

doi: 10.3788/gzxb20144305.0519001

有限能量 Airy 光束的小尺度自聚焦特性

于文龙¹, 章礼富², 谭超¹, 傅喜泉¹

(1 湖南大学 信息科学与工程学院, 微纳光电器件及应用教育部重点实验室, 长沙 410082)

(2 长沙学院 电子与通信工程系, 长沙 410003)

摘 要:研究了有限能量 Airy 光束在克尔介质中的非线性传输过程及整体自聚焦(特别是小尺度自聚焦)特性. 研究发现相对于整体自聚焦, 有限能量 Airy 光束主峰的小尺度自聚焦更容易发生, 而且其噪音调制的增长速度随着截断系数的增加而变慢. 通过对比研究不同截断系数小尺度自聚焦的增益谱, 发现截断系数也极大地影响有限能量 Airy 光束的增益谱, 截断系数越小 Airy 光束受噪音影响分裂的可能性就越大; 对于较大的截断系数, 有限能量 Airy 光束增益谱和由它主瓣拟合的高斯光束的增益谱越来越接近. 研究结果对于有限能量 Airy 光束的潜在应用有一定的指导作用.

关键词:非线性光学, 非线性薛定谔方程; 自聚焦; 无衍射光束; Airy 光束; 非线性传输; 小尺度自聚焦; 增益谱

中图分类号: O437

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)05-0519001-7

Small-scale Self-focusing of Finite Energy Airy Beam

YU Wen-long¹, ZHANG Li-fu², TAN Chao¹, FU Xi-quan¹

(1 Key Laboratory for Micro/Nano Optoelectronic Devices of Ministry of Education, School of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

(2 Department of Electronics and Communication Engineering, Changsha University, Changsha 410003, China)

Abstract: The nonlinear propagation of finite energy Airy beam (FEAB) in Kerr media was investigated numerically. The characteristics of whole beam self-focusing (WBSF) and small-scale self-focusing (SSFS) of the FEAB were thoroughly studied during its nonlinear propagation. It was found that the SSFS is more likely to take place than the WBSF, and the growth rate of noise modulation decreases with increasing the truncation factor. By comparing the gain spectra of SSFS for different truncated factors, it can be seen that the truncation factor has a large impact on the gain spectrum of the FEAB indicating the possibility of the breakup of the FEAB induced by noise is inversely proportional to the truncated factor. In addition, the gain spectrum of FEAB is more similar to that of the Gaussian beam fitted from the main lobe of FEAB in the case of larger truncation factor. These results are very important for the potential application of the FEAB.

Key words: Nonlinear optics; Nonlinear Schrödinger equation; Self-focusing; Non-diffracting beam; Airy beam; Nonlinear propagation; Small-scale self-focusing; Gain spectrum

OCIS Codes: 190.3270; 190.4420; 190.5940; 190.3100

0 引言

无衍射光束由于具有中心光斑尺寸小且不随传播

距离而变化, 自加速传播等特性, 在激光加工、激光大气通讯、光子弹等领域具有广泛的应用^[1-3]. 1987年, J. Durnin 等人首次指出描述光束自由空间传输的

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金(No. 20110161110012)、湖南省科学技术厅科技计划资助(No. 2013TP4026)和湖南省自然科学基金(No. 13JJ4108)资助

第一作者:于文龙(1988-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光光束的非线性传输与控制. Email: 835052174@qq.com

导师:傅喜泉(1977-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为宽带激光脉冲的传输与控制. Email: fuxiquan@gmail.com

通讯作者:章礼富(1982-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为强激光传输与控制.

收稿日期:2013-08-05; **录用日期:**2013-10-10

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

Helmholtz 方程具有精确的本征解,它所描述的光束能无限远的传输,不会因存在衍射而发生任何畸变,并详细阐述了无衍射光束的基本概念和相关原理^[4].其中最简单的一类解可由零阶 Bessel 函数表达,具有无限横向范围和能量.这种光束便称作 Bessel 光束、无衍射光束 (Non-diffraction Beam) 或自由衍射光束 (Diffraction-free beam).理论上,这种无衍射光束具有无限能量,导致在实际中很难实现.同年, J. Durnin 等人从实验上观察到了有限大小(能量)无衍射光束能持续很长的距离^[5].随后,关于无衍射光束的研究引起了人们的极大的兴趣,一些新的无限射光束也被发现,如 Mathieu 光束、Ince-Gaussian 光束等.

