

涡旋光轨道角动量的拓扑荷差值法测量

王华鑫 王彤 熊晗

Measurement of orbital angular momentum of vortex beam by topological charge difference method

WANG Hua-xin, WANG Tong, XIONG Han

引用本文:

王华鑫, 王彤, 熊晗. 涡旋光轨道角动量的拓扑荷差值法测量[J]. 中国光学, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2024-0141

WANG Hua-xin, WANG Tong, XIONG Han. Measurement of orbital angular momentum of vortex beam by topological charge difference method[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2024-0141

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0141>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

杂化偏振涡旋合成光束阵列的轨道角动量谱

Orbital-angular-momentum spectra in coherent optical vortex beam arrays with hybrid states of polarization

中国光学 (中英文). 2023, 16(6): 1501 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2023-0010>

均匀偏振cosh-Pearcey-Gauss光束的远场坡印廷矢量, 自旋与轨道角动量

The Poynting vectors, spin and orbital angular momentums of uniformly polarized cosh-Pearcey-Gauss beams in the far zone

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 1195 <https://doi.org/10.37188/CO.EN.2022-0022>

Cosh-Pearcey-Gaussian涡旋光束在单轴晶体中的坡印廷矢量和角动量密度

The poynting vector and angular momentum density of Cosh-Pearcey-Gaussian vortex beams in uniaxial crystals

中国光学 (中英文). 2023, 16(1): 193 <https://doi.org/10.37188/CO.EN.2022-0007>

纳米光子学中的光学涡旋

Optical vortices in nanophotonics

中国光学 (中英文). 2021, 14(4): 792 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0066>

二维人工超材料的光学拓扑性质

Optical topological characteristics of two dimensional artificial metamaterials

中国光学 (中英文). 2021, 14(4): 955 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0074>

涡旋光束在不同盐度的水下湍流中的传输特性的实验研究

Experimental investigation on propagation characteristics of vortex beams in underwater turbulence with different salinity

中国光学 (中英文). 2022, 15(1): 111 <https://doi.org/10.37188/CO.EN.2021-0001>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-08

涡旋光轨道角动量的拓扑荷差值法测量

王华鑫, 王彤, 熊晗*

(江苏省高校低碳能源高效转化与利用重点实验室, 苏州科技大学物理科学与技术学院,
江苏苏州 215009)

摘要: 本文提出一种针对涡旋光轨道角动量的拓扑荷差值检测技术。通过两束拓扑荷不同的涡旋光得到周期性的差值法强度分布图, 读取其中一个周期的光斑个数, 可快速准确地计算出待测涡旋光的轨道角动量。相比干涉法和衍射法等需要接收完整涡旋光的传统检测方法, 拓扑荷差值法只需接收小部分涡旋光即可进行测量, 这在高阶的、大尺寸的涡旋光测量方面有非常大的优势, 在涡旋光的远距离自由空间光通信方面具有潜在的应用。

关键词: 涡旋光; 轨道角动量; 拓扑荷差值; 自由空间光通信

中图分类号: O436.1 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2024-0141 CSTR: 32171.14.CO.2024-0141

Measurement of orbital angular momentum of vortex beam by topological charge difference method

WANG Hua-xin, WANG Tong, XIONG Han*

(Key Laboratory of Efficient Low-carbon Energy Conversion and Utilization of Jiangsu Provincial Higher Education Institutions, School of Physical Science and Technology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, 215009, China)

* Corresponding author, E-mail: xh1980xh@126.com

Abstract: This paper presents a topological load difference detection technique for the orbital angular momentum of vortex beams. Two vortex beams with different topological charges obtained the periodic intensity distribution. The orbital angular momentum of the vortex beam to be measured can be quickly and accurately calculated by reading the number of spots in one period. The traditional interference and diffraction methods need to receive the complete vortex beam. In contrast, the topological charge difference method only needs to receive a small amount of vortex beam to measure. This has great advantages in the measurement of high-order and large-scale vortex beams. It has potential applications in long-distance free-space optical communication of vortex beams.

Key words: vortex beam; orbital angular momentum; topological load difference; free-space optical communication

收稿日期: 2024-08-09; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: “十四五”江苏省重点学科资助项目 (No. 2021135)

Supported by Jiangsu Key Disciplines of the Fourteenth Five-Year Plan (No. 2021135)

