

引用格式: TANG Ao, LAN Bin, SHEN Feng. Simulation of Generating Vortex Beam with Controllable Mode Based on Deformable Mirror with Continuous Surface[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(1):0151120

唐奥, 兰斌, 沈锋. 基于连续镜面变形镜生成模式可调的涡旋光束仿真研究[J]. 光子学报, 2022, 51(1):0151120

# 基于连续镜面变形镜生成模式可调的涡旋光束 仿真研究

唐奥<sup>1,2,3</sup>, 兰斌<sup>1,2</sup>, 沈锋<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院自适应光学重点实验室, 成都 610209)

(2 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

(3 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**使用连续镜面变形镜生成涡旋光束, 根据涡旋光束相位的螺旋对称结构, 变形镜驱动器设计成环形排布, 通过生成环形螺旋波前来解决连续镜面变形镜不能拟合奇点的问题。在光路中加入  $4f$  滤波系统来滤去高频噪声和次级衍射旁瓣。推导了空间滤波的小孔半径的表达式, 这可以保证在滤波过程中尽可能保留主瓣信息, 并且完全消除旁瓣。仿真得到了拓扑荷数等于  $-5 \sim 5$  的无旁瓣的涡旋光束, 得到的振幅分布具有破坏性的环形结构, 相位分布是比较理想的螺旋结构, 而且滤波之后的模式纯度接近理想值。该方法使用的连续镜面变形镜面形变化灵活, 可以承受高功率, 对于模式可调的高功率涡旋光束的生成有很好的应用前景。

**关键词:** 自适应光学; 涡旋光束; 环形螺旋相位; 连续镜面变形镜; 空间滤波

中图分类号: O436

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20225101.0151120

## 0 引言

涡旋光束的相位为一扭曲的波阵面, 其光子沿轴向方向螺旋前进。1992年, ALLEN L等<sup>[1]</sup>分析了拉盖尔-高斯光束, 证明了凡是复振幅表达式中含有相位项  $\exp(i l \theta)$  的光束, 它的每个光子都具有  $l \hbar$  大小的轨道角动量 (Orbital Angular Momentum, OAM),  $l$  被称为拓扑荷数 (topological charge,  $l$ )。由于涡旋光束具有这些独特的性质, 在经典和量子通信<sup>[2-3]</sup>, 粒子操纵<sup>[4]</sup>, 超分辨成像<sup>[5]</sup>, 光学加工<sup>[6]</sup>以及旋转探测<sup>[7]</sup>等领域具有广泛的应用。

在上述应用中, 涡旋光束的生成研究具有十分重要的意义。目前已经报道了许多方法, 例如, 使用螺旋相位板<sup>[8]</sup>, 超表面<sup>[9-11]</sup>, 空间光调制器<sup>[12-13]</sup>和数字微镜<sup>[14]</sup>等腔外光学元件将高斯光束转换为涡旋光束。螺旋相位板和超表面等方法生成不同模式的涡旋光束需要更换不同的光学元件, 而使用空间光调制器和数字微镜虽然能灵活生成不同模式的涡旋光束, 但是衍射效率很低, 而且上述方法大部分采用的是相位型光学元件, 不能承受高功率激光。此外, 费马螺旋衍射光栅<sup>[15]</sup>, 光纤<sup>[16-17]</sup>, 光子晶体<sup>[18]</sup>等方法也被用来生成涡旋光束。费马螺旋衍射光栅由一系列螺旋缝组成, 能量转化效率比较低, 采用光纤法在功率放大过程中的高功率值功率往往会造成光纤放大器的光学损伤, 另外光子晶体虽然在集成器件上有很大优势, 但也不能承受高功率, 因此, 这些方法对于生成高功率涡旋光束不是很理想。通过柱透镜可以将厄米-高斯光束转换为拉盖尔-高斯光束<sup>[19]</sup>, 而且在腔内可以激发不同模式、高纯度的厄米-高斯模式, 然后在腔外可以通过柱透镜将其转换为拉盖尔-高斯模式<sup>[20]</sup>, 这种方法可以实现涡旋光束模式切换, 也具有较高的转换效率, 但是未见此类方法生成高功率涡旋光束的报道。2020年, LONGMAN A等<sup>[21]</sup>使用螺旋反射镜生成了高功率涡旋光束, 但是

基金项目: 国家自然科学基金(No.61901449), 装备预研重点实验室基金项目(No. 6142A04190212)

第一作者: 唐奥(1996—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为涡旋光束生成及检测。Email: tangao18@mails.ucas.ac.cn

导师(通讯作者): 沈锋(1969—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为自适应光学。Email: shenfeng@ioe.ac.cn

收稿日期: 2021-08-16; 录用日期: 2021-09-25

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

不能灵活的调控涡旋光束的模式。因此,可调式高功率涡旋光束生成技术仍是目前待解决的问题。

自适应光学中,变形镜常被用于补偿大气湍流产生的像差<sup>[22]</sup>,也可以补偿高功率激光中的像差<sup>[23]</sup>,而且还可以放置在腔内用于调制输出不同模式的激光<sup>[20]</sup>。早在1983年,连续镜面变形镜被指出不能拟合螺旋波前中的奇点和突变<sup>[24]</sup>,因此,目前没有连续镜面变形镜生成涡旋光束的报道,文献报道的都是用分块式变形镜来生成涡旋光束<sup>[25-29]</sup>。这些方法虽然可以灵活的切换涡旋光束的模式,但是分块式变形镜是由一系列小镜子组成,高功率激光会透过镜子之间的缝隙进入器件内部,造成器件损坏,所以分块式变形镜不能承受高功率。

涡旋光束中心虽然存在相位奇点,但是奇点并不是生成涡旋光束的充要条件,例如,使用相干合成的方法<sup>[30]</sup>,只需满足环上 $2\pi l$ 的相位变化,即可生成对应模式的涡旋光束。本文提出使用连续镜面变形镜来生成涡旋光束,设计了环形排布的驱动器阵列来生成环形螺旋波前,避免了连续镜面不能拟合奇点。通过选择变形镜驱动器合适的参数,来减小不能拟合突变面形带来的影响。对于连续镜面不能拟合突变面形和拟合面形不平滑带来的高频噪声,采用了滤波处理。文中仿真生成了 $l=-5\sim 5$ 的涡旋光束,得到了较好的结果,证明了使用连续镜面变形镜也能生成涡旋光束。该方法在模式可调的高功率涡旋光束的生成上具有很好的应用前景。

## 1 连续镜面变形镜设计

连续镜面变形镜设计要遵循以下两个准则,1)解决连续镜面变形镜不能拟合奇点,2)由于连续镜面变形镜不能拟合突变面形,会对生成的螺旋波前造成影响,尽量将这个影响降到最小。

涡旋光束具有螺旋波前,其一般表达式为

$$E(r, \theta) = A(r, \theta) \exp(i l \theta) \quad (1)$$

式中, $r, \theta$ 分别是极坐标的径向坐标和角向坐标, $A(r, \theta)$ 为涡旋光束的振幅, $\exp(i l \theta)$ 表示螺旋相位因子。使用螺旋相位板给高斯光束或平面波加载上螺旋相位是常用的涡旋光束生成方法,但是完整的螺旋相位板产生的涡旋光束会有旁瓣的生成,国承山等<sup>[31]</sup>指出,环形的螺旋相位具有抑制旁瓣的效果,并推导了最佳环宽度的表达式为

$$\Delta d = R_1 - R_2 = \left( 1 - \frac{2x_{\max 1}^l}{x_{\max 2}^l + x_{\min 1}^l} \right) \cdot R_1 \quad (2)$$

式中, $\Delta d$ 是环形螺旋相位的径向宽度, $R_1$ 是环的外半径, $R_2$ 是环的内半径, $x_{\max 1}^l, x_{\max 2}^l, x_{\min 1}^l$ 分别表示第 $l$ 阶贝塞尔函数的第一、第二极大值和第一极小值。根据式(2),对于不同拓扑荷数的螺旋相位,选择合适的环宽度,才能使抑制旁瓣达到最佳效果。