1979 年, Berry 和 Balazs 指出量子力学中的薛定谔方程具有一个非展宽的 Airy 函数波包的解,且具有自由加速的特性^[6].数学上 Airy 函数与 Bessel 函数都是不可积的,因此 Airy 光束携带的能量无限大,在实际中很难实现这种 Airy 光束.为了在实验中能产生 Airy 光束,需要对 Airy 函数加上衰减因子进行截断处理,使其在数学上可积,从而具有有限能量便于在实验上实现.在光纤光学中,当有限能量的高斯脉冲只受到三阶色散作用下线性传输后将演变为有限能量的 Airy 脉冲^[7-8].通过解析方法可得到三阶色散在线性传输过程中对高斯脉冲频谱的相位调制.因此,只要在高斯光束上叠加立方空间位相调制,再经过透镜变换,远场分布(焦平面处)即为有限能量 Airy 光束.2007 年, Siviloglou 和 Christodoulides 等人将薛定谔方程与光学旁轴波动方程类比,首次预测并论证了有限能量 Airy 光束 (Finite Energy Airy Beam, FEAB),验证了保持长距离无衍射传播的特性^[9-10].从此,有限能量 Airy 光束的产生、传输及应用一直是热门研究领域.对于有限能量 Airy 光束线性传输,它的最典型的两个特性是自愈与横向加速,分别被 Broky 等人^[11]与 Siviloglou 等人^[12]在实验上证实. Morris 等人研究了有限能量 Airy 光束传播特性依赖于空间相干和波长^[13]. Besieris 等人研究了存在二阶和三阶色散情形下 Airy 波包的传输特性^[14]. Sztul 等人分析了 Airy 光束空间过程中 Poynting 矢量和角动量的演化,发现 Airy 光束的 Poynting 矢量方向为传输方向的切线方向;主峰的及尾部角动量不为零,而总角动量为零^[15].对于有限能量 Airy 光束的非线性传输, Polynkin 等人研究了飞秒 Airy 光束在水里和空气中非线性传输成丝 (filamentation) 过程中的超连续谱和等离子体通道的产生^[16-17]. Panagiotopoulos 等人从实验和数值模拟两个方面研究了高强度有限能量 Airy 光束在电离克尔介质中的非线性传输特性^[18]. Chen 等人分析了非电离情形下 Kerr 非线性对 Airy 光束传输特性的影响^[19]. Kasparian 等人计算了非线性传输过程中 Airy 光束横向能量变化,发现 Kerr 透镜诱发的横向能量远大于 Airy 光束自身多峰结构诱导的能量,因

此高强度 Airy 光束所产生的等离子体通道不仅是弯曲焦点上的等离子火花更是自导引成丝^[20]. Jia 等人研究有限能量 Airy 光束在具有扩散非线性光折变介质中的非线性传输^[21].基于这些无衍射光束无色散波包的传输特性, Abdollahpour 等人实现了空间 Airy 光束时间 Airy 脉冲 (Airy-Airy-Airy) 型光子弹^[22], 而 Chong 等人则实现了空间 Bessel 光束时间 Airy 脉冲 (Bessel-Bessel-Airy) 型光子弹^[23].

关于有限能量 Airy 光束的非线性传输主要是集中在极端非线性光学过程,即超强度导致成丝过程.但是对于细丝形成之前的非线性传输过程研究的则较少,如自聚焦过程.而自聚焦又是非线性光学领域中的一个普遍现象,它会产生一些非常有趣而又意想不到的现象^[24].在高功率激光系统中,自聚焦,特别是小尺度自聚焦是导致光束质量下降和激光介质破坏的主要因素之一^[25].目前关于常规光束如高斯光束的小尺度自聚焦在实验和理论上已被广泛研究,获得了许多重要的结果^[26-31].但是关于有限能量 Airy 光束的小尺度自聚焦特性的研究较少.由于有限能量 Airy 光束具有多峰的初始强度分布,与高斯光束的强度分布有很大不同,必然会导致有限能量 Airy 光束和高斯光束不一样的自聚焦特性.本文基于旁轴近似和慢变包络近似下描述光束传输的(2+1)维非线性薛定谔方程,数值研究了有限能量 Airy 光束在非线形传输过程中的整体自聚焦和小尺度自聚焦现象,尤其是小尺度自聚焦特性.详细研究了截断系数对自聚焦的影响.

1 理论模型

非线性薛定谔方程描述激光脉冲的基本方程,忽略色散、损耗以及高阶项,且在慢变包络近似和旁轴近似下,得到描述光束传输的归一化标量(2+1)维非线性薛定谔方程^[24]为

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} = i \frac{L_N}{2L_{\text{diff}}} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \psi + i |\psi|^2 \psi \quad (1)$$

式中, ψ 正比于电场包络的振幅 $A(u, v, \zeta) = A_0 \psi(x, y, z)$, $z = \zeta/L_N$ 为归一化传输距离, $x = u/\omega_0$ 和 $y = v/\omega_0$ 是归一化横向坐标, ω_0 为束宽, $L_{\text{diff}} = k\omega_0^2/2$ 为衍射长度, $L_N = (n_0 n_2 c |A_0|^2/\lambda)^{-1}$ 为非线性长度, $k = 2\pi n_0/\lambda$ 是波数, λ 为波长, n_0 和 n_2 分别为线性与非线性折射率.利用分步傅里叶方法^[8]数值求解方程(1),研究有限能量 Airy 光束在非线形克尔介质中传输特性.

有限能量 Airy 光束的表达式为

$$\psi(x, y, z=0) = \psi_0 \text{Ai}(x) \exp(ax) \text{Ai}(y) \cdot \exp(ay) \quad (2)$$

式中 ψ_0 为初始振幅, a 为截断系数, $\text{Ai}(\omega)$ 为 Airy 函数

$$\text{Ai}(\omega) = \int_0^{\infty} \cos(t^3/3 + \omega t) / \pi dt \quad (3)$$

研究有限能量 Airy 光束传输过程中的小尺度自

聚焦现象,需在有限能量 Airy 光束上叠加余弦调制

$$\psi(x, z=0) = \psi_0 [1 + a \cos(\Omega x) + a \cos(\Omega y)] \times \text{Ai}(x) \text{Ai}(y) \exp[a(x+y)] \quad (4)$$

a 为调制强度, Ω 为空间调制频率, 计算中衍射系数为 $C_{\text{diff}} = L_N / L_{\text{diff}} = 0.02$.

