

## 耗散系统中高阶效应对艾里脉冲传输特性的影响

张壹,宋丽军\*

(山西大学 物理电子工程学院,山西 太原 030006)

**摘要:**基于高阶非线性薛定谔方程,研究了耗散系统中高阶效应对一种新型艾里脉冲传输特性的影响。结果表明:除了系统的三阶色散对艾里脉冲的传输有影响,其他高阶效应对艾里脉冲的传输也存在很大的影响。比如:自陡峭效应和自频移效应对艾里脉冲传输的影响与三阶色散类似,均会引起脉冲中心发生偏移,且系统参数的绝对值越大,偏移量增长越快。此外,非线性增益会使艾里脉冲的强度不断增大,因此,合理选择非线性增益和线性损耗参数,可以使两种效应对艾里脉冲的影响相互抵消。增益色散也会导致艾里脉冲的强度不断衰减,且增益色散越大,艾里脉冲的强度衰减得越快。综上所述,可以通过合理选择系统参数来调控艾里脉冲的传输动力学行为,从而实现耗散系统内艾里脉冲传输的管理。

**关键词:**耗散系统;艾里脉冲;动力学特性

中图分类号:O436

文献标志码:A

文章编号:0253-2395(2024)03-0605-09

## Influence of Higher-order Effects on Airy Pulse Transmission Characteristics in the Dissipative Systems

ZHANG Yi, SONG Lijun\*

(College of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** Based on the high-order nonlinear Schrödinger equation, the influence of higher-order effects on the transmission characteristics of a new type Airy pulse in dissipative systems is studied. The results show that in addition to the third-order dispersion of the system, other higher-order effects also have great influence on the Airy pulse transmission. For example, the influence of self-steepening effect and the self-frequency shift on the Airy pulse transmission is similar to third-order dispersion, both of which cause the pulse center to shift, and the larger the absolute value of system parameters is, the faster the shift increases. In addition, the nonlinear gain increases the intensity of Airy pulse, so the reasonable selection of the nonlinear gain and linear loss parameters can make their influence on Airy pulse offset each other. The gain dispersion causes the intensity of Airy pulse to decay continuously during the transmission process, and the greater the gain dispersion is, the faster the intensity of Airy pulse decays. To sum up, we can control the transmission dynamics of Airy pulse by selecting reasonable system parameters, so as to realize the management of pulse transmission in the dissipative system.

**Key words:** dissipative system; Airy pulse; dynamic characteristic

收稿日期:2023-07-17;接受日期:2023-09-12

基金项目:国家自然科学基金(61475198)

作者简介:张壹(1975-),男,山西太原人,硕士,实验师,研究方向光学。E-mail:zhangyi@sxu.edu.cn

\*通信作者:宋丽军(SONG Lijun),E-mail:songlij@sxu.edu.cn

引文格式:张壹,宋丽军.耗散系统中高阶效应对艾里脉冲传输特性的影响[J].山西大学学报(自然科学版),2024,47(3):605-613. DOI:10.13451/j.sxu.ns.2023148

## 0 引言

近年来,无衍射波由于其具有许多有趣的特性以及潜在的应用而备受关注<sup>[1-6]</sup>。在量子力学研究领域,首次由Berry和Balaze提出的艾里光束就是无衍射波的一种<sup>[7]</sup>。这里必须强调的是,就像其他任何无衍射光束一样,艾里光束同样携带着无限的能量,因此它的实现需要一定程度的截断。在此基础上,有限能量艾里光束被提出,并相继出现了大量的理论和实验研究<sup>[8-13]</sup>。研究结果表明,有限能量艾里光束表现出近似无衍射的演化行为,并具有自我加速和自我修复的特性。随着研究的深入,关于艾里光束的有趣结果被报道得越来越多<sup>[14-22]</sup>,特别是近期有关椭圆艾里光束<sup>[15]</sup>和圆艾里光束<sup>[16-18]</sup>的研究很受广大研究人员的青睐。

除了空间上的艾里光束,时间上的艾里脉冲也被广泛研究<sup>[23-30]</sup>。在这些研究中,三阶色散对艾里脉冲传输特性的影响受到了人们的广泛关注<sup>[27-30]</sup>,比如:三阶色散在啁啾艾里脉冲传播中的作用<sup>[28]</sup>和三阶色散作用下艾里脉冲的反转和紧聚焦特性<sup>[29-30]</sup>。此外,湖南大学的文双春小组证明了弱艾里脉冲可以用来操纵光孤子在不同波长传播时的动力学<sup>[31]</sup>,且艾里波包控制孤子的到达时间方面要比相应的高斯脉冲有效得多。上海大学的曾祥龙小组通过艾里-孤子碰撞提出了一种光学视界的光纤模拟<sup>[32]</sup>,并研究了光子晶体光纤中艾里脉冲的特性。美国Besieris等在慢变包络近似的框架下,获得了一个无限能量均匀移动的艾里波包解和一个平方可积的加速艾里解<sup>[33]</sup>,并指出三阶色散的存在可以增加波包的“穿透深度”。华南师范大学的邓冬梅小组和深圳大学的邓志祥小组基于修正的薛定谔方程,分别获得了啁啾艾里圆形波包解<sup>[34]</sup>和梯度指数呼吸孤子解<sup>[35]</sup>,并系统地分析了它们的传播特性。随着研究的不断深入,超宽带艾里脉冲的实现<sup>[36]</sup>、啁啾艾里脉冲的传输特性<sup>[37]</sup>、截断艾里脉冲的再生<sup>[38]</sup>和聚焦<sup>[39-40]</sup>等也相继被报道。

