

贝塞尔光束自重建的理论模拟与实验验证

谢家俊, 许杭史, 余文慧, 胡睿, 屈军乐, 刘丽炜*

深圳大学物理与光电工程学院教育部/广东省光电子器件与系统重点实验室, 广东 深圳 518060

摘要 贝塞尔光束具有无衍射、自重建等特性, 在光镊、生物成像等领域具有重要的应用价值。基于角谱理论, 分析了贝塞尔光束被障碍物遮挡后的自重建行为, 提出利用互相关系数来表征贝塞尔重建光束和原光束截面光强分布的相似性, 从而在理论模拟中确定恢复距离, 并得到障碍物不同参数对贝塞尔光束自重建的影响。理论模拟结果表明, 恢复距离和障碍物大小并非简单的线性关系, 障碍物只有在阻挡更多的光束旁瓣时, 恢复距离才会增加, 而且离轴障碍物比轴上障碍物需要更长的恢复距离; 对于轴上障碍物而言, 当其尺寸小于高阶贝塞尔光束的中空区域时, 高阶贝塞尔光束有着更强的自愈能力。同时进行了实验验证, 利用空间光调制器产生可调控的贝塞尔光束用于验证仿真结果, 实验结果与仿真结果吻合, 说明基于角谱理论的互相关系数法可以用于精准验证贝塞尔光束的自重建特性。

关键词 医用光学与生物技术; 贝塞尔光束; 自重建; 角谱理论; 空间光调制器

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0617021

Numerical Simulation and Experimental Confirmation on Reconstruction of Bessel Beam

Xie Jiajun, Xu Hangshi, Yu Wenhui, Hu Rui, Qu Junle, Liu Liwei*

Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

Abstract The Bessel beam has the characteristics of non-diffraction and reconstruction, and has important application value in the fields such as optical tweezers and biological imaging. Based on the angular spectrum theory, the reconstruction behavior of the Bessel beam blocked by obstacles is analyzed, and the cross-correlation coefficient is used to characterize the similarity of the cross-section intensity distributions of the reconstructed Bessel beam and the original one, thus to determine the recovery distance in the simulation, and get the influence of different obstacles on Bessel beam reconstruction. The simulation results show that the relationship between the recovery distance and the obstacle size is not simply linear. The recovery distance will only increase when the obstacle blocks more sidelobes and the off-axis obstacle causes longer recovery distance than that of the on-axis obstacle. For on-axis obstacles, when their sizes are smaller than the hollow areas of the high-order Bessel beam, the high-order Bessel beam has a stronger self-healing ability. In the experiment, the spatial light modulator is used to generate a flexible Bessel beam to verify the simulation results. The experimental results are in good agreement with the simulation results, which indicates that the cross-correlation method based on the angular spectrum theory can accurately simulate the reconstruction characteristics of Bessel beam.

Key words medical optics and biotechnology; Bessel beam; reconstruction; angular spectrum theory; spatial light modulator

收稿日期: 2021-12-01; 修回日期: 2022-01-20; 录用日期: 2022-01-24

基金项目: 国家自然科学基金(61935012/61835009, 62175163, 61961136005)、深圳市科技计划国际合作项目(GJHZ20190822095420249)、深圳市重点项目(JCYJ20200109105404067)。

通信作者: liulw@szu.edu.cn

1 引言

自 Durnin 等^[1]于 1987 年提出“无衍射光束”以来,贝塞尔(Bessel)光束作为“无衍射光束”的主要一员,因其在传播过程中具有保持光场分布、克服障碍进行自重建的能力,吸引了国内外研究人员的广泛关注。贝塞尔光束的自重建性质已被用于光学“体成像”^[2-4]、光镊^[5]和非线性光学^[6-7]等应用领域。

2008 年, Litvin 等^[8]根据圆锥波理论提出零阶贝塞尔光束自重建的简化模型,对零阶贝塞尔光束经过不同障碍物的自重建行为进行了仿真和实验验证。2011 年,张前安等^[9]由汉克尔波理论分析高阶贝塞尔光束的重建特性并利用 Zemax 软件进行模拟仿真。2012 年, Chu^[10]基于巴比涅原理给出了贝塞尔光束自重建的物理解释,同时发现自重建贝塞尔光束将出现比原光束更大的光场强度的现象。2017 年, Aiello 等^[11]证实了受阻光束的自重建特性不限于无衍射光束,并且证明无衍射光束的重建是光强度与相位的同时重建。虽然人们对贝塞尔光束做了近乎全面的理论和实验研究,但在建模仿真的灵活性提升方面报道较少。本文提出基于角谱理论的互相关系数法来研究贝塞尔光束的自重建特性。角谱理论在傍轴近似条件下可以很好地描述衍射现象^[12];同时利用互相关系数定义自重建贝塞尔光束的截面强度与原光束之间的相似性,该系数量化了贝塞尔光束的自重建能力。角谱理论和互相关系数法两者结合可准确地分析轴棱锥产生的贝塞尔光束被障碍物阻挡后的自重建光强分布及恢复距离随障碍物变化的关系。

