

强非局域非线性介质中两种空间位置相反 Airy 光束产生的脱落孤子演化

文兵¹, 邓杨保², 傅喜泉¹

¹湖南大学信息科学与工程学院, 微纳光电器件教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082;

²湖南城市学院信息与电子工程学院, 湖南 益阳 413002

摘要 利用分步傅里叶方法, 数值模拟了强非局域非线性介质中两种空间位置相反的 Airy 光束在不同振幅、截断系数和非局域程度条件下产生的脱落孤子演化。研究发现: 当光束的振幅增大、截断系数减小和介质的非局域系数减小时, 正 Airy 光束不但主峰能够产生脱落孤子, 其旁瓣也能产生脱落孤子, 从而导致孤子数目进一步增加。无论振幅、截断系数和非局域系数如何变化, 反 Airy 光束只能在主峰处产生一个脱落孤子, 其旁瓣都不能产生脱落孤子。通过调控 Airy 光束的振幅、截断系数和介质的非局域系数可控制脱落孤子的产生和数目。

关键词 非线性光学; Airy 光束; 强非局域; 高非线性; 演化

中图分类号 O437 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.041902

Evolution of Shedding Soliton Generated by Two Space-Reversed Shapes of Airy Beams in Strongly Nonlocal Nonlinear Medium

Wen Bing¹, Deng Yangbao², Fu Xiquan¹

¹Key Laboratory for Micro/Nano-Optoelectronic Devices of Ministry of Education,

College of Computer Science and Electronic Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China;

²College of Information and Electronic Engineering, Hunan City University, Yiyang, Hunan 413002, China

Abstract Under the conditions of different amplitudes, truncation coefficients, and nonlocal degrees, we numerically study the evolution of shedding solitons generated by two kinds of symmetric Airy pulses with space-reversed shapes in a strongly nonlocal nonlinear medium by split-step Fourier method. The results indicate that as the amplitude increases, truncation coefficient and nonlocal coefficient decrease, a tail-leading Airy beam not only generates a shedding soliton at the main lobe, but also generates the shedding solitons at the side-lobes. Thus the number of shedding soliton further increases. However, no matter how the amplitude, truncation coefficient, and nonlocal coefficient change, only one shedding soliton is generated at the main lobe of a tail-trailing Airy beam, while the shedding soliton cannot be generated at the side-lobes. Therefore, we can control the generation and number of shedding soliton by manipulating the amplitude and the truncation coefficient of an Airy beam, and controlling the nonlocal coefficient of a medium.

Key words nonlinear optics; Airy beams; strongly nonlocal area; high nonlinearity; evolution

OCIS codes 190.4420; 190.4370; 190.5940; 190.6135

收稿日期: 2017-11-09; 收到修改稿日期: 2017-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(61571183, 61605045)、湖南省自然科学基金(2017JJ1014, 2017JJ3012)、湖南省教育厅优秀青年基金(15B042)

作者简介: 文兵(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事激光的传输与相互作用方面的研究。

E-mail: wenbing0409@126.com

导师简介: 傅喜泉(1977—), 男, 博士, 教授, 主要从事高功率激光的传输与控制方面的研究。

E-mail: fuxiquan@gmail.com

1 引言

2007年, Siviloglou等^[1]通过实验第一次产生并观察到有限能量的 Airy 光束。Airy 光束独特的性质, 如近似无衍射^[2]、横向自加速^[3]、自愈^[4-5]等, 使其在等离子通道^[6]、微粒操控^[7]、光子弹^[8]、大气通信^[9], 以及其他领域具有重要的应用前景, 引起极大关注。研究者在 Airy 光束的产生方法^[10-14]、轨迹控制^[15-16]和应用^[17-20]等方面做了大量研究。在非线性和区域控制 Airy 光束, 可以产生很多奇异的演化特征, 最显著的是 Airy 光束在非线性效应作用下使主峰处脱落出 1 个孤子, 由于 Airy 光束的自愈特性, 剩余部分能够逐渐恢复成 Airy 光束的形状并保持自加速传输, 而能量主要集中在脱落的孤子部分^[21]。Airy 光束在非线性介质中传输时, 高阶效应, 如拉曼和自陡, 均会使主峰脱落的孤子发生自加速偏转^[22]。目前已有许多关于 Airy 光束在非线性介质中传输时的调制不稳定性^[23]、自聚焦^[24]和自频移^[25]等方面的研究, 其中两束 Airy 光束^[26]或者 Airy 光束和孤子在非线性介质中共同传输^[27]的报道很多。

Airy 光束存在着空间位置相反的两种形式, 分别称其为正、反 Airy 光束。正 Airy 光束的形状为主峰在前, 拖尾在后; 反 Airy 光束的形状为拖尾在前, 主峰在后。在线性介质中传输时, 这两种形式 Airy 光束的运动轨迹都会出现弯曲, 分别表现出自加速和自减速的传输特性^[28]。但是, 在高阶非线性效应作用下, 正、反 Airy 光束均表现出自加速特性^[29]。由于正、反 Airy 光在非线性介质中传输时均可以在主峰处脱落出 1 个孤子, 所以很多研究者研究了脱落孤子之间的相互作用。峰值功率相同的正、反 Airy 光束在克尔非线性介质^[30]和饱和非线性介质^[31]中传输时, 所产生的脱落孤子由于相互作用距离短, 在它们的主峰位置间距小于主峰束宽时表现为吸引, 孤子缠绕形成类似 DNA 螺旋结构的缠绕孤子对。