2 数值计算结果分析

2.1 有限能量 Airy 光束整体自聚焦和小尺度自聚焦

Airy 光束是一种无衍射光束, 但不同于 Bessel 光束, 主要表现在它具有横向加速的传输特性. 而有限能量 Airy 光束则在传输一定距离下也具有 Airy 光束的传播特性. 这种线性传输特性必然影响其非线性传输特性. 图 1 为有限能量 Airy 光束在线性介质中传输时的空间强度分布随传输距离变化图, 清晰地揭示了线性传输过程中的自加速现象. 对比线性传输不同距离后的有限能量 Airy 光束的空间强度, 可以看到其主瓣位置发生了横移. 在 $z=200$ 时, 有限能量 Airy 光束的强度分布与初始输入 ($z=0$) 时的强度分布基本一致, 只是峰值强度有所减弱; 当传输距离 $z=400$ 时, 除了峰值强度降低外, 还出现了明显的衍射. 为了更清晰展现 Airy 光束的加速特性, 图 1(d) 给出了有限能量 Airy 光束剖面随传输距离的变化图. 当有限能量 Airy 光束在线性介质中传输时, 传输较大距离 ($z=200$) 后才可以看到光束的横向自加速现象.

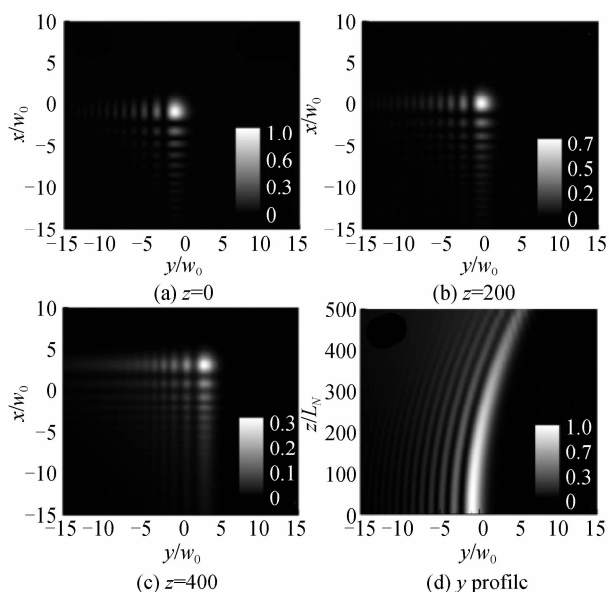


图 1 截断系数 $a=0.1$ 的有限能量 Airy 光束在线性介质中传输, 空间强度分布以及 y 方向剖面随传输距离的演化图

Fig.1 The spatial intensity distribution of the linear propagation of the FEAB with the truncation factor $a=0.1$ the intensity evolution of y profile as a function of propagation distance

