文章编号：0258-7025(2002)Supplement-0076-03

饱和非线性 LSSM 光纤中的各阶孤子及其相互作用

张俊萍　杨性愉

（内蒙古大学理工学院物理学系，呼和浩特 010021）

提要　利用了快速傅里叶方法，研究了不同于克尔光纤的饱和非线性 LSSM 光纤中的各阶孤子幅值范围，并研究了一阶孤子序列的相互作用，得出一些有意义的结论。

关键词　饱和非线性，快速傅里叶，孤子相互作用

中图分类号　O437　　**文献标识码**　A

Solitons and Their Interaction in Nonlinearity-Saturation LSSM Optical Fibers and Their Interaction

ZHANG Jun-ping　YANG Xing-yu

(*Physics Department*, *Inner Mongolia University*, *Hohhot* 010021)

Abstract　According to Fast-Fourier-Transformation method, the amplitude regions for each order soliton are numerically investigated in nonlinearity-saturation LSSM optical fibers different from Kerr fibers. Interaction properties of the first order solitons are analyzed.

Key words　saturation nonlinearity, Fast-Fourier-Transformation method, interaction of soliton

1　引　言

非线性介质中脉冲光束传输的规律一直是一个颇受关注的问题。饱和非线性 LSSM 对于研究孤子的双稳态有重要的意义[1~6]。由于饱和非线性，使得标准 NLS 孤子的阶的定义不再适用，需要重新进行定义。对饱和非线性 LSSM 薛定谔方程的高阶孤子解及相互作用作解析分析是不可能的，因此只能借助数值方法。本文利用了快速傅里叶方法，研究了 LSSM 非线性饱和光纤中的各阶孤子存在的幅值范围，并分析研究了一阶孤子的相互作用。

2　孤子的幅值范围

克尔非线性是光纤折射率非线性响应的理想描述，它仅适用于光束强度不太大的情况。但现实中，在非常高的功率水平下，非线性响应开始饱和，所以支配孤波的一般形式应是[1,3]

$$i\frac{\partial E}{\partial \xi} + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 E}{\partial \tau^2} + f(I)E = 0$$

$$\xi = \frac{|\beta_2| z}{T_0^2} = \frac{z}{L_D},\ \tau = \frac{T}{T_0} = \frac{t - z/V_g}{T_0} \tag{1}$$

式中 E 为脉冲包络的归一化振幅，ξ 为归一化距离，τ 是归一化时间，β_2 为光纤的群速度色散系数，V_g 为脉冲包络的群速度，T_0 为入射脉冲的半宽度（$1/e$ 功率处），z 是传输距离，T 是随脉冲以群速度 V_g 移动的参考系中的时间量度，ξ, τ, E 均为无量纲量。这里 $f(I)$ 是与光强 $I = |E|^2$ 有关的任意函数且 $f(0) = 0$。与光强有关的折射率 $n = n_0 + n_2 f(I)$。文献[7~9] 研究了几种不同饱和非线性光纤中的孤子，而我们所依据的数学模型是 LSSM 非线性薛定谔方程

$$i\frac{\partial E}{\partial \xi} + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 E}{\partial \tau^2} + f(I)E = 0 \tag{2}$$

其中

$$f(I) = \begin{cases} \alpha I & I < I_0 \quad (3a) \\ \Delta\left[1 - (1-\mu)\dfrac{I_0^2}{I^2}\right] & I > I_0 \quad (3b) \end{cases}$$

不失一般性，我们取 $\alpha = 0.2, \mu = 0.2, \Delta = 1, I_0 = 1$。模拟中的数值初值设为

$$E(0, \tau) = N\mathrm{sech}(\tau) \tag{4}$$

由于 $f(I)$ 中包含有饱和项 (3b)，使非线性项受到很大程度的削弱。因此，对于标准的 NLS 方程

$$i\frac{\partial E}{\partial \xi}+\frac{1}{2}\frac{\partial^2 E}{\partial \tau^2}+|E|^2E=0$$

当 $N=1$ 时，即可使非线性平衡色散，使波形保持不变。但式(3)中的非线性相对弱得多，于是使非线性与色散平衡的 N 值必定是大于1的某一数值，这个数值就是一阶孤子的定义值。通过扫描搜索，发现一阶孤子的定义值大约在1.5左右，即当 $N=1.5$ 时，趋于稳定。于是，可以认为 $N<1.5$ 对应标准非线性薛定谔方程 $N<1.0$ 的情形。那么 N 为多少时可以认为是二阶孤子呢？当 $N=3.5$ 时，开始出现明显的抖动，$N=4.0$ 时就更为明显(见图1)，因此，一阶孤子的幅值范围是 $1.5\leqslant N\leqslant 3.5$。当 $N=5.0$ 时，基本保持着单个峰值，但 $N=5.5$ 时开始出现双峰和单峰周期性交替现象。图2给出 $N=6.0, 8.0, 9.0$ 和10.0时的孤子的演化。因此，当 $N>5.0$ 可认为进入三阶孤子，或者说二阶孤子范围是 $3.5<N<5.0$。当 $N=10.0$ 时出现三个峰值，可以认为此时进入四阶孤子状态，因此三阶孤子范围是 $5.0\leqslant N\leqslant 10.0$。三阶孤子及四阶孤子演化过程中，双峰或三峰状态持续时间长，而且第一次出现多峰状态的时间也长。

