

文章编号: 1001-3806(2003)06 0577-03

一阶孤子和高斯准孤子在传输中相互作用的研究

方云团¹ 沈廷根^{2,3} 谭锡林²

(¹镇江船舶学院物理系, 镇江, 212003)

(²南京师范大学江苏省光电中心实验室, 南京, 210097)

(³江苏大学物理系, 镇江, 212003)

摘要: 用分步傅里叶变换法求解光孤子 NLS 方程, 研究了一阶孤子和高斯准孤子在传输中相互作用和演化规律, 发现一阶孤子和高斯准孤子相互作用的结果不仅与脉冲的种类有关, 且与它们在传输中的排列方式有关. 当以两个一阶孤子(左右)和一个高斯准孤子(中)的方式混合输入时, 3 个脉冲发生一次碰撞后便逐渐分离, 从而可克服脉冲间的相互干扰.

关键词: 一阶孤子; 高斯准孤子; NLS 方程; 相互作用

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

Study of the interaction of solitons and Gaussian quasi-solitons in propagation

Fang Yuntuan¹, Shen Tinggen^{2,3}, Tan Xilin²

(¹ Department of Physics, Zhenjiang Watercraft College, Zhenjiang, 212003)

(² Photoelectricity Central Laboratory of Jiangsu Province, Nanjing Normal University, Nanjing, 210097)

(³ Department of Physics, Jiangsu University, Zhenjiang, 212003)

Abstract: The interaction of solitons and Gaussian quasi-solitons in propagation is studied by solving the NLS equation. The results of the propagation depend on not only the types of soliton but also the transmitting ways. In a special way of propagation the problem of signal interaction can be solved.

Key words: soliton; Gaussian quasi-soliton; NLS equation; interaction

引言

在光孤子传输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^[1], 在光纤系统的设计中这是一个必须考虑的重要问题。近年来, 光孤子通信由于高速率、大容量等诸多优点, 引起了人们的高度重视。随着传输速率的提高, 对孤子间的相互作用的控制显得越来越重要。陈陆君等人研究了光孤子系列的相互作用, 发现用准二阶孤子和一阶孤子代替两个一阶孤子传输可明显减小它们间的相互作用, 从而有利于光孤子系列的传输^[2]。另外, Chu 等人提出了一种特殊的高斯脉冲^[3], 它的演化接近于一阶孤子, 称之为高斯准孤子。若把多个高斯准孤子或高斯准孤子和一阶孤子混合注入光纤, 它们间的相互作用和演化结果如何, 这就是本文

中要研究的问题。

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归一化的标准非线性薛定谔方程描述:

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

$q = q(x, \tau)$ 为光纤中归一化孤子的场包络函数, x 和 τ 分别是归一化时间和传输距离, 它们均是无量纲的物理量。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^[4]。利用该方法, (1) 式可等效为: $i \frac{1}{2} \frac{\partial q}{\partial x} = - \frac{1}{2} \frac{\partial^2 q}{\partial \tau^2}$ (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 $x + h$ 分两步计算。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, 解得:

作者简介: 方云团, 男, 1965 年 7 月出生。副教授, 硕士研究生。目前从事光通信的基础研究。

收稿日期: 2003-01-09; 收到修改稿日期: 2003-04-16

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

对(4)式两边关于 τ 求傅里叶变换得:

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

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 τ 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)式后求傅里叶逆变换得:

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

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。分析上述推导过程可知, 数值计算的误差应是在导出非线性的(4)式时, 忽略了 $|q|^2$ 随 x 的变化。因此, 在具体程序设计时, 每迭代一大步(以一个 h 计)实质是分成两次进行并通过误差比较来取舍的。首先缓冲保存相对的初始数据, 连续迭代两小步(以一个 $h/2$ 为一小步)并缓冲非线性部分的结果, 其次再由初始数据直接迭代一大步, 缓冲非线性部分的结果及整体结果, 比较2次算得的非线性部分的结果, 误差小(取 10^{-4}), 则继续; 误差大, 废除这一大步的结果, 缩小区间 h 从头再来。计算中, 一阶孤子的初始注入脉冲为双曲正割函数 $q(\tau, 0) = \operatorname{sech}(\tau)$, 而与此脉冲的能量和脉宽相等的高斯准孤子的初始注入脉冲形式为 $q(\tau, 0) = 1.032 \exp[-(\tau/1.497)^2]$ 。^[3]

