

涡旋光波前畸变校正实验研究

柯熙政, 王夏尧*

西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 涡旋光在大气湍流中传输时会发生波前畸变,故需要进行波前校正。相比于传统的带有波前传感器的自适应光学校正系统,采用随机并行梯度下降算法的无波前传感器的自适应光学校正系统具有硬件实现简单、对光强闪烁等复杂环境的适应性好等优点。仿真结果表明:该系统对单模涡旋光和多模复用涡旋光都可实现波前畸变校正,能提高模式纯净度。实验结果表明:经校正,单模涡旋光的光强相关系数可提高至 0.85 左右,多模复用涡旋光的光强相关系数可提高至 0.72 左右,单模涡旋光波前畸变的校正效果优于多模复用涡旋光。仿真和实验结果均表明,采用随机并行梯度下降算法的自适应校正技术可有效实现涡旋光波前畸变校正。

关键词 遥感; 涡旋光; 波前校正; 随机并行梯度下降算法; 大气湍流

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0328018

Experimental Study on the Correction of Wavefront Distortion for Vortex Beam

Ke Xizheng, Wang Xiayao

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

Abstract The wavefront distortion occurs when vortex light transmits in atmospheric turbulence, so wavefront correction is required. Compared with the traditional adaptive optical system with wavefront sensor, the adaptive optical system of the wavefront sensorless using a stochastic-parallel-gradient-descent (SPGD) algorithm has the advantages of simple realization of hardware and good adaptability of complex environment such as light intensity scintillation. The simulation results show that the system can correct the wavefront distortion and improve the mode purity for single-mode and multimode multiplexed vortex beams. The experimental results show that the intensity correlation coefficient of single mode vortex beam can be increased to around 0.85, the intensity correlation coefficient of multimode multiplexed vortex beam can be increased to around 0.72, and the wavefront distortion correction effect of single mode vortex beam is better than that of multimode multiplexed vortex beam. Both the simulation and experimental results show that the adaptive correction technique using SPGD algorithm can effectively realize the wavefront distortion correction of vortex beam.

Key words remote sensing; vortex beam; wavefront correction; SPGD algorithm; turbulence

OCIS codes 280.7060; 050.4865; 090.1000; 200.4960

1 引 言

随着人们对通信质量需求的增加,通信技术正朝着高速率、大容量方向发展。涡旋光束^[1]携带轨道角动量(OAM),其中不同拓扑荷的光束具有相互正交的特性。传统的通信调制方式用于 OAM 复用^[2-4]通信,可极大提高通信系统的频带利用率和系统容量^[5],然而由于大气湍流^[6-8]的影响,光束可能

发生波前畸变而导致相位扭曲、模式纯度下降,从而影响信息的传输,因此对经过大气湍流的涡旋光进行波前畸变校正十分必要。

近年来,国内外学者对涡旋光束自适应波前校正技术^[9-10]做了很多研究,主要技术有:夏克哈特曼法^[11](S-H)、相位恢复算法^[12-13](Gerchberg-Saxton, GS)、随机并行梯度下降算法^[14](SPGD)等。2014年,Xie等^[15]使用基于 Zernike 多项式的

收稿日期: 2017-08-22; 收到修改稿日期: 2017-09-26

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

作者简介: 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。E-mail: 1246425913@qq.com

SPGD 算法对单模 OAM 光束进行波前校正,并用得出的校正模型校正通过同一湍流的多路涡旋光,实验结果表明,模式之间的串扰减少。2015 年, Yang 等^[16] 仿真模拟了基于变形镜(DM)和 SPGD 算法的自适应光学系统对畸变 OAM 光束的校正,结果表明,畸变涡旋光经该自适应光学系统校正后,波前畸变得以补偿。2017 年,高春清等^[17]通过数值仿真的方法分析 SPGD 算法结合 Zernike 多项式校正涡旋光束波前畸变的效果,仿真结果表明,此方法可很好地实现涡旋光束的自适应波前校正。在此基础上,本文参考经典的自适应光学系统,采用无波前传感器的涡旋光自适应波前校正技术,以随机并行梯度下降算法作为自适应算法,以变形镜作为波前校正器,结合仿真模拟和实验结果,说明了采用随机并行梯度下降算法的自适应校正技术可有效地实现涡旋光束的波前畸变校正。

