

障碍物遮挡下漂移涡旋光束拓扑荷数的测量

李岩松, 陈君*, 傅钢坤, 戚国震, 石岩, 赵春柳, 金尚忠**

中国计量大学光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018

摘要 复杂环境中漂移扰动和不透明障碍物破坏光振幅和光相位, 给拓扑荷数(TC)精准测量带来挑战。分析了两种均匀离轴的多中心涡旋光束和一种随机离轴的漂移涡旋光束经扇形不透明障碍物(SSOO)后的传输情况, 提出一种利用单柱透镜测量漂移涡旋光束 TC 的方法。对比光强法、傅里叶变换法以及相位法在极端条件下对漂移涡旋光束 TC 测量的结果, 发现在以上 3 种方法失效时, 所提方法仍可对输入光束的 TC 值大小及符号作出准确判断。这种抗光束漂移和抗遮挡的 TC 测量法对基于涡旋光的光通信和光加密具有重要应用价值。

关键词 物理光学; 涡旋光束; 轨道角动量; 光束漂移; 障碍物; 拓扑荷探测

中图分类号 TN247 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS0226002

1 引言

涡旋光束是具有螺旋波前的光束^[1]。涡旋光束中, 螺旋波前位错周围的相位变化为 $2m\pi$, 其中 m 为拓扑荷数(TC)。涡旋光束的光子以 $m\hbar$ 的轨道角动量(OAM)进行扭曲运动, 其中, \hbar 为约化普朗克常数。扭曲光子的 OAM 特性使得涡旋光束具有角自由度^[2], 被广泛应用于光学加密^[3]、光通信^[4-5]、超分辨率成像^[6]、粒子操纵^[7]和旋转物体检测^[8]等领域。然而, 当涡旋光束在湍流等动态随机介质中传播时, 光束瞬时中心在截面上随机移动, 形成光束漂移。光束漂移使光振幅和相位发生畸变, 致使完全相干涡旋光束退化为漂移涡旋光束^[9-10]。准确测量漂移涡旋光束的 TC, 是拓展复杂环境下涡旋光束应用领域的前提。

掌握涡旋光束的 TC 信息对于 OAM 光子的应用具有非常重要的作用^[11-12]。现有研究主要针对完全相干涡旋光束。Prabhakar 等^[13]报道了一种将傅里叶光强的暗环数用于涡旋光束的 TC 判断方法。Li 等^[14]提出根据重建相位分布的奇点特征来确定被遮挡涡旋光束的 TC。Kotlyar 等^[15]利用平均 OAM 值来研究完全相干情况下线性组合的光学涡旋 TC 竞争。对于低相干涡旋光束的 TC 测量问题, Liu 等^[16]报道了一种利用空间相干度的振幅分布特征来获取扇形不透明障碍物(SSOO)阻挡后低相干涡旋光束 TC 值的方法, 该方法在遮挡角度小于 180° 时适用。此外, Lu 等^[17]报道了利用空间相干度的相位奇点特征来获得涡旋光束 TC 大小及方向的方法。上述方法对待测光束的相干性空间

分布规律有一定要求, 并不适用于漂移涡旋光束的 TC 判断^[9]。在漂移扰动下涡旋光束振幅和相位所携带的 TC 特征遭到破坏, 相位分布和 OAM 谱对 TC 的判断都存在失真^[9], 这给复杂环境下涡旋光束的 TC 精准测量带来挑战。目前, 漂移涡旋被大角度 SSOO 阻挡后的 TC 测量方法鲜有报道。

本文提出一种适用于漂移扰动和障碍物遮挡的涡旋光束 TC 测量方法, 利用单柱透镜测量平均 OAM 值来获得涡旋光束的 TC 值。这种方法对待测光束的空间相干性没有特殊要求, 对相干和部分相干光束均适用。通过分析均匀离轴相干叠加的涡旋光(UCS)、均匀离轴非相干叠加的涡旋光(UIS)和随机离轴非相干叠加的涡旋光(RIS)这 3 种多中心涡旋光经 SSOO 遮挡后的传输情况, 发现利用平均 OAM 值的测量法在遮挡角度超过 180° 乃至增大至 270° 时, 仍可以获得被探测涡旋光的输入 TC 大小及方向。基于光强、傅里叶光强分布以及相位分布的 TC 测量方法在角向障碍物遮挡达到或超过 180° 时就无法获得漂移涡旋的正确信息。本文采用由单柱透镜构建的实验系统测量平均 OAM 值, 获得了符合理论预测的结果, 证明所提方法对复杂环境中涡旋光束 TC 的探测具有重要的参考价值。

2 理论原理

2.1 漂移涡旋光束的理论模型

漂移涡旋光束是一种随机离轴的多中心涡旋光束^[9], 由多个离轴涡旋子光束的非相干叠加产生。本文以离轴的拉盖尔-高斯涡旋光束为基本模式, 介绍漂

收稿日期: 2022-06-29; 修回日期: 2022-07-18; 录用日期: 2022-08-01; 网络首发日期: 2022-08-10

基金项目: 浙江省之江实验室重大科研项目(2019DE0KF01)、浙江省重点研发计划项目(2021C01068)

通信作者: *chenjun.sun@cjlu.edu.cn; **jinsz@cjlu.edu.cn

移涡旋光束的理论模型。离轴拉盖尔-高斯光束的复振幅为

$$E_0(x, y) = \exp\left[-\frac{(x-x_0-a)^2 + (y-y_0)^2}{w^2}\right] \left[(x-x_0) - i \cdot \text{sign}(m) \cdot (y-y_0)\right]^{|m|}, \quad (1)$$

式中: (x, y) 为笛卡尔坐标系下涡旋光束横截面上的任意空间点; $\text{sign}(m)$ 根据 m 的正负分别返回 +1 和 -1; (x_0, y_0) 为涡旋光中心的离轴坐标; a 为涡旋相位中心与振幅中心的偏移距离, 即涡旋错位; w 为高斯光斑的束腰半径。离轴多中心涡旋复合光束的光场表达式为

$$U_0(x, y) = \sum_{(x_0, y_0)} E_0(x, y) \exp(i\delta_p), \quad (2)$$

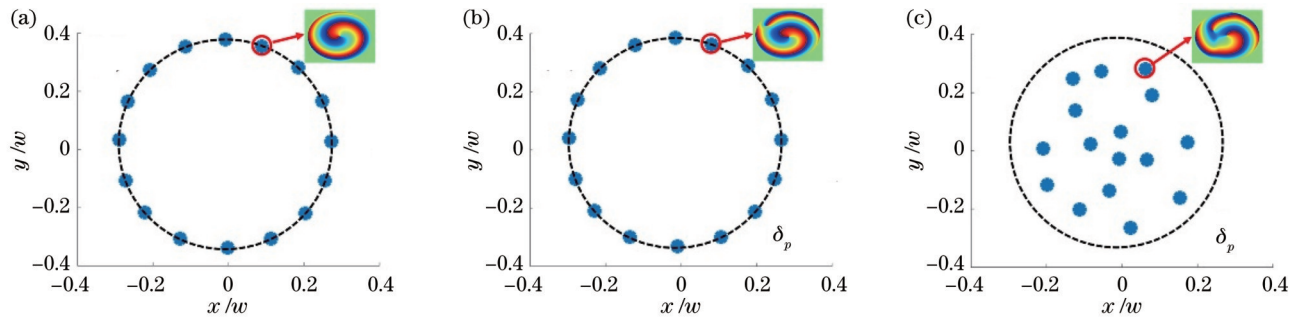


图1 离轴多中心涡旋光的三种叠加方式(插图为该处子光束的相位分布图)。(a) UCS 涡旋光; (b) UIS 涡旋光; (c) RIS 涡旋光
Fig. 1 Three superposition modes of off-axis multicenter vortex beams (the insets show the phase distribution of superimposed vortex beamlets there). (a) UCS vortex beam; (b) UIS vortex beam; (c) RIS vortex beam

