

# 同步幅度调制控制孤子系统中的孤子相互作用

王发强 陈明华 杨祥林

(东南大学电子工程系, 南京 210096)

**提要** 用解析法分析了幅度调制控制孤子系统中的孤子相互作用, 结果显示, 幅度调制控制能有效地抑制孤子相互作用, 同时也能控制孤子频率的漂移。

**关键词** 孤子, 同步幅度调制, 孤子相互作用

## 1 引 言

众所周知, 周期性放大的孤子传输系统只要光纤放大器间距远远小于孤子脉冲的色散长度就能实现高速长距离通信<sup>[1]</sup>, 但由于孤子间的非线性相互作用限制了码率的进一步提高。近年来人们提出了许多措施, 如周期性插入滑频滤波器<sup>[2]</sup>、同步幅度调制器<sup>[3]</sup>或同步相位调制器<sup>[4]</sup>。其中最有效的两种是同步相位调制控制和同步幅度调制控制。尤其是同步幅度调制技术, 在孤子间距四倍于脉宽时仍能稳定传输<sup>[5]</sup>。

现有关于同步幅度调制控制孤子系统相互作用的分析都是采用计算机对孤子传输演化方程进行直接模拟。本文将运用微扰法先导出孤子参数运动方程, 然后通过数值求解研究了幅度调制系统的孤子相互作用。

## 2 参量运动方程

具有周期性能量放大的平均孤子系统, 在插入同步幅度调制器后, 脉冲的慢变包络可用下列非线性方程来描述<sup>[6]</sup>

$$\frac{\partial u}{\partial z} = -iD \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - ir^2 \delta |u|^2 u + \Delta g u + \mu [\cos(\omega_m t) - 1] u \quad (1)$$

式中右边第一项代表群速色散的影响,  $D = -\beta''/2$ ,  $\beta''$  为光纤的二阶色散。第二项代表非线性作用,  $\delta = \frac{2\pi n_2 h \omega_0}{\lambda A_{\text{eff}}}$ ,  $n_2$  为非线性折射率,  $A_{\text{eff}}$  为光纤有效截面积,  $\omega_0$  为载波频率,  $\lambda$  为频率为  $\omega_0$  的光波长,  $r^2 = \frac{1 - \exp(-2\Gamma l)}{2\Gamma l}$ ,  $r$  代表相邻放大器之间强度的变化。第三项代表为补偿同步幅度调制所需的附加增益。第四项代表时域幅度调制作用项,  $\mu$  等于有效调制损耗,  $\omega_m$  为调制频率, 等于  $2\pi$  乘以比特率。

为了便于讨论, 将(1)式进行归一化得

$$i \frac{\partial u}{\partial z'} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial T^2} + |u|^2 u - igu - i\mu'[\cos(\omega T) - 1]u = 0 \quad (2)$$

其中  $z' = \frac{z}{L_D}$ ,  $T = \frac{t}{t_c}$ ,  $g = \Delta g L_D$ ,  $\mu' = \mu L_D$ ,  $\omega = \omega_m t_c$ ,  $L_D = \frac{t_c^2}{|\beta''|}$

此处  $L_D$  是色散长度,  $t_c$  为单位归一化时间的特征量。

设没有调制和孤子相互作用时方程(2)的孤子解形式为

$$u(z', T) = 2\nu \operatorname{sech} z \exp[i\varphi(x, z')] \quad (3)$$

其中

$$x = 2\nu[T - \xi(z')], \quad \varphi(x, z') = \frac{\kappa}{\nu}x + \delta(z'), \quad \xi(z') = 2\kappa z' + \xi_0, \quad \delta(z') = 4(\kappa^2 + \nu^2)z' + \delta_0$$