本文提出使用连续镜面变形镜生成环形螺旋波前来解决不能拟合奇点的问题,同时,根据上面的描述,该方法也具有抑制旁瓣的效果。为了变形镜的后续参数设计,计算了最佳环的内外半径之比

$$R_{\text{ratio}} = \frac{R_1 - \Delta d}{R_1} = \frac{2x_{\max 1}^l}{x_{\max 2}^l + x_{\min 1}^l} \quad (3)$$

从式(3)可以看出,最佳环的内外半径之比只与拓扑荷数有关。图1展示了不同拓扑荷数的最佳环形螺旋相位的内外半径之比,随着拓扑荷数增加,最佳环的内外半径之比也在增加,即最佳环宽度越来越窄。图1中, $l=1$ 的最佳环的内外半径比为0.265 3, $l=5$ 的最佳环的内外半径之比为0.523 9。

连续镜面变形镜由基座、驱动器和镜面组成,其中,驱动器由压电陶瓷构成,通过控制电压来改变压电陶瓷的行程,进而改变镜面面形,其响应函数为高斯型,一般表达式为<sup>[32]</sup>

$$I(x, y) = \exp \left[ \ln(\omega) \times \left( \frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}}{d} \right)^\alpha \right] \quad (4)$$

式中, $\omega$ 为交联值, $d$ 为响应函数的底半宽, $\alpha$ 是高斯指数, $x_i, y_i$ 分别表示第 $i$ 个驱动器的直角坐标。

涡旋光束的螺旋相位是螺旋对称的,而传统的连续镜面变形镜,驱动器是方形阵列排布或六边形阵列排布<sup>[22]</sup>,不能拟合出螺旋对称结构,因此将驱动器设计成环形排布。AKSENOV V P等<sup>[33]</sup>指出使用相干合

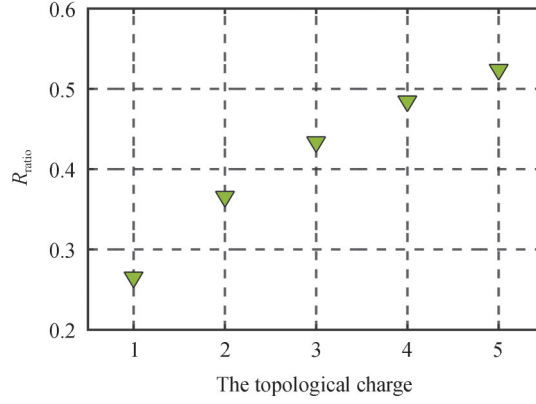


图1 不同拓扑荷数的最佳环形螺旋相位的内外半径之比

Fig.1 The ratio of the inner and outer radius of the optimal annular spiral phase with different topological charges

成系统生成涡旋光束时,在同一环上需保证每个 $0\sim 2\pi$ 的周期至少要有三个单元来拟合,才能在远场得到较好的涡旋光束。本文将此规定用于变形镜上,对于生成 $|l|=5$ 的螺旋相位,环形排布的驱动器阵列每个环上的驱动器数量要大于等于15。考虑到制造成本,设置最内环15个驱动器,往外的环上驱动器数量呈等差数列递增,这里规定同一个环上的驱动器的角向间距都相同,并且驱动器的径向间距等于第一个环上驱动器的角向间距。至于驱动器响应函数的参数,通常高斯指数 $\alpha=2.0$ <sup>[32]</sup>,交联值 $\omega$ 可以取到 $0.08\sim 0.14$ ,由于连续镜面变形镜在螺旋波前突变位置处拟合的是一个倾斜的面形,倾斜面形的斜率越大越接近突变面形,因此交联值取最小值 $\omega=0.08$ ,其底半宽 $d$ 等于第一个环上驱动器的角向距离。

在响应函数参数确定的情况下,由于每个环上的驱动器呈等差数列排布,选择不同的公差会影响生成的环形螺旋波前。环上驱动器太密,会使变形镜在螺旋波前突变位置处拟合的倾斜面形斜率过小,环上驱动器过于稀疏,会造成变形镜拟合残差过大。为此,选择生成的环形螺旋波前的模式纯度作为目标值,来选择合适的驱动器数量。众所周知,在圆域上涡旋光束各OAM模式之间是正交的,可以构成一组完整的正交集,因此,任意光场的波前都可以看作是一组OAM模式的叠加<sup>[34]</sup>。但是在环域上,是否还会保持正交性?例如,环域上的泽尼克多项式就失去了正交性<sup>[35]</sup>。在环域上取两个拓扑荷数为 $l_1, l_2$ 的OAM模式为例,分析它们是否正交,积分式表示为

$$\langle \phi_{l_1}, \phi_{l_2} \rangle = \int_{R_2}^{R_1} r dr \int_0^{2\pi} \exp(il_1\theta) \exp(il_2\theta) d\theta \quad (5)$$

式中,被积函数只与角向坐标有关,在环域上可以积分得到

$$\langle \phi_{l_1}, \phi_{l_2} \rangle = \begin{cases} 0 & l_1 \neq l_2 \\ 1 & l_1 = l_2 \end{cases} \quad R_1 > r > R_2 \quad (6)$$

从式(6)可以得出结论,OAM模式在环域上也是正交的。因此,使用连续镜面变形镜生成的环形螺旋波前可以表示为一组OAM模式的组合

$$u(r, \theta) = \sum_l c_l(r) \exp(il\theta) \quad R_1 > r > R_2 \quad (7)$$

这里, $c_l$ 是复系数,可以通过式(8)得到

$$c_l = \int_{R_2}^{R_1} \int_0^{2\pi} u(r, \theta) \exp(-il\theta) r dr d\theta \quad (8)$$

各模式占比表示为

$$P_l = \frac{|c_l|^2}{\sum_l |c_l|^2} \quad (9)$$

$P_l$ 也被称作OAM谱,其中本征模式所占的比例,是生成该模式涡旋光束的模式纯度。

拓扑荷数只表示螺旋相位的旋转方向,因此,下面讨论只分析变形镜生成 $l$ 为正的螺旋波前的模式纯度。考虑制造成本,驱动器阵列第一个环上设置15个驱动器,一共五个环,图2展示了公差为4,5,6,7时,使

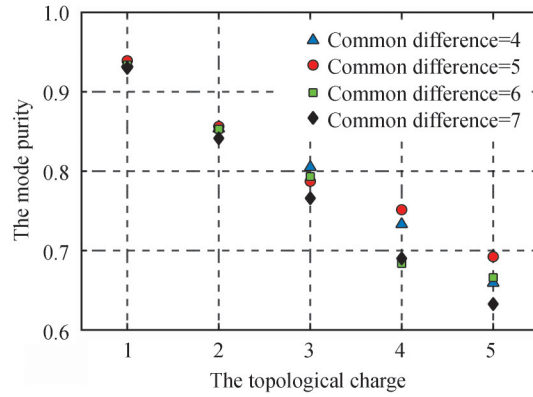


图2 驱动器不同排布的变形镜生成不同模式涡旋光束的模式纯度对比,第一个环上15个驱动器,公差分别为4,5,6,7,一共五个环

Fig. 2 Comparison of the mode purity of the generated vortex beam with different mode by using DM with different arrangement of drivers, there are 15 drivers on the first ring, common difference=4, 5, 6, 7, and five rings

