

单环多段光强分布检测光学涡旋拓扑荷值

张昊 常琛亮 夏军

Detection optical vortex topological charges with monocyclic multistage intensity distribution

Zhang Hao Chang Chen-Liang Xia Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 064101 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.064101

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.064101>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I6>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

部分相干光对周期性局域空心光束的影响

[Effects of a partially coherent beam on periodic bottle beam](#)

物理学报.2016, 65(4): 044103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.044103>

无衍射特殊光束的产生与三维表征

[Generation and three-dimensional characterization of complex nondiffracting optical beams](#)

物理学报.2015, 64(24): 244203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.244203>

栅极热变形对离子推力器工作过程影响分析

[Analysis on the effects of optics thermal deformation on the ion thruster operation](#)

物理学报.2015, 64(9): 094104 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094104>

多环涡旋光束的实验研究

[Experimental study on multiple-ring vortex beams](#)

物理学报.2014, 63(24): 244103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.244103>

离轴拉盖尔-高斯涡旋光束传输中的光斑演变

[Change of the off-center Laguerre-Gaussian vortex beam while propagation](#)

物理学报.2012, 61(6): 064103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.064103>

# 单环多段光强分布检测光学涡旋拓扑荷值

张昊<sup>1)</sup> 常琛亮<sup>2)</sup> 夏军<sup>2)†</sup>

1)(东南大学物理系, 南京 211189)

2)(东南大学电子科学与工程学院显示技术研究中心, 南京 210096)

(2015年9月30日收到; 2015年11月23日收到修改稿)

针对涡旋光束检测范围局限这一问题, 提出了一种新的光学涡旋拓扑荷值检测方法——单环多段光强分布检测法, 它以分段数和环半径为两大检测常数, 将检测涡旋光束拓扑荷值范围扩大到了128种, 与以往利用旁瓣调控光学涡旋检测拓扑荷值方法相比, 检测范围扩大了1个数量级. 单环多段光强分布是基于计算机全息图实现在远场衍射焦平面上环半径相等的两束携带不同拓扑荷数的涡旋光束叠加后形成的光强分布. 计算机模拟和光学实验验证了所提出方法的可行性, 该方法在自由空间光通信领域具有一定的研究价值和应用潜力.

**关键词:** 光学涡旋, 轨道角动量, 计算全息图, 光通信技术

**PACS:** 41.85.-p, 42.40.Jv, 42.50.Tx

**DOI:** 10.7498/aps.65.064101

## 1 引言

光学涡旋(optical vortices, OV)光束<sup>[1]</sup>是一种特殊的光场, 其具有 $\exp(-il\varphi)$ 形式的相位因子<sup>[2]</sup>, 其中 $l$ 定义为OV光束的拓扑荷, 特殊的相位因子使得光束中每个光子都携带有 $l\hbar$ 的轨道角动量, 涡旋光束的这种螺旋相位结构, 导致其中心点与任意一点均在同一条等相位线上, 因而该点的相位无法定义, 称为相位奇点, 并且在该点的光场强度为零, 形成中空的环形光场分布<sup>[3]</sup>. 涡旋光束独特的拓扑特性使其在光学及其他应用领域具有广泛和十分重要的应用价值<sup>[4-13]</sup>, 其中涡旋光束在光学微操纵<sup>[6]</sup>、量子计算<sup>[9]</sup>、基于光学比特的光通信<sup>[10]</sup>方面表现出独特的应用潜力.

随着对OV光束的广泛研究与应用, OV光束轨道角动量的检测方法作为应用基础与前提也得到了逐步深入的研究. 例如利用振幅衍射光学元件包括三角缝<sup>[14]</sup>、单缝<sup>[15]</sup>、双缝<sup>[16,17]</sup>和叉形光栅<sup>[18,19]</sup>检测轨道角动量. 当OV光束通过这些光学元件后, OV光束的远场衍射将会呈现出特定的

现象, 同时这些光学元件的作用可以通过一个空间光调制器来实现<sup>[20]</sup>. Berkhout<sup>[21]</sup>等和Lavery等<sup>[22]</sup>利用图像重构法将螺旋位相光束重构为线性位相梯度且正比于轨道角动量拓扑荷值, 通过透镜使不同水平相位梯度的光斑聚焦到水平方向的不同位置. Chen等<sup>[23]</sup>发现了在远场衍射焦平面上主环与第一旁瓣环对于不同拓扑荷值有特定的比值关系, 并基于旁瓣调控光学涡旋(sidelobe-modulated optical vortices, SMOV)提出了主环-旁瓣环半径比检测涡旋光束拓扑荷值法<sup>[24]</sup>, 这种方法的优势在于SMOV对光束与光学元件间的对准和位相匹配要求较低. 然而, 之前所有轨道角动量检测方法都由于较小的检测范围使得OV光束的应用价值受到限制, 若能将检测范围扩大一个数量级或更大, OV光束拓扑荷值多样性才能够真正得以应用推广, 因此扩大拓扑荷检测范围是有重要意义的研究工作.