此处  $\nu, \kappa, \xi_0$  和  $\delta_0$  分别为孤子的振幅、中心频率与载频之差、初始中心位置和初始位相。

考虑双孤子作用时的(2)式解可写为

$$U(z', T) = u_1(z', T) + u_2(z', T) \quad (4)$$

其中

$$u_n(z', T) = 2\nu_n \operatorname{sech} x_n \exp[i\varphi_n(x_n, z')] \quad (n = 1, 2)$$

$$x_n = 2\nu_n[T - \xi_n(z')] \quad \varphi_n(x_n, z') = \frac{\kappa_n}{\nu_n}x_n + \delta_n(z')$$

$$\xi_n(z') = 2\kappa_n z' + \xi_{n0} \quad \delta_n(z') = 4(\kappa_n^2 + \nu_n^2)z' + \delta_{n0}$$

当调制强度以及孤子相互作用都较小时,可将它们作微扰处理,将(4)式代入(2)式,运用微扰法得到孤子参量运动方程<sup>[7]</sup>

$$\frac{d\kappa_n}{dz'} = (-1)^n 16\nu^3 e^{-2r} \cos(2\kappa r + \Psi) \quad (5a)$$

$$\frac{d\nu_n}{dz'} = (-1)^n 16\nu^3 e^{-2r} \sin(2\kappa r + \Psi) + 2(g - \mu')\nu_n + \frac{\mu'\omega\pi}{2}\sigma \cos[\omega(\xi_n - \xi_{n0})] \quad (5b)$$

$$\frac{d\xi_n}{dz'} = 2\kappa_n + 4\nu e^{2r} \sin(2\kappa r + \Psi) + \frac{\mu'\pi}{2\nu_n\sigma} \left(1 - \frac{\pi\omega\rho}{4\nu_n\sigma}\right) \sin[\omega(\xi_n - \xi_{n0})] \quad (5c)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\delta_n}{dz'} = & 2(\kappa_n^2 + \nu_n^2) + 8\kappa\nu e^{-2r} \sin(2\kappa r + \Psi) + 24\nu^2 e^{-2r} \cos(2\kappa r + \Psi) \\ & + \frac{\mu'\pi}{\nu_n\sigma} \kappa_n \left(1 - \frac{\pi\omega\rho}{4\nu_n\sigma}\right) \sin[\omega(\xi_n - \xi_{n0})] \end{aligned} \quad (5d)$$

其中

$$\sigma = \sinh\left(\frac{\pi\omega}{4\nu_n}\right), \quad \rho = \cosh\left(\frac{\pi\omega}{4\nu_n}\right), \quad \kappa = \frac{\kappa_1 + \kappa_2}{2}, \quad \nu = \frac{\nu_1 + \nu_2}{2}, \quad r = \xi_1 - \xi_2, \quad \Psi = \delta_2 - \delta_1$$

$\xi_{n0}$  为第  $n$  ( $n = 1, 2$ ) 孤子的中心位置。

(5) 式是 8 个变量微分方程组,无法解析求解。为此,采用龙格-库塔法对其进行数值求解。通常在孤子系统中,初始注入孤子为同频、等幅、同相、等间隔孤子序列,因而  $\kappa_1 = \kappa_2 = 0$ ,  $\nu_1 = \nu_2 = 1/2$ ,  $\Psi = 0$ , 归一化调制频率  $\omega = 2\pi/r$ 。补偿增益  $\Delta g$  的归一化值可由(1)式的能量运动方程给出<sup>[6]</sup>,运用(3)式的孤子解形式可得

$$\frac{\partial |u(z', T)|^2}{\partial z'} = \int |u(z', T)|^2 [g + \mu'(\cos\omega T - 1)] dT$$

若补偿增益正好补偿调制损耗,则孤子脉冲能量沿途保持恒定,因此令  $\frac{\partial |u(z', T)|^2}{\partial z'} = 0$ , 得到  $g = \mu'[1 - \omega\pi \sinh(\omega\pi/4\nu)/4\nu]$ 。然后数值求解(5)式,绘出间距  $\xi_1 - \xi_2$ , 相位差  $\delta_2 - \delta_1$ , 振幅差  $\nu_2 - \nu_1$ , 频率差  $\kappa_2 - \kappa_1$  随传输距离的变化曲线,图 1~4 中的实线是在  $\mu' = 0.4$  情况下给出的。

