

文章编号: 0253-2239(2004)02-215-5

# 偏振模色散影响色散控制孤子传输的理论研究\*

徐 铭<sup>1</sup> 蒲 涛<sup>1</sup> 杨淑雯<sup>1</sup> 杨祥林<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 深圳大学信息工程学院新技术研究中心, 深圳 518060)  
(<sup>2</sup> 南京邮电学院光纤通信研究所, 南京 210003)

**摘要:** 采用变分法分析高速色散控制孤子在双折射光纤中的传输规律。首先建立了色散控制孤子在双折射光纤中的扰动传输模型, 然后解析了偏振模色散影响下色散控制孤子各参量的传输演化规律, 最后对解析结果进行了计算。研究表明, 偏振模色散参量对色散控制孤子能量、脉宽的演化影响很大, 当偏振模色散很大时, 如  $D_p > 0.3 \text{ ps/km}^{1/2}$  时, 必须考虑采用某些在线控制手段来有效抑制偏振模色散对传输系统的影响, 然而, 当  $D_p \leq 0.1 \text{ ps/km}^{1/2}$  时, 系统几乎不受影响, 同时本文还证明了色散控制孤子抗偏振模色散扰动的能力强的这一特点。为研究偏振模色散对高速非线性传输系统、特别是色散控制孤子传输系统的影响提供了理论依据和研究方法。

**关键词:** 光纤通信技术; 偏振模色散; 变分法; 色散控制孤子

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

## A Study of the Influence of Polarization Mode Dispersion in Dispersion-Managed Soliton Transmission Systems

Xu Ming<sup>1</sup> Pu Tao<sup>1</sup> Yang Shuwen<sup>1</sup> Yang Xianglin<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> *Advanced Technology Research Center of Information Engineering Academy, Shenzhen University, Shenzhen 518060*,  
<sup>2</sup> *Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003*)

(Received 13 December 2002)

**Abstract:** The rule of dispersion-managed soliton transmission in birefringent fiber is analyzed by variational method. Firstly, The model of perturbed soliton transmission in birefringent fiber is built, and then the rule of transmission evolvement of the DMS parameters influenced by PMD is analyzed, at the last, the analysis results are numerical computed. The results indicate that the parameter of PMD has a great impact on the energy and width of DMS evolution. While the PMD is big like as the  $D_p > 0.3 \text{ ps/km}^{1/2}$ , the some of online control methods must be used to restrain the PMD effects on this transmission system, but if  $D_p \leq 0.1 \text{ ps/km}^{1/2}$ , the transmission system can hardly be effected by PMD. The results also prove that the DMS possess a characteristic of robustness to PMD. These results provide the theoretical evidence and research way for studying influence of PMD in systems of high-speed nonlinear pulse transmission, particularly in DMS system transmission.

**Key words:** optical fiber communication technology; polarization mode dispersion (PMD); variational method; dispersion managed soliton (DMS)

## 1 引 言

\* 国家自然科学基金(60132040)资助课题。

E-mail: xum@szu.edu.cn

收稿日期: 2002-12-13

光纤的偏振模色散(PMD)来自于光纤本身的非圆对称几何形状或外界因素引起的非圆形对称形

变,从而造成单模光纤中不同偏振方向上具有不同的折射率和不同的传播常量,导致信号脉冲展宽。早期对偏振模色散的研究主要集中在对其定性的分析上,重点研究其统计特性<sup>[1,2]</sup>。近年来,随着通信速率的提高,对偏振模色散的研究正在深入,重点进行定量研究,以及如何对偏振模色散进行补偿<sup>[3~5]</sup>。孤子脉冲由于本身的非线性机制,对偏振模色散具有自抑制(self-trapping)能力,成为一个有前景的偏振模色散补偿方法之一<sup>[6,7]</sup>。