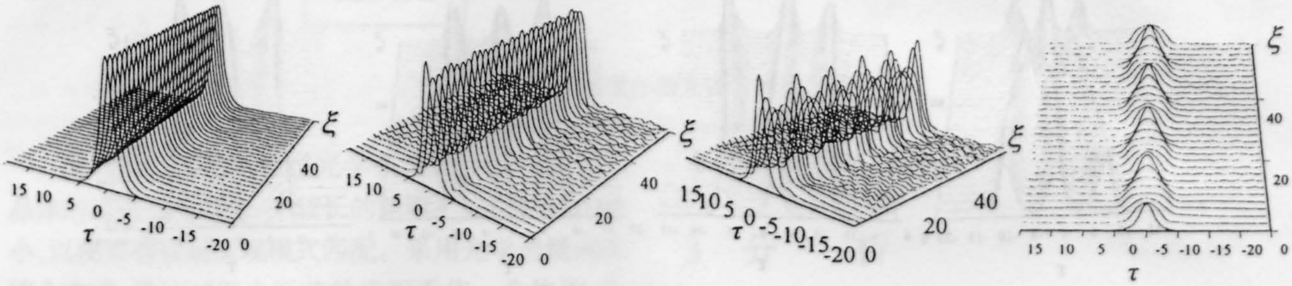

图1 单孤子的演化

Fig.1 Evolution of single soliton: (a) $N=1.2$; (b) $N=1.5$; (c) $N=3.0$; (d) $N=4.0$

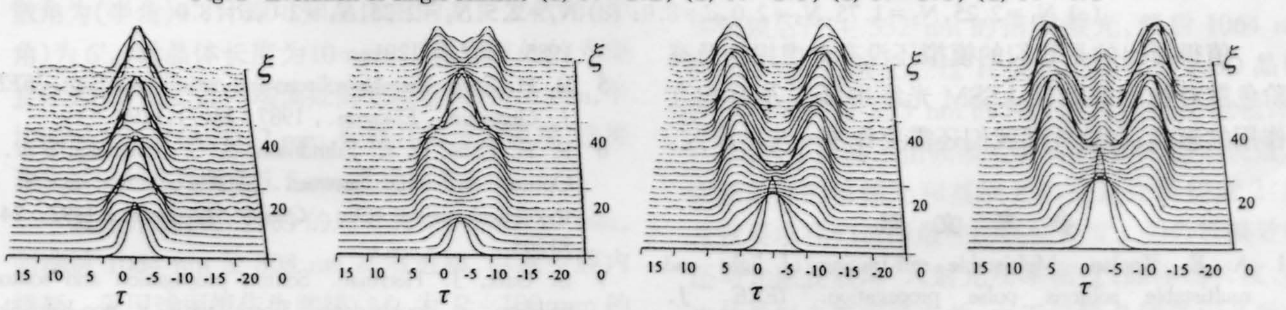

图2 单孤子的演化

Fig.2 Evolution of single soliton. (a) $N=6.0$; (b) $N=8.0$; (c) $N=9.0$; (d) $N=10.0$

3 孤子的相互作用

实际系统中传输的信息是大量的脉冲串，这就涉及到多孤子的相互作用问题，束缚一个单孤子的同一非线性也在相邻孤子间建立一个孤子互作用力，孤子间的相互作用直接影响通信的质量和容量，在光纤系统的设计中这是一个必须考虑的重要问题。饱和光纤中孤子的相互作用与标准非线性薛定谔方程的情况不同。我们利用快速傅里叶方法对一阶孤子序列的相互作用进行数值模拟，并对结果进行分析和讨论。

对双孤子，数值模拟的初值设为

$$E(0,\tau)=N_1\operatorname{sech}\left(\tau+\frac{d}{2}\right)+N_2\operatorname{sech}\left(\tau-\frac{d}{2}\right) \quad (5)$$

其中，d 为孤子间隔。三孤子则是依此类推，其模拟结果见图3和图4。从图3中的(b)与(a)的对比中，可以说明增加孤子间的距离，能够减小孤子间的相互作用，这样的结论对多孤子序列同样成立。而不等幅孤子的注入也可以减小孤子间的相互作用，这可以从图2(c)与(a)以及图3中的(b)，(c)，(d)与(a)的对比中得到。对于不等幅三孤子序列，图3(b)，(c)和(d)是等间隔的孤子幅值依次分别(b) $N_1=1.75$, $N_2=2.25$, $N_3=2.0$；(c) $N_1=2.25$, $N_2=1.75$, $N_3=2.0$；(d) $N_1=2.5$, $N_2=2.25$, $N_3=2.0$ 的情况。由(b)和(c)可知幅值最相近的相邻孤子最易发生相互作用。那么，在相同的孤子间隔下，幅值相近程度一样的情况下，会发生什么情形呢？可以由图3(c)中得出幅值相对高的相邻孤子易发生相互作用。

