

文章编号:1001-5078(2007)10-1088-03

高阶飞秒孤子演化特性的数值研究

李莉, 杨荣草

(山西大学物理电子工程学院, 山西 太原 030006)

摘要:本文以高阶非线性薛定谔方程为数学模型,数值研究了高阶色散和高阶非线性效应影响下高阶飞秒孤子的演化特性,并与高阶皮秒孤子的演化特性进行了比较。结果发现二阶飞秒孤子的演化特性与二阶皮秒孤子的演化特性非常相似,都具有很好的周期性;而三阶和四阶飞秒孤子的演化特性与相应的皮秒孤子的演化特性有很大不同,高阶效应的存在不同程度上破坏了三阶和四阶孤子演化的周期性。

关键词:高阶孤子;飞秒脉冲;色散;自陡峭;拉曼散射

中图分类号:O437;TN253

文献标识码:A

Numerical Study on Propagation Property of the High-order Femtosecond Soliton

LI li, YANG Rong-cai

(College of physics & Electronics Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: Based on the model of the high-order nonlinear Schrödinger equation, the propagation property of the high-order femto second solitons under the influence of the higher-dispersion and higher-nonlinear effects was numerically investigated, and compared to that of the high-order picosecond solitons. The results show that the propagation property of second-order femtosecond soliton is similar to that of second-order picosecond soliton, which is periodic. But for third- and fourth-order femtosecond solitons, different from the corresponding ones in picosecond dimension, the higher-order effects destroy the periodicity of the propagation.

Key words: high-order soliton; femtosecond pulse; dispersion; self-steepening; Raman scattering

1 引言

光孤子在光纤中的传输特性一直是人们研究的热点课题之一。在光纤的反常色散区,由于色散和非线性效应的相互平衡,使光脉冲以孤子形式在光纤中无畸变地传输。光脉冲在光纤中的传输是以非线性薛定谔方程(NLSE)为数学模型,该传输方程只包含群速度色散(GVD)和自相位调制(SPM)效应^[1]。随着超短脉冲技术的发展,当光脉冲宽度进入飞秒量级时,光纤的高阶色散效应(如三阶色散TOD)和高阶非线性效应(如自陡峭等)已不能忽略,描述飞秒光脉冲在光纤中传输的数学模型需要

修正为高阶非线性薛定谔方程(HNLSE)^[1-6]。

(高阶)非线性薛定谔方程是研究光孤子传输的动力学基础,该方程具有双曲正割形式的一阶孤子解,它在传输过程中形状和频谱结构均保持不变。当输入能量较大的光脉冲时,光脉冲将演变为高阶孤子^[1]。人们对皮秒尺度下一阶孤子和高阶孤子的传输规律进行了很多研究^[1-8],发现皮秒高阶孤子具有周期性的传输特性。近年来也有人对飞秒尺

作者简介:李莉(1977-),女,助教,研究方向为光纤通信。
E-mail: lili@sxu.edu.cn
收稿日期:2007-04-18

度下高阶孤子的演化特性进行了研究。文献[9]和[10]研究了仅有高阶非线性效应影响下二阶孤子的衰变特性和二阶孤子间的相互作用。

本文以高阶非线性薛定谔方程为数学模型,采用对称分步傅里叶算法数值研究在高阶色散和高阶非线性效应影响下二阶、三阶、四阶飞秒孤子的演化特性,并分别与相应的皮秒高阶孤子的演化特性进行比较。

2 数学模型

考虑到高阶色散和高阶非线性效应,飞秒脉冲在光纤中的传输由如下高阶非线性薛定谔方程来描述:

$$\frac{\partial A}{\partial Z} + i\alpha_1 \frac{\partial^2 A}{\partial \tau^2} + i\alpha_2 |A|^2 A + \alpha_0 A = \alpha_3 \frac{\partial^3 A}{\partial \tau^3} + \alpha_4 \frac{\partial}{\partial \tau} \cdot (|A|^2 A) + \alpha_5 A \frac{\partial |A|^2}{\partial \tau} \quad (1)$$

