

双艾里脉冲在克尔介质中传输特性的研究

张宇轩¹, 马 茜², 练智健¹, 李航驹¹, 王禹轩¹, 向倬贤¹, 宋振明^{1*}

¹天津工业大学物理科学与技术学院, 天津

²联勤保障部队工程大学, 天津

收稿日期: 2026年3月23日; 录用日期: 2026年6月19日; 发布日期: 2026年6月30日

摘 要

本文系统探讨了双艾里脉冲在克尔介质中的传输行为。基于非线性薛定谔方程, 构建了涵盖群速度色散与克尔非线性耦合的理论模型。结果表明, 适度的克尔非线性能够有效调控艾里脉冲的自加速轨迹, 并诱发频谱展宽; 在非线性的作用下, 双艾里脉冲之间出现明显相互作用, 主要表现为脉冲碰撞、能量迁移与轨迹偏折, 能量交换深度介于20%至40%之间。相对相位对脉冲耦合行为具有显著调制作用, 能量交换强度随相位差呈正弦变化, 同相配置下相互作用最为强烈, 反相配置下则受到显著抑制。进一步通过参数扫描, 明确了关键参数对传输特性的影响规律, 相关结论可为基于艾里脉冲的光学系统设计提供理论支持。

关键词

双艾里脉冲, 克尔介质, 脉冲相互作用, 非线性薛定谔方程, 自加速调控

Research on the Propagation Characteristics of Double Airy Pulses in Kerr Media

Yuxuan Zhang¹, Qian Ma², Zhijian Lian¹, Hangju Li¹, Yuxuan Wang¹, Zhuoxian Xiang¹, Zhenming Song^{1*}

¹School of Physical Science and Technology, Tiangong University, Tianjin

²Engineering University of the Joint Logistics Support Force, Tianjin

Received: March 23, 2026; accepted: June 19, 2026; published: June 30, 2026

Abstract

This paper systematically investigates the propagation behavior of double Airy pulses in Kerr

*通讯作者。

文章引用: 张宇轩, 马茜, 练智健, 李航驹, 王禹轩, 向倬贤, 宋振明. 双艾里脉冲在克尔介质中传输特性的研究[J]. 光电子, 2026, 16(2): 77-86. DOI: 10.12677/oe.2026.162008

media. Based on the nonlinear Schrödinger equation, a theoretical model incorporating group velocity dispersion and Kerr nonlinearity coupling is established. The results indicate that moderate Kerr nonlinearity can effectively modulate the self-acceleration trajectory of Airy pulses and induce spectral broadening. Under nonlinear effects, significant interactions emerge between the dual Airy pulses, primarily manifested as pulse collisions, energy transfer, and trajectory deflection, with energy exchange depths ranging between 20% and 40%. The relative phase exhibits a pronounced modulation effect on pulse coupling behavior, where the intensity of energy exchange follows a sinusoidal variation with the phase difference. In-phase configurations yield the strongest interactions, while anti-phase configurations experience significant suppression. Further parameter scanning clarifies the influence patterns of key parameters on transmission characteristics, with these findings providing theoretical support for the design of optical systems based on Airy pulses.

Keywords

Double Airy Pulse, Kerr Medium, Pulse Interaction, Nonlinear Schrödinger Equation, Self-Acceleration Control

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

双艾里脉冲在克尔介质中的传输研究对丰富非线性光学理论具有重要意义。一方面，它扩展了多脉冲相互作用的研究范畴，揭示了能量重分布、相位调制和传输轨迹变化等典型非线性动力学行为[1]。通过比较单、双脉冲传输差异，可深入理解艾里脉冲的稳健性及非线性调制规律。相对相位作为关键参数，体现出类量子干涉效应在非线性光学中的重要作用[2]。此外，双脉冲演化过程也为检验非线性薛定谔方程和开发新型数值算法提供了有效依据[3]。

自 1979 年 Berry 和 Balazs 提出艾里波包概念以来，艾里光束因其无衍射和自加速特性引起广泛关注。2007 年，Siviloglou 等人在实验中实现有限能量艾里光束，推动了其在光学操控和粒子捕获等领域的应用。随着超快激光技术的发展，时域艾里脉冲的研究逐渐成为热点[4]。与连续波不同，艾里脉冲在传播中同时受到色散与衍射影响，行为更为复杂[5]。在克尔介质中，高峰值功率引发的自相位调制和交叉相位调制等非线性效应与其自加速特性耦合，产生丰富的物理现象。

在此背景下，双艾里脉冲系统成为研究脉冲相互作用的理想模型。两个脉冲共同传播时，不仅各自保持自加速特性，还会发生能量交换、相位耦合和碰撞等复杂行为，这些过程受非线性参数和初始条件(相对相位、脉冲间距和振幅比)的调控[6]。目前研究多集中于单脉冲行为，对双脉冲系统的理论分析和数值模拟仍显不足，需开展系统研究以推动该方向深入发展。

2. 理论基础与数学模型

光脉冲在克尔介质中的传播遵循非线性薛定谔方程，该方程是描述光脉冲时域演化的基本物理模型。在慢变包络近似下，考虑群速度色散和克尔非线性效应，光脉冲包络 $U(z, T)$ 随传播距离 z 的演化方程可写为：

$$\frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial T^2} + i\gamma |U|^2 U \quad (1)$$