色散控制孤子(DMS)传输方案由于较传统孤子有更多突出的优点而越来越受到重视<sup>[7,8]</sup>:增强的脉冲能量和接近零路径平均色散使该系统具有高的信噪比以及较小的定时抖动,同时,色散控制孤子系统打破了传统孤子的限制,在给定的比特速率情况下,容许更宽的脉宽和更长的放大间距,适用于密集波分复用。然而,在设计和评价孤子通信系统时,特别是在高速低色散系统中,多数研究未考虑偏振

模色散的影响,人们对偏振模色散如何影响色散控制孤子传输特性的研究还属刚刚起步,Mollenauer<sup>[6]</sup>采用绝热法分析了普通孤子受偏振模色散的影响,Sunnerud、Xie等<sup>[7,9]</sup>用实验和数值方法研究了偏振模色散对色散控制孤子的影响。本文采用变分法解析了偏振模色散影响下的色散控制孤子传输方程,结果证明色散控制孤子具有很强的抗偏振模色散的能力,为系统地研究孤子在变路色散条件下受偏振模色散影响的传输特性提供了理论依据以及方法。

## 2 偏振模影响下色散控制孤子扰动传输模型

色散控制孤子在双折射光纤中的传输时,脉冲的两正交偏振分量  $U$ 、 $V$  满足如下归一化耦合方程<sup>[10]</sup>:

$$i\left(\frac{\partial U}{\partial Z} + \delta'_g \frac{\partial U}{\partial T}\right) + \frac{d(Z)}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial T^2} + Q(|U|^2 + m|V|^2)U + \frac{1}{3}U^*V^2 \exp(-4i\Delta\beta Z) = 0, \quad (1a)$$

$$i\left(\frac{\partial V}{\partial Z} - \delta'_g \frac{\partial V}{\partial T}\right) + \frac{d(Z)}{2} \frac{\partial^2 V}{\partial T^2} + Q(|V|^2 + m|U|^2)V + \frac{1}{3}V^*U^2 \exp(-4i\Delta\beta Z) = 0, \quad (1b)$$

式中  $U$ 、 $V$  分别表示每个偏振方向上的脉冲包络幅度,  $T$ 、 $Z$  和  $\Delta\beta$  分别表示归一化时间、传输距离和正交偏振光的传播常量差,  $d(Z)$  表示色散变化项,

$$\delta'_g = \frac{\delta\beta' L_d}{2t_0} = \frac{[d(\Delta\beta)/d\omega]L_d}{t_0}$$

为归一化微分群时延,其中  $L_d$  与  $t_0$  分别表示孤子系

统的色散长度和初始脉宽,  $Q = \gamma P_0 L_d$  表示系统的非线性,  $m$  为两偏振分量的交叉相位调制项,  $\gamma$  和  $P_0$  分别为光纤的非线性系数和系统的初始功率。现在拍长度小于孤子周期时,可忽略方程(1)中的快变化项,则方程成为

$$i\left(\frac{\partial U}{\partial Z} + \delta'_g \frac{\partial U}{\partial T}\right) + \frac{d(Z)}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial T^2} + Q(|U|^2 + m|V|^2)U = 0, \quad (2a)$$

$$i\left(\frac{\partial V}{\partial Z} + \delta'_g \frac{\partial V}{\partial T}\right) + \frac{d(Z)}{2} \frac{\partial^2 V}{\partial T^2} + Q(|V|^2 + m|U|^2)V = 0, \quad (2b)$$

上面的方程还可改成扰动方程形式:

$$i\frac{\partial U}{\partial Z} + \frac{1}{2}d(Z) \frac{\partial^2 U}{\partial T^2} + Q|U|^2U = -\left[i\delta'_g \frac{\partial U}{\partial T} + Qm|V|^2U\right] = R, \quad (3a)$$

$$i\frac{\partial V}{\partial Z} + \frac{1}{2}d(Z) \frac{\partial^2 V}{\partial T^2} + Q|V|^2V = -\left[i\delta'_g \frac{\partial V}{\partial T} + Qm|U|^2V\right] = R', \quad (3b)$$