2.2 平均 OAM 的计算方法

使用等效矩阵方法(EMA)^[18-20]来获得 3 种离轴多中心涡旋光束传输后的瞬时光场, 即

$$U = H_y^T H_x^T U_0 H_x H_y, \quad (3)$$

式中: U_0 为矩阵形式的初始光场[式(2)]; U 为矩阵形式的传输后光场; 上标 T 表示矩阵复共轭转置; H_x 和 H_y 为传输系统在 x 方向和 y 方向的脉冲响应矩阵。 H_x 的表达式为

$$[H_x]_{jm} \equiv H_x(x_j, u_m) = \frac{\omega_j}{\sqrt{i\lambda|B_1|}} \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda B_1}\right] (A_1 x_j^2 - 2x_j u_m + D_1 u_m^2), \quad (4)$$

式中: λ 为波长; A_1, B_1 和 D_1 均为光学系统在 x 方向的传输矩阵元素; x_j 为输入平面的横坐标; u_m 为输出平面的横坐标; ω_j 为权重系数。 H_y 的定义与 H_x 相似, 但矩阵元素 A_1, B_1 和 D_1 替换为 y 方向的元素 A_2, B_2 和 D_2 。 $[H_y]_{kn} \equiv H_y(y_k, v_n)$ 表示 y 方向的脉冲响应函数在空间点 (y_k, v_n) 的函数值, 其中 $y_k = k\Delta, v_n = n\Delta, \Delta$ 为空间采样间距。输入场 U_0 的离散形式为 $U_0 \equiv U_0(x_j, y_k)$, 其中, $x_j = j\Delta$ 。同理, 输出场 U 的离散形式为 $U \equiv U(u_m, v_n)$, 其中, $u_m = m\Delta, v_n = n\Delta$ 。输入面和输出面的采样数分别为 N_1 和 N_2 , 即: $j, k=1, 2, \dots, N_1; m, n=1, 2, \dots, N_2$ 。式(4)中, ω_j 表示为

式中: δ_p 为 $0 \sim 2\pi$ 的随机相位。离轴坐标 (x_0, y_0) 随机分布在半径为 c 的圆形区域内。若式(2)中不含 δ_p 随机相位项, 且离轴点 (x_0, y_0) 均匀分布在半径为 c 的圆周上, 如图 1(a) 所示, 则称复合光场 $U_0(x, y)$ 为 UCS 涡旋光; 若式(2)含有 δ_p 项, 且离轴点 (x_0, y_0) 均匀分布在半径为 c 的圆周上, 如图 1(b) 所示, 则称 $U_0(x, y)$ 为 UIS 涡旋光; 若式(2)含有 δ_p 项, 离轴点 (x_0, y_0) 随机分布在半径为 c 的圆形区域内, 如图 1(c) 所示, 此时称 $U_0(x, y)$ 为 RIS 涡旋光。RIS 涡旋光是一种漂移涡旋光束, UCS 涡旋光和 UIS 涡旋光是普通的离轴涡旋光束。本文将研究以上 3 种由不同叠加方式产生的离轴涡旋光束在经历传输和障碍物遮挡后的 TC 探测问题。

$$\omega_j = \Delta \exp\left(i\frac{\pi B_1}{\lambda}\right) \frac{\sin\left[\pi(u_m - A_1 x_j)\Delta/(\lambda B_1)\right]}{\pi(u_m - A_1 x_j)\Delta/(\lambda B_1)}. \quad (5)$$

利用式(3)~(5)可获得离轴多中心涡旋光束传输后的瞬时输出光场。将障碍物的透过率函数 $O(x, y)$ 加载在输入光场上, 即 $\tilde{U}_0(x_j, y_k) = U_0(x_j, y_k) \times O(x_j, y_k)$, 然后用 \tilde{U}_0 替换 U_0 并代入式(3), 可以获得任意障碍物遮挡下的各种离轴涡旋光束的传输情况。

使用文献[21-22]报道的方法和上述 EMA 数值模拟公式来计算障碍物遮挡下的各种离轴涡旋光束的平均 OAM 值。利用 ABCD 传输矩阵, 分别利用沿 x 方向和 y 方向放置的具有相同焦距的柱透镜(CL)对待探测光束进行聚焦仿真。假设柱透镜焦面为探测面, 对两次聚焦后的光强进行记录, 分别为 $|U(x', y)|^2$ 和 $|U(x, y')|^2$ 。这里 x' 表示在沿 x 方向 CL 作用下, 光场在探测面上的坐标。同理, y' 表示沿 y 方向的聚焦点坐标。利用光强信息得到光强协方差的计算公式为

$$V_{x, y'} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |U(x', y)|^2 x' y dx' dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |U(x', y)|^2 dx' dy}, \quad (6)$$

式中: $V_{x, y'}$ 为 x 方向放置 CL 时的协方差。同理, 在 y 方

向放置 CL 时的协方差 $V_{x',y}$ 可以用类似方法获得。光束的平均 OAM 值 l_{OAM} 可通过协方差直接算出,即

$$l_{\text{OAM}} = 2\pi(V_{x',y} - V_{x,y'}) / (f\lambda), \quad (7)$$

式中: f 为柱透镜焦距。

在以上计算过程中,柱透镜的传输矩阵^[23]为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{z}{f_1} & z + z_0 - \frac{z_0}{f_1} z \\ -\frac{1}{f_1} & 1 - \frac{z_0}{f_1} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{z}{f_2} & z + z_0 - \frac{z}{f_2} z_0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 - \frac{z_0}{f_2} \end{bmatrix} \end{cases}, \quad (8)$$

