

doi:10.3788/gzxb20184703.0326001

双复合离散型艾里涡旋加速光的传输特性

韩坤¹, 高爱华¹, 戢凯文¹, 李莎莎¹, 温增润², 高平安¹,
齐新元^{1,2}, 白晋涛^{1,2}

(1 西北大学 物理学院, 西安 710069)

(2 西北大学 光子学与光子技术研究所/光电技术与功能材料省部共建国家重点实验室培育基地, 西安 710069)

摘 要:利用全息技术,采用二元相位处理后的离散型艾里涡旋相位,制作了一种双复合离散型艾里涡旋加速光.理论模拟和实验探究了该加速光的传输特性,以及线性因子(s)、径向层数(N)和拓扑荷梯度(ΔL)对光场的调控机制.结果表明,双加速光在传输过程中,由于离散和旋转效应,逐渐分离为多个类艾里光;通过调节传输距离及 ΔL ,可实现二维类艾里光至一维类艾里光之间的演化.此外, N 和 s 可分别调节双加速光的强度分布及其在初始截面($z=0$ 处的 x - y 平面)中的位置分布; ΔL 也可调节分离的类艾里光之间的强度分布.

关键词:艾里涡旋光束;波传输;空间光调制器;全息技术

中图分类号:O436.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)03-0326001-8

Propagation Dynamics of the Twins Composite Discrete Airy-vortex Accelerating Beams

HAN Kun¹, GAO Ai-hua¹, JI Kai-wen¹, LI Sha-sha¹,
WEN Zeng-run², GAO Ping-an¹, QI Xin-yuan^{1,2}, BAI Jin-tao^{1,2}

(1 School of Physics, Northwest University, Xi'an 710069, China)

(2 National Key Laboratory of Photoelectric Technology and Functional Materials (Culture Base), and Institute of Photonics and Photon-Technology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: By utilizing the holographic technique, a novel type of twins composite discrete Airy-vortex accelerating beam is generated with discrete Airy-vortex phase which is processed by binary phase. The propagation properties of the accelerating beam and the modulation of different parameters [the linear factor(s), the number of total layer (N) and the topological gradient (ΔL)] to the accelerating beam is also studied by theoretical simulation and experiment. The results show that such twins accelerating beam will split itself into several separated Airy-like beams due to the discrete and rotatory effect in propagation; and the separated Airy-like beams evolve into one-dimensional Airy-like beams by adjusting the propagation distance and ΔL . Furthermore, s and N can modulate the intensity distribution of twins accelerating beam and the space distribution of twins accelerating beam in initial plane (the plane x - y at $z=0$), respectively; ΔL also can modulate the intensity distribution of separated Airy-like beams.

Key words: Airy vortex beam; Wave propagation; Spatial light modulator; Holographic technique

OCIS Codes: 260.6042; 260.1960; 050.4856; 070.7345; 070.6120

基金项目:国家自然科学基金(No.11104211),弱光非线性光子学教育部重点实验室开放基金(No. OS17-3)和陕西省自然科学基金(No. 2017JM6014)资助

第一作者:韩坤(1994—),男,硕士研究生,主要研究方向为微纳介观光学结构的设计与制作及光波在微结构中的动力学规律. Email: hankunxd@163.com

导师(通讯作者):齐新元(1979—),男,副教授,博士,主要研究方向为微纳介观光学结构的设计与制作、光波在微结构中的动力学规律以及光纤激光器的设计. Email: qixyxn@nwu.edu.cn

收稿日期:2017-09-20; **录用日期:**2017-12-13

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

艾里光束作为一种在自由空间中无损耗且加速传输的新型特殊光,于1979年首次在理论上被提出^[1],并于2007年在实验上生成^[2-3].研究发现,艾里光可通过由立方相位调制后的高斯光经逆傅里叶转换生成^[2-3],也可通过3/2相位直接对高斯光调制生成^[4],其具有自加速^[2-3]、无衍射^[2-3]和自愈^[5]特性.人们基于艾里光的特殊性质,对其进行了更深一步的研究,如:BAUMGARTL J等利用艾里光清理光学微粒^[6];Polynkin P等将艾里光应用于自弯曲等离子轨道^[7-8];LU Yang等对艾里光阵列的研究^[9];HU Yi, SHI Yao-yao等对调控艾里光束轨迹的研究^[10-11];CAO Zheng, XU Sen-dong等对艾里光在非线性方面的研究^[12-13]及艾里光束在光弹中的应用^[14-15].近几年中,多种不同种类的加速光被相继提出,如:ALEAHMA D和ZHANG Peng等分别提出了Helmholtz加速光^[16]与非傍轴Mathieu加速光^[17];REN Z J和QIAN Y X等分别提出了一种四合一艾里加速光^[18]与可调轨迹的准艾里加速光^[19]等.其中,MAZILU M等于2009年将涡旋相位引入艾里光的立方相位,成功制作了艾里涡旋加速光^[20].由于涡旋相位的引入,艾里光在初始截面($z=0$ 处的 x - y 平面)处的主瓣呈涡旋结构,随着传输距离的增加,主瓣逐渐恢复,光场分布类似艾里光^[20-21].据此,引入其他特殊相位至艾里光的立方相位,进而影响光束在传输中的分布,值得进一步探究.

本文将离散型涡旋相位引入艾里光的立方相位中,并对其进行二元相位处理,通过全息技术,制作了双复合离散型艾里涡旋加速光.在理论上探究了初始光场的分布,根据衍射理论模拟了光场的空间传输特性及调控机制,并加以实验验证.

