

无波前传感器的自适应光学校正

吴加丽, 柯熙政

西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 激光在大气湍流中传输时会发生波前畸变, 从而降低无线光通信系统的性能。采用基于随机并行梯度下降 (SPGD) 算法的无波前传感器自适应光学校正系统对远场的畸变波前进行校正。模拟结果表明, 校正后系统的斯特列尔比由 0.15 提高到 0.81, 远场光斑能量更加会聚。以 CCD 相机探测到的远场畸变光斑光强值作为系统的目标函数, 实验验证了 SPGD 算法对不同畸变像差的校正情况。经校正, 目标函数(中心 900 个像素点的灰度均值)由 26.5, 44.6, 110.6 分别上升到 77.2, 93.4, 208.5, 斯特列尔比由 0.23, 0.39, 0.48 分别上升到 0.67, 0.75, 0.86, 中心光强值增大且光斑能量会聚, 该结果与理论结果相吻合。

关键词 大气光学; 自适应光学; 无波前传感器; 多相位屏传输; 随机并行梯度下降算法

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.030103

Adaptive Optics Correction of Wavefront Sensorless

Wu Jiali, Ke Xizheng

School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

Abstract Wavefront aberration occurs during laser propagating in the atmospheric turbulence, which reduces the performance of wireless optical communication system. We use a wavefront sensorless adaptive optics correction system based on the stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm to correct the far field wavefront aberration. The simulation results indicate that the Strehl ratio of the proposed system is increased from 0.15 to 0.81, and the far field spot energy becomes converged. We take the intensity of the far field distorted spot detected by CCD camera as the objective function of the system, and experimentally verify the correction performances for different aberrations by the SPGD algorithm. After correction, the objective functions (the mean gray value of 900 pixels in the center) increase from 26.5 to 77.2, from 44.6 to 93.4, and from 110.6 to 208.5, respectively; the Strehl ratios increase from 0.23 to 0.67, from 0.39 to 0.75, and from 0.48 to 0.86, respectively. The central light intensity increases and the spot energy becomes converged. The experimental results are in good agreement with theoretical results.

Key words atmospheric optics; adaptive optics; wavefront sensorless; multi-phase screen propagation; stochastic parallel gradient descent algorithm

OCIS codes 010.1080; 090.1000; 010.1300; 200.4960

1 引言

激光在大气中传输时, 大气湍流会引起光波的波前失真、光强起伏和光束漂移等现象, 降低系统的成像质量和光束质量, 从而制约无线光通信系统性能的提高^[1]。1953年, Babcock^[2]提出用闭环实时

补偿波前误差的方法校正湍流引起的动态干扰, 此后自适应光学逐渐成为校正光波畸变的首选方法。目前, 大多数自适应光学系统都是用波前传感器探测波前相位畸变量, 并由波前控制器根据探测到的畸变量产生控制信号, 以驱动波前校正器, 即变形镜 (DM), 实现对畸变相位的校正^[3]。2010年, 夏利军

收稿日期: 2017-08-21; **收到修改稿日期:** 2017-09-28

基金项目: 国家自然科学基金(61377080, 60977054)、陕西省重点产业创新项目(2017ZDCXL-GY-06-01)

作者简介: 吴加丽(1994—), 女, 硕士研究生, 主要从事大气激光通信等方面的研究。E-mail: wj1940315@163.com

导师简介: 柯熙政(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事无线激光通信方面的研究。

E-mail: xzke@263.net(通信联系人)

等^[4]开展了大气光通信畸变波前校正实验,实验结果表明经自适应光学系统校正后,采用更小的初始光功率能够得到更好的通信质量。2014年,Hashmi等^[5]在实验室进行了星间自适应光学通信数值模拟,结果表明自适应光学系统经闭环校正后,其斯特列尔比可以从0.30提高到0.75。2017年,武楚晗等^[6]研究了基于层析传感的自适应光学眼底成像系统,结果表明:相较于传统自适应光学系统,层析自适应光学系统可扩大校正视场角。但是,含波前传感器的校正系统结构复杂,且波前传感器会分流系统的部分光强,因此国内外学者开始对无波前传感器自适应光学校正系统进行研究。