当光束宽度比材料响应函数的宽度小得多时, 介质呈现出强非局域、高非线性特性, 很多研究发现非局域非线性对孤子的传输有显著影响^[32-34]。相对于局域非线性介质, Airy 光束在非局域非线性介质中传输时会产生一些奇异特性^[35], 使其可以很好地应用于光开关和光学操控^[36]。Zhou 等^[37]发现 Airy 光束在强非局域非线性介质中传输时会脱落出 1 个强度周期性变化的呼吸孤子。Zhu 等^[38]运

用传递矩阵法, 对二维 Airy 光束在强非局域非线性介质中的传输进行了研究。Shen 等^[39]研究了脱落孤子在非局域非线性介质中的传输特性, 发现脱落孤子存在长距离相互作用, 即使在 Airy 光束的主峰位置距离较远(主峰位置差需小于 3 倍主峰宽度)的情况下, 也能够由于相互吸引而缠绕成螺旋结构。Huang 等^[40]研究了 Airy 光束在强非局域非线性介质中的多孤子脱落现象。Airy 光束在强非局域非线性介质中传输时, 能量加速向主峰集中并脱落出 1 个孤子^[39], 这样 Airy 光束就演变成了孤子, 光孤子在强非局域非线性介质中传输时, 会发生自偏转, 还能实现分束^[41-42]。这些研究成果为研究不同形式的 Airy 光束传输提供了一定的指导。

目前, 虽然已经有研究者对正 Airy 光束在强非局域非线性介质中的传输特性进行相关研究^[37-40], 但是有关反 Airy 光束在该介质中的传输特性还未见研究的报道。为了更好地理解不同形式的 Airy 光束在强非局域非线性介质中的传输特性, 更有效地操控脱落孤子, 本文研究了正、反 Airy 光束在强非局域非线性介质中的演化, 着重分析了不同振幅、截断系数和非局域程度对正、反 Airy 光束所产生脱落孤子的演化影响。

2 理论模型

Airy 光束在非局域非线性介质中的传输可以由非局域非线性薛定谔方程描述, 计算中忽略介质的损耗和高阶效应^[34]:

$$i \frac{\partial \phi}{\partial z} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + |\phi|^2 \phi - \mu \phi \frac{\partial \phi^2}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

式中: $\phi(x, z)$ 为光束包络; $x = X/X_0$ 为无量纲的横向坐标, X_0 为光束的宽度; z 为归一化传输距离; 系数 μ 为非局域效应的大小, 并且一般情况 $|\mu| < 1$ 。 μ 代表非局域非线性响应的程度, 当 $\mu \rightarrow \infty$ 时, (1) 式被简化成非局域非线性薛定谔方程; 当 $\mu \rightarrow 0$ 时, (1) 式对应的是强局域状态, 描述的是液体晶体在稳定状态下的非线性响应。通常, 当具有指数响应的非局域非线性介质呈现出各种程度的非局域性时, 光场在其中的传输都可以用(1)式来描述。在已有的理论和实验工作中, 就存在着这样的物理系统, 一个典型的例子是(1)式可以描述电磁波在存在着恒定静电场的向列型液晶中的传播, μ 为向列型液晶的弹性势能与外加静电场能量的比值, 描述介质的非局域程度。特别值得注意的是, 通过调节外加静电压改变 μ , 液晶能够表现出各种程度的非局域性。此外, (1)

式还能描述光束在部分电离的等离子体中的传输。

在实验模拟中,归一化的初始 Airy 脉冲存在两种形式:

$$\phi(x, z=0) = A \times F_A(x) \exp(ax), \quad (2)$$

for tail-leading Airy beam,

$$\phi(x, z=0) = A \times F_A(-x) \exp(-ax), \quad (3)$$

for tail-trailing Airy beam,

式中 $0 < a < 1$, a 为 Airy 脉冲的截断系数,能够控制 Airy 光束的旁瓣的峰值; A 为归一化的光束振幅; $F_A(x)$ 代表 Airy 函数, $F_A(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[i\left(\frac{u^3}{3} + xu\right)\right] du$ 。只有当光束能量达到一定程度时,非局域性的作用才能显现,所以 A 的理想取值范围为 $A > 1$ 。

图 1 为截断系数 $a = 0.1$ 时,初始输入的正、反 Airy 光束横向空间分布图以及 Airy 光束的主峰相对能量随截断系数 a 的变化图。从图 1(a)可见,正 Airy 光束在初始位置的形状为非对称的拖尾振荡结构,主峰的能量最高,在主峰左侧有很多旁瓣,形

成了一个长长的拖尾,并且旁瓣的能量逐渐减小。从图 1(b)可见,反 Airy 光束在初始位置的形状和正 Airy 光束完全对称。Airy 光束为多峰结构,截断系数 a 能够控制主峰和旁瓣的峰值,主峰能量占 Airy 光束主要部分。Airy 光束的各瓣峰值越高,在非局域非线性介质中传输时越容易脱离出孤子,因此 Airy 光束总是主峰先脱离出孤子。研究不同截断系数下的 Airy 光束的主峰占比能更容易理解主峰和旁瓣在非局域非线性介质中产生的条件。从图 1(c)可以看出,Airy 光束随着截断系数的增加,脉冲主峰的能量占总能量的比例越来越大,当截断系数 a 增加到 0.4 时,主峰能量基本上不再增加。因为 a 相对较小时,Airy 脉冲有许多振荡拖尾的旁瓣,故主峰占有脉冲总能量比例较小;当 a 增大时,脉冲振荡拖尾部分的旁瓣迅速减少,而脉冲总能量不变,即拖尾旁瓣能量转移到了主峰;当 a 增加到 0.4 以后,脉冲旁瓣越来越少直至消失,脉冲几乎演变成高斯形状,主峰能量达到最大值,脉冲几乎失去了横向自加速的特性。

