

引用格式: QIN Guangwei, XIE Wenke, ZOU Xingjian, et al. Metric Function Construction for Coherent Synthetic Vortex Beam Based on Angular Invariance of the Light Field Distribution and Its Application[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(12):1201003
秦广为, 谢文科, 邹行健, 等. 基于相干合成涡旋光束光场分布角向不变性的评价函数构建及其应用研究[J]. 光子学报, 2023, 52(12):1201003

基于相干合成涡旋光束光场分布角向不变性的 评价函数构建及其应用研究

秦广为¹, 谢文科¹, 邹行健², 于涛¹, 谢巧¹

(1 中南大学 物理学院, 长沙 410083)

(2 深圳北理莫斯科大学 材料科学与工程学院, 深圳 518172)

摘要: 大气湍流引入的波前畸变导致相干合成涡旋光束质量劣化, 需进行波前畸变校正。基于相干合成涡旋光束光场分布的角向不变性, 通过像清晰度函数提取明暗干涉条纹区域的总光强, 构建角向条纹对比度评价函数, 将评价函数应用于随机并行梯度下降算法, 可以实现单环以及双环阵列结构的相干合成涡旋光束波前畸变自适应校正。仿真实验结果表明, 相较于光强相关系数等传统评价函数, 以角向条纹对比度作为评价函数的随机并行梯度下降算法具有校正性能好、收敛速度快的优点。此外, 单环和双环结构相干合成涡旋光束的波前校正结果均验证了角向条纹对比度作为相干合成涡旋光束评价函数的有效性及优势。

关键词: 自适应光学; 涡旋光束; 角向不变性; 评价函数; 随机并行梯度下降算法

中图分类号: O439

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20235212.1201003

0 引言

涡旋光束凭借其独特的螺旋相位分布和携带轨道角动量 (Orbital Angular Momentum, OAM) 的特性, 成为目前的研究热点^[1-2]。相较于传统方法生成的涡旋光束, 相干合成涡旋 (Coherent Synthetic Vortex, CSV) 光束具有输出功率高、拓扑荷模式可控等优点, 其在目标转速遥感、光通信等远距离传输领域具有广泛的应用前景^[3-4]。2021年, 侯天悦等通过相干合成光纤阵列, 生成了高功率、快速、模式可切换的叠加态涡旋光束, 并提出可将 CSV 光束引入光通信领域^[5]; 2022年, 于涛等利用相干合成技术生成了 $\pm l$ 阶拓扑荷的叠加态涡旋光束, 建立了目标转速远距离探测模型^[6]。但在远距离大气探测应用中, 由于大气湍流的存在, CSV 光束会发生波前畸变而导致光斑畸变和 OAM 模式扩展, 即光束质量产生劣化, 故需对 CSV 光束进行自适应光学校正。由于随机并行梯度下降 (Stochastic Parallel Gradient Descent, SPGD) 算法具有收敛速度快、收敛精度高等优点, 被广泛应用于无波前传感的自适应光学系统^[7]。

SPGD 算法性能优劣很大程度上依赖于评价函数选取的准确性, 然而由多拓扑荷组成的叠加态 CSV 光束, 其光强和相位分布较为复杂, 传统评价函数应用于 CSV 光束的质量评价存在困难。例如, 斯特列尔比 (Strehl Ratio, SR)、桶中功率 (Power-in-the-bucket, PIB) 被广泛应用于相干合成光束质量评价, 但由于 CSV 光束具有中空环形的光强分布特征, 其不能直接用于 CSV 光束质量评价^[8-9]。光强相关系数、OAM 模式能量占比虽可以应用于 CSV 光束质量评价, 但以光强相关系数作为评价函数应用于 SPGD 波前畸变校正时, 因 CSV 光束的光强分布会随传输距离变化发生较大改变, 在实际应用中难以获取真空条件下的光强分布 (标准光斑)^[10]; 以 OAM 模式能量占比为评价函数进行波前校正时, 由于对 CSV 光场进行了螺旋谱分

基金项目: 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金 (No. 2022ZZTS0728)

第一作者: 秦广为, 202211011@csu.edu.cn

通讯作者: 谢文科, wenkexiedan@163.com

收稿日期: 2023-04-23; 录用日期: 2023-06-25

<http://www.photon.ac.cn>

析^[11],导致SPGD算法收敛时间过长,校正后光束质量难以满足应用要求。为有效实现基于SPGD算法的CSV光束波前畸变SPGD自适应光学校正,需构建适用于CSV光束的评价函数。

因此,本文基于CSV光束传输过程中光场分布的角向不变特性,以角向条纹对比度构建了CSV光束的质量评价函数 J_0 ,并结合SPGD算法进行了波前畸变自适应校正。相较于评价函数光强相关系数和OAM模式能量占比,构建的评价函数 J_0 可以有效提升SPGD算法的收敛精度和收敛速度,并且在复杂双环阵列结构的CSV光束SPGD波前畸变校正中仍然有效。

1 CSV光束传输特性及其评价函数

1.1 CSV光束模型及传输特性

如图1所示,将 N 个振幅归一化的高斯光束以环形排布在 $z=0$ 平面。为相干合成高功率涡旋光束,对该环形排布的高斯光束阵列施加 l_0 阶离散涡旋相位,其光束阵列在任意 z 处的光振幅^[12]为

$$E(r, \varphi, z) = \exp\left(-\frac{r^2 + R^2}{\omega^2(z)}\right) \exp\left(-\frac{ik(r^2 + R^2)}{2R(z)}\right) \exp[i \arctan(z/f - ikz)] \times \sum_{j=0}^{N-1} \exp\left(\frac{2Rr \cos(\theta_j - \varphi)}{\omega^2(z)}\right) \exp\left(\frac{ikrR \cos(\theta_j - \varphi)}{R(z)}\right) \exp(il_0 \theta_j) \quad (1)$$

式中, R 为组束环半径, k 为波数矢量; (r, φ, z) 为距离 z 处的平面极坐标; $\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + (z/f)^2}$ 是传输至距离 z 处的光斑半径宽度, ω_0 为源平面处高斯光束束腰半径, $f = (\pi \omega_0^2)/\lambda$ 为共焦参数; $R(z) = z + f^2/z$ 为 z 处的曲率半径; N 为子光束数目; $\theta_j = 2\pi j/N$ 为第 j 个高斯光束中心与 x 轴的夹角; l_0 为目标拓扑荷。