式中: $\begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix}$ 为柱透镜在 x 方向的传输矩阵; $\begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix}$ 为柱透镜在 y 方向的传输矩阵; z_0 为光源到 CL 的距离; z 为 CL 到探测面的距离。由于探测面在 CL 焦面,则 $z = f$ 。当 CL 的柱面轴沿 x 方向放置时,式 (8) 中 $f_1 = f, f_2 = \infty$; 当 CL 的柱面轴沿 y 方向放置时,式 (8) 中 $f_2 = f, f_1 = \infty$ 。将式 (8) 表示的柱透镜传输矩阵代入式 (3)~(6), 可获得待测光束经沿 x 方向和 y 方向放置的 CL 系统作用后的协方差 $V_{x,y'}$ 和 $V_{x',y}$ 。利用式 (7) 可得到该待测光束的平均 OAM 值 l_{OAM} 。在本文仿真中, $z_0 = 150 \text{ mm}, f = 150 \text{ mm}, z = 150 \text{ mm}$ 。

2.3 仿真结果

图 2 所示为 3 种离轴涡旋光的平均光强分布及其

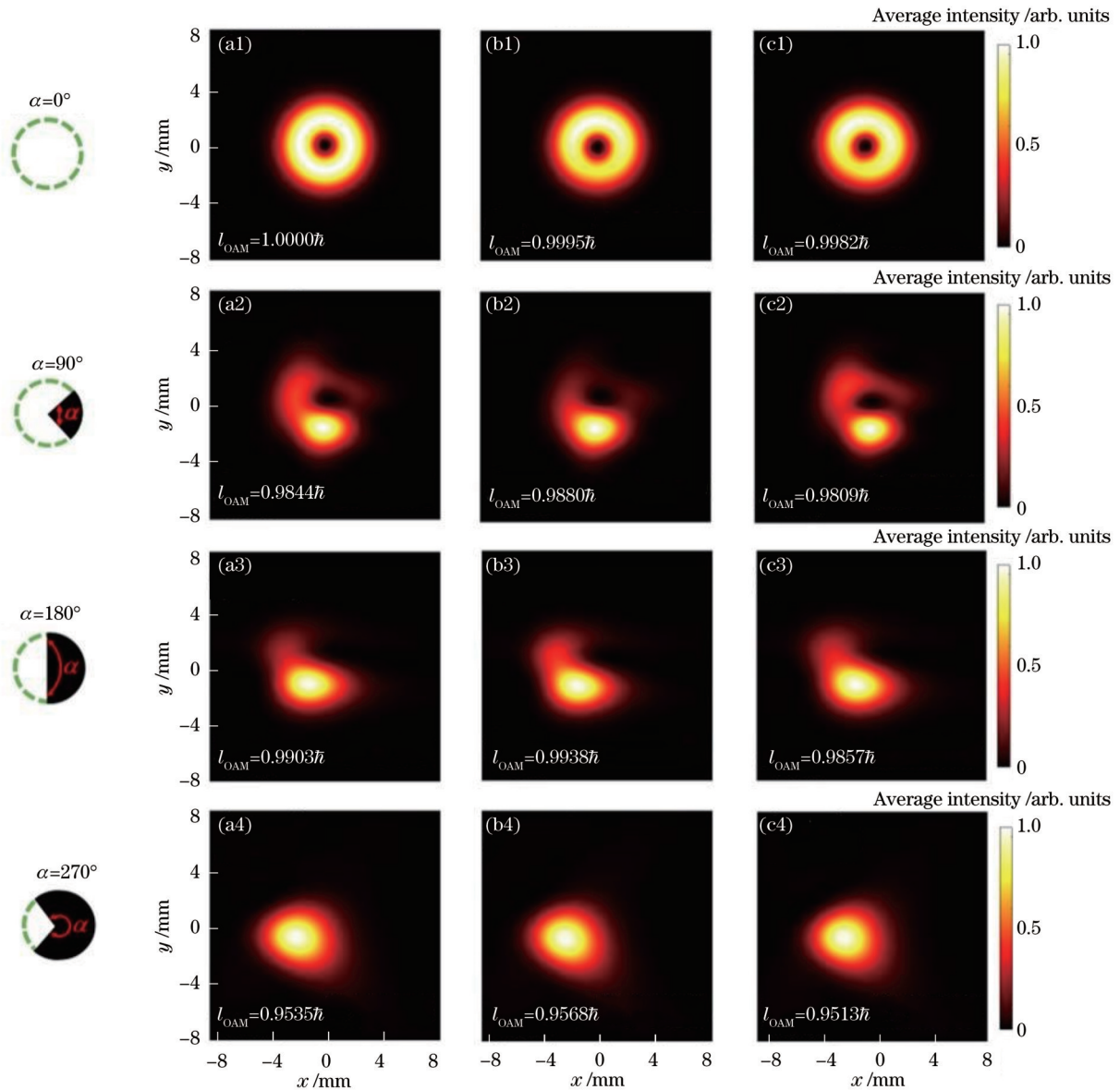


图 2 三种离轴涡旋光的平均光强分布和平均 OAM 值的理论结果。(a1)~(a4) UCS; (b1)~(b4) UIS; (c1)~(c4) RIS
Fig. 2 Theoretical results of average light intensity and average OAM of three vortex beams. (a1)~(a4) UCS; (b1)~(b4) UIS; (c1)~(c4) RIS

平均 OAM 值的理论结果。在仿真中,离轴参数设为 $c=0.2w$, 涡旋错位距离 $a=0$, $w=0.1575\text{ mm}$, $m=1$ 。图 2 所示的平均光强是对 1000 个瞬时光强求平均的结果。从图 2 可见,随着 SSOO 遮挡角度的增大,经传输后涡旋光的空心光强结构消失。此时,不能通过观察光强分布获得 3 种被遮挡涡旋光束的 TC 信息。然而,平均 OAM 值 l_{OAM} 始终处于 TC 值附近。同时,平均 OAM 值仍然会受到遮挡的影响。对比不同遮挡角度下的平均 OAM 值可知,随着遮挡程度增加,平均 OAM 值减小,但平均 OAM 值 l_{OAM} 仍然在 TC 值附近,遮挡没有影响对 TC 值的判断。上述结果表明,平均 OAM 值可用于遮挡条件下的 TC 探测。

有研究指出,傅里叶变换平均光强的暗环数可表征涡旋光 TC 值的大小^[13]。由衍射理论可知,夫琅禾费

衍射光场复振幅正比于衍射屏透射系数的傅里叶变换^[24]。傅里叶变换平均光强所体现的正是远场衍射的光强分布。图 3 展示了 3 种 TC 为 1 的离轴涡旋光的傅里叶光强分布的理论仿真结果,离轴参数 $c=0.6w$, $w=0.1575\text{ mm}$, $a=0$ 。如图 3(a1)~(c1) 所示,在无障碍物时傅里叶光强暗环的数量与光源 TC 值相等。图 3(a1)~(c1) 中箭头所指的暗环数量与 TC 一致。随着遮挡角度 α 的不断加大,3 种离轴涡旋光的傅里叶光强黑环消失;当 $\alpha=270^\circ$ 时,傅里叶光斑完全退化为高斯或椭圆高斯形态。此时基于傅里叶光强分布来识别 TC 的方法完全失效。图 3 表明:当无障碍物或障碍物遮挡较小时,傅里叶光强可以反映光束的 TC 信息;在大遮挡下该方法失效,但其平均 OAM 值处于 TC 值附近,仍然可以给出正确的 TC 信息。