1 引言

与传统的平面波相比, 涡旋光的波前呈现出类似旋涡的形状^[1]。在自由空间光通信领域, 涡旋光的旋转相位结构和轨道角动量 (Orbital angular momentum, OAM) 使其能够携带更多信息, 适应日益增长的数据流量需求。涡旋光通信在满足未来高带宽、高安全性及全球覆盖需求方面具有重要意义, 尤其在全球数据传输、卫星通信和对安全性要求高的应用中发挥重要作用^[2-5]。但是目前远距离涡旋光通信技术仍然面临信号衰减、畸变及干扰等挑战, 准确地检测出涡旋光的 OAM 是在自由空间光通信应用的关键基础^[6-8]。OAM 的概念和生成方法在上世纪 90 年代被提出, 研究者利用螺旋相位板等光学元件实现了涡旋光束的制备。随后, 基于衍射法的检测技术逐渐成为主流, 通过将涡旋光束照射到光栅等元件上, 形成特征性图样以分析其 OAM 特性。进入 21 世纪, 随着空间光调制器 and 高分辨率探测器技术的进步, OAM 检测的精度和效率显著提高^[9-11]。庄京秋等人利用软边光阑对衍射光束的抑制作用, 提高了衍射分布中主亮斑的可识别度, 将矩孔检测范围拓展到 30 阶, 三角孔检测的范围拓展到 ± 20 阶^[12]。同时, 干涉法和其他先进技术的引入, 使得 OAM 的测量更加精确, 推动了其在量子通信、光信息处理和基础科学研究等领域的广泛应用, 展现出巨大的潜力^[13-15]。但干涉法通常需要更复杂的光路设计和较高的光学稳定性。陆健能使用一组柱透镜, 通过改变柱透镜之间的夹角获得旋转位置—空间频率的对应变换关系, 测得的拓扑荷值高达 200 阶^[16]。中南民族大学的杨春勇等人使用一束波长不同的涡旋光与待检测的涡旋光束进行复合, 再通过环形光栅衍射, 最终得到螺旋状的花纹, 在测得更高阶的同时检测出了涡旋光的旋转方向^[17]。

自由空间中, 涡旋光束的尺寸也会随着传输距离的增加而不断扩大^[18-19], 这导致对远距离传输的测量装置的口径要求也就越高。若接收到的光束不完整, 极易造成 OAM 测量的误差。此外, 在实际应用中, 产生的涡旋光总会存在一定程度的离轴, 以及自由传输过程中的大气或水中湍流, 都会导致离轴涡旋光束的光强分布会随着传输距离的增加而变得不均匀^[20-21]。干涉图样的模糊不

清容易造成 OAM 测量的误差。针对这些问题, 本文采用拓扑荷差值法来研究 OAM 的测量, 通过差值形成的周期性分布规律, 只需要利用局部的强度分布图, 便可计算出涡旋光的拓扑荷值。拓扑荷差值法对接收终端的涡旋光束在分布不均匀方面具有较大的包容性, 能够极大提高涡旋光 OAM 检测的可靠性, 对于远距离涡旋光通信的进一步发展具有重要意义。

2 拓扑荷差值法原理

拉盖尔-高斯光束是一种典型的涡旋光束, 它自身携带轨道角动量, 在柱坐标系下的复振幅表达式为^[22]:

$$E_p^l(r, \theta, z) = \frac{A}{\omega(z)} \left[\frac{\sqrt{2}r}{\omega(z)} \right]^{|l|} L_p^{|l|} \left[\frac{2r^2}{\omega^2(z)} \right] \times \exp \left[\frac{-r^2}{\omega^2(z)} \right] \exp(il\theta), \quad (1)$$

其中 $A = \sqrt{2p! / [\pi(|l| + p)!]}$ 是归一化常数, $\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + (z/Z_0)^2}$ 为拉盖尔高斯光束传输 z 距离时的束腰半径, ω_0 为传输距离为 0 时的束腰半径, $Z_0 = \pi\omega_0^2/\lambda$ 为瑞利长度, r 为极坐标下的径向距离, $L_p^l [2r^2/\omega^2(z)]$ 为拉盖尔多项式, p 为径向指数 (本文中 p 取值为 0), $\exp(il\theta)$ 为螺旋相位因子, l 为拓扑荷数, θ 为极坐标下的角坐标。

拓扑荷数为 l 的光束振幅可简写为:

$$E_l(r, \theta) = R_l(r) \exp(il\theta), \quad (2)$$

与其共轭干涉后的光场分布为:

$$I_l(r, \theta) = 2|R_l(r)|^2 [1 + \cos(2l\theta)], \quad (3)$$

其中 $|R_l(r)|^2$ 为径向光强分布。由式 (3) 可见, 涡旋光共轭干涉后出现随方位角度变化的强度分布 (即花瓣状干涉图), 花瓣数是拓扑荷值的 2 倍^[23]。随着拓扑荷值的增大, 花瓣干涉图的尺寸也随之变大^[24]。

本文采用的拓扑荷差值测量法, 需要另一束与待测涡旋光拓扑荷不同的参考涡旋光, 各自共轭干涉形成花瓣状干涉分布, 并再次叠加形成新的分布。可用来改变涡旋光拓扑荷的方法有光学波片法、偏振调制器法、非线性光学效应以及超材料法等等^[25-26]。这些方法具有成本较高、实验操作复杂、性能不稳定、应用场景受限等缺点。

本文实验中是使用空间光调制器(SLM)的左右两部分分别加载不同拓扑荷的叉状光栅相位图, 如图 1(b) 所示, 两束光分别入射 SLM 左右两个位置, 生成两束拓扑荷不同的待测涡旋光和参考涡旋光, 光强度相同。实验光路如图 1(a) 所示, He-Ne 激光器 (波长 632.8 nm) 发出的光束经透镜 L1、L2 扩束准直, 通过 BS1 分成两路, 分别入射 SLM 的液晶表面左右两侧转换为涡旋光束, 反