图 2 是不同调制强度下的有限能量 Airy 光束在非线性能量传输过程中不同传输距离处的 ($z=0, 5$) 强度分

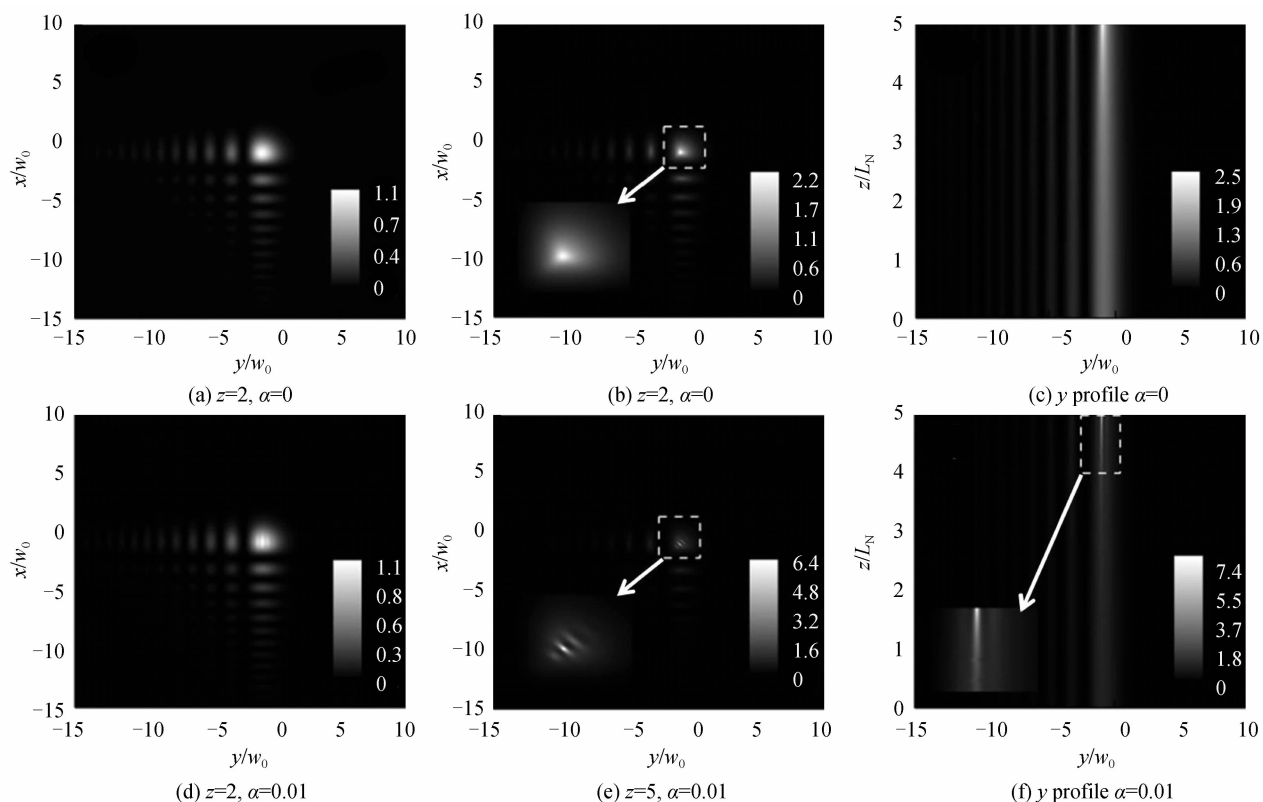


图 2 截断系数 $a=0.1$ 有限能量 Airy 光束在非线性能量传输过程中不同传输距离处的 ($z=0, 5$) 强度分

Fig.2 The spatial intensity distribution of the nonlinear propagation of the FEAB with the truncation factor $a=0.1$; the intensity evolution of y profile as a function of propagation distance

布及其 y 剖面随传输距离变化. 可以清晰地看到非线性传输过程中发生了整体自聚焦和小尺度自聚焦. 当有限能量 Airy 光束在非线性介质传输时, 无初始调制时即 $\alpha=0$ (图 2(a)~(c)), 在传输过程中发生了整体自聚焦. 对比图 2(a)和(b), 发现随着传输距离的增加主瓣及其邻近的旁瓣的强度逐渐增强; 在 $z=5$ 处(图 2(b)), 整体自聚焦使得光束横向急剧收缩, 主瓣上产生了一根高强度细丝, 而邻近的旁瓣也被整体压缩. 为了更直观地显示整体自聚焦的动态过程, 图 2(c)给出了 y 剖面随传输距离的变化过程, 可以清晰地看到整体自聚焦的发生过程. 图 2(d)~(f)给出了初始调制幅度 $\alpha=0.01$ 时, 有限能量 Airy 光束的小尺度自聚焦过程. 由于光束的主瓣强度最大, 因此主瓣区域内发生了明显的小尺度自聚焦. 在 $z=2$ 时, 光束主瓣表现为整体收缩, 此时整体自聚焦的作用占优; 而在 $z=5$ 处, 小尺度自聚焦作用强于整体自聚焦的作用, 明显地看到光束主瓣发生了分裂成丝. 由此可见有限能量 Airy 光束在非线性传输过程中存在整体自聚焦和小尺度自聚焦, 且在传输过程中两者相互竞争, 有噪音调制情形下主瓣更易于发生小尺度自聚焦.

为了更加清晰地揭示在非线性传输过程中整体自聚焦和小尺度自聚焦对有限能量 Airy 光束传输的影

响. 图 3 给出了在不同初始调制强度 α 下, 有限能量 Airy 光束在传输 $5L_N$ 距离后的强度分布与初始输入强度分布的对比. 图 3(a)~(d)初始调制强度 α 分别为 0、0.003、0.006 和 0.01, 其中虚线为始强度分布, 实线为光束在 $z=5$ 强度分布图. 从图 3(a)可以看出, 初始无调制($\alpha=0$)时, 经过 $z=5$ 非线性传输后, 有限能量 Airy 光束主峰及其相近的两个次峰发生了整体自聚焦, 峰值强度增大, 其中主峰最明显. 原因在于远离主峰的波瓣初始强度较低, 因此非线性效应较弱, 以致整体自聚焦不明显. 当初始调制强度 $\alpha=0.003$ 时, 由于调制频率为 Airy 光束主峰强度对应的最快增长频率, 在 $z=5$ 处, 可以看到次级主峰还是表现明显的整体自聚焦, 而光束主瓣在传输的过程中受小尺度自聚焦的影响而发生明显的分裂, 其它波瓣的非线性效应不明显. 图 3(c)和(d)给出了调制强度 α 分别为 0.006 和 0.01 情形下, 有限能量 Airy 光束经过 $5L_N$ 传输后的始末强度分布图. 可以看到, 其变化特征与调制强度 $\alpha=0.003$ 时一致. 但是, 由于初始调制强度的增大, 使得小尺度调制强度的非线性增长变快, 导致在经历相同的传输距离时, 调制度越大, 小尺度调制的强度越大. 从图 3(b)~(d)中还可以看到, 主瓣小尺度调制基本上只从本底中吸收能量获得增长, 破坏主瓣的光束质