2 理论基础

2.1 涡旋光束经湍流传输和自适应波前校正

拉盖尔-高斯(LG)光束是一种典型的涡旋光束,在自由空间中,其沿 z 方向传输的电场表达式为^[18]

$$E_p^l(r, \varphi, z) = \sqrt{\frac{2p!}{\pi(p+|l|)!}} \frac{1}{w(z)} \left[\frac{\sqrt{2}r}{w(z)} \right]^{|l|} \times \exp\left[\frac{-r^2}{w^2(z)} \right] L_p^{|l|} \left[\frac{2r^2}{w^2(z)} \right] \times \exp(-il\varphi) \exp\left[\frac{ikr^2z}{2(z^2+z_R^2)} \right] \times \exp\left[-i(2p+|l|+1)\arctan\left(\frac{z}{z_R}\right) \right], \quad (1)$$

式中, r 为空间点到传输轴的径向距离, φ 为方向角, z 为传输距离, w_0 为束腰半径, $w(z) = w_0 \sqrt{1+(z/z_R)^2}$, λ 为波长, $z_R = \pi w_0^2/\lambda$ 为瑞利距离, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, $(2p+|l|+1)\arctan(z/z_R)$ 为古依相移, $L_p^{|l|}(x)$ 为缔合拉盖尔多项式, l 为角向指数,即拓扑荷数, p 为径向指数。

涡旋光在大气湍流中传输时,光束会产生波前畸变,因而需要进行波前畸变校正,涡旋光束经湍流畸变及自适应光学系统校正过程如图 1 所示^[19]。涡旋光在大气湍流中传输后,光斑变得明暗不一,强度分布不再均匀,光斑形状发生扭曲,目标 OAM 能量占比下降,转移到了临近的 OAM 模式,经自适应系统校正后,光强分布均匀性有所提高,光斑形状变得规整,目标 OAM 能量占比得以提高。

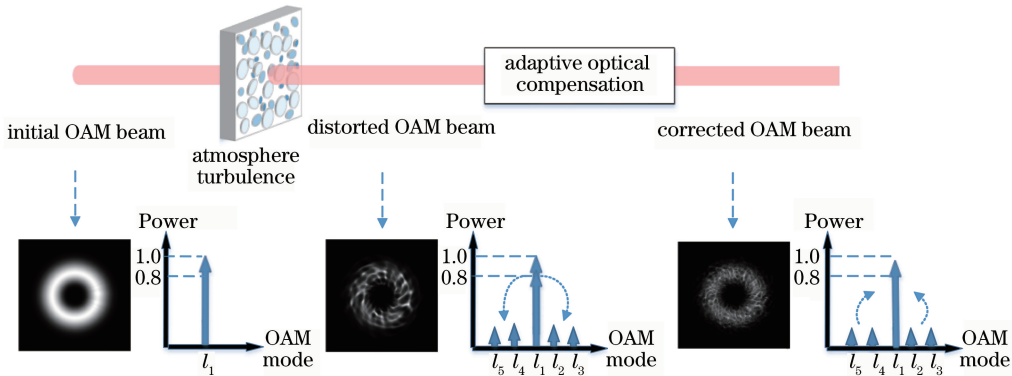


图 1 涡旋光经湍流畸变及自适应光学系统校正的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of distortion generated by a vortex beam transmitting in atmosphere turbulence and corrected by adaptive optical system

2.2 随机并行梯度下降算法校正原理

SPGD 算法的无波前传感器的涡旋光自适应波前畸变校正技术的校正原理如图 2 所示。利用 CCD 相机采集得到畸变光束的强度分布,利用 SPGD 算法获得相位校正模式,通过控制波前校正器(变形镜)形成反馈回路,从而对畸变的涡旋光束进行相位校正。

