

离轴双涡旋的单光束在非局域介质中的传输特性

陈荣泉^{1*}, 王清²

¹闽南理工学院土木工程学院, 福建 泉州 362700;

²九江学院理学院, 江西 九江 332005

摘要 在非线性介质中, 离轴偏移涡旋光束的演化规律服从非局域、非线性薛定谔方程, 通过解析法可以得到初始光强和轨道角动量的表达式。采用分步傅里叶法数值模拟离轴涡旋位置、拓扑电荷和涡旋环流方向等因素对光束的临界功率、光束宽度、轨道角动量、相结构分布和传输方向的影响。结果表明, 选择适当的离轴涡旋位置和拓扑电荷, 双涡旋的单光束可以实现双涡旋结构的光强分布, 也可以倾斜传输。轨道角动量的大小不仅取决于传统的拓扑电荷, 也取决于离轴涡旋位置。因此, 此类双涡旋单光束的可控传播在光束的信息携带和传导中具有重要的理论指导意义和应用前景。

关键词 非线性光学; 非局域介质; 双涡旋; 拓扑电荷; 轨道角动量

中图分类号 O437 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2119001

Propagation Properties of Off-Axis Double Vortex Single Beam in Nonlocal Media

Chen Rongquan^{1*}, Wang Qing²

¹College of Civil Engineering, Minnan University of Science and Technology,
Quanzhou, Fujian 362700, China;

²College of Science, Jiujiang University, Jiujiang, Jiangxi 332005, China

Abstract In nonlinear media, the evolution of off-axis offset vortex beams obeys the non-local and nonlinear Schrodinger equation. The expressions of initial light intensity and orbital angular momentum can be obtained by analytical methods. The split-step Fourier method is used to numerically simulate the influence of factors, such as off-axis vortex position, topological charge, and vortex circulation direction on the critical power, beam width, orbital angular momentum, phase structure distribution, and transmission direction of the beam. The results show that by selecting the appropriate off-axis vortex position and topological charge, the single beam of the double vortex can achieve the light intensity distribution of the double vortex structure, and it can also transmit obliquely. The magnitude of the orbital angular momentum depends not only on the traditional topological charge, but also on the position of the off-axis vortex. Therefore, the controllable propagation of this type of double vortex single beam has important theoretical guiding significance and application prospects in the information carrying and transmission of the beam.

Key words nonlinear optics; nonlocal media; double vortex; topological charge; orbital angular momentum

OCIS codes 190.6135; 190.3270; 190.4370

收稿日期: 2020-12-14; 修回日期: 2021-02-04; 录用日期: 2021-03-04

基金项目: 福建省教育厅中青年教师教育科研项目(JAT190893)

通信作者: *jxgzcrq@163.com

1 引言

随着通信系统的飞速发展,高速度、大容量的信息传输是未来的发展趋势,其中孤子通信是实现大数据传输的有效途径,而且在近几十年引起了大批学者的重视。

众所周知,涡旋光束的轨道角动量(OAM)^[1]可承载信息,为此可以提高通信系统的数据容量,即对轨道角动量谱进行信息编码可以储存大量信息。相比于传统的二进制编码,涡旋光束的轨道角动量编码具有高的安全性、快的数据传输速率以及更大的容量^[2]。涡旋光束具有零中心强度^[3]、螺旋相位和携带 OAM 的特性,所以在各种非线性介质中的传播和操纵非常值得研究,在光镊、光学扳手和空间光通信等领域具有潜在的应用^[4]。2019年,Wang 等^[5]发现涡旋椭圆复合 Airy 孤子在非局部非线性介质中可以进行斜传播,这类似于光镊的效果。

近年来,在非局域介质中发现了各种类型的涡旋孤子,如非局域介质中的椭圆涡孤子^[6]、非局域非线性介质中的矢量涡旋孤子对^[7]、铅玻璃中的矢量涡孤子^[8]、向列相液晶中的涡孤子^[9]和光热涡孤

子^[10]以及分数阶涡旋光束^[11]等,利用上述涡旋孤子均取得了丰富的研究结果。

迄今为止,大部分的研究都集中在单个涡旋孤子,对于离轴涡旋光束^[12-17]的研究比较少,研究结果表明其也能在非局域介质中存在,而且发现涡旋暗核会发生移动,高阶离轴涡旋光束可以发生暗核分裂现象等。在上述研究的基础上,本文揭示双离轴涡旋的类高斯光束可以在非局域非线性介质中稳定传播,发现调节离轴位置和拓扑电荷可以控制涡旋光束的运动轨迹。