本文从仿真模拟和实验验证两个方面,对贝塞尔光束经过不同障碍物后的自重建行为进行了研究:仿真过程中,各项参数可以灵活调节,如在轴上或离轴

处设置不同种类和大小的障碍物来研究不同参数的贝塞尔光束的自重建特性,同时比较不同阶数的贝塞尔光束的自重建能力;实验中利用空间光调制器(spatial light modulator, SLM)加载涡旋光束相位与轴棱锥相位的叠加相位全息图,从而调制高斯光束以产生可调控的贝塞尔光束并用于验证仿真结果。实验结果与理论模拟结果吻合得较好,表明基于角谱理论的互相关系数法具有准确性,为贝塞尔光束的自重建特性的研究提供了一种方便的手段。

2 理论分析

理想贝塞尔光束的生成需要无限大的能量,受限于光学器件孔径以及入射光能量,在实际应用中往往生成近似理想的贝塞尔光束,称之为高斯-贝塞尔光束,本文中的贝塞尔光束都指的是高斯-贝塞尔光束。

通过对入射 SLM 的高斯光束进行相位调制,从而产生参数可调谐的贝塞尔光束。加载在 SLM 上的相位全息图是轴棱锥相位与涡旋光束相位的叠加相位全息图^[13-15],如图 1(a)所示。这里 SLM 产生贝塞尔光束等同于半径为 ω_0 的准直涡旋光束入射锥角为 γ 的轴棱锥时,光束沿着圆锥角 θ 在后方区域会聚形成贝塞尔光束,如图 1(b)所示。根据图 1(b),在以 z 轴为传输方向的笛卡儿坐标系中,半径为 ω_0 的准直涡旋光束的复振幅可以表示为^[16]

$$E(x, y) = E_0 \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\omega_0} \right)^l \exp \left[-\frac{x^2 + y^2}{\omega_0} \right] \exp(i l \varphi), \quad (1)$$

式中: E_0 是常数项; ω_0 是光束半径; l 是涡旋光束所携带的拓扑电荷数;方位角 $\varphi = \arctan(y/x)$ 。基于角谱理论,涡旋光束垂直入射轴棱锥后,在轴棱锥后方距离 z 处生成的光束的复振幅可表示为^[17]

$$E(x, y, z) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F} [E(x, y) T] \exp \left[i k z \sqrt{1 - (\lambda u)^2 - (\lambda v)^2} \right] \right\}, \quad (2)$$

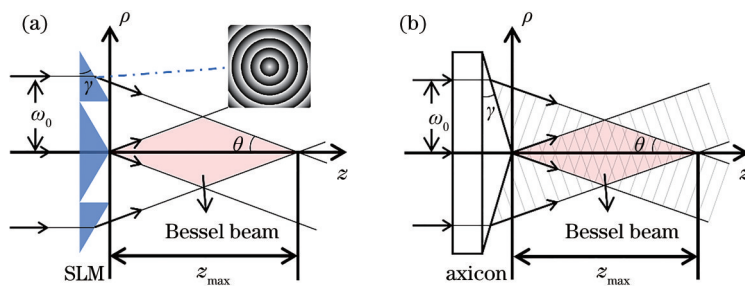


图 1 生成贝塞尔光束的示意图。(a) SLM 装置示意图; (b) 轴棱锥装置示意图

Fig. 1 Diagram of generation of Bessel beams. (a) Schematic diagram of SLM device; (b) schematic diagram of axicon device

式中： $T = \exp[-ik(n-1)(\tan\gamma)\rho]$ 是轴棱锥的复振幅透过率函数， $\rho^2 = x^2 + y^2$ ， n 和 γ 分别是轴棱锥的折射率和锥角； $k = 2\pi/\lambda$ 是波矢大小， λ 是激光波长； u 和 v 是频域空间坐标， $\mathcal{F}[\cdot]$ 和 $\mathcal{F}^{-1}[\cdot]$ 分别是傅里叶变换和傅里叶逆变换。此时截面光强度分布 $I(x, y, z) = E(x, y, z) E^*(x, y, z)$ ， $E^*(x, y, z)$

是 $E(x, y, z)$ 的共轭复数。

随后，生成的贝塞尔光束被不透明障碍物遮挡。不透明障碍物的复振幅透射率函数表示为只由 0 和 1 组成的二值矩阵 $O(x, y)$ ，由角谱理论得到，障碍物后距离 d 处的自重建光束复振幅 $E(x, y, d)$ 为

$$E(x, y, d) = \mathcal{F}^{-1}\left\{\mathcal{F}\left[E(x, y, z) O(x, y)\right] \exp\left[ikd\sqrt{1-(\lambda u)^2-(\lambda v)^2}\right]\right\}, \quad (3)$$