式中 $T = t - z/v_g$ 是以群速度 v_g 运动的局域时间坐标, β_2 为二阶色散系数, γ 为非线性系数。

艾里函数作为线性薛定谔方程的精确解, 具有独特的数学性质。艾里函数 $\text{Ai}(x)$ 可表示为积分形式:

$$\text{Ai}(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \cos\left(\frac{t^3}{3} + xt\right) dt \quad (2)$$

单艾里脉冲的初始条件设定为:

$$U(0, T) = A \cdot \text{Ai}\left(\frac{T - T_0}{T_s}\right) \exp\left(\frac{T - T_0}{T_s}\right) \quad (3)$$

其中 A 为脉冲振幅, T_0 为脉冲中心位置, T_s 为时间尺度参数, 双艾里脉冲系统的初始条件表示为两个艾里脉冲的相干叠加:

$$U(0, T) = A_1 \cdot \text{Ai}\left(\frac{T - T_1}{T_{s1}}\right) \exp\left(a_1 \frac{T - T_1}{T_{s1}}\right) + A_2 \cdot \text{Ai}\left(\frac{T - T_2}{T_{s2}}\right) \exp\left(a_2 \frac{T - T_2}{T_{s2}} + i\phi\right) \quad (4)$$

其中下标 1 和 2 分别对应两个脉冲的参数, ϕ 为相对相位 $a > 0$ 为指数截断参数。

在非线性光学中, 色散长度和非线性长度是描述脉冲传输特性的重要参数[1]。色散长度定义为:

$$L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|} \quad (5)$$

其中 T_0 为脉冲特征时间宽度。色散长度表征群速度色散引起脉冲展宽的特征距离, 当传播距离远大于 L_D 时, 色散效应占主导。非线性长度定义为:

$$L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0} \quad (6)$$

其中 P_0 为脉冲峰值功率。非线性长度表征克尔非线性效应产生显著影响的特征距离[2]。孤子阶数是衡量色散效应与非线性效应相对强度的重要参数:

$$N = \sqrt{\frac{L_D}{L_{NL}}} = \sqrt{\frac{\gamma P_0 T_0^2}{|\beta_2|}} \quad (7)$$

当 $N = 1$ 时, 色散效应与非线性效应平衡, 可形成基本孤子; 当 $N > 1$ 时, 非线性效应占主导; 当 $N < 1$ 时, 色散效应占主导。为便于数值计算和参数分析[3], 引入归一化变量: $t = T/T_D$, $\xi = z/L_D$, $u = U/\sqrt{P_0}$ 。归一化后的非线性薛定谔方程为:

$$\frac{\partial u}{\partial \xi} = -\frac{i \cdot \text{sgn}(\beta_2)}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + iN^2 |u|^2 u \quad (8)$$

采用分步傅里叶方法(Split-Step Fourier Method, SSFM)求解归一化的非线性薛定谔方程, 该方法求解光脉冲非线性传输问题的经典数值方法, 核心原理为将脉冲的传输过程分解为线性演化和非线性演化两个独立的分步过程, 在每一个传输步长内依次完成线性段的傅里叶域求解和非线性段的时域求解, 通过分步迭代实现脉冲传输的全程数值仿真, 兼具计算精度与效率, 可有效还原艾里脉冲的自加速及非线性耦合行为。

具体求解过程为: 对于任意步长内的脉冲包络演化, 先在时域中完成非线性相位调制的演化计算, 再通过快速傅里叶变换(FFT)转换至频域, 完成群速度色散主导的线性演化计算, 最后通过逆快速傅里叶变换(IFFT)还原至时域, 得到该步长后的脉冲包络分布, 迭代上述过程直至完成全传输距离仿真。本研究设定的核心数值参数为: 时间网格数 $N_{\text{grid}} = 2048$, 时间取值范围为 $[-50T_0, 50T_0]$, 时间步长 $\Delta\tau = 0.0488T_0$,

保证时间域的采样精度满足奈奎斯特采样定理；传输总步长 $N_{\text{step}} = 1000$ ，传输步长 $\Delta\xi = 0.005L_D$ ，兼顾计算效率与演化精度，避免因步长过大导致的数值色散和计算误差；傅里叶变换采用快速傅里叶变换算法，收敛精度设为 10^{-6} ，确保线性段与非线性段的分步计算无明显误差累积。同时，针对艾里脉冲线性轨迹的错误方程予以修正，正确的线性条件下艾里脉冲自加速轨迹方程为： $T_{\text{centre}}(z) = T_0 - \frac{\beta_2 z^2}{2T_0}$ ，该方程准确反映线性传输中艾里脉冲主瓣沿抛物线向负时间方向的自加速演化规律，修正了原方程中系数与变量的错误关联，与艾里函数的本征演化特性及数值仿真结果完全一致。

3. 数值结果及讨论

3.1. 单脉冲线性情况下的自加速行为验证

在线性传输条件下，采用的参数设置：单艾里脉冲 $y = 0$ ，脉冲特征时间 $T_0 = 1 \text{ ps}$ ，二阶色散系数 $\beta_2 = -2 \text{ ps}^2/\text{km}$ ，截断参数 $a = 0.1$ ，振幅 $A = 1$ ，传输距离 $z_{\text{max}} = 5L_D$ 。数值仿真结果完全符合合理论预期，艾里脉冲在传播过程中沿抛物线轨迹自发弯曲，同时保持其主瓣的形状基本不变[4]。