综上所述,不论是空间域中的艾里光束,还是时间域中的艾里脉冲,基于低阶理论模型的研究已有很多,且发现了许多有趣的特性,但随着脉冲脉宽的不断缩短,以及脉冲峰值强度

的不断升高,系统中的非线性效应将变得越来越重要,对脉冲的作用也将变得不容忽视,因此,本文将基于描述耗散系统的理论模型——高阶非线性薛定谔(HNLS)方程,研究一种新型的艾里脉冲在耗散系统中的传输特性,主要包括三阶色散、自陡峭效应和自频移效应对有限能量艾里脉冲传输动力学的的影响;以及非线性增益、线性损耗和增益色散对有限能量艾里脉冲强度的调控,进而在耗散系统中对有限能量艾里脉冲的综合管理。

## 1 理论模型

当周期性扰动较小时,有限能量艾里脉冲在同时包含增益带宽限制和高阶非线性效应的光学系统中的传输,可以用下面的高阶非线性薛定谔方程来描述<sup>[41]</sup>:

$$E_z = i \frac{D}{2} E_{zz} + \lambda E_{zzz} + \delta E + i\sigma E_t + \epsilon E_{tt} + (i + \chi) |E|^2 E + \mu (|E|^2 E)_t + \nu E (|E|^2)_t, \quad (1)$$

其中, $E(z, t)$ 是电场的复振幅包络, $z$ 是归一化的传输距离, $t$ 是延迟时间, $D=1(-1)$ 代表反常(正常)色散,系统参数 $\delta, \sigma, \epsilon$ 和 $\chi$ 为实常数, $\lambda, \mu$ 和 $\nu$ 为复数。此外, $\delta > 0 (< 0)$ 为线性增益(损耗); $\lambda$ 的实部 $\lambda_r$ 代表三阶色散; $\sigma$ 和 $\lambda$ 的虚部 $\lambda_i$ 与 $\delta\omega$ 成正比, $\omega_0$ 为脉冲载频, $\omega_a$ 为增益中心频率,且 $\delta\omega = \omega_a - \omega_0$ ; $\epsilon$ 代表增益色散效应,且与增益带宽成反比; $\chi$ 代表非线性增益或吸收; $\mu$ 的实部 $\mu_r$ 代表自陡峭效应, $\mu$ 的虚部 $\mu_i$ 代表非线性增益或吸收过程的综合效应; $\nu$ 的虚部 $\nu_i$ 代表自频移效应,而 $\nu$ 的实部 $\nu_r = 0$ 。

## 2 结果与讨论

假设初始输入的艾里脉冲为:

$$E(t, 0) = A_0 Ai(t) \exp(at), \quad (2)$$

$$Ai(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[i\left(\frac{1}{3}bs^3 + cs^2 + (t-d)s\right)\right] ds, \quad (3)$$

其中, $Ai$ 表示艾里函数,其表达式如(3)式所示。 $A_0$ 代表初始脉冲的振幅, $a > 0$ 为截断系数。艾里脉冲参数 $b$ 为实数, $c$ 和 $d$ 为复数。实际研究中要对艾里脉冲进行截断,以确保艾里脉冲能量有限,本文中取 $A_0 = 3, a = 0.1$ 。(2)式给出的艾里脉冲随各参数的变化如图1所示。从图1(a)中可

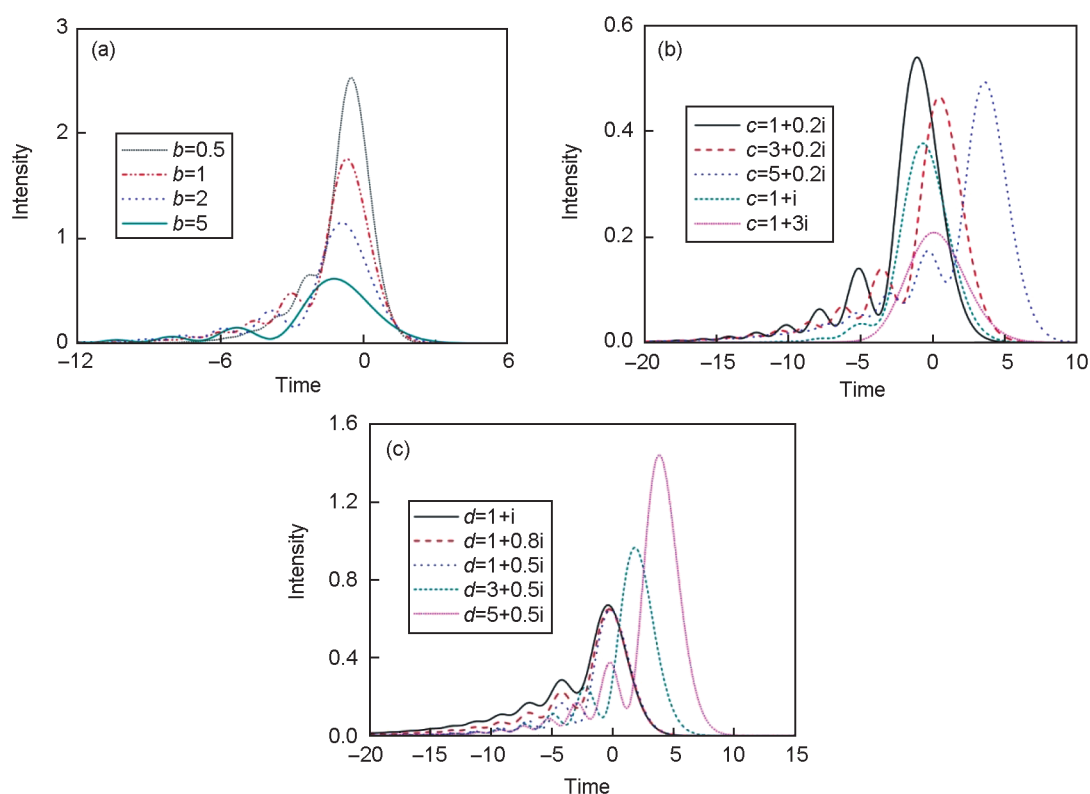


图1 艾里脉冲的分布

(a)  $c=0.1+0.2i$ 且 $d=0.1+0.5i$ ; (b)  $b=5$ 且 $d=0.1+0.5i$ ; (c)  $b=5$ 且 $c=1+0.2i$