无波前探测的自适应光学系统根据成像探测器获得的像质信息建立系统性能评价函数,用优化算法对评价函数进行优化,从而实现畸变波前的校正^[7]。早期,主要的优化算法有爬山法^[8]和多元高频振动法^[9],但此类算法由于耗时长、带宽需求大而被搁浅^[10]。此后,研究人员转而寻找容易实现且可并行计算控制参数的智能算法,其中使用较多的算法是遗传算法、模拟退火算法和随机并行梯度下降(SPGD)算法。2011年,Yang等^[11]研究了SPGD算法、遗传算法和模拟退火算法等优化算法对系统校正效果的影响,结果表明模拟退火算法所需的校正时间最短。2012年,王卫兵等^[12]研究了遗

传算法在激光整形中的应用,结果表明基于遗传算法的无波前传感器校正系统可以使系统的斯特列尔比由0.3771提高到0.9049。2016年,Anzuola等^[13]研究了SPGD算法及其模态版本M-SPGD算法对自适应光学系统的校正能力,结果表明M-SPGD算法相比于SPGD算法有更快的收敛速度。以上对无波前探测的自适应光学校正系统的研究大多基于理论研究,而实验研究较少。

本文分析了光经多相位屏传输后光斑的畸变情况,通过数值模拟和实验验证了基于变增益系数的SPGD算法的无波前传感器自适应光学系统可实现对畸变波前的闭环校正,该研究为今后的无波前探测自适应光学实验提供了基础。

2 基本原理

2.1 系统结构

无波前传感器的自适应光学校正系统主要由波前控制器、DM和CCD 3部分组成,系统原理框图如图1所示。光源发出的平行光经大气湍流传输后产生带有像差的畸变光束,畸变光束入射到DM,DM对畸变光束进行初次校正并反射残余畸变波前到CCD,波前控制器根据CCD采集到的系统性能指标值驱动智能算法重新产生DM的控制信号,以实现畸变光束的多次闭环校正。

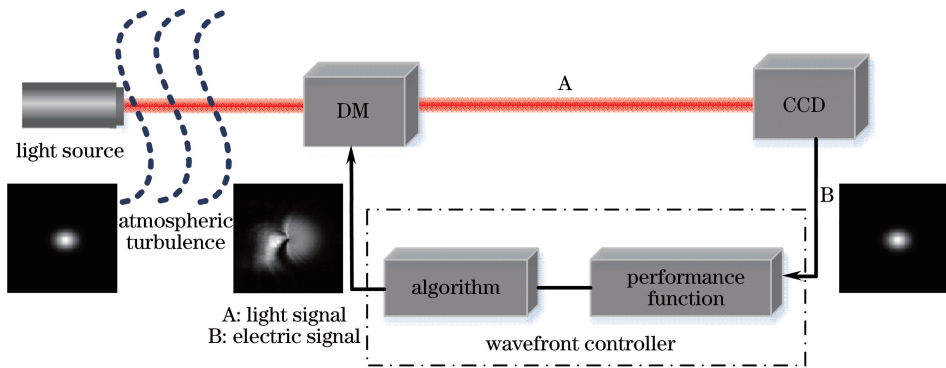


图1 无波前传感器自适应光学校正系统原理框图

Fig. 1 Principle diagram of wavefront sensorless adaptive optics correction system

2.2 Zernike 多项式模拟相位屏

激光经大气湍流传输后会产生带有像差的畸变光,大气湍流引起的畸变相位 $\phi(r)$ 可以由小波法^[14]或Zernike多项式法计算得到。这里采用单位圆域内正交的Zernike多项式线性表示 $\phi(r)$ ^[15],则有

$$\phi(r) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i Z_i(r), \quad (1)$$