1 双复合离散型艾里涡旋加速光的特性探究

1.1 理论分析

离散型艾里涡旋相位模板的相位分布表示为

$$\phi(k_x, k_y) = \phi_a \cdot \phi_n \cdot \text{circ}_n \quad (1)$$

式中, ϕ_a 是艾里光表征在 k 空间的立方相位(即频谱项),为

$$\phi_a = \exp(ik_x^3/8 + ik_y^3/8) \quad (2)$$

$\phi_n \cdot \text{circ}_n$ 表示离散相位模板的离散涡旋项,为

$$\phi_n = \exp(il_n\theta) \cdot \text{circ}_n \quad (3)$$

$l_n = l_1 + (n-1)\Delta L$, $l_1 = 1$.其中,整数 $n(n=1:N)$ 为离散型相位模板的层数, N 为总层数表征径向离散参量, ΔL 是拓扑荷梯度表征角向离散参量, ΔL 和 N 共同调节离散相位模板的相位分布, θ 为方位角, circ_n 为

$$\text{circ}_n(k_r) = k_R \sqrt{\frac{n-1}{N}} < k_r < k_R \sqrt{\frac{n}{N}} \quad (4)$$

$k_r = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$.由于理想艾里光束能量无限分布,需对立方相位进行截断处理才能实验生成,截断处理后的艾里光具有衍射效应^[2-3].在本文中,设定 k_r 的最大值 k_R 为15,实现对立方相位的截断处理,并减小光场的衍射效应.

对 $\phi(k_x, k_y)$ 进行逆傅里叶转换即可生成初始空间光场 u_0 ^[2-3,22]为

$$u_0(x_0, y_0, z=0) = F^{-1}(\phi_a \cdot \phi_n \cdot \text{circ}_n) = F^{-1}(\phi_a) \otimes F^{-1}(\phi_n \cdot \text{circ}_n) \propto \text{Airy}(x_0) \text{Airy}(y_0) \otimes A \sum_{n=1}^N J_{l_n} \left(2\pi k_R f_{kr} \sqrt{\frac{n}{N}} \right) \exp \left[i \left(\frac{\pi}{2} l_n + l_n \theta \right) \right] \quad (5)$$

式中, F^{-1} 表示逆傅里叶变换, J_{l_n} 表示贝塞尔函数,符号 \otimes 表示卷积运算, $f_{kr} = k_r/(\lambda f)$, f 为焦距, $A = \pi k_R/N$.

从式(5)得,光场 u_0 包含了三部分:艾里项 $\text{Airy}(x_0) \text{Airy}(y_0)$ 、贝塞尔项 $J_{l_n} \left(2\pi k_R f_{kr} \sqrt{\frac{n}{N}} \right)$ 和复指数项 $\exp[i(l_n \pi/2 + l_n \theta)]$.其中,艾里项使此新型光加速传输;贝塞尔项使光场呈离散分布;复指数中的涡旋因子,引入旋转效应至光场中.

通过将线性相位 $\varphi_s(k_x, k_y) = s(k_x + k_y)$ 引入离散涡旋相位,得到一修正相位 $\varphi_m(k_x, k_y) = \varphi(k_x, k_y) + \varphi_s(k_x, k_y)$,其中 s 为实数表示线性因子, $\varphi(k_x, k_y) = (k_x^3/8 + k_y^3/8 + l_n \theta) \cdot \text{circ}_n$.对 $\exp(i\varphi_m(k_x, k_y))$

进行逆傅里叶变换得 $\phi_m(x, y)$ 有

$$\phi_m(x, y) = F^{-1} \{ \exp [i\varphi_m(k_x, k_y)] \} = F^{-1} \{ \exp [i\varphi(k_x, k_y)] \} \otimes \quad (6)$$

$$F^{-1} \{ \exp [i\varphi_s(k_x, k_y)] \} = u_0(x, y) \otimes \delta(x - s/2\pi, y - s/2\pi) = u_0(x - s/2\pi, y - s/2\pi)$$

式中, u_0 为式(5)表示的初始光场, s 可调节 u_0 在初始截面 ($z=0$ 处的 x - y 平面) 处的位置分布.

对 $\varphi_m(k_x, k_y)$ 进行二元相位处理^[23], 有

$$\varphi_{bm}(k_x, k_y) = \begin{cases} +\frac{\pi}{2}, & \varphi_m(k_x, k_y) \in [2m\pi, (2m+1)\pi] \\ -\frac{\pi}{2}, & \varphi_m(k_x, k_y) \in [2(m-1)\pi, 2m\pi] \end{cases} \quad (7)$$

式中 m 为整数, 二元相位处理过程如图 1 所示.

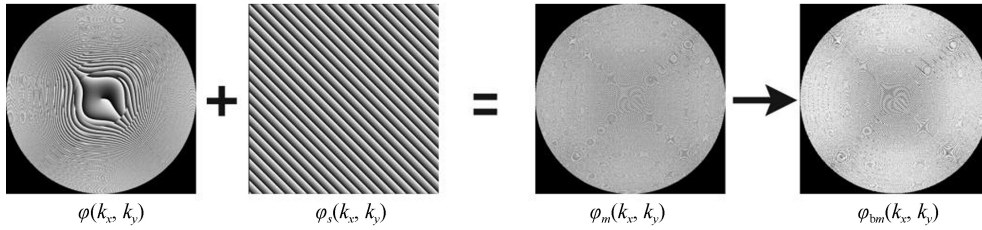


图 1 二元相位处理过程

Fig.1 The process of the binary phase

对 $\exp(i\varphi_{bm}(k_x, k_y))$ 逆傅里叶变换得 $\phi_{bm}(x, y)$

$$\phi_{bm}(x, y) = \iint \exp [i\varphi_{bm}(k_x, k_y)] \exp (-2\pi i x k_x) \exp (-2\pi i y k_y) dk_x dk_y$$

$$\phi_{bm}^*(x, y) = \iint \exp [-i\varphi_{bm}(k_x, k_y)] \exp (2\pi i x k_x) \exp (2\pi i y k_y) dk_x dk_y \quad (8)$$

$$\phi_{bm}(-x, -y) = \iint \exp [i\varphi_{bm}(k_x, k_y)] \exp (2\pi i x k_x) \exp (2\pi i y k_y) dk_x dk_y$$