Fig. 1 Airy pulse plot

(a)  $c = 0.1 + 0.2i$ , and  $d = 0.1 + 0.5i$ ; (b)  $b = 5$  and  $d = 0.1 + 0.5i$ ; (c)  $b = 5$  and  $c = 1 + 0.2i$

以看出,参数 $b$ 主要影响的是艾里脉冲主峰的峰值强度,随着 $b$ 的增大,主峰峰值强度却会减小,旁瓣的强度也会随之降低。当参数 $c$ 的实部增大时,艾里脉冲的主峰中心向右偏移,且 $c$ 的实部越大,偏移量越大;当参数 $c$ 的虚部增大时,主峰中心的偏移不太明显,但主峰和旁瓣的强度均会减小,如图1(b)所示,从图中可以看出,当 $c$ 的虚部足够大,且 $c=1+3i$ 时,脉冲的旁瓣完全消失。当参数 $d$ 的虚部减小时,艾里脉冲的主峰强度和脉冲中心变化都不大,旁瓣的强度略有所降低;但当参数 $d$ 的实部增大时,艾里脉冲的主峰峰值强度和脉冲中心都发生了较为明显的变化,主峰峰值强度增大,脉冲中心向右偏移,且旁瓣强度也随之增大,如图1(c)所示。

接下来,我们研究有限能量艾里脉冲的演化特性。当艾里脉冲的各参数取值分别为 $b=5$ ,  $c=1+0.2i$ 和 $d=3+0.5i$ ,且系统参数 $D=1$ ,其他各参数均为零( $\delta=\sigma=\varepsilon=\chi=\mu=\nu=0$ )时,三阶色散对艾里脉冲传输特性的影响如图2所示。从图中可以看出,当三阶色散为零时,在

演化初期艾里脉冲发生了反转,旁瓣从主峰的左侧转到主峰的右侧,并随着传输距离的延伸,旁瓣逐渐衰减直至消失,随后艾里脉冲主峰的演化呈周期的脉动行为,如图2(a)所示。当三阶色散不为零时,艾里脉冲主峰的演化特性基本没有发生太大变化,依然保持周期的脉动行为,但脉冲中心向右侧的偏移速度会随着三阶色散的增大而增大,如图2(b)和图2(c)所示的 $\lambda=0.03$ 和 $\lambda=0.05$ 时的演化情况。当三阶色散小于零时,艾里脉冲的演化特性,除了主峰的偏转方向不同之外,其他特征和正的三阶色散对艾里脉冲的影响基本相同,且三阶色散的绝对值越大,脉冲中心偏移量随传输距离的延伸增长越快,如图3(a)所示。图3(b)给出的是艾里脉冲峰值强度的演化情况,可以看出,三阶色散的增大会使艾里脉冲的峰值强度变化范围增大,且随着传输距离的不断增长,主峰强度的脉动幅度却在减小。