式中 $Z_i(r)$ 为Zernike多项式的第 i 项, a_i 为Zernike多项式第 i 项的加权系数。 $Z_i(r)$ 及其偶数项 $Z_{\text{even}i}$ 、奇数项 $Z_{\text{odd}i}$ 的表达式为

$$\begin{cases} Z_i(r) = \sqrt{n+1} R_n^0(r), & m=0 \\ Z_{\text{even}i} = \sqrt{n+1} R_n^m(r) \sqrt{2} \cos(m\theta), & m \neq 0, \\ Z_{\text{odd}i} = \sqrt{n+1} R_n^m(r) \sqrt{2} \sin(m\theta), & m \neq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中 $R_n^m(r)$ 为径向多项式, $R_n^m(r) = \sum_{s=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! [(n+m)/2-s]! [(n-m)/2-s]!} r^{n-2s}$; (r, θ) 为单位圆域内的极坐标; n, m 分别为多项式的径向级次和角向级次, 两者取值均为整数, 且满足 $m \leq n$, $n - |m|$ 为偶数; a_i 可由 Noll 定义的 Kolmogorov 湍流下 Zernike 模式间的统计相关性和基于 Zernike 多项式的 K-L 函数展开法计算^[15]。Zernike 多项式的第 1 项为整体平移项, 在自适应光学领域, 一般不考虑整体平移对波前畸变的影响, 因此模拟时可以不考虑 Zernike 多项式的第 1 项^[16]。

2.3 激光在大气湍流中的传输

在自适应光学畸变波前校正技术中, 可以用大气相干长度 r_0 描述湍流效应的影响; r_0 值越大, 表示大气条件越好, 湍流对激光的影响越小。对于接收望远镜直径 D 不超过 1 m 的系统, 定义 $D/r_0=2$ 的湍流为弱湍流, $D/r_0=10$ 的湍流为中湍流, $D/r_0=20$ 的湍流为强湍流^[17]。采用 2~14 阶 Zernike 多项式仿真相位屏, 图 2 为不同湍流强度对应的相位屏的模拟结果。图 2(a) 对应弱湍流情况, 相位峰谷(PV)值为 0.7227λ , λ 为激光波长。图 2(b) 对应中强湍流情况, PV 值为 2.5930λ 。图 2(c) 对应强湍流情况, PV 值为 5.9640λ 。由图可见, 湍流强度与波前相位的波动幅度成正比。

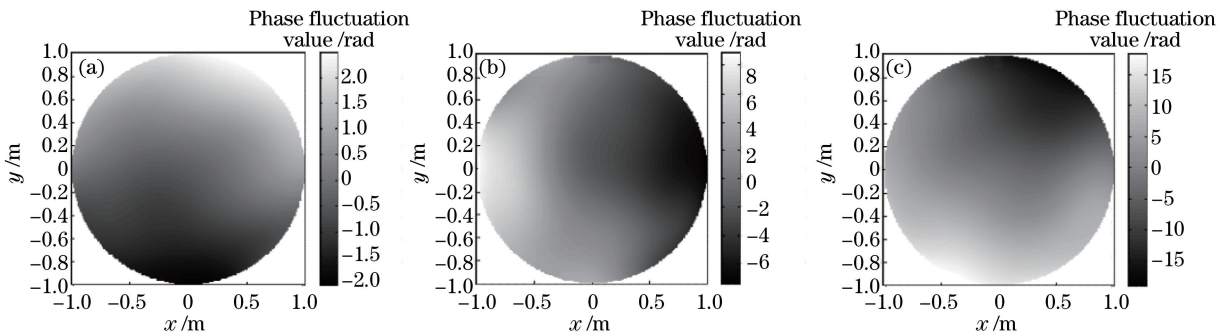


图 2 不同湍流强度对应的相位屏的模拟结果。(a)弱湍流;(b)中强湍流;(c)强湍流

Fig. 2 Simulation results of phase screen under different turbulence intensities.

(a) Weak turbulence; (b) mid-strong turbulence; (c) strong turbulence

采用多相位屏近似法模拟激光在大气湍流中的传输, 即把光束的传输路径 z 看作由自由空间和均匀散布其间的 i 个相位屏 z_i 构成^[18], 激光在大气湍流中的传输原理图如图 3 所示。自由空间的传输过程可由菲涅耳衍射过程描述, 激光通过相位屏时, 振幅不变, 因此只把相应的相位扰动叠加到光束波前上。激光从 z_i 平面传输到 $z_{i+1} = z_i + \Delta z$ 平面的光场为

$$u(r, z_{i+1}) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F} \left\{ u(r, z_i) \exp [i\phi(r, z_i)] \right\} \times \exp \left(ik \Delta z_{i+1} - i \frac{K_x^2 + K_y^2}{2k} \Delta z_{i+1} \right) \right\}, \quad (3)$$