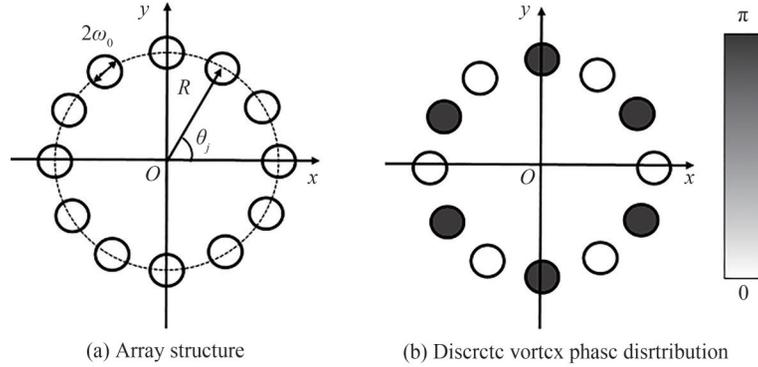


图1 $N=12, l_0=6$ 时的光束阵列示意图

Fig. 1 The schematic diagram of the CSV beam array where $N=12, l_0=6$

依据第一类修正贝塞尔函数 $\exp(x \cos \varphi) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} I_l(x) \exp(il\varphi)$, $I_l(x)$ 为 l 阶贝塞尔函数。式(1)在极坐标下展开为^[13]

$$E(r, \varphi, z) = N \exp\left(-\frac{r^2 + R^2}{\omega^2(z)}\right) \exp\left(-\frac{ik(r^2 + R^2)}{2R(z)}\right) \exp[i \arctan(z/f) - ikz] \times \sum_{l_p} I_{l_p} \left[\left(\frac{2R}{\omega^2(z)} + \frac{ikR}{R(z)} \right) r \right] \exp[il_p \varphi] \quad (2)$$

式中, $l_p = l_0 - Np$,其中 p 为任意整数。由式(2)可知,CSV光束中除存在目标拓扑荷外,还存在拓扑荷数为 $l_0 - Np$ ($p \neq 0$) 的其它模式,即拓扑荷发生了扩散,并且各阶模式振幅大小正比于所对应拓扑荷阶数的贝塞尔函数幅值。其中 l_p 阶模式振幅为

$$A_{l_p} = N \exp\left(-\frac{r^2 + R^2}{\omega^2(z)}\right) \exp\left(-\frac{ik(r^2 + R^2)}{2R(z)}\right) \times \exp[i \arctan(z/f) - ikz] I_{l_p} \left[\left(\frac{2R}{\omega^2(z)} + \frac{ikR}{R(z)} \right) r \right] \quad (3)$$

当目标拓扑荷 $l_0 = \pm N/2$ 时,CSV光束中 $\pm l_0$ 阶OAM模式占比最强,此时光场表达式近似为

$$E(r, \varphi, z) = NA_{l_0}(r, z)\exp(il_0\varphi) + NA_{-l_0}(r, z)\exp(-il_0\varphi) \quad (4)$$

1.2 传统评价函数

为保证 SPGD 波前畸变校正的有效性,评价函数不仅要求计算简便、易于获取,还应满足在相位畸变为零时存在唯一的全局极值^[14-15]。分析已有光束质量评价函数应用于 CSV 光束的可行性。

1) 斯特列尔比

斯特列尔比定义为实际光束的远场峰值光强与具有同样功率的理想光束的峰值光强之比^[8],可以表示为

$$SR = \frac{I(x_0, y_0)}{I_0(x_0, y_0)} \quad (5)$$

式中, $I_0(x_0, y_0)$ 为理想光束的峰值光强大小, $I(x_0, y_0)$ 实际光束的远场峰值光强, (x_0, y_0) 为峰值光强位置。

SR 不仅可在一定程度上反映光束的能量聚集度,还可以反映光束波前相位误差的大小。但对于涡旋光束而言,由于其具有空心环形的强度分布,故难以准确获得峰值光强位置 (x_0, y_0) 。

2) 桶中功率

桶中功率表征光束的能量集中度,其定义为在远场给定尺寸的“桶”中包围的激光功率占总功率的百分比^[9],即

$$PIB = \int_C I(r, \varphi) dr d\varphi \quad (6)$$

式中, C 为所划分的“桶”的尺寸大小, $I(r, \varphi)$ 为扰动下的远场光强分布。由式(2)定义可知,具有相反拓扑荷的涡旋光束光斑尺寸相同,故桶中功率无法直接应用于叠加态涡旋光束的质量评价。

3) 光强相关系数

涡旋光束中模式纯净度与光强相关系数呈正比关系^[16]。基于光强相关系数的评价函数定义为^[17]

$$J_c = \int_0^1 \int_{-\pi}^{\pi} I(r, \varphi) I_{id}(r, \varphi) dr d\varphi \quad (7)$$

式中, $I_{id}(r, \varphi)$ 为无湍流传输时的远场光强分布。

由式(7)可知,光强相关系数 J_c 作为评价函数时,需以无湍流时的理想光强分布 $I_{id}(r, \varphi)$ 作为模板函数,用以计算当前光强分布 $I(r, \varphi)$ 与 $I_{id}(r, \varphi)$ 的相似性。然而 CSV 光束光强分布随远场传输距离发生改变,因此在实际应用过程中无湍流传输时的远场光强分布 $I_{id}(r, \varphi)$ 获取困难。

4) OAM 模式能量占比

依据螺旋谐波分析方法,可将涡旋光场分解为一系列具有不同拓扑荷数的模式叠加^[11],即

$$E(r, \varphi, z) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{l=-\infty}^{\infty} a_l(r, z) \exp(il\varphi) \quad (8)$$

式中, a_l 为第 l 阶拓扑荷模式对应的振幅大小,即

$$a_l(r, z) = \frac{1}{\sqrt{2}} \int_0^{2\pi} E(r, \varphi, z) \exp(-il\varphi) d\varphi \quad (9)$$

对 a_l 径向积分可得

$$P_l = \int_0^{\infty} |a_l(r, z)|^2 r dr \quad (10)$$

P_l 为第 l 阶 OAM 模式的强度大小。因此,以 $\pm l$ 阶 OAM 模式能量占比定义的评价函数可表示为

$$J_o = P_{l_0} \times P_{-l_0} \quad (11)$$

由式(8)~(11)可知, J_o 获取过程包含了复杂的积分运算,所需时间较长。

1.3 角向条纹对比度评价函数构建

鉴于上述光束质量评价方法存在模板函数获取困难、计算时间长等缺陷,不能较好地满足 CSV 光束的质量评价及其实际应用需求。结合 CSV 光束传输特性,构建光斑角向条纹对比度评价函数。

由式(2)可得, CSV 光束在距离 z 处的光强分布为

$$I(r, \varphi, z) = E(r, \varphi, z) \times E^*(r, \varphi, z) = 4N^2 |A_{l_0}(r, z)|^2 \cos^2(l_0 \varphi) \quad (12)$$

