ images[J]. *Opt Express*, 2020, **28**(10): 14414–14427.
- [19] Gu H J, Liu M Q, Liu H Y, et al. An algorithm combining convolutional neural networks with SPGD for SLAO in FSO[J]. *Opt Commun*, 2020, **475**: 126243.
- [20] Kingma D P, Ba J. Adam: a method for stochastic optimization[C]//*Proceedings of the 3rd International Conference on Learning Representations*, 2015.
- [21] Braat J. Polynomial expansion of severely aberrated wave fronts[J]. *J Opt Soc Am A*, 1987, **4**(4): 643–650.
- [22] Débarre D, Booth M J, Wilson T. Image based adaptive optics through optimisation of low spatial frequencies[J]. *Opt Express*, 2007, **15**(13): 8176–8190.
- [23] Dong B, Yu J. Hybrid approach used for extended image-based wavefront sensor-less adaptive optics[J]. *Chin Opt Lett*, 2015, **13**(4): 041101.
- [24] Booth M J. Wave front sensor-less adaptive optics: a model-based approach using sphere packings[J]. *Opt Express*, 2006, **14**(4): 1339–1352.
- [25] Loshchilov I, Hutter F. SGDR: stochastic gradient descent with warm restarts[C]//*Proceedings of the 5th International Conference on Learning Representations*, 2017.
- [26] Facomprez A, Beaurepaire E, Débarre D. Accuracy of correction in modal sensorless adaptive optics[J]. *Opt Express*, 2012, **20**(3): 2598–2612.
- [27] Liu J, Zhao W S, Liu C G, et al. Accurate aberration correction in confocal microscopy based on modal sensorless method[J]. *Rev Sci Instrum*, 2019, **90**(5): 053703.
- [28] Fleck J A Jr, Morris J R, Feit M D. Time-dependent propagation of high energy laser beams through the atmosphere[J]. *Appl Phys*, 1976, **10**(2): 129–160.

作者简介



刘武杰(1997-), 男, 硕士, 主要从事自由空间光通信技术、无波前传感自适应光学技术的研究。

E-mail: lwjz@hust.edu.cn

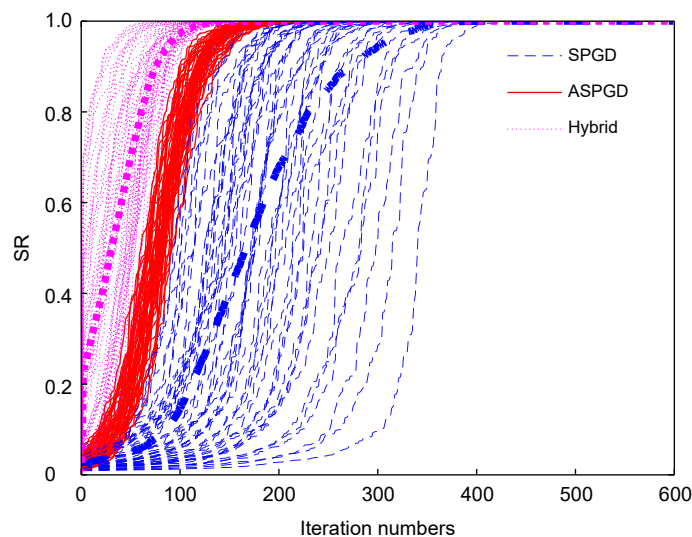


【通信作者】元秀华(1957-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤通信与光纤传感技术、光电检测、光电控制及生物医学信号处理技术的研究。

E-mail: yuanxh@hust.edu.cn

Application of hybrid modal algorithm in wavefront sensorless adaptive optics

Liu Wujie, Yuan Xiuhua*, Zhou Zeyu, Li Qi, Zhao Ming



variation of SR in different optimization algorithms

Overview: With the advent of the 5G era, the general demand for big data processing makes the stable transmission of high-speed and high-capacity links more and more important. However, when the laser is transmitted in the atmosphere, natural phenomena such as air flow, temperature change, rain, fog, and snow will seriously undermine the stability and reliability of atmospheric link transmission. Among all proposed methods of compensating for atmospheric turbulence effects, the wavefront sensorless adaptive optics becomes the most effective technology to correct wavefront distortion caused by atmospheric turbulence, which can improve communication performances when applied in atmospheric laser communications. The final correction results of wavefront sensorless adaptive optics are often determined by different optimization algorithms which can be divided into model-free optimization algorithms and model-based optimization algorithms. However, both types of algorithms have certain limitations. The iterations of the model-free algorithms are so numerous that the convergence rate is very slow. The model-based algorithms have great correction speed, but can only correct low-order aberrations of wavefront distortion, so they are too easy to fall into local convergence and their correction accuracy is very low. Therefore, a critical technical problem of free-space optical communications is how to improve the convergence rate and correction accuracy of the iterative algorithms at the same time.

The Lukosz pre-correction modal algorithm can correct low-order aberrations of wavefront distortion and narrow the search range of iterative algorithms. The adaptive cosine-decay stochastic parallel gradient descent (AcSPGD) algorithm can compensate for high-order aberrations of wavefront distortion and improve the correction accuracy of iterative algorithms. In this paper, a new hybrid modal algorithm based on the pre-correction model and AcSPGD algorithm is applied to correct wavefront distortion in wavefront sensorless adaptive optics, and the feasibility of the optimization algorithm is also verified by the experiments. Experimental results show that the correction speed of the hybrid modal algorithm is two times faster than the commonly used stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm, and the correction accuracy of the hybrid modal algorithm is better than the traditional Lukosz modal algorithm. Applied to wavefront sensorless adaptive optics, the optimization algorithm effectively reduces the phase fluctuation of the wavefront and improves the far-field Strehl ratio, which thus improves the signal-to-noise ratio of the atmospheric laser communication system by 2.9 dB, reduces the bit error rate to 10^{-6} , and improves the communication performance of the free-space optical communication system. The hybrid modal algorithm has great reference and application value.

Liu W J, Yuan X H, Zhou Z Y, et al. Application of hybrid modal algorithm in wavefront sensorless adaptive optics[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(12): 220020; DOI: [10.12086/oe.2022.220020](https://doi.org/10.12086/oe.2022.220020)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (62005088)

School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

* E-mail: yuanxh@hust.edu.cn