2 理论模型

根据惠更斯-菲涅耳原理,当光束在介质中传播时,光束的衍射展宽效应是普遍存在的。当光束在非线性介质中传播时,其折射率与光强分布有关,若中心光强越大,则折射率越大,光束越向中心靠拢,使得光束的束宽作非线性压缩。当非线性效应和光束本身的衍射效应平衡时,光束的宽度不变,此时形成稳定的光孤子。涡旋光束是具有螺旋状相位波前和轨道角动量的奇异光束。光束在非线性非局域介质中传播满足归一化非线性薛定谔方程^[18-19],表达式为

$$i \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \varphi + \varphi \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} R(x-x', y-y') |\varphi(x', y', z)|^2 dx' dy' = 0, \quad (1)$$

式中: z 为传输距离; φ 为光波函数; (x, y) 为空间坐标; (x', y') 为响应介质的坐标; R 为响应函数。双涡旋光波函数可以表示为

$$\varphi(x, y, z) = A [x + a + i(y + b)]^m [x + c + i(y + d)]^n \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2e^2}\right) \exp(-ikz), \quad (2)$$

式中: A 为振幅; m 和 n 为拓扑电荷; a, b, c 和 d 均为任意常数; k 为光波的相位因子; e 为光束宽度。高斯型响应函数可以表示为 $R(x, y) = \frac{1}{\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\sigma^2}\right)$,其中 σ 为响应函数的特征长度。光束输入的初始功率 P_0 是光强 $|\varphi|^2$ 的空间积分,表达式为

$$P_0 = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |\varphi|^2 dx dy. \quad (3)$$

轨道角动量 M 、光束宽度的最大值 e_m 和及非局域程度 δ 可分别表示为^[19]

$$M = \text{Im} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi^* \left(x \frac{\partial \varphi}{\partial y} - y \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) dx dy, \quad (4)$$

$$e_m = \sqrt{\frac{2 \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 |\varphi|^2 dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |\varphi|^2 dx dy}}, \quad (5)$$

$$\delta = \frac{\sigma}{e_m}, \quad (6)$$

式中: Im 为取虚部; φ^* 为光波函数的共轭函数。当拓扑电荷 m 值和 n 值不确定时,初始功率和轨道角动量很难得到解析解。当拓扑电荷 $m=n=1$ 时,将(2)式分别代入(3)式和(4)式,可得到

$$P_0 = \pi A^2 e^2 \{ (a^2 + b^2)(c^2 + d^2) + [(a+c)^2 + (b+d)^2] e^2 + 2e^4 \}, \quad (7)$$

$$M = \pi A^2 e^4 [(a+c)^2 + (b+d)^2 + 4e^2]. \quad (8)$$

3 数值模拟

在非线性克尔介质中,光束的稳定传输需要考虑光强与介质之间的相互作用。当光束在介质中传输时,衍射展宽效应与非线性压缩效应可以精确抵消,当光束形状保持不变时,此处的输入功率称为临界功率,

用 p 来表示。在 $\delta=10$ 的情况下,采用分步傅里叶变换法来模拟双涡旋光束在非局域非线性介质中的传播过程。设定拓扑电荷 $m=n=1$,调节光束输入的初始功率和涡旋位置进行实验,结果如图 1 所示,其中 T 为旋转周期。当初始功率等于临界功率时,光束在传输过程中保持其初始宽度不变,从而形成稳定的光孤子。