SPGD 算法的关键技术包括评价函数和迭代方法。传统的评价函数有斯特列尔比(SR)、像清晰度函数、环围能量比等,然而这些评价函数并不适用于

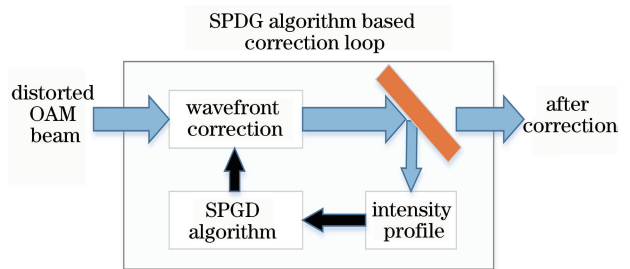


图 2 SPGD 算法校正涡旋光束实验系统图

Fig. 2 Experimental system of correcting vortex beam using SPGD algorithm

涡旋光。研究表明,涡旋光束的模式纯净度与其光强相关系数呈单调递增关系^[20],故将光强相关系数 C_k 作为 SPGD 算法校正性能的评价函数,其定义为^[21]

$$C_k = \iint_{0-\pi}^{\pi} I(r, \theta) I_{id}(r, \theta) dr d\theta, \quad (2)$$

式中, $I(r, \theta)$ 为校正后远场光强分布, $I_{id}(r, \theta)$ 为无湍流远场光强分布。

随机并行梯度下降算法实现步骤如下。

1) 初始化:产生一组变形镜驱动器的初始控制信号 $\mathbf{U}_0 = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_N]$, $u_i = 0, i = 1, 2, \dots, N, N$ 为变形镜驱动器的个数。

2) 校正迭代模块:已知第 k 次迭代结果,则算法的第 $(k+1)$ 次迭代过程如图 3 所示。已知当前校正模式的电压参量 $\mathbf{U}_k = [u_{1,k} \ u_{2,k} \ \dots \ u_{N,k}]$,生成正向扰动,产生输出电压 $\mathbf{U}_k + \Delta\mathbf{U}_k$ 施加到变形镜,计算性能评价函数 $C_{1,k}$,生成反向扰动,产生输出电压 $\mathbf{U}_k - \Delta\mathbf{U}_k$ 施加到变形镜,计算性能评价函数 $C_{2,k}$,得新的电压参量 $\mathbf{U}_{k+1} = \mathbf{U}_k + \mu\Delta\mathbf{U}_k(C_{1,k} - C_{2,k})$,其中, μ 为迭代步长, $\Delta\mathbf{U}_k = [\Delta u_{1,k} \ \Delta u_{2,k} \ \dots \ \Delta u_{N,k}]$, $\Delta u_{i,k}$ 相互独立且服从伯努利分布 $\Pr(\Delta u_{i,k}) = \begin{cases} 0.5, & \Delta u_i = 1 \\ 0.5, & \Delta u_i = -1 \end{cases}$

3) 校正更新模块:更新当前电压参量为 \mathbf{U}_{k+1} 。

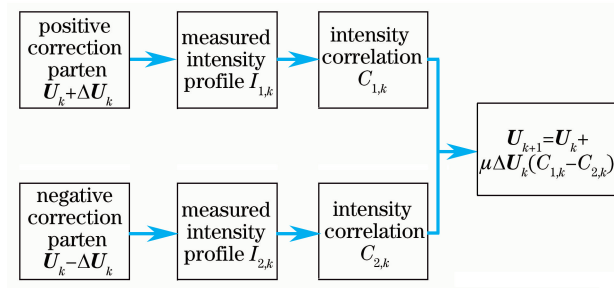


图 3 SPGD 算法第 $(k+1)$ 次迭代框图

Fig. 3 Iterative block diagram of SPGD algorithm for the $(k+1)$ th iteration

2.3 变形镜

变形镜主要作为波前校正器用于各种自适应光学系统之中。变形镜由可变形镜面和驱动器组成,控制信号通过控制驱动器改变变形镜的镜面形状,从而改变入射光的波前传输的光程,进而改变入射光的波前相位结构,达到校正波前畸变的目的。

本文使用的是 69 单元的变形镜,各驱动器排布如图 4 所示。整个镜面变形是由各个驱动器共同作用而成,变形镜面形 $f(x, y)$ 为 N 个驱动器的光学

影响函数 $S(x, y)$ 的线性加权和^[22],即

$$f(x, y) = \sum_{j=1}^N U_j S_j(x, y), \quad (3)$$

式中, U_j 为第 j 个驱动器上所施加的电压值, $S_j(x, y)$ 为第 j 个单元的镜面影响函数,呈高斯分布,其表达式为^[23]

$$S_j(x, y) = \exp\{\ln \omega [\sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2} / d]^a\}, \quad (4)$$