其中 * 表示共轭. 由式(7)得出 $\exp[-i\varphi_{bm}(k_x, k_y)] = -\exp[i\varphi_{bm}(k_x, k_y)]$, 可知

$$\phi_{bm}(-x, -y)\phi_{bm}^*(-x, -y) = \phi_{bm}(x, y)\phi_{bm}^*(x, y) \quad (9)$$

式(9)为奇对称函数, 表示二元相位处理后, 生成的双光场在 $z=0$ 处呈中心对称分布.

1.2 双复合离散型艾里涡旋加速光的传输特性探究

实验装置如图 2 所示. 利用全息技术^[24-25], 将相位图制作作为全息图并加载于 SLM 上; 532 nm 平面波经透镜 L_1 、 L_2 扩束, 通过分束棱镜 (BS) 入射到反射式空间光调制器 (SLM; Holoeye LETO, 1920 × 1080 pixels) 后, 其正一级衍射光包含全息图的所有信息; 通过傅里叶透镜 (L_3 , 焦距为 150 mm) 对调制后的平面波做逆傅里叶变换, 并利用方形光阑 (F) 滤掉其余级次保留正一级衍射级次, 最终在 L_3 后焦面处生成双复合离散型艾里涡旋加速光; 利用 CCD 相机观察光场的动态传输 (图 2 中白色箭头为光束传播方向), 光场的生成及传输过程可通过菲涅耳衍射及透镜调制函数描述为

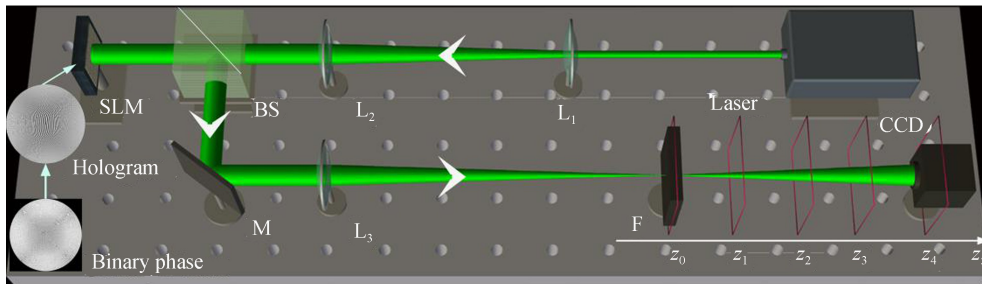


图 2 实验装置

Fig.2 The schematic of the experimental setup

$$u_1(x, y, z) = \text{FreT}_{f+z} \left[\text{FreT}_f (U_{F1}) \times \exp \left[\frac{-ik(x^2 + y^2)}{2f} \right] \right] \quad (10)$$

其中, U_{F1} 为平面波经空间光调制器调制后的正一级衍射级次, x 和 y 为空间坐标, z 表示光场传输距离, f 为傅里叶透镜的焦距, $\exp\left[\frac{-ik(x^2+y^2)}{2f}\right]$ 为透镜调制函数, 算符 FreT_z 表示菲涅耳衍射积分^[26].

由式(5)及 $l_n = l_1 + (n-1)\Delta L$ 知, 离散相位中径向参数 N 与角向参数 ΔL 影响初始光场 u_0 的离散程度. 如图 3 所示 [N 与 ΔL 分别取不同值时的初始光场 ($z_0 = 0$ 处) 模拟图], 取 $s = 15$, 双光场在初始截面 ($z_0 = 0$ 处的 x - y 平面) 处间距明显 [见式(6)], 利于观察. 当 $\Delta L = 0$, l_n 始终等于 l_1 , 此刻的光场分布为艾里涡旋^[20] [如图 3(a), (e), (i) 所示]; 当 N 与 ΔL 不断增大时, l_n 的值不断增加, 侧瓣出现分离, 其分离程度随之增加 [如图 3(b)~(d)、(f)~(h)、(j)~(l) 所示].