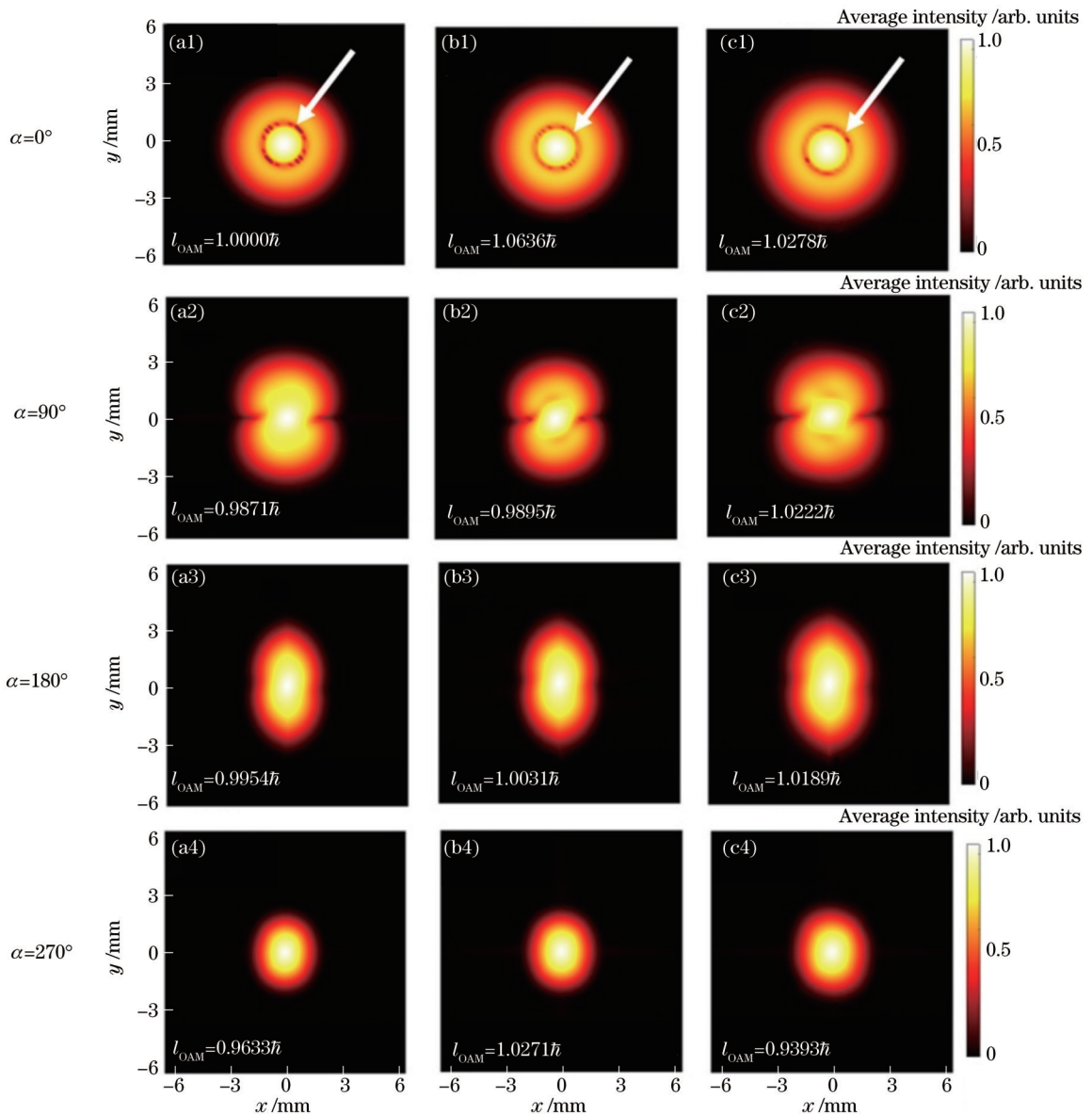


图 3 $m=1$ 时 3 种离轴涡旋光的傅里叶光强分布。(a1)~(a4) UCS; (b1)~(b4) UIS; (c1)~(c4) RIS

Fig. 3 Fourier intensity distribution of three off-axis vortex beams with $m=1$. (a1)~(a4) UCS; (b1)~(b4) UIS; (c1)~(c4) RIS

有研究表明,当高斯涡旋光束被 SSOO 遮挡达到 180° 时,相位分布可以反映光束的 TC 信息^[14]。图 4 展示了 3 种离轴涡旋光的相位分布理论结果。在仿真中,参数 $w = 0.1575 \text{ mm}$, $c = 0.6w$, $a = 0$ 。如图 4 (a1)~(c1) 所示,在没有障碍物 ($\alpha = 0^\circ$) 时,3 种涡旋光

束的相位奇点明显,沿奇点一周相位变化的周期数为 TC 值。随着 SSOO 遮挡角度增大,相位奇点出现解旋,奇点区域缩小。如图 4 (a4)~(c4) 所示,当遮挡角度 α 增加到 270° ,相位奇点完全消失。这意味着当遮挡角度较大时,相位法无法判断 TC 的数值。