射后经过小孔滤出 1 级光。由 BS1 射出的涡旋光先经过偏振片 P3 滤除杂光, 再经过 BS3 分成竖直和水平两束光, 分别经过反射镜 M5 反射和三棱镜 TP1 反转光束后回到 BS3。同理, 由 M2 反射的涡旋光经过 BS2 分束, 水平方向的光经过三棱镜 TP2 发生反转, 与经 M3 反射回的竖直方向的光干涉。最终两路形成的干涉光经 BS4 再次叠加进入 CCD 中。

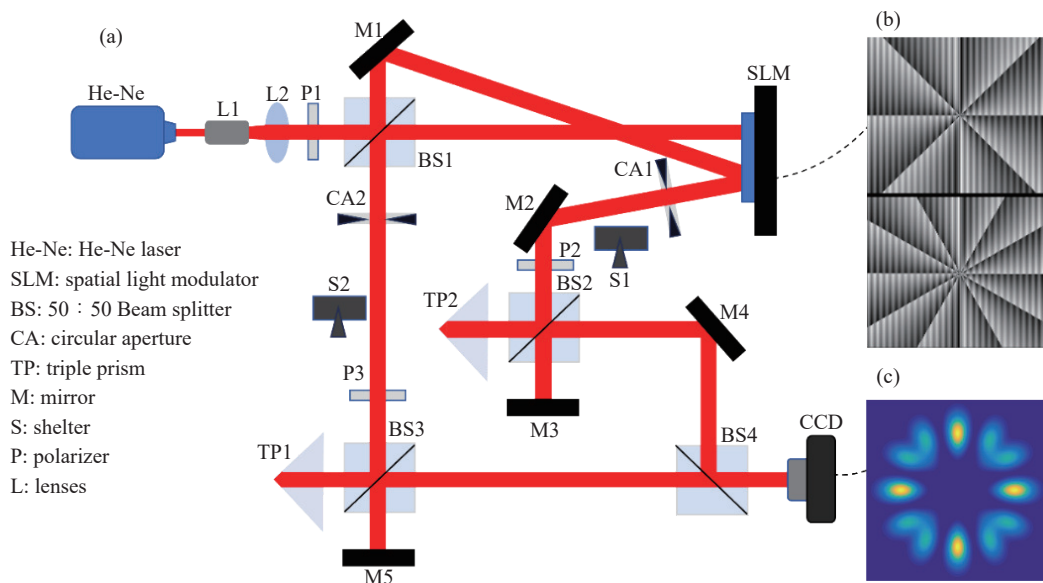


图 1 拓扑荷差值法测量光路图

Fig. 1 Topological load difference method measures the optical path diagram

一束光分成拓扑荷值不同的待测涡旋光和参考涡旋光, 由拓扑荷值相差 n 的两个(3)式分别来表示, 两束光经过光路后最终在 CCD 处进行强度叠加。由于两束光强度相近, 为便于计算取振幅项相等 $R_l(r) = R_{l-n}(r)$, 最终得到的光场强度分布为:

$$I(r, \theta) = 4|R_l(r)|^2 \{1 + \cos[(2l-n)\theta] \cos(n\theta)\},$$

其中 n 为拓扑荷差值。由 (4) 式求导可得光强分布中的极大值条件:

$$\theta = \frac{2k_1\pi}{2l-n} = \frac{2k_2\pi}{n}, \text{ or } \theta = \frac{(2k_1+1)\pi}{2l-n} = \frac{(2k_2+1)\pi}{n},$$

其中 k_1, k_2 为整数, 代入 (4) 式可得极大值 $I_{\max} = 8|R_l(r)|^2$ 。极小值条件为:

$$\theta = \frac{(2k_1+1)\pi}{2l-n} = \frac{2k_2\pi}{n}, \text{ or } \theta = \frac{2k_1\pi}{2l-n} = \frac{(2k_2+1)\pi}{n},$$

其中 k_1, k_2 为整数, 代入 (4) 式可得极小值 $I_{\min} = 0$ 。

以拓扑荷值为 6 的待测涡旋光为例, 当拓扑荷差值 n 为 2 时, 待测涡旋光和参考涡旋光与自身共轭干涉的强度分布分别如图 2(a) 和图 2(b)

所示, 第一行为仿真结果, 第二行为实验结果, 第三行为光强分布仿真曲线。图 2(c) 为两者叠加后的强度分布。由于待测光束的拓扑荷值较大, 主要形成叠加分布的外圈, 而参考涡旋光束的拓扑荷值较小, 形成了叠加分布的内圈, 两者原本的干涉“花瓣数”不一样,