同样可得到自重建光束的截面光强度分布 $R(x, y, d) = E(x, y, d) E^*(x, y, d)$ 。

利用互相关系数 C_{cross} 来表示原始贝塞尔光束 $I(x, y, z)$ 与自重建距离 d 的贝塞尔光束 $R(x, y, d)$ 之间的相似性，随着自重建距离增加，当互相关系数大于 0.9 时，确定此时的自重建距离为恢复距离。互相关系数表示为

$$C_{\text{cross}} = \frac{\sum_m \sum_n (I_{mn} - \bar{I})(R_{mn} - \bar{R})}{\sqrt{\left[\sum_m \sum_n (I_{mn} - \bar{I})^2\right] \left[\sum_m \sum_n (R_{mn} - \bar{R})^2\right]}}, \quad (4)$$

式中： \bar{I} 是二维矩阵 $I(x, y, z)$ 的平均值； \bar{R} 是二维矩

阵 $R(x, y, d)$ 的平均值； m 和 n 分别是 $I(x, y)$ 和 $R(x, y)$ 的行数和列数。

3 理论模拟

3.1 受阻贝塞尔光束的恢复距离

根据图 1 及 (1)~(4) 式，设置仿真参数：光源波长为 721 nm；准直涡旋光束的半径 $\omega_0 = 0.7$ mm 且拓扑电荷数 $l = 0$ ；光束入射到锥角为 1° 、折射率为 1.51 的轴棱锥；在轴棱锥出射面后 30 mm 处设置半径为 $100 \mu\text{m}$ 的轴上圆形障碍物。以障碍物为 z 轴起点，图 2 为圆形障碍物前后不同位置处的光强分布模拟图。

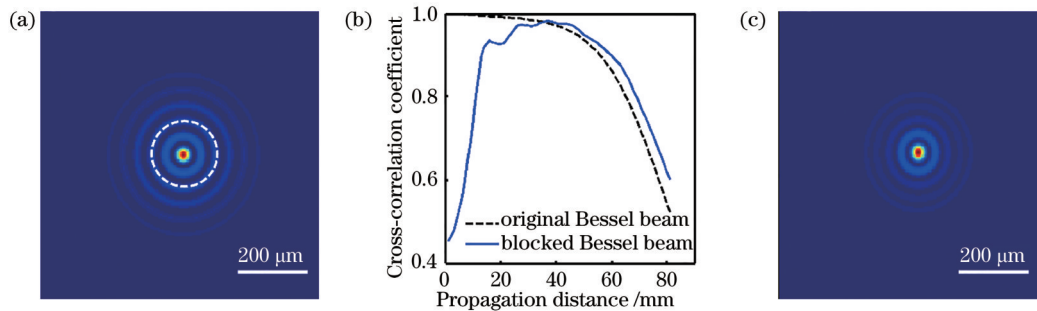


图 2 零级贝塞尔光束被半径 $100 \mu\text{m}$ 的圆形轴上障碍物阻挡后，互相关系数与传播距离的关系曲线及自重建光束的截面光强分布。(a) $z = -1$ mm 处自重建贝塞尔光束的光场分布；(b) 自重建光场与原光场的互相关系数随传播距离变化的曲线图；(c) $z = 14$ mm 处自重建贝塞尔光束的光场分布

Fig. 2 Relationship between cross-correlation coefficient and propagation distance and cross-sectional intensity distribution of reconstructed Bessel beam as zeroth-order Bessel beam is blocked by on-axis circular obstacle with radius of $100 \mu\text{m}$. (a) Cross-sectional intensity distribution of reconstructed Bessel beam at $z = -1$ mm; (b) relationship between cross-correlation coefficient of reconstructed Bessel beam and original one and propagation distance; (c) cross-sectional intensity distribution of reconstructed Bessel beam at $z = 14$ mm

零阶贝塞尔光束的截面光强分布如图 2(a) 所示，白色圆形虚线框为轴上障碍物的边缘。当受阻零阶贝塞尔光束继续传播并逐渐自重建时，根据 (4) 式计算自重建贝塞尔光束与原光束之间的互相关系数，互相关系数与传播距离的关系曲线如图 2(b) 所示。随着传播距离逐渐增大，互相关系数

由于自重建贝塞尔光束逐渐复原而逐步增大，经过波动阶段后，随着传播距离超过贝塞尔光束的“无衍射距离”，自重建光束失去保持光场分布的能力，逐渐形成一个环形光场，此时相关系数逐步下降，如图 2(b) 实曲线所示。将障碍物的半径大小设置为零，即原光束不受遮挡，此时互相关系数与自重