当三阶色散及其他效应参数为零时,线性增益 $\delta$ 对艾里脉冲传输特性的影响如图4所示。

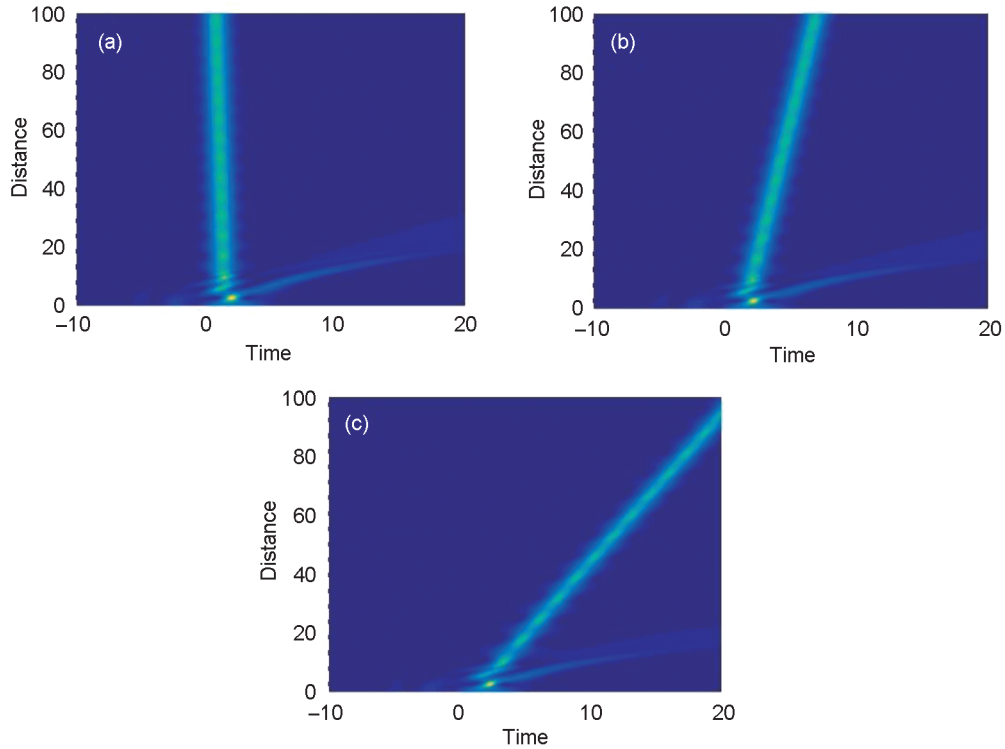


图2 三阶色散对艾里脉冲的影响

(a)  $\lambda = 0$ , (b)  $\lambda = 0.03$ , (c)  $\lambda = 0.05$

Fig. 2 Influence of the third-order dispersion on the Airy pulse

(a)  $\lambda = 0$ , (b)  $\lambda = 0.03$ , (c)  $\lambda = 0.05$

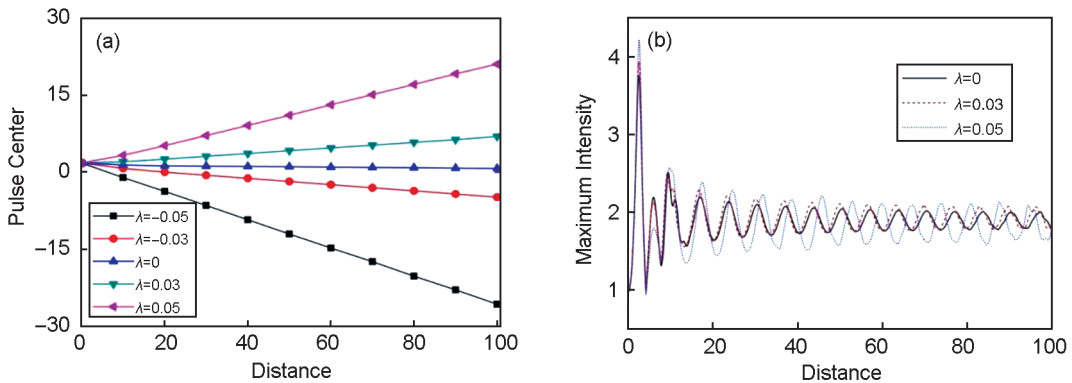


图3 三阶色散影响下艾里脉冲的脉冲中心(a)和峰值强度(b)的演化

Fig. 3 Pulse center (a) and maximum intensity (b) of the Airy pulse under the third-order dispersion

从图4(a)和(b)可以看出,线性增益的存在并不会改变艾里脉冲演化过程中的基本特性,艾里脉冲的演化依然保持周期性的脉动行为,但随着线性增益的增大,艾里脉冲的峰值强度会逐渐增大,脉动周期也会逐渐减小,如图4(c)所示。由于增益色散效应的存在,使得增益谱宽小于光脉冲的谱宽,脉冲内不同频率成分将经历不同的放大,脉冲的形状将受到影响,所以增益色散对脉冲的影响可以等效为普通光纤中的

损耗效应,会使脉冲受到的等效损耗系数变大,因此,增益色散存在时,随着传输距离的不断延伸,艾里脉冲的强度不断衰减,且增益色散越大,艾里脉冲的强度衰减得越快,如图5所示。

接下来分析非线性增益对艾里脉冲传输的影响及其与线性损耗的平衡。当只有非线性增益存在时,艾里脉冲的强度会随着传输距离的增加逐渐变大,但艾里脉冲的脉动周期会随着传输距离的增加逐渐变小,且非线性增益并

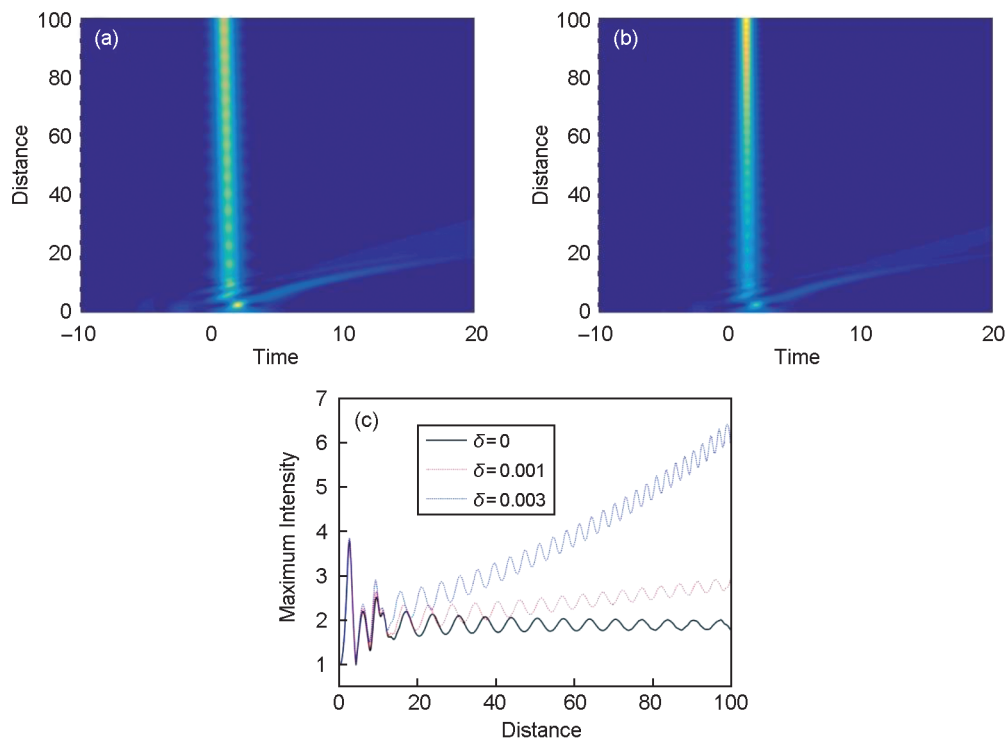


图4 线性增益对艾里脉冲的影响

(a)  $\delta = 0.001$ , (b)  $\delta = 0.003$ , (c) 峰值功率的演化

Fig. 4 Influence of the linear gain on the Airy pulse

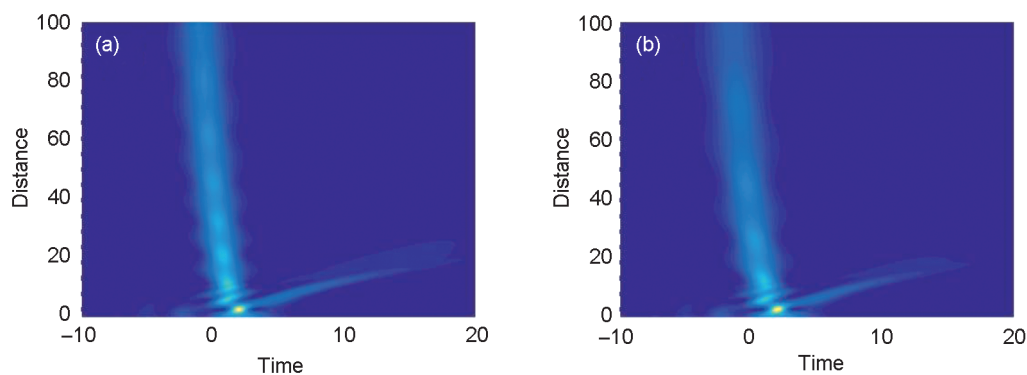
(a)  $\delta = 0.001$ , (b)  $\delta = 0.003$ , (c) evolution of the maximum intensity