式中与角度有关的因子为

$$\cos^2(l_0 \varphi) = \frac{1}{2} [\cos(2l_0 \varphi) + 1] \quad (13)$$

由式(13)可知, CSV 光束光强随角度呈明暗周期分布, 如图 2 所示, 其中红线标注的区域表示明条纹区域, 黄线标注的区域表示干涉暗场分布区域, 并且当 l_0 确定时, 该周期分布特性仅与幅角 φ 的变化有关, 与传输距离无关。

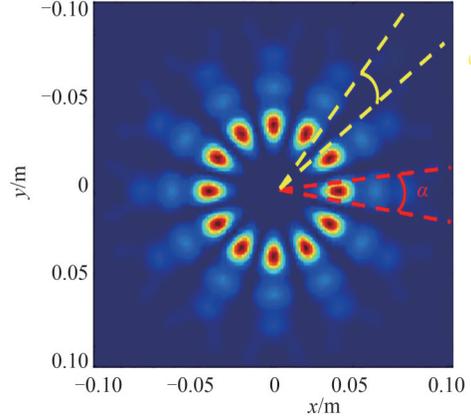


图 2 CSV 光束角向特性

Fig.2 The angular characteristic of CSV beam

在 SPGD 算法中, 所测 CSV 光束的光强分布特性可以用像清晰度函数进行描述^[18]。因此, 在 CSV 光束的 SPGD 波前畸变自适应校正中, 采用角向条纹对比度结合像清晰度函数的方法进行光束质量评价。其中像清晰度函数表示为

$$S = \int M(r, \varphi) I(r, \varphi) dr d\varphi \quad (14)$$

式中, 基于干涉条纹的角向周期分布规律构建的模板函数 $M(r, \varphi)$ 为

$$M_1(r, \varphi) = \begin{cases} 1, & \frac{k_1 \pi}{l_0} - \frac{\alpha}{2} < \varphi < \frac{k_1 \pi}{l_0} + \frac{\alpha}{2}, k_1 = 0, 1, 2, \dots, 2l_0 - 1 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (15)$$

$$M_2(r, \varphi) = \begin{cases} 1, & \frac{k_2 \pi}{2l_0} - \frac{\alpha}{2} < \varphi < \frac{k_2 \pi}{2l_0} + \frac{\alpha}{2}, k_2 = 1, 2, \dots, 2l_0 - 1 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (16)$$

M_1 、 M_2 分别表示 CSV 光束明、暗条纹所在区域对应的模板函数, 其反映了 CSV 光束的周期分布特性; α 表示明暗干涉条纹区域选取的角向范围大小。在 SPGD 校正系统中, 分别测量明暗条纹区域的总光强 $I_b = \iint M_1(r, \varphi) I(r, \varphi) dr d\varphi$ 、 $I_d = \iint M_2(r, \varphi) I(r, \varphi) dr d\varphi$, 即可构建角向条纹对比度评价函数为

$$J_D = \frac{I_b - I_d}{I_b + I_d} \quad (17)$$

2 基于 J_D 评价函数的 CSV 光束自适应光学校正

仿真参数设置如下: 种子光源波长为 1 064 nm, 子光束束腰半径 $\omega_0 = 5$ mm, 阵列半径 $R = 30$ mm; 光束的传输距离 $z = 1$ km, 子孔径数目 $N = 12$, 大气结构常数 $C_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$; 在 MATLAB 仿真过程中, 空间采样分辨率为 512×512 。

利用随机相位屏模型模拟大气湍流所产生的畸变相位。如图 3 所示, 将光束传输路径等分为 M 段, 每一段路径等效为光束通过一个“薄”相位屏。光束从 z_m 平面传输到 z_{m+1} 平面表示^[19-20]为

$$u(r, z_{m+1}) = F^{-1} \left\{ F [u(z_m) \exp [i\varphi(r, z_m)]] \exp \left(-i \frac{k_x^2 + k_y^2}{2k} \Delta z_{m+1} \right) \right\} \quad (18)$$

式中, $u(r, z_m)$ 、 $u(r, z_{m+1})$ 分别为传输至 z_m 和 z_{m+1} 平面处的光场; F 为傅里叶变换, F^{-1} 为傅里叶逆变换; k 为光束的波束矢量, k_x 、 k_y 分别为在 x 方向和 y 方向上的空间波数; $\varphi(r, z_m)$ 为根据大气湍流 Kolmogorov 谱的功率谱密度函数得到随机相位分布^[21-22]。

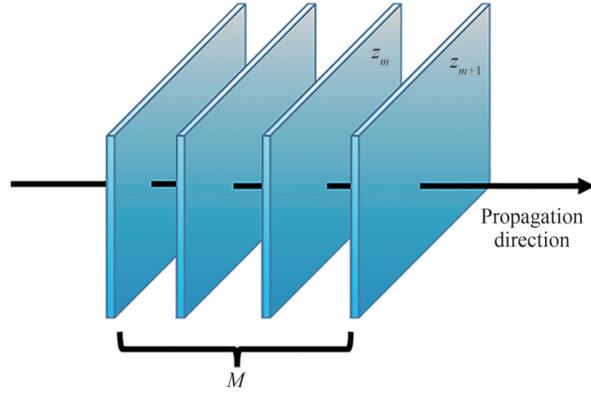


图3 湍流相位屏传输模型

Fig. 3 Transmission model of atmosphere phase screens

2.1 CSV 光束传输特性分析

1 km 处 CSV 光束的光强分布和 OAM 模式能量分布结果如图 4 所示。其中图 4(a) 和 (c) 是无湍流传输时的光强分布和 OAM 模式分布。由图 4(a) 可知, CSV 光束经自由空间传输后, 由于相邻子光束之间会产生光场叠加, 因而形成 12 条随角度周期性变化的瓣状干涉条纹, 且能量集中分布于瓣状条纹中心位置。由图 4(c) 可知, 加载了 $l_0=6$ 阶离散涡旋相位的 CSV 光束中主要包含 ± 6 阶 OAM 模式, 其占比之和为 0.982。