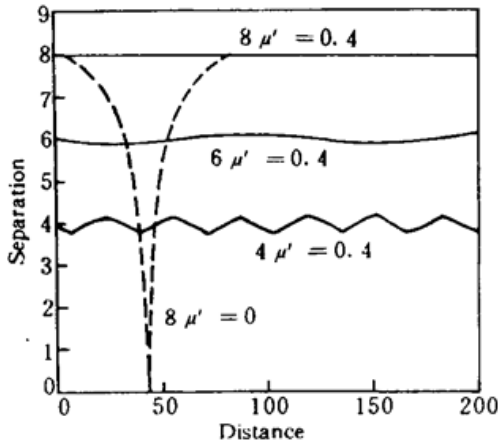


Fig. 1 The separation against distance

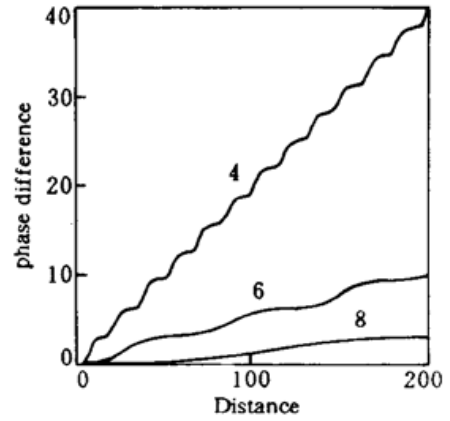


Fig. 2 The phase difference against distance

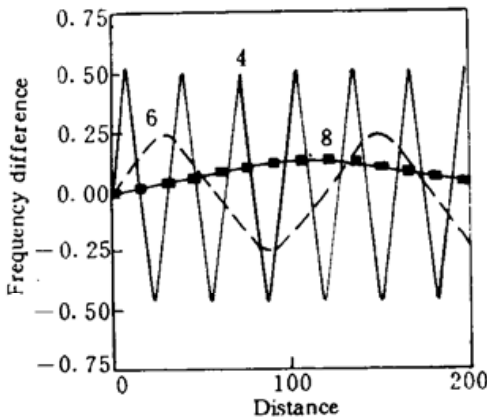


Fig. 3 The frequency difference against distance

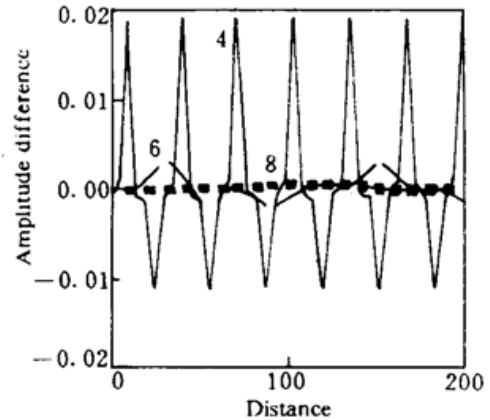


Fig. 4 The amplitude difference against distance

### 3 结果与讨论

众所周知,当孤子间距大于 10 倍孤子脉宽时,其相互作用力可以忽略。当间隙缩小时,相互作用力明显增大而不可忽略。对于等幅同相位同中心频率孤子,作用力是吸引力,因此,孤子脉冲将偏离原来位置而迅速靠近,同时频率差将迅速增大,直到两孤子发生碰撞,然后又由于排斥力的作用而分开,直到恢复原来的初始间距(如图 1 中虚线所示,即  $\mu' = 0$  不加任何控制)。

首先,讨论幅度调制控制对孤子相互作用和间距的控制。图 1 与图 2 分别给出间距为 8, 6 和 4 时孤子间距及相位差随传输距离的变化情况。由图 1 可知,由于幅度调制存在均能使两孤子有效分开,即使当孤子间距仅为 4 时,也只在平均值 4 附近存在微小的波动,因此从平均意义上来看还是稳定的。这表明同步幅度调制能有效地控制孤子的相互间距,阻止了孤子因相互作用而发生的碰撞,也就是说同步幅度调制有效地控制了孤子相互作用。另外,由文献[2]可以看出滑频滤波器不能控制间距小于 5 的孤子相互作用,由此可认为幅度调制器对孤子相互作用的控制优于滑频滤波器。