式中, ω 为驱动器的交连值,取值范围一般在 0.04~0.12 之间,实测 $\omega = 0.85$, x_j, y_j 分别为第 j 个驱动器的横、纵坐标, $d = 1.5 \text{ mm}$ 为变形镜中各驱动器之间的归一化距离, a 为高斯指数。

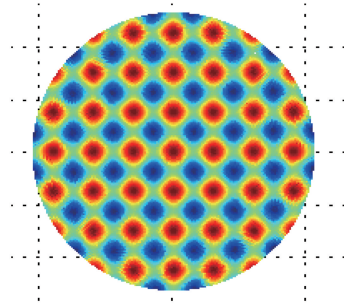


图 4 69 单元变形镜仿真图

Fig. 4 Simulation diagram of 69-element deformable mirror

实验中使用的是法国生产的 ALPAO 高速可变形镜,此变形镜驱动器数量为 69,镜面直径为 10.5 mm,各驱动器之间的归一化距离为 1.5 mm,镜面最大形变量为 60 μm ,该变形镜稳定所需的时间约为 800 μs ,带宽大于 750 Hz。

2.4 螺旋谱

为了更好地阐明轨道角动量的成分,在这里引入螺旋谱。由于不同阶的 OAM 态是正交的,不同轨道角动量一起可构成一组正交基,且任意光束都可以按此正交基进行分解,故任意光场的复振幅 $u(r, \varphi, z)$ 可按螺旋谱谐波函数 $\exp(il\varphi)$ 进行展开,即

$$u(r, \varphi, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{l=-\infty}^{\infty} a_l(r, z) \exp(il\varphi), \quad (5)$$

式中, $a_l(r, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{2\pi} u(r, \varphi, z) \exp(il\varphi) d\varphi$, l 为拓扑荷数。

对 $a_l(r, z)$ 积分得各单一 OAM 态所占的相对功率为

$$P_l(r, z) = \int_0^{\infty} |a_l(r, z)|^2 r dr. \quad (6)$$

螺旋谱 η_l 表示光束的各 OAM 模式所占的比例,其

表达式为

$$\eta_l = P_l / \left(\sum_{q=-\infty}^{\infty} P_q \right). \quad (7)$$

3 实验结果

应用 SPGD 算法的无波前传感器的涡旋光波前畸变自适应校正系统实验方案如图 5 所示。

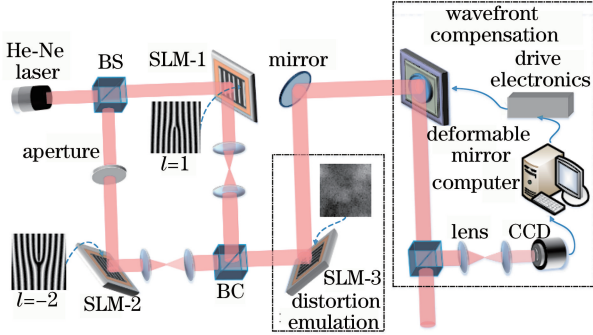


图 5 实验装置图

Fig. 5 Experimental setup

实验采用 632.8 nm 的 He-Ne 激光器作为光源, 光束经分束镜 (BS) 分成两束, 其中一束入射到加载叉形光栅的空间光调制器 (SLM-1) 处, 另一束先通过光阑 (aperture), 再入射到加载叉形光栅的空间光调制器 (SLM-2) 处, 生成的两束涡旋光分别经过两组透镜进行扩束、准直后, 再经合束器 (BC) 进行合束, 然后入射到加载了模拟大气湍流的灰度图的空间光调制器 (SLM-3) 处, 此时涡旋光束发生了波前畸变, 经反射镜反射至变形镜处, 后将从变形镜反射出的光束经分束镜进行分束, 分束后, 其中一束光进出 CCD 相机, 测得光强信息, 通过 SPGD 算法计算施加给变形镜驱动器的电压, 通过驱动电路控制变形镜产生形变, 从而对波前进行闭环校正, 另一束光则为校正后的涡旋光束。实验中可通过控制光阑实现单模涡旋光或多模复用涡旋光波前畸变的校正。

