

高阶孤子在光纤中传输的数值研究

王志斌, 李志全, 刘洋

(燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要:通过数值求解非线性薛定谔方程, 得到了二阶和三阶孤子的传输特性, 并和一阶孤子做了比较. 对于二阶孤子和三阶孤子间的相互作用做了分析, 讨论了三阶色散对高阶孤子相互作用的影响, 得出随着三阶色散的增大, 会使孤子的衰变具有新的特性, 将会导致光孤子通信的误码率加大.

关键词:光纤通信; 高阶孤子; 相互作用; 三阶色散; 数值模拟

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2007)09-1641-4

0 引言

随着对光纤通信在传输速率和容量方面提出越来越高的要求, 光孤子通信已经成为各国科学家研究的一个重要课题^[1-5].

描述光孤子传输演化的方程是非线性薛定谔方程, 由于它是一个高阶非线性偏微分方程, 要想求得解析解并不是一件容易的事. 但是随着计算机技术和相关应用软件的发展, 用数值方法模拟光孤子的传输演化变得十分简单. 常用的数值方法有微扰法, 差分方法、分步傅里叶法等, 其中分步傅里叶法原理简单, 易于编程, 为许多学者所采用^[6-9].

本文详细介绍了分步傅里叶法的原理和程序设计步骤, 并用界面友好的 matlab 语言编程环境进行了相关问题的数值模拟. 发现随着三阶色散的增大, 将会导致光孤子通信中误码率增大.

1 分步傅里叶法

光孤子在光纤中传播时, 可用非线性薛定谔方程进行描述^[10]

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{\alpha}{2}A + \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} = i\gamma|A|^2A \quad (1)$$

式中 $A(z, T)$ 为光场的复振幅; i 为虚数单位; $T = t - \beta_1 z$ 为时间参量; $\beta_1 = 1/v_g$, v_g 为群速度; β_2, β_3 分别为二阶和三阶色散系数; γ 为非线性系数; α 为光纤损耗.

设 $U = A(z, T) / \sqrt{P_0}$, 其中 P_0 为入射脉冲的峰值功率. 方程(1)可变为

$$\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\alpha}{2}U + \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 U}{\partial T^2} - \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3 U}{\partial T^3} = i\gamma P_0 |U|^2 U \quad (2)$$

分步傅里叶法求方程(2)的数值解就是将光脉冲在光纤中的传播一段距离时, 分两步进行计算, 也就

是让色散和非线性各自独立起作用. 在传播距离很小时, 这种分析具有足够高的精度. 则方程(2)变为

$$\frac{\partial U}{\partial z} = (\hat{D} + \hat{N})U \quad (3)$$

式中 \hat{D} 和 \hat{N} 为差分算符, 前者表示色散项和吸收项, 后者表示非线性项. 当仅有非线性项和仅有色散项起作用时, 可以很方便的求出

$$U_1(z, T) = U(0, T) \exp [i\gamma P_0 |U(0, T)|^2 z] \quad (4)$$

$$U(z, T) = \text{IFFT} \left\{ \left[\left(\frac{i}{2}\beta_2 \omega^2 - \frac{i}{6}\beta_3 \omega^3 - \frac{\alpha}{2} \right) z \right] \cdot \text{FFT}[U_1(z, T)] \right\} \quad (5)$$

式中, ω 为傅里叶域频率.

Matlab 语言中, 有专门的语句进行傅里叶变换和反变换, 分别是 `fft()` 和 `ifft()` 函数. 当自变量是一个向量时, 需要把零频分量移至频谱的中心, 这时需要重新排列 `fft()` 和 `ifft()` 的输出. 所以在编程时要注意使用 `fftshift` 和 `ifftshift` 函数进行傅里叶变换和反变换.