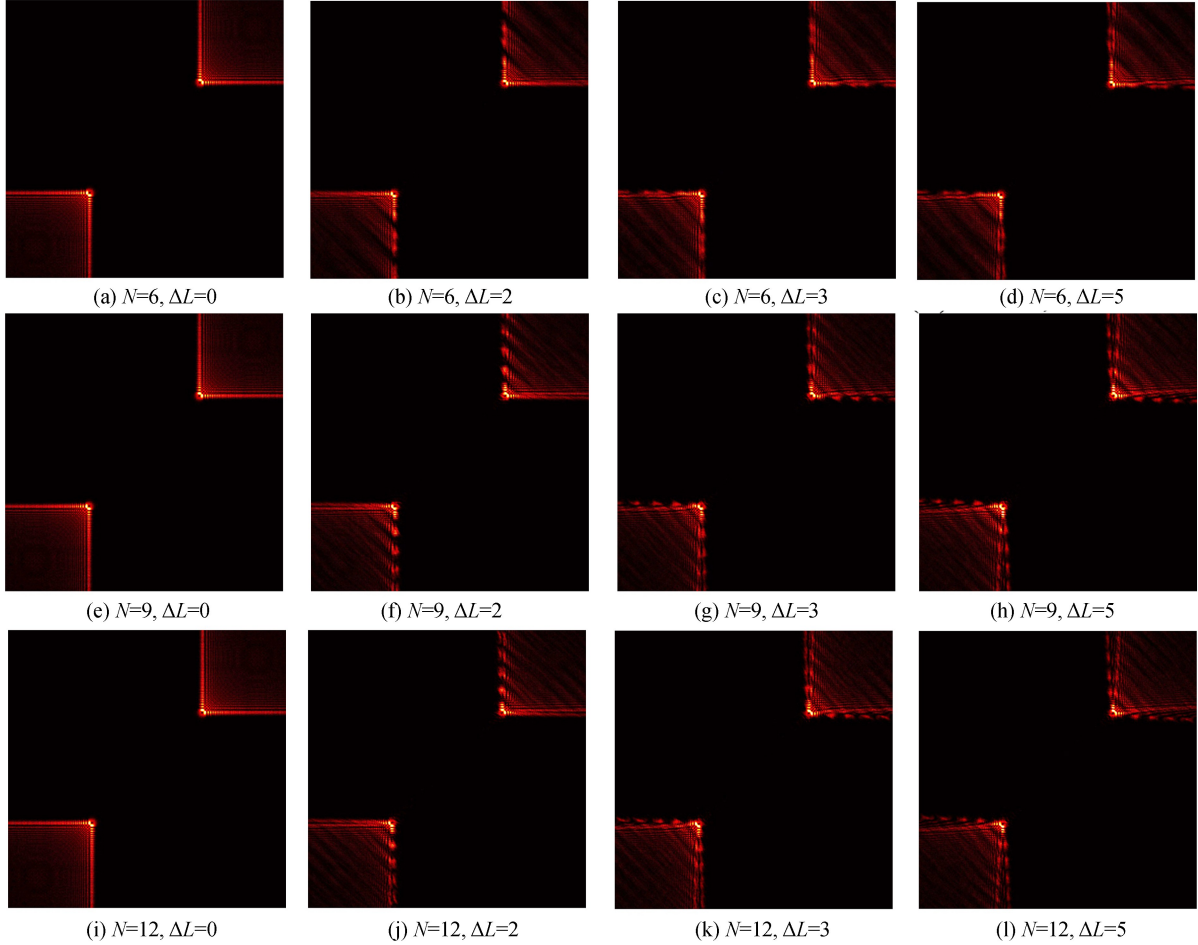


图 3 不同参量时的初始光场 ($z_0 = 0$) 分布

Fig.3 The initial light field ($z_0 = 0$) with different parameters

图 4 为双复合离散型艾里涡旋加速光传输图 ($s = 15$) [(a)~(e) 为模拟结果, (f)~(j) 为对应的实验结果]. 根据参量 N 和 ΔL 对侧瓣分离程度的影响 (如图 3 所示), 选取参量 $N = 12$, $\Delta L = 5$, $s = 15$ 以观察明显的离散现象. 在初始光场中, 主瓣为光涡旋结构 [如图 4(a), (f) 白色线框内所示], 分离的侧瓣呈不连续分布 [见图 4(a), (f)]. 在贝塞尔项 $J_{l_n}\left(2\pi k_R f_{kr} \sqrt{\frac{n}{N}}\right)$ 引起的径向离散影响下, 侧瓣分离的双光场在加速传输过程中, 逐渐分离为多个二维类艾里光 [见图 4(d), (i), $z_3 = 81$ mm 处]. 由复指数项 $\exp[i(l_n \pi/2 + l_n \theta)]$ 中的离散涡旋因子引起的旋转效应, 各个侧瓣能量发生转移, 能量转移方向如图中白色箭头所示 [见图 4(b)~(e), (g)~(j)], 使光场不再呈中心对称分布. 随着传输距离增加, 侧瓣的能量转移程度随之增加, 分离的二维类艾里光最终演化为一维类艾里光 [见图 4(e), (j), $z_4 = 108$ mm 处].

