

文章编号: 1001-3806(2004)03-0327-03

## 色散控制孤子系统的三阶色散分析

张利娜, 蔡 炬, 龙瑞平, 祁志甫, 杨祥林

(南京邮电学院 光信息技术系, 南京 210003)

**摘要:** 对三阶色散在色散控制孤子系统特性做了深入分析, 采用变分法分析了三阶色散对色散控制孤子的传输特性的影响, 给出了各参数的演变特点, 并通过数值仿真讨论了三阶色散对系统的演变特点, 指出了三阶色散对系统的有害性和补偿的必要性。

**关键词:** 色散控制; 三阶色散; 二阶色散; 脉宽; 非线性作用

中图分类号: O436.3 文献标识码: A

## Analysis of third order dispersion in dispersion managed soliton system

ZHANG Li-na, CAI Ju, LONG Rui-ping, QI Zhi-fu, YANG Xiang-lin

(Department of Optical Information Technology, Nanjing Institute of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** The character of third order dispersion in dispersion managed soliton system is studied. The influence of the third order dispersion (TOD) on dispersion managed soliton transmission system is investigated by means of variational method, and the evolution equations for the parameters of the optical Gaussian shaped pulse is derived. By simulation, we discussed the properties of the parameters under the influence of TOD. The nocuous influence and the necessity of management of third order dispersion is pointed out.

**Key words:** dispersion managed; third order dispersion; second order dispersion; width of pulse; nonlinear interaction

## 引 言

色散控制孤子在普通孤子的基础上, 通过周期性的色散补偿, 有效地解决了普通孤子传输中高信噪比和低相互作用不能兼顾的问题。由于其优势突出、应用简便而迅速得到广泛重视。通过对成本、实现难度和效率的评估分析表明, DMS 传输方案(尤其是 WDM DMS 传输)是实现高速长距离光纤通信的一种优选方案。然而, 由于该传输方案是在传输线路上周期性交替采用正负色散光纤来降低路径平均色散, 路径平均色散值的降低, 必将导致三阶色散对系统性能产生影响。

目前, 已有较多学者对三阶色散(TOD)效应对孤子系统影响进行过研究, 但对 DMS 的影响研究较少, CHU<sup>[1]</sup>指出 TOD 能抑制普通孤子间的非线性相互作用, SHEN<sup>[2]</sup>则指出脉冲频域和时域的演变程度取决于色散补偿光纤的位置, 即采用预补偿还是后

补偿。NIJHOF<sup>[3]</sup>初步探讨了 TOD 对 DMS 传输的影响, 指出在较小的 TOD 情况下不会使 DMS 产生分裂。文中将以非线性薛定谔方程为基础, 采用变分法分析三阶色散对色散控制光孤子系统的影响, 给出三阶色散对各参数的影响特性。

## 1 色散控制孤子通信系统中的三阶色散的影响

由含三阶色散项的广义非线性薛定谔方程可得:

$$i \frac{\partial E}{\partial z} - \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + r(z) |E|^2 E - \frac{i}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 E}{\partial t^3} = -i\alpha(z) E \quad (1)$$

经过归一化处理, 令  $u = E / \sqrt{P_0}$ ,  $T = t / T_0$ ,  $Z = z / L_d$ ,  $L_d = T_0^2 / \langle \beta_2 \rangle$ , 其中,  $P_0$  是入射脉冲的峰值功率,  $T_0$  为脉冲的初始半宽度, 且入射功率为  $P_0 = 1 / (r L_d)$ , 则得到含三阶色散的归一化方程:

$$i \frac{\partial u}{\partial Z} - \frac{1}{2} \frac{\beta_2}{\langle \beta_2 \rangle} \frac{\partial^2 u}{\partial T^2} + |u|^2 u - \frac{i}{6} \frac{\beta_3}{\langle \beta_2 \rangle T_0} \frac{\partial^3 u}{\partial T^3} = -i\alpha L_d u \quad (2)$$