图5 增益色散对艾里脉冲的影响

(a)  $\epsilon = 0.01$ , (b)  $\epsilon = 0.02$ 

Fig. 5 Influence of the gain dispersion on the Airy pulse

(a)  $\epsilon = 0.01$ , (b)  $\epsilon = 0.02$ 

不会引起脉冲中心的偏移,如图6(a)—图6(d)所示。此外,非线性增益越大,强度增长越快,此规律可以在图6(e)所示的峰值强度演化图中更为清楚地看出。当非线性增益 $\chi = 0.0015$ 和线性损耗 $\delta = -0.0018$ 时,艾里脉冲的演化如图6(f)所示,从图中可以看出,合理调节非线性增益和线性损耗参数,可以做到二者对艾里脉冲演化的影响相互抵消,艾里脉冲的脉动行为趋

于平缓,如图6(h)中蓝色实线所示。

当其他非线性效应均不存在时,自陡峭效应和自频移效应对艾里脉冲演化的影响分别如图7和图8所示。从图中可以看出,正的自陡峭效应使艾里脉冲在传输过程中向左侧偏移,而负的自陡峭效应使艾里脉冲向右侧偏移,且自陡峭效应的绝对值越大,偏移的速度越快,偏移量随传输距离的增加也接近线性增长趋

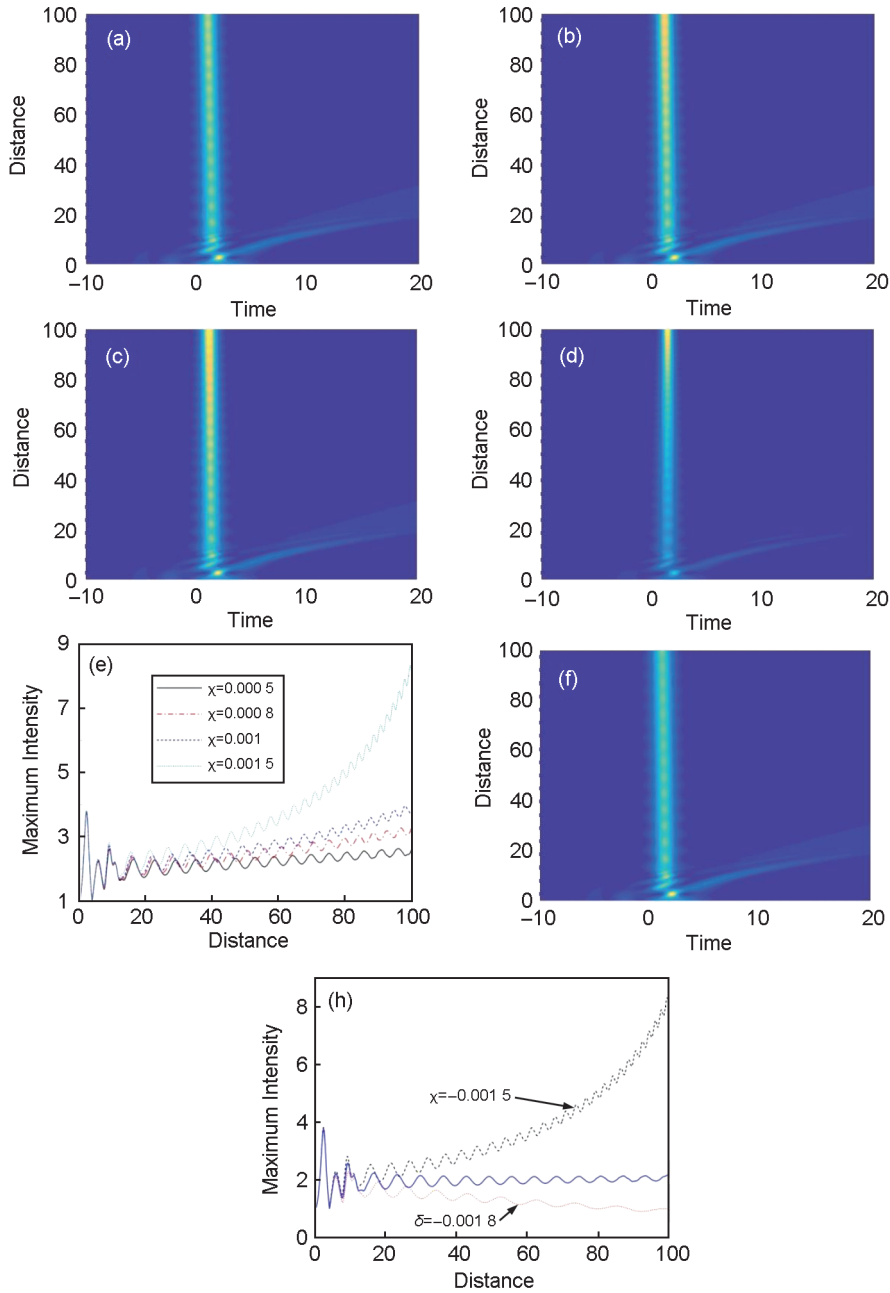


图6 非线性增益对艾里脉冲的影响

(a)  $\chi = 0.0005$ , (b)  $\chi = 0.0008$ , (c)  $\chi = 0.001$ , (d)  $\chi = 0.0015$ , (e) 峰值强度的演化, (f)—(h) 非线性增益和线性损耗的平衡