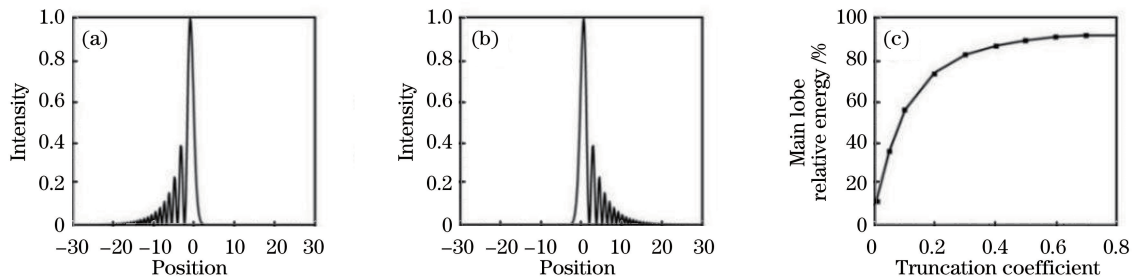


图 1 $a = 0.1$ 时,初始输入的(a)正、(b)反 Airy 光束空间分布图和(c) Airy 光束的主峰相对能量随截断系数变化
Fig. 1 Spatial profiles of (a) tail-leading Airy beam and (b) tail-trailing Airy beam in the initial position with truncated coefficient $a = 0.1$; (c) Airy beams relative energy at main lobe as a function of truncation coefficient

基于以上分析,下面理论模拟正、反 Airy 光束在非局域非线性介质中的传输,各初始参数的取值范围: $0 < \mu < 1, A > 1, 0 < a < 0.4$ 。

3 数值计算结果分析

本部分讨论正、反两种对称 Airy 光束的初始振幅 A 、截断系数 a ,以及介质的非局域效应系数 μ 对脱离孤子的演化影响。色散系数为 -1 ,一般非线性系数为 1 ,这两系数保持不变。

3.1 克尔非线性介质和强非局域非线性介质中,正、反 Airy 光束的演化特性

图 2 为当截断系数 $a = 0.4$,非局域效应系数 $\mu = 0.3$ 和振幅 $A = 4$ 时,正、反 Airy 光束在克尔非线性介质和强非局域非线性介质中的演化过程。由图 2(a)可知,正 Airy 光束在二阶色散和自相位调

制的共同作用下,经历 1 个初始阶段光束宽度缩小的阶段,且 Airy 光束的最大强度增加。当传输到 $z = 2.5$ 时,Airy 光束的主峰处脱离出 1 个孤子,而剩下的部分逐渐恢复成 Airy 光束形式,然后继续保持横向自加速传输。由图 2(b)可知,反 Airy 光束同样经历 1 个初始光束宽度缩小的阶段,并在传输距离 $z = 2.5$ 时脱离出 1 个孤子,剩下的部分保持横向自加速传输。从图 2(c)可见,当考虑非局域效应对 Airy 光束的传输影响时,其演化规律与在克尔非线性介质中是不同的。在群速度色散、自相位调制和非线性效应的共同作用下,正 Airy 光束的宽度会加速缩小,主峰的峰值功率会更快地达到脱离出孤子的阈值并脱离出孤子,且其传输轨迹是弯曲的。从图 2(d)可见,反 Airy 光束在强非局域非线性介质中所脱离出孤子的传输距离及脱离孤子的运动轨

迹几乎和正 Airy 光束的相同。另外发现,正、反 Airy 光束在强非局域非线性介质中传输时,在相同

的传输距离,正 Airy 光束的横向位移更大,正 Airy 光束具有更大的自加速和自弯曲特性。

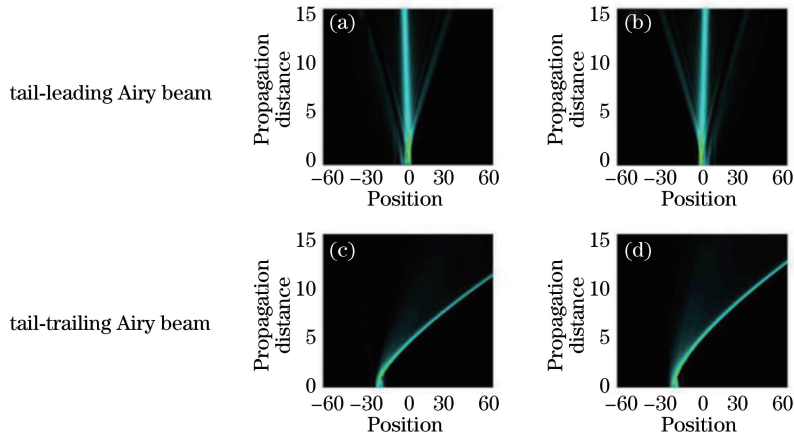


图 2 $a=0.4, A=4$ 时,正、反 Airy 光束在不同介质中的演化。(a)、(b)克尔非线性介质;(c)、(d)强非局域非线性介质, $\mu=0.3$
Fig. 2 Evolutions of the two spatially symmetrical Airy beams in different media with launched truncated coefficient $a=0.4$ and amplitude $A=4$. (a), (b) Kerr nonlinear medium; (c), (d) strongly nonlocal nonlinear medium, $\mu=0.3$