3.1 仿真模拟

仿真实验的参量选取如下: 束腰半径 $\omega_0 = 3$ cm, 波长 $\lambda = 632.8$ nm, 径向指数 $p = 0$, 大气折射率结构常数 $C_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$, 传输距离 $z = 1$ km, 算法迭代次数 $N = 200$ 。

图 6 是单模 LG ($l=3$) 光束经自由空间传输、有湍流传输及经 SPGD 算法校正后的强度、相位、螺旋谱分布图。其中图 6(a)~(c) 为单模 LG 光束在自由空间中传输后强度、相位及螺旋谱分布图, 图 6(d)~(f) 为单模 LG 光束在大气湍流中传输后强

度、相位及螺旋谱分布图, 图 6(g)~(i) 为单模 LG 光束经 SPGD 算法校正后的强度、相位及螺旋谱分布图。

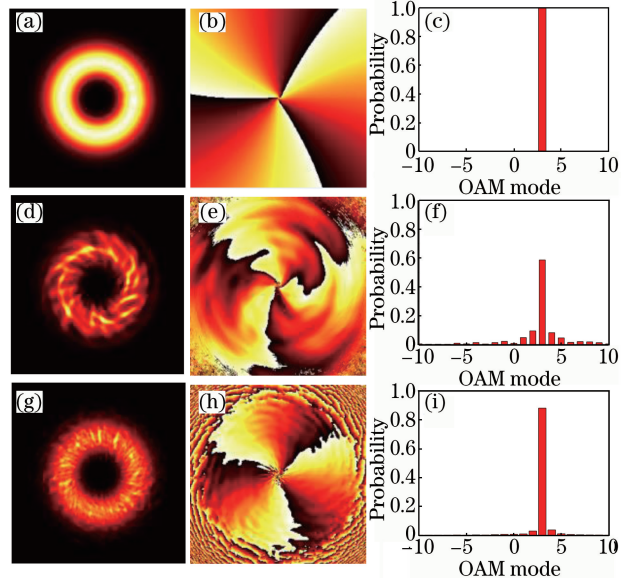


图 6 单模 LG 光束的强度、相位和螺旋谱分布图。

(a)~(c) 自由空间中; (d)~(f) 大气湍流中; (g)~(i) 校正后

Fig. 6 Intensity, phase and spiral spectrum distributions of the single-mode LG beams.

(a)-(c) In free space; (d)-(f) in the turbulent atmosphere; (g)-(i) after correction

从图 6 中可以看出, 畸变单模 LG 光束经校正后, 其光强分布变均匀, 环状中心强度变强, 相位跃变处, 即“每一扇叶片”的分界处变清晰和规整, 拓扑荷 $l=3$ 的模式占比由 58.6% 上升至 88.3%, 这说明此系统可以有效地校正单模涡旋光波前畸变, 提高模式纯净度。

图 7 是多模复用 LG ($l=-1, 2$) 光束经自由空间传输、有湍流传输及经 SPGD 算法校正后的强度、相位、螺旋谱分布图。其中图 7(a)~(c) 为多模复用 LG 光束在自由空间中传输后强度、相位及螺旋谱分布图, 图 7(d)~(f) 为多模复用 LG 光束在大气湍流中传输后强度、相位及螺旋谱分布图, 图 7(g)~(i) 为多模复用 LG 光束经 SPGD 算法校正后的强度、相位及螺旋谱分布图。

由图 7 可看出, 畸变的多模复用 LG 光束经校正后, 其花瓣状光强分布的每一片瓣状光斑中心强度变强, 相位跃变处扭曲程度减弱, 拓扑荷 $l=-1$ 的模式占比由 36% 上升至 41.5%, 拓扑荷 $l=2$ 的模式占比由 37.1% 上升至 47.3%, 说明此系统也可校正多模复用涡旋光束波前畸变, 提高模式纯净度, 而且对比图 7 与图 6 可看出, SPGD 算法具有很好