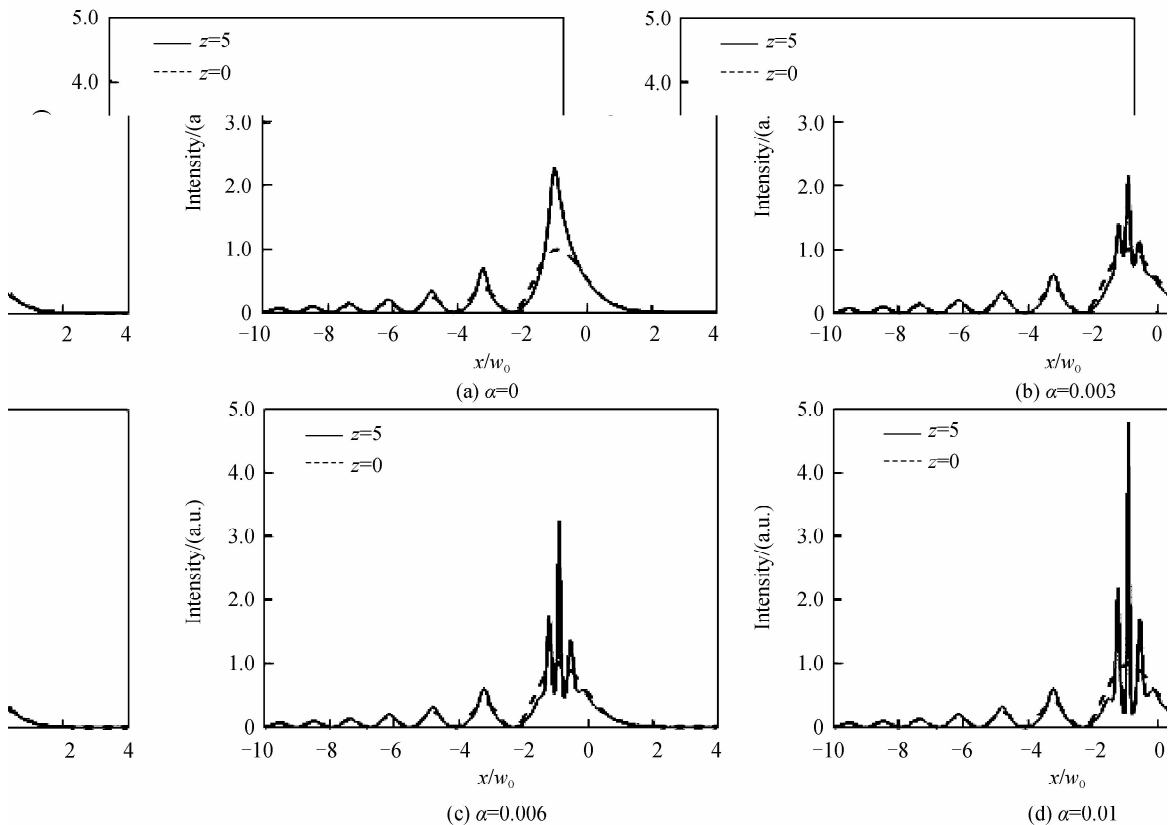


图 3 不同初始调制强度 α 下, 有限能量 Airy 光束传输 $z=5$ 后的强度分布与初始强度分布对比
Fig. 3 The spatial profile of FEAB at $z=5$ and $z=0$ under different initial modulation depth α

量,从而将主瓣分裂成多根细丝.由此可以看出有限能量 Airy 光束在非线性传输过程中小尺度自聚焦更容易导致光束分裂.

2.2 截断系数 a 对调制增长速度及增益谱的影响

截断系数 a 是有限能量 Airy 光束的一个非常重要的特征参量.不同的截断系数 a ,导致有限能量 Airy 光束的能量分布发生变化,必然会影响传输过程整体自聚焦和小尺度自聚焦,导致光束空间强度增长发生变化.相应的数值计算结果如图 4,图 4(a)~(d)的截断系数分别为 $a=0.1, 0.2, 0.3$ 和 0.4 .图中实线是光束在小尺度自聚焦作用下的空间最大强度随传输距离变化曲线,虚线是光束在整体自聚焦作用下的空间最大强度随传输距离变化曲线.从图 4 中可以看出不同

的截断系数 a ,空间强度随传输距离的变化规律为:1)随着传输距离的增加,有限能量 Airy 光束的空间最大强度都随之变大;2)在小尺度自聚焦作用下,有限能量 Airy 光束的空间最大强度增长速度明显大于在整体自聚焦作用下空间最大强度的增长速度;3)有限能量 Airy 光束的空间最大强度增长速度随着截断系数 a 的增大而变慢.产生上述现象的主要原因在于当截断系数 a 取不同的值时,有限能量 Airy 光束的主瓣宽度和强度是不同的,随着截断系数 a 的增大主瓣宽度展宽,强度变小,将导致有限能量 Airy 光束在非线性传输过程中其空间强度增长速度随着截断系数 a 的增加而变慢.