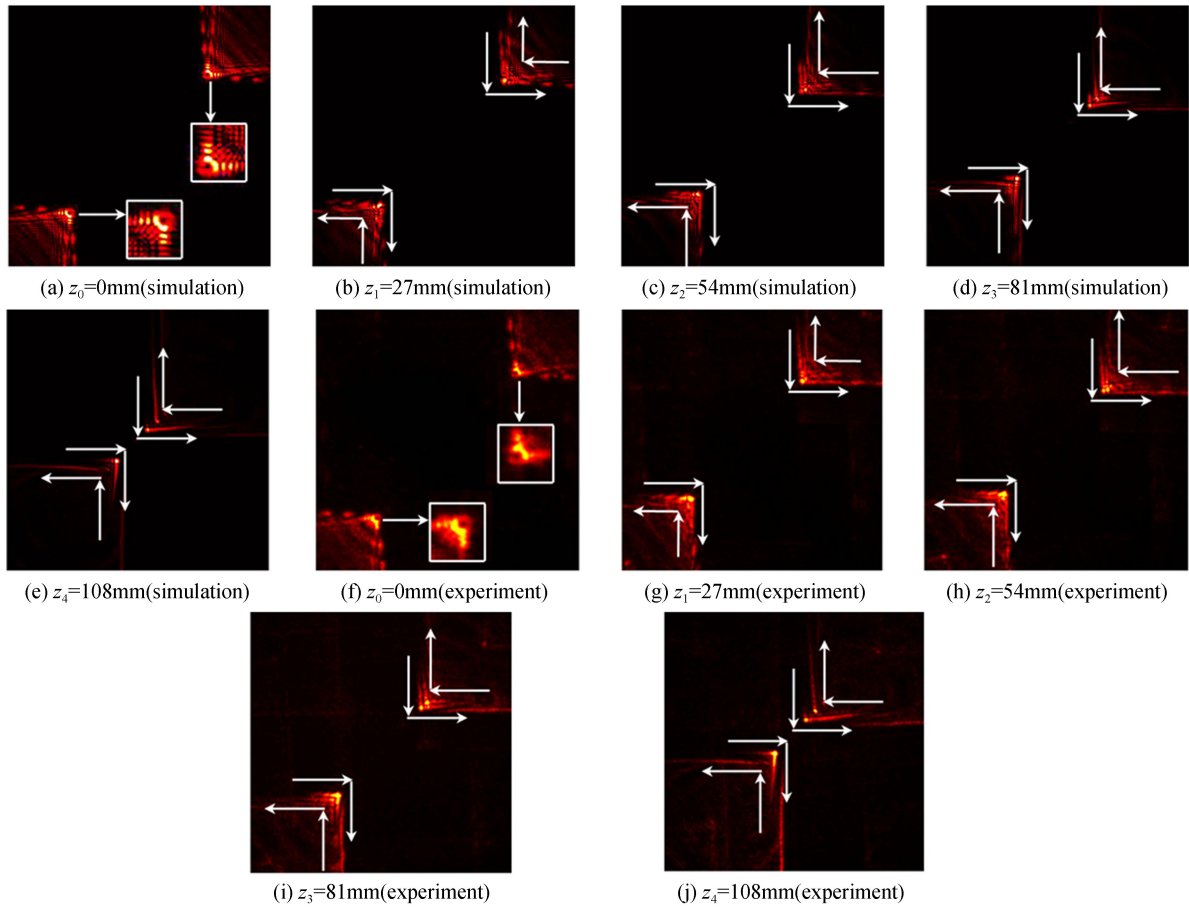
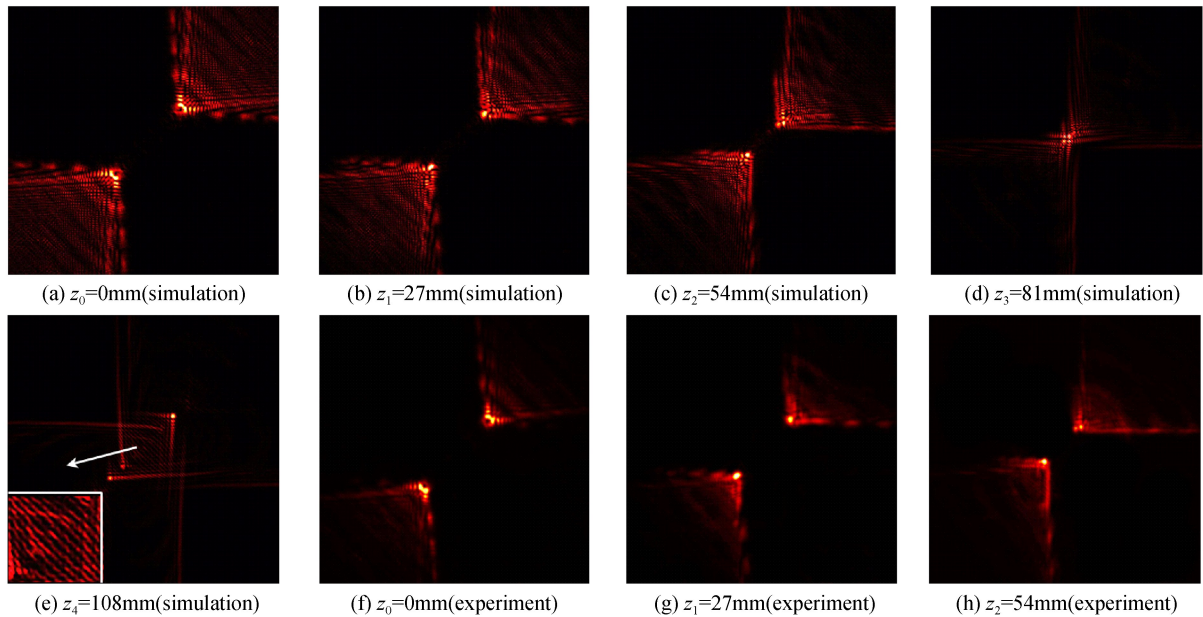


图 4 双复合离散型艾里涡旋加速光传输图($s=15$)

Fig.4 The propagation of the twins composite discrete Airy-Vortex accelerating beam($s=15$)

由式(6)知,参量 s 可调节双复合型艾里涡旋加速光在初始截面($z=0$ 处的 $x-y$ 平面)处的位置分布.如图 4(a),(f)、图 5(a),(f)所示, s 值越大, $z=0$ 处的双光束之间的距离越大.图 5 所示为双加速光的传输图($s=5$)[(a)~(e)为模拟结果,(f)~(j)为对应的实验结果],由于加速传输,双加速光在 $z=81$ mm 至 $z=108$ mm 区间发生交叠,且在交叠区域可观察到干涉条纹[图 5(e),(j)白色框内所示],之后双光束沿着各自的轨迹继续向前传输.如图 6 所示(轨迹拟合曲线图),与取相同参数的单加速光^[27]的轨迹曲线对比,双光束