定义路径平均色散长度为  $L_d = T_0^2 / \langle \beta_2 \rangle$ , 其中

作者简介: 张利娜(1978), 女, 硕士研究生, 目前从事高速色散控制系统和城域网方面的研究。

E-mail: zhang.lina@eyou.com

收稿日期: 2003-06-06; 收到修改稿日期: 2003-10-09

$\langle \beta_2 \rangle = (\beta_{21}l_1 + \beta_{22}l_2)/(l_2 + l_1)$  为路径平均色散,  $d(Z) = -\beta_2/\langle \beta_2 \rangle$  为归一化周期色散的变化项,  $s = \beta_3/(\langle \beta_2 \rangle T_0)$  为归一化三阶色散项。对色散控制孤子, 为平衡二阶色散和 SPM, 令脉冲初始输入功率  $P_0 = \langle \beta_2 \rangle / (rT_0^2)$ , 色散分布强度为  $S = (\beta_{21}l_1 - \beta_{22}l_2) \tau_{FWHM}^2$ 。因此, 即得无损耗的 (即  $\alpha = 0$ )、含三阶色散项的归一化色散控制孤子方程:

$$i \frac{\partial u}{\partial Z} + \frac{1}{2} d(Z) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + |u|^2 u - \frac{i}{6} s \frac{\partial^3 u}{\partial t^3} = 0 \quad (3)$$

当  $d(Z) = -1$ , 也即  $\beta_2 = \langle \beta_2 \rangle$ , 则含三阶色散项的普通孤子传输方程为:

$$i \frac{\partial u}{\partial Z} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + |u|^2 u - \frac{i}{6} s' \frac{\partial^3 u}{\partial t^3} = 0 \quad (4)$$

设输入脉冲为一具有初始啁啾的高斯脉冲:

$$U(0, T) = A(0) \exp[-B^2(T - T_0(0))^2/2] \times \exp[i\omega(0)T + iC(0)T^2 + i\varphi(0)] \quad (5)$$

并假设  $T(0) = \omega(0) = \varphi(0) = 0$ , 则方程(5)的解为:

$$U(Z, T) = A(Z) \exp[-B^2(T - T_0(Z))^2/2] \times \exp[i\omega(Z)T + iC(Z)T^2 + i\varphi(Z)] \quad (6)$$

式中, 参数  $A(Z)$ ,  $\varphi(Z)$ ,  $B(Z)$ ,  $T_0(Z)$ ,  $C(Z)$  和  $\omega(Z)$  分别表示传输距离演变的高斯脉冲的幅度, 与  $T$  无关的相位, 脉宽, 脉冲中心位置, 线性啁啾和频率。应用变分法研究三阶色散对系统的影响, 从而导出脉冲参数变化的演变。

$$BA^2 = E_0 (\text{常数}) \quad (7a)$$

$$dB/dZ = 2BCd \quad (7b)$$

$$dC/dZ = 1/2B^4 - [E_0/(2\sqrt{2}B^3)] - 2C^2d \quad (7c)$$

$$dT_0/dZ = s(1/A^2 + 12C^2)/2 \quad (7d)$$

$$\omega(Z) = 2C(Z)T_0 - 2C(Z)T(Z) + \omega(0) \quad (7e)$$

由上式可知: (1) 色散控制孤子系统中, 三阶色散并不改变孤子的幅度及其相位, 但产生一阶频率小量, 并使脉冲中心位置  $T_0$  随  $Z$  产生线性漂移; (2) 在普通孤子系统中, 由于  $d(Z) = -1$ , 而在色散控制孤子系统中  $d(Z) \neq -1$ , 注意到(7b)式和(7c)式中,  $d(Z)$  导致啁啾变化的不同, 因此, 三阶色散对系统的影响效果是不同的。