式中 $\mathcal{F}, \mathcal{F}^{-1}$ 分别表示傅里叶变换和傅里叶逆变换, $u(r, z_i)$ 为 z_i 平面的光场, $\phi(r, z_i)$ 为 z_i 平面处的相位屏引入的相位畸变, Δz 为相邻相位屏的间距, K_x^2 和 K_y^2 分别为空域 x 方向和 y 方向上的空间波数, k 为波数, $k = 2\pi/\lambda$ 。如果初始光场为 $u_0(r, z)$, $\phi(r, z_i)$ 已知, 则通过(3)式可求出经传输之后的光场 $u(r, z_{i+1})$ 。

进行数值仿真时, 设定束腰半径 $\omega_0 = 5$ mm, $\lambda = 0.6328$ μm 的高斯光束由 $z=0$ 平面沿 z 方向水

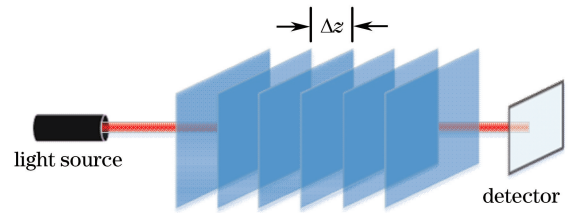


图 3 激光在大气湍流中的传输原理图

Fig. 3 Principle diagram of optical propagation in atmospheric turbulence

平传输, 取 $z = 1000$ m。采用前 15 阶 Zernike 多项式模拟 Kolmogorov 谱相位屏, 相位屏网格为 256×256 , 相位屏间距 $\Delta z = 200$ m, 在不同湍流强度下模拟得到的激光经湍流传输后的远场光强分布如图 4 所示, 图中 X 和 Y 表示光斑的中心坐标。

从图 4 中可以看出, 光经大气湍流传输后, 会发生远场光斑质心漂移和分裂等现象, 随着湍流强度的增大, 湍流对远场光斑的影响也会加强。

2.4 SPGD 算法

由上文讨论可知, 无波前传感器自适应光学校正畸变波前的核心是: 利用波前控制器控制智能算法, 以对系统性能评价函数进行优化, 产生对应的

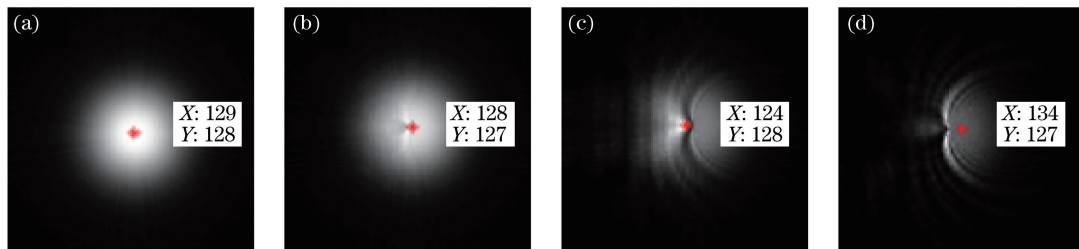


图 4 激光经湍流传输后的远场光强分布。(a)无湍流;(b)弱湍流;(c)中强湍流;(d)强湍流

Fig. 4 Far field light intensity distributions of laser propagating through atmospheric turbulence.

(a) Without turbulence; (b) weak turbulence; (c) mid-strong turbulence; (d) strong turbulence

DM 控制信号。无波前探测的自适应光学系统智能算法主要分为两类:无模式优化方法和基于模式的优化方法^[19-20],无模式优化方法直接控制 DM 对畸变波前进行校正,并使系统性能评价指标达到最优值;基于模式的优化方法选用合适的基底模式描述波前误差,通过对基底模式系数的优化来校正畸变波前^[21]。采用无模式优化方法中的 SPGD 算法,核心是对施加在 DM 上的控制信号进行双边并行扰动,从而校正畸变像差。