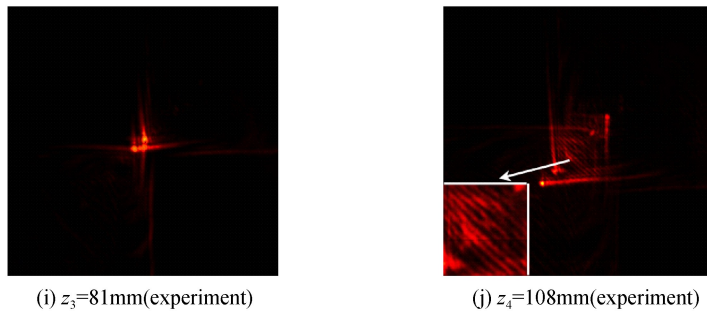


图 5 双复合离散型艾里涡旋加速光传输图($s=5$)
Fig.5 The propagation of the twins composite Airy-Vortex accelerating beam ($s=5$)

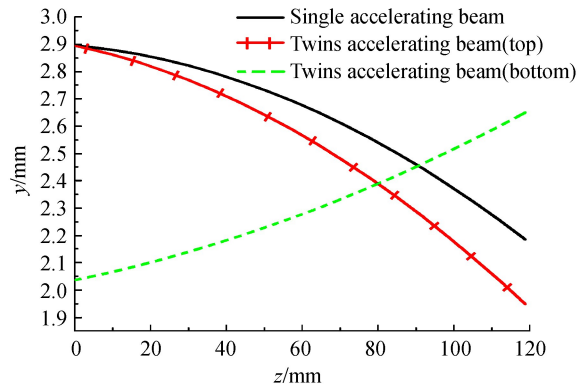


图 6 双加速光与单加速光传输轨迹拟合曲线
Fig.6 Fitting curves of propagation trajectory of the single and twins accelerating beams

之间由于吸引作用,轨迹偏折程度明显,说明二元处理后生成的双光束,其横向($x-y$ 平面中)加速度大于单光束的横向加速度.

1.3 双复合离散型艾里涡旋加速光的调控机制探究

由图 3 及图 4 分析知,当 ΔL 不为 0 时,随着 N 不断增加,侧瓣之间分离程度随之增加,继而在传输过程中分离为多个类艾里光束[如图 4(d)~(e), (i)~(j)].从式(5)中贝塞尔项 $J_{ln} \left(2\pi k_R f_{kr} \sqrt{\frac{n}{N}} \right)$ 知,当 N 逐渐增加时,贝塞尔项在径向的离散程度也随之增大,其影响传输中分离出的类艾里光的分离程度.如图 7 所示

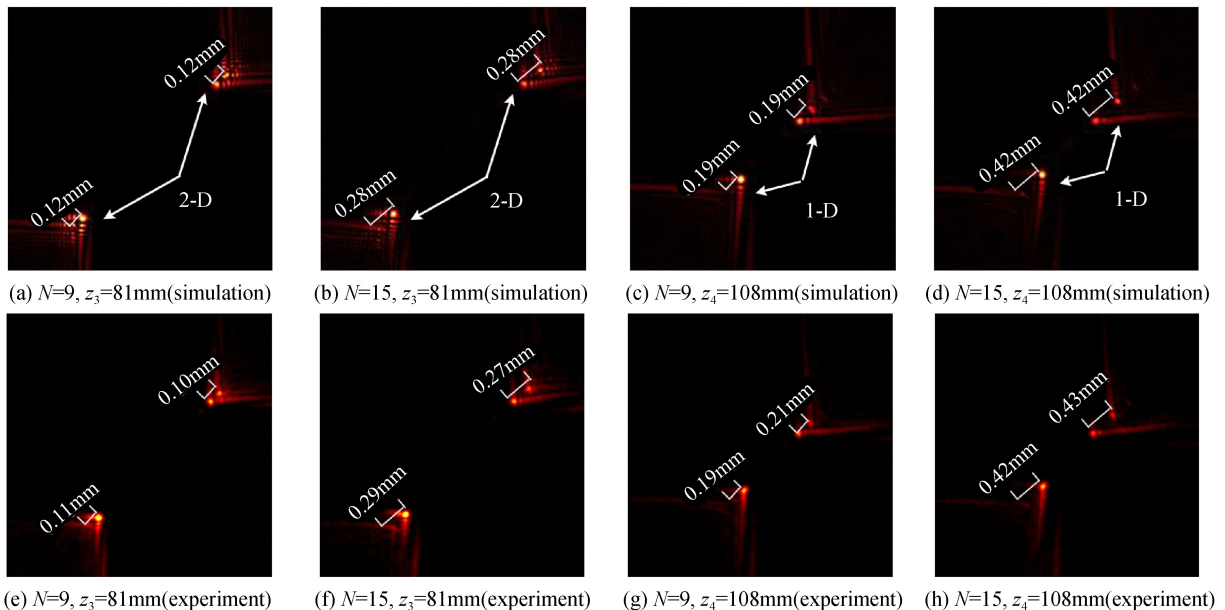


图 7 参量 N 对双复合离散型艾里涡旋加速光的调控
Fig.7 The modulation of the parameter N to twins composite discrete Airy-Vortex accelerating beam

