

饱和非线性介质中艾里孤子的产生与传输调控

陈卫军, 杨继凯, 刘春阳, 王连镨, 母一宁, 宋德

长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022

摘要 采用分步傅里叶法, 通过数值模拟研究了饱和非线性介质中艾里孤子的产生与传输调控。单艾里光束入射时, 在一定的初始振幅范围内可以产生稳定传输的呼吸式孤子。初始振幅增加时, 孤子的强度增加, 呼吸周期变短, 但宽度基本保持不变。衰减系数增加时, 孤子的平均峰值强度先增大后减小之后再增大, 存在两个极值点。光束入射角度为负值时, 形成左倾艾里孤子; 光束入射角度为正值时, 形成右倾艾里孤子。双艾里光束入射时, 入射角同为负值可以减弱光束间的相互作用, 入射角同为正值可以增强光束间的相互作用。此外, 不同的入射角可以控制孤子或孤子对的传输方向。

关键词 非线性光学; 饱和非线性; 分步傅里叶法; 艾里光束; 孤子; 产生; 传输调控

中图分类号 O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0119001

Generation and Propagation Regulation of Airy Solitons in Saturable Nonlinear Medium

Chen Weijun, Yang Jikai, Liu Chunyang, Wang Liankai, Mu Yining, Song De

School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract The generation and propagation regulation of Airy solitons in saturable nonlinear medium are numerically investigated by split-step Fourier method. For a single incident Airy beam, stably propagated breathing solitons are generated within a certain initial amplitude range. The intensity of solitons increases and breathing period decreases with the increase of initial amplitude, but the solitons width remains unchanged. With the increase of decay coefficient, mean peak intensity of the solitons has two extreme values, and it is found to first increase, then decrease and increase again. Left tilted Airy solitons can be generated with a negative launch angle, and right tilted Airy solitons can be generated with a positive launch angle. When two incident Airy beams interact with each other, the interaction can be weakened with the same negative launch angles, and the interaction can be strengthened with the same positive launch angles. Furthermore, the propagation direction of solitons or soliton pairs can be controlled by different launch angles.

Key words nonlinear optics; saturable nonlinear; split-step Fourier method; Airy beam; soliton; generation; propagation regulation

OCIS codes 190.5530; 190.6135; 160.4330

1 引 言

艾里光束是近 10 年来出现的一种新型的无衍射光束, 其以无衍射、自愈和横向自加速等特点引起了国内外物理学者的极大关注^[1]。1979 年, Berry 和 Balazs^[2]在量子力学范畴类提出了自由空间中的薛定谔方程具有时不变的艾里函数特解, 并指出其具有无穷能量, 但这一工作并未引起人们的重视。2007 年,

Siviloglou 等^[3-4]首次从理论和实验上报道了艾里光束的形成, 之后国内外的研人员对艾里光束的应用进行了多方面研究, 包括光学微粒操控^[5-7]、光子弹^[8-10]、弯曲的等离子体通道的产生^[11]、光路由^[12]、光互联^[13]、光束自聚焦合成^[14]、图像信号传输^[15]、真空电子加速^[16]、大气通信^[17-19]以及激光引导放电^[20]等。

与其他典型的无衍射光束(如贝塞尔光束^[21]、空间光孤子^[22]及局域表面波^[23]等)相比, 艾里光束

收稿日期: 2017-08-14; 收到修改稿日期: 2017-09-01

基金项目: 国家自然科学基金(51502023, 51602028)、吉林省产业创新专项基金(20160082)

作者简介: 陈卫军(1988—), 男, 博士, 讲师, 主要从事非线性光学和光电成像器件方面的研究。

E-mail: dk062chenweijun@163.com

在传输过程中的最大特点是横向自加速特性。因此,近年来出现了一些关于艾里光束传输轨迹调控方面的报道^[24-32]。一方面,在线性折射率的调制作用下,艾里光束的传输轨迹可以发生改变,如在其传输方向上引入横向梯度折射率变化可以使光束沿预定轨迹传输^[24-25],在其入射时引入一定的倾斜角度可以使光束的弯曲轨迹发生改变^[26]。另一方面,在非线性折射率的调制作用下,艾里光束的光场分布和传输轨迹可以发生改变,如在光折变晶体中艾里光束可以实现自陷或自聚焦的局域态模式^[27-29],在克尔介质中传输时因主瓣能量脱落而可以形成周期振荡的孤子^[30-32]。同时,艾里光束在不同非线性介质中的交互作用也引起了广泛关注,同相位艾里光束相互吸引,反相位艾里光束相互排斥,并且在艾里光束交互作用时还可以诱导产生孤子或孤子对^[33-39]。值得注意的是,不同于传统的空间孤子,在非线性介质中由艾里光束产生的孤子一般都具有周期振荡并且沿直线传输的特点,即可形成呼吸孤子,这种新型孤子在本文中被称为空间艾里孤子。目前,关于饱和非线性介质中艾里孤子产生方面的研究尚少,对艾里孤子的传输调控值得研究。

本文基于分步傅里叶法对饱和非线性薛定谔方程进行数值求解,探寻了艾里孤子的产生条件,分析了系统参数对艾里孤子产生的影响,讨论了艾里孤子的传输稳定性,并提出了艾里孤子传输调控的理论方案。该研究丰富了空间光孤子的理论,为艾里光束的进一步应用(如光路由)提供了参考。