由图 2 可以理解同步幅度调制控制对孤子间距的控制。从图 2 可知在传输过程中孤子间的相位差持续增长,由于当孤子间相位差小于  $\pi/2$  时孤子间作用力是吸引力,而当相位差大于  $\pi/2$  时相互作用力为排斥力<sup>[8]</sup>,因此由于相互相位差的不断变化使得相互间的作用力也随着变化,这样使得平均相互作用力为零,从而有效地抑制了孤子相互作用力。

其次,讨论幅度调制控制对孤子频率与振幅的控制。图 3 和 4 分别给出孤子间距为 8,6 和 4 时孤子的频率差及振幅随传输距离的演化情况。从图 3 可以看出孤子间的频率差在传输过程中仅作微小的波动,两孤子的传输速度沿途保持基本相同,因而导致了孤子相互间距基本不变或仅有微小波动。由频率差的波动可知两孤子的速度也有所不同,因此两孤子抖动时经过各自同步幅度调制定时中心的时间也就不一样,由于调制损耗的存在,使得孤子振幅演化也不同。因此,随着孤子间频率差的抖动孤子振幅也产生了抖动。这就是图 4 中孤子间有振幅差演变的原因。但其变化很小,对误码率的影响可以忽略<sup>[6]</sup>。

## 4 结 论

本文通过对孤子参量微扰运动方程的计算,结果显示同步幅度调制不仅能有效地控制放大的自发辐射噪声引起的孤子中心抖动,而且还能有效地控制任意相近(微扰论有效范围内,即孤子间距大于或等于 4)孤子脉冲之间的相互作用。可见,同步调制是孤子传输系统最有力的控制手段之一。

### 参 考 文 献

- 1 L. F. Mollenauer, E. Lichtman, M. J. Neubelt *et al.*. Demonstration, using, sliding frequency guiding filters, of errorfree soliton transmission over more than 20000 km at 10 Gbit/s, single channel, and over more than 13000 km at 20 Gbit/s in a two-channel WDM. *Electr. Lett.*, 1993, 29(10): 910
- 2 Y. Kodama, S. Wabnitz. Analysis of soliton stability and interactions with sliding filters. *Opt. Lett.*, 1994, 19(3): 162
- 3 P. L. Francois, T. Georges. Reduction of averaged soliton interaction forces by amplitude modulation. *Opt. Lett.*, 1993, 18(8): 583
- 4 N. J. Smith, W. J. Firth, K. J. Blow *et al.*. Suppression of soliton interactions by periodic phase modulation. *Opt. Lett.*, 1994, 19(1): 16
- 5 H. Kubota, M. Nakazawa. Soliton transmission control in time and frequency domains. *IEEE. J. Quant. Electr.*, 1993, QE-29(7): 2189
- 6 A. Mecozzi, J. D. Moores, H. A. Haus *et al.*. Modulation and filtering control of soliton transmission. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1992, 9(8): 1350
- 7 V. I. Karpman, V. V. Solov'ev. A perturbational approach to the two-soliton systems. *Physica 3D*, 1981: 487
- 8 D. Anderson, M. Lisak. Bandwidth limits due to mutual pulse interaction in optical soliton communication systems. *Opt. Lett.*, 1986, 11(3): 174

## Interaction of Solitons in a Soliton Transmission System with the Control of Amplitude Modulation

Wang Faqiang Chen Minghua Yang Xianglin

(Department of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing 210096)

**Abstract** In this paper the soliton interaction is analysed for the first time by means of an analytic method. It shows that the amplitude modulation can control not only the soliton interaction effectively but also the soliton frequency shifting.

**Key words** soliton, amplitude modulation, soliton interaction