本文研究一种基于SMOV的单环多段光强分布, 它利用分段数和半径两大检测常数, 编码了复合涡旋光束拓扑荷数, 将拓扑荷数检测范围扩大到

† 通信作者. E-mail: xiajun@seu.edu.cn

了128种,极大地扩展了拓扑荷值检测范围,同时具有对光束与光学元件之间的对准和位相匹配不苛刻的优势. 本文从理论上分析了结构的形成与光强分布特点,同时理论模拟了光强分布规律,并通过光学实验产生了与理论模拟相一致的光学现象. 这种单环多段光强分布结构提供了更广阔OV光束轨道角动量检测范围,因而扩大了OV光束所能承载的信息量,在自由空间光通信等领域具有一定的应用潜力.

## 2 理论分析和方法

### 2.1 理论分析

一个环形涡旋相位结构可以通过两个拓扑荷相同而半径不同的相位掩模板相减得到,环形涡旋相位掩模板的分布可以表示为

$$\tau_l(r, \varphi) = \left[ \text{circl}\left(\frac{r}{R}\right) - \text{circl}\left(\frac{r}{\beta R}\right) \right] \times \exp(il\varphi) \quad (1)$$

$$l = \pm 1, \pm 2, \dots,$$

其中 $(r, \varphi)$ 是入射平面极坐标, $l$ 为涡旋光束拓扑荷, $R$ 为相位掩模板半径, $\beta$ 为相位掩模板环形结构中内环与外环半径之比<sup>[23]</sup>. 环形涡旋光束经过焦距为 $f$ 的透镜,在夫琅禾费衍射焦平面上复振幅可以用傅里叶变换表示:

$$E_l(\rho, \theta) = -\frac{ik}{2\pi f} \int_{R\beta}^R \int_0^{2\pi} \exp(il\varphi) \times \exp\left(-\frac{ik}{f} r\rho \cos(\varphi - \theta)\right) r dr d\varphi, \quad (2)$$

其中, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, $(\rho, \theta)$ 为夫琅禾费衍射焦平面极坐标. 图1所示为拓扑荷 $l = 41$ 时涡旋光束的夫琅禾费衍射模拟结果,其中图1(a)为相位掩模板,图1(b)为根据(2)式计算得到的夫琅禾费衍射焦平面上的光场强度分布图.

根据前人的研究<sup>[24]</sup>,环形涡旋光束在远场衍射焦平面上形成的圆环半径为

$$\rho \approx \frac{\gamma_{l-1,1}\lambda f}{2\pi R}, \quad (3)$$

其中 $\gamma_{l-1,1}$ 为 $(l-1)$ 阶第一类贝塞尔方程的第一个根, $\lambda$ 为波长, $R$ 为相位掩模板半径, $f$ 为透镜焦距. 通过(3)式可知,环形涡旋光束在远场衍射焦平面上形成的圆环半径 $\rho$ 随拓扑荷 $l$ 增大而增大,随相位掩模板圆环半径 $R$ 增大而减小.

为实现不同拓扑荷的两束OV光束在夫琅禾费衍射焦平面光强分布叠加为单环,我们在相位掩模板上固定一束OV光束的拓扑荷值 $l_1$ 和环半径 $R_1$ 不变,在夫琅禾费衍射焦平面上形成的单环光强分布的环半径 $\rho$ 随即固定,而在相位掩模板上编码的另一束OV光束随着拓扑荷值 $l_2$ 的不同,环半径 $R_2$ 由(3)式计算即可得到. 当相息图上两个环形涡旋光束存在重叠时,编码相息图中重叠部分利用傅里叶变换的可加性即可计算得到.

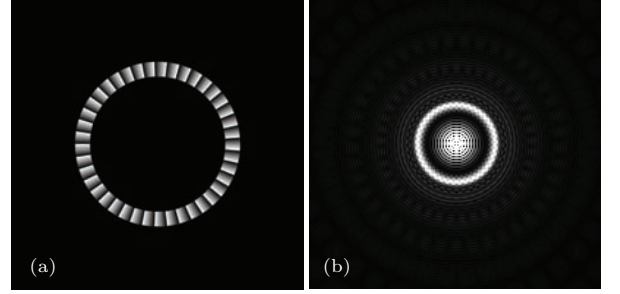


图1 拓扑荷 $l = 41$ 时的夫琅禾费衍射模拟结果 (a) 相位掩模板; (b) 傅里叶变换下的模拟图

Fig. 1. Simulated result in Fraunhofer diffraction by topological charge  $l = 41$ : (a) Phase mask; (b) simulated diagram in Fourier transform.