2 理论模型

考虑一维情况,在傍轴近似下,饱和非线性介质

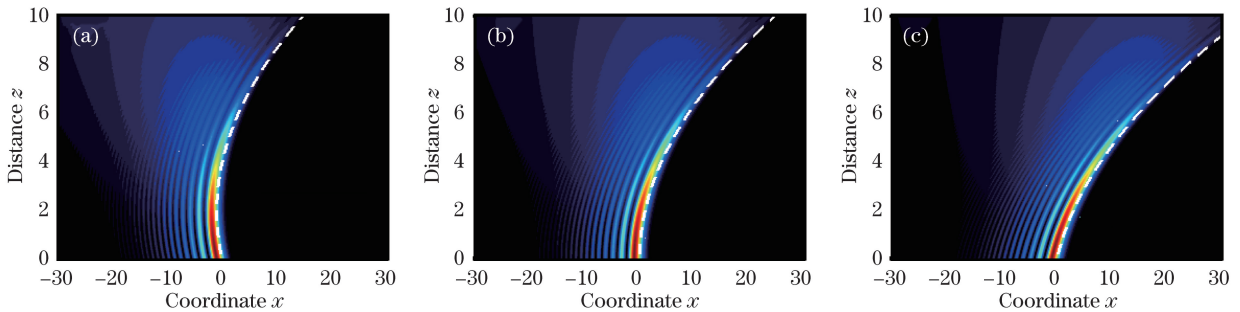


图 1 线性情况下入射角度取不同值时艾里光束的传输轨迹图。(a) $v = -1$; (b) $v = 0$; (c) $v = 1$

Fig. 1 Propagation trajectories of Airy beam with different values of the initial launch angle in linear regime.

(a) $v = -1$; (b) $v = 0$; (c) $v = 1$

为了方便研究两艾里光束的交互作用,构造入射光束的表达形式为^[26,33,41]

$$\varphi(x, z = 0) = u_1 \text{Ai}(x - B) \exp[a(x - B)] \cdot$$

中光波电场分量的慢变复振幅包络 $\phi(x, z)$ 满足的非线性薛定谔方程为^[40]

$$i\phi_z + \frac{1}{2}\phi_{xx} + \frac{\beta I}{1 + I/I_0}\phi = 0, \quad (1)$$

式中 $\phi_z = \partial\phi/\partial z$; $\phi_{xx} = \partial^2\phi/\partial x^2$; x 和 z 分别是由束宽 x_0 和衍射长度 kx_0^2 归一化的横向和纵向无量纲坐标 ($k = 2\pi n/\lambda$ 为波数, n 为介质的折射率, λ 为自由空间中光波的波长); $I = |\varphi|^2$ 为光波强度; β 为描述非线性强度的参数^[40] (文中取 $\beta = 2$); I_0 为饱和参数。初始入射的艾里光束的表达式为

$$\varphi(x, z = 0) = u_0 \text{Ai}(x) \exp(ax) \exp(ivx), \quad (2)$$

式中无量纲量 u_0 为调节入射光功率大小的初始振幅, $\text{Ai}(\cdot)$ 为艾里函数, a 为调节艾里光束光场分布的衰减系数 ($a > 0$), v 为正比于艾里光束入射角度 θ 的量(称为初始角度), $\theta = v/(kx_0)$ 。在由空间光调制器产生艾里光束的实验中,通过调整成像透镜相对于系统轴的横向位移可以改变 θ 的大小,即通过旋转傅里叶透镜的角度可调节 θ 的值,进而改变 v 的大小。根据上述初始条件,在线性情况下,(1)式的解析解^[26]为

$$\varphi(x, z) = u_0 \text{Ai}(x - z^2/4 - vz + iaz) \cdot \exp(ax - az^2/2 - avz) \exp[-iz^3/12 + i(a^2 - v^2 + x)z/2 + ivx - ivz^2/2]. \quad (3)$$

根据艾里函数的定义,从(3)式可知,艾里光束可以沿着抛物线轨迹 $x = vz + z^2/4$ 向前传输,如图 1 所示。从图 1(a)可以看出,当 $v < 0$ 时,艾里光束先向左加速,到达极值点 ($\hat{z} = -2v$) 后再向右加速。从图 1(b)可以看出,当 $v = 0$ 时,艾里光束沿抛物线横向加速,这就是基本的有限能量艾里光束。图 1(c)给出的是 $v > 0$ 时的情形,艾里光束向右倾斜。

$$\exp[iv_1(x - B)] + u_2 \exp(i\rho\pi) \text{Ai}[-(x + B)] \cdot \exp[-a(x + B)] \exp[-iv_2(x + B)], \quad (4)$$

式中 u_1 和 u_2 分别为两艾里光束的初始振幅; v_1 和

v_2 分别为描述两艾里光束初始入射角度大小的量; B 为两入射光束之间的间距; ρ 为调节两光束相位变化的参数,当 $\rho=0$ 时,两光束为同相位,当 $\rho=1$ 时,两光束为反相位。