建距离的关系曲线如图 2(b)虚曲线所示,两条曲线的下降位置表示了贝塞尔光束的无衍射范围。图 2(b)中,当互相关系数大于 0.9 时,确定此时传播距离 $z = 14 \text{ mm}$ 为受阻贝塞尔光束的恢复距离。这里恢复距离与最小重建距离 $z_{\min} = 11.23 \text{ mm}$ 不匹配^[8],因为在最小重建距离处重建零阶贝塞尔光束与原光束之间的相似度不是最高。

3.2 轴上障碍物的尺寸对贝塞尔光束恢复距离的影响

改变轴上圆形障碍物的半径,确定对应的恢复距离,该恢复距离是关于圆形障碍物半径的函数,如图 3(a)所示。此外,用方形障碍物代替了圆形障碍物,并重复上述仿真过程,结果如图 3(b)所示。

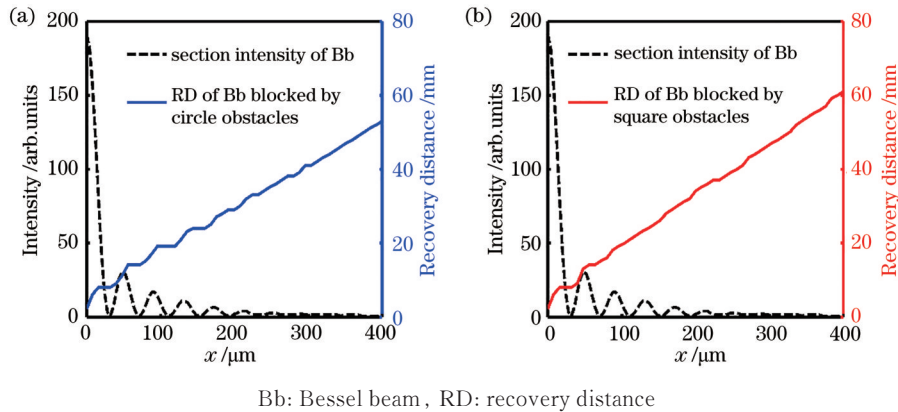


图 3 受阻零阶贝塞尔光束的恢复距离随障碍物尺寸变化的关系图。(a)圆形障碍物;(b)方形障碍物

Fig. 3 Relationship between recovery distance of blocked zeroth-order Bessel beam and sizes of obstacles. (a) Circle obstacles; (b) square obstacles

图 3(a)的实曲线表明,恢复距离的增加与障碍物的半径增长成正比,但恢复距离与障碍物的半径之间并非简单的线性关系,恢复距离随着障碍物半径的增长呈现步进式的增加。图 3(a)的虚曲线为零阶贝塞尔光束的截面强度图,基于两条曲线,恢复距离曲线的步进式增加行为解释如下:随着障碍物的半径增大,当障碍物的新增区域遮挡零阶贝塞尔光束的中心亮斑或旁瓣时,恢复距离增加;当障碍物的新增区域恰好落入贝塞尔光束的黑暗环形区域,恢复距离保持不变;值得注意的是,步进式曲线的上升斜率逐渐下降,猜测其原因是障碍物面积

的相对增长率逐渐下降。将轴上圆形障碍物更改为轴上正方形障碍物,得到恢复距离与障碍物半径的变化关系,如图 3(b)实曲线所示。可以看出,图中相同尺寸的正方形障碍物有稍大的恢复距离,因为在仿真中,圆形障碍物被设置为相同尺寸的正方形障碍物的内接圆,因此相同尺寸下,正方形的轴上障碍物会遮挡更多的贝塞尔光束旁瓣。

随后,重复上述步骤,用相同方法研究了一阶贝塞尔光束的自愈能力。在模拟参数中将准直涡旋光束的拓扑电荷数设置为 1,其余参数保持不变,仿真结果如图 4 所示。一阶贝塞尔光束表现出与零阶贝

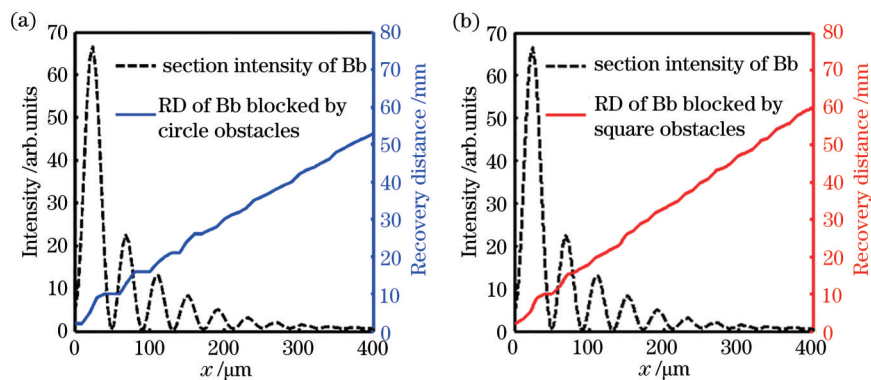


图 4 受阻一阶贝塞尔光束的恢复距离随障碍物尺寸变化的关系图。(a)圆形障碍物;(b)方形障碍物

Fig. 4 Relationship between recovery distance of blocked first-order Bessel beam and sizes of obstacles. (a) Circle obstacles; (b) square obstacles