2 高阶孤子传输的数值模拟

光孤子的色散长度和非线性长度分别为 $L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|}$, $L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0}$, T_0 为初始脉冲半宽度. $z_0 = \frac{\pi}{2} L_D$, $N^2 = \frac{L_D}{L_{NL}} = \frac{\gamma P_0 T_0^2}{|\beta_2|}$, N 为孤子阶数. 在数值模拟中取 $T_0 = 20 \text{ ps}$, $\lambda = 1.55 \text{ }\mu\text{m}$, $\beta_2 = -20 \text{ ps}^2/\text{km}$, $\gamma = 2.43 \text{ (1/kmW)}$. 由于孤子传输能量的损耗可以由掺铒光纤放大器(EDFA)进行周期性补充, 在数值模拟中未考虑损耗项, 即令 $\alpha = 0$.

2.1 高阶孤子和一阶孤子在光纤中的传输演化比较

取入纤脉冲为 $U(0, t) = \text{sec } h(t)$, $t = T/T_0$, 选择合适的 P_0 , 使孤子满足阶数 $N = (\gamma P_0 T_0^2 / |\beta_2|)^{1/2}$. 在数值模拟中, 取 $\beta_3 = 0.1 \text{ ps}^3/\text{km}$. 由图 1、图 2、图 3 可以看出, 一阶孤子在传输了 4 个孤子周期后, 其

幅度和形状几乎没有改变,二阶孤子的幅值以 z_0 为周期进行周期性涨落,并且在两侧激起色散波. 三阶孤子在传输了不到一个周期就很快分裂,除两个大的孤子序列外,在中间激起第三列小孤波. 并且在初始阶段色散波能量比较集中,随着传输距离的增加,其能量变得愈加弥散.

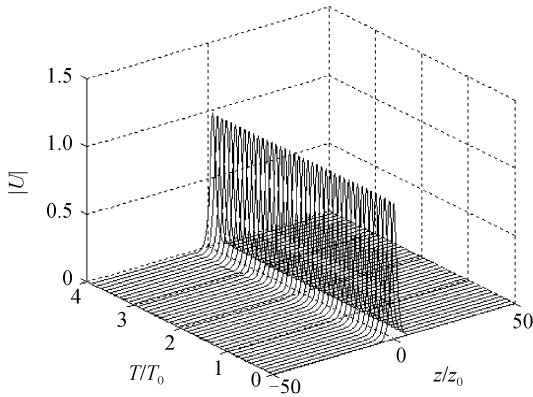


图1 一阶孤子的传输
Fig.1 One-order soliton transmission

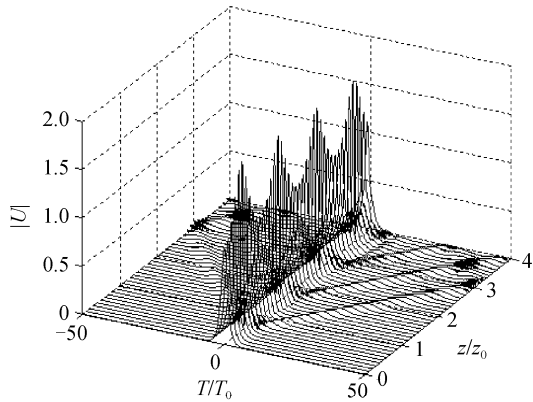


图2 二阶孤子的传输
Fig.2 Second-order soliton transmission

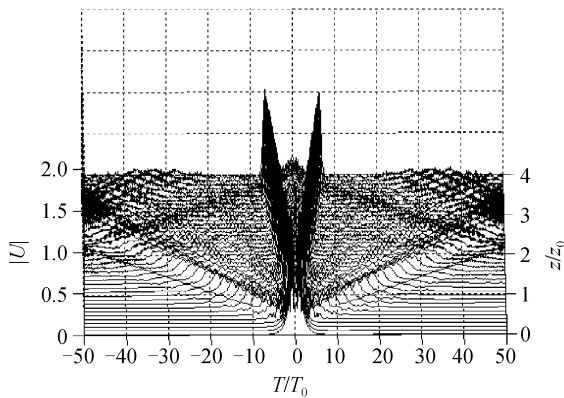


图3 三阶孤子的传输
Fig.3 Third-order soliton transmission

2.2 高阶孤子间的相互作用

二阶孤子间相互作用如图4, $U(0,t) = \text{sech}(t-1.5) + \text{sech}(t+1.5)$, 取 $\beta_3 = 0.1 \text{ ps}^3/\text{km}$. 可以看到两个二阶孤子传输了不到半个周期,各自开始压缩,并在中间激起第三列孤波. 由于强烈的相互吸引,约