图 3 为截断系数 $a=0.5$,非局域效应系数 $\mu=0.4$ 时,在不同振幅条件下,正、反 Airy 光束在强非局域非线性介质中传输时的主峰和旁瓣脱落孤子随传输距离的变化。从图 3(a)可知,正 Airy 光束在初始振幅 $A=1.5$ 时,在较大的传输距离 $z=6$ 时脱落后第 1 个孤子。当初始振幅增大时,脱落孤子的数目增加,并且孤子脱落时间变早。在 $z=9.8, A=2$ 时,出现第 2 个脱落孤子。在 $z=13.8$ 和 $A=3.1$ 时,出现第 3 个脱落孤子。可见随着振幅的增大,正 Airy 光束会在更短的传输距离脱落后更多的孤子。从图 3(b)可知,反 Airy 光束始终只脱落后 1 个孤子,并且随着振幅的增加,反 Airy 光束会在更短的传输距离脱落后孤子。反 Airy 光束脱落孤子的传输轨迹会与反 Airy 光束的旁瓣发生碰撞,旁瓣能量

大部分转移到脱落孤子上,故旁瓣会由于能量不够而不能产生脱落孤子。

3.2 强非局域非线性介质中,正、反 Airy 光束的截断系数对孤子的流出的影响

图 4 为非局域效应系数 $\mu=0.3$,振幅 $A=4$ 时,不同截断系数 a 下的正、反 Airy 光束演化特性。从图 4(a)可知,当截断系数 $a=0.05$ 时,正 Airy 光束能够脱落后 4 个传输轨迹弯曲的孤子,其传输轨迹由非局域效应所致。随着截断系数增加,从图 4(b)可见,当 $a=0.15$ 时,第 1 个旁瓣脱落后孤子,并且主瓣脱落的孤子发生分裂,脱落孤子的数目达到 3 个。从图 4(c)可见,当 $a=0.25$ 时,正 Airy 光束在强非局域非线性介质中只能在主瓣处脱落后 1 个孤子。可见,正 Airy 光束所脱落后的孤子数目会随着截断系数的减小而增加,因为随着截断系数的减小,Airy 光束的能量可以更加平均地分配到各旁瓣中去,旁瓣获得一定的能量而达到发生脱落孤子的阈值并脱落后孤子。从图 4(d)~(f)可知,反 Airy 光束在强非局域非线性介质中只脱落后 1 个孤子。反 Airy 光束的旁瓣在主峰右侧,主峰处的脱落孤子会向右偏转,随着传输距离的增加,该孤子会与旁瓣发生碰撞。由于旁瓣的峰值较小,旁瓣的能量大部分转移到主峰的脱落孤子上,从而导致旁瓣的能量小于产生孤子的阈值而不能脱落后孤子,并且随着截断系数增加,反 Airy 光束脱落孤子的传输轨迹弯曲程度会增加。由图 4 可知,为增加脱落孤子的数目,可以选择截断系数较小的正 Airy 光束。

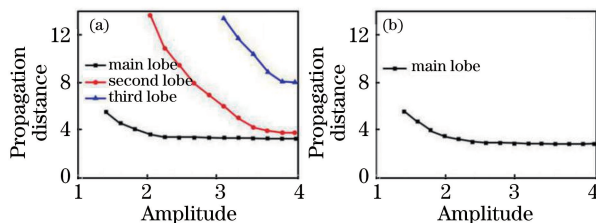


图 3 $a=0.5, \mu=0.4$,在强非局域非线性介质中传输时,正、反 Airy 光束的主峰和旁瓣在不同振幅条件下脱落后孤子随传输距离的变化。(a)正 Airy 光束;(b)反 Airy 光束

Fig. 3 Position of the solitons shedding at the main lobe and the side lobes of two spatially symmetrical Airy beams versus different amplitudes with launched truncated coefficient $a=0.5$ and nonlocal parameter $\mu=0.4$. (a) Tail-leading Airy beam; (b) tail-trailing Airy beam

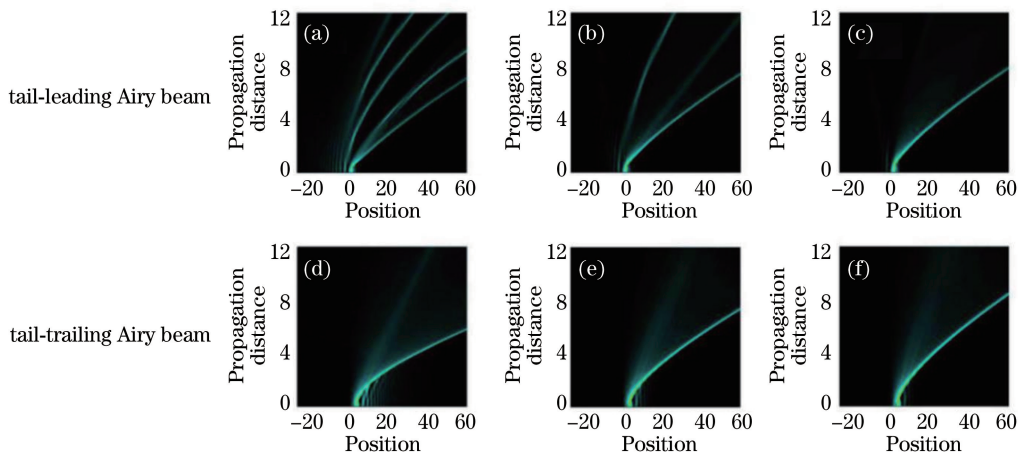


图 4 $\mu=0.3, A=4$ 时,正、反 Airy 光束在不同截断系数条件下随传输距离的变化。

(a)、(d) $a=0.05$; (b)、(e) $a=0.15$; (c)、(f) $a=0.25$

Fig. 4 Position of the solitons shedding at the main lobe and the side lobes of two spatially symmetrical Airy beams for different truncated coefficients with launched amplitude $A=4$ and nonlocal parameter $\mu=0.3$.