且均匀分布, 故外圈光斑间隔角度较小, 内圈光斑间隔角度较大, 内外光斑之间出现周期性的重合和错开, 形成类似差分尺的效果。在 2π 范围内, 内圈和外圈光斑每隔一定角度会发生完全重合, 出现亮度最强的光斑, 数量为 $2(l-n) - 2n = 2l - 4n$, 如图 2(c) 中的外圈点 1、4、7 和 10, 此时:

$$\frac{k_1}{l} = \frac{k_2}{l-n}, \quad k_1, k_2 \in \mathbb{Z},$$

当内外圈的暗斑重合时形成暗条纹, 数量为 $2(l-n)$; 当内圈光斑刚好在外圈两个光斑中间时, 会出现类似“蝴蝶翅膀”形状的光斑, 个数为 $2l - 2(l-n) = 2n$, 如图 2(c) 中的外圈点 2 和 3、5 和 6、8 和 9、11 和 12, 此时:

$$\frac{k_1 + \frac{1}{2}}{l} = \frac{k_2}{l-n}, \quad k_1, k_2 \in Z,$$

当内圈光斑不在外圈两个光斑中间，而是偏向其中一个光斑，“蝴蝶翅膀”会出现一强一弱的情况，如图 3(i) 中的 t1。

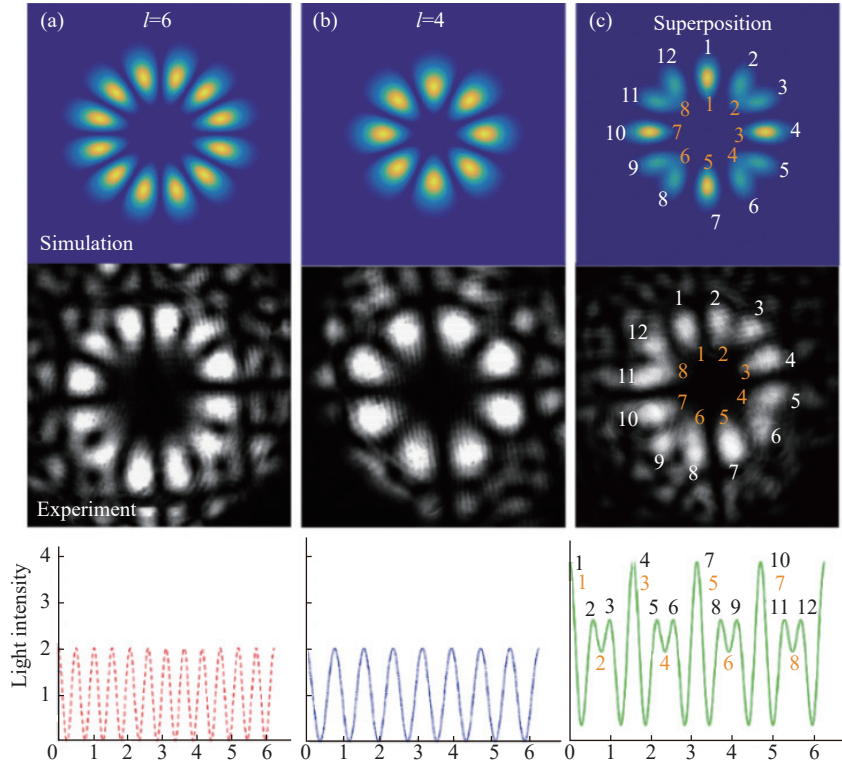


图 2 (a) $l=6$ 和 (b) $l=4$ 的涡旋光的共轭干涉态, (c) 为它们的叠加态

Fig. 2 Conjugate interference modes of vortex beams with OAM of (a) $l=6$ and (b) $l=4$, (c) is their superposition