在2个周期处压缩为一个孤子,在这里能量有一个较大峰值. 在大约2.5个周期时,重新分裂为三个孤子,其中中间孤子能量要比两边对称的两个孤子能量大. 中间孤子能量同二阶孤子一样,能量也表现为周期性的涨落. 随着传输距离的增加,其能量有减小的趋势,这是因为色散波消耗了一部分能量的原因,如图5. 图6是两个三阶孤子的传输演化图. 从图中可以看到,三阶孤子间的相互作用较二阶孤子更为强烈,除了在中间激起一系列能量较大的孤子波外,在

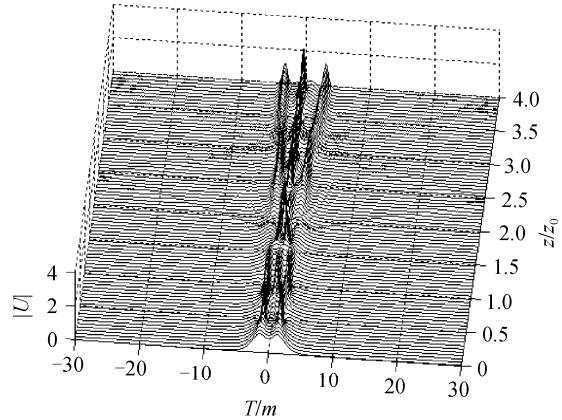


图4 $\beta_3 = 0.1$ 时,二阶孤子对的相互作用
Fig.4 The interaction of second-order soliton pairs when $\beta_3 = 0.1$

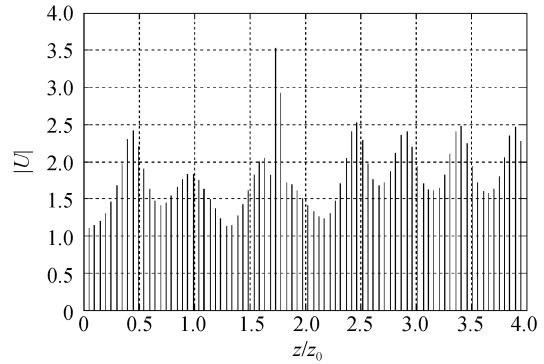


图5 分裂后,中间孤子传输平面图
Fig.5 The soliton in the middle transmission plan after split

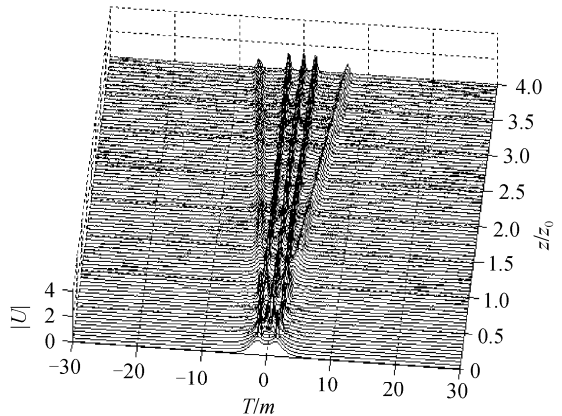


图6 $\beta_3 = 0.1$ 时,三阶孤子对的相互作用
Fig.6 The interaction of third-order soliton pairs when $\beta_3 = 0.1$

两侧还对称存在两个能量较小的孤波. 可见,随着孤子阶数的增加,其相互作用程度也相应增加,如不加以控制,将会使光孤子通信的误码率加大.