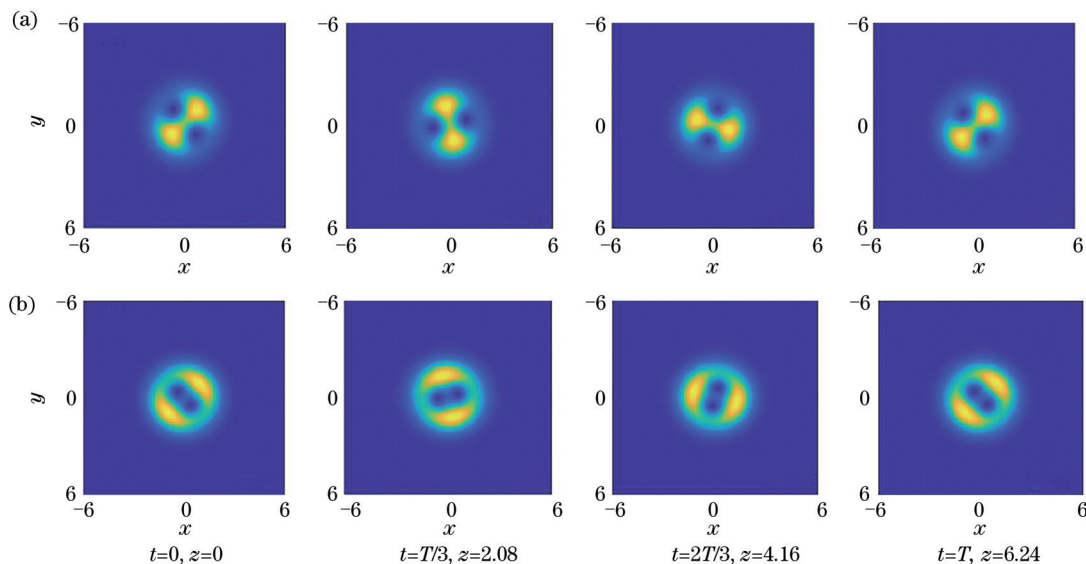


图 1 对称涡旋光束在不同情况下的光强分布。(a) $a=-c=-0.7, b=-d=-0.7, p=17506$;
(b) $a=-c=-0.4, b=-d=-0.4, p=17506$

Fig. 1 Intensity distribution of symmetric vortex beam under different conditions. (a) $a=-c=-0.7, b=-d=-0.7,$
and $p=17506$; (b) $a=-c=-0.4, b=-d=-0.4,$ and $p=17506$

从图 1 可以看到,当涡旋光束对称时,光束传输一段距离后的形状与起初形状完全重合,可以理解这一段距离为一个旋转周期,此时传播方向和束宽保持不变;涡旋光束有奇点(光强为零),为此光强分布图中出现空心。当拓扑电荷 m 值和 n 值相等时,比较图 1(a)和图 1(b)可以发现,尽管涡旋位置不相同,但是可以形成稳定的光孤子,而且具有相同的临界功率 p 和旋转周期 T 。在 $m=n=1, a=-c=b=-d$ 和 $p=17506$ 的情况下,轨道角动量的数值解(实线)和解析解(虚线)如图 2 所示。

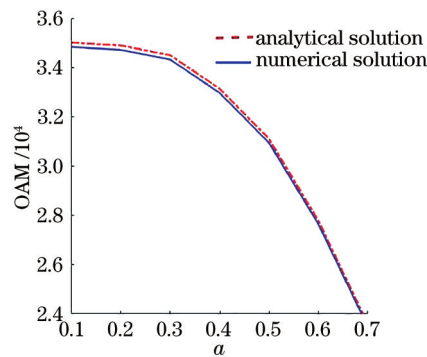


图 2 轨道角动量的数值解和解析解比较

Fig. 2 Comparison of numerical and analytical solutions for orbital angular momentum

光束的轨道角动量本征态可以构建高维 Hilbert 空间,将之用于数据存储可以使其携带更复杂的信息。从图 2 可以看到,在涡旋对称的情况下,当光束开始输入介质中时,对应的 a 值增大,即增大涡旋点相对于原点的距离,但角动量随着 a 值的增大逐渐减小,而角动量的解析解与数值解相吻合。当拓扑电荷相等时,尽管涡旋位置不相同,但稳定孤子所对应的临界功率保持不变。结合图 1 可知,当输入功率一定时,涡旋点(奇点)越靠近原点,光强能量分布越远离中心,同时轨道角动量越大。在

不同情况下倾斜传输的光强分布如图 3 所示。

对比图 3(a)和图 3(b)可知,在涡旋点不对称且拓扑电荷 $m=n$ 的情况下,光束在一个周期内传输位置会发生移动,光束束宽基本不变,而光束倾斜传输只不过是其旋转方向与传输方向相反。从图 3(c)可以看到,尽管涡旋光束关于原点对称,但当 $m \neq n$ 时,光束也会倾斜传输,这可能与拓扑电荷