用连续镜面变形镜生成不同螺旋波前的模式纯度。图2中的黑色菱形表示公差为7的排布方式,其模式纯度最低。蓝色三角形和红色圆圈表示公差为4,5的排布方式,其模式纯度比较高,而公差为5的排布方式仅在 $l=3$ 时,模式纯度低于公差为4时的排布方式。因此,最终选取公差等于5的排布方式来设计驱动器阵列。图3(a)为最终设计的驱动器排布方式,从内到外每个环上的驱动器数量依次为15,20,25,30,35,一共125个驱动器。图中参数进行了归一化,所设计的环形驱动器阵列内外半径之比为0.3738。图3(b)展示了驱动器环形排布的连续镜面变形镜的结构示意图,根据图1中的数据,使用该变形镜,对生成 $l=2\sim 4$ 的涡旋光束有比较好的抑制旁瓣效果。

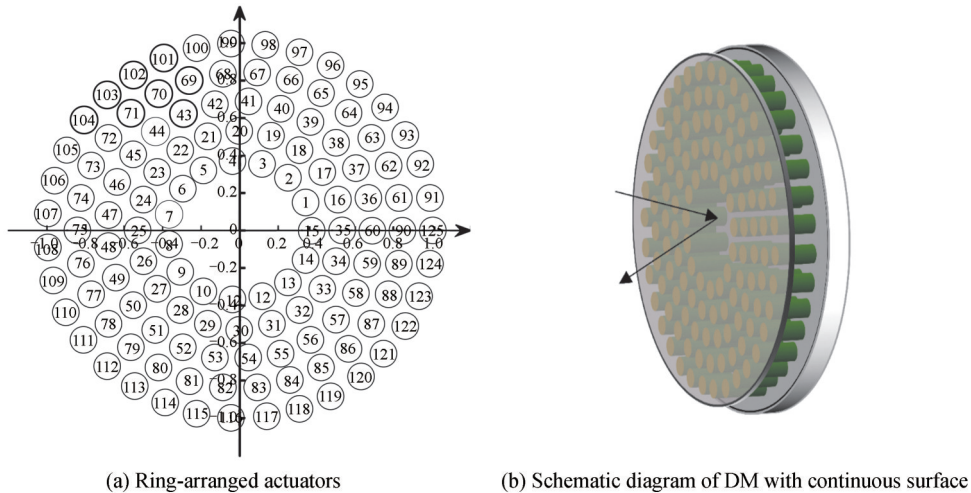


图3 连续表面变形镜的示意图及其环形排布的驱动器

Fig. 3 Schematic diagram of the DM with continuous surface and ring-arranged actuators

## 2 仿真分析

### 2.1 环形螺旋波前生成

由于连续镜面变形镜不能拟合奇点,因此,本文采用上述设计的变形镜来拟合环形螺旋波前用于生成涡旋光束。根据螺旋相位的变化特点,第 $j$ 环上第 $h$ 个驱动器的电压为

$$V_{jh} = \text{mod} \left( \frac{hl}{N_j} V_{2\pi}, V_{2\pi} \right) \quad (10)$$

式中, $N_j$ 是第 $j$ 个环上的驱动器数量, $V_{2\pi}$ 是驱动器形变一个波长所需的电压, $\text{mod}(a, b)$ 是取余函数。生成的环形螺旋波前可表示为

$$\psi(x, y) = \sum_{j=1}^{N_{\text{circle}}} \sum_{h=1}^{N_j} \text{mod} \left( \frac{hl}{N_j} V_{2\pi}, V_{2\pi} \right) \cdot \exp \left[ \ln(0.08) \frac{(x - x_{j,h})^2 + (y - y_{j,h})^2}{d^2} \right] \quad (11)$$

根据式(11),仿真生成了不同拓扑荷数的环形螺旋波前,如图4所示,图4(a)~(e)表示 $l=1\sim 5$ ,图4(f)~(j)表示 $l=-1\sim -5$ 。从图中可以看出,由于环上的驱动器数量能够被1,5整除,所以 $|l|=1,5$ 的螺旋波前能够很好的生成。而环上的驱动器数量不能被2,3,4整除,拟合 $|l|=2\sim 4$ 的螺旋波前失去了周期性结构,只存在广义上的周期,这种结构的相位也能生成涡旋光束,如文献[27]中的分离式变形镜生成的螺旋波前,相邻周期的边界为锯齿形。对于螺旋波前的切换,可以通过式(10)改变驱动器的电压轻松实现。

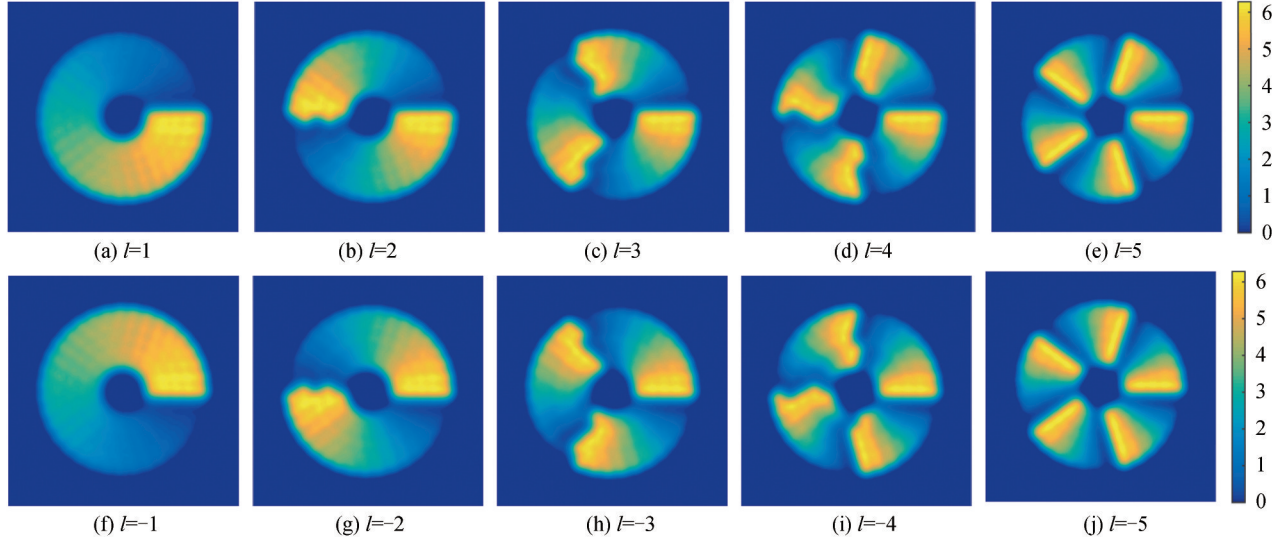


图4 使用连续镜面变形镜生成的环形螺旋波前

Fig. 4 Circular spiral wavefront generated by the DM with continuous surface

## 2.2 使用连续镜面变形镜生成涡旋光束

具有上述结构的连续镜面变形镜产生环形螺旋面波前时,变形镜中心区域为平面波前,使用高斯光束来生成涡旋光束会引入额外的零频分量。目前高功率激光器大多采用的是非稳腔结构,出射的是环形光束<sup>[23]</sup>,将所设计的变形镜与这种激光器相结合,可以在腔外生成高功率涡旋激光。对于其他实心光场,可以整形为环形光场<sup>[36]</sup>,再使用变形镜生成涡旋光束。因此,下面的仿真中采用的环形光束作为入射光束,考虑到激光器的出射光束的光环宽度是恒定的,因此,仿真中光束的尺寸不随着 $l$ 的改变。