SPGD 算法主要基于随机逼近理论和人工神经网络技术。SPGD 算法的迭代公式为^[22]

$$I^{(k+1)} = \{I_j^{(k+1)}\} = \{I_j^{(k)} + \gamma \delta J^{(k)} \delta I_j^{(k)}\},$$

$$j = 1, 2, \dots, N, k = 0, 1, 2, \dots, \quad (4)$$

式中 $I^{(k+1)}$ 为第 $k+1$ 次施加在 DM 上的控制信号, γ 为增益系数, $\delta J^{(k)}$ 为第 k 次系统目标函数值的变化量(δ 为扰动幅度), $\delta I_j^{(k)}$ 为第 k 次施加在 DM 各促动器上相互独立且同为伯努利分布的随机扰动控制量。

2.5 波前校正器

选择法国 ALPAO 公司生产的 69 单元高速可变形镜,采用电磁促动器,DM 结构如图 5 所示。DM 的工作原理是通过给线圈通电,控制磁块上下运动并带动连续镜面(薄膜)发生形变,以实现畸变波前的校正。与压电陶瓷促动器和微机械机电系统促动器相比,基于电磁促动器的 DM 的迟滞误差更小,反射镜面的平整度更好。

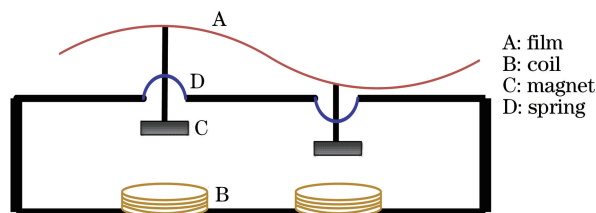


图 5 DM 结构示意图

Fig. 5 Structural diagram of DM

DM 产生的总面形量 $I(r)$ 为

$$I(r) = \sum_{i=1}^N I_j S_j(r), \quad (5)$$

式中 N 为 DM 促动器个数; I_j 为施加在第 j 个促动器上的控制电流; $S_j(r)$ 为第 j 个促动器的影响函数,其表达式为

$$S_j(r) = S_j(x, y) = \exp\{\ln \omega [\sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2}/d]^\alpha\}, \quad (6)$$

式中 ω 为促动器的交连值, α 为高斯指数, d 为促动器之间的归一化间距, (x_j, y_j) 为第 j 个促动器的坐标。高斯指数和交连值对低阶像差的影响大于对高阶像差的影响,因此必须找到合适的 ω 和 α , 这里取 $\omega = 0.08, \alpha = 2$ 。当给各促动器施加最大形变量时,DM 总面形分布如图 6 所示,从图中可以看出,各促动器面形均服从高斯分布。

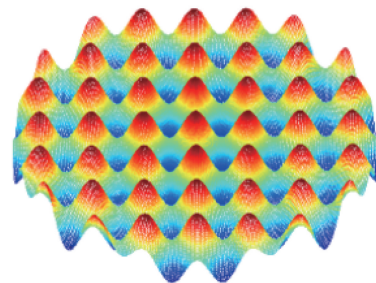


图 6 DM 总面形分布

Fig. 6 Total surface distribution of DM

3 数值仿真与实验研究

3.1 系统性能评价指标

无波前传感器进行畸变波前校正时,采用斯特列尔比作为系统性能评价指标。斯特列尔比的定义式为^[23]

$$R_{SR} = \frac{I(x_0, y_0)}{I_0(x_0, y_0)}, \quad (7)$$

式中 $I(x_0, y_0)$ 为有像差的高斯像面像点对应的最大光强度, $I_0(x_0, y_0)$ 为无像差的高斯像面像点对应的最大光强度。斯特列尔比值越小, 代表波前畸变越严重。在自适应光学系统中, 当一个畸变波前系统的斯特列尔比满足 $R_{SR} > 0.8$ 时, 可以认为该系统已经被很好地校正^[23]。