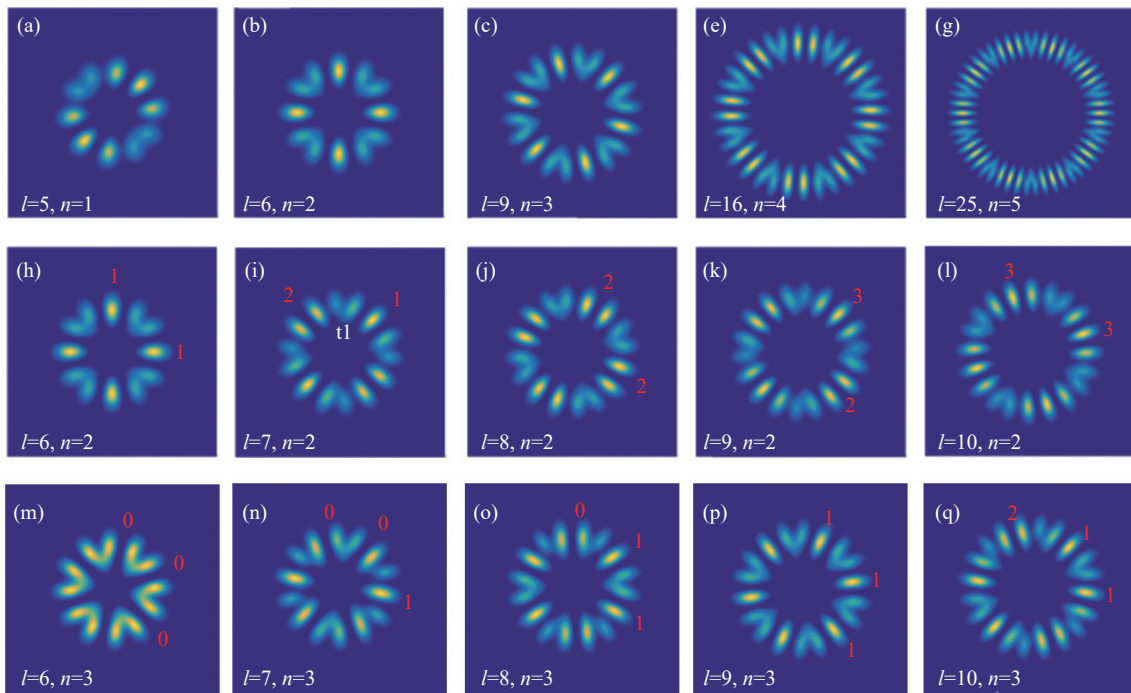


图 3 不同拓扑荷与差值的强度分布图

Fig. 3 Intensity distribution of different topological loads and differences

由于花瓣状干涉图中花瓣个数是拓扑荷值的两倍, 因此差值法中 $0\sim\pi$ 与 $\pi\sim 2\pi$ 的图像完全一致。如图 3(h)~(q), 图中红色数字代表相邻两个“蝴蝶翅膀”中间光斑的个数, 从一个“蝴蝶翅膀”开始到另一个“蝴蝶翅膀”开始可看做一个周期。当差值一定时, 随着拓扑荷的增加, 两个“蝴蝶翅膀”中间光斑的个数是依次增加的。当待测涡旋光的拓扑荷数刚好是差值 n 的整数倍, 则每个周期中间光斑数量相同, 如图 3(h)、3(j)、3(l)、3(m)、3(p) 所示。当所要测量的涡旋光的拓扑荷数无法被 n 整除, 此时每个周期的光斑数量可能不同, 如图 3(i)、3(k)、3(n)、3(o)、3(q)。因此在进行涡旋光拓扑荷差值法测量时, 可以调整差值来检查每个周期的光斑个数是否相等, 届时再求出涡旋光拓扑荷。如图 3(k), 拓扑荷为 9 差值为 2 时, 各周期光斑数量不同, 当调整差值为 3 时得到各周期光斑数量相同的 3(c); 也可保持拓扑荷差值不变, 调节叉状光栅相位图, 将待测涡旋光拓扑荷降低 1, 观察差值法直到每个周期的光斑数量都一致时, 求出待测涡旋光的拓扑荷。例如图 4(a) 中的强度分布图不具有周期性规律, 此时可将待测涡旋光拓扑荷降低 1, 再次进行叠加得到 4(b), 由此可推出待测涡旋光的拓扑荷值为 7。

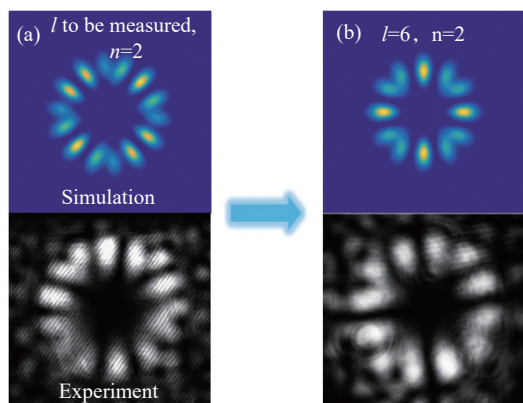


图 4 差值 $n=2$, (a) l 待测和 (b) $l=4$ 的涡旋光的强度分布图

Fig. 4 Intensity distribution of vortex beams with a difference of $n=2$, (a) l to be measured, and (b) $l=4$

3 拓扑荷差值法应用

在远距离的自由空间光通讯中, 涡旋光由于可以携带不同的轨道角动量, 能够显著提升信道通讯容量, 因此得到越来越多的关注。然而, 涡旋

光在远距离自由传输时, 通常会面临光束尺寸随传输距离迅速增大以及大气湍流导致光束离轴和部分模糊的情况, 造成接收设备巨大且接收图样模糊难以识别的问题。针对于此, 本文所提出的拓扑荷差值法仅需接收小部分涡旋光即可检测涡旋光拓扑荷值, 在远距离自由空间光通讯方面具有潜在的应用。

离轴涡旋光具有围绕非中心光轴旋转的螺旋相位结构, 这将导致涡旋光束的光强和相位呈现非对称分布的情况如图 5(a), 并很有可能在较高阶拓扑荷的情况下由于局部强度分布能量小而难以辨别拓扑荷值, 如图 5(b) 所示。将待测涡旋光束拓扑荷值减小 2 得到参考涡旋光 5(c) 与参考干涉图 5(d), 通过拓扑荷差值法得到待测涡旋光与参考涡旋光的叠加分布如图 5(e) 所示, 在图 5(e) 的下半部分可以看到两个“蝴蝶翅膀”(t1、t2), 故一个周期内有三个亮斑, 差值为 2, 得到待检测的涡旋光拓扑荷为 6。