(a), (d) $a=0.05$; (b), (e) $a=0.15$; (c), (f) $a=0.25$

图 5 为非局域效应系数 $\mu=0.3$, 振幅 $A=4$ 时, 在不同截断系数下, 正、反 Airy 光束的主峰和旁瓣脱落孤子的归一化强度变化情况。从图 5(a) 可知, 当截断系数为 $a=0.01$ 时, 正 Airy 光束能够脱落出 5 个孤子, 第 2 瓣的峰值功率占主瓣的 60%; 而当截断系数 $a=0.2$ 时, 脱落孤子数为 3, 第 2 瓣的峰值功率占主瓣的 24%; 当截断系数 a 进一步增大时, 正 Airy 光束的旁瓣越来越少直至消失, 演变成为高斯形状光束, 主峰能量达到最大值, 正 Airy 光束只能

在主峰处脱落出 1 个孤子。由此可知, 当正 Airy 光束的截断系数增大时, 脱落孤子的数目减少。从图 5(b) 可见, 无论截断系数如何变化, 反 Airy 光束只在主峰处脱落出 1 个孤子, 旁瓣无脱落孤子。反 Airy 光束的旁瓣在主峰右侧, 故主峰处的脱落孤子会向右偏转, 随着传输距离的增加, 该孤子会与旁瓣发生碰撞。由于旁瓣的峰值较小, 旁瓣的能量大部分转移到主峰的脱落孤子上, 从而导致旁瓣的能量小于产生孤子的阈值而不能脱落孤子。

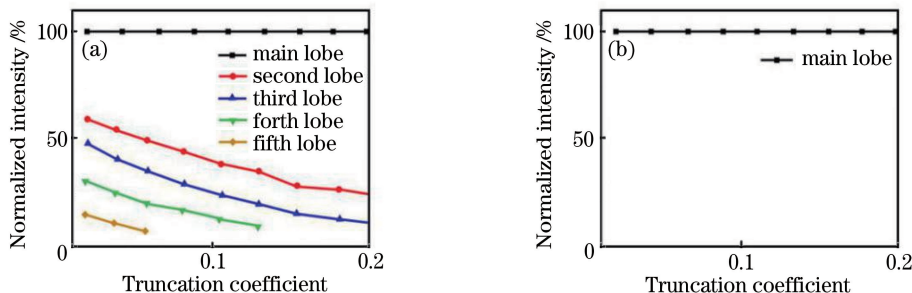


图 5 $\mu=0.3, A=4, z=10$ 时, 正、反 Airy 光束的主峰和旁瓣脱落孤子的强度随截断系数 a 的变化。

(a) 正 Airy 光束; (b) 反 Airy 光束

Fig. 5 Intensities of the solitons shedding at the main lobe and the side lobes of two spatially symmetrical Airy beams for different truncated coefficients with nonlocal parameter $\mu=0.4$, amplitude $A=4$ and propagation distance $z=10$.

(a) Tail-leading Airy beam; (b) tail-trailing Airy beam

图 6 表示当非局域效应系数 $\mu=0.3$, 振幅 $A=4$, 传输距离 $z=10$ 时, 正、反 Airy 光束主峰处的脱落孤子在不同截断系数下的横向位置。从图 6 可见, 正、反 Airy 光束主峰脱落孤子的横向位置偏移量都随截断系数的增加而减少。相对于正 Airy 光

束, 反 Airy 光束主峰脱落孤子的横向位移随截断系数的变化更快。当 $a < 0.35$, 正 Airy 光束主峰脱落孤子的横向位置偏移小于反 Airy 光束; 当 $a > 0.35$ 时, 正 Airy 光束主峰脱落孤子的横向位置偏移大于反 Airy 光束。

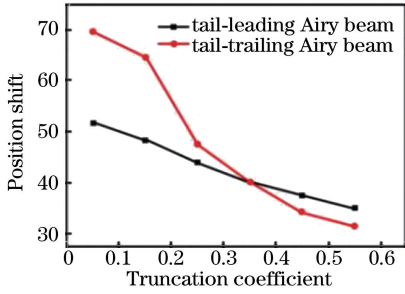


图 6 $\mu = 0.3, A = 4, z = 10$ 时, 正、反 Airy 光束主峰处的脱落孤子在不同截断系数下的横向位置情况
 Fig. 6 Horizontal positions of the solitons shedding at the main lobe for different truncated coefficients with nonlocal parameter $\mu = 0.4$, amplitude $A = 4$ and propagation distance $z = 10$

3.3 强非局域非线性介质中, 介质的非局域系数对正、反 Airy 光束脱落孤子的影响

图 7 为截断系数 $a = 0.15$, 振幅 $A = 4$ 时, 在不同非局域系数 μ 下的正、反 Airy 光束演化特性。从图 7(a) 可见, 当 $\mu = 0.3$ 时, 正 Airy 光束由于经历了