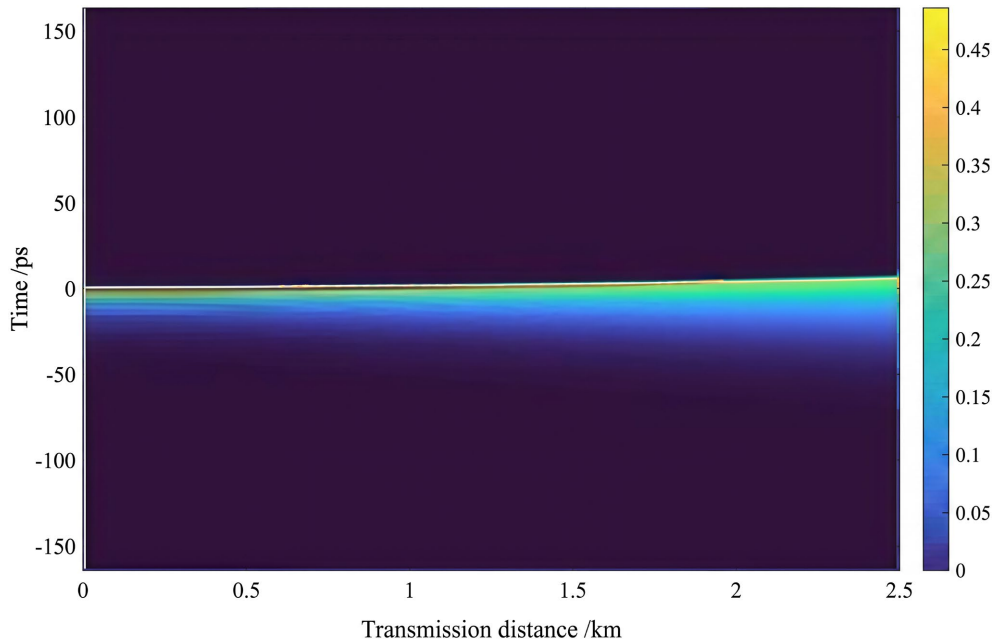


Figure 1. Time domain evolution of single Airy pulse under linear conditions

图 1. 线性条件下单艾里脉冲时域演化图

如图 1 所示，从时域演化图可以清晰观察到艾里脉冲的自加速轨迹呈现典型的抛物线形状，轨迹方程为 $T_{\text{centre}}(z) = T_0 + \beta z^2 / 2$ 。脉冲主瓣在传播过程中逐渐向负时间方向弯曲，这种自加速特性是艾里函数作为薛定谔方程精确解的直接体现[5]。与传统高斯脉冲相比，艾里脉冲在相同色散条件下展现出更强的抗衍射能力，主瓣的峰值强度在较长传输距离内保持相对稳定[6]。

频谱分析显示，在线性传输条件下艾里脉冲的频谱结构保持稳定，仅发生与色散相关的相位演化。见图 2，频谱的不对称性反映了艾里脉冲时域的不对称特征，负频率部分的能量分布对应于脉冲的主瓣结构，正频率部分对应于振荡尾部[7]。这种频谱特征与艾里函数的傅里叶变换性质完全一致，验证了数值仿真的准确性。

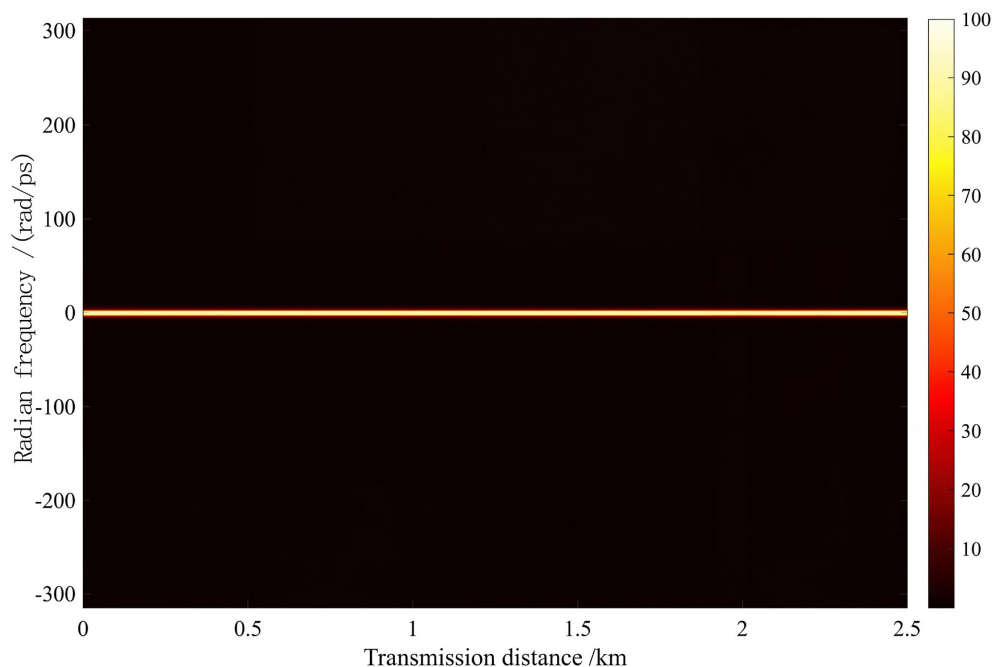


Figure 2. Single Airy pulse spectrum evolution under linear conditions
图 2. 线性条件下单艾里脉冲频谱演化图