图2为复合涡旋光束相位掩模板的理论模拟图,其中图2(a)为外环拓扑荷 $l_1 = 41$ 、内环拓扑荷 $l_2 = 33$ 时的相位掩模板,可以看到内外环刚好相接,即内环外半径 $R_2$ 与外环内半径 $R_1 \cdot \beta_1$ 刚好相等;图2(b)为外环 $l_1 = 41$ 、内环 $l_2 = 30$ 时的相位掩模板,可以看到内外环间有空隙,即内环外半径 $R_2$ 小于外环内半径 $R_1 \cdot \beta_1$ ;图3(c)为外环 $l_1 = 41$ 、内环 $l_2 = 36$ 时的相位掩模板,可以看到内外环存在重叠部分,即内环外半径 $R_2$ 大于外环内半径 $R_1 \cdot \beta_1$ .

环形涡旋光束在球形傅里叶透镜焦平面上夫琅禾费衍射图像可由(2)式进一步化简,令 $p = kR\rho/2f$ ,得

$$E_l(\rho, \theta) = \frac{1}{f} \frac{(-i)^{l+1} \exp(il\theta) k^2}{(l+2)!} \left\{ R^2 p^l \cdot {}_1F_2\left[\frac{l+2}{2}, \frac{l+4}{2}, l+1, -p^2\right] - (\beta R)^2 p^l \cdot {}_1F_2\left[\frac{l+2}{2}, \frac{l+4}{2}, l+1, -(\beta p)^2\right] \right\}, \quad (4)$$

其中, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, $(\rho, \theta)$ 为夫琅禾费衍射焦平面极坐标, ${}_1F_2(a, b, c, d)$ 是普通超几何函数. 由(4)

式可知, 当  $\rho$  满足 (3) 式时, 夫琅禾费衍射焦平面上形成圆环的相位结构与相位掩模板上相位结构相同, 都拥有特殊的相位因子  $\exp(i l \theta)$ .

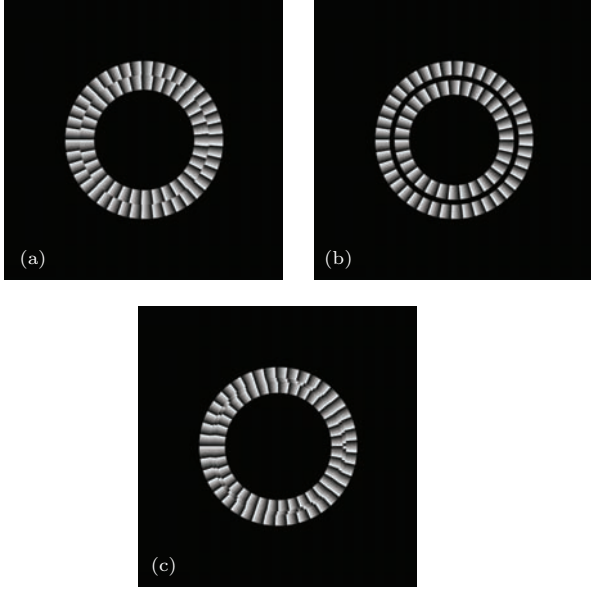


图2 复合涡旋光束相位掩模板的理论模拟图 (a) 外环拓扑荷  $l_1 = 41$ 、内环拓扑荷  $l_2 = 33$  相位掩模板; (b) 外环  $l_1 = 41$ 、内环  $l_2 = 30$  相位掩模板; (c) 外环  $l_1 = 41$ 、内环  $l_2 = 36$  相位掩模板

Fig. 2. Simulated diagram of phase mask with outer-ring topological charge  $l_1$  and inner-ring topological charge  $l_2$ : (a)  $l_1 = 41$ ,  $l_2 = 33$ ; (b)  $l_1 = 41$ ,  $l_2 = 30$ ; (c)  $l_1 = 41$ ,  $l_2 = 36$ .

当相位掩模板上编码有两束涡旋光束时, 两环分别在相位掩模板上一周记载  $2\pi \cdot l_1$ ,  $2\pi \cdot l_2$  ( $l_1$  为外环拓扑荷数,  $l_2$  为内环拓扑荷数, 令  $l_1 > l_2 > 0$ ) 的相位. 在夫琅禾费衍射焦平面上, 两束涡旋光束形成的光环半径相同, 并且各自光环处的相位与相位掩模板上的编码相位相同. 由不同拓扑荷  $l_1$ ,  $l_2$  在光环一周上记载总相位差为  $2\pi \cdot (l_1 - l_2)$ , 因而在一周上存在  $(l_1 - l_2)$  个点满足相位差为  $(2n + 1) \cdot \pi$  (其中  $n$  为整数). 由于干涉相消原理, 两列光波的频率相同、位相差恒定、振动方向一致时, 相位差满足  $\Delta\varphi = (2n + 1) \cdot \pi$  时, 出现干涉相消现象. 由于  $l_1$ ,  $l_2$  相差较小, 在  $\rho$  相等时, 振幅相差较小, 则在满足相位差条件的点上存在:

$$\begin{aligned} E_{l_1 l_2}(\rho, \theta) &= A(l_1) \exp(i l_1 \theta) + A(l_2) \\ &\times \exp\{i[l_1 \theta + (2n + 1) \cdot \pi]\}, \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $A(l_1)$  与  $A(l_2)$  表示外环拓扑荷  $l_1$  与内环拓扑荷  $l_2$  单独傅里叶变换时所得振幅, 进而得:

$E_{l_1 l_2}(\rho, \theta) = 0$ . 因而, 复合涡旋光束在夫琅禾费衍射焦平面上形成单环多段的光强结构, 光环被分为

$$n = (l_1 - l_2) \quad (6)$$

段, 各段与中心所夹幅角均相等. 由于当  $l_1 < l_2$  时, 会呈现出与  $l_1 > l_2$  相同的单环分段结构, 而无法区分, 本文所讨论的都是  $l_1 > l_2$  的情况.

由 (3) 式可知, 单环多段光强结构的光环半径与外环拓扑荷值  $l_1$  成正比, 当  $l_1 = 1, 2, 3 \dots$  时, 很难通过观察  $\rho$  检测出拓扑荷值  $l_1$ , 而当外环拓扑荷值相差较大, 即可通过观察光环半径  $\rho$  轻易分辨出外环拓扑荷值  $l_1$ . 确定外环拓扑荷  $l_1$  后, 通过观察分段数即可确定内环拓扑荷值.

由于拓扑荷值正负并不影响远场衍射焦平面上光环半径以及图像对称性易知当外环拓扑荷  $l_1$  与内环拓扑荷  $l_2$  同为负时在远场衍射焦平面上将呈现于内外环拓扑荷同为正时相同光强分布; 当外环拓扑荷  $l_1 > 0$  与内环拓扑荷  $l_2 < 0$  时, 由于  $(l_1 - l_2)$  决定单环多段光强分布结构的分段数, 导致分段数过多、观察现象极不明显的情况.

以  $l_1$  表示相位掩模板上外环涡旋光束拓扑荷,  $l_2$  表示内环拓扑荷, 在现象较好前提下, 单环多段光强可以编码  $l_1 = 31, 41, \dots, 101$ ,  $l_2 = l_1 - 1, l_1 - 2, \dots, l_1 - 16$  共 128 种复合涡旋光束, 其中当  $l_1 \geq 111$  时, 单环多段光强较弱. 同时, 当  $l_1$  较大时, 即单环多段光强分布环半径较大时, 可以清晰地观察出分段数  $n > 16$  时的光强分布结构, 因而, 单环多段光强分布可编码拓扑荷范围可大于 128 种, 极大程度地扩大了拓扑荷值检测范围, 使复合涡旋光束作为空间自由光通信信息载体可承载更大的信息容量, 在自由空间光通信领域的应用价值提高了一个档次.

## 2.2 理论模拟

首先通过计算机模拟复合涡旋光束夫琅禾费衍射焦平面光强分布, 图 3(a)–(p) 给出的是外环拓扑荷  $l_1 = 41$  不变, 内环拓扑荷  $l_2$  取值 40, 39, 38,  $\dots$ , 25 时复合涡旋光束夫琅禾费衍射焦平面理论模拟图. 由图 3 可知单环多段光强分段数  $n$  分别在图 3(a)–(p) 中为 1, 2, 3,  $\dots$ , 16, 可以得到复合涡旋光束相位掩模板固定外环拓扑荷  $l_1 = 41$  时, 在夫琅禾费衍射图像上单环分段数

$n = 1, 2, 3, \dots, 16$  分别对应着相位掩模板上内环拓扑荷  $l_2 = 40, 39, 38, \dots, 25$ , 与 2.1 节的理论结果相一致. 结果表明, 当固定相位掩模板外环拓扑荷  $l_1$  时, 则内环拓扑荷  $l_2$  与夫琅禾费衍射图像上单环多段光强分段数  $n$  是一一对应的, 因此证明了分段数作为检测常数的正确性.

图 4(a)–(d) 所示为相位掩模板上外环拓扑荷  $l_1$ , 内环拓扑荷  $l_2$  的复合涡旋光束的夫琅禾费衍射图像. 对比图 4(a) 和 (b) 可知, 当夫琅禾费衍射图像中光环的分段数均为 8 时, 通过检测光环半径  $\rho$  即可轻松区分相位掩模板上外环拓扑荷  $l_1$ , 进而由分段数  $n = (l_1 - l_2)$  得到内环拓扑荷  $l_2$ . 证明了夫

琅禾费衍射图像上光环半径  $\rho$  作为检测常数的必要性.