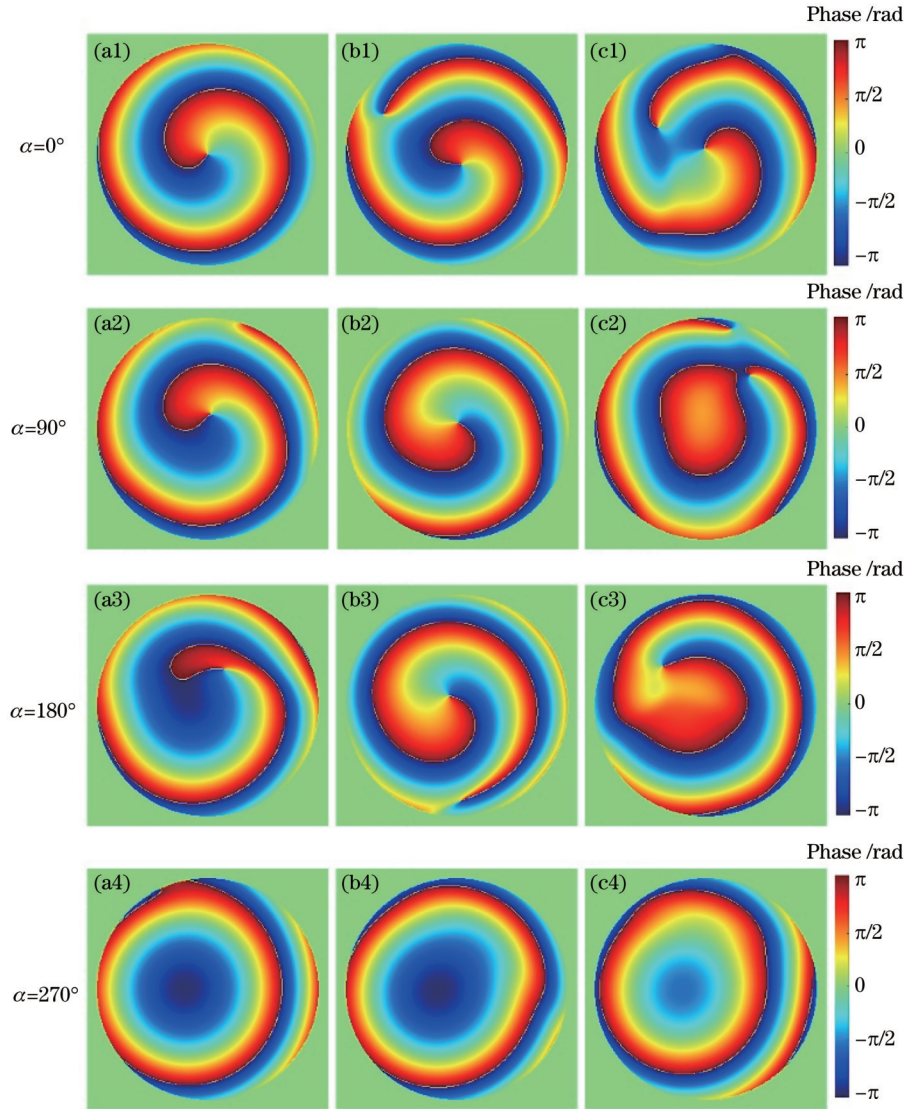


图 4 $m=1$ 时 3 种离轴涡旋光的相位分布。(a1)~(a4) UCS; (b1)~(b4) UIS; (c1)~(c4) RIS

Fig. 4 Phase distributions of three vortex beams with $m=1$. (a1)~(a4) UCS; (b1)~(b4) UIS; (c1)~(c4) RIS

以上理论仿真结果表明,光强分布并不能直观地反映 TC。在小遮挡角度下傅里叶光强可通过黑环数量体现 TC 的大小,但在漂移和大角度 SSOO 干扰下该方法失效。当 SSOO 小于 180° 时,相位法是判断 TC 的一个有效方法;当 SSOO 遮挡角度增大至 270° ,相位奇点消失,这使得通过相位奇点判断 TC 的方法受限。理想情况下角向遮挡障碍物后光子的平均 OAM 值是守恒的^[15],这是平均 OAM 方法能用于光束 TC 判断的物理原因。同时注意到,离轴扰动和孔径效应会使得探测面的平均 OAM 值出现差异。探测面的平均 OAM 值并不严格等于 TC 值。然而,即使在 270° 遮挡

下平均 OAM 值仍在初始 TC 值附近。这表明,利用光子平均 OAM 值来判断光束 TC 的方法受到漂移扰动和大角度 SSOO 遮挡的影响较小。

3 实验验证

采用多模非相干叠加方法^[25]和数字全息技术^[26]合成 UCS 和 UIS 这两种普通离轴涡旋光束以及 RIS 漂移涡旋光束。实验中,将预先设计的数字全息图像 (CGH) 放入空间光调制器 (SLM) 中连续播放,并将激光束照射该 SLM 以实现多中心光学涡旋的产生。任意一帧 CGH 产生的瞬时光场^[9] $U^{(k)}$ 为

$$U^{(k)}(x, y) = \sum_{p=1}^N \exp\left[-\frac{(x-x_p-a)^2+(y-y_p)^2}{w^2}\right] \left[(x-x_p) - i \cdot \text{sign}(m) \cdot (y-y_p) \right]^{|m|} \exp(i\delta_p), \quad (9)$$

式中:瞬时光场 $U^{(k)}$ 由 N 个离轴的涡旋光场叠加产生, $N=500$; (x_p, y_p) 与理论部分 (x_0, y_0) 对应, 其余参数与理论部分设置参数一致。在全息图中加入扇形遮挡物, 如图 5 所示, 并制备了 $\alpha=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 这 4 种遮挡下的 CGH 各 N_k ($N_k=1000$) 幅。

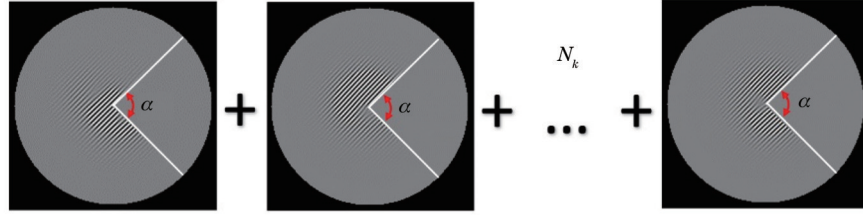


图 5 SLM 使用的一组全息图序列

Fig. 5 One set of computational graphic holograms displayed by SLM

将图 6 所示的装置用于 3 种离轴涡旋光束的产生和平均 OAM 值的测量。He-Ne 激光器 ($\lambda=632 \text{ nm}$, 功率为 2 mW ; 线偏振) 发出的光束经空间光调制器 (SLM; 相位调制, 分辨率为 $1280 \text{ pixel} \times 720 \text{ pixel}$, 像素尺寸为 $6.3 \mu\text{m}$) 反射的一级衍射光为式 (9) 所计算的一种涡旋光束。该待测光束被 CMOS (分辨率为 $600 \text{ pixel} \times 800 \text{ pixel}$, 像素尺寸为 $2.2 \mu\text{m}$, 曝光时间为

1 ms) 探测。根据文献 [21] 的方法, 使用主轴相对于 x 方向倾斜 $\pm 45^\circ$ 的 CL 来测量从 SLM 出射的光束平均 OAM 值。CMOS 放置在 CL 焦平面处, 记录焦面光强分布。通过该光强分布可计算光束经 CL 系统作用后的协方差 $V_{x,y}$ 和 $V_{x,y'}$, 然后计算出平均 OAM 值。当该装置用于测量光强分布时, 移除 CL。

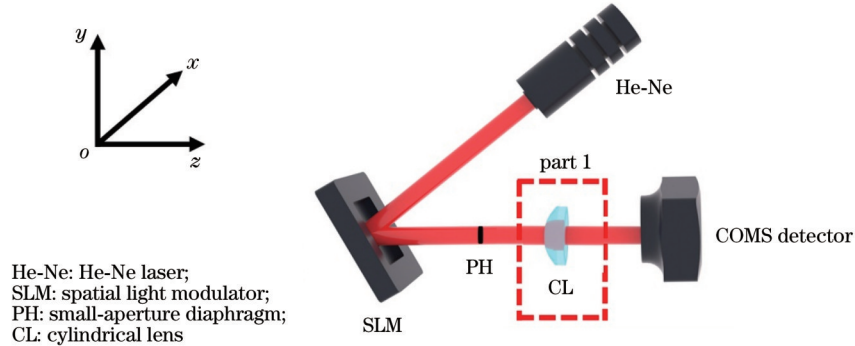


图 6 测量离轴多中心涡旋光束平均 OAM 值的实验装置示意图

Fig. 6 Schematic of experimental setup for the detection of the average OAM of three off-axis vortex beams