[(a)~(d)为模拟结果,(e)~(h)为对应的实验结果],当 ΔL 固定为5时,当 N 从9增加至15,分离的二维($z_3=81$ mm处)及一维类艾里光束($z_4=108$ mm处)的主瓣之间的距离分别随之增加。

在离散涡旋项作用下,双复合离散型艾里涡旋加速光的侧瓣能量随传输而转移.当传输距离足够大,能量转移程度增加,最终二维类艾里光演化为一维类艾里光(见图4(e),(j), $z_4=108$ mm处).由 $l_n=l_1+(n-1)\Delta L$ 知,当 ΔL 减小,不同层上的拓扑荷值减小,侧瓣能量转移变慢,在同一传输距离处,侧瓣的能量转移程度减弱,类艾里光的演化程度也随之减弱.如图8所示[(a)~(d)为模拟结果,(e)~(h)为对应的实验结果], N 固定为12时,当 $\Delta L=2$,离散涡旋项引起的旋转效应减小,在 $z_4=108$ mm处,侧瓣能量转移程度小,光场分布依旧为二维类艾里光[如图8(c),(g)所示];当 $\Delta L=5$ 时,离散涡旋项引起的旋转效应增强,在 $z_4=108$ mm处侧瓣能量转移程度大,二维类艾里光演化为一维[如图8(d),(h)所示].离散涡旋项所引起的旋转效应,不仅影响类艾里光的演化程度,且能引起类艾里光之间能量转移.如图8所示,当 $\Delta L=2$,旋转效应较弱,能量主要分布于一个类艾里光上,几乎不发生转移,类艾里光之间的强度差别大[如图8(a),(c),(e),(g)所示];当 $\Delta L=5$,旋转效应增强,能量发生转移,类艾里光之间的强度差别较小[如图8(b),(d),(f),(h)所示].

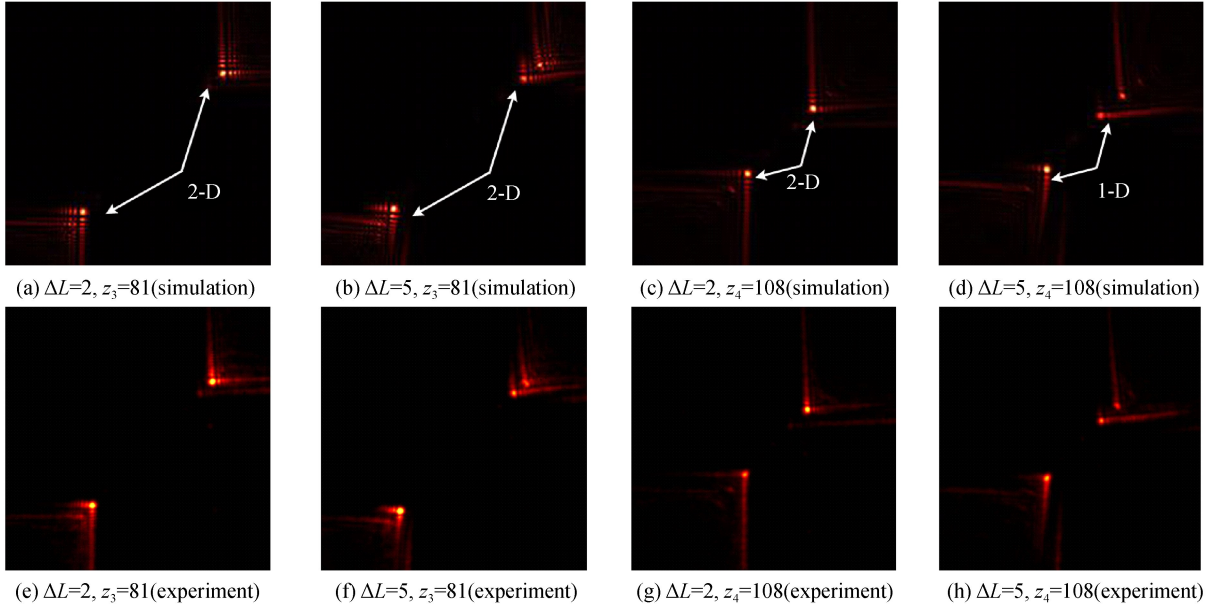


图8 参量 ΔL 对双复合离散型艾里涡旋加速光的调控

Fig.8 The modulation of the parameter ΔL to twins composite discrete Airy-Vortex accelerating beam

2 结论

本文对离散型艾里涡旋相位进行二元相位处理,利用全息技术,成功制作了双复合离散型艾里涡旋加速光,并实现了对此新型光束分布的调控.此双加速光在自由空间沿着抛物线轨迹传输,由于离散涡旋项的作用,在传输中逐渐分离为多个类艾里光;双加速光侧瓣能量随传输发生转移,使二维类艾里光逐渐演化为一维.此外,通过理论分析、模拟和实验探究,参量 s 和 N 分别调节双加速光在初始截面($z=0$ 处的 $x-y$ 平面)中的位置分布和多个类艾里光之间的分离程度;参量 ΔL 可调节二维类艾里光至一维类艾里光的演化程度,同时也可调节类艾里光之间的能量分布.根据此双复合离散型艾里涡旋加速光的动态传输特性及其动态调控机制,预期其在捕获微粒及动态操控微粒方面有着很好的应用前景.

