

文章编号: 1002-2082(2008)02-0317-04

# 二阶孤子的传输和相互作用

方云团, 范俊

(镇江船艇学院 基础实验中心, 江苏 镇江 212003)

**摘要:** 用分步傅里叶变换法求解二阶孤子传输的非线性薛定谔方程, 得到了在此条件下孤子传输的数值图形, 发现二阶孤子在传输中被压缩, 幅值振荡变化。2个二阶孤子在传输过程中没有出现象2个一阶孤子那样周期性碰撞, 但2个二阶孤子时间间隔较小时, 随传输距离在2个二阶孤子中间周期性地衍生出第3个孤子。研究证明: 二阶孤子的传输具有与一阶孤子明显不同的特征。

**关键词:** 二阶孤子; 非线性薛定谔方程; 分步傅里叶变换法

中图分类号: TN929.11

文献标志码: A

## Propagation and interaction of second-order solitons

FANG Yun-tuan, FAN Jun

(Center of Basic Experiment, Zhenjiang Watercraft College, Zhenjiang 212003, China)

**Abstract:** The propagation characteristics of second-order solitons were acquired by solving the nonlinear Schrodinger (NLS) equation with the method of step Fourier transform. The second-order solitons are compressed and their amplitude oscillates during the propagation. Periodic collision does not take place during propagation process of two second-order solitons. Two second-order solitons will periodically yield a smaller soliton when their time-interval is small enough. It is concluded that the propagation characteristics of second-order soliton are different from those of one-order soliton.

**Key words:** second-order soliton; NLS equation; method of step Fourier transform

## 引言

光纤孤子理论是当今非线性领域的首选论题之一。在光纤的反常色散区, 由于自相位调制效应与群速度色散相平衡, 使光脉冲演变为光孤子。光孤子在光纤中无形变地传输以及其绝热特性可实现全光通信的特性, 使它成为通信的最优信息载体, 近些年来一直是一个倍受关注的研究领域<sup>[1-7]</sup>。非线性薛定谔方程(NLS)是研究光孤子传输的动力学基础, 由该方程所规定的解具有双曲正割函数的形式, 但目前研究得较多的是一阶孤子, 由

标准NLS方程支配的一阶孤子在传输中其脉冲和光谱形状均保持不变。当注入能量较大的光脉冲时, 光脉冲将演变为高阶孤子。由于高阶孤子具有较强的非线性, 将具有与一阶孤子不同的特点。本文通过分步傅里叶变换法求解NLS方程, 研究二阶孤子在传输过程中的演化特征。

## 1 计算原理

不考虑高阶色散, 并假定光损耗可由周期放大器提供的增益抵消, 则光孤子的传输规律可由如下

收稿日期: 2007-03-21; 修回日期: 2007-05-07

作者简介: 方云团(1965—), 男, 安徽桐城人, 副教授, 主要从事光孤子通信和光子晶体的研究工作。

E-mail: fang\_yt1965@sina.com

归一化的非线性薛定谔方程描述<sup>[4]</sup>:

$$i \frac{\partial q}{\partial x} + \beta \frac{\partial^2 q}{\partial \tau^2} + \gamma |q|^2 q = 0 \quad (1)$$

式中:  $q=q(x, \tau)$ , 为光纤中孤子的归一化场包络函数;  $\gamma$  为光纤非线性系数;  $\beta$  为光纤二阶色散系数;  $x$  和  $\tau$  分别为归一化传输距离和传输时间。