其中, $A(Z, \tau)$ 表示脉冲包络的慢变振幅, $Z = z/L_D$ 是归一化传输距离, $\tau = \frac{t - \beta_1 z}{T_0}$ 是归一化延迟时间;

$\alpha_1 = -\frac{1}{2} \text{sgn}(\beta_2)$ 是 GVD 参量, $\alpha_2 = N^2$ 代表 Kerr 非线性, $\alpha_3 = \text{sgn}(\beta_3) \frac{L_D}{6L'_D}$ 是 TOD 参量, $\alpha_4 = -\frac{2}{\omega_0 T_0}$ N^2 , $\alpha_5 = -\frac{\mu}{\gamma T_0}$ 分别对应于自陡峭效应和非线性拉曼

延迟效应。其中: $N^2 = L_D/L_{NL}$, $L_D = T_0^2/|\beta_2|$ 为 GVD 长度, $L'_D = T_0^3/|\beta_3|$ 为 TOD 长度, $L_{NL} = 1/\gamma P_0$ 为 Kerr 非线性长度, β_2 和 β_3 分别是光纤的 GVD 和 TOD 系数, γ 是 Kerr 非线性系数, T_0 和 P_0 分别是入射脉冲的初始宽度和功率, α_0 代表光纤的损耗/增益。在通信波长 $1.55 \mu\text{m}$ 附近, 光纤损耗已降至 0.2 dB/km , 而且还可通过光纤放大器来补偿, 本文设 $\alpha_0 = 0$ 。对于皮秒光脉冲, 高阶效应项可以忽略, 方程(1)就简化为标准的非线性薛定谔方程。

方程(1)是一个高阶的非线性偏微分方程, 解析求解它的 N 阶孤子解比较困难。本文采用对称分步傅里叶变换算法数值分析在高阶色散和高阶非线性效应影响下高阶孤子的演化特性。在以下数值计算中我们取归一化的光纤系统参量为: $\alpha_1 = 0.5$, $\alpha_2 = 1$, $\alpha_3 = -0.0083$, $\alpha_4 = -0.0498$, $\alpha_5 = 0.0498$ 。

3 数值结果及分析

输入如下形式初始 N 阶孤子:

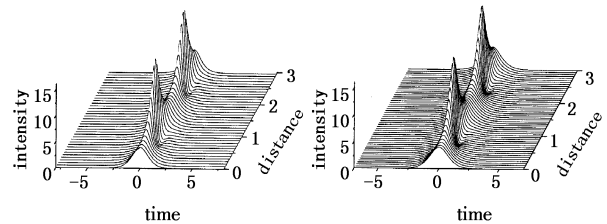
$$A(Z, 0) = N \text{sech}(\tau) \quad (2)$$

其中, N 表示孤子的阶数。本文数值模拟中取 $N =$

2, 3, 4 来分别研究在高阶色散和高阶非线性效应下二阶、三阶、四阶孤子在光纤中的演化特性。当模拟皮秒孤子时, 我们令高阶项 $\alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = 0$ 。

3.1 二阶孤子演化 ($N=2$)

图 1(a) 是二阶飞秒孤子传输 3 个色散长度的演化图形, 为了对比起见, 图 1(b) 给出了二阶皮秒孤子传输相同色散长度的演化图形。从图 1 中可以看出, 二阶飞秒孤子与二阶皮秒孤子的演化过程非常相似, 都具有周期性。在传输了更长的距离后, 二阶飞秒孤子仍保持很好的周期性, 如图 2 所示。