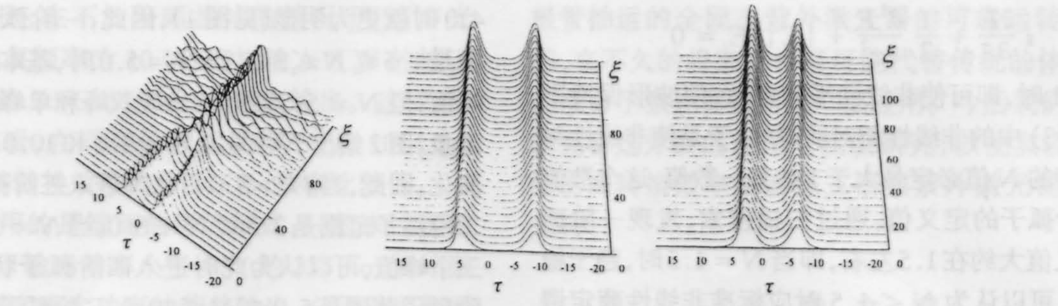

图 3　双孤子的相互作用

Fig. 3　Interaction of two solitons, N_1. (a) $N_2 = 2.0, d = 8.0$; (b) $N_2 = 2.0, d = 12.0$; (c) $N_2 = 1.5, d = 8.0$

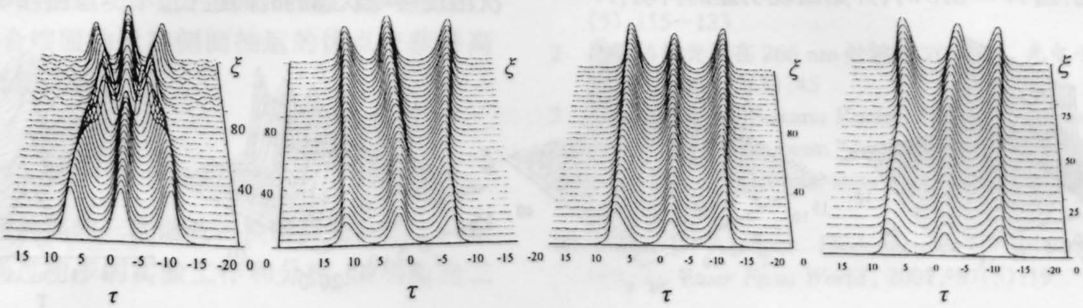

图 4　三孤子的相互作用

Fig. 4　Interaction of two soliton. (a) $N_1 = N_2 = N_2 = 2.0, d = 8.0$; (b) $N_1 = 1.75, N_2 = 2.25, N_3 = 2.0, d = 8.0$; (c) $N_1 = 2.25, N_2 = 1.75, N_3 = 2.0, d = 8.0$; (d) $N_1 = 2.5, N_2 = 2.25, N_3 = 2.0, d = 8.0$

值得指出的是我们的模拟还没有考虑损耗及高阶色散对饱和非线性 LSSM 光纤中孤子及其相互作用的影响,在这方面我们还需要作进一步的研究。

参 考 文 献

1 A. E. Kaplan. Multistable self-traping of light and multistable solitons pulse propagation. *IEEE. J. Quantum. Electron.*, 1985, **QE-21**(9):1538

2 R. H. Enns, S. S. Rangnekar, A. E. Kaplan. Bistable-soliton pulse propagation: Stability aspects. *Phys. Rev. A*, 1987, **36**(3):1270

3 R. H. Enns, S. S. Rangnekar, A. E. Kaplan. "Robust" bistable solitons of the highly nonlinear Schodinger equation. *Phys. Rev. A*, 1987, **35**(1):466

4 A. E. Kaplan. Bistable solitons. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, **55**(12):1291

5 R. H. Enns. Bistable solitons and optical switching. *IEEE J. Quantum. Electron.*, 1987, **23**(7):1199

6 R. H. Enns, D. E. Edmunson, S. S. Rangnekar *et al.*. Optical switching between bistable soliton states: a theoretical review. *Opt. Quant. Electron.*, 1992, **24**: S1295

7 S. Gatz, J. Herrman. Soliton propagation and soliton collision in double-doped fibers with a non-Kerr-like nonlinear refractive-index change. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(7):484

8 De Angelis C. Soliton instabilities from resonant random mode coupling in birefringent optical fibers. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(12):850

9 陈陆军,郭　耀,梁昌洪. 饱和光纤中的各阶孤子及孤子相互作用. 光学学报,1995, **15**(7):855