3 数值结果与讨论

为了详细分析艾里孤子的性质,首先必须探寻艾里孤子的产生条件。基于分步傅里叶法,通过调整 u_0 、 a 和 v 的值,将(2)式作为初始光场条件,将其代入(1)式中进行演化。数值计算过程中取传输方向的步长为 $0.01z_0$ (z_0 为衍射长度),横向范围取点数为 2^{12} 个。

图2给出了初始振幅 u_0 取不同值时饱和非线性介质中艾里光束的演化情况,参数 $a=0.1, v=0$ 。可以看出,当 u_0 较小时($u_0=1$),无孤子形成,艾里光束基本保持线性传输,如图2(a)所示。当 $u_0=2$ 时,介质的自聚焦效应增强,在传输过程中由艾里光束的主瓣脱落一大部分能量形成了具有光强呼吸式振荡的孤子,还有一部分光波能量继续沿线性艾里

光束的加速方向进行传输(白色虚线表示线性艾里光束的传输轨迹, $I_0=0.5$),如图2(b)所示,本课题组称这种由艾里光束产生的孤子为空间艾里孤子,这是介质的非线性自聚焦效应与光束的衍射效应不能完全平衡而又相当产生的结果。此后,随着 u_0 增大,艾里孤子的强度逐渐变大,呼吸周期逐渐变短。克尔介质中灾难性的自聚焦效应使得孤子的宽度随初始振幅增加而快速下降,稳定性差^[31]。而饱和非线性形成的艾里孤子的宽度基本保持不变,因而稳定性高。值得注意的是,在饱和参数 I_0 较小的情况下,当 u_0 较大时,虽然艾里孤子依然沿直线传输,但由于艾里光束的横向自加速作用,产生的艾里孤子沿横向加速方向发生了一定的自倾斜,倾斜角度随初始振幅的增加而增加,这也是非线性介质中艾里孤子不同于克尔介质中艾里孤子的另一个重要特点,如图2(d)所示。通过数值模拟发现,当初始振幅 u_0 过大时,无法形成艾里孤子,这与文献[38]的结论一致,即艾里孤子的形成与入射光功率的大小有关,存在临界功率与截止功率。

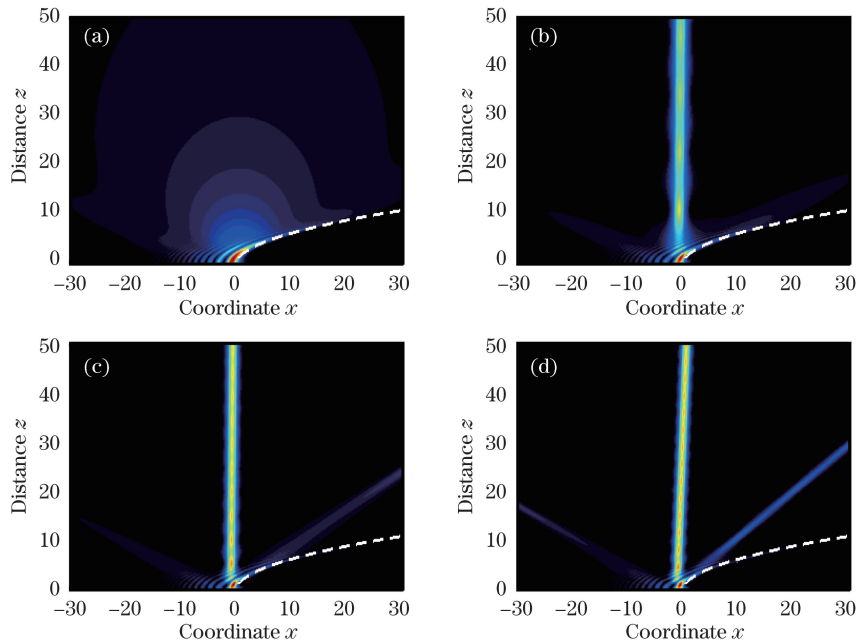


图2 初始振幅取不同值时艾里孤子的形成。(a) $u_0=1$; (b) $u_0=2$; (c) $u_0=3$; (d) $u_0=4$

Fig. 2 Formation of Airy solitons with different initial beam amplitudes. (a) $u_0=1$; (b) $u_0=2$; (c) $u_0=3$; (d) $u_0=4$

为了详细分析艾里孤子强度的变化,分别对初始振幅和衰减系数取不同值时的无初始倾斜($v=0$)艾里光束进行演化,结果如图3所示($I_0=1$),图3(a)清楚地表明了艾里孤子的峰值强度随传输距离的增加而呈现出呼吸式振荡的特点,并且初始振幅越大,孤子的峰值强度越大,呼吸周期越短(孤子的呼吸周期定义为两相邻波峰或波谷间的距离)。

图3(b)给出了衰减系数变化时艾里孤子峰值强度的振荡变化情况,调整衰减系数对初始艾里光束的光场分布具有重要影响,衰减系数越大,艾里光束的光场分布越趋于高斯函数分布^[19]。可以看出,随着 a 的增大,艾里孤子的峰值强度振荡先变弱后变强,当 $a=0.8$ 时,艾里孤子的振荡几乎消失,产生这种现象的主要原因是由于光束的衍射效应近似被非线