上式即为以扰动形式来表示的双折射光纤中色散控制孤子脉冲的两偏振分量的演化方程。等号右边的项即代表扰动项,由双折射产生的微分群时延  $\delta'_g$  和交叉相位调制项构成。

## 3 扰动色散控制孤子传输模型的变分解

对于形如

$$i \frac{\partial M}{\partial Z} + \frac{1}{2} d(Z) \frac{\partial M^2}{\partial^2 T} + Q(Z) |M|^2 M = R \quad (4)$$

的非线性扰动薛定谔方程可采用变分方法求解<sup>[11]</sup>, 设方程(3)的初始试探解为

$$U(Z, T) = A_u(Z) f_u(\tau) \exp(i\phi_u), \quad V(Z, T) = A_v(Z) f_v(\tau) \exp(i\phi_v), \quad (5a)$$

$$\begin{cases} \tau = B_i(Z) T - T_{0i}, \\ \phi_i = \frac{C_i(Z) B_i^2(Z)}{2} [T - T_{0i}]^2 - k_i(Z) [T - T_{0i}(Z)] + \theta_i, \end{cases} \quad i = U \text{ or } V, \quad (5b)$$

式中脉冲参量  $A, B, C, k, T_0, \theta$  分别表示脉冲的幅度、脉宽、啁啾、频率、中心位置和相位。可以得到如下的孤子脉冲各参量的演化规律:

$$\dot{A}_i = -\frac{A_i d C_i B_i^2}{2} + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \text{Im}[R \exp(-i\phi_i)] \left[ \frac{f_i \tau^2}{I_y} - \frac{3f_i}{I_i} \right] d\tau, \quad (6a)$$

$$\dot{B}_i = -B_i^3 d C_i + \frac{B_i}{A_i} \int_{-\infty}^{\infty} \text{Im}[R \exp(-i\phi_i)] \left[ \frac{f_i \tau^2}{I_y} - \frac{f_i}{I_i} \right] d\tau, \quad (6b)$$

$$\begin{aligned} \dot{C}_i = & dB_i^2 \left( \frac{I_x}{I_y} + C_i^2 \right) - \frac{A_i^2 Q I_N}{2 I_y} + \\ & \frac{1}{A_i I_i I_y} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} I_l \text{Re}[R \exp(i\phi)] (2f_i \tau + f_i) d\tau - 2C_i \text{Im}[R \exp(-i\phi)] (I_y - I_l \tau^2) f_i \right\} d\tau, \end{aligned} \quad (6c)$$

$$\dot{k}_i = -\frac{2B_i}{A_i I_i} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \text{Re}[R \exp(-i\phi)] f_i d\tau + C_i \int_{-\infty}^{\infty} \text{Im}[R \exp(-i\phi)] f_i \tau d\tau \right\}, \quad (6d)$$

$$\dot{T}_{0i} = -dk_i + \frac{2}{A_i B_i I_i} \int_{-\infty}^{\infty} \text{Im}[R \exp(-i\phi)] f_i \tau d\tau. \quad (6e)$$

设色散控制孤子的稳定传输形状为  $f(\tau_i) = \exp(-\tau_i^2/2)$ , 代入扰动项  $R$  则有

$$I_x = \int_{-\infty}^{\infty} f_i^2 d\tau = \frac{\sqrt{\pi}}{2}, \quad I_y = \int_{-\infty}^{\infty} f_i^2 \tau^2 d\tau = \frac{\sqrt{\pi}}{2}, \quad (7a)$$

$$I_N = \int_{-\infty}^{\infty} f_i^4 d\tau = \frac{\sqrt{2\pi}}{2}, \quad I_i = \int_{-\infty}^{\infty} f_i^2 d\tau = \sqrt{\pi}, \quad (7b)$$

$$\text{Im}[R^* \exp(-i\phi_i)] = -\delta'_g A_i B_i f_i \tau, \quad (8a)$$

$$\text{Re}[R^* \exp(-i\phi_i)] = \delta_g A_i f_i [B_i^2 C_i (T - T_{0i}) - k_i] - Qm A_i f_i |A_j f_j|^2, \quad (8b)$$