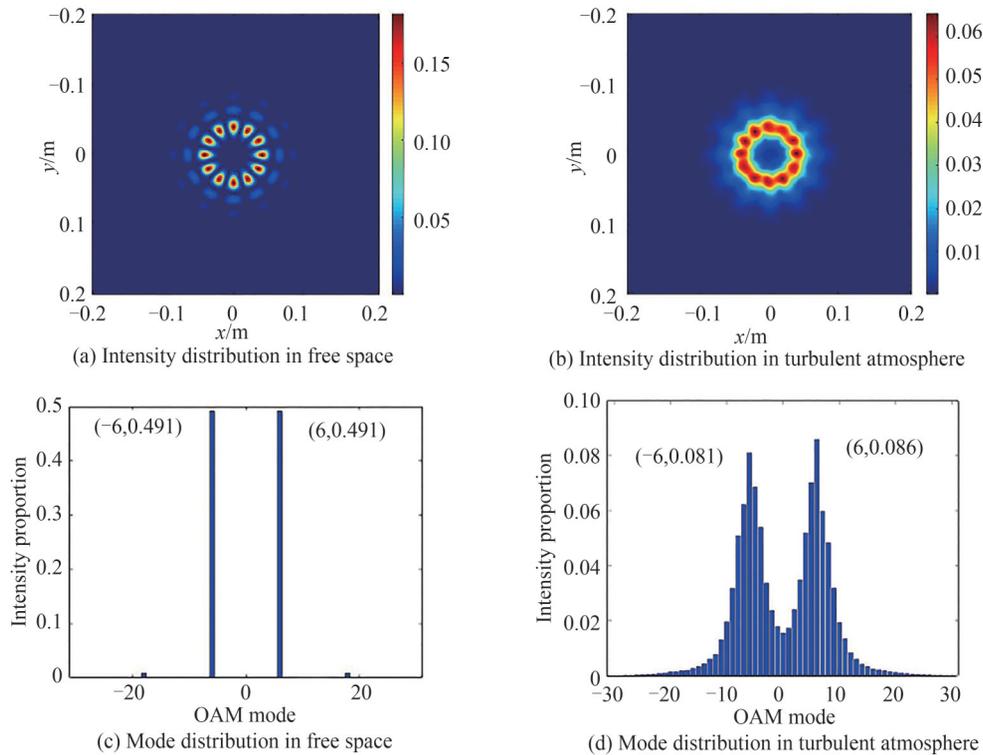


图4 远场光强分布和 OAM 模式分布

Fig. 4 Far-field intensity distribution and OAM mode distribution

图4(b)为受到湍流扰动后的光强分布,由于大气传输波前畸变效应,此时的明暗条纹周期分布规律被破坏,亮条纹的强度亦不均匀。图4(d)为受湍流扰动后的CSV光束中各阶模式占比分布,此时 ± 6 阶OAM模式能量向邻近模式发生扩散,其占比之和下降至0.167。因此,大气湍流带来的波前畸变限制了CSV光束在遥感探测等领域的应用,故需对CSV光束进行波前畸变校正。

2.2 角向区域选取

J_D 作为评价函数时,选取的明暗条纹角宽度 α 将影响SPGD算法性能。当 $l_0=6$ 时, α 的取值范围为 $0^\circ\sim 15^\circ$ 。受限于所设空间分辨率大小, α 的最小取值间隔为 $2 \times \frac{2\pi}{512}$,即 1.41° 。在 $C_n^2=1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 的湍流条件下生成200组湍流相位屏。以 1.41° 为步长改变 α 的取值,并在每一 α 的取值下依据上述湍流相位屏进行相同的200次校正实验,由所测平均结果分析 α 对SPGD算法性能的影响。

图5为200次校正实验中 J_D 的平均收敛曲线,当 α 由 1.41° 增大至 14.1° 时, J_D 收敛极值由0.7747递减至0.4712,表明 α 取值越小, J_D 对于CSV光束中明暗条纹分布变化越敏感,CSV光束的质量评价越准确,SPGD算法的收敛精度越高。SPGD算法收敛速度随 α 变化关系如表1所示,将收敛步数定义为评价函数由初态收敛至距极值80%处所经历的步数。由表1可知,随着 α 增大,计算的所需采样点数越多,单次迭代所需时间增加的同时收敛步数基本不发生改变。因此,当增大 α 时,SPGD算法的收敛速度下降,可以通过降低 α 值来有效提升SPGD算法的收敛速度和收敛精度。后续实验中 α 选取为 1.41° 。

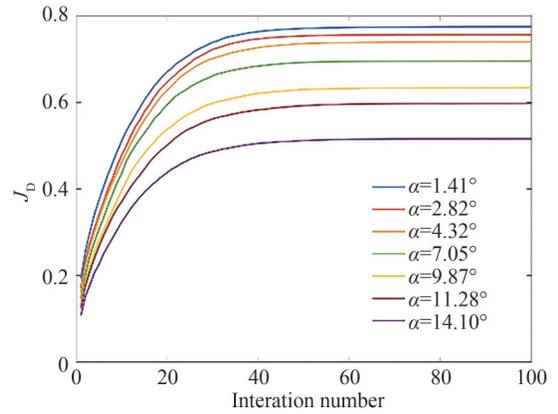


图5 α 取不同值时的 J_D 收敛曲线
Fig.5 Convergence curve of J_D under different α

表1 SPGD算法收敛速度随 α 变化关系

Table 1 Variation of convergence speed with α in SPGD algorithm

$\alpha/(^\circ)$	1.41	2.82	4.23	7.05	11.28	14.10
Single iteration time/ms	0.52	0.55	0.58	0.61	0.74	0.89
Convergence step	17	18	17	17	18	17

2.3 校正结果分析

为研究以 J_D 作为评价函数的SPGD算法的校正性能,分别选用 J_0 、 J_C 以及 J_D 作为CSV光束评价函数,结合SPGD算法进行波前畸变校正,并以校正后的光强分布和 ± 6 阶OAM模式能量占比评价CSV光束的SPGD波前畸变校正效果。在 $C_n^2=1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 的湍流条件下生成200组湍流相位屏,分别采用三种评价函数进行了相同的200次重复实验。

在波前畸变校正实验中,归一化后的评价函数随迭代次数的收敛曲线如图6所示。在平均收敛曲线中,校正前 J_0 、 J_C 、 J_D 的取值分别为0.154、0.552、0.575;在校正过程中,三种函数均以单调递增的方式进行收敛;曲线收敛后的三种评价函数取值分别为0.355、0.851、0.877。比较 J_0 、 J_C 、 J_D 在200次实验中收敛极值的波动幅度可知, J_0 的极值波动幅度为0.606,明显大于 J_C 的0.239和 J_D 的0.152,表明采用 J_0 的SPGD算法稳定性差。表2为采用不同评价函数的SPGD算法收敛速度分析,其中由于 J_D 相较于 J_C 、 J_0 运算更简便、计算所需采样点数更少,单次迭代所需时间仅为0.5 ms,相较于 J_0 和 J_C 单次迭代速度分别提升8.2倍和3.0倍。计算不同评价函数由初态收敛至距极值80%处所经历的步数可知, J_0 、 J_C 、 J_D 的收敛步数分别为56步、41步和36步;经由MATLAB计算迭代总时间可知, J_D 相较于 J_0 、 J_C 收敛速度分别提升12.7倍和3.4倍。因此,采用 J_D 作为评价函数可以有效提升SPGD算法的校正速度。