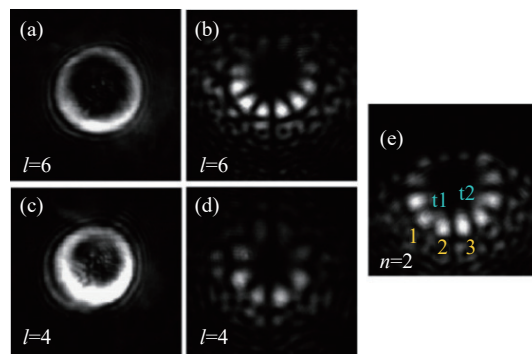


图 5 离轴涡旋光拓扑荷差值法测量过程

Fig. 5 Measurement process of the topological charge difference method of an off-axis vortex beam

离轴量在光学和激光通信中是指光束的中心位置相对于理想光轴的偏移量。离轴量的范围显著影响光束的聚焦和接收效果, 涉及焦点位置偏移、模糊成像、接收效率下降与误码率上升等关键因素, 这些直接影响光网络性能与信号质量。如图 6 所示, a 和 b 分别代表 x 轴和 y 轴方向的离轴率, 离轴率可以用离轴量与束宽的比值表示。图 6(a) 为 a 、 b 均为 0 时的差值法强度分布图, 随着 b 的增大, 整个图上半部分的光强逐渐减弱, 下半部分逐渐增强, 直到 y 轴方向离轴率 $b=0.5$ 时, 如图 6(f), 上半部分图光强趋向于 0, 此时依然可以看到清晰的周期性的光斑。

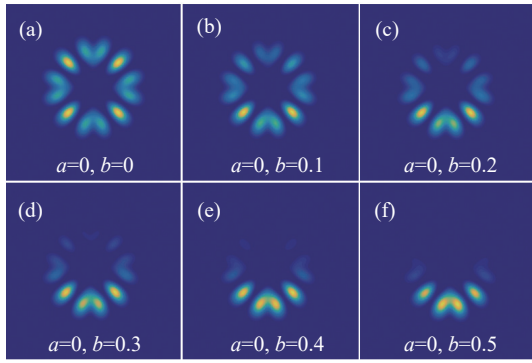


图 6 不同离轴率下的差值法强度分布图

Fig. 6 Intensity distribution of the difference method at different off-axis rates

如图 7(a) 所示, 用遮光板将光束下半部分遮挡, 再与自身共轭干涉得到干涉图 7(g), 同理得到 7(h), 将 7(g) 与 7(h) 叠加得到图 7(m), 图中仍然可以看到一个清晰完整的周期, 已知差值为 2, 一个周期亮条纹有 3 条, 计算出原始涡旋光拓

扑荷值为 6, 此时一个周期约占整个图像的 1/4。图 7(c)、7(d)、7(i)、7(j)、7(n) 为一半遮挡的实验结果图。当拓扑荷更大时, 涡旋光的束宽更大。遮挡四分之三的涡旋光如图 7(e)、7(f), 与自身共轭干涉得到干涉图 7(k)、7(l), 再叠加得到图 7(o), 已知差值 n 为 20, 故完整的差值法干涉图应该有 40 个周期, 根据图 7(o) 中显示一个周期有 11 条亮条纹, 推断出原始涡旋光拓扑荷为 220, 此时一个周期约占整个图像的 1/40。涡旋光拓扑荷越大, 图中的亮条纹就越多, 为了方便读取每个周期的亮条纹数, 应尽量使用更大的差值来确保有更多的周期。涡旋光至少有两个完全相同的周期, 理论上拓扑荷差值法只要有一个完整周期便可计算出原始涡旋光的拓扑荷, 故每束涡旋光均可只接收一半, 但最少应接收以强度分布图中心为圆心的 $1/2n$ 的圆弧大小的光, 才可准确计算出涡旋光的拓扑荷。