下面将采用快速分步傅里叶(SSFT)算法研究不同参数时 TOD 对 DMS 传输系统的影响。

## 2 系统与仿真

为避免 Gordon-Haus 定时抖动的干扰, 突出三阶色散的作用, 在仿真中只考虑无损系统的性能。图 1 为典型色散控制传输方案的色散分布图。采用

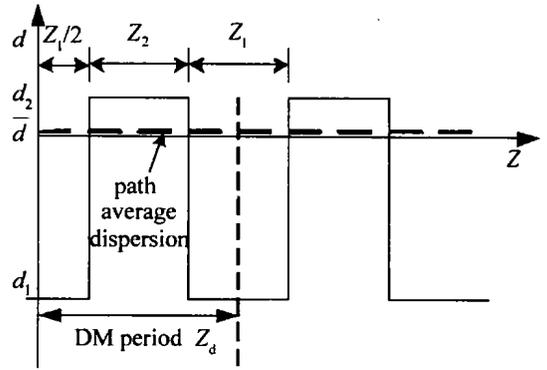


Fig. 1 Dispersion profile

分步傅里叶方法对存在三阶色散条件下的色散控制孤子系统进行分析。分析时采用如下数据: 设一个色散分布周期内 DCF 和传输光纤的长度分别为 5km 和 55km, 路径平均色散为  $0.01 \text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ , 输入脉冲的半极大全宽为 5ps, 比特时隙为 25ps (占空比为 0.2, 系统速率  $40 \text{Gbit/s}$ )。为分析方便, 将非线性系数统一设为  $0.00243 \text{mW}^{-1} \text{km}^{-1}$ 。而本地色散值则随  $S$  的大小需要而变。取系统的色散分布强度  $S = 2.1872$ , 功率为  $2.5292 \text{mW}$ , 图 2 所示为三阶色散为  $0.1 \text{ps}^2/(\text{nm} \cdot \text{km})$  时, 三阶色散对单脉冲, 也即对自相位调制(SPM)的影响特性。由于  $\beta_3 > 0$  脉冲向右沿偏移, 有少量的色散波产生, 脉冲的中心位置随着距离  $Z$  逐渐偏移, 这点与普通系统是一致的<sup>[4]</sup>。

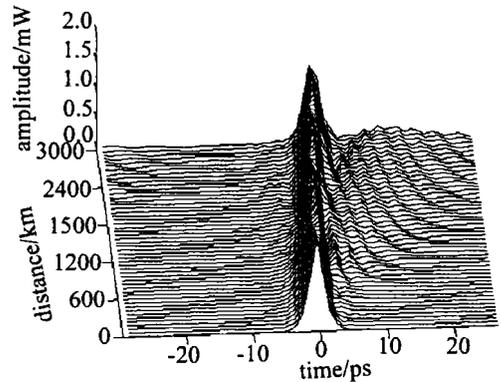


Fig. 2 Evolution of single pulse

图 3 中描述了中心位置偏移随着三阶色散和传输距离演变特性, 图示两曲线分别为三阶色散值为 0.05, 0.1 时中心位置偏移随着传输距离  $z$  的变化情况, 曲线变化随距离近似曲线变化, 且这种偏移是经过一段距离才开始的。而当三阶色散变化时, 中心位置随距离变化的速率也显著变化, 斜率与三阶色散值成正比。

当输入脉冲为脉冲对时, 在普通孤子系统中, 当  $s = 0.05$  时孤子对的间隔保持不变<sup>[1]</sup>, 也即三阶色散作用, 在一定量值时可以抑制孤子间的相互作用。

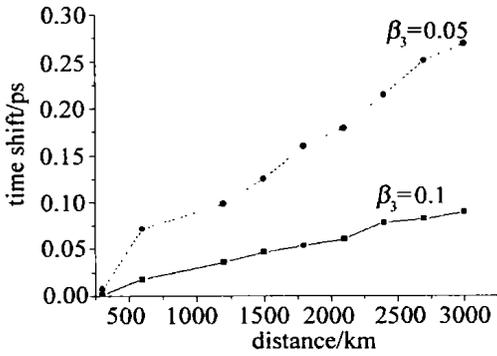


Fig. 3 Evolution of the center point

文中将由仿真分析在色散控制孤子系统中, 是否也存在一个值能对孤子相互作用起有效影响。并且将以碰撞长度来衡量三阶色散对相邻双孤子相互作用的影响。将碰撞长度定义为: 相邻脉冲间隔小于比特时隙的 70% 时脉冲传输的距离。这种定义近似对应于误码率为  $10^{-9}$  时的传输距离。