校正后光强分布和OAM模式分布如图7所示。图7(a)和(c)为采用 J_0 作为评价函数的校正结果,其中图7(a)为校正后光强分布,此时光强分布与图3(b)中校正前光强分布相近似,表明光束的波前相位仍存在较大校正残差;图7(d)为校正后OAM模式分布,以 J_D 评价函数校正后的 ± 6 阶OAM模式能量占比之和由

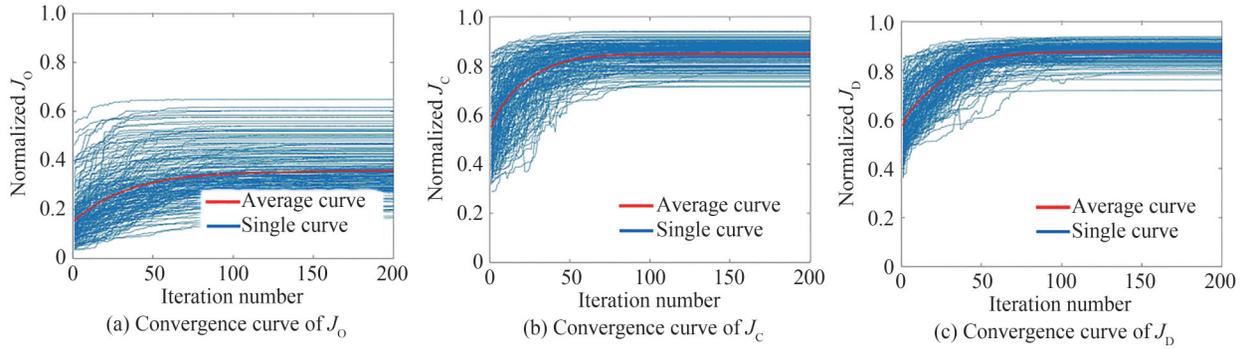


图6 J_O 、 J_C 、 J_D 评价函数的收敛曲线
Fig.6 Convergence curve of J_O , J_C and J_D

表2 评价函数收敛速度分析
Table 2 Analysis of metric function convergence speed

Metric function	Convergence step	Single iteration time/ms	Convergence time/ms
J_O	56	4.1	229.6
J_C	41	1.5	61.5
J_D	36	0.5	18

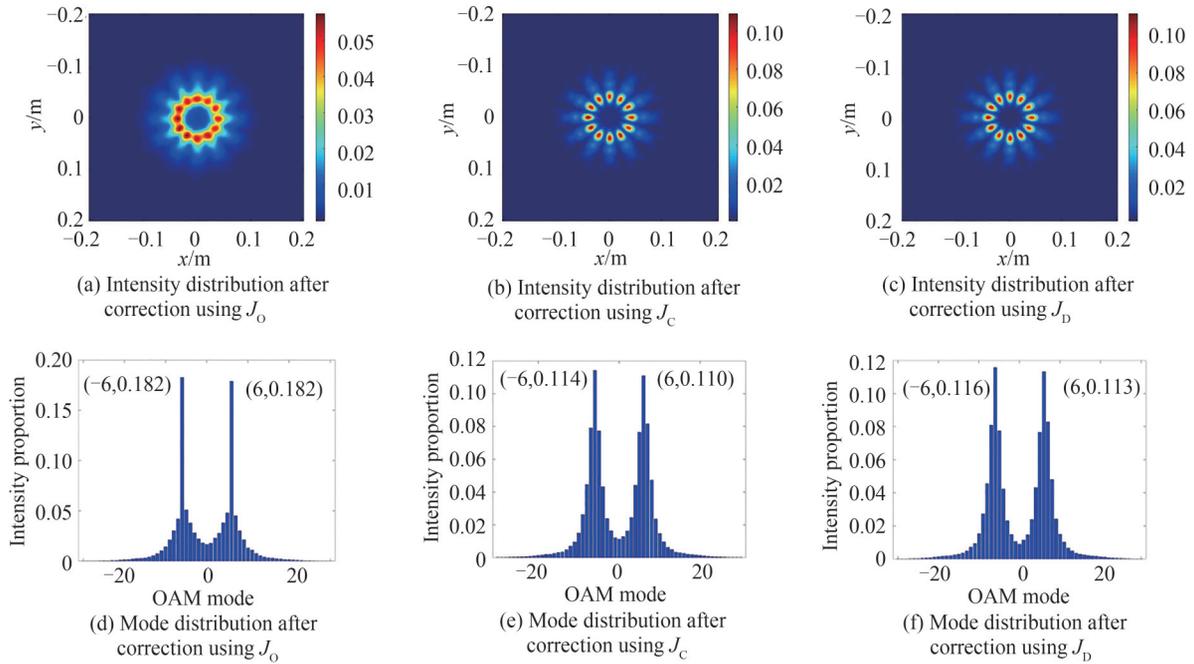


图7 采用 J_O 、 J_C 、 J_D 作为评价函数的SPGD波前畸变校正结果
Fig.7 The results of SPGD wavefront phase correction using J_O , J_C and J_D as metric function

0.167 提升至 0.363。图 7(b)、(c) 分别为采用 J_C 、 J_D 作评价函数校正后的光强分布,在图 7(b)、(c) 中均可清晰地观测到干涉条纹的明暗分布成角向周期性分布,同时光强集中分布于瓣状条纹中心亮斑区域,表明了 J_C 、 J_D 能够改善 CSV 光束的光强分布。图 7(e)、(f) 分别为采用 J_C 、 J_D 作评价函数校正后的 OAM 模式分布,其中 J_D 校正后 ± 6 阶 OAM 模式能量占比之和为 0.229,相较于采用 J_C 的 0.224 提升幅度更大,表明 J_D 相较于 J_C 能够更有效地提升模式纯度。

综合比较校正后 CSV 光束光强分布和 OAM 模式能量分布,其中 J_O 能够显著提升校正后 ± 6 阶 OAM 模式能量占比,但其校正后光强分布几乎没有得到优化,因此以 J_O 作为评价函数的 SPGD 算法在波前畸变校正中对于 CSV 光束质量改善效果较差;采用 J_C 、 J_D 校正后光束光强分布均存在清晰的干涉条纹分布,但 J_D 校

正结果中, ± 6 阶 OAM 模式能量占比优于 J_c 。因此, 以 J_b 作为评价函数的 SPGD 算法可以更好地提升 CSV 光束质量, 具有更高的校正精度。