由图 4(c) 和 (d) 可知, 当相位掩模板上外环拓扑荷  $l_1 = 31, 31$  时, 夫琅禾费衍射图像上单环多段光强分布现象依然明显, 检测效果未受到较大影响. 结果表明, 单环多段光强可以编码  $l_1 = 31, 41, \dots, 101, l_2 = l_1 - 1, l_1 - 2, \dots, l_1 - 16$  的复合涡旋光束, 共 128 种复合涡旋光束, 且由图 4(d) 可知当外环拓扑荷  $l_1 = 101$  时, 分段数  $n \geq 17$  时分段现象也很容易观察, 检测范围仍可继续扩大.

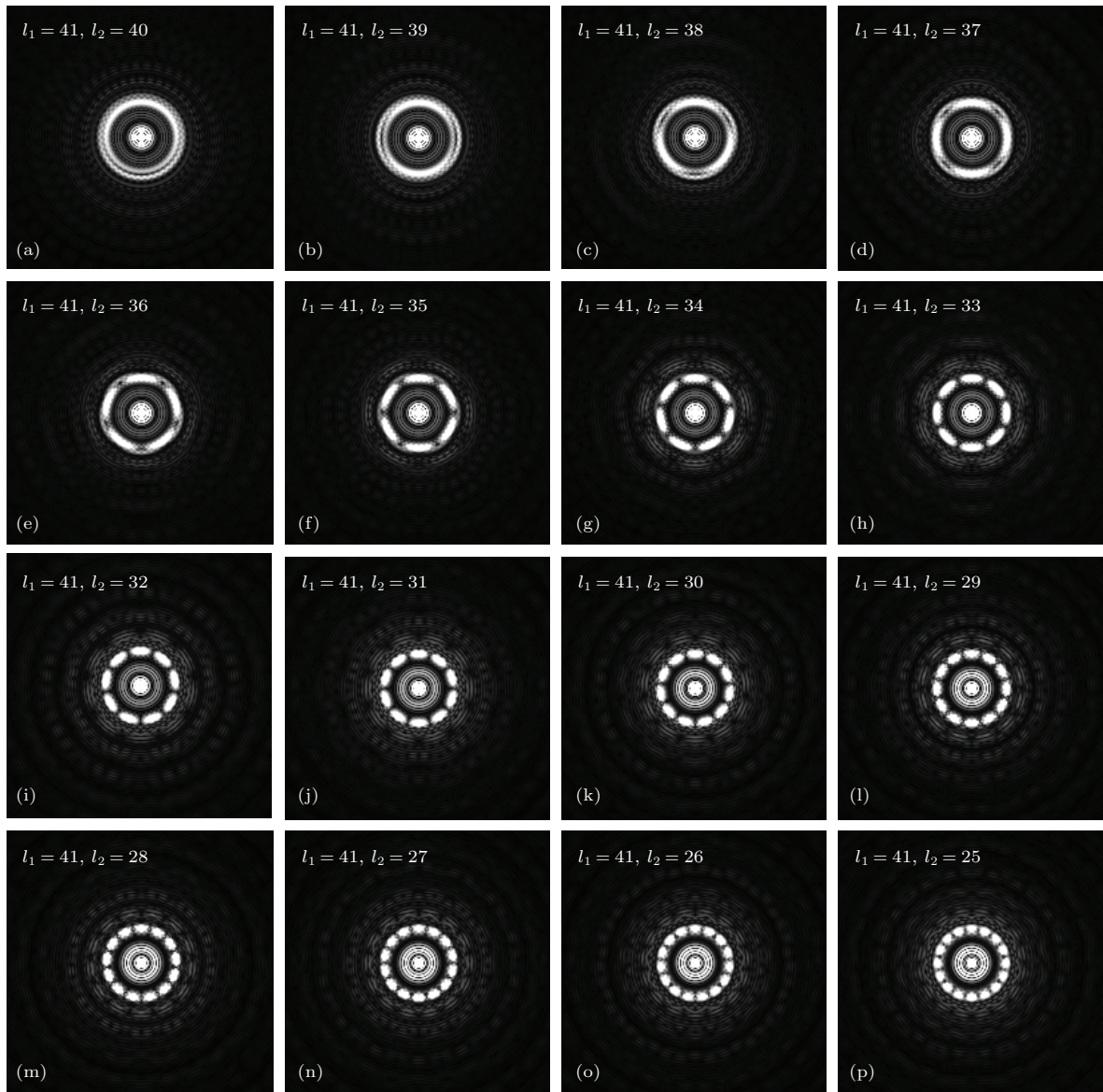


图 3 复合涡旋光束理论光强分布 保持相位掩模板外环拓扑荷  $l_1 = 41$ , (a)–(p) 为不同内环拓扑荷的情况  
 Fig. 3. Intensity distributions of simulated diagram of compound vortex beam in theory phase mask with out-ring topological charge  $l_1 = 41$  and inner-ring  $l_2$  which is different in Figs. (a)–(p).