2.3 三阶色散对高阶孤子相互作用的影响

图 7 是 $\beta_3=0.6 \text{ ps}^3/\text{km}$ 时,二阶孤子相互作用的传输演化图. 从图中可以看出在 2 个孤子周期之前,两个孤子的传输和 $\beta_3=0.1 \text{ ps}^3/\text{km}$ 是基本相同的,但是随后分裂成的三个大的孤波已经不具有 $\beta_3=0.1 \text{ ps}^3/\text{km}$ 时的对称特性,其中间孤子和左边孤子表现为相互吸引,和右边的孤子表现为相互排斥,并且在中间和右边孤波之间产生了第四列孤波. 这说明对于高阶孤子来讲,高阶色散的增大会使孤子分裂更为严重,并且相互吸引的两列分裂波会迅速叠加在一起,给通信带来不利影响. 中间大孤子传输的平面图如图 8,和图 5 已经有了明显区别, 2.5 个周期后,孤子幅值已经不具有典型的周期性.

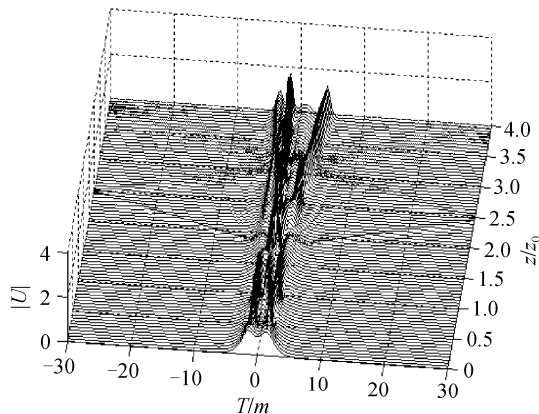


图 7 $\beta_3=0.6$ 时,二阶孤子对相互作用
Fig. 7 The interaction of second-order soliton pairs when $\beta_3=0.6$

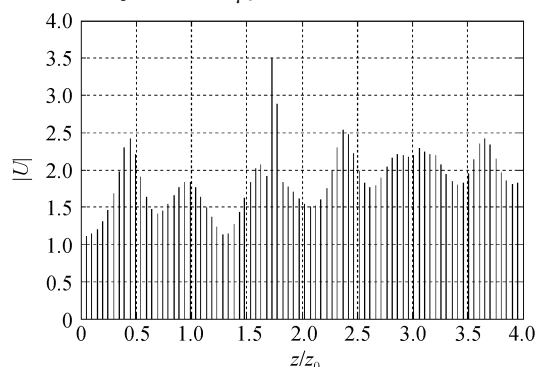


图 8 分裂后,中间大孤子传输平面图
Fig. 8 The big soliton in the middle transmission plan after split

从图 9 可以看出 $\beta_3=0.6 \text{ ps}^3/\text{km}$ 时,两列三阶孤子的相互作用更加明显,分裂出的相邻孤子之间只要是距离足够近都会发生重叠. 可见,随着孤子阶数的增加,其相互作用也就越复杂.

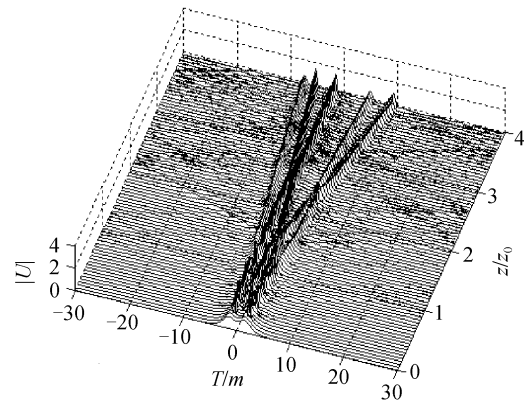


图 9 $\beta_3=0.6$ 时,三阶孤子对相互作用
Fig. 9 The interaction of third-order soliton pairs when $\beta_3=0.6$

3 结论

详细介绍了分步傅里叶法对非线性薛定谔方程的数值模拟. 指出高阶孤子在光纤中的传输和一阶孤子相比更加复杂,通过数值模拟,得到了二阶和三阶孤子的传输特性,并和一阶孤子做了比较. 对于二阶孤子和三阶孤子间的相互作用做了分析,并讨论了三阶色散对高阶孤子相互作用的影响. 随着三阶色散的增大,会使孤子的衰变具有新的特性,将会导致光孤子通信的误码率加大.