综上, J_b 作为评价函数可有效提升 SPGD 算法的校正性能, 使其具有更高的收敛精度和更快的收敛速度。

2.4 双环阵列结构的 CSV 光束波前相位校正

在实际应用中, 为获取更高的输出功率, CSV 光源阵列通常为更加复杂的多环嵌套结构^[5]。为验证评价函数 J_b 在复杂光源阵列中的有效性, 构建了如图 8 所示的双环阵列结构 CSV 光源, 并结合 SPGD 算法进行波前畸变自适应校正。研究表明, CSV 光束中 OAM 模式分布与光源阵列结构填充因子 $f = \omega_0 / [R \sin(n/N)]$ 相关^[23]。因此, 为保证双环阵列结构的 CSV 光束同单环结构的 OAM 模式分布相同, 应使内外环具有相同的填充因子, 故将双环阵列结构参数设置为: $\omega_{01} = 3 \text{ mm}$, $\omega_{02} = 5 \text{ mm}$, $R_1 = 18 \text{ mm}$, $R_2 = 30 \text{ mm}$; 内外环均加载 6 阶拓扑荷的离散涡旋相位。以该光源结构进行 1 km 大气传输的仿真结果见图 9。

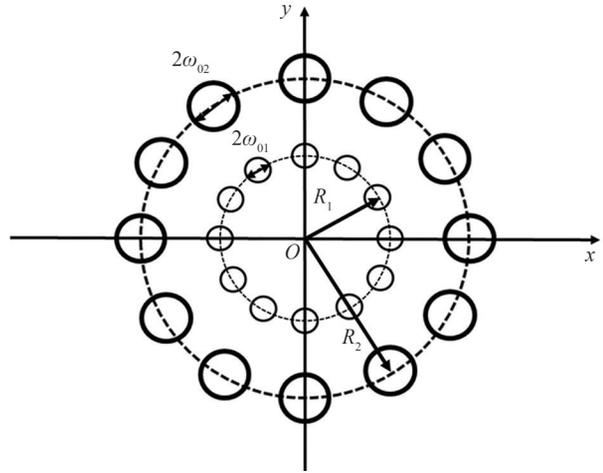


图 8 双环阵列结构示意图
Fig. 8 The schematic diagram of dual-ring array

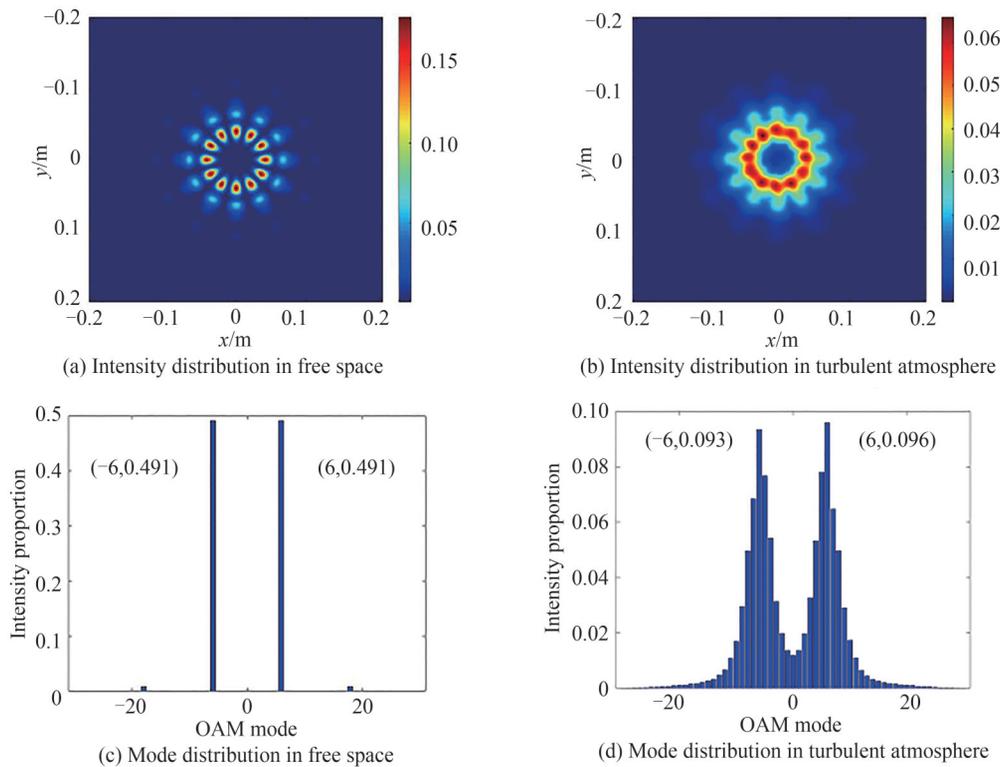


图 9 双环阵列 CSV 光束的远场光强分布和 OAM 模式分布
Fig. 9 Far-field intensity distribution and OAM mode distribution of CSV beam with dual-ring array

1 km 处 CSV 光束的光强分布和 OAM 模式能量分布结果如图 9 所示。图 9(a)、(c) 分别为理想条件下的光强分布和 OAM 模式分布, 此时光强分布具有清晰可见的周期性瓣状干涉条纹, 且能量汇集于瓣状光斑中心位置, 表明了双环阵列的 CSV 光束光场分布与单环具有相同的角向周期性。图 9(b)、(d) 为受大气湍流扰动后的光强分布和 OAM 模式分布, 对比图 9(a)、(c) 可知, 经过大气传输后, CSV 光束的光强分布角向规律性消失, 明条纹之间相互重叠并成环形分布, 以致角向条纹对比度下降; ± 6 阶 OAM 模式能量占比之和

由 0.982 大幅跌至 0.189, ± 6 阶 OAM 模式能量向邻近模式发生扩散。

双环 CSV 光束经 SPGD 算法校正后光强分布和 OAM 模式分布如图 10 所示。其中图 10(a)、(d) 为采用 J_0 作为评价函数进行 SPGD 波前校正后的结果, 对比图 9(b)、(d) 可知, J_0 作为评价函数进行 SPGD 波前校正可以有效提升双环 CSV 光束中 ± 6 阶 OAM 模式能量占比, 但其对于 CSV 光束的光强分布几乎没有明显改善。采用 J_c 、 J_d 作为评价函数进行波前相位校正后的光强分布比较结果如图 10(b)、(c) 所示, 其中 CSV 光束光强分布在校正后具有清晰的明暗条纹分布规律并且能量汇聚于瓣状光斑中心, 因此 J_c 、 J_d 能够改善 CSV 光束的光强分布。采用 J_c 、 J_d 进行 SPGD 波前校正后的 OAM 模式能量分布见图 10(e)、(f), 其中采用 J_c 、 J_d 作评价函数进行校正后 ± 6 阶 OAM 模式能量占比之和分别为 0.229、0.238。分析可知, 在更加复杂的 CSV 阵列结构中, 采用 J_d 作为评价函数的 SPGD 算法仍可有效进行波前畸变校正。