如图 4a 所示, 在上述条件下的孤子对脉冲在无

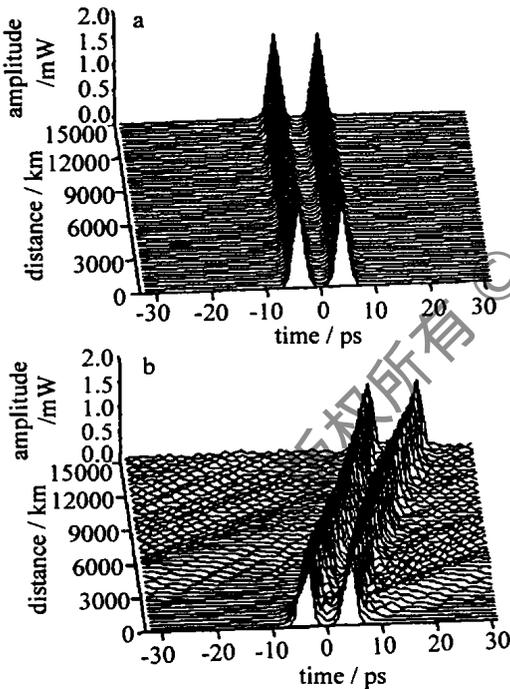


Fig. 4 Evolution of binate pulse a- $\beta_3=0$  b- $\beta_3=0.1\text{ps}^2\cdot(\text{nm}\cdot\text{km})^{-1}$

三阶色散时传输效果较好, 碰撞距离极大, 可到达 60000km, 同时脉冲中心位置偏移也很小, 近似为 0。而图 4b 中,  $\beta_3=0.1\text{ps}^2\cdot(\text{km}\cdot\text{nm})^{-1}$  时, 三阶色散主要影响仍然是中心脉冲的偏移和色散波的产生, 同时还导致碰撞距离减小至 2460km。仅改变三阶色散值, 由 0 开始增加, 当  $\beta_3 < 0.02\text{ps}^2\cdot(\text{km}\cdot\text{nm})^{-1}$ , 脉冲的碰撞距离和中心位置无变化。当  $\beta_3 > 0.02\text{ps}^2\cdot(\text{km}\cdot\text{nm})^{-1}$ , 脉冲的中心位置开始偏移, 间距无明显变化, 当  $\beta_3$  增至大于  $0.03\text{ps}^2\cdot(\text{nm}\cdot\text{km})^{-1}$ , 三阶色散将导致中心位置偏移和碰撞距离的急剧减小, 三阶色散的作用开始明显。随着  $\beta_3$  增加, 中心位置偏移程度增大, 碰撞距离减小加剧。因此与常规孤子系统不同<sup>[5]</sup>, 三阶色散对系统的影响是有害的。

### 3 小结

在色散控制孤子系统中, 由于路径平均色散接近于 0, 三阶色散的影响是不容忽略的。三阶色散引起脉冲演变的波形变化和脉宽的展宽, 对非线性相互作用有害, 因此, 需要通过三阶色散补偿提高系统性能。

### 参 考 文 献

- [1] CHU P L, DDESEM C. Effect of third-order dispersion of optical fiber on soliton interaction [J]. Electron Lett, 1985, 21(6): 228~ 229.
- [2] SHEN S, CHANG C C, SARDESAIL H P *et al.* Effects of self phase modulation on sub 500 fs pulse transmission over dispersion compensated fiber links [J]. Quantum Electron, 1999, 17:452~ 454.
- [3] NIJHOF J H B, DORAN N J, FORSLAK W. Stable soliton like propagation in dispersion managed system with net anomalous, zero and normal dispersion [J]. Electron Lett, 1997, 33(24): 1726~ 1727.
- [4] AGRAWAL G P. 非线性光纤光学原理及应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2002. 49~ 52.
- [5] 杨祥林, 温扬敬. 光纤孤子通信理论基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001. 152~ 162.