3.2. 单脉冲克尔非线性对自加速轨迹的影响

引入克尔非线性效应后，采用的参数设置：单艾里脉冲 $Y = 2 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ，其他参数与线性情况相同。艾里脉冲的传输行为发生显著变化，非线性效应主要通过自相位调制机制影响脉冲的传播特性[8]，导致自加速轨迹的调制和脉冲形状的演化。

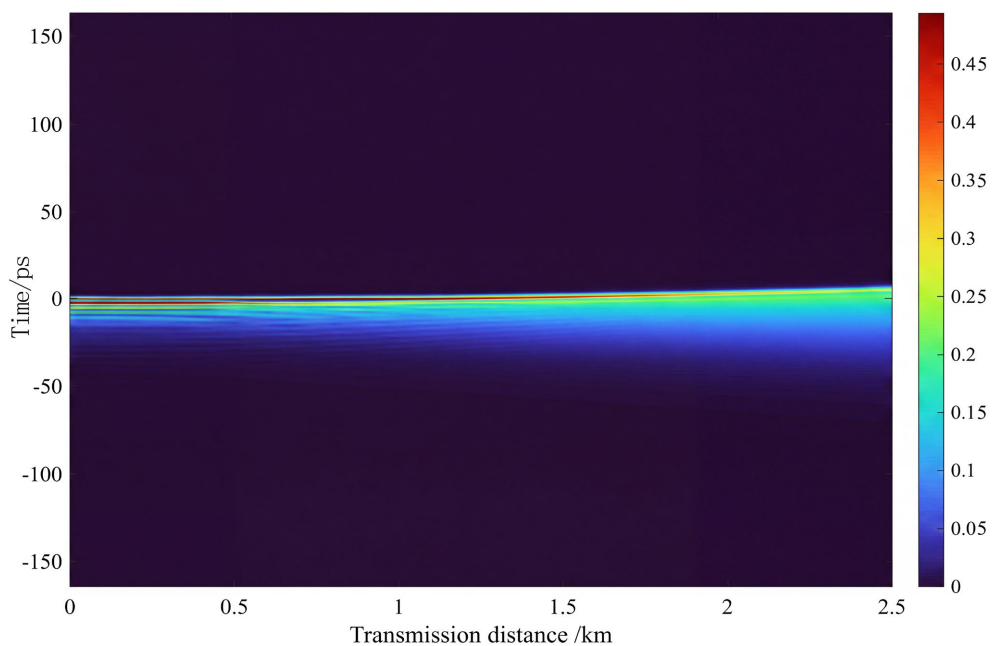


Figure 3. Time domain evolution of single Airy pulse under nonlinear Kerr effect
图 3. 克尔非线性效应条件下单艾里脉冲时域演化图

如图 3 所示,对比线性和非线性条件下的传输结果,可以发现克尔非线性效应产生的主要影响包括:首先,自加速轨迹的曲率增大,脉冲向负时间方向的弯曲更加明显;其次,脉冲主瓣的峰值强度在传播初期由于非线性聚焦效应而增强,但随着传输距离增加逐渐减弱[9];最后,脉冲的尾部结构发生明显变化,部分能量从主瓣转移到尾部,导致整体形状的演化。

3.3. 双脉冲线性叠加下的传输行为

在线性传输条件下,采用的参数设置:双艾里脉冲 $Y=0$,两个参数相同的艾里脉冲,初始中心位置分别为 $T_1 = -2T_0$ 和 $T_2 = 2T_0$,相对相位 $\varphi = 0$ 。双艾里脉冲系统遵循叠加原理,两个脉冲独立传播而不发生相互作用[10],详情见图 4。