3.2 仿真结果与分析

采用多相位屏传输法模拟激光在大气湍流中的传输, 其中相位屏由前 15 阶 Zernike 多项式产生, 对基于 SPGD 算法的无波前传感器校正畸变波前进行仿真, $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$, $\omega_0 = 5 \text{ mm}$, $z = 1 \text{ km}$, $\Delta z = 200 \text{ m}$ 。图 7 为校正前后远场光斑的光强分布, 图 7(a) 为校正前远场光斑的光强分布图, 图 7(b) 为校正后远场光斑的光强分布图, 从图中可以看出校正前光斑散斑严重, 校正后光斑光强明显增加, 且能量更加会聚。图 8 为校正过程中根据 (7) 式计算的远场光束斯特列尔比的变化曲线, 由图可见, 随着算法的不断迭代, 斯特列尔比由校正前的 0.15 增加至 0.81, 斯特列尔比增加到一定程度时会趋于平稳, 说明此时系统已趋于稳定。

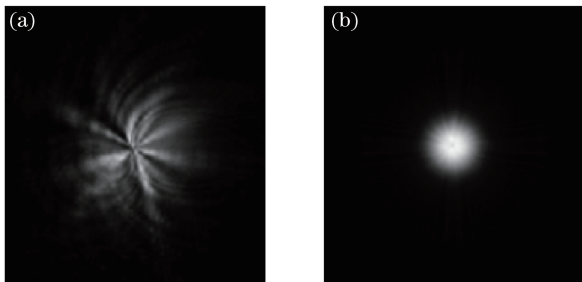


图 7 校正前后远场光斑的光强分布。(a) 校正前; (b) 校正后

Fig. 7 Light intensity distributions of far field spot
(a) before and (b) after correction

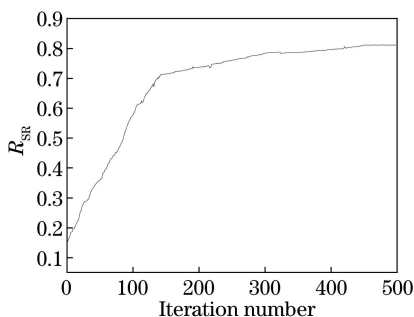


图 8 系统斯特列尔比变化曲线

Fig. 8 Strehl ratio curve of system

3.3 实验研究

为了验证 SPGD 算法的可行性及其闭环校正能力, 搭建了无波前传感器自适应光学实验系统。

图 9 为无波前传感器自适应光学系统实物图。激光器发出的平行光经透镜 L1 和 L2 组成的 $4f$ 系统扩束准直, 准直后的光经毛玻璃后产生带有像差的畸变光束, 畸变光束经分束镜 BS 后垂直入射到 DM, DM 对畸变光束进行初次校正并反射出残余畸变波前, 残余畸变光束经透镜 L3、L4 和衰减片 AS 后入射到 CCD, 系统根据 CCD 采集到的残余畸变光束光强值驱动控制算法重新产生 DM 的控制信号, 从而实现对畸变光束的多次闭环校正。

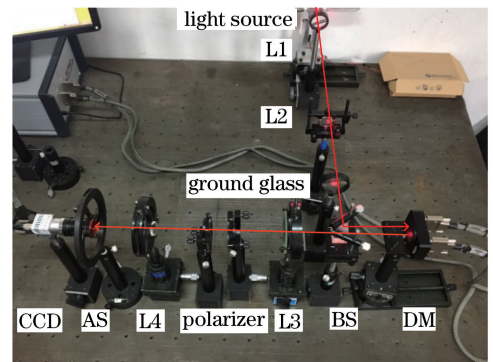


图 9 无波前传感器自适应光学校正系统实物图

Fig. 9 Physical photograph of wavefront sensorless adaptive optics correction system

实验选用波长为 $0.65 \mu\text{m}$ 、功率为 30 mW 的激光器, 用毛玻璃代替大气湍流产生随机畸变像差。SPGD 算法中系统的收敛速度和校正效果与 δ 和 γ 等参数的取值有关, 实验中选取 $\delta = 0.03$, 设定 $\gamma = 1.75 / (0.03 + J)$, 其中 J 为评价函数值。系统采用斯特列尔比作为评价指标, 为了使评价指标较可信, 采用以光斑质心为中心的环围像素平均灰度值作为目标函数, 系统选取 $30 \text{ pixel} \times 30 \text{ pixel}$ 的平均灰度值。CCD 采集的光斑光强分布经 150 次闭环迭代校正前后的结果如图 10 所示, 图 11 为系统斯特列尔比变化曲线。