性效应完全补偿,类似于饱和非线性介质中的空间亮孤子。图 3(c)和 3(d)分别给出了艾里孤子的平均峰值强度随初始振幅和衰减系数的变化曲线。可以看出,孤子的平均峰值强度随初始振幅增加而单调递增,随衰减系数增加而先增大后减小之后再增大,存在两个极值点。

由图 2(d)可知,增加初始振幅会导致艾里孤子自倾斜。为了控制艾里孤子的传输方向,可在

光束入射时通过调整成像透镜的横向位置使其倾斜一定角度,从而产生传输方向可调的艾里孤子,结果如图 4 所示($I_0=1$)。可以看出:当 $v<0$ 时,艾里孤子向 x 负半轴方向倾斜;当 $v>0$ 时,艾里孤子向 x 正半轴方向倾斜。因此,通过调整参数 v 的值,可以控制艾里孤子的倾斜角度,图 4(a2)~(c2)给出的是不同初始角度下孤子传输至 $z=19.1$ 处时的强度包络,值得注意的是,调整初始角度不

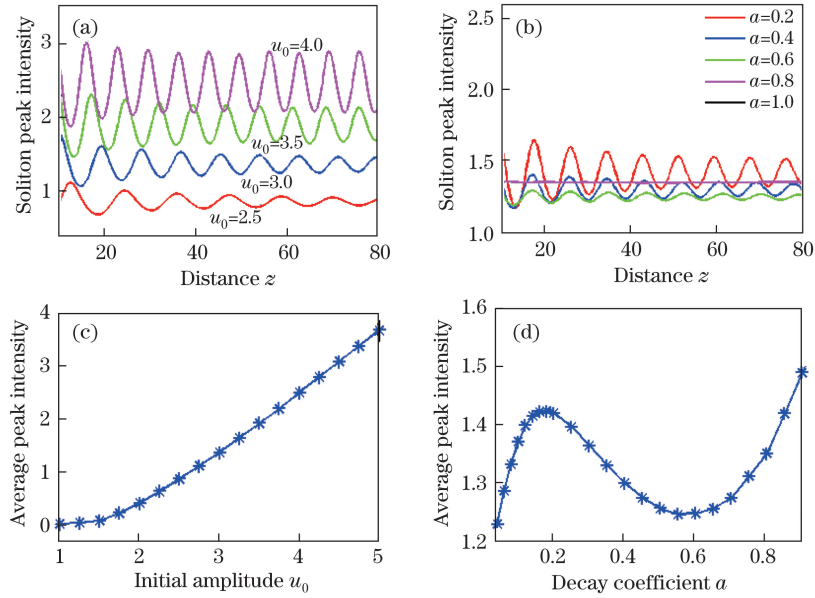


图 3 (a)初始振幅 u_0 和(b)衰减系数 a 取不同值时孤子峰值强度的振荡图;平均峰值强度随(c) u_0 和(d) a 的变化

Fig. 3 Oscillation of the soliton peak intensity with different values of (a) initial amplitudes u_0 and (b) decay coefficient a ; and average peak intensity as the function of (c) u_0 and (d) a