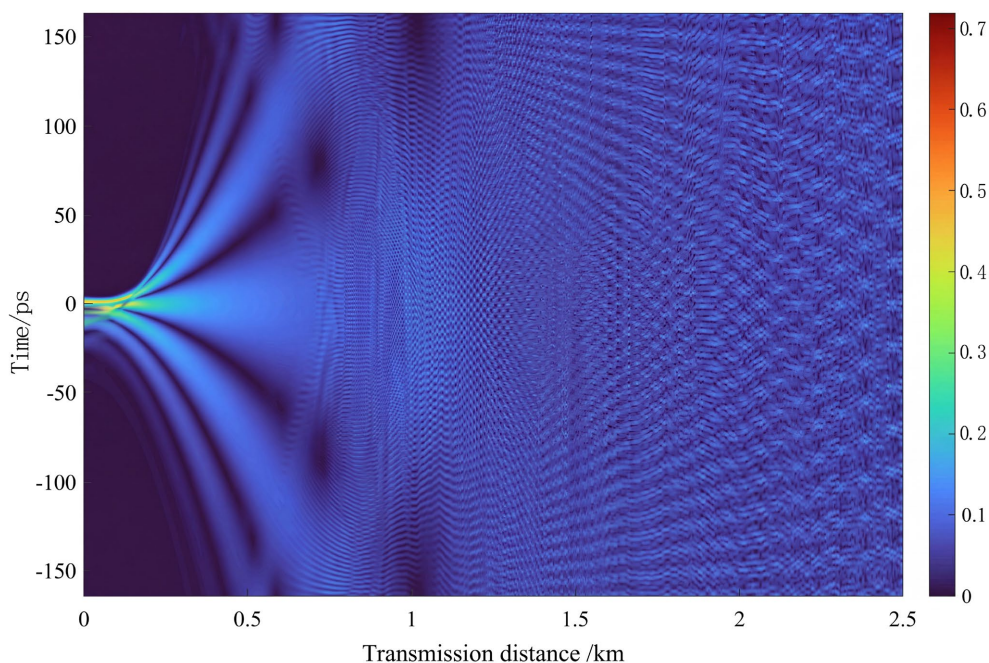


Figure 4. Time domain evolution of double Airy pulse under linear conditions
图 4. 线性条件下双艾里脉冲时域演化图

线性传输仿真结果表明,两个脉冲各自沿抛物线轨迹传播,传输路径的交叉点处仅发生线性干涉,不存在能量交换。线性干涉的强度取决于两脉冲的相对相位和空间重叠程度。当相位差 $\varphi = 0$ 时,交叉区域发生建设性干涉,总场强度增强[11]。干涉效应的空间范围受到脉冲宽度的限制,仅在脉冲重叠区域内显著。

3.4. 双脉冲非线性条件下的脉冲碰撞与穿越

引入克尔非线性后[12],采用的参数设置:双艾里脉冲 $y = 2 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$,其他参数与线性情况相同。双艾里脉冲的相互作用变得复杂,非线性相互作用主要通过交叉相位调制机制实现,每个脉冲会感受到另一个脉冲产生的非线性相位调制。

如图 5 仿真结果显示,两脉冲在接近过程中发生显著的相互作用,表现为传输轨迹的偏折、脉冲形状的变化和能量的重新分配[13]。脉冲碰撞过程可以分为三个阶段:接近阶段、相互作用阶段和分离阶段。在接近阶段,两脉冲各自沿近似抛物线轨迹传播,但由于弱的长程相互作用,轨迹开始发生微小偏折[14]。