如图5所示,激光器出射的环形光束经过连续镜面变形镜反射之后即可加载上螺旋相位,可表示为

$$E_{\text{DM}}(x, y) = E_0 \exp[i\psi(x, y)] \quad (12)$$

式中, $E_0$ 表示具有环形振幅的光束。在远场可以得到涡旋光束,通常使用透镜来观察远场光场,在焦面上可以获得生成的涡旋光束,焦面上的光场可利用傅里叶变换得到

$$E_{\text{far}}(x_{\text{far}}, y_{\text{far}}) = \frac{e^{if_1}}{i\lambda f_1} e^{i\frac{\pi}{\lambda f_1}(x_{\text{far}}^2 + y_{\text{far}}^2)} \mathcal{F} \left\{ E_{\text{DM}}(x, y) \right\} = \frac{e^{if_1}}{i\lambda f_1} e^{i\frac{\pi}{\lambda f_1}(x_{\text{far}}^2 + y_{\text{far}}^2)} \cdot \mathcal{F} \left\{ E_0 \exp \left[ i \sum_{j=1}^{N_{\text{circle}}} \sum_{h=1}^{N_j} \text{mod} \left( \frac{hl}{N_j} V_{2\pi}, V_{2\pi} \right) \exp \left[ \ln(0.08) \frac{(x - x_{j,h})^2 + (y - y_{j,h})^2}{d^2} \right] \right] \right\} \quad (13)$$

式中, $f_1$ 是透镜 $L_1$ 的焦距, $(x_{\text{far}}, y_{\text{far}})$ 表示焦面上的直角坐标,焦面上的光强表示为

$$I = |E_{\text{far}}|^2 \quad (14)$$

根据式(13),生成的涡旋光束的拓扑荷数可通过变形镜来调控。

仿真中,波长 $\lambda=632.8$  nm, $f_1=400$  mm,变形镜镜面半径等于30 mm,驱动器阵列外半径设为25 mm,入射光束的外半径等于25 mm,内半径等于9.345 mm,与变形镜驱动器阵列的内外环半径相等,内外半径之比

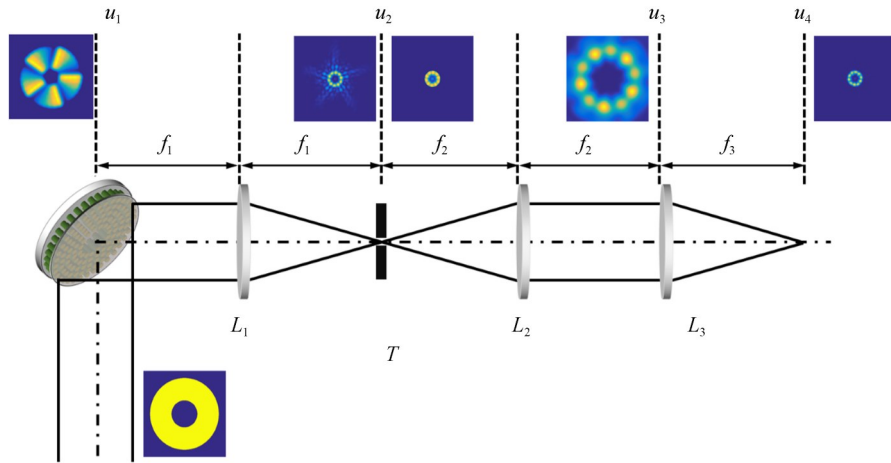


图5 使用变形镜生成涡旋光束的示意图

Fig. 5 Schematic diagram of using DM to generate vortex beams

为 0.373 8。根据式(14),在焦面  $u_2$  上,仿真得到了  $l=1\sim 5$  的涡旋光束,光强分布如图 6(a)~(e)所示。由于仿真设置的环形光束内外环半径之比与  $l=2$  的最佳环半径之比接近,所以生成  $l=2$  的涡旋光束基本上无旁瓣,如图 6(b),对于其他拓扑荷数,该内外半径之比不是最佳的,旁瓣不能被完全消除。图 6 中,  $l=1$  的涡旋光束具有明显的衍射环,  $l=3, 4, 5$  的涡旋光束,随着拓扑荷的增大,旁瓣也越多,这与上述的分析相符。对主瓣光强分布,  $l=1$  的涡旋光束为一个完整的圆环,但光强分布不均匀,环的上半部分比其他区域的光强更强,  $l=2\sim 5$  的涡旋光束为一系列光斑组成,这是因为连续镜面变形镜在螺旋波前突变位置处,拟合的是一个倾斜的面形,在该位置处,光束被加载上了一个倾斜相位,在聚焦过程中破坏了光场的环形结构。环上的光斑数量与拓扑荷数有关,  $l=1$  的涡旋光束在圆环上可以看作有 1 个光斑,  $l=2$  的涡旋光束环上可以看作有 2 个光斑,  $l=3$  的涡旋光束环上有 3 个光斑,  $l=4$  的涡旋光束环上有 8 个光斑,  $l=5$  的涡旋光束环上有 10 个光斑。图 7(a)~(e)给出了生成  $l=1\sim 5$  的涡旋光束的相位分布,如图 7(e)中的蓝色区域所示,生成的  $l=5$  的涡旋光束,其相位中心也具有 5 个奇点,说明生成的光束是具有对应拓扑荷数的涡旋光束。仿真结果证明了即使变形镜生成的环形螺旋相位面中心没有奇点,也能获得涡旋光束。

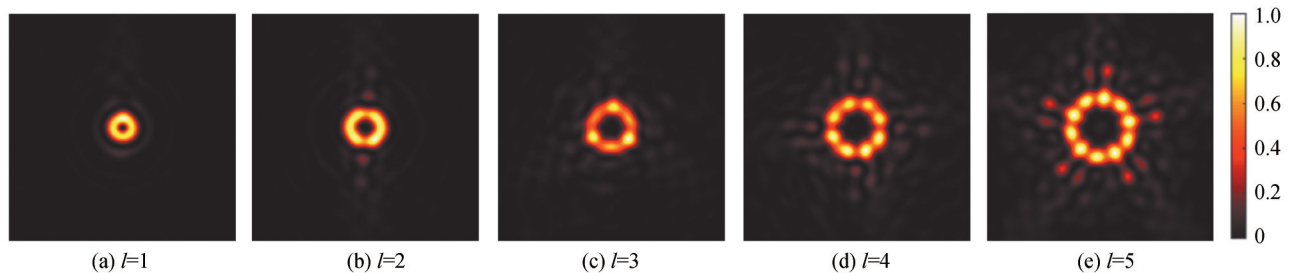


图6 使用连续镜面变形镜生成涡旋光束的光强

Fig. 6 The intensity of the vortex beams generated by the DM with continuous mirror

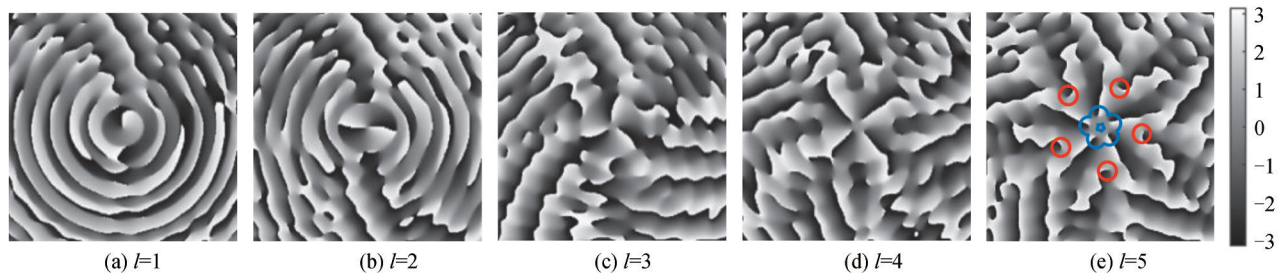


图7 使用连续镜面变形镜生成涡旋光束的相位

Fig. 7 The phase of the vortex beams generated by the DM with continuous mirror

虽然焦面  $u_2$  上的涡旋光束具有对应的拓扑荷信息,但是在其相位面上还分布着其他奇点,如图 7(e) 中的红色圆圈区域,说明生成的涡旋光束,不仅存在着本征拓扑荷模式,也存在着其他模式,这会降低本征模式的模式纯度。根据式(7)~(9),得到了生成的  $l=1\sim 5$  涡旋光束的相位模式纯度,如图 8 所示。图中显示,随着拓扑荷数的增大,模式纯度也在降低,各模式纯度的大小与图 2 中的优化得到的结果基本相同。连续表面变形镜不能拟合突变面形,生成的螺旋波前不是理想的,而在焦面上得到的涡旋光束的相位具有对应的拓扑信息,并存在着额外的奇点,说明连续镜面在突变面形处拟合的倾斜面形,对生成涡旋光束的影响体现在这些额外的奇点上。