图 7 所示为 3 种离轴涡旋光的傅里叶光强分布和平均 OAM 值的实验结果。参数 w, c, a 与图 3 中的设置相同, 初始 TC 为 1。从图 7(a1)~(c1) 可以看出, 当叠加方式为 UCS 且无遮挡状态下, 傅里叶光强分布有一个暗环出现。暗环数量与 TC 相同。随着遮挡角度 α 的增大, 暗环消失, 傅里叶光强分布退化为高斯分布。如图 7 所示, 光子平均 OAM 值始终在 1 附近变化。实验叠加得到的平均光强分布 [图 7(a2)~(c2)] 和理论叠加得到的平均光强分布 [图 3(a2)~(c2)] 的主体规律一致, 而理论与实验结果存在的部分细节差异是由瞬时扰动光场中离轴涡旋的相位随机性引起的。考虑到实验测量的误差和仿真的数据量情况, 傅里叶光强和平均 OAM 值的实验结果与理论仿真结果一致。图 7 表明, 平均 OAM 值可以正确表征待测光束

的 TC 信息。

由于本研究的测量对象为整数 TC, 最接近平均 OAM 值的整数值即是待测涡旋光束的 TC。需要注意的是, 平均 OAM 值不仅可以判断 TC 的幅值和符号, 还对离轴扰动和涡旋错位具有一定的容错性。

4 分析与讨论

光强中心与涡旋相位中心发生错位是一种对涡旋光的破坏影响。这在基于螺旋相位板产生涡旋光的实验中是难以避免的一种现象, 对传统的 TC 测量有较大影响。本研究将对通过平均 OAM 模拟计算出的不同涡旋错位距离 a 、不同 TC 大小和符号、不同漂移扰动程度下 UIS 和 RIS 光束进行对比分析。

表 1 为在涡旋错位量 $a=0.6w$ 和 $a=1.2w$ 下平

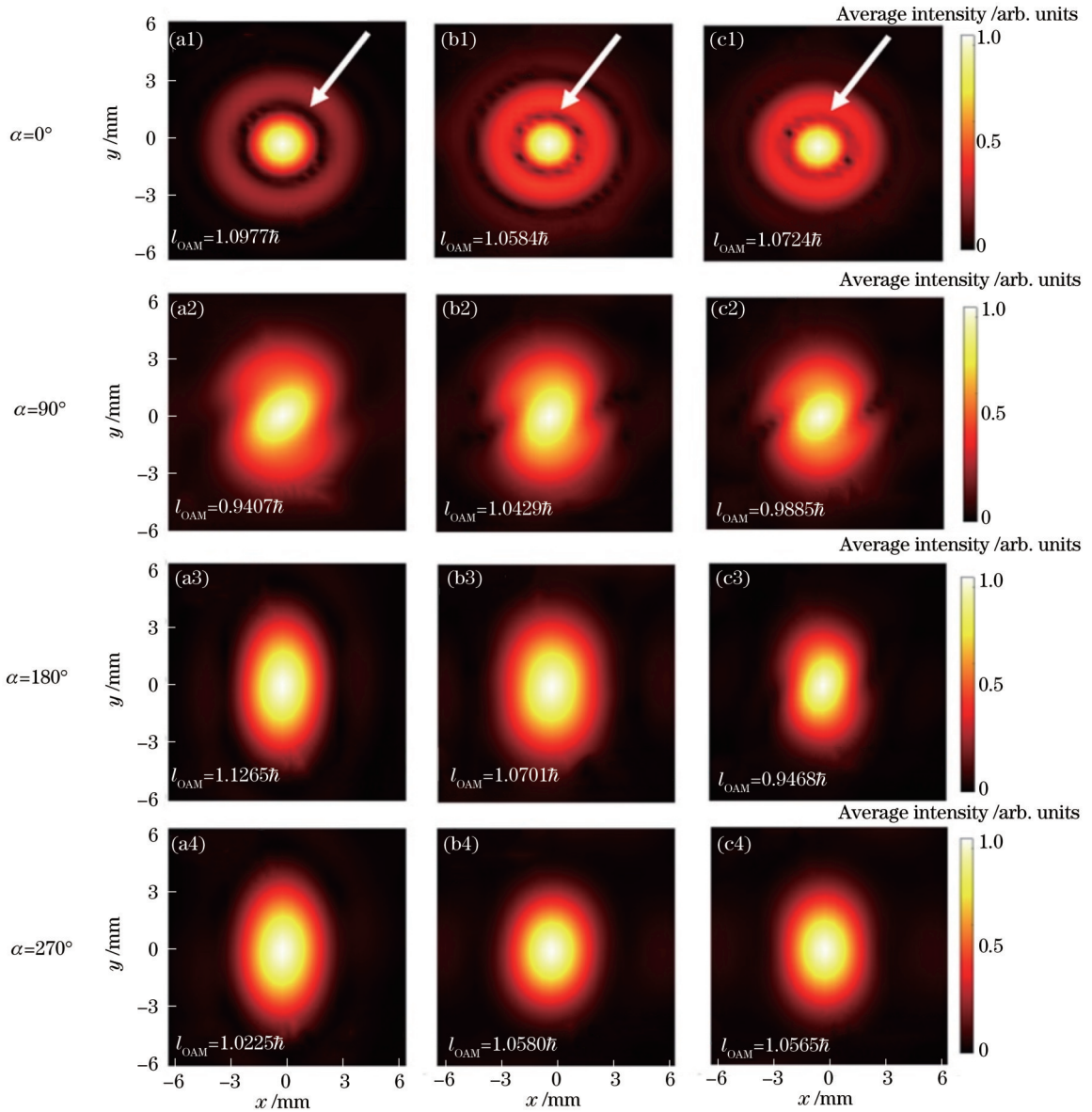


图 7 3 种离轴涡旋光束的傅里叶光强分布和平均 OAM 值的实验结果 ($m=1$)。(a1)~(a4) UCS; (b1)~(b4) UIS; (c1)~(c4) RIS
Fig. 7 Experimental results of Fourier intensity distribution and average OAM of three off-axis vortex beams ($m=1$). (a1)~(a4) UCS; (b1)~(b4) UIS; (c1)~(c4) RIS

均 OAM 的数值模拟结果,其中参数 $m=1$ 。对于 RIS 产生的漂移涡旋光,在涡旋错位量 $a=1.2w$ 和遮挡角度 $\alpha=270^\circ$ 情况下,平均 OAM 值明显小于 TC 值,但与平均 OAM 值最接近的整数值仍然等于 TC 值,在这种干扰情况下平均 OAM 值依然可以反映待测光束的 TC 值信息。模拟结果表明,平均 OAM 方法探测 TC 对于离轴扰动和涡旋错位都不敏感。需要注意的是,虽然理想情况下部分角遮挡并不影响光子平均 OAM 值在传输时的守恒,但离轴扰动和孔径效应仍然会造成探测面的平均 OAM 值损失。当 a 和 c 同时处于较大值,例如 $a=0.6w$ 、 $c=0.6w$,且障碍物遮挡达到 180° 以上时,RIS 光束的平均 OAM 降低到 0.5 以下,本文方法将出现较大误差。