令  $\beta = \frac{1}{2}, \gamma = 1$ , 方程(1)变为标准NLS方程。实践已证明, 分步傅里叶积分法是求解NLS方程有效的数值方法<sup>[4]</sup>。方程(1)可等效为

$$i \frac{1}{2} \frac{\partial q}{\partial x} = -\frac{1}{2} \frac{\partial^2 q}{\partial \tau^2} \quad (2)$$

$$i \frac{1}{2} \frac{\partial q}{\partial x} = -|q|^2 q \quad (3)$$

光脉冲在光纤中由  $x$  传输到  $x+h$  分2步计算。在前半部分  $[x, (x+h)/2]$  上先让(3)式起作用, 并忽略  $|q|^2$  在该区间的变化, 解得:

$$q[\tau, (x+h)/2] = \exp(i|q|^2 h) q(\tau, x) \quad (4)$$

对(4)式两边关于  $\tau$  求傅里叶变换, 得:

$$Q[\omega, (x+h)/2] = F[\exp(i|q|^2 h) q(\tau, x)] \quad (5)$$

再让(2)式在后半部分区间  $[(x+h)/2, x+h]$  上起作用, 并让  $q$  关于  $\tau$  求傅里叶变换, 经变换得:

$$Q(x+h) = \exp(-i\omega^2 h/2) Q[(x+h)/2] \quad (6)$$

把(5)式代入(6)式后再求傅里叶逆变换, 得:

$$q(\tau, x+h) = F^{-1}\{\exp(-i\omega^2 h/2) \cdot F[\exp(i|q|^2 h) q(\tau, x)]\} \quad (7)$$

上式即为分步傅里叶变换法求解方程(1)的数值演化的依据。

## 2 结果与分析

初始输入脉冲为二阶孤子  $q(\tau, 0) = 2\text{sech}(\tau)$ , 图1和图2表示传输归一化距离  $x$  为40的结果。与一阶孤子相比脉冲宽度受到近似周期性的压

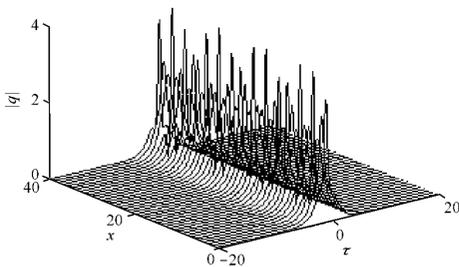


图1  $\beta = \frac{1}{2}$  时二阶孤子的传播图像

Fig. 1 Propagation of second-order solitons when  $\beta = \frac{1}{2}$

缩, 孤子为绝热传输状态(即孤子幅值与孤子脉宽乘积为一常数), 导致幅值发生振荡, 除在传输的最后阶段孤子脉座有轻微振荡外, 整个过程基本稳定。

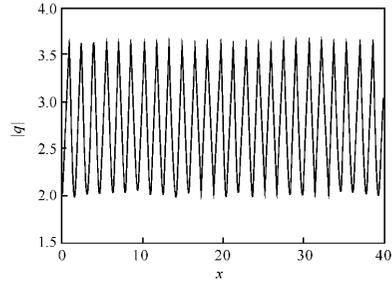


图2 二阶孤子幅值随传播距离呈周期性变化

Fig. 2 Variation of second-order soliton amplitude with propagation distance

由于在光孤子通信系统中传输的信息通常是大量的脉冲串, 这必然涉及到孤子间的相互作用, 而孤子间的相互作用直接影响到通信的质量和容量<sup>[4-6]</sup>。一阶孤子在传输中会发生相互作用导致周期性碰撞<sup>[4]</sup>。这里我们重点研究2个二阶孤子在传输中的相互作用和演化特征。输入初始脉冲  $q(\tau, 0) = 2\text{sech}(\tau+5) + 2\text{sech}(\tau-5)$ , 2个二阶孤子之间归一化时间距离为10, 在二阶色散系数  $\beta = 1/2$  时, 我们仍用分步傅里叶变换法求解方程(1), 得到图3的计算结果。可以看出, 除了2个脉冲内侧边缘有很小的次波扰动外, 2个二阶孤子的主峰有逐渐分离的趋势, 这与2个一阶孤子出现的周期