塞尔光束相同的自重建特性,这里不再赘述。

3.3 离轴障碍物对贝塞尔光束恢复距离的影响

设置半径为 $100\ \mu\text{m}$ 的轴上圆障碍物,并逐渐增大离轴偏移量。得到仿真结果:在较小的离轴偏移量的前提下,离轴障碍物导致贝塞尔光束的恢复距离比轴上障碍物更长,与已报道文献结果符合^[9],结果如图 5 所示。

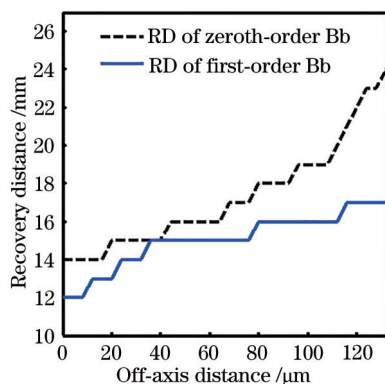


图 5 零阶和一阶贝塞尔光束所需的恢复距离随半径为 $100\ \mu\text{m}$ 的圆形障碍物的离轴偏移量改变的关系图

Fig. 5 Relationship between recovery distances needed for zeroth-order and first-order Bessel beams and off-axis offset of circle obstacle with radius of $100\ \mu\text{m}$

3.4 不同阶数贝塞尔光束的自愈能力

保持轴上圆障碍物的半径为 $100\ \mu\text{m}$,改变贝塞尔光束的阶数并依次得到其恢复距离。得到仿真结果如图 6 所示:贝塞尔光束所需自愈距离随阶数

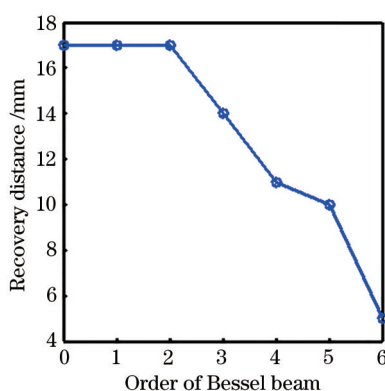


图 6 不同阶数的贝塞尔光束被半径 $100\ \mu\text{m}$ 的轴上圆形障碍物遮挡所需的恢复距离

Fig. 6 Recovery distances needed for different-order Bessel beams blocked by on-axis circle obstacle with radius of $100\ \mu\text{m}$

增长而下降,即高阶贝塞尔光束展示出更好的自重建能力,与已有报道文献符合^[9]。这是由于高阶贝

塞尔光束具有中空区域,当轴上障碍物尺寸小于中空区域时,其对高阶贝塞尔光束的能量遮挡比例更低,此时高阶贝塞尔光束展示出更好的自重建能力;当轴上障碍物尺寸大于中空区域时,高阶贝塞尔光束的恢复距离只取决于轴棱锥的锥角参数。

4 实验验证

实验光路如图 7 所示。单频连续激光器 (continuous laser) 输出波长为 $721\ \text{nm}$ 的线偏光,通过扩束器 (BE) 对激光束进行扩束准直后,形成了半径为 $1.0\ \text{mm}$ 的高斯光束。衰减片 (NF) 和半波片 (HWP) 改变高斯光束的光场强度和偏振态,以满足 SLM 的工作要求。SLM 通过加载涡旋光束相位与轴棱锥相位的叠加相位全息图,从而调制高斯光束以产生不同参数的贝塞尔光束。最终,由相机 (camera) 在物镜 (MO) 的像平面上接收到被菲林片遮挡的自重建贝塞尔光束的截面光强分布。

首先,通过相机获取原始、受阻及自重建的零阶贝塞尔光束和一阶贝塞尔光束的截面光强度分布。由于贝塞尔光束的中心亮斑和同心旁瓣较小,本文使用物镜将光束图样放大 12 倍。如图 8 所示,零阶贝塞尔光束被半径为 $100\ \mu\text{m}$ 的圆形障碍物遮挡时,实验观测的恢复距离为 $43\ \text{mm}$,与模拟仿真的恢复距离相差较大。因为在实验中,为了更加清晰地观察到实验参数对恢复距离的影响,在观察到贝塞尔光束的次级旁瓣恢复完整时,才确定此刻的重建距离为恢复距离。