2 结果与分析

对一阶孤子和高斯准孤子采取多种形式的注入方式, 观察它们在传输中的演化行为。以下是所得计算结果。

(1) 两孤子输入情况

图1中分别给出两个一阶孤子, 两个高斯准孤子以及一个一阶孤子和一个高斯准孤子的传输结果。在所有的图形中, τ 轴、 x 轴和 $|q|$ 轴分别表示归一化的时间、传输距离和幅值。为了比较, 初始注入时它们之间归一化时间均相隔为6。三者共同之处是由于孤子间的相互作用, 在传输过程中出现周期性的离合, 会合之处出现幅值较大的单峰。在整个传输过程中每个孤子在分离后的幅度没有变化, 孤子对相互作用的距离或时间较短, 相互作用后能量不变, 类似于粒子之间的弹性碰撞而作周期性的相互振动。不同之处是高斯准孤子离合周期明显小于一阶孤子, 从这一点上讲, 它将不利于孤子通信系统的设计, 因为为了避免串码, 总是希望孤子间无相互作用或相互作用的周期较长。一阶孤子和高斯准

孤子的离合周期基本与两个一阶孤子的情况相同, 但有趣的是两脉冲叠加后产生的单峰逐渐向左偏移, 若把它们看作两个粒子, 则高斯准孤子的能量要大于一阶孤子的能量。

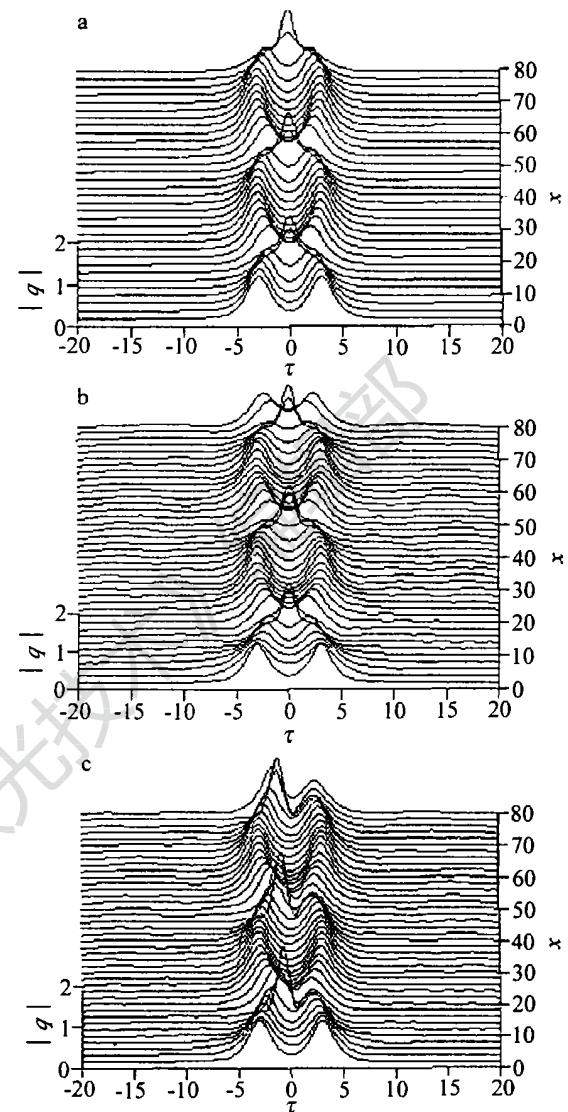


Fig. 1 The figures of two solitons in propagation

a—two solitons in propagation b—two Gaussian quasi solitons in propagation c—a soliton and a Gaussian quasi soliton in propagation

(2) 3个一阶孤子和3个高斯准孤子输入情况

图2中分别给出3个一阶孤子, 3个高斯准孤子的传输结果。同样初始注入时它们之间归一化时间均相隔为6。可以看出, 三孤子相互作用时, 外侧两孤子相互靠近, 幅值逐渐变大; 中心孤子的幅值逐渐变小, 但位置不变。达到最大作用后, 又开始相反的过程, 最后恢复原状完成一个周期。在此种条件下三孤子均未能叠加成一个单峰。图2a中在孤子相互作用时外侧两孤子比图2b靠得更近, 表明3个一阶孤子的作用比3个高斯准孤子的强度大, 对通信系统的设计来说, 应该希望孤子间的作用越小越