(a) 二阶飞秒孤子演化图 (b) 二阶皮秒孤子演化图

图 1 二阶飞秒孤子和二阶皮秒孤子演化图

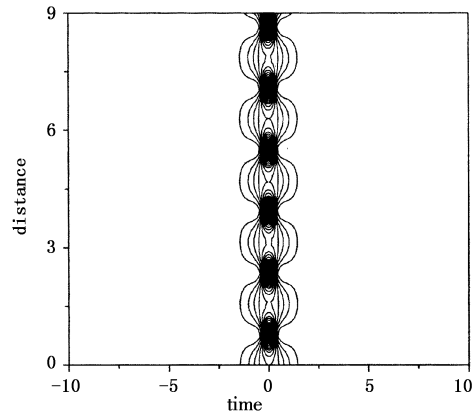
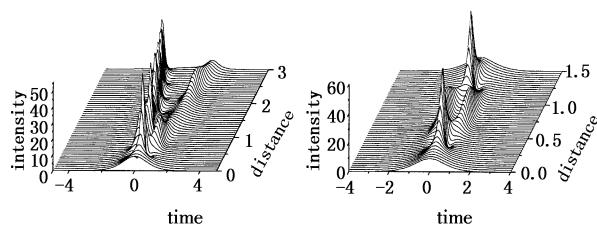


图 2 二阶飞秒孤子传输了 9 个色散长度的等高线图

3.2 三阶孤子演化 ($N=3$)

图 3 是三阶飞秒孤子和三阶皮秒孤子的演化图形。比较图 3(a) 和 (b) 可以看出, 三阶飞秒孤子与三阶皮秒孤子的演化完全不同。三阶皮秒孤子在传输过程中呈周期性的演化, 起始阶段脉冲变窄变高, 而后分裂成两个峰值较低的相同脉冲, 再合而为一演化成峰值较高的窄脉冲, 最后恢复初始脉冲形状进入下一个周期。而三阶飞秒孤子在演化过程中发生脉冲分裂后不再恢复到初始脉冲形状, 两脉冲间的距离随着传输距离的增加而增加, 前面的脉冲峰值较高而脉宽较窄, 后面的脉冲峰值较小而脉宽较宽。由于高阶效应的存在, 三阶飞秒孤子的演化不再具有周期性特性, 但分裂成的两个脉冲却逐渐以不同的周期演化, 这可以清楚地从图 4 上看到。



(a) 三阶飞秒孤子演化图 (b) 三阶皮秒孤子演化图

图3 三阶飞秒孤子和三阶皮秒孤子的演化图

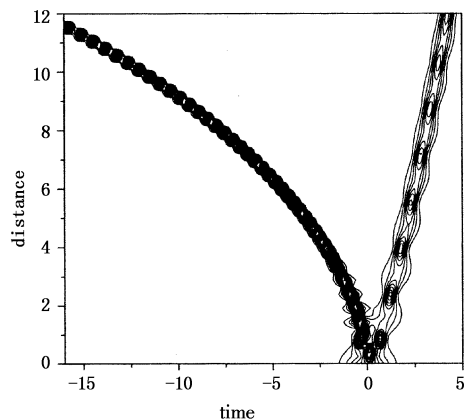
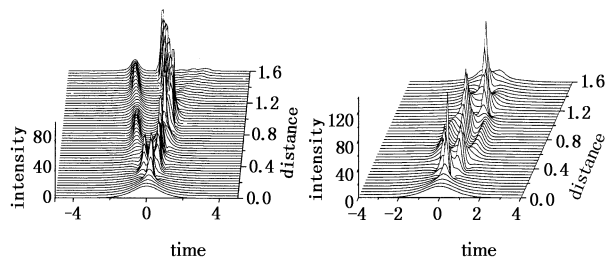


图4 三阶飞秒孤子演化了12个色散长度的等高线图

3.3 四阶孤子演化($N=4$)