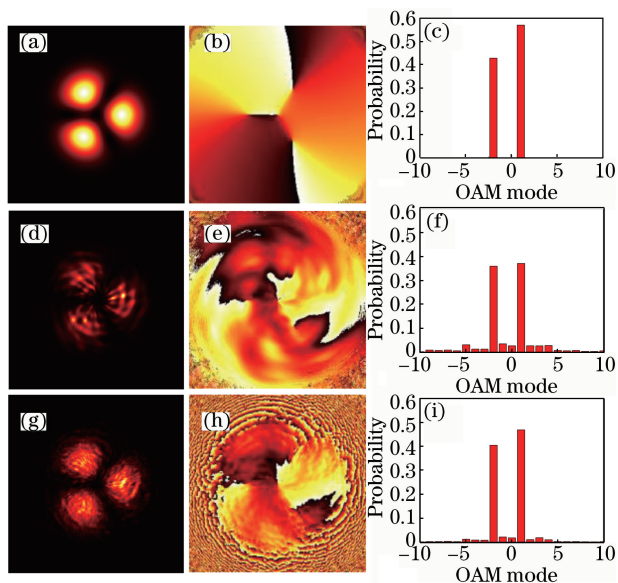


图 7 多模复用 LG 光束的强度、相位和螺旋谱分布图。

(a)~(c)自由空间中；(d)~(f)大气湍流中；(g)~(i)校正后

Fig. 7 Intensity, phase and spiral spectrum

distributions of the multimode multiplexing LG beams.

(a)-(c) In free space; (d)-(f) in the turbulent atmosphere;

(g)-(i) after correction

的适应性,对于单束和复用涡旋光束都能够校正其波前畸变,提高目标 OAM 模式纯净度。这里需要注意的是,图 7(c)中两个涡旋模式的比例并不相等,这是由于仿真中叠加的两束涡旋光取的不是归一化振幅,致使计算得到的单一 OAM 态所占的相对功率并不完全一样,从而使光束中两模式的相对功率比存在差异。

3.2 实验研究

大气结构常数为 $C_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 时,CCD 捕获的不同阶次涡旋光校正前后强度分布如图 8 所示。其中图 8(a)为无湍流无校正情况下的光强分布图,图 8(b)为经过湍流后光强分布图,图 8(c)为经校正后光强分布图。

从图 8 可看出,单模涡旋光经湍流传输后,其环状强度分布发生扭曲变形,然而经校正后,强度分布变得均匀且光斑形状也变得规整。多模复用涡旋光经湍流传输后,其花瓣状光强分布的每一片瓣状光斑都发生扭曲形变,然而经校正后,其花瓣状光斑亦变规整,且瓣状光斑中心强度变强。对比图 8 ($l=3$)和图 7 可看出,校正前后光强分布变化的实验结果与仿真结果相一致,无论是单模涡旋光还是多模复用涡旋光都可以实现有效的波前畸变校正。

对应图 8 各种阶次涡旋光束校正前后光强分布图,这里给出其对应的光强相关系数的具体数值,如

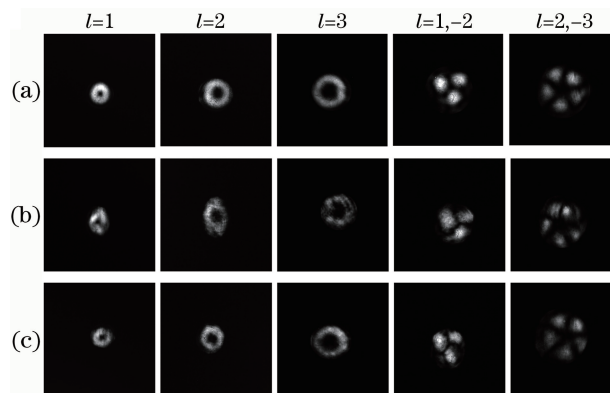


图 8 各种阶次涡旋光束校正前后光强分布图。

(a)进入湍流前；(b)经过湍流后；(c)校正后

Fig. 8 Distribution of light intensity of various order vortex

beams before and after correction. (a) Before turbulence;

(b) after turbulence; (c) after correction

表 1 所示。从表 1 可以看出,单模涡旋光($l=1,2,3$)经校正后,光强相关系数由 0.5 左右上升至 0.85 左右,多模复用态涡旋光($l=1,-2$ 和 $l=2,-3$)分别由 0.473 上升至 0.731、0.430 上升至 0.726。

表 1 不同阶次涡旋光束校正前后光强相关系数

Table 1 Intensity correlation coefficients of various orders vortex beams before and after correction

Correction	$l=1$	$l=2$	$l=3$	$l=1,-2$	$l=2,-3$
Before	0.507	0.483	0.492	0.473	0.430
After	0.858	0.845	0.852	0.731	0.726