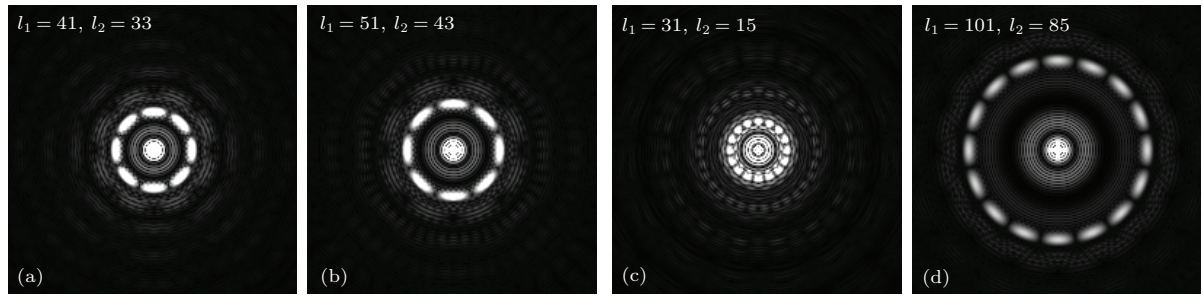


图4 复合涡旋光束夫琅禾费衍射中理论光强分布, (a)—(d) 为相位掩模板上不同的外环拓扑荷  $l_1$  和内环拓扑荷  $l_2$  情况  
 Fig. 4. Intensity distribution in Fraunhofer diffraction by compound vortex beam in theory phase mask with different out-ring topological charge  $l_1$  and inner-ring  $l_2$  in Figs. (a)–(d).

### 3 实验装置和结果

检测复合涡旋光束拓扑荷的光学实验装置示意图见图5. 由半导体激光器 ( $\lambda = 532 \text{ nm}$ ) 发射的激光, 经过分光棱镜后分成两束, 一束光垂直照射在纯相位型反射式空间光调制器 (SLM, Holoeye, Pluto) 上. SLM 的像素为  $1080 \times 1920$ , 通过计算机1加载相息图以对入射光进行相位调制. 光束经 SLM 反射后再次经分光棱镜后垂直射在透镜 ( $f = 500 \text{ mm}$ ) 中心, 透镜焦平面上实时图像被电荷耦合元件 (charge-coupled device, CCD) 图像控制器观测并保存到计算机2上.

制器观测并保存到计算机2上.

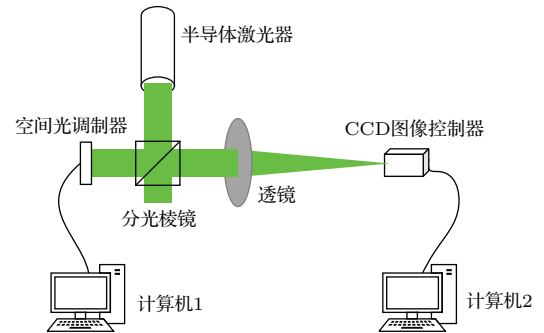


图5 检测复合涡旋光束拓扑荷的光学实验示意图  
 Fig. 5. Schematic diagram of detection of vortex beam topological charge experiment.