图5为四阶飞秒孤子和四阶皮秒孤子传输了相同色散长度的演化图形。由图5(b)可以看出四阶皮秒孤子在演化过程中经历了脉冲分裂和合成,具有皮秒高阶孤子周期演化的特性。在高阶效应的作用下,四阶飞秒孤子的演化不再具有周期性。在演化的初始阶段,四阶飞秒孤子分裂成脉宽、峰值不同的两个脉冲。前面宽而弱的脉冲似乎呈周期性的演化,后面窄而强的脉冲完全没有周期性。为了更好地研究四阶飞秒孤子的演化规律,我们延长传输距离,发现四阶飞秒孤子分裂成两个脉冲时还伴随有能量的辐射,走在前面的脉冲的确具有周期性的演化特性,如图6所示。大量的数值模拟表明,随着高阶色散和高阶非线性效应的减弱,四阶孤子的演化越接近皮秒高阶孤子周期性的演化特性,这进一步说明,高阶效应的存在一定程度上破坏了高阶孤子演化的周期性。



(a) 四阶飞秒孤子演化图 (b) 四阶皮秒孤子演化图

图5 四阶飞秒孤子和四阶皮秒孤子的演化图

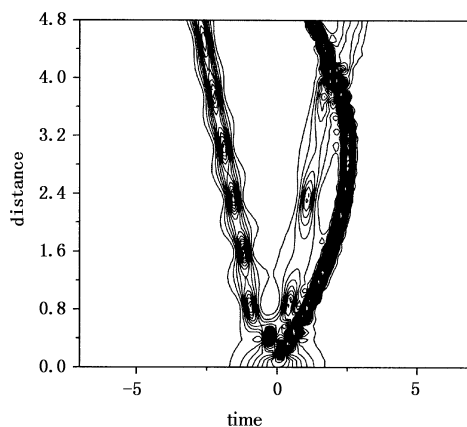


图6 四阶飞秒孤子传输了4.8个色散长度的演化图

4 结束语

本文以高阶非线性薛定谔方程为数学模型,采用对称分步傅里叶算法数值研究了在高阶色散和高阶非线性效应影响下飞秒高阶孤子在光纤中的演化特性,并与皮秒高阶孤子的演化特性进行了比较。结果发现二阶飞秒孤子的演化特性与二阶皮秒孤子的演化特性非常相似,都具有很好的周期性;而三阶和四阶飞秒孤子的演化特性与相应的皮秒孤子的演化特性有很大不同,高阶效应的存在不同程度上破坏了三阶和四阶孤子演化的周期性。

参考文献:

- [1] G P AGRAWAL. Nonlinear fiber optics [M]. New York: Academic Press, 1995.
- [2] Y KODAMA, A HASEGAWA. Nonlinear pulse propagation in a monomode dielectric guide [J]. IEEE J. Quantum Electronics, 1987, 23: 510 - 524.
- [3] 李仲豪, 徐新民, 周国生. 飞秒脉冲在光纤中的无畸变传输孤子解 [J]. 光子学报, 1997, 26(21): 513 - 516.
- [4] 田慧平, 李仲豪, 王钢, 等. 飞秒光脉冲间相互作用的数值研究 [J]. 光学学报, 2001, 21(5): 513 - 517.
- [5] Zhiyong Xu, Lu Li, Zhonghao Lia, et al. Soliton interaction under the influence of higher-order effects [J]. Optics Communications, 2002, 210: 375 - 384.
- [6] 王涛, 田慧平, 李仲豪, 等. 飞秒暗孤子间相互作用的数值研究 [J]. 光学学报, 2003, 23(6): 680 - 683.
- [7] 苗润才, 王飞, 曾祥梅. 二阶孤子间相互作用引起孤子衰变 [J]. 光子学报, 2004, 33(8): 927 - 930.
- [8] 方云团, 姜春明, 杨伟群. 三阶孤子传输和相互作用的数值研究 [J]. 激光与红外, 2004, 34(4): 302 - 304.
- [9] 苗润才, 王飞, 曾祥梅. 高阶非线性效应影响下二阶孤子的衰变 [J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2004, 32(4): 32 - 35.
- [10] 张妍, 李康, 孔凡敏. 脉冲内拉曼散射效应影响下高阶孤子之间的相互作用及其控制 [J]. 量子电子学报, 2005, 22(5): 784 - 788.