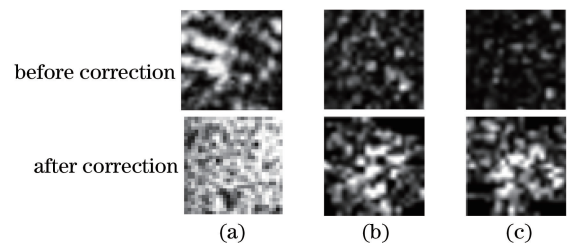


图 10 校正前后 CCD 采集的光斑光强分布。

(a) 弱湍流; (b) 中强湍流; (c) 强湍流

Fig. 10 Light intensity distributions of spot collected by CCD before and after correction. (a) Weak turbulence; (b) mid-strong turbulence; (c) strong turbulence

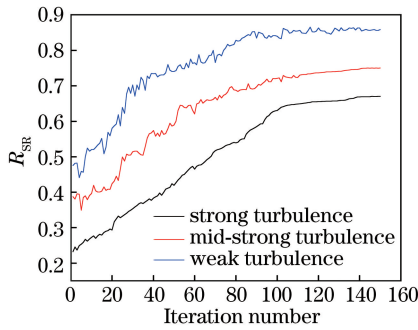


图 11 系统斯特列尔比变化曲线

Fig. 11 Strehl ratio curve of system

图 10 中第 1 行图图为平行光经过毛玻璃不同位置时 CCD 采集的像差畸变光斑,第 2 行图图为 CCD 采集的畸变光斑经校正后的光斑图。从图中可以看出,平行光经过毛玻璃不同位置时会产生不同的畸变光,且光斑均出现发散现象,经系统校正之后光斑能量更加集中,中心光强增强。

实验中取中心光斑的平均灰度值作为目标函数值,经校正后,中心光斑的 900 个像素点的平均灰度值由 110.6,44.6,26.5 分别上升到 208.5,93.4,77.2。校正前后系统的斯特列尔比值由校正前的 0.48,0.39,0.23 分别上升到 0.86,0.75,0.67。

4 结 论

用多相位屏传输法模拟高斯光束在大气湍流中的传输,从理论和实验两方面研究了基于 SPGD 算法的无波前传感器自适应光学系统对湍流产生的畸变波前校正效果。结果表明:激光受湍流影响时远场光斑会出现散斑和质心漂移,且随着湍流强度的增大,湍流对激光的影响越来越严重。理论结果表明,畸变波前经过基于 SPGD 算法的自适应光学系统校正后,系统的斯特列尔比由 0.15 提高到 0.81,校正后的光斑变得更加会聚,中心光强增强。实验中,以 CCD 相机探测到的远场光斑环围光强值作为目标函数。使用 SPGD 算法校正后,系统的斯特列尔比由 0.48,0.39,0.23 分别提高到 0.86,0.75,0.67,中心光强值明显增大。因此,SPGD 算法可有效校正大气湍流引起的波前畸变。

参 考 文 献

[1] Li Y, Xiangli B, Zhang W X. Effects of laser propagation through atmospheric turbulence on imaging quality in Fourier telescopic[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(2): 292-296.
李杨, 相里斌, 张文喜. 湍流大气中激光传输对傅里

叶望远镜成像质量的影响[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(2): 292-296.