表 2 展示了 $m=-1$ 、 $c=0.6w$ 下两种涡旋光束被各角度 SSOO 遮挡后的平均 OAM。从表 2 可见,平均 OAM 值既能正确体现待测光束 TC 的幅值,还能给出其符号。

当光束漂移程度加大,RIS 光束的相干度将降低。表 3 列出了 $m=2$ 、 $c=0.6w$ 和 $c=1.2w$ 下,两种离轴涡旋光束的平均 OAM 值。可以看出,相干度对平均 OAM 的影响很小。

表 1~3 的结果表明,基于平均 OAM 的 TC 探测方法对于离轴扰动和涡旋错位不敏感。在低相干环境中,所提方法的测量准确性受到的影响很小。平均 OAM 可以反映离轴多中心涡旋光束的 TC 大小和符号。

表 1 $m=1$ 时涡旋错位下两种多中心涡旋光的平均 OAM 值Table 1 Average OAM of two multicenter vortex beams under the obstruction of SSOO at $m=1$

$\alpha / (^{\circ})$	$a = 0.6w, c = 0.2w$		$a = 1.2w, c = 0.2w$		$a = 0.6w, c = 0.6w$
	$l_{OAM,UIS} / \hbar$	$l_{OAM,RIS} / \hbar$	$l_{OAM,UIS} / \hbar$	$l_{OAM,RIS} / \hbar$	$l_{OAM,RIS} / \hbar$
0	1.0226	1.0237	1.0057	0.9678	1.0399
90	0.9439	0.9455	0.8811	0.8689	0.7306
180	0.9578	0.9517	0.9608	0.8936	0.4815
270	0.8869	0.8790	0.8503	0.6867	0.1213

表 2 $m=-1, c=0.6w$ 时两种离轴涡旋光束的平均 OAMTable 2 Average OAM of two off-axis vortex beams under the obstruction of SSOO at $m=-1$ and $c=0.6w$

$\alpha / (^{\circ})$	$l_{OAM,UIS} / \hbar$	$l_{OAM,RIS} / \hbar$
0	-1.0863	-1.0273
90	-0.9760	-0.9712
180	-0.9740	-1.0646
270	-0.9449	-0.9674

表 3 $m=2$ 时不同离轴参数下两种离轴涡旋光束的平均 OAMTable 3 Average OAM of two off-axis vortex beams under different off-axis parameters with $m=2$

$\alpha / (^{\circ})$	$c = 0.6w$		$c = 1.2w$	
	$l_{OAM,UIS} / \hbar$	$l_{OAM,RIS} / \hbar$	$l_{OAM,UIS} / \hbar$	$l_{OAM,RIS} / \hbar$
0	1.9816	1.9909	2.0171	1.9789
90	1.9638	1.9810	1.9627	1.9686
180	1.9687	1.9820	2.0027	1.9523
270	1.9168	1.9224	1.9384	1.8925

5 结 论

通过理论和实验研究了被 SSOO 阻挡后漂移光束的平均 OAM、光强、傅里叶光强以及相位分布的特点。研究表明, 漂移涡旋光束被超过 180° 的 SSOO 阻挡后, 只有基于平均 OAM 的探测方法可以正确反映输入光束 TC 的绝对值和符号, 且对离轴扰动和涡旋错位的容错度较高。提出利用单柱透镜测量两种普通离轴涡旋光束和一种漂移涡旋光束 TC 的方法, 得到了理论与实验相符的结果。所提 TC 探测方案适用于存在漂移扰动和大角度 SSOO 遮挡的复杂传输环境。

在自由空间进行光通信时, 受环境大气湍流的影响, 光束所携带的 TC 信息可能失真, 因此准确地检测出失真前的 TC 信息将成为涡旋光束应用的难点。所使用的基于平均 OAM 值 l_{OAM} 的 TC 判断方法, 受到障碍物的干扰较小, 这是有利于复杂环境中的涡旋信号识别的。此外, 复杂环境中 TC 信息的严重失真, 可以看作是自然界对信息的“加密”。恢复出 TC 信息的过程, 可以看作是“解密”的过程。如果我们掌握复杂环境对 TC 信息的调制方式, 就可为光学加密提供一个新维度。因此, 本研究的理论结论和实验方案对于复

杂环境中的光通信^[27-28]、光学加密^[29]具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J, 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] Erhard M, Fickler R, Krenn M, et al. Twisted photons: new quantum perspectives in high dimensions[J]. Light: Science & Applications, 2018, 7(3): 17146.
- [3] Fang X Y, Ren H R, Gu M. Orbital angular momentum holography for high-security encryption[J]. Nature Photonics, 2020, 14(2): 102-108.
- [4] Lei T, Zhang M, Li Y R, et al. Massive individual orbital angular momentum channels for multiplexing enabled by Damman gratings[J]. Light: Science & Applications, 2015, 4(3): e257.
- [5] Wang J. Advances in communications using optical vortices[J]. Photonics Research, 2016, 4(5): 14-28.
- [6] Qiu X D, Li F S, Zhang W H, et al. Spiral phase contrast imaging in nonlinear optics: seeing phase objects using invisible illumination[J]. Optica, 2018, 5(2): 208-212.
- [7] Eckerskorn N, Bowman R, Kirian R A, et al. Optically induced forces imposed in an optical funnel on a stream of particles in air or vacuum[J]. Physical Review Applied, 2015, 4(6): 064001.
- [8] Lavery M P J, Speirits F C, Barnett S M, et al. Detection of a spinning object using light's orbital angular momentum[J]. Science, 2013, 341(6145): 537-540.
- [9] Wu R, Chen J, Zhang Y Y, et al. Revealing the orbital angular momentum spectrum and correlation phase of optical vortices with wander perturbations and spiral offsets[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(7): 2008-2014.
- [10] 吴冉, 陈君, 傅钢坤. 多模高阶涡旋光的光束漂移实验研究[J]. 光学学报, 2022, 42(4): 0426001.
- [11] Wu R, Chen J, Fu G K. Experimental study of multi-mode high-order vortex beam wander[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(4): 0426001.
- [12] Wang L Y, Ma J T, Xiao M, et al. Application of optical orbital angular momentum to rotation measurements[J]. Results in Optics, 2021, 5: 100158.
- [13] Chen J, Wan C H, Zhan Q W. Engineering photonic angular momentum with structured light: a review[J]. Advanced Photonics, 2021, 3(6): 064001.
- [14] Prabhakar S, Kumar A, Banerji J, et al. Revealing the order of a vortex through its intensity record[J]. Optics Letters, 2011, 36(22): 4398-4400.
- [15] Li X F, Ma L Q, Zeng J, et al. Determining the topological charge of an obstructed vortex beam via reconstructed phase distribution[J]. Applied Physics Letters, 2020, 117(25): 251103.
- [16] Kotlyar V V, Kovalev A A, Volyar A V. Topological charge of a linear combination of optical vortices: topological competition [J]. Optics Express, 2020, 28(6): 8266-8281.
- [17] Liu X L, Peng X F, Liu L, et al. Self-reconstruction of the degree of coherence of a partially coherent vortex beam