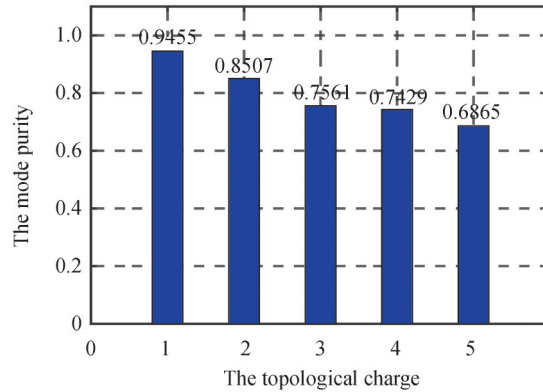


图 8 在  $u_2$  平面上得到的  $l=1\sim 5$  的涡旋光束的模式纯度

Fig. 8 The mode purity of obtained vortex beam with  $l=1\sim 5$  on  $u_2$  plane

### 2.3 对生成的涡旋光束进行滤波处理

图 9 给出了连续镜面变形镜拟合不同拓扑荷数的环形螺旋波前的残差,尽管我们选择了合适的参数,在突变位置处还是存在较大的残差,在其他位置处,残差相对比较小。而且随着拓扑荷数的增大,需要拟合的突变面形也在增多,因此,残差的均方根(Root Mean Square, RMS)也在增大。图 6(b)中,仿真中设置的环形光束内外环半径与  $l=2$  的最佳环内外环半径接近,可以看出基本无衍射环,但是在主瓣的上方和下方出

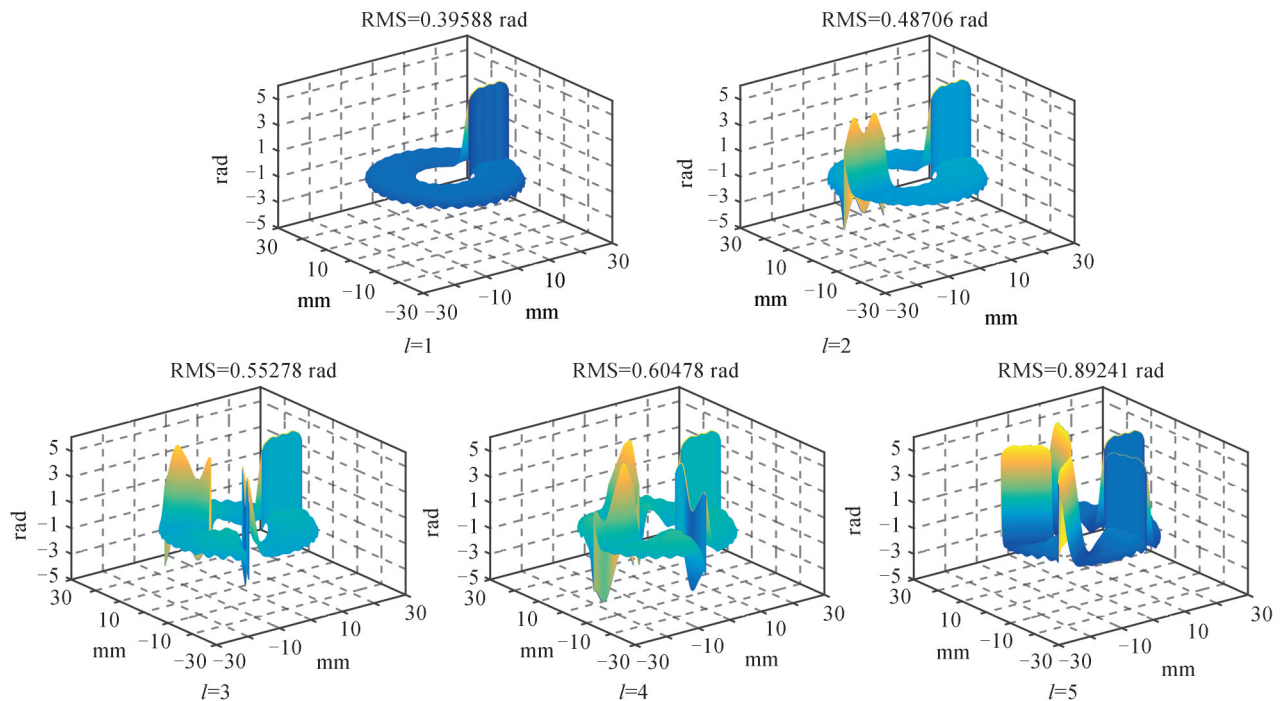


图 9 连续镜面变形镜拟合环形螺旋波前的残差

Fig. 9 The residual distribution of annular spiral wavefront generated via DM with continuous surface

现了一系列光斑分布,这些光斑是由于连续镜面变形镜不能拟合突变面形和拟合面形不平滑造成的。因此,生成涡旋光束的旁瓣由两部分组成,一是由不是最佳环宽度的环形螺旋相位带来的次级衍射旁瓣,二是由于变形镜不能拟合理想螺旋波前带来的高频噪声,而且图7中额外的奇点也存在于旁瓣中,因此可以通过空间滤波来消除这些影响,得到光束质量较好的涡旋光束。图5展示了光束被连续镜面变形镜反射后经过 $4f$ 滤波系统的示意图。 $u_1$ 平面为连续镜面变形镜所在平面,环形光束经过变形镜反射后传播 $f_1$ 的距离到达透镜 $L_1$ ,在透镜 $L_1$ 的焦平面 $u_2$ 上得到频谱信息,通过小孔光阑 $T$ 来滤去高频噪声和次级衍射旁瓣。然后,传输 $f_2$ 的距离到达透镜 $L_2$ ,经过透镜 $L_2$ 后再传输 $f_2$ 的距离,到达 $u_3$ 平面, $u_3$ 平面与连续镜面的变形镜平面 $u_1$ 是共轭的,再经透镜 $L_3$ 聚焦可以得到滤波后的涡旋光束。

仿真中,透镜的焦距 $f_1=f_2=f_3=400$  mm,孔径光阑 $T$ 的半径随拓扑荷数变化,关于孔径光阑的半径,我们可以通过求解焦面上涡旋光束的主瓣宽度来得到。由于环形螺旋相位只抑制旁瓣,对主瓣没有影响,为方便计算,选择圆域螺旋相位聚焦得到的涡旋光束来求解主瓣宽度。平面波入射螺旋相位板后,经过透镜聚焦,在焦面上的光场可表示为<sup>[37]</sup>

$$E_f(\rho, \varphi) = \frac{k}{f_1} \exp\left(i \frac{k}{2f_1} \rho^2\right) \exp(i l \varphi) \int_0^{R_1} J_l\left(\frac{k r \rho}{f_1}\right) r dr \quad (15)$$

式中, $(\rho, \phi)$ 是焦面上的极坐标,引入变量 $a = k r \rho / f_1$ ,旋转对称的振幅分布可表示为

$$A_f(\rho) = \frac{f_1}{k \rho^2} \int_0^{k \rho R_1 / f_1} J_l(a) da \quad (16)$$