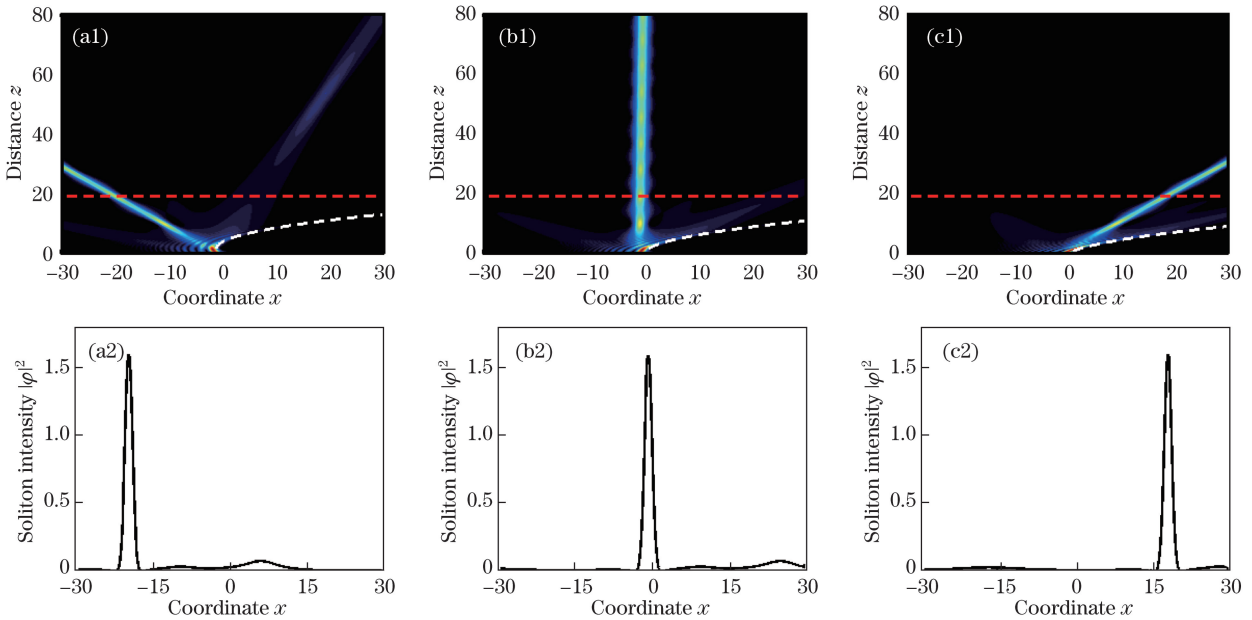


图 4 孤子的强度演化图及红色虚线位置处孤子的强度轮廓。(a) $v=-1$; (b) $v=0$; (c) $v=1$

Fig. 4 Evolution of soliton intensities and the intensity profiles of soliton at the location of red dashed line corresponding to Fig. 4(a1)-(c1). (a) $v=-1$; (b) $v=0$; (c) $v=1$

会使孤子的强度和宽度改变。通过这种调控手段,可以使饱和非线性介质中艾里孤子的输出位置发生改变^[12],这对于光路由的开发研究具有重要意义。

为了进一步分析艾里孤子的传输稳定性,对初始入射光束加高斯型随机白噪声扰动进行演化,即在初始入射光场表达式的基础上乘以扰动因子项

$[1+g(x)]$,其中, $g(x)$ 是具有高斯分布的随机函数,方差为 σ_{noise}^2 。图5分别给出了不同参数下扰动20%的入射艾里光束($v=0$)在饱和非线性介质中的演化情况,所有的入射光束都具有20%的微扰, $I_0=1$ 。可以看出,这种在初始入射时受到较强扰动的艾里光束在饱和非线性介质中依然能够形成稳定向前传输的艾里孤子。

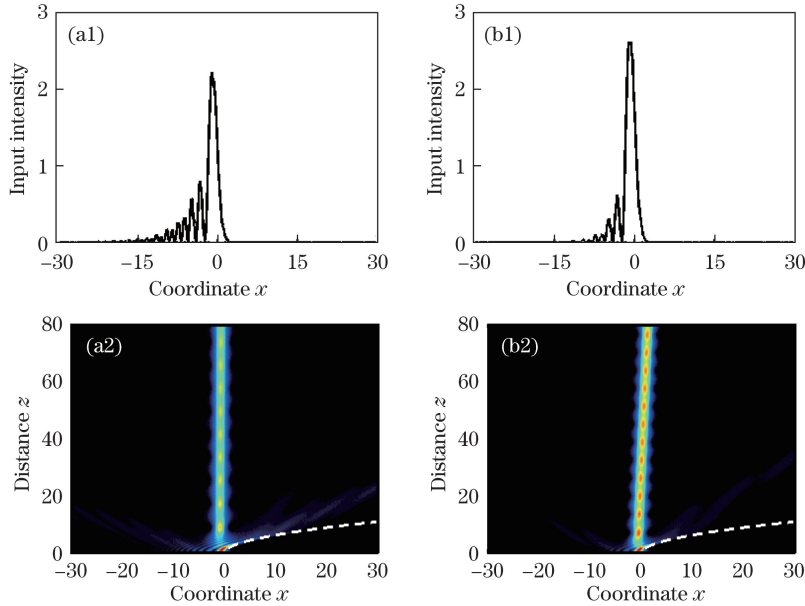


图5 艾里孤子的稳定传输演化图。(a) $\sigma_{\text{noise}}^2=0.04$ 、 $u_0=3.0$ 、 $a=0.1$ 条件下的扰动入射光强分布及入射光束的传输演化图;
(b) $\sigma_{\text{noise}}^2=0.04$ 、 $u_0=4.0$ 、 $a=0.2$ 条件下的扰动入射光强分布及入射光束的传输演化图

Fig. 5 Stable propagation of Airy solitons. (a) Profiles of the perturbed incident beam intensity and propagation dynamics of the incident beams under the conditions of $\sigma_{\text{noise}}^2=0.04$, $u_0=3.0$ and $a=0.1$; (b) profiles of the perturbed incident beam intensity and propagation dynamics of the incident beams under the conditions of $\sigma_{\text{noise}}^2=0.04$, $u_0=4.0$ and $a=0.2$

接下来讨论具有初始偏转角度的艾里光束在饱和非线性介质中的交互作用。由于文献[33]中已报道饱和非线性介质中艾里光束的交互作用($v_1=v_2=0$ 时的情况),并得出以下结论:同相位艾里光束相互吸引,可以产生单艾里孤子;反相位艾里光束相互排斥,可以产生艾里孤子对。因此,这里重点讨论 $v_1=v_2 \neq 0$ 时艾里光束交互诱导孤子或孤子对的传输调控情况。为了方便研究,考虑两光束初始振幅相等且振幅较大,光束间距较小,设 $u_1=u_2=3.0$, B 分别为 $-1,0,1$ 。

图6给出的是同相位艾里光束在不同初始角度和间距时的相互作用($I_0=1$),为了对比说明,图6(b)、(e)、(h)给出的是 $v_1=v_2=0$ 时的情况。可以看出,同相位艾里光束相互吸引。当 $v_1=v_2 < 0$ 时,光束间的吸引力减弱,在中心位置处由主瓣能量脱落形成强度减弱且沿纵轴传输的单艾里孤子,在中心位置两侧由旁瓣能量脱落形成强度增强的相