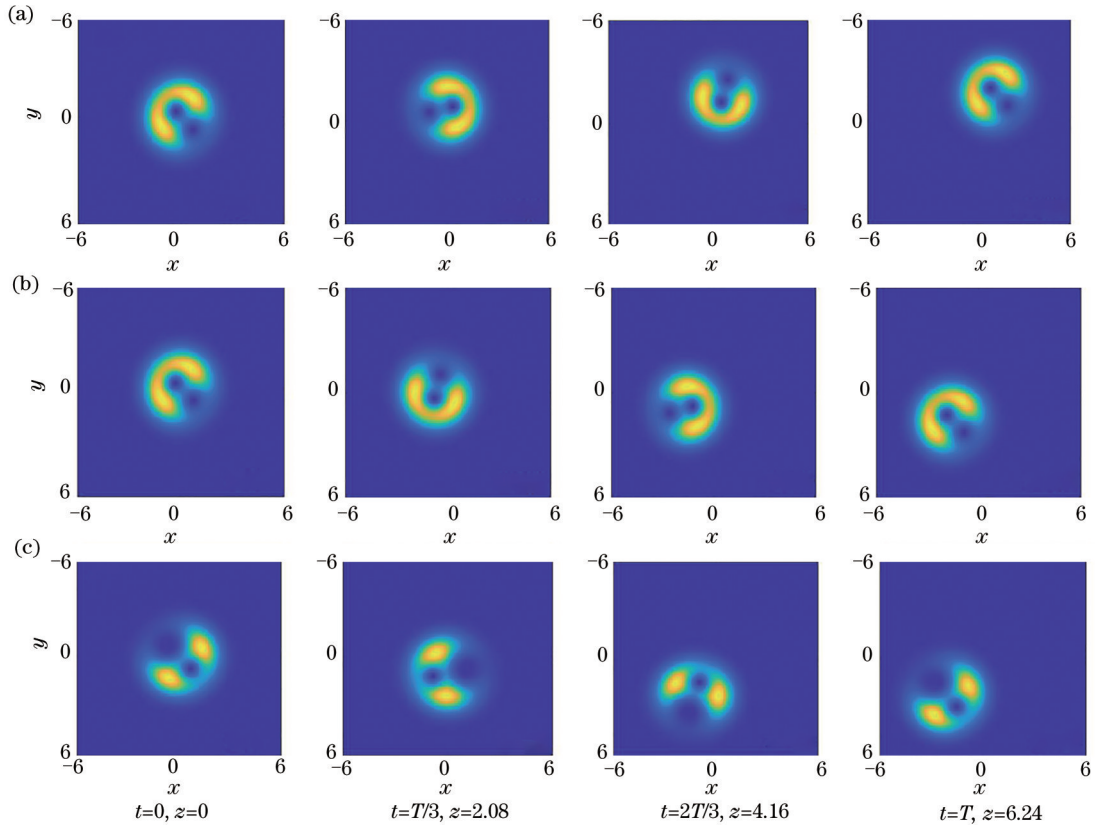


图 3 不同情况下倾斜传输的光强分布。(a) $m=n=1, a=b=-0.7, c=d=0.3, p=17506$; (b) 涡旋的环流方向取负, $m=n=1, a=b=-0.7, c=d=0.3, p=17506$; (c) $m=1, n=2, a=-c=-0.7, b=-d=-0.7, p=18004$

Fig. 3 Light intensity distribution of oblique transmission under different conditions. (a) $m=n=1, a=b=-0.7, c=d=0.3,$ and $p=17506$; (b) direction of circulation of vortex is negative, $m=n=1, a=b=-0.7, c=d=0.3,$ and $p=17506$; (c) $m=1, n=2, a=-c=-0.7, b=-d=-0.7,$ and $p=18004$

和涡旋轨道角动量较大有关,使得角动量不对称而导致倾斜传输,所以光束两涡旋位置不对称和两涡旋的拓扑电荷不同,都可以使光束倾斜传输。光束的三维传输情况如图 4 所示。