- obstructed by an opaque obstacle[J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(18): 181104.
- [17] Lu X Y, Zhao C L, Shao Y F, et al. Phase detection of coherence singularities and determination of the topological charge of a partially coherent vortex beam[J]. Applied Physics Letters, 2019, 114(20): 201106.
- [18] Shakir S A, Fried D L, Pease E A, et al. Efficient matrix approach to optical wave propagation and Linear Canonical Transforms[J]. Optics Express, 2015, 23(20): 26853-26862.
- [19] Chen J, Zhang E X, Peng X F, et al. Efficient tensor approach for simulating paraxial propagation of arbitrary partially coherent beams[J]. Optics Express, 2017, 25(20): 24780-24789.
- [20] Chen J, Dong W. Efficient tensor approach for propagation of beams of arbitrary shape and coherence through atmospheric turbulence[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 108: 36-40.
- [21] Alperin S N, Niederriter R D, Gopinath J T, et al. Quantitative measurement of the orbital angular momentum of light with a single, stationary lens[J]. Optics Letters, 2016, 41(21): 5019-5022.
- [22] Kotlyar V, Kovalev A, Porfirev A, et al. Orbital angular momentum of a laser beam behind an off-axis spiral phase plate [J]. Optics Letters, 2019, 44(15): 3673-3676.
- [23] Chen J, Liu X L, Yu J Y, et al. Simultaneous determination of the sign and the magnitude of the topological charge of a partially coherent vortex beam[J]. Applied Physics B, 2016, 122(7): 201.
- [24] 赵建林. 高等光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 150-153. Zhao J L. Advanced optics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 150-153.
- [25] Perez-Garcia B, Yepiz A, Hernandez-Aranda R I, et al. Digital generation of partially coherent vortex beams[J]. Optics Letters, 2016, 41(15): 3471-3474.
- [26] Goodman J W, Lawrence R W. Digital image formation from electronically detected holograms[J]. Applied Physics Letters, 1967, 11(3): 77-79.
- [27] 南久航, 韩一平. 双路多进制涡旋光通信[J]. 光学学报, 2021, 41(12): 1206001. Nan J H, Han Y P. Dual-channel multiband vortex optical communication[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(12): 1206001.
- [28] 刘海达, 黑小兵, 杨洋, 等. 用于水下光通信高维调制与解调的轨道角动量叠加态研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 60(9): 0901001. Liu H D, Hei X B, Yang Y, et al. Research of orbital angular momentum in superposition state for highdimensional modulation and demodulation of underwater optical communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 60(9): 0901001.
- [29] 吴军, 王刚, 徐刚. 结合计算全息与混沌的彩色图像加密方法 [J]. 光学学报, 2021, 41(19): 1909001. Wu J, Wang G, Xu G. Color image encryption method based on computer generated hologram and chaos[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(19): 1909001.

Measurement of Topological Charge of Obstructed Wandering Vortex Beams

Li Yansong, Chen Jun*, Fu Gangkun, Qi Guozhen, Shi Yan, Zhao Chunliu, Jin Shangzhong**

College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China

Abstract

Objective Topological charge (TC) is a key factor to characterize the orbital angular momentum (OAM) of vortex beams. Accurate determination of TC is an essential prerequisite for the applications of OAM beams in optical communication and sensing. In complex environments, wandering perturbation and opaque obstacles destroy the amplitude and phase of the optical field and put challenges to accurate measurements. In this paper, we propose a method to determine the TC of obstructed wandering vortex beams. According to the theoretical results of the propagation of two uniform off-axis multi-center vortex beams and a random off-axis wandering vortex beam through a sector-shaped opaque obstacle (SSOO), it is observed that the averaged OAM of wandering vortex beams can reveal the TC of the input field, and even wandering perturbation and large-angle SSOO are encountered. Experimental measurement of the averaged OAM is carried out based on a single cylindrical lens (CL), and the results agree with the theoretical predictions. Results show that the method proposed here works well when the methods of light intensity, Fourier transform, and phase distribution fail to determine the TC in extremely complex environment such as the angle of SSOO of 270° and large wandering perturbations.

Methods In this work, three types of multi-center off-axis vortex beams, namely, the beams of uniform off-axis coherent superposition (UCS), uniform off-axis incoherent superposition (UIS), and random off-axis incoherent superposition (RIS), are studied both in theory and experiment. In the theory part, utilizing an equivalent matrix method (EMA), we obtain the propagation of the three types of vortex beams after the SSOO. Theoretical results of the distribution of the light intensity, Fourier intensity, and phase are presented. According to the ABCD propagation law of a tilted CL, the average OAM of the three types of beams is calculated for various input topological charges. In the experimental part, the intensity distribution is detected, and the average OAM is obtained using a single 45° -tilted CL.

Results and Discussions Fig. 2 presents the theoretical results for three types of vortex light intensity distributions and average OAM values. It shows that as the area of SSOO increases, the dark hollow structure inside the intensity disappears, which means that in the propagation with a large-area SSOO, the TC of the input beam cannot be recognized according to the distribution of the intensity of the beams. Figs. 3 and 4 are the theoretical results for the Fourier intensity distributions and phase distributions, respectively. It can be seen that when the obstructed area of the SSOO is larger than one half, methods based on the Fourier intensity and the phase distributions lost their efficiency, while the average OAM always keep around the value of the input TC. It means that in the case of a large-area SSOO, the method based on the averaged OAM works well. Fig. 7 presents the experimental results of the Fourier-transformed intensity distribution and the average OAM of three types of off-axis vortex beams. The input TC equals 1. The comparison between Fig. 7 and Fig. 3 shows that the experimental results agree with theoretical predictions. Table 1 is the theoretical results of the average OAM of the UIS beam and the RIS beam under the obstruction of SSOO when different spiral offsets are considered. It shows the robustness of the average OAM method in perturbations of spiral offset. Table 2 is the results of the average OAM of two types of off-axis vortex beams under SSOO at a TC value of -1 . It indicates that this method can recognize the magnitude as well as the sign of the TC. Table 3 is the results of the average OAM under SSOO at different off-axis perturbations. It shows that this method can give the right value of TC when the wandering perturbation is as high as $1.2w$.

Conclusions In this paper, the characteristics of the average OAM, optical intensity, Fourier intensity, and phase distribution of the wandering vortex beams obstructed by SSOO are investigated theoretically and experimentally. The results show that the detection method based on the average OAM can correctly reveals the absolute value and sign of the TC of the input beam when the wandering vortex beam is obstructed by the angle of SSOO of over 180° . Moreover, this method works robustly when off-axis perturbations and vortex center misalignment are encountered.

Key words physical optics; vortex beam; orbital angular momentum; beam wandering; obstacles; topological charge detection