大气结构常数为 $C_n^2 = 5 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 时,单模涡旋光($l=-2, l=1$)和多模复用涡旋光($l=1,-2$)的光强相关系数随 SPGD 算法迭代次数的变化情况如图 9 所示。

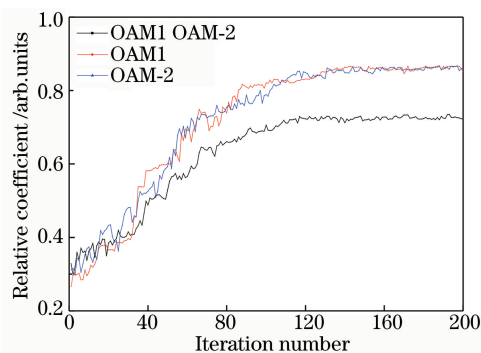


图 9 光强相关系数随迭代次数的变化关系

Fig. 9 Correlation coefficient of light intensity with the number of iterations

由图 9 中可看出,算法经 200 次迭代后,单模涡旋光($l=-2, l=1$)的光强相关系数可由 0.3 左右提升至 0.85 左右,多模复用态涡旋光($l=1,-2$)的光强相关系数可由 0.3 左右提升至 0.72 左右。

结合图 9 和表 1 可看出,校正后的单模涡旋光光强相关系数只有 0.85 左右,原因如下。

1)SPGD 算法本身的原因。SPGD 算法是一种无模型优化算法,无法建立准确的数学模型来最优化控制过程,这是因为像质评价函数(光强相关系数)、SPGD 算法的梯度估计的精度等因素都会影响算法的寻优结果。

2)实验中不可能完全消除系统误差。若能找到更加适合涡旋光的像质评价函数、提高随机并行梯度下降算法的梯度估计的精度、减小系统误差等,实验效果会更好。

还可以看出,校正后的多模复用涡旋光的光强相关系数比单模涡旋光的光强相关系数低,这是由于光强分布的差异性直接影响算法的寻优结果,从而导致单模涡旋光波前畸变的校正效果优于多模复用涡旋光。

4 结 论

在应用相位恢复算法^[12]、SPGD 算法^[15-17]的无传感器的涡旋光波前畸变校正实验中,一般都采用空间光调制器作为波前校正器,而空间光调制器在作为校正器使用前必须进行标定实验,即找出空间光调制器相位响应与写入灰度值之间的关系,方可加载经 SPGD 算法计算得到的灰度图,从而进行波前校正。然而空间光调制器标定实验十分复杂、耗时,而且对于光束的平行、准直性要求较高,这就增加了实施波前畸变校正实验的复杂性和难度,本文结合经典自适应光学系统,使用变形镜作为波前校正器,无须对变形镜做任何预处理,也无须将 SPGD 算法与 Zernike 多项式结合,只须获得使得评价函数(光强相关系数)取得最优解时的变形镜驱动电压,变形镜在驱动电压的作用下通过产生满足自身镜面影响的形变,改变入射光的光程,即可实现波前校正,这一方法极大地降低了实验的复杂度。

通过仿真和实验研究了 SPGD 算法对单模和多模复用涡旋光畸变校正的效果,其结果表明:SPGD 算法可有效地校正单模和多模复用涡旋光的波前畸变,提高 OAM 模式纯净度及光强相关系数;SPGD 算法校正单模涡旋光波前畸变的效果要优于校正多模复用涡旋光。