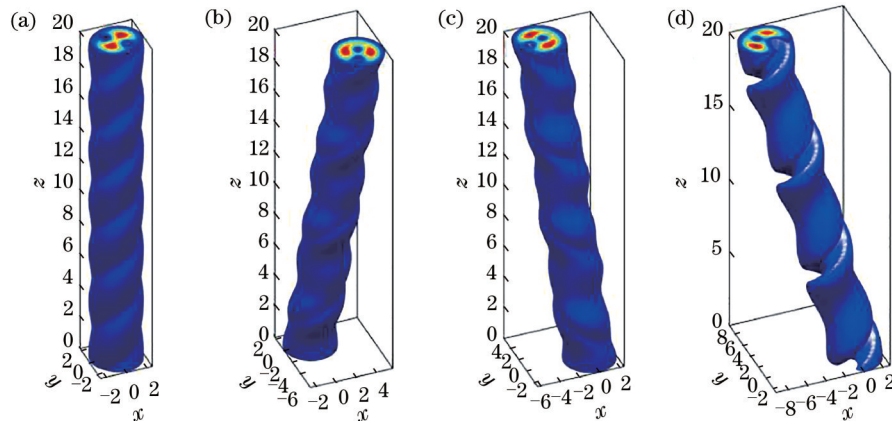


图 4 光束的三维传输情况。(a) $m=n=1, a=-c=-0.7, b=-d=-0.7, p=17506$; (b) $m=n=1, a=b=-0.7, c=d=0.3, p=17506$; (c) 涡旋的环流方向取负, $m=n=1, a=b=-0.7, b=-d=0.3, p=17506$; (d) $m=1, n=2, a=-c=-0.7, b=d=-0.7, p=18004$

Fig. 4 Three-dimensional propagation of light beams. (a) $m=n=1, a=-c=-0.7, b=-d=-0.7,$ and $p=17506$; (b) $m=n=1, a=b=-0.7, c=d=0.3,$ and $p=17506$; (c) direction of circulation of vortex is negative, $m=n=1, a=b=-0.7, b=-d=0.3,$ and $p=17506$; (d) $m=1, n=2, a=-c=-0.7, b=d=-0.7,$ and $p=18004$

从图 4 可以看到,对于对称涡旋或者不对称涡旋的光束,传输都比较稳定。对比图 4(a)和图 4(d)可以看到,在涡旋位置对称的情况下,若两个涡旋的拓扑电荷相等,则光束传输方向保持不变;若两个涡旋的拓扑电荷不相等,则光束出现倾斜传输。

对比图 4(b)和图 4(c)可以看到,当涡旋的环流方向取负时,光束的传输方向和旋转方向都发生改变,此现象与涡旋椭圆复合 Airy 孤子^[5]在非局域介质中的斜传输过程相似。光束的光强大小分布、相结构和能流如图 5 所示。