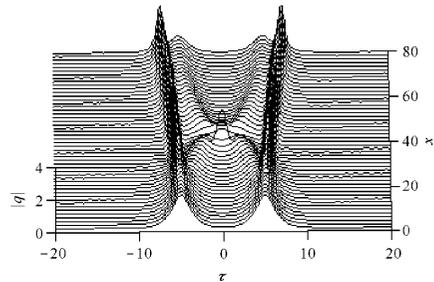


图3 2个二阶孤子的传播(初始时间间隔为10)图像

Fig. 3 Propagation of two second-order solitons as initial time-interval is 10

性碰撞完全不同<sup>[4]</sup>。从这一点上说, 通信中使用二阶孤子比一阶孤子具有更大的优越性, 因为如果孤子发生碰撞, 会导致串码。但是, 值得注意的是, 在传输距离40的位置于2个主峰之间出现了一个较大的子峰, 我们称它为衍生孤子。衍生孤子与

个一阶孤子碰撞时聚合成一个孤子的情况完全不同。为了更清楚地观察衍生孤子的形状,图4给出了在传输距离为40的位置的传输波形,中间衍生孤子的形状非常明显。下面我们缩短2个二阶孤子之间归一化时间距离使之变为6,即输入初始脉冲变

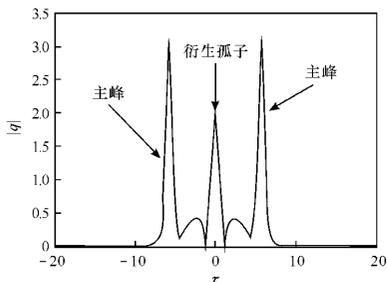


图4 2个二阶孤子在传输距离为40处的波形

Fig. 4 Wave form of two second-order solitons at propagation distance of 40

为 $q(\tau, 0) = 2\text{sech}(\tau+3) + 2\text{sech}(\tau-3)$ ,得到图5所示结果。与图3比较知,产生衍生孤子需要的传输距离变得更短,在传输距离40以内产生了3个衍生孤子;与图1比较,二阶孤子的脉宽压缩程度减小,且幅值的变化相对变慢。图6给出在特定时刻 $\tau=0$ 时衍生孤子振幅随传输距离的变化,它说明衍生孤子在传输过程中明显具有周期性产生和湮灭的特征。以上说明,由于二阶孤子的能量大于一阶孤子的能量,稳定性较差,在外界影响(例如碰撞)下容易分裂,产生新的孤子,类似于重原子

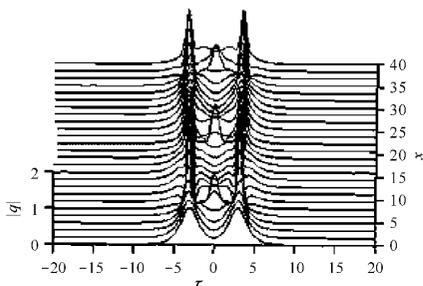


图5 2个二阶孤子的传播(初始时间间隔为6)

Fig. 5 Propagation of two second-order solitons as initial time-interval is 6

核碰撞产生的裂变,而衍生出的孤子释放二阶孤子的部分能量,从而使孤子的传输变得稳定。但是,在通常情况下衍生出的孤子对通信是有害的,因为在接收端检测信号时容易产生误码。根据上面的研究,二阶孤子之间间隔越长,产生衍生孤子需要的传输距离也变得越长。因此,在利用二阶孤子

进行通信时,一定要控制好发射孤子信号的时间间隔,才能不产生误码。

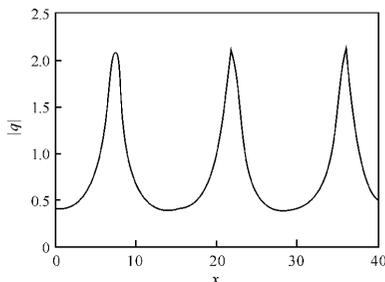


图6  $\tau=0$ 时衍生孤子振幅随传输距离的变化

Fig. 6 Variation of amplitude of ramification soliton with propagation distance when  $\tau=0$