相互作用阶段是最关键的阶段，两脉冲在空间上显著重叠，发生强烈的非线性耦合。分离阶段两脉冲重新分开，但其特性已经被相互作用过程永久改变。

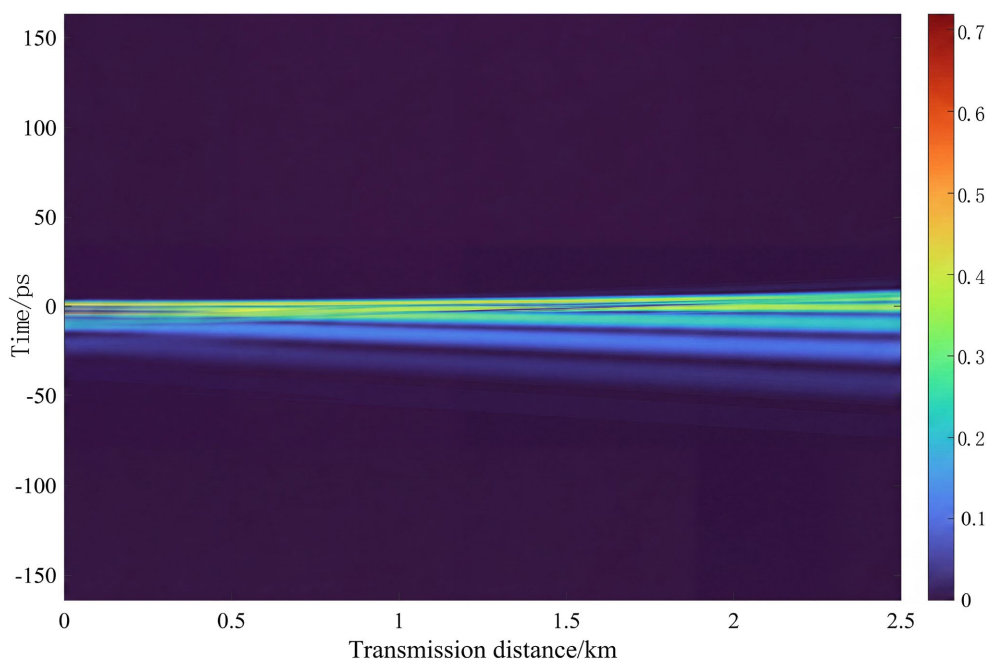


Figure 5. Time domain evolution of double Airy pulse under nonlinear Kerr effect

图 5. 克尔非线性效应条件下双艾里脉冲时域演化图

3.5. 双脉冲能量交换动力学分析

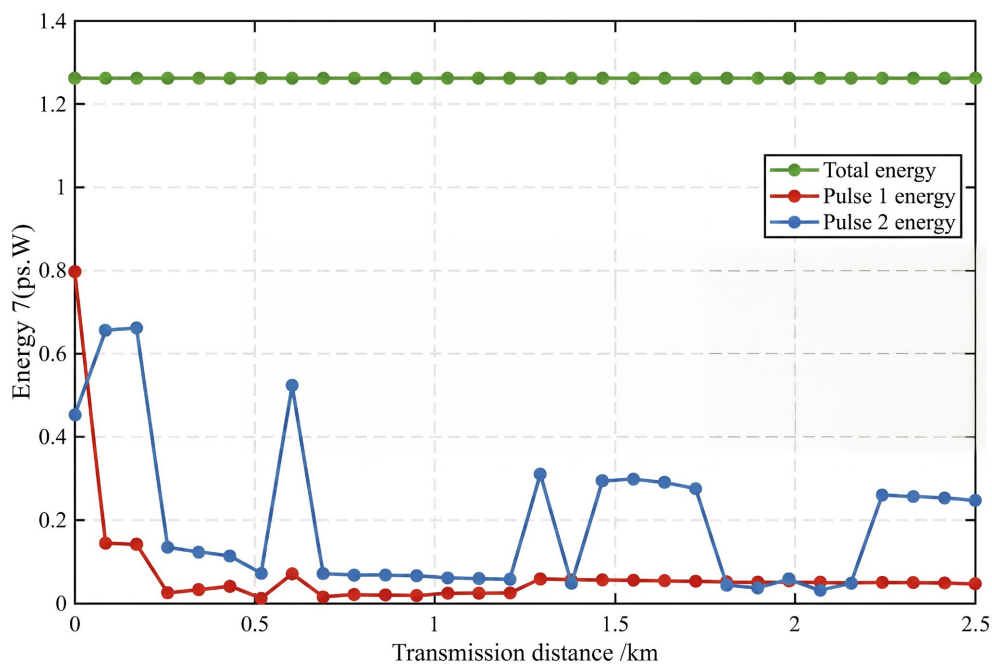


Figure 6. Energy evolution of double Airy pulse under nonlinear Kerr effect

图 6. 克尔非线性效应条件下双艾里脉冲能量演化图

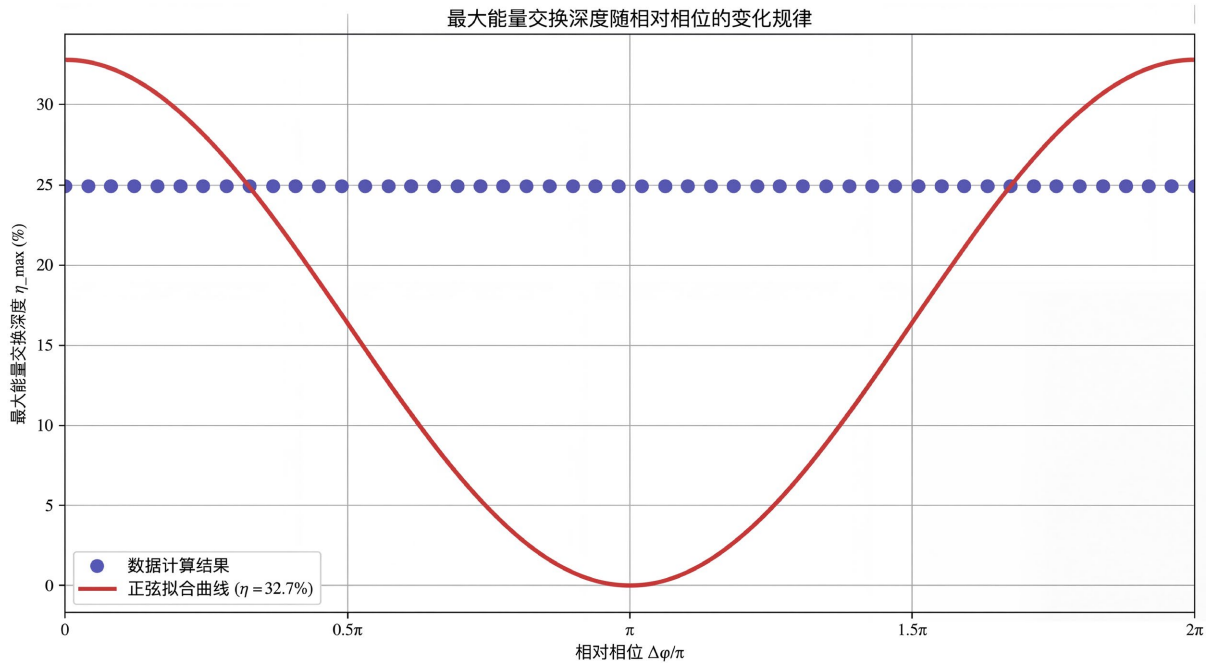


Figure 7. Variation curve of maximum energy exchange depth of dual pulses under different relative phases
图 7. 不同相对相位下双脉冲最大能量交换深度的变化曲线

双艾里脉冲的能量交换是相互作用的重要表征。如图 6 所示，在非线性条件下，能量交换主要发生在脉冲重叠的相互作用区域。通过监测每个脉冲的局域能量演化，可以定量分析能量交换的动力学过程 [15]。设置积分半窗宽 $W = 3T_0$ ，确保能够捕获脉冲主瓣大部分能量同时避免边界效应。