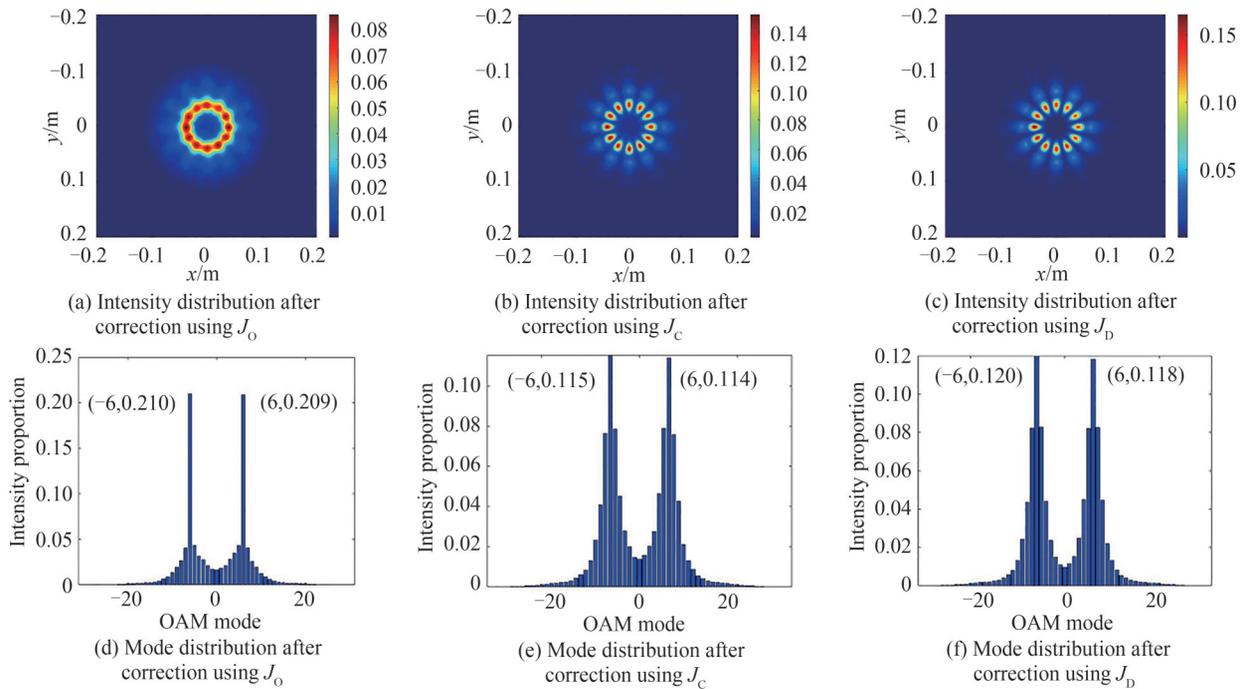


图 10 双环阵列 CSV 光束波前相位校正结果

Fig. 10 The results of wavefront phase correction for CSV beam with dual-ring array

3 结论

为提升经过大气传输后的 CSV 光束质量, 以 CSV 光束的传输特性为基础, 构建了角向条纹对比度评价函数 J_d , 结合 SPGD 算法对 CSV 光束的波前畸变进行了校正。仿真结果表明, 相较于光强相关系数 J_c 、OAM 模式能量占比 J_0 , 以 J_d 作为评价函数的 SPGD 算法在过程中具有更高的收敛精度和更快的收敛速度, 其在单环结构 CSV 光束波前校正结果中, CSV 光束的角向条纹对比度由 0.575 提升至 0.877; 模式能量占比由 0.167 提升至 0.229; 相较于 J_0 、 J_c , 收敛速度分别提升了 12.7 倍和 3.4 倍。此外, 在复杂双环阵列结构的 CSV 光束中, 以 J_d 作为评价函数的 SPGD 算法仍可在 CSV 光束的波前畸变自适应校正中有效改善 CSV 光束的光强分布以及 ± 6 阶 OAM 模式能量占比, 从而提升 CSV 光束质量。所提出的评价函数 J_d 可以较好地满足 CSV 光束的质量评价及其实际应用的需求。

参考文献

- [1] CVIJETIC N, MILIONE G, IP E, et. al. Detecting lateral motion using light's orbital angular momentum[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 15422.
- [2] WILLNER A E, AHMED N, LAVERY M P J, et al. Optical communications using orbital angular momentum beams [J]. Advances in Optics and Photonics, 2015, 7: 66-106.