- [2] Babcock H W. The possibility of compensating astronomical seeing [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1953, 65(386): 229-236.
- [3] Ellerbroek B L, Rhoadarmer T A. Adaptive wavefront control algorithms for closed loop adaptive optics[J]. Mathematical and Computer modelling, 2001, 33(1/2/3): 145-158.
- [4] Xia L J, Li X F. Transmission wave-front correction of atmospheric optical communication based on adaptive optics technology [J]. Information and Electronic Engineering, 2010, 8(3): 331-335.
夏利军, 李晓峰. 基于自适应光学的大气光通信波前校正实验[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2010, 8(3): 331-335.
- [5] Hashmi A J, Eftekhari A A, Adibi A, *et al.* Analysis of adaptive optics-based telescope arrays in a deep-space inter-planetary optical communications link between Earth and Mars [J]. Optics Communications, 2014, 333: 120-128.
- [6] Wu C H, Zhang X F, Chen W L, *et al.* Fundus imaging system based on tomographic adaptive optics [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(4): 0411002.
武楚晗, 张晓芳, 陈蔚林, 等. 基于层析传感的自适应光学眼底成像系统[J]. 光学学报, 2017, 37(4): 0411002.
- [7] Booth M J. Wavefront sensorless adaptive optics for large aberrations[J]. Optics Letters, 2007, 32(1): 5-7.
- [8] Vorontsov M A, Carhart G W, Pruidze D V, *et al.* Adaptive imaging system for phase-distorted extended source and multiple-distance objects [J]. Applied Optics, 1997, 36(15): 3319-3328.
- [9] O'meara T R. The multidither principle in adaptive optics[J]. Journal of the Optical Society of America, 1977, 67(3): 306-315.
- [10] Tyson R K. Principles of adaptive optics[M]. New York: CRC Press, 1991.
- [11] 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.
- [12] Wang W B, Zhao S, Guo J, *et al.* Genetic algorithm used in laser shaping[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(10): 1115-1119.
王卫兵, 赵帅, 郭劲, 等. 遗传算法在激光整形中的

- 应用[J]. 激光与红外, 2012, 42(10): 1115-1119.
- [13] Anzuola E, Segel M, Gladysz S, *et al.* Performance of wavefront-sensorless adaptive optics using modal and zonal correction [C]. SPIE, 2016, 10002: 100020J.
- [14] Feng F, Li C W. Simulation of atmospheric turbulence phase screen based on wavelet analysis [J]. Acat Optica Sinica, 2017, 37(1): 0101004.
丰帆, 李常伟. 基于小波分析的大气湍流相位屏模拟 [J]. 光学学报, 2017, 37(1): 0101004.
- [15] Noll R J. Zernicke polynomials and atmospheric turbulence [J]. Journal of the Optical Society of America, 1976, 66(3): 207-211.
- [16] Hu Z H, Jiang W H. Simulation of the optical wavefront distorted by atmospheric turbulence [J]. Opto-Electronic Engineering, 1995, 22(2): 50-56.
胡朝晖, 姜文汉. 受大气湍流影响的光学波前模拟 [J]. 光电工程, 1995, 22(2): 50-56.
- [17] Liu C, Chen S Q, Li X Y, *et al.* Performance evaluation of adaptive optics for atmospheric coherent laser communications[J]. Optics Express, 2014, 22(13): 15554-15563.
- [18] Wang L, Shen X J, Zhang W A, *et al.* Study on propagation of flattened Gaussian beams through turbulent atmosphere utilizing multiple phase-screens [J]. Laser & Infrared, 2012, 42(8): 852-856.
王龙, 沈学举, 张维安, 等. 相位屏法研究平顶高斯光束的大气传输特性 [J]. 激光与红外, 2012, 42(8): 852-856.
- [19] Li Z K, Zhao X H, Cao J T, *et al.* Model-based tabu search algorithm for free-space optical communication with a novel parallel wavefront correction system[J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2015, 19(1): 45-54.
- [20] He J L, Wei L, Yang J S, *et al.* Phase fitting optimization method to laser beam shaping system based on deformable mirror [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(2): 020101.
何杰铃, 魏凌, 杨金生, 等. 基于变形镜激光束整形系统中的相位拟合优化方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(2): 020101.
- [21] Wang R, Dong B. Deformable mirror eigen-modes based wavefront sensorless adaptive optics system for point-like target [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(2): 0212001.
王瑞, 董冰. 点目标下基于变形镜本征模式的无波前传感器自适应光学系统 [J]. 中国激光, 2016, 43(2): 0212001.
- [22] Vorontsov M A, Carhart G W, Cohen M, *et al.* Adaptive optics based on analog parallel stochastic optimisation: Analysis and experimental demonstration[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2000, 17(8): 1440-1453.
- [23] Han L Q, Wang Z B. Fiber coupling efficiency and Strehl ratio for space optical communication based on adaptive optics correction [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(1): 125-129.
韩立强, 王志斌. 自适应光学校正下空间光通信的光纤耦合效率及斯特列尔比 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 125-129.