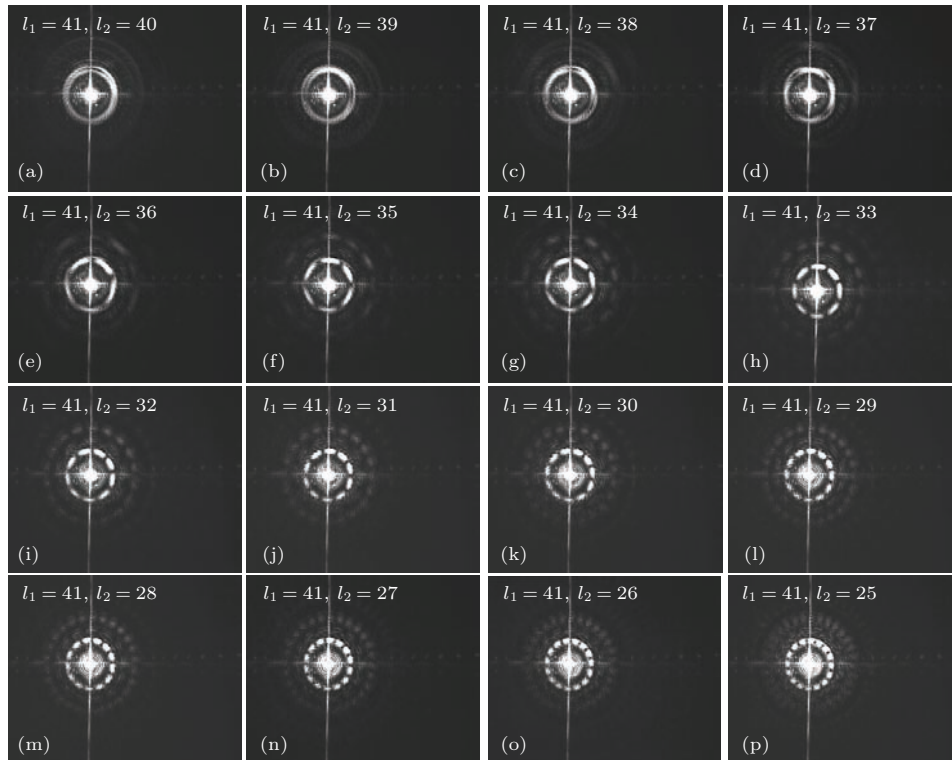


图6 CCD 检测图像保持相位掩模板外环拓扑荷  $l_1 = 41$ , (a)—(p) 为不同内环拓扑荷的情况  
 Fig. 6. Examined image in CCD: phase mask with out-ring topological charge  $l_1 = 41$  and inner-ring  $l_2$  which is different in Figs. (a)–(p).

首先来检测相位掩模板上外环拓扑荷  $l_1$  固定的情况, 实验现象如图 6 所示, 相位掩模板上外环拓扑荷  $l_1 = 41$ , 内环拓扑荷  $l_2$  在图 6(a)–(p) 中依次为 40, 39, 38,  $\dots$ , 25, 图像中光环分段数  $n$  在图 6(a)–(p) 中依次为 1, 2, 3,  $\dots$ , 16. 实验结果与理论分析及理论模拟均完全符合, 并且现象明显, 极易分辨, 证明了分段数作为检测常数的正确性.

为验证夫琅禾费衍射图像光环半径可作为检测常数, 将光环分段数  $n$  相同的两个相位掩模板分别加载在 SLM 上, 利用 CCD 在透镜焦平面上实时拍摄实验结果. CCD 拍摄结果如图 7 所示, 其中图 7(a) 为相位掩模板上外环拓扑荷  $l_1 = 41$ 、内环拓扑荷  $l_2 = 31$  时所拍摄图像, 图 7(b) 为外环  $l_1 = 51$ 、内环  $l_2 = 41$  时所拍摄图像. 由图 7 可知, 虽然两光强结构分段数均为 10, 但光环半径相差较大, 极易区分, 证明了环半径作为检测常数的正确性.

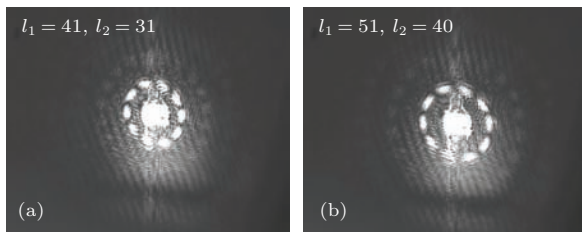


图 7 焦平面光强分布图 (a) 相位掩模板上外环拓扑荷  $l_1 = 41$ , 内环拓扑荷  $l_2 = 31$ ; (b) 外环拓扑荷  $l_1 = 51$ , 内环拓扑荷  $l_2 = 41$

Fig. 7. Intensity distribution in the focal plane: (a) Phase mask with out-ring topological charge  $l_1 = 41$  and inner-ring topological charge  $l_2 = 31$ ; (b)  $l_1 = 51$ ,  $l_2 = 41$ .

## 4 总 结

本文提出了一种基于 SMOV 的利用单环多段光强分布检测拓扑荷的方法. 理论表明, 单环多段光强分布结构以分段数和环半径两大检测常数, 将检测涡旋光束拓扑荷值范围扩大到了 128 种, 极大地扩展了拓扑荷值检测范围, 同时具有对光束与光学元件之间的对准和位相匹配不苛刻的优势. 本文对单环多段光强分布结构进行了理论模拟, 并对产生的复合涡旋光束进行了相应的理论分析, 基于复合涡旋光束计算全息图, 利用空间光调制器进行了光学实验产生了与理论相一致的光强分布. 本文研究结果对于深入理解复合涡旋光束的形成分布特

征有一定的指导意义, 同时, 在自由空间光通信领域具有一定研究价值和应用潜力.