参考文献

- [1] BERRY M V, BALAZS N L. Nonspreading wave packets[J]. *American Journal of Physics*, 1979, **47**(3): 264-267.
- [2] SIVILOGLOU G A, BROKY J, DOGARIU A, et al. Observation of accelerating Airy beams[J]. *Physical Review Letters*, 2007, **99**(21): 213901.
- [3] SIVILOGLOU G A, CHRISTODOULIDES D N. Accelerating finite energy Airy beams[J]. *Optics Letters*, 2007, **32**(8): 979-981.
- [4] COTTRELL D M, DAVIS J A, HAZARD T M. Direct generation of accelerating Airy beams using a 3/2 phase-only

- pattern[J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(17): 2634-2636.
- [5] BROKY J, SIVILOGLOU G A, DOGARIU A, *et al.* Self-healing properties of optical Airy beams[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(17): 12880-12891.
- [6] BAUMGARTL J, MAZILU M, DHOLAKIA K. Optically mediated particle clearing using Airy wave packets[J]. *Nature Photonics*, 2008, **2**(11): 675-687.
- [7] POLYNKIN P, KOLESIK M, CHRISTODOULIDES D N, *et al.* Curved plasma channel generation using ultraintense Airy beams[J]. *Science*, 2009, **324**(5924): 229-233.
- [8] BLECKMANN F, MINOVICH A, FROHNHAUS J, *et al.* Manipulation of Airy surface plasmon beams[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(9): 1443-1445.
- [9] LU Y, JIANG B, QI X Y, *et al.* Arrays of gaussian vortex, Bessel and Airy beams by computer-generated hologram[J]. *Optics Communications*, 2016, **363**: 85-90.
- [10] HU Y, ZHANG P, CHEN Z G, *et al.* Optimal control of the ballistic motion of Airy beams[J]. *Optics Letters*, 2010, **35** (13): 2260-2262.
- [11] SHI Yao-yao, WU Tong, LIU You-wen, *et al.* Control of self-bending Airy beams[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(12): 1401-1407.
施瑶瑶, 吴彤, 刘友文, 等. 艾里光束自弯曲性质的控制[J]. 光子学报, 2013, **42**(12):1401-1407.
- [12] CAO Z, TAN Q, QI X Y, *et al.* Nonlinear evolution of Airy-like beams generated by modulated waveguide arrays[J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(24): 6601-6605.
- [13] XU Sen-dong, FENG Yuan-xin. Study on propagation properties of the Airy beams through negative index medium[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **44**(2): 0208002.
许森东, 冯元新. 艾里光束通过负折射率介质的传输特性[J]. 光子学报, 2014, **44**(2): 0208002.
- [14] CHONG A, RENNINGER W H, CHRISTODOULIDES D N, *et al.* Airy-Bessel wave packets as versatile linear light bullets[J]. *Nature Photonics*, 2010, **4**(2): 103-106.
- [15] ABDOLLAHPOUR D, SUNTSOV S, PAPAOGLOU D G, *et al.* Spatiotemporal Airy light bullets in the linear and nonlinear regimes[J]. *Physical Review Letters*. 2010, **105**(25): 253901-1-253901-4.
- [16] ALEAHMAD P, MIRI M A, CHRISTODOULIDES D N, *et al.* Fully vectorial accelerating diffraction-free Helmholtz beams[J]. *Physical Review Letters*, 2012, **109**(20): 203902-1-203902-5.
- [17] ZHANG P, HU Y, CHEN Z G, *et al.* Nonparaxial Mathieu and Weber accelerating beams[J]. *Physical Review Letters*, 2012, **109**(19): 193901-1-193901-5.
- [18] REN Z J, WU Q, SHI Y L, *et al.* Production of accelerating quad Airy beams and their optical characteristics[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(12): 15154-15164.
- [19] QIAN Y X, ZHANG S. Quasi-Airy beams along tunable propagation trajectories and directions[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(9): 9489-9500.
- [20] MAZILU M, BAUMGARTL J, ČIŽMÁR T, *et al.* Accelerating vortices in Airy beams[C]. SPIE, 2009, **7430**: 74300C.
- [21] CHENG Ke, XIA Ji-shen, ZHONG Xian-qiong. Propagation dynamics and vortex trajectory of an Airy vortex beam in gradient-index media[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(9): 0905002.
程科, 夏基深, 钟先琼. 艾里涡旋光在梯度折射率介质中的动态传输与涡旋轨迹[J]. 光子学报, 2014, **43**(9): 0905002.
- [22] BARÁNEK M, BOUCHAL Z. Optimizing the rotating point spread function by SLM aided spiral phase modulation[C]. SPIE, 2014, **9441**: 94410N-1-94410N-10.
- [23] FAN Y T, WEI J S, MA J Y, *et al.* Tunable twin Airy beams induced by binary phase patterns[J]. *Optics Letters*. 2013, **38**(8): 1286-1288.
- [24] IZDEBSKAYA Y V, LU T H, NESHEV D N, *et al.* Dynamics of three-Airy beams carrying optical vortices[J]. *Applied Optics*, 2014, **53**(10): B248-B253.
- [25] DAVIS J A, COTTRELL D M, CMPOS J, *et al.* Encoding amplitude information onto phase-only filters[J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(23): 5004-5013.
- [26] GOODMAN J W. Introduction to Fourier optics[M]. America: McGraw-Hill, 1968.
- [27] HAN K, JI K W, QI X Y, *et al.* Observation of the composite Airy-like accelerating beams generated by the discrete vortex-cubic phase masks[J]. *Optik*, 2018, **157**: 1122-1128.