Fig. 6 Influence of the nonlinear gain on the Airy pulse

(a)  $\chi = 0.0005$ , (b)  $\chi = 0.0008$ , (c)  $\chi = 0.001$ , (d)  $\chi = 0.0015$ , (e) evolution of the maximum intensity, (f)—(h) balance between the nonlinear gain and linear loss

势。自频移效应对艾里脉冲传输特性的影响规律与自陡峭效应类似,但是自频移效应引起的偏移量随传输距离的增加呈非线性增长趋势,传输距离越大,偏移量增大越快。

### 3 结论

综上所述,本文基于用来描述耗散系统中

光脉冲演化的理论模型——高阶非线性薛定谔方程,数值分析了耗散系统中一种新型艾里脉冲的传输动力学特性,该艾里脉冲包含多个参数,且调节不同的参数将引起艾里脉冲不同特征量的变化。因此,可以通过合理选择参数来获取所需要的艾里脉冲形状。采用分步傅里叶变换法,数值研究了耗散系统中各高阶效应对

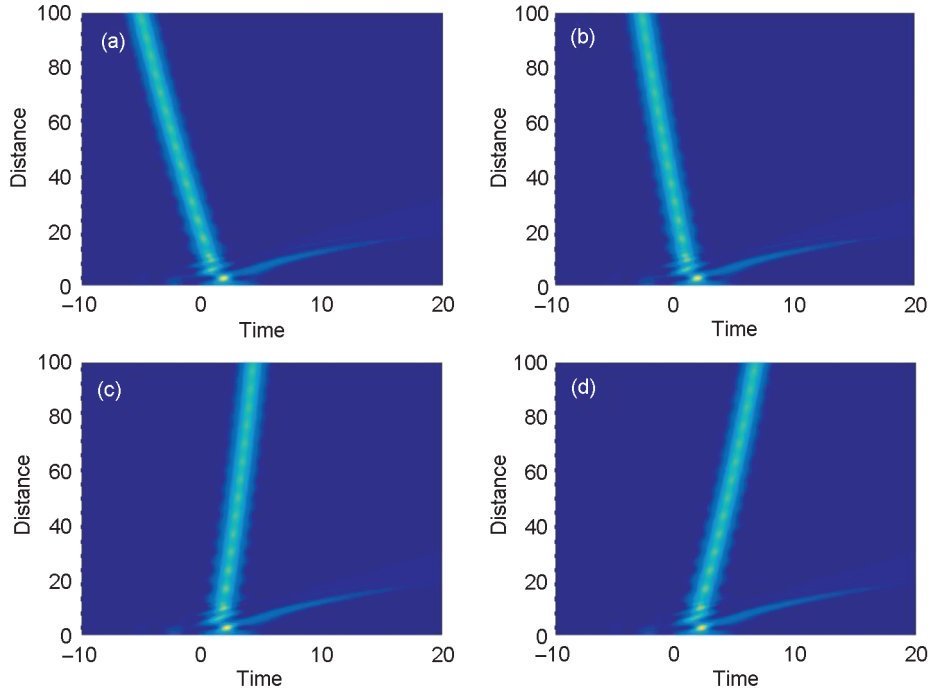


图7 自陡峭效应对艾里脉冲的影响

(a)  $\mu = 0.05$ , (b)  $\mu = 0.03$ , (c)  $\mu = -0.03$ , (d)  $\mu = -0.05$

Fig. 7 Influence of the self-steepening effect on the Airy pulse

(a)  $\mu = 0.05$ , (b)  $\mu = 0.03$ , (c)  $\mu = -0.03$ , (d)  $\mu = -0.05$

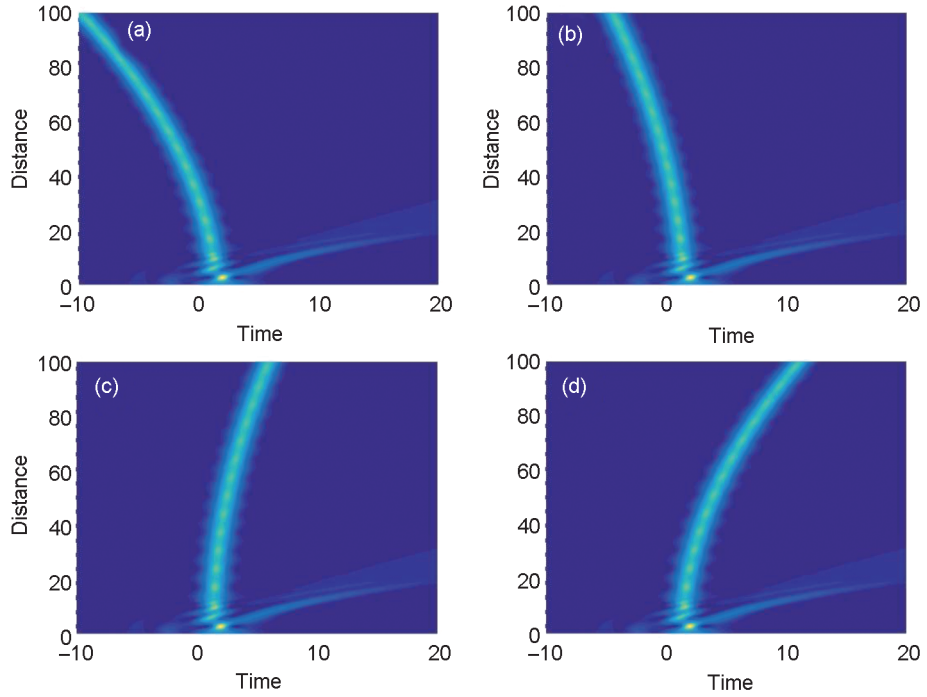


图8 自频移效应对艾里脉冲的影响

(a)  $\nu = 0.001i$ , (b)  $\nu = 0.0005i$ , (c)  $\nu = -0.0005i$ , (d)  $\nu = -0.001i$