## 参考文献

- [1] Curtis J E, Grier D G 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 133901
- [2] Swartlander G A 2001 *Opt. Lett.* **26** 497
- [3] Gan X T, Zhang P, Liu S, Xiao F J, Zhao J L 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 3280
- [4] Ding P F, Pu J X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 174201 (in Chinese) [丁攀峰, 蒲继雄 2012 物理学报 **61** 174201]
- [5] Fang G J, Sun S H, Pu J X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 064210 (in Chinese) [方桂娟, 孙顺红, 蒲继雄 2012 物理学报 **61** 064210]
- [6] Gecevičius M, Drevinskas R, Beresna M, Kazansky P 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 231110
- [7] Chen C R, Yeh C H, Shih M F 2014 *Opt. Express* **22** 3180
- [8] Dholakia K, Čžmár T 2011 *Nature Photon.* **5** 335
- [9] Fickler R, Lapkiewicz R, Plick W N, Krenn M, Schaeff C, Ramelow S, Zeilinger A 2012 *Science* **338** 640
- [10] Rodenburg B, Mirhosseini M, Malik M, Rodenburg B, Mirhosseini M, Malik M, Magaña-Loaiza O, Yanakas M, Maher L, Steinhoff N, Tyler G, Boyd R 2014 *New J. Phys.* **16** 033020
- [11] Lehmuskero A, Li Y, Johansson P 2014 *Opt. Express* **22** 434
- [12] Liu Y, Li H N, Hu Y, Du A 2014 *Chin. Phys. B* **23** 087501
- [13] Zhou Z H, Guo Y K, Zhu L 2014 *Chin. Phys. B* **23** 044201
- [14] Hickmann J M, Fonseca E J S, Soares W C, Chávez-Cerda S 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 053904
- [15] Ghai D P, Senthilkumaran P, Sirohi R S 2009 *Opt. Lasers Eng.* **47** 123
- [16] Sztul H I, Alfano R R 2006 *Opt. Lett.* **31** 999
- [17] Zhou H, Yan S, Dong J, Zhang X 2014 *Opt. Lett.* **39** 3173
- [18] Guzzinati G, Clark L, Béché A, Verbeeck J 2014 *Phys. Rev. A* **89** 025803
- [19] Saitoh K, Hasegawa Y, Hirakawa K, Tanaka N, Uchida M 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 074801
- [20] Xin J T, Gao C Q, Li C, Wang Z 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 174202 (in Chinese) [辛景寿, 高春清, 李辰, 王铮 2012 物理学报 **61** 174202]
- [21] Berkhout G C G, Lavery M P J, Courtial J, Beijersbergen M W, Padgett M J 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 153601
- [22] Lavery M P J, Berkhout G C G, Courtial J, Padgett M J 2011 *J. Opt.* **13** 064006
- [23] Chen J, Kuang D F, Fang Z L 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 4210
- [24] Chen J, Zhao X, Fang Z L, Zhu S W, Yuan X C 2010 *Opt. Lett.* **35** 1485

# Detection optical vortex topological charges with monocyclic multistage intensity distribution

Zhang Hao<sup>1)</sup> Chang Chen-Liang<sup>2)</sup> Xia Jun<sup>2)†</sup>

1) (*Department of Physics, Southeast University, Nanjing 211189, China*)

2) (*School of Electronic Science and Engineering, Display center, Southeast University, Nanjing 210096, China*)

( Received 30 September 2015; revised manuscript received 23 November 2015 )

## Abstract

Generation and application of the vortex beams are part of the hot topics in the optical field. In connection with the limited detection range of topological charge, we introduce a novel monocyclic multistage intensity distribution, which is generated by the coaxial superposition of two vortex beams with different topological charge numbers which have the same radius of ring in the focal plane of fraunhofer diffraction. This novel intensity distribution which is achieved by computer generated hologram is a new application of sidelobe-modulated optical vortices. The detection range of topological charge is expanded to 128 by two detection constants consisting of segments and radius in the monocyclic multistage intensity distribution method. We study the generation and distribution characteristics of monocyclic multistage intensity distribution in the focal plane of fraunhofer diffraction theoretically and experimentally to generate the qualified monocyclic multistage intensity distribution using a spatial light modulator. Excellent agreement between theoretical and experimental results is observed. The study indicates that two orbital angular momenta of vortex beams can be accurately determined by the segments and radius determined in the monocyclic multistage intensity distribution method. The method is immune to harassments from alignment and phase matching between the beams and optical elements, and has a large detection range, which is enlarged one order of magnitude compared with the previous way of detecting topological charges with sidelobe-modulated optical vortices. Our method provides a more large detection range of topological charge, which enables the vortex beams as the information carriers to carry more data in communication. Therefore, this method possesses research potential and applicability in future free-space optical communication.

**Keywords:** optical vortices, orbital angular momentum, computer generated hologram, optical communication technology

**PACS:** 41.85.-p, 42.40.Jv, 42.50.Tx

**DOI:** [10.7498/aps.65.064101](https://doi.org/10.7498/aps.65.064101)

---

† Corresponding author. E-mail: [xiajun@seu.edu.cn](mailto:xiajun@seu.edu.cn)