将(7)式与(8)式代入方程组(6), 可解得如下的方程组:

$$\dot{A}_i = -\frac{1}{2} A_i B_i^2 d C_i, \quad (9a)$$

$$\dot{B}_i = -B_i^3 d C_i, \quad (9b)$$

$$\dot{C}_i = dB_i^2 (1 + C_i^2) - Q \left( \frac{\sqrt{2}}{2} \right) A_i^2 - 2Qm \left( \frac{E_j}{\sqrt{\pi} B_i^2} \right) P^3 (2P^2 \Delta T^2 - 1) \exp(-P^2 \Delta T^2), \quad (9c)$$

$$\Delta \dot{k} = 2Qm P^3 E_{\text{sol}} \Delta T \exp(-P^2 \Delta T^2) / \sqrt{\pi}, \quad (9d)$$

$$\Delta \dot{T} = -\Delta k d + \delta'_g, \quad (9e)$$

其中  $\frac{1}{P^2} = \frac{1}{B_i^2 + B_j^2}$ ,  $E_{\text{sol}} = \sqrt{\pi} \left( \frac{A_i^2}{B_i} + \frac{A_j^2}{B_j} \right)$  表示孤子总能量。

从方程组中可以看出, 光纤的双折射效应( $\delta'_g$

和  $m$ ) 会打破孤子的简并, 引起不同偏振模之间分离(9d), 导致脉冲展宽(9e), 并影响脉冲的啁啾、脉宽和幅度的演化(9c)、(9b)、(9a), 从而导致脉冲能量的变化。

(9)式表示在常双折射光纤中,孤子脉冲参量的演化规律。在计算方程组(9)时,不同的条件下,对归一化微分群时延 $\delta'_g$ 的处理不同:在常双折射光纤中,与偏振模色散参量 $D_p$ 之间的关系为

$$D_p = \delta'_g T_0 / \sqrt{z_h}, \quad (10)$$

而在随机双折射光纤中, $\delta'_g$ 是随机发生变化的,由于偏振模色散的相干长度 $z_h = \pi/\Delta\beta$ 远小于色散控制孤子的色散长度,按照Gisin等做法,视偏振模色散效应为白噪声源,在此取 $\delta'_g$ 的均方方差值,则归一化微分群时延 $\delta'_g$ 与偏振模色散参量 $D_p$ 之间的关系

$$D_p = \sqrt{\langle \delta_g'^2 \rangle} T_0 / \sqrt{z_h}, \quad (11)$$

研究证明,在长距离传输当中,这样处理的结果误差很小<sup>[2,6]</sup>。

#### 4 结果解析

现在对解析结果方程组(9)进行数值计算,分析图1所示的色散控制孤子在偏振模色散影响下的传输特性。放大器位于 $nZ_d$ 处,高斯准孤子脉冲的初始脉宽 $t_0=5$  ps,载波波长 $\lambda_0=1.55$   $\mu\text{m}$ ,信道的速率 $R=40$  Gb/s,光纤色散值 $D_1=17$  ps/(nm·km)(长度35 km), $D_2=-118.2$  ps<sup>2</sup>/km(长度5 km), $D=0.1$  ps<sup>2</sup>/km,色散长度 $L_D=195$  km, $z_a=z_d=40$  km(归一化 $Z_a=Z_d=0.205$ )。假定单模光纤和补偿光纤的 $\alpha=0.2$  dB/km, $n_2=3.2 \times 10^{-20}$  m<sup>2</sup>/W,