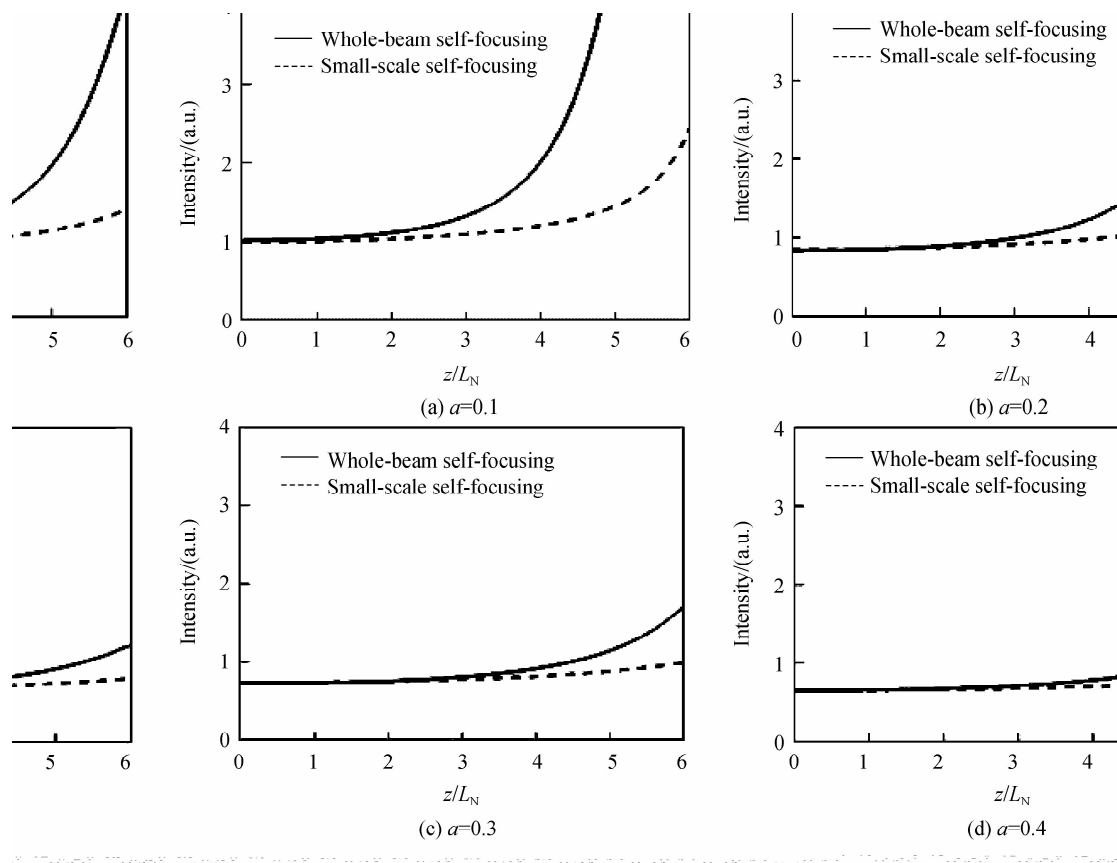


图 4 不同截断系数 a 下,整体自聚焦和小尺度自聚焦对光束空间最大强度演化的影响
Fig. 4 The influences of whole-beam self-focusing and small-scale self-focusing on the evolution of spatial maximum intensity during nonlinear propagation for different truncation factor

通过计算可以看到,有限能量 Airy 光束非线性传输过程中,其主瓣对于非线性现象的产生起着决定性的作用.而有限能量 Airy 光束的主瓣能够很好地由高斯函数来拟合,因此可以对比有限能量 Airy 光束的主瓣与它对应的拟合高斯光束的传输特性.通过数值计算得到了不同截止系数下的有限能量 Airy 光束与由它的主瓣拟合的高斯光束的小尺度调制增益谱图,如图 5.小尺度调制增长率定义为

$$g = \ln(I_m/I_0)/z \quad (5)$$

式中, I_0 为 Airy 光束初始强度的最大值, I_m 为输出强度的最大值, z 为传输距离.为计算方便,只取一维 x (或 y) 进行数值计算,其余计算参量不变.图 5 中虚线(三角符号)和实线(正方形符号)分别为有限能量 Airy 光束与由它的主瓣拟合的高斯光束的小尺度调制增益谱.从图 5 可以看出,有限能量 Airy 光束和由它的主瓣拟合的高斯光束的小尺度调制增益都随着截断系数 a 的增大而减小.相同调制频率下,有限能量 Airy 光束的小尺度调制增益小于其主瓣拟合的高斯光束的小尺

度增益,因此 Airy 对噪音有一定的抵制作用. 随着截断系数 a 的增大,有限能量 Airy 光束主瓣的空间强度

分布越来越接近高斯光束,可以从图 4(c)中看出此种情形下两者的增益谱曲线越来越相似.