- [3] YU Tao, XIA Hui, FAN Zhihua, et al. Generation of Bessel-Gaussian vortex beam by combining technology[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(13): 134203.
于涛, 夏辉, 樊志华, 等. 贝塞尔-高斯涡旋光束相干合成研究[J]. 物理学报, 2018, 67(13): 134203.
- [4] LI Fajing, NIE Shouping, MA Jun, et al. Multiple-dimensional multiplexed holography based on modulated chiro-optical fields[J]. Optics Express, 2022, 30(23): 41567-41579.
- [5] HOU Tianyue, CHANG Qi, YU Tao, et al. Switching the orbital angular momentum state of light with mode sorting assisted coherent laser array system [J]. Optics Express, 2021, 29(9): 13428-13440.
- [6] YU Tao, XIA Hui, XIE Qiao, et al. Free-space remote detection of a spinning object using the combined vortex beam[J]. Optics Express, 2022, 30(22): 39294-39308.
- [7] WEN Lianghua, YANG Ping, YANG Kangjian, et al. Experiments of the aberrations correction for membrane fresnel lens based on wavefront sensorless[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(10): 1011001.
文良华, 杨平, 杨康建, 等. 基于无波前传感的菲涅耳透镜像差校正实验[J]. 光子学报, 2017, 46(10): 1011001.
- [8] GU Haijun, LIU Meiqi, LIU Haoyu, et al. An algorithm combining convolutional neural networks with SPGD for SLAO in FSO[J]. Optics Communications, 2020, 475: 126243.
- [9] GENG Chao, LUO Wen, TAN Yi, et al. Experimental demonstration of using divergence cost-function in SPGD algorithm for coherent beam combining with tip/tilt control[J]. Optics Express, 2013 21(21): 25045-25055.
- [10] KE Xizheng, WANG Xiayao. Experimental study on the correction of wavefront distortion for vortex beam [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0328018.
柯熙政, 王夏尧. 涡旋光波前畸变校正实验研究[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0328018.
- [11] PENG Yiming, XUE Yu, XIAO Guangzong, et al. Spiral spectrum analysis and application of coherent synthetic vortex beams[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(21): 214206.
彭一鸣, 薛煜, 肖光宗, 等. 相干合成涡旋光束的螺旋谱分析及应用研究[J]. 物理学报, 2019, 68(21): 214206.
- [12] YU Tao, XIA Hui, XIE Wenke, et al. The generation and verification of Bessel-Gaussian beam based on coherent beam combining[J]. Results in Physics, 2020, 16: 102872.
- [13] YU Tao, XIA Hui, XIE Qiao, et al. Free-space remote detection of a spinning object using the combined vortex beam [J]. Optics Express, 2022, 30(22): 39294-39308.
- [14] MA Shengjie, HAO Shiqi, ZHAO Qingsong. Wavefront distortion correction of vortex beam based on improved SPGD algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(6): 0601001.
马圣杰, 郝士琦, 赵青松. 基于改进型 SPGD 算法的涡旋光波前畸变校正[J]. 光学学报, 2021, 41(6): 0601001.
- [15] CHEN Meirui, JIANG Lü, MAO Hongmin, et al. High-precision static aberration correction method of SPGD algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(5): 0511001.
陈梅蕊, 姜律, 毛红敏, 等. SPGD 算法高精度静态像差校正方法[J]. 光学学报, 2023, 43(5): 0511001.
- [16] HUANG Hao, REN Yongxiong, YAN Yan, et al. Phase-shift interference-based wavefront characterization for orbital angular momentum modes[J]. Optics Letters, 2013, 38(13): 2348-2350.
- [17] XIE Guodong, REN Yongxiong, HUANG Hao, 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): 1197-1200.
- [18] MULLER R A, BUFFINGTON A. Real-time correction of atmospherically degraded telescope images through image sharpening[J]. Journal of the Optical Society of America, 1974 64(9): 1200-1210.
- [19] SUN Ridong, GUO Lixin, CHENG Mingjian, et al. Propagation characteristics of bessel-gaussian beam in anisotropic atmosphere[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(12): 1201002.
孙日东, 郭立新, 程明建, 等. 贝塞尔高斯光束在各向异性湍流中的传输特性[J]. 光子学报, 2018, 47(12): 1201002.
- [20] GBUR G, KOROTKOVA O. Angular spectrum representation for the propagation of arbitrary coherent and partially coherent beams through atmospheric turbulence [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2007 24(3): 745-752.
- [21] PAN Sunxiang, WANG Le, WANG Wennai, et al. An effective way for simulating oceanic turbulence channel on the beam carrying orbital angular momentum[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 14009.
- [22] GLEDZER E B. On thermodynamics of Kolmogorov's scaling in turbulence [J]. Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics, 2023, 57(1): 67-71.
- [23] HOU Tianyue, CHANG Qi, LONG Jinhu, et al. Design considerations and performance analysis of a fiber laser array system for structuring orbital angular momentum beams: a simulation study[J]. Optics Express, 2022, 30(9): 15279-15309.

Metric Function Construction for Coherent Synthetic Vortex Beam Based on Angular Invariance of the Light Field Distribution and Its Application

QIN Guangwei¹, XIE Wenke¹, ZOU Xingjian², YU Tao¹, XIE Qiao¹

(1 School of Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

(2 Department of Materials Science and Engineering, Shenzhen MSU-BIT University, Shenzhen 518172, China)

Abstract: In the atmospheric transmission, due to the effect of atmospheric turbulence, the Coherent Synthetic Vortex (CSV) beam will undergo wavefront distortion and lead to intensity profile aberration and Orbital Angular Momentum (OAM) mode expansion, making the CSV beam quality unable to meet the practical application requirements. In order to mitigate the wavefront phase distortion brought by turbulence, the phase correction technology based on adaptive optics is particularly important. The SPGD algorithm is widely used in adaptive optical systems without wavefront sensing because of its fast convergence speed and high convergence accuracy. However, the performance of the Stochastic Parallel Gradient Descent (SPGD) algorithm depends on the accuracy of metric function.

Given the uniqueness of the CSV beam, it is necessary to develop a new metric function by evaluating the light field features of the CSV beam. By theoretical analysis, it is known that the intensity of the CSV beam is distributed periodically in the angular direction. Since the periodic variation feature is independent of transmission distance and array structure parameters, the angular fringe contrast, which evaluates energy concentration in the bright fringe and prevents energy accumulation in the dark fringe, is an appropriate metric function.

When the angular fringe contrast is used as the metric function, the chosen bright and dark fringe angle width α will affect the SPGD algorithm performance. To establish the selection criteria of angular fringe contrast metric function, the SPGD correction experiment is performed when the value of α is changed in steps of 1.41° , which shows that a smaller value of α can result in higher convergence accuracy and the faster convergence speed for the SPGD algorithm. On the basis of this, the wavefront distortion of CSV beam is corrected by SPGD algorithm with the angular fringe contrast as the metric function. In order to verify the validity of the angular fringe contrast as metric function, comparative experiment is carried out to verify the effectiveness with different metric function: OAM mode energy ratio, intensity correlation coefficient and angular fringe contrast. The experimental results show that the SPGD algorithm with the angular fringe contrast has higher convergence accuracy and faster convergence speed, compared with the intensity correlation coefficient and OAM mode energy ratio. In the result of single-loop structure CSV beam SPGD wavefront correction using the angular fringe contrast, the angular fringe contrast is improved from 0.575 to 0.877, and the mode energy ratio is improved from 0.167 to 0.229. Compared with OAM mode energy ratio and intensity correlation coefficient, the convergence speed of SPGD algorithm is improved by 12.7 times and 3.4 times, respectively.

What's more, a dual-ring fiber array is developed to achieve higher output power and improved SPGD correction accuracy. In addition, to ensure a high proportion of the expected OAM mode in CCV beam, the waist radius of the sub-beam in inner and outer rings needs to be proportional to the inner and outer ring array radius. We used the above light source structure and performed SPGD correction, the simulation experiment results show that the SPGD algorithm with the angular fringe contrast as the metric function can also effectively improve the beam quality of CSV beam with complex dual-ring array structure.

In summary, the metric function's angular fringe contrast' proposed in this paper can satisfy the needs of quality evaluation of CSV beam and its practical long-range transmission applications.

Key words: Adaptive optics; Vortex beam; Angular invariance; metric function; SPGD algorithm

OCIS Codes: 010.1080; 010.1285; 140.3295