$$A_{\text{eff}}=50 \mu\text{m}^2, z_h=0.1 \text{ km}。$$

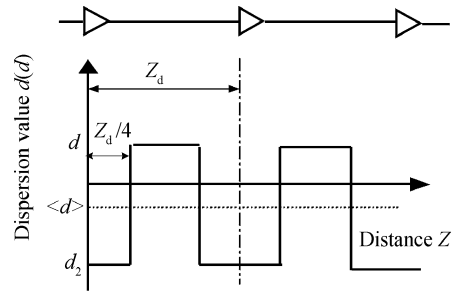


Fig. 1 Dispersion managed fiber line sketch map

结果如图2所示,其中图(2a)显示在不同的偏振模色散参量 $D_p=1$  ps/km<sup>1/2</sup>, 0.5 ps/km<sup>1/2</sup>, 0.3 ps/km<sup>1/2</sup>和0.1 ps/km<sup>1/2</sup>情况下,归一化色散控制孤子能量 $E_{\text{sol}}$ 随距离的变化关系,图(2b)显示归一化脉冲宽度 $1/\sqrt{P^2}$ 随距离的演化关系。

从图中可以看出,偏振模色散参量对色散控制孤子能量、脉宽影响很大,例如 $D_p=1$  ps/km<sup>-1/2</sup>时,脉冲传输至 $24 \times 195$  km=4680 km时,脉冲的能量降为初始能量(归一化初始能量为1)的0.2倍,脉宽(归一化初始脉宽为1)则为初始脉宽的5倍,因此,系统的性能大大降低。当 $D_p=0.3$  ps/km<sup>-1/2</sup>时,图中显示能量降低不到初始能量的一半,脉冲展宽到脉冲比特周期的一半左右,此时系统几乎处于判决线左右。然而,当 $D_p=0.1$  ps/km<sup>-1/2</sup>时,系统性能良好。这个结果和文献[7]数值计算得出的结果一致。

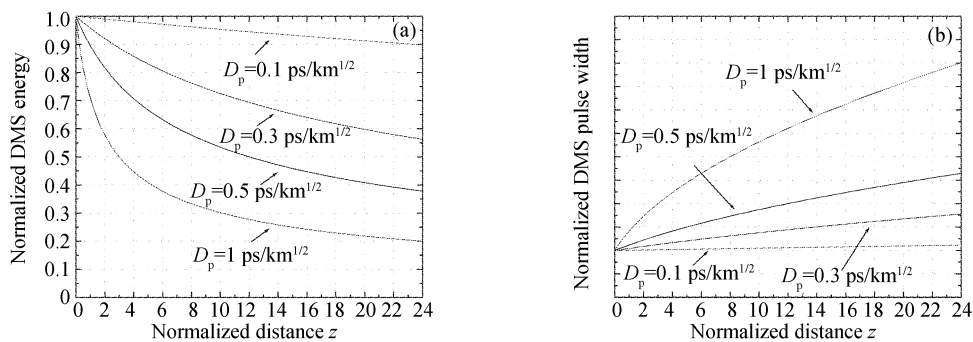


Fig. 2 (a) Evolution of the normalized pulse energy of DMS along the normalized distance for different PMD,

(b) Evolution of the Normalized pulse width of DMS along the normalized distance for different PMD

图3为不同偏振模色散参量情况下,脉冲两个偏振模的均方时间相对位移量,得出的结果显然和上面相似。显然,对于如此高速、长距离的传输系统来说,当偏振模色散很大时,如 $D_p > 0.3$  ps/km<sup>1/2</sup>时,必须考虑采用某些控制手段才行。

图4则在 $D_p=0.1$  ps/km<sup>1/2</sup>时,分别计算了在

线性系统(线性系统中偏振模色散引起的两个偏振模的均方时间走离量为 $\sqrt{\langle \Delta T^2 \rangle} = D_p \sqrt{L}$ <sup>[6]</sup>, $L$ 为传输距离)和色散控制孤子传输系统中,两个偏振模的均方时间走离量的对比,结果显示:与线性系统相比,色散控制孤子能有效抑制偏振模色散引起的脉冲偏振模的走离,从而维持脉冲的稳定传输。