互对称的艾里孤子对。当 $v_1=v_2 > 0$ 时,光束间吸引力增强,大部分能量在光束交互初始便开始汇聚,只有一小部分能量脱落形成强度减弱的孤子或孤子对。值得注意的是,当 $B=1$ 时,初始角度为正值时可以产生孤子对,如图6(i)所示,这是因为此时艾里光束主瓣能量的峰值在 $x=\pm 0.915$ 附近,间距 B 已经大于该距离,导致两光束的偏转方向相反,所以产生偏转的孤子对。由此可见,两束同相位的艾里光束交互时,调整初始入射角度和间距可以控制孤子的强度或产生相互对称的孤子对。

图7给出的是反相位艾里光束在不同初始角度和间距时的相互作用。为了对比说明,图7(b)、(e)、(h)给出了 $v_1=v_2=0$ 时的情况。可以看出,反相位艾里光束相互排斥。当 $v_1=v_2 < 0$ 时,光束间排斥力减弱,主瓣能量脱落形成的孤子对强度减弱,旁瓣能量脱落形成的孤子对强度增强,如图7(a)、(d)所示。值得注意的是,当间距 $B=1$ 时,主瓣能

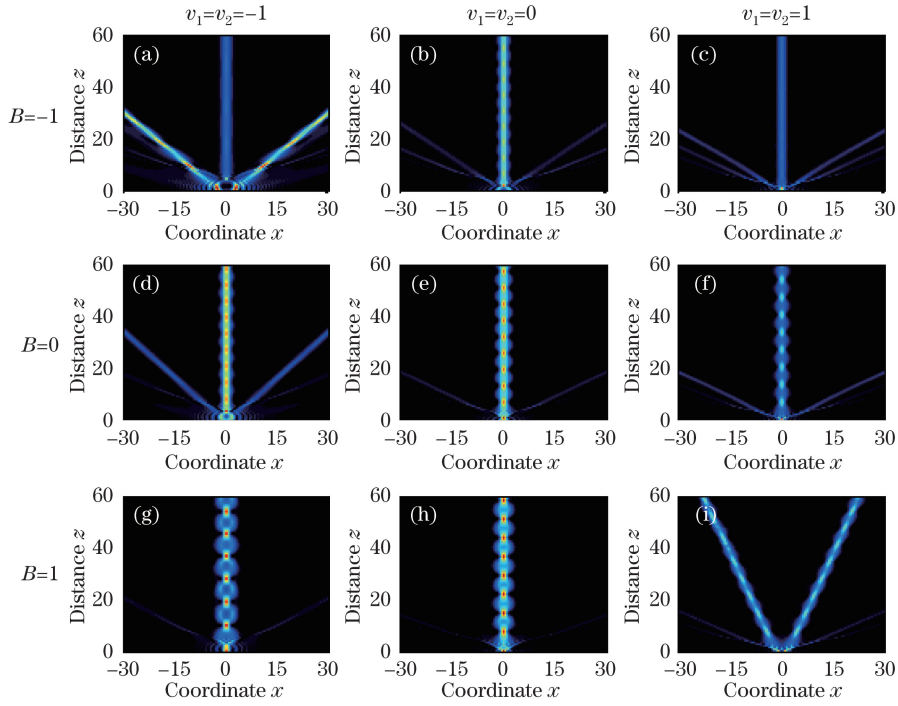


图 6 不同初始角度和间距时同相位艾里光束的交互作用

Fig. 6 Interaction of two in-phase incident Airy beams with different launch angles and interval factors

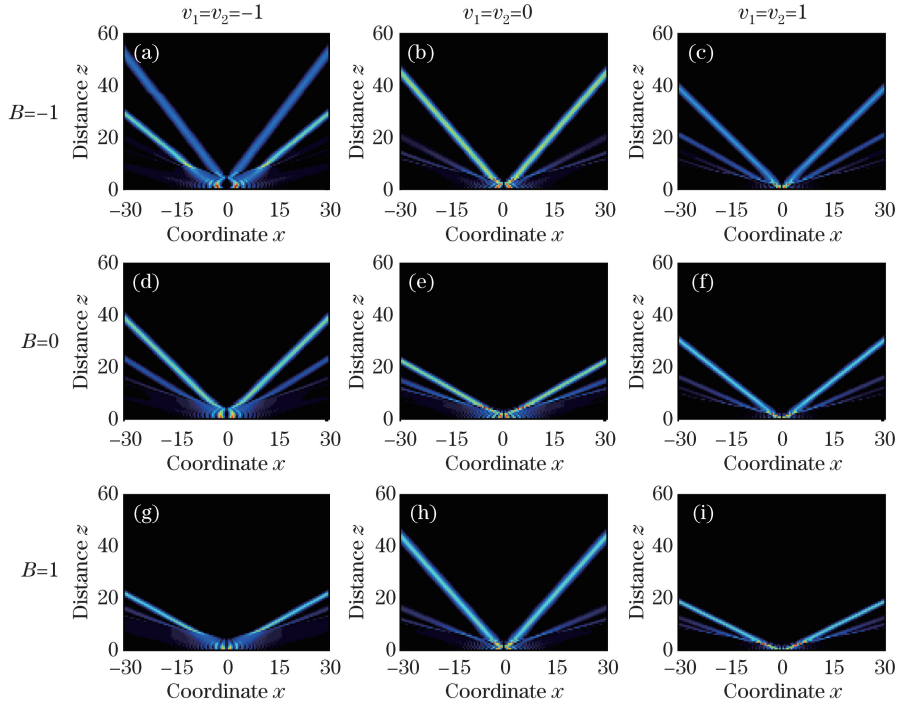


图 7 不同初始角度和间距时反相位艾里光束的交互作用

Fig. 7 Interaction of two out-of-phase incident Airy beams with different launch angles and interval factors