初始阶段的光束压缩, 主峰和次峰的峰值功率达到脱落孤子的阈值而发生孤子脱落。随着传输距离的增加, 主瓣所脱落出的孤子会进一步分裂。从图 7(b) 可见, 当 $\mu = 0.4$ 时, 正 Airy 光束产生的脱落孤子数与图 7(a) 一样, 由于非局域系数越大, 介质的非局域效应就越小, 所以脱落孤子传输轨迹的弯曲程度减小。由图 7(c) 可见, 当 $\mu = 0.5$ 时, 正 Airy 光束只产生 2 个脱落孤子。由于非局域系数越大, 介质的非局域效应就越小, 所以主峰脱落出的孤子没有发生进一步分裂。由图 7(d) ~ (f) 可见, 反 Airy 光束只脱落出 1 个孤子, 随着非局域系数的增加, 非局域效应减小, 脱落出孤子的弯曲程度减小。由图 7 可知, 非局域效应可以导致孤子传输轨迹的弯曲和孤子分裂, 正 Airy 光束在强非局域非线性介质中传输时能产生多孤子结构, 故我们可以通过调控非局域系数来控制产生脱落孤子数。

图 8 为当截断系数 $a = 0.15$, 振幅 $A = 4$, 传输距离 $z = 8$ 时, 正、反 Airy 光束的主峰和旁瓣脱落

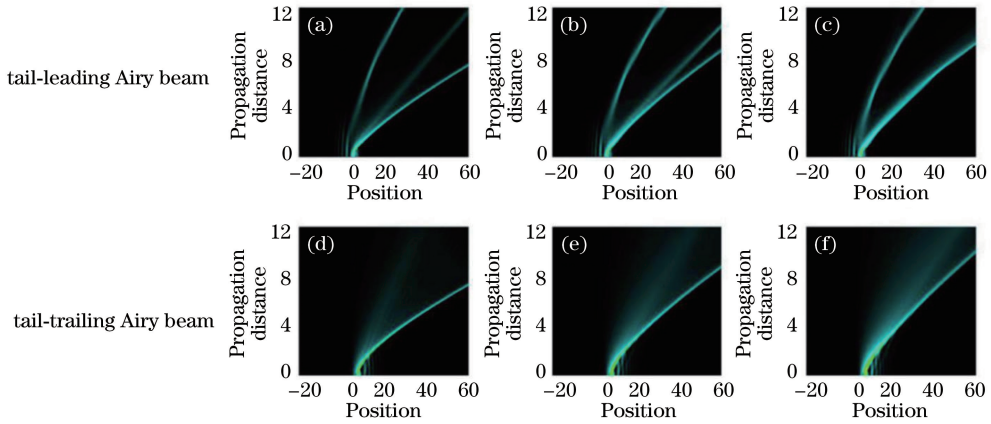


图 7 $a = 0.15, A = 4$ 时正、反 Airy 光束在不同的非局域系数 μ 时传输距离的的演化。(a), (d) $\mu = 0.3$; (b), (e) $\mu = 0.4$; (c), (f) $\mu = 0.5$
 Fig. 7 Position of the solitons shedding at the main lobe and the side lobes of two spatially symmetrical Airy beams for different nonlocal parameters with truncated coefficient $a = 0.15$ and amplitude $A = 4$.
 (a), (d) $\mu = 0.3$; (b), (e) $\mu = 0.4$; (c), (f) $\mu = 0$

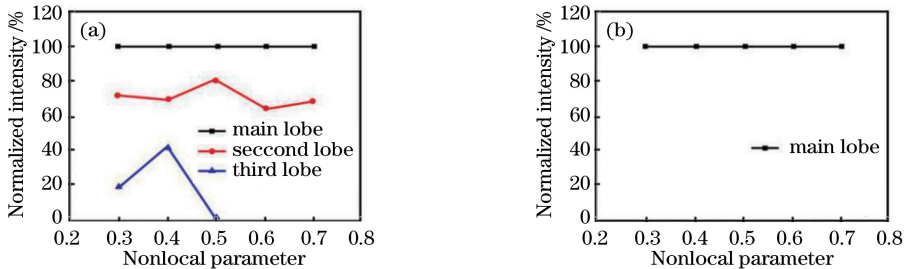


图 8 $a = 0.15, A = 4, z = 8$ 时, 正、反 Airy 光束的主峰和旁瓣脱落孤子的归一化强度随非局域系数的变化。
 (a) 正 Airy 光束; (b) 反 Airy 光束

Fig. 8 Intensities of the solitons shedding at the main lobe and the side lobes of two spatially symmetrical Airy beams for different nonlocal parameters with truncated coefficient $a = 0.15$, amplitude $A = 4$ and propagation distance $z = 8$.

(a) Tail-leading Airy beam; (b) tail-trailing Airy beam

孤子的归一化强度随非局域系数的变化。从图 8(a)可见,当 $\mu < 0.4$ 时,正 Airy 光束的主峰脱落孤子出现分裂,孤子数为 3。当 $\mu > 0.5$ 时,正 Airy 光束的主瓣和第 1 个旁瓣都脱落出 1 个孤子,孤子总数为 2 个。由图 8(b)可见,无论非局域系数如何变化,反 Airy 光束只脱落出 1 个孤子。由图 8 可知,当非局域系数减小时,介质的非局域效应增加,从而导致脱落孤子出现分裂和孤子数增加。

图 9 为当截断系数 $a = 0.15$,振幅 $A = 4$,传输距离 $z = 10$ 时,正、反 Airy 光束的主峰脱落孤子在不同非局域系数下的横向位置变化情况。从图 9 可见,正 Airy 光束主峰脱落孤子的横向位置偏移量随非局域系数的增加先减少后增加;而反 Airy 光束主峰脱落孤子的横向位置偏移量随非局域系数增加一直减少。