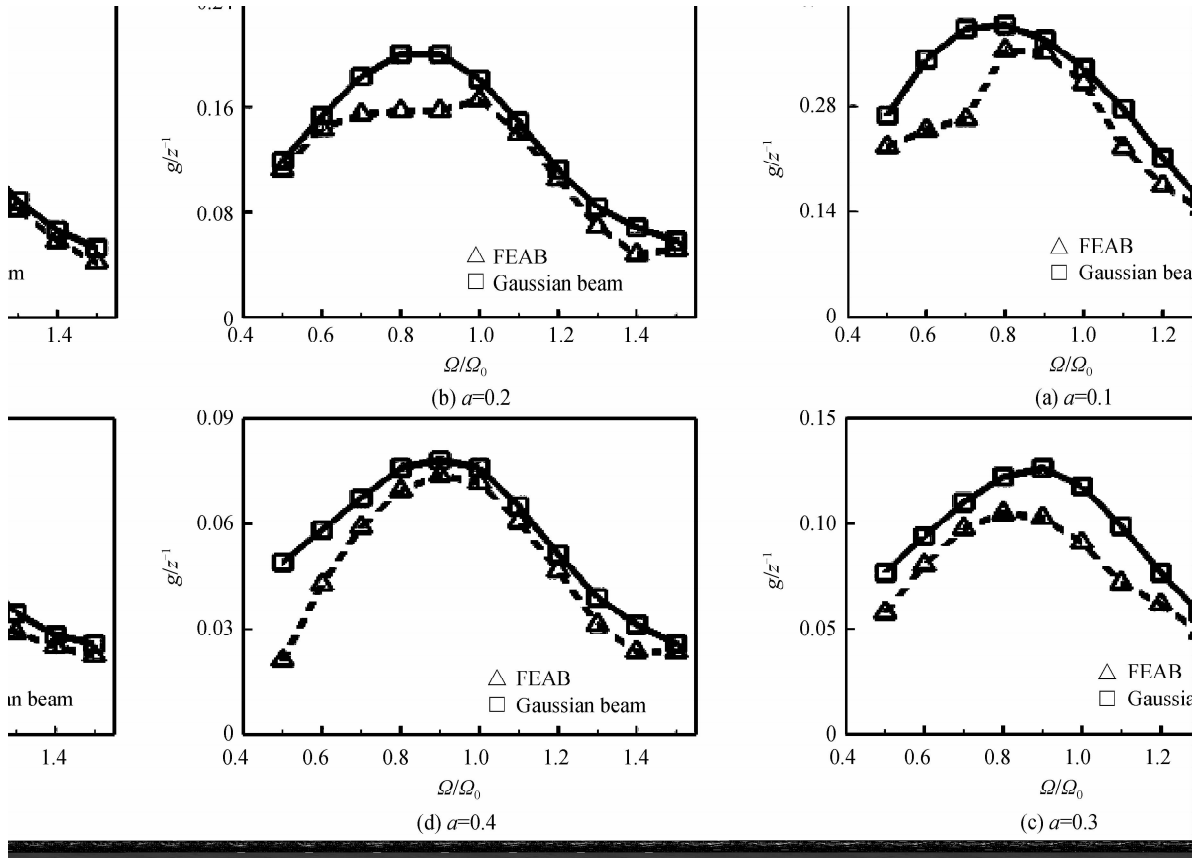


图 5 不同截断系数 a 下,有限能量 Airy 光束与由它的拟合主瓣的高斯光束的增益谱图, Ω_0 为最快增长频率

Fig. 5 The gain spectra of the FEAB and the Gaussian beam obtained by fitting the main lobe of FEAB for different truncation factor. Ω_0 is fastest increasing frequency

3 结论

通过数值计算(2+1)维非线性薛定谔方程,研究了有限能量 Airy 光束在克尔非线性介质传输过程中的自聚焦特性,尤其是小尺度自聚焦特性. 结果表明有限能量 Airy 光束不仅存在整体自聚焦,而且在受到噪音的影响情况下,小尺度自聚焦比整体自聚焦更易发生,更加容易导致光束分裂成丝. 此外,有限能量 Airy 光束的空间强度增长速度随着截断系数 a 的增加而变慢;有限能量 Airy 光束的增益谱曲线与由它的主瓣拟合的高斯光束的增益谱类似,且随着截断系数 a 的增大,两者越来越接近. 这些结果对有限能量 Airy 光束的实际应用具有一定的参考价值. 此外,本文的计算是基于空间调制不稳定性理论^[28],没有考虑时间特性. 文献[22]已经实验上研究了 Airy 光束 Airy 脉冲型线性光子子弹的非线性传输特性,这种时空 Airy 波包的非线性传输必将受其它高阶非线性效应,如喇曼、自陡及时空耦合等效应的影 响. 因此时空 Airy 波包的时空不稳定特性的研究也是很有意义的.

参考文献

- [1] BOR Z, ERDELYI M, HORVATH Z L, *et al.* Application of nondiffracting beam[C]. SPIE, 1999, **3749**: 76-77.
- [2] KOLLAROVA V, MEDRIK T, CELECHOVSKY R, *et al.* Application of nondiffracting beams to wireless optical communications[C]. SPIE, 2007, **6736**: 67371C.
- [3] BOUCHAL Z, Nondiffracting optical beams: physical properties, experiments, and applications[J]. *Czechoslovak Journal of Physics*, 2003, **53**: 537-578.
- [4] DURNIN J. Exact solutions for nondiffracting beams I. the scalar theory[J]. *Journal of Optical Society American A*, 1987, **4**(4): 651-654.
- [5] DURNIN J, MICELI J J, Jr., *et al.* Diffraction-free beams[J]. *Physical Review Letters*, 1987, **58**(15): 1499-1501.
- [6] BERRY M V, BALAZS N L. Nonspreading wave packets[J]. *American Journal of Physics*, 1979, **47**(3): 264-267.
- [7] TRÄGER F. Handbook of lasers and optics[M]. New York: Springer, 2007.
- [8] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics[M]. Singapore: Elsevier, 2007.
- [9] SIVILOGLOU G A, CHRISTODOULIDES D N. Accelerating finite energy Airy beams[J]. *Optics Letters*, 2007, **32**(8): 979-981.
- [10] SIVILOGLOU G A, BROKLY J, DOGARIU A, *et al.* Observation of accelerating Airy beams[J]. *Physical Review Letters*, 2007, **99**(21): 213901.