其次,改变轴上障碍物的尺寸,观察其对贝塞尔光束恢复距离的影响,并用方形障碍物代替圆形障碍物进行重复实验,同时改变贝塞尔光束的阶数进行对比实验。实验结果如图 9 所示:在贝塞尔阶数确定的情况下,恢复距离的变化只与障碍物的尺寸变化成正比,与障碍物类型无关。本文在透明的菲林片上刻蚀不透光的油墨作为障碍物,但在障碍物尺寸大小的选取中考虑欠妥。更精确的实验方法是用数字微镜设备 (digital micromirror device, DMD) 代替障碍物,让 DMD 反射任意部分的贝塞尔光束,达到 DMD 作为可调参数障碍物的目的^[11]。

同时,在较小离轴偏移量的前提下,逐渐扩大半径为 $100\ \mu\text{m}$ 的圆形障碍物的离轴偏移量,并改变贝塞尔光束的阶数做重复实验。实验验证了更大的离轴量会导致更长的恢复距离,对于不同阶数的贝塞尔光束均是如此,如图 10 所示。

最后,保持轴上圆障碍物半径为 $100\ \mu\text{m}$,比较

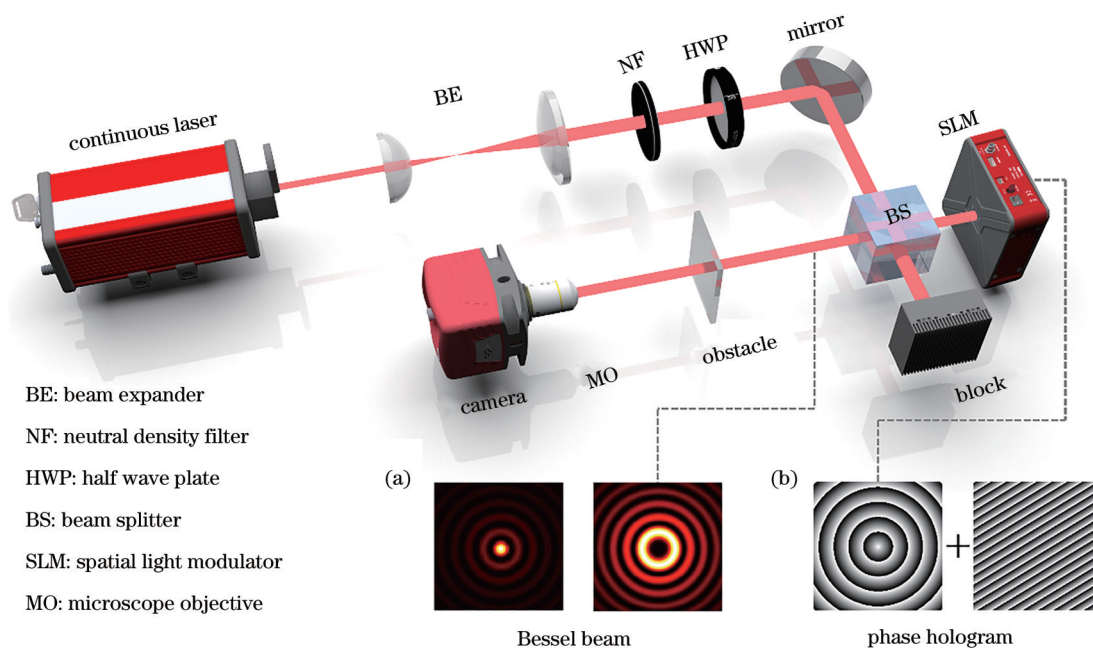


图7 实验系统图。(a)贝塞尔光束模拟图;(b)轴棱锥相位与涡旋光束相位的叠加相位全息图

Fig. 7 Schematic of experimental system. (a) Simulation diagram of Bessel beam; (b) superimposed phase hologram of axicon phase and vortex beam phase