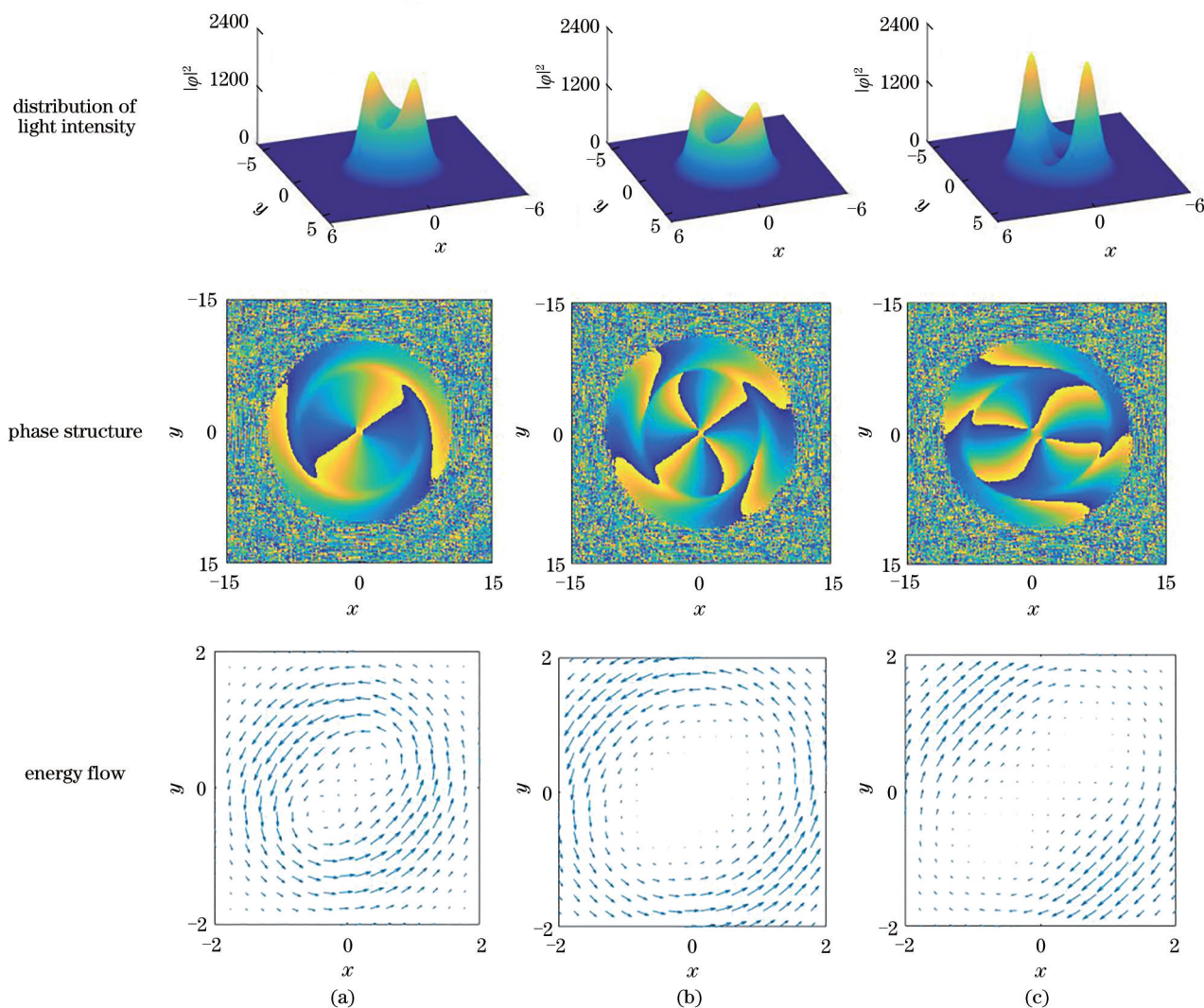


图 5 光束的性能结果。(a) $m=n=1, a=-c=-0.1, b=-d=-0.1, p=17450$; (b) $m=n=2, a=-c=-0.1, b=-d=-0.1, p=18815$; (c) 涡流反向, $m=n=2, a=-c=-0.2, b=-d=-0.2, p=18846$
 Fig. 5 Beam performance results. (a) $m=n=1, a=-c=-0.1, b=-d=-0.1, p=17450$; (b) $m=n=2, a=-c=-0.1, b=-d=-0.1, p=18815$; (c) vortex reverse, $m=n=2, a=-c=-0.2, b=-d=-0.2, p=18846$

从图 5 可以看到,当拓扑电荷 $m=n$ 且涡旋光束对称分布时,光束在传输过程中,其宽度和传输方向不变,因为轨道角动量是关于原点对称的,所以可以保持稳定传输。比较图 5(a)和图 5(b)可知,当对称的涡旋位置不变,仅增大拓扑电荷时,若形成稳定的光束,则必须增大初始功率,随着拓扑电荷的增加,相结构更加复杂,这有助于光束携带更多

复杂的信息。从图 5(c)可以看到,当涡旋的环流方向取负时,能流由原来的顺时针变为逆时针,光束的倾斜传输方向发生改变。不同情况下的束宽如图 6 所示。

比较图 6(a)和图 6(b)可知,当涡旋光束关于原点对称,仅增大拓扑电荷时,若形成稳定的光孤子,则输入的初始束宽和初始光强都必须增大。比较

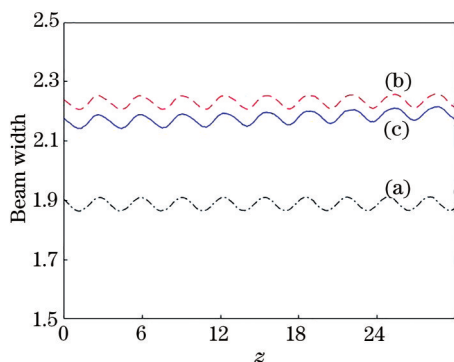


图 6 不同情况下的束宽。(a) $m=n=1, a=-c=-0.1, b=-d=-0.1, p=17450$; (b) $m=n=2, a=-c=-0.1, b=-d=-0.1, p=18815$; (c) $m=n=2, a=-c=-0.2, b=-d=-0.2, p=18846$

Fig. 6 Beam width under different conditions. (a) $m=n=1, a=-c=-0.1, b=-d=-0.1, p=17450$; (b) $m=n=2, a=-c=-0.1, b=-d=-0.1, p=18815$; (c) $m=n=2, a=-c=-0.2, b=-d=-0.2, p=18846$