好, 从而说明高斯准孤子的混合传输比一阶孤子的混合传输具有较强的抗干扰性。

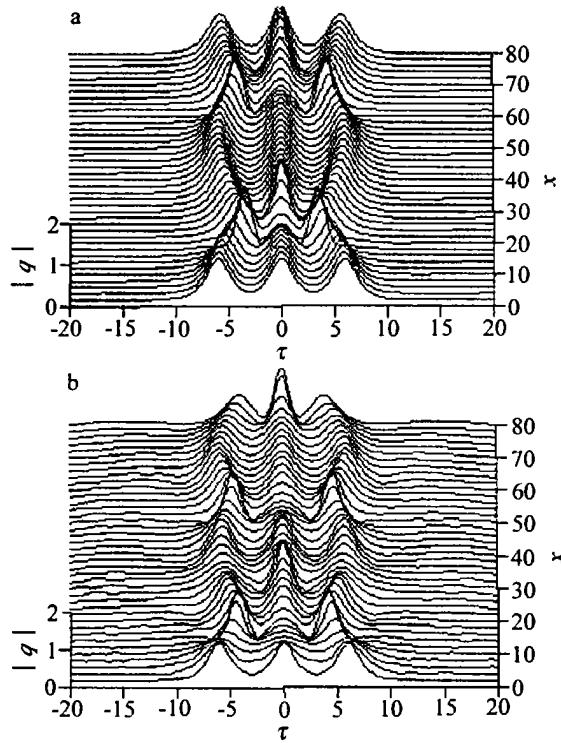


Fig. 2 The figures of three solitons in propagation

a—three solitons in propagation b—three Gaussian quasi-solitons in propagation

(3) 两个一阶孤子(左右)和1个高斯准孤子(中)混合输入

同样初始注入时它们之间归一化时间均相隔为 6。此种情况与图 2 明显不同, 首先在传输的归一化距离达到 20 后, 外侧两个一阶孤子迅速向中间高斯准孤子靠近, 并分别与高斯准孤子叠加, 脉冲波峰由 3 个变成两个; 此后, 这两个波峰进一步会合, 变成一个幅值更大的波峰。然后波峰的演变朝相反的方向变化, 直至恢复为 3 个脉冲, 但经过这样的一次作用后, 除中间高斯准孤子的传播方向没有发生变化外, 两侧的一阶孤子逐渐分离, 3 个孤子的间距随传输距离的增大而增大(见图 3), 且幅值和脉宽均没有发生明显的变化。从粒子的角度来看, 这进一步说明高斯准孤子能量较大, 受一阶孤子的影响较小, 碰撞后排斥力大于吸引力, 分离后便不再会合。在这种情况下 3 个脉冲经过一次会合后, 便各自独立传播, 这对通信系统的设计具有重要意义, 因为它可以有效地克服通信中串码问题。

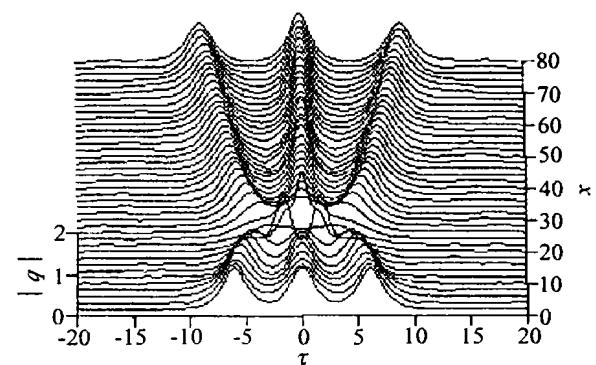


Fig. 3 A Gaussian quasi soliton with two solitons on its side in propagation

(4) 2 个高斯准孤子(左右)和1个一阶孤子(中)混合输入

图 4 与图 3 比较有明显不同, 没有图 3 那样有三峰变二峰再变一峰的过程, 孤子间仍然有周期性的相互作用。在相互作用的过程中, 两侧波峰变大, 中间孤子的波峰明显减小。这可以解释为由于一阶孤子的能量较小, 受高斯准孤子的影响较大。

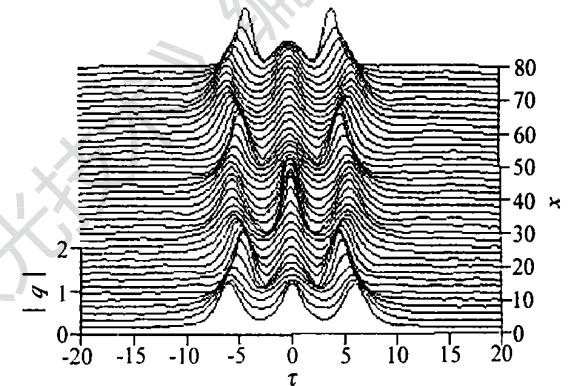


Fig. 4 A soliton with two Gaussian quasi-solitons on its side in propagation

总之, 通过上面的计算说明, 高斯准孤子和一阶孤子在传输中相互作用的结果不仅与孤子的种类有关, 而且与孤子的注入方式有很大关系。特别是当以特定的方式注入高斯准孤子和一阶孤子时, 可以解决通信中的串码问题。本文中的研究结果为孤子通信系统的设计提供了直观、清晰的理论依据。

参 考 文 献

- [1] Georges T. Opt Commun, 1991, 85: 195.
- [2] 陈陆君, 梁昌洪. 孤立子理论及其应用. 西安: 西安电子科学出版社, 1997: 199.
- [3] Chu P L, Desen C. Electro Lett, 1983, 19: 956.
- [4] 陈陆君, 梁昌洪. 孤立子理论及其应用. 西安: 西安电子科学出版社, 1997: 84.