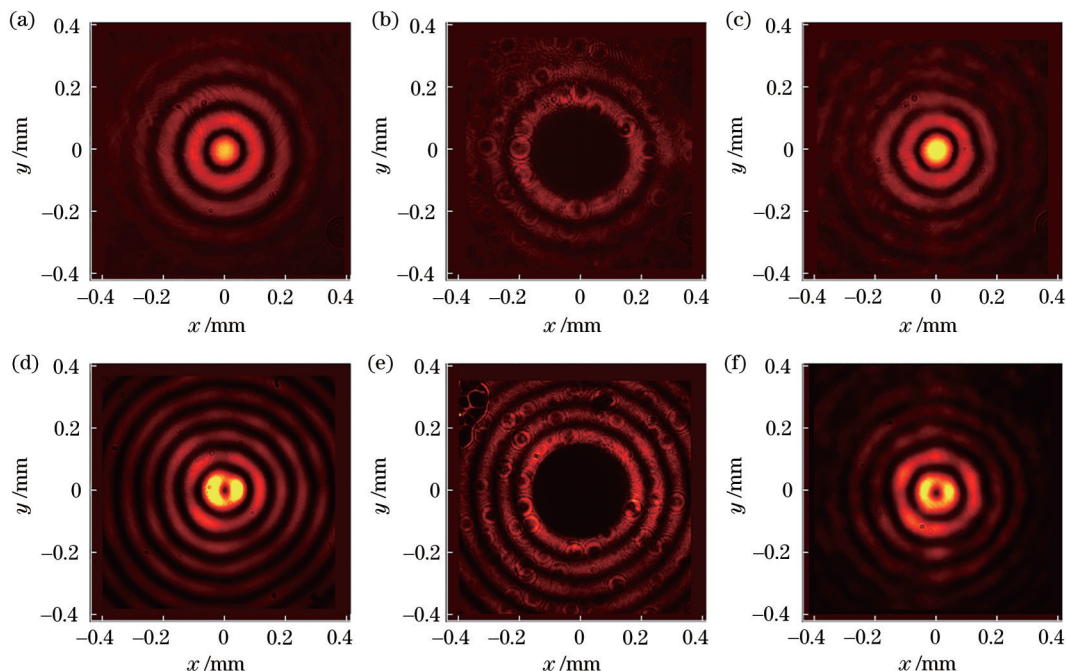


图8 不同情况下的贝塞尔光束的截面强度分布图。(a)原始零阶贝塞尔光束;(b)被半径为 $100\ \mu\text{m}$ 的轴上圆形障碍物阻挡的零阶贝塞尔光束;(c)在恢复距离为 $43\ \text{mm}$ 的自重建零阶贝塞尔光束;(d)原始一阶贝塞尔光束;(e)被半径为 $100\ \mu\text{m}$ 的圆形障碍物阻挡的一阶贝塞尔光束;(f)在恢复距离为 $42.5\ \text{mm}$ 的自重建一阶贝塞尔光束

Fig. 8 Cross section intensity distributions of Bessel beams at different situations. (a) Original zeroth-order Bessel beam; (b) zeroth-order Bessel beam blocked by on-axis circle obstacle with radius of $100\ \mu\text{m}$; (c) reconstructed Bessel beam with recovery distance of $43\ \text{mm}$; (d) original first-order Bessel beam; (e) first-order Bessel beam blocked by on-axis circle obstacle with radius of $100\ \mu\text{m}$; (f) reconstructed Bessel beam with recovery distance of $42.5\ \text{mm}$

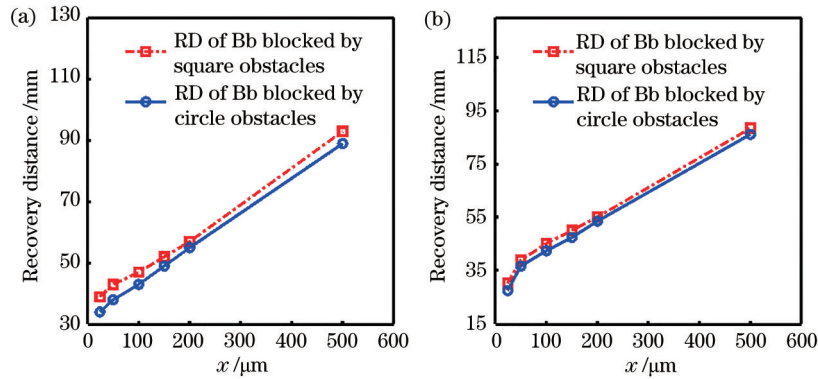


图 9 恢复距离与圆形和方形障碍物尺寸改变的关系曲线。(a)零阶贝塞尔光束;(b)一阶贝塞尔光束

Fig. 9 Relationship between recovery distances and sizes of circle and square obstacles. (a) Zeroth-order Bessel beam; (b) first-order Bessel beam

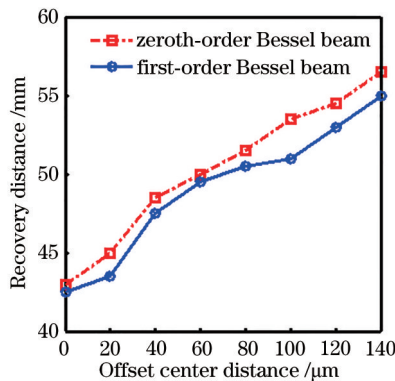


图 10 恢复距离与圆形障碍物(半径 100 μm)的离轴偏移量的关系曲线

Fig. 10 Relationship between recovery distance and off-axis offset of circle obstacle with radius of 100 μm