量已不再脱落,由旁瓣能量脱落形成孤子对,如图 7(g)所示。当 $v_1 = v_2 > 0$ 时,光束间排斥力增强,但大部分能量在光束交互之初便开始抵消,导致能量损失,形成强度减弱的孤子对,且间距越小,排斥力增强的程度越明显,如图 7(c)、(f)、(i)所示。

此外,数值模拟还发现,当 $v_1 \neq v_2$ 时,若 $v_1 - v_2 < 0$,则同相位艾里光束交互时形成左倾单孤子,反相位艾里光束交互时形成左强右弱互不对称的孤子对;若 $v_1 - v_2 > 0$,则同相位艾里光束交互时形成右倾单孤子,反相位艾里光束交互时形成左弱右强

互不对称的孤子对。

4 结 论

利用分步傅里叶法研究了饱和非线性介质中艾里孤子的产生与传输控制。结果表明:单艾里光束入射到饱和非线性介质中时,在一定初始振幅范围内可以产生艾里孤子。当初始振幅较小时,无艾里孤子产生;当初始振幅较大时,由于艾里光束主瓣能量脱落形成具有周期振荡的呼吸式孤子,受饱和和非线性的影响,孤子的宽度基本保持不变,孤子的强度和呼吸周期随着初始振幅的增加分别递增和递减。此外,衰减系数也可以影响艾里孤子的振荡,随着衰减系数增加,孤子的峰值强度先增大后减小之后再增大,存在两个极值点,当孤子振荡时,衰减系数对呼吸周期并不产生明显的影响。对入射艾里光束引入一定倾角后,孤子的传输方向随之发生变化,倾角为负值时孤子向左倾斜,倾角为正值时孤子向右倾斜,因而可以通过调整光束入射角度控制艾里孤子的传输方向。此外,通过扰动演化发现,艾里孤子可以稳定传输。双艾里光束入射到饱和非线性介质中时,入射角为负值的同相位艾里光束交互可以减弱光束间的吸引力,在中心位置处由主瓣能量脱落形成强度减弱且沿纵轴传输的单艾里孤子,在中心位置两侧由旁瓣能量脱落形成强度增强的相互对称的艾里孤子对,入射角为正值的同相位艾里光束交互可以增强光束间的吸引力,大部分能量在光束交互之初便开始汇聚,只有一小部分能量脱落形成强度减弱的孤子或孤子对。入射角为负值的反相位艾里光束交互可以减弱光束间的排斥力,入射角为正值的反相位艾里光束交互可以增强光束间的排斥力。两光束初始入射角度不同时可以控制孤子或孤子对的传输方向。因而,入射角度的变化不仅可以控制艾里孤子或孤子对的传输方向,还可以控制其强度。

参 考 文 献

- [1] Chen 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.
- [2] Berry M V, Balazs N L. Nonspreading wave packets[J]. *American Journal of Physics*, 1979, 47(3): 264-267.
- [3] Siviloglou G A, Christodoulides D N. Accelerating finite energy Airy beams[J]. *Optics Letters*, 2007,

32(8): 979-981.

- [4] Siviloglou G A, Broky J, Dogariu A, *et al.* Observation of accelerating Airy beams[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(21): 213901.
- [5] Baumgartl J, Mazilu M, Dholakia K. Optically mediated particle clearing using Airy wavepackets[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(11): 675-678.
- [6] Zheng Z, Zhang B F, Chen H, *et al.* Optical trapping with focused Airy beams[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(1): 43-49.
- [7] Cheng H, Zang W P, Zhou W Y, *et al.* Analysis of optical trapping and propulsion of Rayleigh particles using Airy beam[J]. *Optics Express*, 2010, 18(19): 20384-20394.
- [8] Abdollahpour D, Suntsov S, Papazoglou D G, *et al.* Spatiotemporal Airy light bullets in the linear and nonlinear regimes[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(25): 253901.
- [9] 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.
- [10] Zhong W P, Belic M R, Zhang Y Q, *et al.* Self-decelerating Airy-Bessel light bullets[J]. *Journal of Physics B*, 2015, 48(17): 175401.
- [11] Polynkin P, Kolesik M, Moloney J V, *et al.* Curved plasma channel generation using ultraintense Airy beams[J]. *Science*, 2009, 324(5924): 229-232.
- [12] Rose P, Diebel F, Boguslawski M, *et al.* Airy beam induced optical routing[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(10): 101101.
- [13] Wiersma N, Marsal N, Sciamanna M, *et al.* All-optical interconnects using Airy beams[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(20): 5997-6000.
- [14] Zhang Z, Liu J J, Zhang P, *et al.* Generation of autofocusing beams with multi-Airy beams[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(3): 034209.
张泽, 刘京郊, 张鹏, 等. 多艾里光束合成自聚焦光束的实验实现[J]. *物理学报*, 2013, 62(3): 034209.
- [15] Liang Y, Hu Y, Song D H, *et al.* Image signal transmission with Airy beams[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(23): 5686-5689.
- [16] Li J X, Fan X B, Zang W P, *et al.* Vacuum electron acceleration driven by two crossed Airy beams[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(5): 648-650.
- [17] 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: 106-114.
- [18] Wen W, Chu X, Cai Y, *et al.* Dependence of the beam wander of an Airy beam on its kurtosis parameter in a turbulent atmosphere[J]. *Optics and*