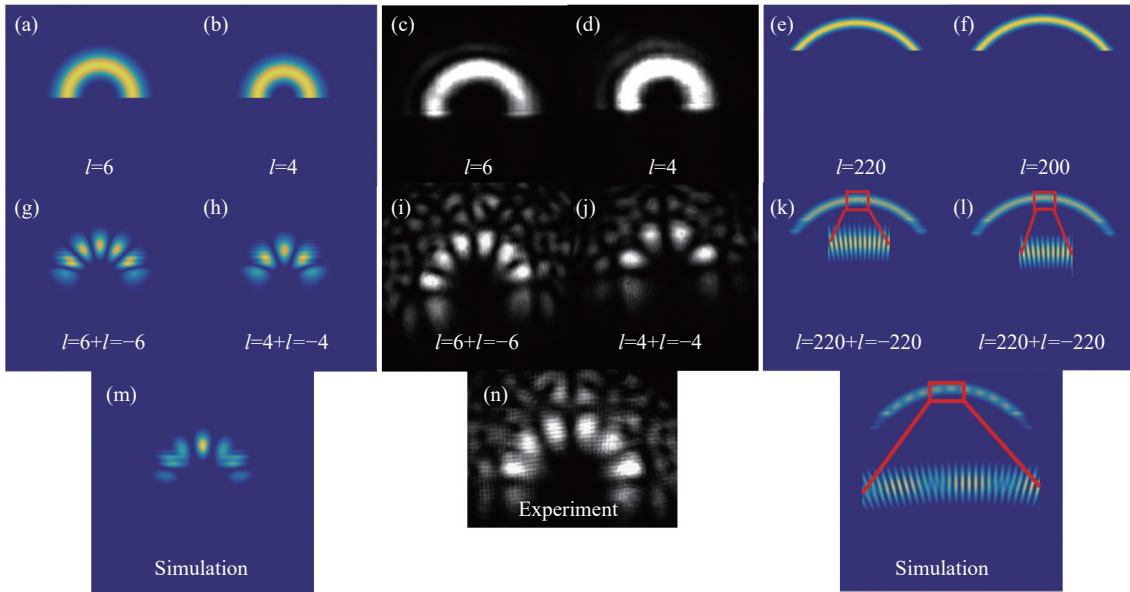


图 7 部分接收的涡旋光拓扑荷差值法强度分布图

Fig. 7 Intensity distribution of partially received vortex beams by topological charge difference method

拓扑荷差值法仅需接收小部分涡旋光即可检测涡旋光拓扑荷值, 这在高阶的、大尺寸的涡旋光测量方面是有非常大优势的, 在远距离自由空间光通讯方面具有潜在的巨大应用。不过由于拓扑荷差值法需要调节待测光束的拓扑荷值, 导致整体光路相对复杂, 实际应用时的系统体积偏大。因此需要将未来进一步优化光路设计。

4 结 论

本文从理论模拟和实验上研究了涡旋光轨道角动量的拓扑荷差值法。通过加载合成光栅生成两束拓扑荷不同的涡旋光, 再经过与自身共轭干涉并叠加之后得到具有周期性规律的强度分布

图, 通过一个周期的光斑个数计算出整个涡旋光的拓扑荷。当涡旋光拓扑荷更大时, 为了方便计算出完整的涡旋光的拓扑荷, 需使用更大的差值来保证每个周期的光斑数量尽量少。面对大口径的涡旋光时, 理论上最少可以只接收 $1/2n$ 的圆弧大小的部分, 通过差值与一个周期的光斑个数得到整个涡旋光的拓扑荷。面对离轴光束时, 涡旋光的光强分布通常不均匀。能根据拓扑荷差值法提供的部分清晰的分布周期, 推算出整个涡旋光的拓扑荷。该方法在拓扑荷值为 6、差值为 2、

离轴率范围 0~50% 的情况下, 仍能保持较高的拓扑荷辨识精度。与传统方法相比, 拓扑荷差值法的优势在于不再局限于完整清晰的光束, 有助于提高系统的稳定性和可靠性, 为复杂光学系统的精准测量提供有力支持。未来, 随着该方法的进一步优化和在实际应用中的验证, 它有望突破传统光通信的瓶颈, 特别是在需要高带宽和远距离传输的场景中, 实现对复杂光场中涡旋光的高效检测和解调, 在光通信、量子信息处理和光学成像等前沿领域发挥重要作用。

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] CHEN H, ZHANG P, HE SH, *et al.*. Average capacity of an underwater wireless communication link with the quasi-Airy hypergeometric-Gaussian vortex beam based on a modified channel model[J]. *Optics Express*, 2023, 31(15): 24067-24084.
- [3] BISMI B S, AZEEM S. Design and analysis of DPSK, QPSK modulations in underwater optical communication using free space optics[J]. *Wireless Personal Communications*, 2023, 132(2): 1487-1502.
- [4] WANG X W, NIE ZH Q, LIANG Y, *et al.*. Recent advances on optical vortex generation[J]. *Nanophotonics*, 2018, 7(9): 1533-1556.
- [5] KAUR S, SACHDEVA S, SINDHWANI M. 400 Gb/s free space optical communication (FSOC) system using OAM multiplexing and PDM-QPSK with DSP[J]. *Journal of Optical Communications*, 2024, 45(4): 917-923.
- [6] VASAVA P B, LAPSIWALA P B. Investigation of link due to atmospheric turbulence in free space optical communication for optical wireless terrestrial networks[J]. *Journal of Optical Communications*, 2024, 45(4): 795-808.
- [7] SAVIDHAN S C S, NAIK R P, ACHARYA U S. Performance analysis of underwater vertical wireless optical communication links using selection combining[J]. *Applied Optics*, 2023, 62(31): 8229-8234. (查阅网上资料, 标黄信息不确定, 请确认).
- [8] SINGH M, LAL SINGH M, SINGH R, *et al.*. Comprehensive experimental and statistical analysis of the effects of salinity gradient, temperature gradient, air bubbles on the performance of underwater wireless optical communication link[J]. *Journal of Modern Optics*, 2022, 69(17): 978-994.
- [9] KHONINA S N, USTINOV A V. Binary multi-order diffraction optical elements with variable fill factor for the formation and detection of optical vortices of arbitrary order[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(30): 8227-8236.
- [10] SAVELYEV D, DEGTYAREV S. Features of the optical vortices diffraction on silicon ring gratings[J]. *Optical Memory and Neural Networks*, 2022, 31(S1): 55-66.
- [11] VLASOV S N, KOPOSOVA E V. Diffraction of wave beams from a reflective grating[J]. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2023, 66(5-6): 345-356.
- [12] 庄京秋, 熊晗, 虞天成, 等. 基于软边小孔的涡旋光轨道角动量检测研究[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(12): 1394-1405.
ZHUNG J Q, XIONG H, YU T CH, *et al.*. Research on Angular momentum detection of Vortex optical orbit based on Small holes with soft edges[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(12): 1394-1405. (in Chinese).
- [13] 黎芳, 李润豪, 杨傲, 等. 利用涡旋光轨道角动量的 8 进制数据传输[J]. *激光与红外*, 2024, 54(6): 885-890.
LI F, LI R H, YANG A, *et al.*. Octal data transmission utilizing orbital angular momentum of the vortex light[J]. *Laser & Infrared*, 2024, 54(6): 885-890. (in Chinese).
- [14] 袁小聪, 贾平, 雷霆, 等. 光学旋涡与轨道角动量光通信[J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2014, 31(4): 331-346.
YUAN X C, JIA P, LEI T, *et al.*. Optical vortices and optical communication with orbital angular momentum[J]. *Journal of Shenzhen University (Science and Engineering)*, 2014, 31(4): 331-346. (in Chinese).