式(16)是贝塞尔函数的积分,我们将其与第 $l$ 阶贝塞尔函数 $J_l(a)$  ( $r=R_1$ )进行了比较,如图10所示,黑色实线表示焦面上得到的涡旋光束的剖面轮廓,蓝色虚线表示第 $l$ 阶贝塞尔函数。从图中观察发现,振幅剖面轮廓的第一极小值会出现在贝塞尔函数的第二个零点位置处,且具有普适性,如图10(a)和(b)所示,当 $l=5$ 和 $l=100$ 时,都符合这个发现。因此,孔径光阑 $T$ 的半径可以用第 $l$ 阶贝塞尔函数的第二个零点 $x_2^l$ 来表示,表达式为

$$R_T = \frac{x_2^l f_1}{k R_1} \quad (17)$$

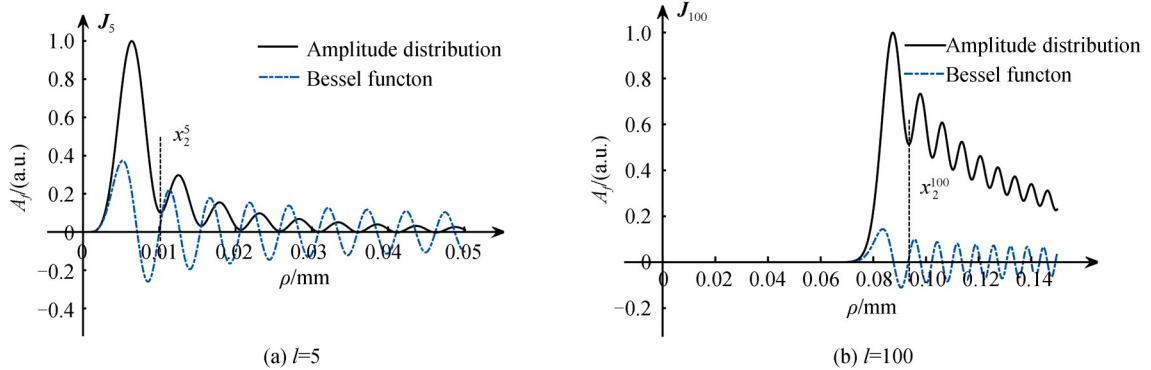


图10 使用圆域螺旋相位生成涡旋光束的振幅轮廓(黑色实线)和第 $l$ 阶贝塞尔函数(蓝色虚线),垂直的虚线表示贝塞尔函数的第二个零点的位置

Fig. 10 Amplitude profile (black solid curve) of the vortex beams created by focusing a circle spiral phase and the  $l_{th}$  Bessel function (blue dashed curve), The vertical dotted lines indicate the position of the second roots of the Bessel function

根据式(17),我们计算了不同拓扑荷数涡旋光束滤波需要的孔径宽度,来进行空间滤波。图11(a)~(j)给出了滤波之后 $l=-5\sim-5$ 的涡旋光束的振幅,从图中可以看出,经滤波处理后,得到了无旁瓣的涡旋光束,但是光场仍是破坏性的环形结构,环上的光斑个数与拓扑荷数相关。图12(a)~(j)展示了滤波之后 $l=-5\sim 5$ 的涡旋光束的相位,与图7中未滤波的相位相比,滤波之后的相位接近于理想的螺旋相位,没有额外的相位奇点,如图12(d)所示,螺旋相位都在红色圆圈区域内,而且具有与拓扑荷数对应的奇点,如图12(d)黑色圆圈所示, $l=4$ 时,相位具有4个奇点。

图13展示了滤波之后的各涡旋光束的模式纯度,与图8相比,滤波之后,模式纯度有很大提升,其中 $l=$



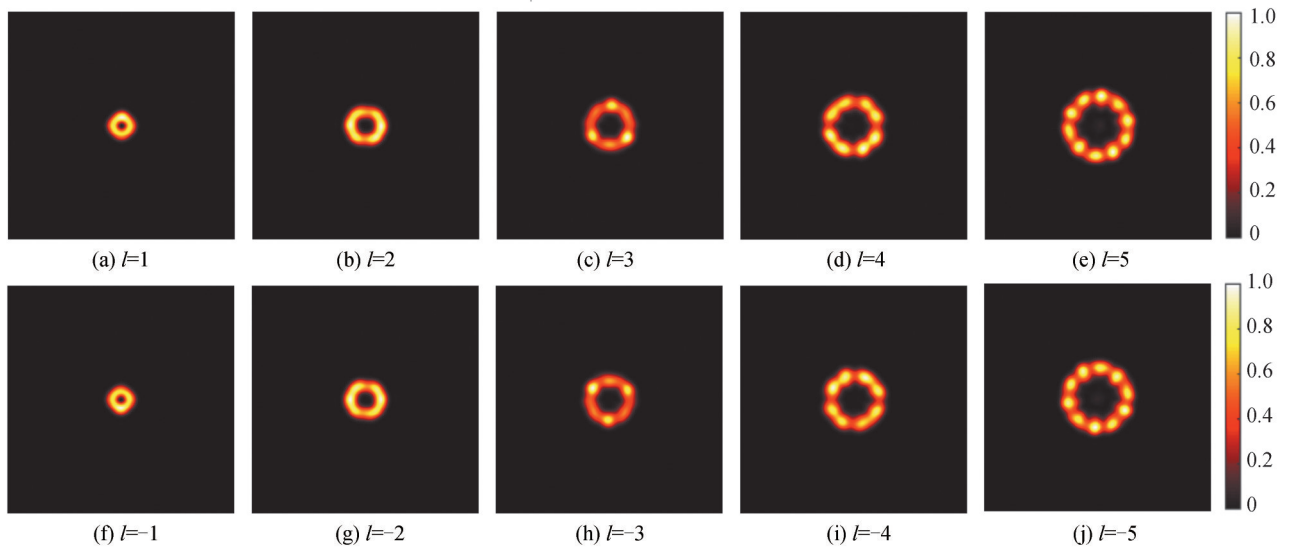


图 11 滤波之后的涡旋光束振幅  
Fig. 11 The amplitude of the vortex beams after filtering

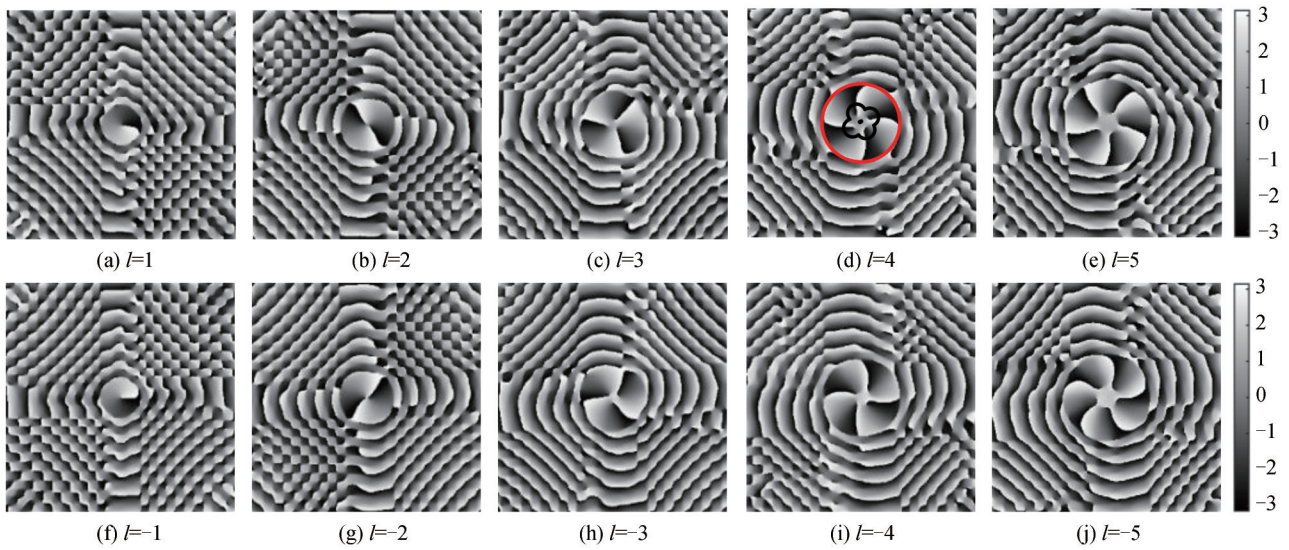


图 12 滤波之后的涡旋光束相位  
Fig. 12 The phase of the vortex beams after filtering

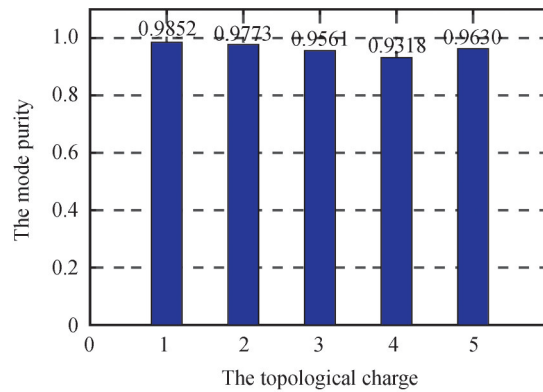


图 13 滤波之后  $l=1\sim 5$  涡旋光束的模式纯度  
Fig. 13 The mode purity of vortex beams with  $l=1\sim 5$  after filtering