- Laser Technology, 2015, 68: 6-10.
- [19] Chu X. Evolution of an Airy beam in turbulence[J]. Optics Letters, 2011, 36(14): 2701-2703.
- [20] Clerici M, Hu Y, Lassonde P, *et al.* Laser-assisted guiding of electric discharges around objects[J]. Science Advances, 2015, 1(5): e1400111.
- [21] Durnin J E, Miceli J J, Eberly J H, *et al.* Diffraction-free beams[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(15): 1499-1501.
- [22] Chen Z, Segev M, Christodoulides D N, *et al.* Optical spatial solitons: historical overview and recent advances[J]. Reports on Progress in Physics, 2012, 75(8): 086401.
- [23] Chen W J, Lu K Q, Hui J L, *et al.* Localized surface waves at the interface between linear dielectric and biased centrosymmetric photorefractive crystals[J]. Optics Express, 2013, 21(13): 15595-15602.
- [24] Efremidis N K. Airy trajectory engineering in dynamic linear index potentials[J]. Optics Letters, 2011, 36(15): 3006-3008.
- [25] Ye Z Y, Liu S, Lou C B, *et al.* Acceleration control of Airy beams with optically induced refractive-index gradient[J]. Optics Letters, 2011, 36(16): 3230-3232.
- [26] Siviloglou G A, Broky J, Dogariu A, *et al.* Ballistic dynamics of Airy beams[J]. Optics Letters, 2008, 33(3): 207-209.
- [27] Christodoulides D N, Coskun T H. Diffraction-free planar beams in unbiased photorefractive media[J]. Optics Letters, 1996, 21(18): 1460-1462.
- [28] Jia S, Lee J, Fleischer J W, *et al.* Diffusion-trapped Airy beams in photorefractive media[J]. Physical Review Letters, 2010, 104(25): 253904.
- [29] Wiersma N, Marsal N, Sciamanna M, *et al.* Airy beam self-focusing in a photorefractive medium[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 35078.
- [30] Allayarov I M, Tsoy E N. Dynamics of Airy beams in nonlinear media[J]. Physical Review A, 2014, 90(2): 023852.
- [31] Fattal Y, Rudnick A, Marom D M, *et al.* Soliton shedding from Airy pulses in Kerr media[J]. Optics Express, 2011, 19(18): 17298-17307.
- [32] Qin X L, Li X J, Chen W J, *et al.* Formation and control of Airy solitons in Kerr media[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2016, 37(10): 1281-1286. 秦旭磊, 李雪健, 陈卫军, 等. 克尔介质中艾里孤子的形成及控制[J]. 发光学报, 2016, 37(10): 1281-1286.
- [33] Zhang Y Q, Belic 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.
- [34] Zhou G Q, Chen R P, Ru G Y, *et al.* Propagation of an Airy beam in a strongly nonlocal nonlinear media[J]. Laser Physics Letters, 2014, 11(10): 105001.
- [35] Diebel F, Bokic B, Timotijevic D V, *et al.* Soliton formation by decelerating interacting Airy beams[J]. Optics Express, 2015, 23(19): 24351-24361.
- [36] Peng Y L, Peng X, Chen B, *et al.* Interaction of Airy-Gaussian beams in Kerr media[J]. Optics Communications, 2016, 359: 116-122.
- [37] Zhou M L, Peng Y L, Chen C D, *et al.* Interaction of Airy-Gaussian beams in saturable media[J]. Chinese Physics B, 2016, 25(8): 084102.
- [38] Chen W J, Lu K Q, Hui J L, *et al.* Propagation and interactions of Airy-Gaussian beams in saturable nonlinear medium[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(24): 244202. 陈卫军, 卢克清, 惠娟利, 等. 饱和非线性介质中艾里-高斯光束的传输与交互[J]. 物理学报, 2016, 65(24): 244202.
- [39] Shen M, Gao J S, Ge L J, *et al.* Solitons shedding from Airy beams and bound states of breathing Airy solitons in nonlocal nonlinear media[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 9814.
- [40] Litchinitser N M, Krolikowski W, Akhmediev N, *et al.* Asymmetric partially coherent solitons in saturable nonlinear media[J]. Physical Review E, 1999, 60(2): 2377-2380.
- [41] Wen W, Chu X. Propagation of symmetric tunable dual Airy beam through ABCD optical system[J]. Optics Communications, 2014, 333: 38-44.