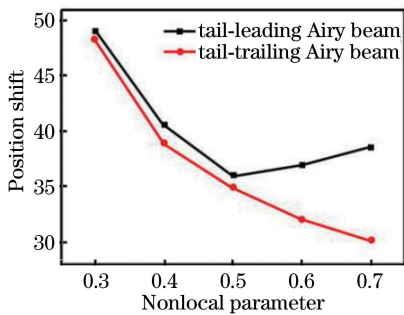


图 9 $a = 0.15, A = 4, z = 10$ 时,正、反 Airy 光束的主峰脱落孤子在不同非局域系数条件下的横向位置变化
Fig. 9 Horizontal positions of the solitons shedding at the main lobe for different nonlocal parameters with truncated coefficient $a = 0.15$, amplitude $A = 4$ and propagation distance $z = 10$

4 结 论

利用分步傅里叶方法求解具有非局域效应的非线性薛定谔方程,研究正、反两种空间位置对称的 Airy 光束在不同振幅、截断系数和非局域程度条件下产生的脱落孤子演化。理论模拟结果发现:当振幅增大时,正 Airy 光束的主峰和旁瓣功率都会进一步增加,超过产生孤子的最小阈值,在主峰和旁瓣处产生多个脱落孤子;当截断系数减小时,正 Airy 光束不但主峰能够产生脱落孤子,其旁瓣功率也会增加,超过产生孤子的最小阈值,也能够产生脱落孤子,形成类似多孤子结构;当介质的非局域系数减小时,非局域效应增加,正 Airy 光束的主瓣或旁瓣所产生的脱落孤子可能进一步分裂,从而导致孤子数目进一步增加。然而,无论振幅、截断系数和介质的

非局域系数如何变化,由于反 Airy 光束的旁瓣在主峰右侧,主峰产生的脱落孤子会向右偏转,随着传输距离增加,该孤子会与旁瓣发生碰撞,旁瓣的能量大部分转移到该孤子上,导致旁瓣的能量小于其产生脱落孤子的阈值而不能产生脱落孤子,故反 Airy 光束只能产生 1 个脱落孤子。

参 考 文 献

- [1] Siviloglou G A, Broky J, Dogariu A. Observation of accelerating Airy beams [J]. Physical Review Letters, 2007, 99(21): 213901.
- [2] Aleahmad P, Miri M A, Mills M S, *et al.* Fully vectorial accelerating diffraction-free helmholtz beams [J]. Physical Review Letters, 2012, 109 (20): 203902.
- [3] Alonso M A, Bandres M A. Spherical fields as nonparaxial accelerating waves [J]. Optics Letters, 2012, 37(24): 5175-5177.
- [4] Ament C, Polynkin P, Moloney J V. Supercontinuum generation with femtosecond self-healing Airy pulses [J]. Physical Review Letters, 2011, 107(24): 243901.
- [5] Yang B, Qin Y L, Liu X, *et al.* Self-healing property of two-dimensional Airy beams [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(7): 070501. 杨斌, 覃亚丽, 刘鲜, 等. 二维艾里光束的自愈特性 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(7): 070501.
- [6] Polynkin P, Kolesik M, Moloney J V, *et al.* Curved plasma channel generation using ultraintense Airy beams [J]. Science, 2009, 324(5924): 229-232.
- [7] Baumgartl J, Mazilu M, Dholakia K. Optically mediated particle clearing using Airy wave packets [J]. Nature Photonics, 2008, 2(11): 675-678.
- [8] Abdollahpour D, Suntsov S, Papazoglou D. Spatiotemporal Airy light bullets in the linear and nonlinear regimes [J]. Physical Review Letters, 2010, 105(25): 253901.
- [9] Chen C Y, Yang H M, Kavehrad M, *et al.* Propagation of radial Airy array beams through atmospheric turbulence [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 52(1): 106-114.
- [10] Dai H T, Sun X W, Luo D, *et al.* Airy beams generated by a binary phase element made of polymer-dispersed liquid crystals [J]. Optics Express, 2009, 17(22): 19365-19370.
- [11] Luo D, Dai H T, Sun X W. Electrically switchable finite energy Airy beams generated by a liquid crystal