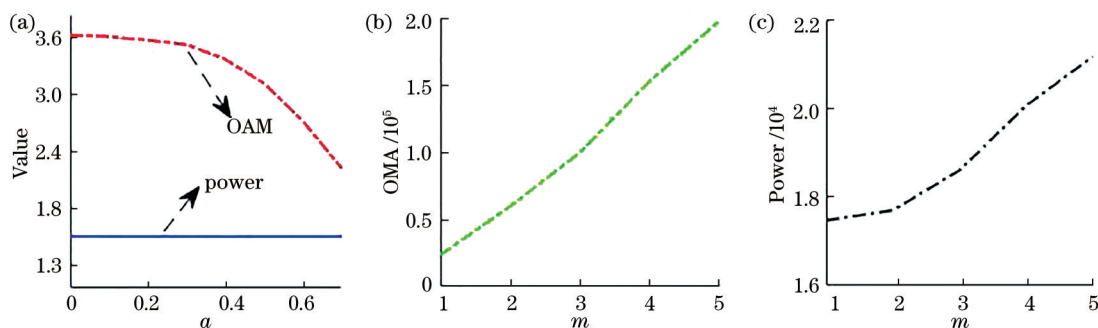


图 7 角动量和临界功率与不同参数的关系。(a)角动量和临界功率分别与涡旋位置的关系;(b)角动量与 m 的关系;(c)临界功率与 m 的关系

Fig. 7 Relationship among angular momentum, critical power and different parameters. (a) Relationship among angular momentum, critical power, and position of vortex; (b) relationship between angular momentum and m ; (c) relationship between critical power and m

4 结 论

本文对两个涡旋光束的传输情况进行描述,传输过程遵循相应归一化的非线性非局域薛定谔方程,当 $m=n=1$ 时,通过解析法来得到光束初始功率和轨道角动量的解析表达式,通过数值模拟可以进一步发现轨道角动量的解析解和数值解相吻合。

首先分析拓扑电荷 m 和 n 以及涡旋光束离心对临界功率和初始束宽的影响。根据能量守恒可知,当临界功率一定时,一般情况下离原点越近,则光强越强;涡旋光束离原点越近的位置出现奇点(光强为零),所以光束只能远离对称点分布,则光束越发散,而形成稳定光束所需的光束束宽越大,

图 6(b)和图 6(c)可知,当拓扑电荷不变,仅增大两个涡旋光束相对原点的距离时,若形成稳定的光孤子,则初始束宽会减小,但是临界光强需保持不变。

临界功率和轨道角动量一直以来是值得思考的问题,在这里只考虑涡旋光束对称和拓扑电荷相等($a=b=-c=-d, m=n$)的情况,则临界功率和轨道角动量的变化如图 7 所示。从图 7(a)可以看到,当拓扑电荷 m 值不变,仅增大两个涡旋光束相对原点的距离时,若形成稳定的光孤子,则轨道角动量需减小,但是临界功率不变。从图 7(b)和图 7(c)可以看到,当涡旋位置不变,仅增大拓扑电荷时,若形成稳定的光孤子,则轨道角动量和初始功率都要增大。需要强调的是,图 7(a)的涡旋位置是光束输入介质中相对于原点的位置,不是光束发生倾斜传输后改变的涡旋位置。也就是说,当拓扑电荷和初始的涡旋位置一定时,尽管光束发生倾斜传输,但轨道角动量是保持不变的。

同时轨道角动量也越大;当涡旋位置不变,仅增大拓扑电荷时,若形成稳定的光孤子,则临界功率和轨道角动量都要增大;尽管涡旋位置或者拓扑电荷不同,但是形成稳定光束所对应的涡旋周期是相同的。

离轴涡旋的位置和拓扑电荷决定了光束传输的倾斜程度以及光强和相位分布。有趣的是,通过选择适当的离轴涡旋位置和拓扑电荷,可以很容易地控制光束的传播路径,也可以通过改变涡旋环流方向,可以使光孤子实现顺时针或逆时针的旋转,该特性与离轴拉盖尔高斯涡旋光束^[12]的传输特性比较类似。在涡旋单光束中,当两个涡旋位置不对称或者两个拓扑电荷不相等时,则涡旋光强分布也

不对称。在非线形介质中,非线性效应可以使光强越大的地方折射率越大,从而导致光线会向折射率大的方向偏折,这是光束整体出现倾斜传输的原因。

光束传输的过程中可采用涡旋点数和拓扑电荷作为信息的载体,若涡旋点数和拓扑电荷越大,则光束相结构更为复杂,这意味着其可以携带更强的信息编码,增加光束的信息容量。当涡旋光场中存在光子角动量作用于分子颗粒物质时,粒子会进行光致旋转运动,从而可实现亚接触的操作,在医学和光学材料方面有应用前景。另外,此类双涡旋光束的传输特性为实现光路的控制和传导带来了启发,可以通过改变涡旋位置或者拓扑电荷来实现光束的倾斜传输,这类类似于光扳手和光钳的效果。