### 3 结束语

研究表明:一般情况下,二阶孤子的传播表现出与一阶孤子明显不同的特性,特别是2个二阶孤子不会发生相互碰撞,它们在传输中还会衍生出第3个孤子。此研究为未来光孤子通信系统的设计提供了有益的参考。

#### 参考文献:

- [1] 陈陆君, 梁昌洪. 孤立子理论及其应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1997:84.  
CHEN Lu-jun, LIANG Chang-hong. The theory and application of soliton [M]. Xi'an: Xidian University Press, 1997:84. (in Chinese)
- [2] 殷德京. 三阶色散效应下的二阶光孤子裂变分析与控制[J]. 光电子·激光, 2001,12(12):1305-1309.  
YIN De-jing. Analysis and control of second-order optical soliton split with third-order dispersion [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2001, 12(12): 1305-1309. (in Chinese)
- [3] 谢小平, 赵尚弘, 王贤华, 等. 光纤中飞秒光孤子脉冲传输的高阶因素分析[J]. 光子学报, 2002,31(4): 429-431.  
XIE Xiao-ping, ZHAO Shang-hong, WANG Xian-hua, et al. The high-order factor analysis of femtosecond soliton pulse propagation in fiber [J]. Acta Photonica Sinica, 2002, 31(4): 429-431. (in Chinese)
- [4] 方云团, 沈廷根, 谭锡林. 三光子吸收效应对孤子对传输的影响[J]. 光电子·激光, 2003,14(9):996-998.  
FANG Yun-tuan, SHEN Ting-gen, TAN Xi-lin. The effect of three-photon absorption on the couple

of solitons in propagation [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2003,14(9):996-998. (in Chinese)

- [5] GEORGES T. Amplifier noise jitter of two interacting solitons[J]. Optics Communications, 1991(85):195.
- [6] YU T, GOLOVCHENKO E A, PILIPETSKII A N, et al. Dispersion managed soliton interactions in optical fibers[J]. Optics Letters, 1997,22(11):793-

795.

- [7] 王志斌,李志全,闫利娟. 偏振模色散影响下飞秒孤子的传输特性研究[J]. 应用光学, 2006,27(6):571-575.
- WANG Zhi-bin, LI Zhi-quan, YAN Li-juan. Transmission properties of femtosecond soliton under the influence of polarization mode dispersion [J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(6): 571-575. (in Chinese)



## 《光机系统设计》(原书第3版)

(美)Paul R. Yoder, Jr 著  
周海宪 程云芳 译

机械工业出版社2008年1月出版,定价98.00元

内容简介:共分4个部分15章:第一部分是阐述光机系统总的设计概念,包括第一章的光机设计过程,第二章的环境影响和第三章材料的光机特性;第二部分是透射式光机系统的设计,包括第四章单透镜的安装和固定,第五章多透镜的安装,第六章光窗和滤光片的安装和第七章棱镜的安装设计;第三部分是反射式光机系统的设计,包括第八章小型非金属反射镜、光栅和胶片的设计与安装,第九章轻质非金属反射镜的设计,第十章光轴水平放置的大口径反射镜的安装,第十一章光轴垂直放置的大口径反射镜的安装,第十二章大孔径变方位反射镜的安装技术和第十三章金属反射镜的设计和安装;第四部分是光机系统的整体分析,包括第十四章光学仪器的结构设计和第十五章光机系统设计分析。该书提供的材料和例子能够对军事、航空航天和民用光学仪器应用中的设计概念、具体设计、开发、评价和使用提供有用的指导。

读者对象:本书可供光电子领域中从事光学仪器设计、光学设计和光机结构设计的研发设计师、光机制造工艺研究的工程师、光机材料工程师阅读,也可以作为大专院校相关专业本科生、研究生和教师的参考书。