- cell with patterned electrode [J]. *Optics Communications*, 2010, 283(20): 3846-3849.
- [12] Li L, Li T, Wang S M. Plasmonic Airy beam generated by in-plane diffraction[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(12): 126804.
- [13] Khilo N A, Belyi V N, Kazak N S, *et al.* Acoustooptic refraction-influenced generation of tunable incomplete Airy beams [J]. *Journal of Optics*, 2014, 16(8): 085702.
- [14] Cheng Z, Zhao S H, Chu X C, *et al.* Research progress of the generation methods of Airy beam[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(3): 030008.
程振, 赵尚弘, 楚兴春, 等. 艾里光束产生方法的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(3): 030008.
- [15] Wang X Z. Research on generation of Airy beams and propagation controlled by using spatial light modulator [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
王晓章. 基于相位空间光调制器的艾里光束产生和传输控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [16] Cheng Z, Chu X C, Zhao S H, *et al.* Research progress of Airy beam's propagation trajectory control[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(6): 060002.
程振, 楚兴春, 赵尚弘, 等. 艾里光束传输轨迹控制方法的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(6): 060002.
- [17] Zhang Z, Hu Y, Zhao J Y, *et al.* Research progress and application prospect of Airy beams[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(34): 3513-3520.
张泽, 胡毅, 赵娟莹, 等. 艾里光束研究进展与应用前景[J]. *科学通报*, 2013, 58(34): 3513-3520.
- [18] Xu J, Liu J, Xie J H, *et al.* Reviews of recent researches on Airy beams [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(7): 070501.
徐佳, 刘娟, 谢敬辉, 等. 艾里激光束理论及应用的最新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(7): 070501.
- [19] Li L, Zhao X X, Zhu J F, *et al.* Self-healing of selectively reflected Airy beam from resonant atoms [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(12): 121404.
李莉, 赵小侠, 朱君凡, 等. 共振原子选择反射艾里光束的自愈[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(12): 121404.
- [20] Chene Z G, Xu J J, Hu Y, *et al.* Control and novel applications of self-accelerating beams [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1026009.
陈志刚, 许京军, 胡毅, 等. 自加速光的调控及其新奇应用[J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1026009.
- [21] Fattal Y, Rudnick A, Marom D M. Soliton shedding from Airy pulses in Kerr media[J]. *Optics Express*, 2011, 19(18): 17298-17307.
- [22] Zhang L F, Zhang J G, Chen Y, *et al.* Dynamic propagation of finite-energy Airy pulses in the presence of higher-order effects [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2014, 31(4): 889-897.
- [23] Zhang L F, Zhong H Z. Modulation instability of finite energy Airy pulse in optical fiber [J]. *Optics Express*, 2014, 22(14): 17107-17115.
- [24] Yu W L, Zhang L F, Tan C, *et al.* Small-scale finite energy self-focusing of Airy beam [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(5): 0519001.
于文龙, 章礼富, 谭超, 等. 有限能量 Airy 光束的小尺度自聚焦特性 [J]. *光子学报*, 2014, 43(5): 0519001.
- [25] Zhang L F, Zhong H Z, Li Y, *et al.* Manipulation of Raman-induced frequency shift by use of asymmetric self-accelerating Airy pulse [J]. *Optics Express*, 2014, 22(19): 22598-22607.
- [26] Xu J, Liu J, Xie J H, *et al.* Reviews of recent researches on Airy beams [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(7): 070501.
徐佳, 刘娟, 谢敬辉, 等. 艾里激光束理论及应用的最新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(7): 070501.
- [27] Li L, Zhao X X, Zhu J F, *et al.* Self-healing of selectively reflected Airy beam from resonant atoms [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(12): 121404.
李莉, 赵小侠, 朱君凡, 等. 共振原子选择反射艾里光束的自愈[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(12): 121404.
- [28] Shi Y Y, Wu T, Liu Y W, *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.
- [29] Shi X H, Tan C, Bai Y F, *et al.* Dressed dynamics of two time-reversed shapes of Airy pulses in a relaxing nonlinear medium [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2015, 32(9): 1816-1823.
- [30] Zhang Y Q, Bellé M R, Wu Z K, *et al.* Soliton pair

- generation in the interactions of Airy and nonlinear accelerating beams [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(22): 4585-4588.
- [31] Zhang Y Q, Bell \acute{c} M R, Zheng H B, *et al.* Interactions of Airy beams, nonlinear accelerating beams, and induced solitons in Kerr and saturable nonlinear media [J]. *Optics Express*, 2014, 22(6): 7160-7171.
- [32] Rasmussen P D, Bang O, Królikowski W. Theory of nonlocal soliton interaction in nematic liquid crystals [J]. *Physical Review E*, 2005, 72(6): 066611.
- [33] Hu W, Zhang T, Guo Q, *et al.* Nonlocality-Controlled interaction of spatial solitons in nematic liquid crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(7): 071111.
- [34] Dreischu A, Neshev D N, Petersen D E, *et al.* Observation of attraction between dark solitons [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(4): 043901.
- [35] Bekenstein R, Segev M. Self-Accelerating optical beams in highly nonlocal nonlinear media [J]. *Optics Express*, 2011, 19(24): 23706-23715.
- [36] Deng D, Li H. Propagation properties of Airy-Gaussian beams [J]. *Applied Physics B*, 2012, 106(3): 677-681.
- [37] Zhou G Q, Chen R P, Ru G Y. Propagation of an Airy beam in a strongly nonlocal nonlinear media [J]. *Laser Physics Letters*, 2014, 11(10): 105001.
- [38] Zhu W, Guan J, Deng F, *et al.* The propagation properties of the first-order and the second-order Airy vortex beams through strongly nonlocal nonlinear medium [J]. *Optics Communications*, 2016, 380: 434-441.
- [39] Shen M, Gao J S, Ge L J. Solitons shedding from Airy beams and bound states of breathing Airy solitons in nonlocal nonlinear media [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 9814.
- [40] Huang S M, Shi X H, Bai Y F, *et al.* Multi-solitons shedding from truncated Airy beam in nonlocal nonlinear media [J]. *Photonics Technology Letters*, 2016, 28(15): 1621-1624.
- [41] Bai D F, Guo Q, Hu W. Variational investigation of Hermite-Gaussian beam propagation in nonlocal Kerr media [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(9): 5684-5689.
白东峰, 郭旗, 胡巍. 非局域克尔介质中厄米高斯光束传输的变分研究 [J]. *物理学报*, 2008, 57(9): 5684-5689.
- [42] Qin X J, Shao Y Q, Guo Q. Steering of optical beams in strongly nonlocal nonlinear media by spatial phase modulation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(9): 5269-5275.
秦晓娟, 邵毅全, 郭旗. 空间相位调制对强非局域空间光孤子的影响 [J]. *物理学报*, 2007, 56(9): 5269-5275.