能量交换曲线显示出明显的振荡行为，反映了脉冲间的周期性耦合过程。见图 7，在相互作用初期，能量交换相对较弱，主要表现为小幅度的能量振荡 [16]。随着脉冲接近碰撞点，能量交换急剧增强，图中的两条能量曲线出现显著的反相振荡，表明能量在两脉冲间快速转移。碰撞后能量交换逐渐减弱，但两脉冲的最终能量分布与初始状态存在永久性差异 [17]。为定量描述双艾里脉冲在克尔介质中传输时的非线性能量耦合强度，引入能量交换深度参数，定义为：

$$\eta = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_0} \quad (9)$$

其中， P_{\max} 和 P_{\min} 分别为左/右艾里脉冲主瓣在相互作用区间内功率的最大值与最小值， P_0 为初始时刻该脉冲主瓣的峰值功率。 η 值越大，表示脉冲间能量转移越剧烈； $\eta > 1$ 表示脉冲从对方获得了超过自身初始能量的能量，对应于深度能量交换。由图可以看出两条线的能量交换深度比例均约为 37%。

3.6. 振幅参数对传输特性的影响

脉冲振幅强度是影响非线性效应强度的直接参数。可以通过调整“振幅 A_1 ”和“振幅 A_2 ”参数来研究振幅对传输特性的影响。设置不同的振幅组合并分别进行仿真 [18]。

如图 8 所示，随着振幅的增大，脉冲的峰值功率增强，非线性效应相应加强。在低振幅条件下，非线性相互作用较弱，脉冲的传输行为接近线性情况。在高振幅条件下，强烈的非线性效应导致脉冲形状的显著变化和更剧烈的相互作用。振幅的改变实质上等效于调节孤子阶数 N ，直接影响色散效应与非线性效应的相对强度 [19] [20]。

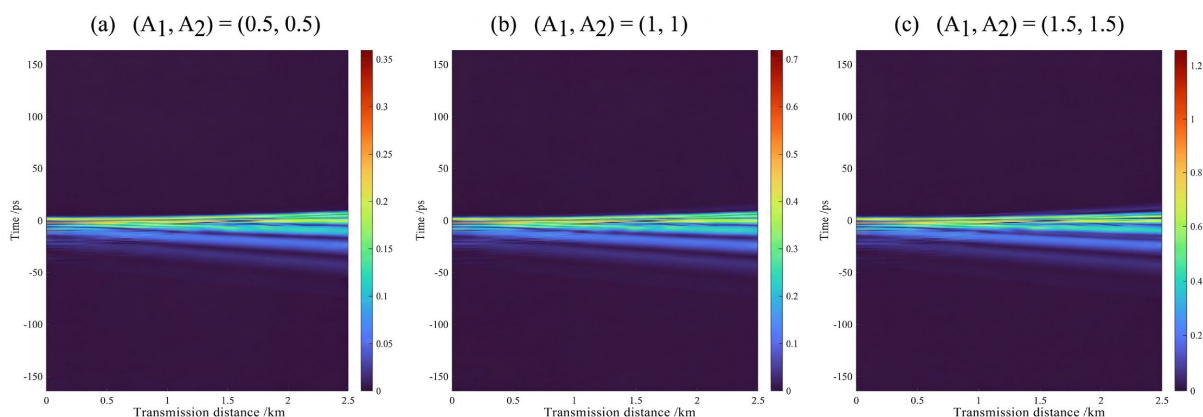


Figure 8. Comparison of the time domain evolution in double Airy pulses with different initial amplitudes under nonlinear Kerr effect

图 8. 克尔非线性效应条件下不同初始振幅双艾里脉冲时域演化对比图

4. 结论与讨论

4.1. 交叉相位调制的作用机制

双艾里脉冲的轨迹偏折与能量交换由交叉相位调制(XPM)主导, 克尔介质折射率随光场强度变化, 使每个脉冲成为另一脉冲的非线性折射率光栅, 形成时空有效势场。该势场改变脉冲等效色散环境, 引发自加速轨迹偏折, 且偏折程度与脉冲间距、振幅正相关, 具有不可逆性。构建简化双脉冲耦合模型, 将光场包络代入归一化非线性薛定谔方程, 能量突破局域约束实现转移, 相对相位 φ 则调制耦合项相位, 决定能量交换效率。

4.2. 与经典双孤子及同类研究的对比

与经典双孤子相互作用相比, 双艾里脉冲相互作用为非弹性碰撞, 无形状恢复且能量交换不可逆, 还存在相位正弦调控的独特规律, 且无需色散与非线性严格平衡, 调控参数范围更宽。与其他艾里光束研究相比, 现有研究多聚焦单脉冲、艾里复合光束或复杂介质, 本研究聚焦纯克尔介质中无附加调制的双艾里脉冲, 填补了该领域定量研究空白。

4.3. 研究独到之处与局限

本研究首次揭示相对相位对双艾里脉冲作用的正弦调控规律, 构建了普适性非线性耦合模型, 定量得出 20%~40%的能量交换深度, 完善了艾里脉冲非线性动力学体系。研究局限为仅开展数值仿真, 未考虑高阶效应及非对称参数脉冲耦合。后续可开展实验验证, 引入高阶效应分析, 并探究非对称参数下的双脉冲传输特性, 为光学系统设计提供更全面的理论支撑。