- [15] 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. (in Chinese).
- [16] 陆健能. 涡旋光束的轨道角动量测量方法研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2020.
LU J N. Research on orbital angular momentum measurement method of vortex beam[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2020. (in Chinese)([查阅网上资料, 未找到对应的英文翻译, 请确认](#)).
- [17] 邹文康, 杨春勇, 侯金, 等. 环形渐变型光栅用于涡旋光束拓扑荷数测量的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(14): 140501.
ZOU W K, YANG CH Y, HOU J, *et al.*. Measurement of topological charges for vortex beams using gradually-changing-period annular gratings[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(14): 140501. (in Chinese).
- [18] 侯政诚, 张明明, 白胜闯, 等. 一维阵列涡旋光束在海面大气中的传输特性[J]. 中国光学(中英文), 2024, 17(2): 300-311.
HOU ZH CH, ZHANG M M, BAI SH CH, *et al.*. Propagation properties of one-dimensional array vortex beams in a marine atmosphere[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(2): 300-311. (in Chinese).
- [19] 杨增浩, 程科, 黄宏伟, 等. 杂化偏振涡旋合成光束阵列的轨道角动量谱(英文)[J]. 中国光学(中英文), 2023, 16(6): 1501-1511.
YANG C H, CHENG K, HUANG H W, *et al.*. Orbital-angular-momentum spectra in coherent optical vortex beam arrays with hybrid states of polarization[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(6): 1501-1511.
- [20] YAN W X, CHEN ZH ZH, LONG X, *et al.*. Iso-propagation vortices with OAM-independent size and divergence toward future faster optical communications[J]. *Advanced Photonics*, 2024, 6(3): 049801.
- [21] 刘慎哲, 宋镇江, 黄秀军, 等. 离轴高阶贝塞尔-高斯涡旋光束的传输分析[J]. 大气与环境光学学报, 2019, 14(6): 401-410.
LIU SH ZH, SONG ZH J, HUANG X J, *et al.*. Transmission analysis of off-axis high order Bessel-Gaussian vortex beam[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2019, 14(6): 401-410. (in Chinese).
- [22] VAITY P, BANERJI J, SINGH R P. Measuring the topological charge of an optical vortex by using a tilted convex lens[J]. *Physics Letters A*, 2013, 377(15): 1154-1156.
- [23] 夏豪杰, 谷容睿, 潘成亮, 等. 涡旋光位移干涉测量方法与信号处理[J]. 光学精密工程, 2020, 28(9): 1905-1912.
XIA H J, GU R R, PAN CH L, *et al.*. Signal processing method for displacement measurement interferometry using vortex beams[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(9): 1905-1912. (in Chinese).
- [24] 杨启航, 李盼, 杨焱, 等. 空间光调制器模拟光栅产生高阶和分数阶涡旋光束[J]. 光学精密工程, 2023, 31(19): 2809-2817.
YANG Q H, LI P, YANG H, *et al.*. Generation of high-order and fractional vortex beams using gratings simulated by spatial light modulators[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(19): 2809-2817. (in Chinese).
- [25] NIV A, BIENER G, KLEINER V, *et al.*. Manipulation of the Pancharatnam phase in vectorial vortices[J]. *Optics Express*, 2006, 14(10): 4208-4220.
- [26] 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.

作者简介:



王华鑫(1998—), 男, 河南商丘人, 硕士研究生, 主要从事光束变换和涡旋光方面的研究。E-mail: 1326773909@qq.com



熊 晗(1980—), 男, 江西高安人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 2015年01月毕业于苏州大学现代光学技术研究所光学工程方向, 获工学博士学位, 主要从事高功率激光和涡旋光方面的研究。E-mail: xh1980xh@126.com