参 考 文 献

- [1] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, *et al.* Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. *Physical Review A*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [2] Gibson G, Courtial J, Padgett M J, *et al.* Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum[J]. *Optics Express*, 2004, 12(22): 5448-5456.
- [3] Huang H, Xie G, Yan Y, *et al.* 100 Tbit/s free-space data link enabled by three-dimensional multiplexing of orbital angular momentum, polarization, and wavelength[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(2): 197-200.
- [4] Ke X Z, Xu J Y. Interference and detection of vortex beams with orbital angular momentum[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(9): 0905003.
柯熙政, 胥俊宇. 涡旋光束轨道角动量干涉及检测的研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(9): 0905003.
- [5] Wang J, Yang J Y, Fazal I M, *et al.* Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 488-496.
- [6] Ke X Z, Wang C Z. Intensity distribution of the partially coherent vortex beams propagating in atmospheric turbulence[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(11): 110604.
柯熙政, 王超珍. 部分相干涡旋光束在大气湍流中传输时的光强分布[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(11): 110604.
- [7] Ge X L, Wei G X, Liu X J, *et al.* Intensity distribution and optical vortex wander of vortex beams propagating in turbulent atmosphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1026015.
葛筱璐, 魏功祥, 刘晓娟, 等. 湍流大气中涡旋光束的光强分布及光学涡旋的漂移[J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1026015.
- [8] Strasburg J D, Harper W W. Impact of atmospheric turbulence on beam propagation[C]. *SPIE*, 2004, 5413: 93-102.
- [9] Liu Y D, Gao C, Qi X, *et al.* Orbital angular momentum (OAM) spectrum correction in free space optical communication[J]. *Optics Express*, 2008, 16(10): 7091-7101.
- [10] Li M, Takashima Y, Sun X, *et al.* Enhancement of channel capacity of OAM-based FSO link by correction of distorted wave-front under strong turbulence[C]. *Frontiers in Optics*, 2014, FTh3B: FTh3B.6.
- [11] Zhao S, Leach J, Zheng B. Correction effect of Shark-Hartmann algorithm on turbulence aberrations for free space optical communications using orbital angular momentum[C]. *IEEE International Conference on Communication Technology*, 2011: 11761048.

[1] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, *et al.* Orbital angular momentum of light and the

- [12] Ren Y, Huang H, Yang J Y, *et al.* Correction of phase distortion of an OAM mode using GS algorithm based phase retrieval[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2012: CF3I.4.
- [13] Zhao S M, Leach J, Gong L Y, *et al.* Aberration corrections for free-space optical communications in atmosphere turbulence using orbital angular momentum states[J]. Optics Express, 2012, 20(1): 452-461.
- [14] Loizos D N, Liu L, Sotiriadis P P, *et al.* Integrated multi-dithering controller for adaptive optics[C]. SPIE, 2007, 6708: 67080B.
- [15] Xie G, Ren Y, Huang H, *et al.* Experiment turbulence compensation of 50-Gbaud/s orbital-angular-momentum QPSK signals using intensity-only based SPGD algorithm[C]. Optical Fiber Communications Conference, 2014: W1H.1.
- [16] Yang X, Yin X L, Guo X L, *et al.* The effect of repairing the distorted OAM beam with changing the Gaussian index of deformable mirrors[EB/OL]. Beijing: Sciencepaper Online [2015-12-05]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201512-711>.
杨璇, 尹霄丽, 郭兴兰, 等. 改变变形镜的高斯指数对修复畸变涡旋光束的影响[EB/OL]. 北京: 中国科技论文在线 [2015-12-05]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201512-711>.
- [17] Gao C Q, Zhang S K, Fu S Y, *et al.* Adaptive optics wavefront correction techniques of vortex beams[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(2): 0201001.
高春清, 张世坤, 付时尧, 等. 涡旋光束的自适应光学波前校正技术[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(2): 0201001.
- [18] Yao A M, Padgett M J. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications[J]. Advances in Optics & Photonics, 2011, 3(2): 161-204.
- [19] Ren Y, Xie G, Huang H, *et al.* Adaptive optics compensation of multiple orbital angular momentum beams propagating through emulated atmospheric turbulence[J]. Optics Letters, 2014, 39(10): 2845-2848.
- [20] Huang H, Ren Y, Yan Y, *et al.* Phase-shift interference-based wavefront characterization for orbital angular momentum modes[J]. Optics Letters, 2013, 38(13): 2348-2350.
- [21] Xie G, Ren Y, Huang H, *et al.* Phase correction for a distorted orbital angular momentum beam using a Zernike polynomials-based stochastic-parallel-gradient-descent algorithm[J]. Optics Letters, 2015, 40(7): 1197-200.
- [22] Guo A L, Zhu H D, Yang Z P, *et al.* Deformable mirror control algorithm based on the phase correction at the actuator position[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0311001.
郭爱林, 朱海东, 杨泽平, 等. 基于驱动器位置相位校正的变形镜控制算法[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0311001.
- [23] Yang H Z, Chen B, Li X Y, *et al.* Experimental demonstration of stochastic parallel gradient descent control 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.