参考文献

- [1] MIAO Run-cai, WANG Fei, ZENG Xiang-mei. Soliton decay induced by interaction between two neighboring second-order solitons[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8): 927-930. 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.
- [2] ZHANG Shu-min, LÜ Fu-yun, DONG Fa-jie, *et al.* Enhanced compression of higher order femtosecond soliton in fibers with slowly decreasing dispersion[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(11): 1360-1363. 张书敏, 吕福云, 董法杰, 等. 色散缓变光纤中飞秒高阶孤子脉冲的增强压缩[J]. *光子学报*, 2004, **33**(11): 1360-1363.
- [3] MARCUSE D. Simulation of single-channel optical systems at 100CB/s[J]. *Journal of Lightwave Technoloty*, 1999, **17**(4): 564-569.
- [4] ZHANG Shu-min, XU Wen-cheng, LUO Ai-ping, *et al.* An improved method to compress femtosecond optical solitons in fibers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(3): 280-283. 张书敏, 徐文成, 罗爱平, 等. 光纤中飞秒基孤子压缩的一种改进性方法[J]. *光子学报*, 2001, **30**(3): 280-283.
- [5] NAKAZAWA M, SUZUKI K, YAMADA E, *et al.* Straight-line soliton data transmissions over 2000km at 20Gbit/s and 1000km at 40 Gbit/s using erbiumdoped fibre amplifiers[J]. *Electron Lett*, 1993, **29**(16): 1474-1476.
- [6] COSTA J R, PAIVA C R, AFONSO M, Barbosa modified split-step fourier method for the numerical simulation of solution

- amplification in erbium-doped fibers with forward-propagation noise[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2001, **37**(1): 145-152.
- [7] 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.
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.
- [8] WANG Tao, HUANG Tian-lu. Numerical research of interaction between femtosecond solitons in optical fibers[J]. *Journal of Xi'an Comjunication Institute*, 2005, **4**(2): 16-18.
王涛, 黄天禄. 光纤中飞秒光孤子间相互作用的数值研究[J]. *西安通信学院学报*, 2005, **4**(2): 16-18.
- [9] 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.
殷德京. 三阶色散效应下的二阶光孤子的裂变分析与控制[J]. *光电子 • 激光*, 2001, **12**(12): 1305-1309.
- [10] AGRAWAL D P. *Nonlinear fiber optics* [M]. Boston: Academic Press, 1989.

Numerically Study on the High Order Solitons Propagation in Optical Fibers

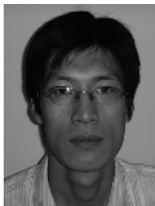
WANG Zhi-bin, LI Zhi-quan, LIU Yang

(College of Electrical Engineering, Yanshan University, Hebei Qinhuangdao 066004, China)

Received date: 2006-04-20

Abstract: Compared with the one-order soliton, the high order solitons propagation in the optical fiber is more complex, via numerical solution of the nonlinear Schrödinger equation (NLSE), the characters of the second-order and the third-order solitons are obtained, and they are also compared with the one order soliton. The interactions of the second-order and the third-order solitons are analyzed, and the influence of third-order dispersion to high order solitons is discussed, the conclusions are showed that if the third-order dispersion increased, it will result in new character of the solitons decay, it finally induced higher code error rate.

Key words: Optical fiber communication; High order solitons; Interactions; Third order dispersion; Numerical simulation



WANG Zhi-bin was born in 1977. He received his Master Degree from Yanshan University in 2002. He is a lecturer of College of Electrical Engineering, Yanshan University, and now he is studying for his Ph. D. His current research interests include optical fiber communications and optical sensor.