参 考 文 献

- [1] Liu X Y. The study on the orbital angular momentum of vortex beam[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2016: 11-13.
刘新月. 涡旋光束轨道角动量的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016: 11-13.
- [2] Du J, Wang J. High-dimensional structured light coding/decoding for free-space optical communications free of obstructions[J]. Optics Letters, 2015, 40(21): 4827-4830.
- [3] Roux F S. How to distinguish between the annihilation and the creation of optical vortices[J]. Optics Letters, 2013, 38(19): 3895-3898.
- [4] Chen J. The study on modulation and application of modified optical vortices[D]. Tianjin: Nankai University, 2010: 11-13.
陈君. 新型光学涡旋的调控与应用研究[D]. 天津: 南开大学, 2010: 11-13.
- [5] Wang Q, Yang J R, Mao J J. Oblique propagation of rotating elliptic vortex complex Airy soliton in nonlocal nonlinear media[J]. Optics Communications, 2019, 443: 110-115.
- [6] Liang G. Spiralling elliptic vortex solitons in nonlocal nonlinear media[J]. Journal of Modern Optics, 2017, 64(21): 2370-2375.
- [7] Ge L J, Bian J C, Li L, et al. Composite soliton-vortex pairs in nonlocal nonlinear media[J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 32(1): 24-30, 40.
葛丽娟, 卞加聪, 李蕾, 等. 非局域非线性介质中的矢量涡旋孤子对(英文)[J]. 苏州科技学院学报(自然科学版), 2015, 32(1): 24-30, 40.
- [8] Zhang H, Chen M, Yang L, et al. Higher-charge vortex solitons and vector vortex solitons in strongly nonlocal media[J]. Optics Letters, 2019, 44(12): 3098-3101.
- [9] Izdebskaya Y V, Shvedov V G, Jung P S, et al. Stable vortex soliton in nonlocal media with orientational nonlinearity[J]. Optics Letters, 2018, 43(1): 66-69.
- [10] Kwaśny M, Karpierz M A, Assanto G, et al. Optothermal vortex-solitons in liquid crystals[J]. Optics Letters, 2020, 45(8): 2451-2457.
- [11] Chen G Y. Research on the characteristics of fractional vortex beam and experimental analysis[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2018: 33-40.
陈古运. 分数阶涡旋光光强及相位特性的实验研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2018: 33-40.
- [12] Ding P F, Pu J X. Change of the off-center Laguerre-Gaussian vortex beam while propagation[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(6): 064103.
丁攀峰, 蒲继雄. 离轴拉盖尔-高斯涡旋光束传输中的光斑演变[J]. 物理学报, 2012, 61(6): 064103.
- [13] Zhu Y Y, Chen Z T, Liu C S, et al. Theoretical research of interference light field of off-axis vortex beam[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2013, 24(5): 1012-1017.
朱艳英, 陈志婷, 刘承师, 等. 离轴涡旋光束干涉光场的理论研究[J]. 光电子·激光, 2013, 24(5): 1012-1017.
- [14] Ding P F, Pu J X. Research on orbital angular momentum of off axial Gaussian vortex beam[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2014, 44(5): 449-456.
丁攀峰, 蒲继雄. 离轴高斯涡旋光束的轨道角动量研究[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2014, 44(5): 449-456.
- [15] Wang H, Ding P F, Pu J X. Tight focusing properties of off-center Gaussian vortex beams[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(21): 214202.
王慧, 丁攀峰, 蒲继雄. 离轴高斯涡旋光束的深聚焦特性[J]. 物理学报, 2014, 63(21): 214202.
- [16] Wang L, Wang Q F, Wang X Q, et al. Transversal optical vortex in the interference field of two off-axis Gaussian beams[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(1): 201-207.
王莉, 王庆峰, 王喜庆, 等. 两束离轴高斯光束干涉场中的横向光涡旋[J]. 物理学报, 2007, 56(1):

- 201-207.
- [17] Chao L M. The study of generation and properties of propagation of vortex beams[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2014: 18-25.
朝鲁门. 涡旋光的产生与传播特性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2014: 18-25.
- [18] Deng D M, Guo Q. Propagation of Laguerre-Gaussian beams in nonlocal nonlinear media[J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2008, 10(3): 035101.
- [19] Wang Q, Li J Z, Xie W X. Spiraling elliptic Laguerre-Gaussian soliton in isotropic nonlocal competing cubic-quintic nonlinear media[J]. Applied Physics B, 2018, 124(6): 104.