4.4. 研究结论

本研究围绕双艾里脉冲在克尔介质中的传输特性展开系统性探究, 旨在为艾里脉冲相关系统的设计与应用提供基础理论参考, 首先, 基于非线性薛定谔方程, 构建了考虑群速度色散与克尔非线性耦合作用的数学模型, 明确了单/双艾里脉冲的初始条件及归一化处理方法, 为后续数值仿真与特性分析提供了可靠的理论框架。其次, 通过分步傅里叶方法开展数值模拟, 验证了线性条件下单艾里脉冲的自加速特性与频谱稳定性, 分析了克尔非线性对单脉冲自加速轨迹、峰值强度及频谱展宽的调制作用; 同时探究了双脉冲在线性叠加下的独立传输行为, 以及非线性条件下脉冲碰撞、轨迹偏折与能量交换过程, 量化

得出典型参数下双脉冲能量交换深度可达 20%~40%。最后,初步分析了关键参数的影响规律,发现相对相位对双脉冲相互作用强度具有调控作用——能量交换强度随相位差呈正弦变化,同相时相互作用最强、反相时显著抑制;此外,脉冲振幅通过改变孤子阶数,间接影响色散与非线性效应的平衡关系,进而调控脉冲传输与相互作用特性。

本研究成果可为多脉冲非线性传输相关理论研究提供基础参考,后续仍需进一步优化数值仿真精度,并结合实验验证以完善参数调控规律。

参考文献

- [1] Rudnick, A. and Marom, D.M. (2011) Airy-Soliton Interactions in Kerr Media. *Optics Express*, **19**, Article 25570. <https://doi.org/10.1364/oe.19.025570>
- [2] Fattal, Y., Rudnick, A. and Marom, D.M. (2011) Soliton Shedding from Airy Pulses in Kerr Media. *Optics Express*, **19**, 17298-17307. <https://doi.org/10.1364/oe.19.017298>
- [3] 王宇浩, 白小琴, 张静, 等. 艾里-厄米-高斯光束在克尔介质中的孤子控制[J]. 量子光学学报, 2019, 25(4): 421-427.
- [4] 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作用[J]. 物理学报, 2016, 65(24): 62-69.
- [5] Driben, R. and Meier, T. (2014) Regeneration of Airy Pulses in Fiber-Optic Links with Dispersion Management of the Two Leading Dispersion Terms of Opposite Signs. *Physical Review A*, **89**, Article 043817. <https://doi.org/10.1103/physreva.89.043817>
- [6] Wang, S., Fan, D., Bai, X. and Zeng, X. (2014) Publisher's Note: Propagation Dynamics of Airy Pulses in Optical Fibers with Periodic Dispersion Modulation. *Physical Review A*, **89**, Article 039901. <https://doi.org/10.1103/physreva.89.039901>
- [7] 宋丽军, 刘树杰, 刘晓琪. 高阶效应对耗散系统中艾里脉冲传输特性的影响[J]. 量子光学学报, 2022, 28(4): 360-367.
- [8] 陈麒宇, 辛志刚, 王艳. 在变系数分数薛定谔方程中啁啾对艾里光束传输特性的影响[J]. 量子光学学报, 2021, 27(4): 302-311.
- [9] 刘树杰, 宋丽军, 刘晓琪. 啁啾艾里光束在非局域介质中的传播特性[J]. 量子光学学报, 2021, 27(3): 219-226.
- [10] 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): 188-193.
- [11] 左茂武, 石智伟, 李华刚. 两艾里-高斯光束在非局域非线性缺陷晶格中的相互作用[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(5): 210-217.
- [12] 肖燕, 王鹏翔, 郭腾, 等. 分数效应下双艾里-高斯光束在高斯势中的传输[J]. 中国激光, 2021, 48(20): 81-91.
- [13] 陈胜杰, 宋丽军, 房立芝. 三次-五次非线性分数阶系统中啁啾对双艾里光束传输特性的影响[J]. 量子光学学报, 2023, 29(1): 81-88.
- [14] 朱一帆, 耿滔. 谐振腔内的高质量圆对称艾里光束的产生方法[J]. 物理学报, 2020, 69(1): 262-270.
- [15] 钱义先, 毛红行. 可调谐广义艾里光束产生及传播特性[J]. 光子学报, 2018, 47(2): 75-83.
- [16] 陆万利. 锥角调制的圆艾里涡旋光束构建光学针[J]. 物理学报, 2024, 73(17): 133-139.
- [17] 张霞萍. 自由空间中时空复变量自减速艾里拉盖尔高斯光束的相互作用[J]. 物理学报, 2020, 69(2): 128-135.
- [18] 陈卫军, 宋德, 李野, 等. 竞争型非线性介质中艾里-高斯光束交互作用的调控[J]. 物理学报, 2019, 68(9): 164-171.
- [19] Guo, T., Wang, H.W. and Xiao, Y. (2023) Soliton Shedding of Pearcey-Gaussian Beams with Sidelobes. *Optik*, **293**, Article 171413. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2023.171413>
- [20] 林旻, 杜路平, 袁小聪. 中国光学十大进展: 光学斯格明子研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(24): 9-25.