- [11] BROKY J, SIVILOGLOU G A, DOGARIU A, *et al.* Self-healing properties of optical Airy beams[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(17): 12880-12891.
- [12] SIVILOGLOU G A, BROKY J, DOGARIU A, *et al.* Ballistic dynamics of Airy beams[J]. *Optics Letters*, 2008, **33**(3): 207-209.
- [13] MORRIS J E, MAZILU M, BAUMGARTL J, *et al.* Propagation characteristics of Airy beams; dependence upon spatial coherence and wavelength[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(3): 13236-13245.
- [14] BESIERIS I M, SHAARAWI A M. Accelerating Airy wave packets in the presence of quadratic and cubic dispersion[J]. *Physical Review E*, 2008, **78**(4): 046605.
- [15] SZTUL H I, ALFANO R R. The Poynting vector and angular momentum of Airy beams[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(13): 9411-9416.
- [16] POLYNKIN P, KOLESIK M, MOLONEY J V, *et al.* Curved plasma channel generation using ultraintense Airy beams[J]. *Science*, 2009, **324**(5924): 229-232.
- [17] POLYNKIN P, KOLESIK M, MOLONEY J. Filamentation of femtosecond laser Airy beams in water[J]. *Physical Review Letters*, 2009, **103**(12): 123902.
- [18] PANAGIOTOPOULOS P, ABDOLLAHPOUR D, LOTTI A, *et al.* Nonlinear propagation dynamics of finite-energy Airy beams[J]. *Physical Review A*, 2012, **86**(1): 013842.
- [19] CHEN Rui-pin, YIN Chao-fu., CHU Xiu-xiang, *et al.* Effect of Kerr nonlinearity on an Airy beam[J]. *Physical Review A*, 2010, **82**(4): 043832.
- [20] KASPARIAN J, WOLF J P. Curved plasma channels; Kerr lens and Airy prism[J]. *Journal of the European Optical Society*, 2009, **4**: 09039.
- [21] JIA S, LEE J, FLEISCHER J W, *et al.* Diffusion-trapped Airy beams in photorefractive media[J]. *Physical Review Letters*, 2010, **104**(25): 253904.
- [22] ABDOLLAHPOUR D, SUNTISOV S, PAPAZOGLU D G, *et al.* Spatiotemporal airy light bullets in the linear and nonlinear regimes[J]. *Physical Review Letters*, 2010, **105**(25): 253901.
- [23] 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.
- [24] BOYD R W, LUKISHOVA S G, SHEN Y R. Self-focusing; Past and Present; Fundamentals and Prospect [M]. New York; Springer, 2009.
- [25] WILLIAMS W, TRENHOLME J, ORTH C, *et al.* NIF design optimization [R]. LLNL Laser Program Quarterly Report, 1996, UCR-LR-105821-96-4; 181-191.
- [26] BESPALOV V I, TALANOV V I, Filamentary structure of light beam in nonlinear liquids[J]. *JETP Letters*, 1966, **3**(3): 307-310.
- [27] ZHENG Yi-zhou, HU Wei, LU Da-quan, *et al.* A non-paraxial correction to the small-scale self-focusing[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(11): 1329-1331.
郑一周,胡巍,陆大全,等.小尺度自聚焦理论的非傍轴修正[J]. *光子学报*, 2003, **32**(11): 1329-1331.
- [28] WEN Shuang-chun, FAN Dian-yuan. Theory of small-scale self-focusing of intense laser beam in media with gain and loss [J]. *Acta Physica Sinica*, 2000, **49**(7): 1282-1286.
文双春,范滇元.增益(损耗)介质中高功率激光束的小尺度自聚焦理论研究[J]. *物理学报*, 2000, **49**(7): 1282-1286.
- [29] WEN Shuang-chun, FAN Dian-yuan. Filamentation of intense laser beam in high power laser and B integral [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(11): 1331-1335.
文双春,范滇元.高功率激光放大器中光束的成丝和 B 积分 [J]. *光学学报*, 2001, **21**(11): 1331-1335.
- [30] LIU Hui, FU Xi-quan, HOU Yan-chao. Control of high-power laser focal position in nonlinear media [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(2): 267-272.
刘辉,傅喜泉,侯彦超.非线性介质中会聚高功率激光的焦点位置控制[J]. *光子学报*, 2011, **40**(2): 267-272.
- [31] ZHU Jing, HU Wei, YI Xu-nong, *et al.* Influence of the air gap between slabs on small-scale self-focusing for slab amplifiers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(3): 342-346.
朱静,胡巍,易煦农,等.片状放大器中片间空气间隔对小尺度自聚焦的影响[J]. *光子学报*, 2006, **35**(3): 342-346.