了不同阶数的贝塞尔光束的重建特性。结果与理论仿真结果吻合:对于轴上障碍物而言,高阶贝塞尔光束所需恢复距离更短,如图 11 所示。

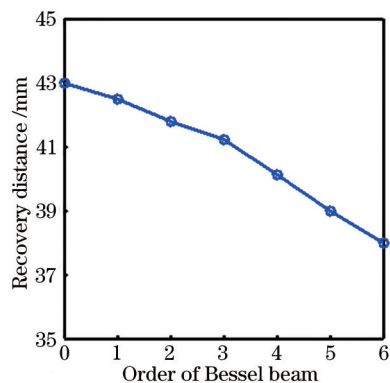


图 11 不同阶数的贝塞尔光束被轴上圆障碍物(半径 100 μm)遮挡所需的恢复距离

Fig. 11 Recovery distance needed for different-order Bessel beams blocked by on-axis circle obstacle with radius of 100 μm

5 结 论

对贝塞尔光束的自重建特性进行了研究。基于角谱理论,提出了用于确定受阻贝塞尔光束恢复距离的互相关系数法,在 MATLAB 软件上进行了数值仿真,并用空间光调制器产生的贝塞尔光束进行实验验证。仿真和实验结果表明:恢复距离与轴上圆形障碍物的半径之间并非简单的线性关系,而是随着障碍物半径的增长呈现步进式的增加。同时,得出与已报道文献相符合的结论,即高阶贝塞尔光束对于轴上障碍物而言具有较强的自愈能力,且离轴障碍物需要更长的恢复距离。此外,其他实验参数如贝塞尔光束的空间光束质量、障碍物的透光率等,也会影响贝塞尔光束的自重建特性,运用本文理论和实验方法,也可以研究这些参数的影响。

参 考 文 献

- [1] Durnin J, Miceli J J, Eberly J H. Diffraction-free beams[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(15): 1499-1501.
- [2] Fan J L, Rivera J A, Sun W, et al. High-speed volumetric two-photon fluorescence imaging of neurovascular dynamics[J]. Nature Communications, 2020, 11: 6020.
- [3] Chen B Y, Huang X S, Gou D Z, et al. Rapid volumetric imaging with Bessel-Beam three-photon microscopy[J]. Biomedical Optics Express, 2018, 9 (4): 1992-2000.
- [4] Wu J L, Liang Y J, Chen S, et al. Kilohertz two-photon fluorescence microscopy imaging of neural activity *in vivo*[J]. Nature Methods, 2020, 17(3):

- 287-290.
- [5] Gong L, Liu W W, Zhao Q, et al. Controllable light capsules employing modified Bessel-Gauss beams[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 29001.
- [6] Zhang P F, Phipps M E, Goodwin P M, et al. Light-sheet microscopy by confocal line scanning of dual-Bessel beams[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2016, 21(10): 100502.
- [7] Ouyang J Y, Li Z L, Liu T, et al. An extended-focus optical coherence tomography system based on circular dammann grating[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(20): 2007002.
欧阳君怡, 李中梁, 刘腾, 等. 基于圆环达曼光栅的长焦深光学相干层析成像系统[J]. *中国激光*, 2021, 48(20): 2007002.
- [8] Litvin I A, McLaren M G, Forbes A. Propagation of obstructed Bessel and Bessel-Gauss beams[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7062: 706218.
- [9] Zhang Q N, Wu F T, Zheng W T, et al. Self-reconstructing properties of high-order Bessel-Gauss beam[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2011, 41(10): 1131-1137.
张前安, 吴逢铁, 郑维涛, 等. 高阶贝塞尔-高斯光束的自重建特性[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2011, 41(10): 1131-1137.
- [10] Chu X. Analytical study on the self-healing property of Bessel beam[J]. *The European Physical Journal D*, 2012, 66(10): 259.
- [11] Aiello A, Agarwal G S, Paúr M, et al. Unraveling beam self-healing[J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): 19147-19157.
- [12] Ersoy O K. *Scalar diffraction theory*[M]//*Diffraction, Fourier optics and imaging*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2006: 41-62.
- [13] Aakhte M, Akhlaghi E A, Müller H A J. SSPIM: a beam shaping toolbox for structured selective plane illumination microscopy[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 10067.
- [14] McLeod J H. The axicon: a new type of optical element[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1954, 44(8): 592-597.
- [15] Liu X Q, Xue C X. Design of diffractive optical elements based on axicon and its light analysis[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(4): 040501.
刘晓庆, 薛常喜. 基于轴棱锥的衍射光学元件设计及其光场分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(4): 040501.
- [16] Arlt J, Dholakia K. Generation of high-order Bessel beams by use of an axicon[J]. *Optics Communications*, 2000, 177(1/2/3/4/5/6): 297-301.
- [17] Zheng J J, Yao B L, Yang Y L, et al. Investigation of Bessel beam propagation in scattering media with scalar diffraction method[J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(11): 112601-112605.