Fig. 8 Influence of the self-frequency shift on the Airy pulse

(a)  $\nu = 0.001i$ , (b)  $\nu = 0.0005i$ , (c)  $\nu = -0.0005i$ , (d)  $\nu = -0.001i$

该艾里脉冲传输特性的影响,并得到了一些有意义的结果。结果表明:三阶色散、自陡峭效

应和自频移效应均会引起艾里脉冲中心的偏移,且脉冲中心的偏移方向受系统参数符号的

影响而分别向左或向右偏移,但偏移量的增长却与系统参数的绝对值大小直接相关;非线性增益和线性增益的存在均会使艾里脉冲在传输过程中的强度不断增大,且增益越大,强度增长越快,因此,合理选择非线性增益和线性损耗参数,可以使两种效应对艾里脉冲传输的影响相互抵消;增益色散的存在会使脉冲受到的等效损耗系数变大,因此,增益色散会导致艾里脉冲传输过程中的强度不断衰减,且增益色散越大,艾里脉冲的强度衰减得越快。因此,我们可以通过合理选择系统参数来调控艾里脉冲的传输动力学行为,从而在耗散系统内实现对艾里脉冲传输的综合管理。本文的研究中只考虑了三阶高阶效应,随着脉冲强度的不断增大和脉宽的不断减小,越来越多的高阶效应的影响将变得不容忽视,比如:四阶、五阶效应等,这也将是我们下一步要做的工作。

#### 参考文献:

- [1] XIAO H, SU D P, SONG W, *et al.* Nondiffracting Beam Length Adjustment by Using 3-bit Coding Metasurfaces[J]. *Opt Mater Express*, 2023, **13**(7): 2109. DOI: 10.1364/ome.488417.
- [2] ZHOU J, LU P, LUO L K, *et al.* Compact Planar Metasurfaces for Nondiffracting Surface Wave Deflection[J]. *Microw Opt Technol Lett*, 2023, **65**(9): 2523–2529. DOI: 10.1002/mop.33745.
- [3] JIA J H, LIN H L, *et al.* Pendulum-type Light Beams[J]. *Optica*, 2023, **10**(1): 90. DOI: 10.1364/optica.477076.
- [4] ASENJO F A, HOJMAN S A. Nondiffracting Gravitational Waves[J]. *Eur Phys J C*, 2021, **81**(1): 98. DOI: 10.1140/epjc/s10052-021-08909-z.
- [5] LI Z, LIU W W, GENG G Z, *et al.* Multiplexed Nondiffracting Nonlinear Metasurfaces[J]. *Adv Funct Mater*, 2020, **30**(23): 1910744. DOI: 10.1002/adfm.201910744.
- [6] HUANG Y H, LI X P, AKRAM Z, *et al.* Generation of Millimeter-wave Nondiffracting Airy OAM Beam Using a Single-layer Hexagonal Lattice Reflectarray[J]. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, 2021, **20**(6): 1093–1097. DOI: 10.1109/LAWP.2021.3073144.
- [7] BERRY M V, BALAZS N L. Nonspreading Wave Packets[J]. *Am J Phys*, 1979, **47**(3): 264–267. DOI: 10.1119/1.11855.
- [8] SIVILOGLOU G A, CHRISTODOULIDES D N. Accelerating Finite Energy Airy Beams[J]. *Opt Lett*, 2007, **32**(8): 979. DOI: 10.1364/ol.32.000979.
- [9] BESIERIS I M, SHAARAWI A M. A Note on an Accelerating Finite Energy Airy Beam[J]. *Opt Lett*, 2007, **32**(16): 2447. DOI: 10.1364/ol.32.002447.
- [10] SIVILOGLOU G A, BROKY J, DOGARIU A, *et al.* Observation of Accelerating Airy Beams[J]. *Phys Rev Lett*, 2007, **99**(21): 213901. DOI: 10.1103/PhysRevLett.99.213901.
- [11] SIVILOGLOU G A, BROKY J, DOGARIU A, *et al.* Ballistic Dynamics of Airy Beams[J]. *Opt Lett*, 2008, **33**(3): 207. DOI: 10.1364/ol.33.000207.
- [12] BROKY J, SIVILOGLOU G A, DOGARIU A, *et al.* Self-healing Properties of Optical Airy Beams[J]. *Opt Express*, 2008, **16**(17): 12880–12891. DOI: 10.1364/oe.16.012880.
- [13] CHU X X, ZHOU G Q, CHEN R P. Analytical Study of the Self-healing Property of Airy Beams[J]. *Phys Rev A*, 2012, **85**: 013815. DOI: 10.1103/physreva.85.013815.
- [14] EFREMIDIS N K. Spatiotemporal Diffraction-free Pulsed Beams in Free-space of the Airy and Bessel Type[J]. *Opt Lett*, 2017, **42**(23): 5038. DOI: 10.1364/ol.42.005038.
- [15] CAO B S, SHEN D H, QIU Z F, *et al.* Characteristics of an Elliptical Airy Beam with a Circular Concentric Vortex and Its Realization[J]. *J Opt Soc Am A*, 2020, **37**(12): 1883. DOI: 10.1364/josaa.405549.
- [16] WEI B Y, ZHANG Y, LI P, *et al.* Liquid-crystal Splitter for Generating and Separating Autofocusing and Auto-defocusing Circular Airy Beams[J]. *Opt Express*, 2020, **28**(18): 26151. DOI: 10.1364/oe.400636.
- [17] CHEN L, WEN J S, SUN D, *et al.* Self-healing Property of Focused Circular Airy Beams[J]. *Opt Express*, 2020, **28**(24): 36516. DOI: 10.1364/oe.405867.
- [18] LI T, LI D M, ZHANG X, *et al.* Partially Coherent Radially Polarized Circular Airy Beam[J]. *Opt Lett*, 2020, **45**(16): 4547. DOI: 10.1364/ol.397993.
- [19] DROUZI L, MAUFAY J, SCIAMANNA M, *et al.* All-optical Control of Pattern Dynamics Generated by Airy Beams[J]. *Opt Lett*, 2019, **45**(1): 9. DOI: 10.1364/ol.45.000009.
- [20] XU C J, HU H C, LIU Y J, *et al.* Radially Polarized Symmetric Airy Beam[J]. *Opt Lett*, 2020, **45**(6): 1451. DOI: 10.1364/ol.389753.
- [21] LI X H, GAO Y X, LIN Y X, *et al.* Optical Control of an Airy Beam via Four-wave Mixing and Six-wave Mixing[J]. *Opt Lett*, 2020, **45**(10): 2930. DOI: 10.1364/ol.393566.
- [22] XU C J, WU Y, DENG D M. Multi-optical Bottles from Second-order Chirped Symmetric Airy Vortex Beams[J].