5的涡旋光束尤为明显,模式纯度从0.6865提升到0.9630,提升了28%,对于 $l=1$ 的涡旋光束,模式纯度也提升了0.04,更接近于1。上述结果说明经过滤波之后得到涡旋光束,从振幅和相位上都有很大提升,因此,使用连续镜面变形镜结合滤波系统,可以得到光束质量较好的涡旋光束。

### 3 讨论

文中对于连续镜面变形镜不能拟合奇点和突变面形,分别提出了解决方案。对于不能拟合奇点,我们设计了驱动器环形排布的变形镜来拟合环形的螺旋波前,这个方法既能解决奇点拟合问题,也能抑制旁瓣。但是通常激光器出射的环形光束的内外环半径之比不能改变,因此,该方法不能对生成任意拓扑荷数的涡旋光束起到最佳的旁瓣抑制效果。对于不能拟合突变面形,我们选择了合适的响应函数参数并选择了合适的驱动器数量,但是这个措施不能彻底解决这个问题,变形镜拟合螺旋波前在突变位置仍存在较大的残差,如图9所示。图14给出了滤波之后的能量损失占比,图中显示 $l=5$ 的涡旋光束能量损失最大,达到了0.45,但该数值低于19路相干合成中的旁瓣能量占比<sup>[38]</sup>。虽然滤波之后得到了光束质量较好的涡旋光束,但随着拓扑荷数的增加,能量损失也越大,而且随着拓扑荷数增大,变形镜拟合残差也越大,因此该方法对于高阶涡旋光束的生成可能不是很理想,接下来,我们将对使用连续镜面变形镜生成高阶涡旋光束的工作展开研究。文中仿真的光环内外半径之比与 $l=2$ 的最佳环的内外环半径之比接近,而非稳腔激光器出射的环形光束的内外环半径之比不一定是该仿真的数值,因此,在实验中,对于 $l=5$ 的能量损失或许会低于文中仿真的数值。

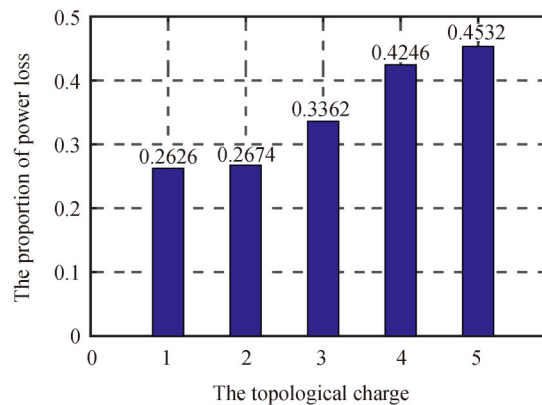


图14 经过孔径滤波后的能量损失比

Fig. 14 The proportion of power loss after spatial filtering

图12显示滤波之后的相位接近理想的螺旋相位,相对于滤波前有很大的改善,但是,图11中振幅仍是具有破坏性的环形结构,这与理想的涡旋光束振幅有一定差距。从结构光的角度来看,使用连续镜面变形镜生成的涡旋光束可以看作是具有轨道角动量的结构涡旋光场,这种光场具有对应拓扑荷数的轨道角动量,并且破坏性的光环结构或许具有奇特的光学特性,可能会在光镊中有着很好的应用前景,如文献[39]提到的中心对称涡旋光束。从相位的角度,虽然振幅不理想,但是得到的相位接近于理想的螺旋相位,而且模式纯度也接近于1,因此,使用连续镜面变形镜生成的涡旋光束在光通信和光学测量等领域也能很好的应用。

### 4 结论

本文设计了驱动器环形排布的连续镜面变形镜,来生成模式可调的涡旋光束。通过生成环形螺旋波前来解决不能拟合奇点的问题,并选择合适的变形镜驱动器参数来减小变形镜不能拟合突变面形带来的影响。文中还得到了焦面上涡旋光束主瓣半径的一般表达式,并采用空间滤波,得到了 $l=-5\sim 5$ 无旁瓣的涡旋光束,证明了连续镜面变形镜也能生成涡旋光束。得到的涡旋光束的相位接近于理想的螺旋相位,模式纯度也接近于1,但振幅是具有破坏性的环形结构,这可以视为是一种结构涡旋光场,在光镊上或许具有很