- Opt Lett*, 2020, **45**(13): 3502. DOI: 10.1364/ol.388569.
- [23] SAARI P. Laterally Accelerating Airy Pulses[J]. *Opt Express*, 2008, **16**(14): 10303. DOI: 10.1364/oe.16.010303.
- [24] KAMINER I, LUMER Y, SEGEV M, *et al.* Causality Effects on Accelerating Light Pulses[J]. *Opt Express*, 2011, **19**(23): 23132. DOI: 10.1364/oe.19.023132.
- [25] PIKSARV P, VALTNA-LUKNER H, VALDMANN A, *et al.* Temporal Focusing of Ultrashort Pulsed Bessel Beams into Airy-Bessel Light Bullets[J]. *Opt Express*, 2012, **20**(15): 17220. DOI: 10.1364/oe.20.017220.
- [26] HU Y, LI M, BONGIOVANNI D, *et al.* Spectrum to Distance Mapping via Nonlinear Airy Pulses[J]. *Opt Lett*, 2013, **38**: 380–382. DOI:10.1364/OL.38.000380.
- [27] CAI W Y, WANG L, WEN S C. Evolution of Airy Pulses in the Present of Third Order Dispersion[J]. *Optik*, 2013, **124**(22): 5833–5836. DOI: 10.1016/j.ijleo.2013.04.043.
- [28] CAI W Y, WANG L, WEN S C. Role of Third-order Dispersion in Chirped Airy Pulse Propagation in Single-mode Fibers[J]. *Opt Commun*, 2018, **413**: 24–29. DOI: 10.1016/j.optcom.2017.12.031.
- [29] DRIBEN R, HU Y, CHEN Z G, *et al.* Inversion and Tight Focusing of Airy Pulses Under the Action of Third-order Dispersion[J]. *Opt Lett*, 2013, **38**(14): 2499. DOI: 10.1364/ol.38.002499.
- [30] XIN W, WANG Y, XIN Z G, *et al.* Inversion of Airy Pulses in Nonlinear Femtosecond Optical System[J]. *Opt Commun*, 2021, **489**: 126889. DOI: 10.1016/j.optcom.2021.126889.
- [31] CAI W Y, MILLS M S, CHRISTODOULIDES D N, *et al.* Soliton Manipulation Using Airy Pulses[J]. *Opt Commun*, 2014, **316**: 127–131. DOI: 10.1016/j.optcom.2013.11.057.
- [32] YANG A, HE Y, WANG S F, *et al.* Manipulating Airy Pulse in the Regime of Optical Event Horizon[J]. *Opt Express*, 2018, **26**(26): 34689. DOI: 10.1364/oe.26.034689.
- [33] BESIERIS I M, SHAARAWI A M. Accelerating Airy Wave Packets in the Presence of Quadratic and Cubic Dispersion[J]. *Phys Rev E*, 2008, **78**(4): 046605. DOI: 10.1103/physreve.78.046605.
- [34] ZHAO G W, CHEN S J, HUANG Z Z, *et al.* Three-dimensional Localized Chirped Airy-circular Wave Packets in Free Space[J]. *J Opt Soc Am A*, 2018, **35**(9): 1645. DOI: 10.1364/josaa.35.001645.
- [35] DENG Z X, CHEN Y, LIU J, *et al.* Graded-index Breathing Solitons from Airy Pulses in Multimode Fibers[J]. *Opt Express*, 2019, **27**(2): 483. DOI: 10.1364/oe.27.000483.
- [36] VALDMANN A, PIKSARV P, VALTNA-LUKNER H, *et al.* Realization of Laterally Nondispersing Ultra-broadband Airy Pulses[J]. *Opt Lett*, 2014, **39**(7): 1877. DOI: 10.1364/ol.39.001877.
- [37] LU J Q, JIA W G, NEIMULE M. Transmission Characteristics of Chirped Airy Pulses in Silicon-on-insulator Waveguides[J]. *Optik*, 2019, **194**: 162845. DOI: 10.1016/j.ijleo.2019.05.051.
- [38] HEUTEU C, MANDENG MANDENG L, TCHAWOUA C. Chirp-dispersion Management Inducing Regeneration of Truncated Airy Pulses in Fiber Optics Links [J]. *J Opt Soc Am B*, 2020, **37**(11): A121. DOI: 10.1364/josab.394237.
- [39] BANERJEE A, ROY S. Self-healing Dynamics and Absolute Temporal Focusing of a Truncated Airy Pulse under Higher-order Phase Modulations[J]. *J Opt Soc Am B*, 2018, **35**(4): 878. DOI: 10.1364/josab.35.000878.
- [40] BANERJEE A, ROY S. Dynamics and Selective Temporal Focusing of a Time Truncated Airy Pulse in Varying Dispersive Media[J]. *J Opt Soc Am B*, 2020, **37**(12): 3819. DOI: 10.1364/josab.405220.
- [41] GAGNON L, BÉLANGER P A. Adiabatic Amplification of Optical Solitons[J]. *Phys Rev A*, 1991, **43**(11): 6187–6193. DOI: 10.1103/physreva.43.6187.