好的应用。该方法可以用在非稳腔结构的高功率激光器上,在腔外生成可调式的高功率涡旋光束,而且变形镜面形变化灵活,也可以应用于其他光场的调控。

#### 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] WANG Jian, YANG Jengyuan, FAZAL I M, et al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nature Photonics*, 1992, 6(7): 488-496.
- [3] SUN Yongnan, LIU Zhaodi, BOWLES J, et al. Experimental certification of quantum dimensions and irreducible high-dimensional quantum systems with independent devices[J]. *Optica*, 2020, 7(9): 1073-1078.
- [4] PADGETT M J, BOWMAN R. Tweezers with a twist[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(6): 343-348.
- [5] QIU Xiaodong, LI Fangshu, ZHANG Wuhong, et al. Spiral phase contrast imaging in nonlinear optics: seeing phase objects using invisible illumination[J]. *Optica*, 2018, 5(2): 208-212.
- [6] NI Jincheng, WANG Chaowei, ZHANG Chenchu, et al. Three-dimensional chiral microstructures fabricated by structured optical vortices in isotropic material[J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6(7): e17011.
- [7] NEO R, SAVAL L S, BLAND H J, et al. OAM interferometry: the detection of the rotational Doppler shift[J]. *Optics Express*, 2017, 25(18): 21159-21170.
- [8] BEIJERSBERGEN M W, COERWINKEL R P C, KRISTENSEN M, et al. Helical-wavefront laser beams produced with a spiral phase plate[J]. *Optics Communications*, 1994, 112(5): 321-327.
- [9] ZHANG Yuchao, GAO Jie, YANG Xiaodong. Topological charge inversion of optical vortex with geometric metasurfaces [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(8): 1801486.
- [10] TANG Xiaoyan, KE Youhuang, JING Xufeng, et al. Free manipulation of terahertz wave based on the transmission type geometric phase coding metasurface[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(1): 0116002.  
唐小燕,柯友煌,井绪峰,等.基于透射型几何相位编码超表面的太赫兹波束自由操控[J].*光子学报*, 2021, 50(1): 0116002.
- [11] LIU B, HE Y, WONG S W, et al. Multifunctional vortex beam generation by a dynamic reflective metasurface [J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(4): 2001689.
- [12] MA Haotong, HU Haojun, XIE Wenke. Study on the generation of a vortex laser beam by using phase-only liquid crystal spatial light modulator[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52: 091721.
- [13] MA Wenqi, LU Huimin, WANG Jianping, et al. Vortex beam generation based on spatial light modulator and deep learning[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(11): 1107001.  
马文琪,路慧敏,王建萍,等.基于空间光调制器和深度学习的涡旋光束产生[J].*光学学报*, 2021, 41(11): 1107001.
- [14] XIN Ziqiang, ZHANG Chonglei, YUAN Xiaocong. Concentric perfect optical vortex beam generated by a digital micromirrors device[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(2): 1-7.
- [15] ZHOU Hongping, LI Jingling, GUO Kai, et al. Generation of acoustic vortex beams with designed Fermat's spiral diffraction grating[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2019, 146(6): 4237-4243.
- [16] REN Kaili, REN Liyong, LIANG Jian, et al. Excitation of high-quality orbital angular momentum vortex beams in an adiabatically helical-twisted single-mode fiber[J]. *Optics Express*, 2021, 29(6): 8441-8450.
- [17] CHEN Ruishan, WANG Jinghao, ZHANG Xiaoqiang, et al. Fiber-based mode converter for generating optical vortex beams[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2018, 1(7): 180003.
- [18] WANG Bo, LIU Wenzhe, ZHAO Maoxiong, et al. Generating optical vortex beams by momentum-space polarization vortices centred at bound states in the continuum[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(10): 623-628.
- [19] BEIJERSBERGEN M W, ALLEN L, Van der Veen H, et al. Astigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular momentum[J]. *Optics Communications*, 1993, 96(1-3): 123-132.
- [20] WANG Deen, LEI Ming, LIN Shibing, et al. Generation of a mode-tunable optical vortex based on a mirror curvature dynamically controlled Z-shaped resonant cavity[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(13): 3079-3082.
- [21] LONGMAN A, SALGADO C, ZERAOUALI G, et al. Off-axis spiral phase mirrors for generating high-intensity optical vortices[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(8): 2187-2190.
- [22] JIANG Wenhan. Overview of adaptive optics development[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(3): 170489.  
姜文汉.自适应光学发展综述[J].*光电工程*, 2018, 45(3): 170489.
- [23] JIANG Wenhan, YANG Zeping, GUAN Chunlin, et al. New progress on adaptive optics in inertial confinement fusion facility[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(7): 1625.  
姜文汉,杨泽平,官春林,等.自适应光学技术在惯性约束聚变领域应用的新进展[J].*中国激光*, 2009, 36(7): 1625.
- [24] BARANOVA N B, MAMAIEV A V, PILIPETSKY N F, et al. Wave-front dislocations: topological limitations for adaptive systems with phase conjugation[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1983, 73(5): 525-528.

- [25] GHAI D P, SENTHILKUMARAN P, SIROHI R S. Adaptive helical mirror for generation of optical phase singularity [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(10): 1378–1383.
- [26] TYSON R K, SCIPIONI M, VIEGAS J. Generation of an optical vortex with a segmented deformable mirror [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(33): 6300–6306.
- [27] SCIPIONI M, TYSON R K, VIEGAS J. Mode purity comparison of optical vortices generated by a segmented deformable mirror and a static multilevel phase plate [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(28): 5098–5102.
- [28] BOVINO F A, BRACCINI M, BERTOLOTTO M. Design of a programmable spiral phase mirror [J]. arXiv preprint arXiv:1111.3483, 2011.
- [29] YU Xiaoming, TODI A, TANG Hongmei. Bessel beam generation using a segmented deformable mirror [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(16): 4677–4682.
- [30] ZHENG Yi, WANG Xiaohua, SHEN Feng, et al. Generation of dark hollow beam via coherent combination based on adaptive optics [J]. *Optics Express*, 2010, 18(26): 26946–26958.
- [31] GUO Chengsgan, LIU Xuan, REN Xiuyun, et al. Optimal annular computer-generated holograms for the generation of optical vortices [J]. *JOSA A*, 2005, 22(2): 385–390.
- [32] HUANG Linhai, RAO Changhui, JIANG Wenhan. Modified Gaussian influence function of deformable mirror actuators [J]. *Optics Express*, 2008, 16(1): 108–114.
- [33] AKSENOV V P, DUDOROV V V, KOLOSOV V V. Properties of vortex beams formed by an array of fibre lasers and their propagation in a turbulent atmosphere [J]. *Quantum Electronics*, 2016, 46(8): 726.
- [34] MILIONE G, WANG T, HAN J, et al. Remotely sensing an object's rotational orientation using the orbital angular momentum of light [J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(3): 030012.
- [35] KONG Lingxi, CHENG Tao, YANG Ping, et al. Decoupling control algorithm based on numerical orthogonal polynomials for a woofer-tweeter adaptive optics system [J]. *Optics Express*, 2021, 29(14): 22331–22344.
- [36] BOYKO O, PLANCHON T A, MERCERE P, et al. Adaptive shaping of a focused intense laser beam into a doughnut mode [J]. *Optics Communications*, 2005, 246(1–3): 131–140.
- [37] LIN J, YUAN X C, TAO S H, et al. Variable-radius focused optical vortex with suppressed sidelobes [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(11): 1600–1602.
- [38] ZUO Jing, LI Feng, GENG Chao, et al. Experimental Demonstration of Central-Lobe Energy Enhancement Based on Amplitude Modulation of Beamlets in 19 Elements Fiber Laser Phased Array [J]. *IEEE photonics journal*, 2021, 13(3): 1–13.
- [39] ZHANG Hao, LI Xingzhong, MA Haixiang, et al. Centrosymmetric optical vortex [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(7): 1429.

## Simulation of Generating Vortex Beam with Controllable Mode Based on Deformable Mirror with Continuous Surface

TANG Ao<sup>1,2,3</sup>, LAN Bin<sup>1,2</sup>, SHEN Feng<sup>1,2</sup>

(1 Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Science, Chengdu 610209, China)

(2 Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Science, Chengdu 610209, China)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** High-power vortex lasers have good application prospects in optical processing and other fields. At present, most methods of generating vortex beams outside the cavity use phase-type devices, such as spiral phase plates and spatial light modulators, and these methods can not withstand high-power laser. The spiral mirrors can be used to generate high-power, but they can not flexibly modulate the vortex beam modes. Thus, the technology of generating mode-tunable high-power vortex beams is still a problem to be solve. In this paper, A method based on the Deformable Mirror (DM) with continuous surface to generate vortex beams is proposed. According to the helical symmetry phase of the vortex beam, the arrangement style of the actuators is designed as a ring, and by generating annular spiral wavefront to solve the DM can not fit singularity. Meanwhile, the annular spiral wavefront has the effect of suppressing side lobes. By comparing the mode purity of the annular spiral wavefront generating via the DM with different numbers drivers, the arrangement of driver arrays is determined, five rings and the number of drives in each ring

from the inside to the outside is 15, 20, 25, 30, 35. Since the DM with continuous surface can not produce the ideal spiral wavefront, and the constant size beam used in simulation can not achieve the best effect of sidelobe suppression for the vortex beam with any mode. Therefore, there are high-frequency noise and high-order diffraction sidelobes in the vortex optical field generated by the DM designed. Hence, we add  $4f$  filtering system to the optical path to remove them, and the expression of the radius of the main lobe of the vortex beam on the focal plane is derived as the radius of the filter hole. Finally, the sidelobe-free vortex beams with the topological charge equal to  $-5 \sim 5$  are generated by simulation, whose amplitude distribution is a destructive ring, and the phase is quite close to the ideal spiral phase, furthermore, the mode purity is closed to 1 after filtering. The above results prove that the DM with continuous surface combined with the filter system can be used to generate a vortex beam with high mode purity. Moreover, the DM with continuous surface can flexibly generate different wavefront, and can withstand high-power laser, thus, this method has a good application prospect for generating high-power vortex beams with adjustable mode.

**Key words:** Adaptive optics; Vortex Beam; Annular spiral phase; Deformable mirror with continuous surface; Spatial filtering

**OCIS Codes:** 220.1080; 080.4865; 060.5060