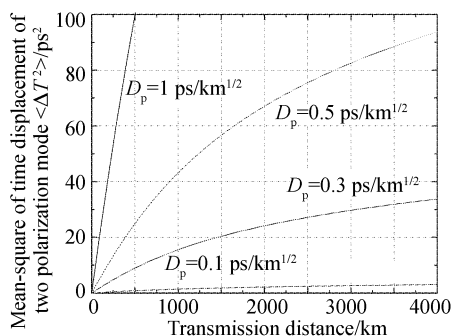


Fig. 3 Evolution of mean square of time displacement of DMS two polarization modes along the propagation line for different PMD

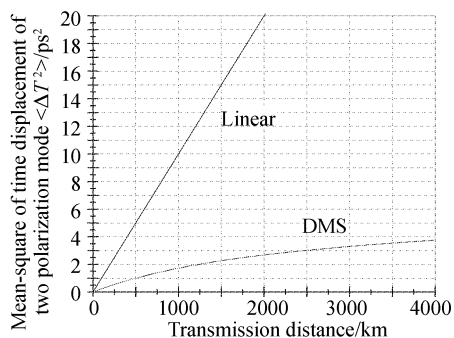


Fig. 4 Evolution mean square of time displacement of DMS and linear pulse two polarization modes along the propagation line for PMD value  $D_p = 0.1 \text{ ps/km}^{1/2}$

**结论** 本文采用变分法解析了考虑主要以偏振模色散为扰动因子的高速色散控制孤子传输系统。研究表明,在高速长距离系统来说,偏振模色散参量值大大影响色散控制孤子的传输脉冲能量和宽度,对色散控制孤子传输系统的设计产生很大的影响,当偏振模色散很大时(比如  $D_p > 0.3 \text{ ps/km}^{1/2}$  时),必须考虑采用某些控制手段(如在线滤波器等),来有效抑制偏振模色散引起的脉冲偏振模的走离效应。同时本文研究结果还证明了色散控制孤子较线性脉冲抗偏振模色散扰动的能力强,具有显著的抑制脉冲两偏振模的均方时间走离的特性,高速长距

离光时分复用(OTDM)传输系统采用色散控制孤子传输方案是明智的选择。

### 参 考 文 献

- 1 Feschini G J, Poole C D. Statistical theory of polarization dispersion in single-mode fibers. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(11):1439~1455
- 2 Cai Ju, Xu Ming, Yan Xionglin. Analysis of statistical characteristics of first and second-order polarization mode dispersion. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(2): 170~175 (in Chinese)
- 3 Wai P K A, Menyuk C R. Polarization mode dispersion decorrelation and diffusion in optical fibers with randomly varying birefringence. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(2):148~157
- 4 Ciprut P, Gisin B, Gisin N *et al.*. Second-order polarization mode dispersion; impact on analog and digital transmission. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(5):757~771
- 5 Sarkimukka S, Djupsjobacka A, Gavler A *et al.*. Mitigation of polarization-mode dispersion in optical multichannel systems. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(10):1374~1380
- 6 Mollenauer L F, Smith K, Gordon J P. Resistance of soliton to the effects of polarization dispersion in optical fibers. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(21):1219~1221
- 7 Sunnerud H, Li J, Xie C *et al.*. Experiment quantification of soliton robustness to polarization-mode dispersion in conventional and dispersion managed systems. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(10):1453~1461
- 8 Suzuki K, Kubota H, Nakazawa M. 1 Tb/s(40 Gb/s×25 channel) DWDM quasi-DM soliton transmission over 1500 km using dispersion managed single mode fiber and conventional C-band EDFAs. *Proc. Optical Fiber Communication Conference*, Anaheim, California, USA, 2001, TuN7-1
- 9 Xie C, Karlsson M, Andrekson P A *et al.*. Robustness of dispersion-managed solitons to the polarization-mode dispersion in optical fibers. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(2):121~123
- 10 Menyuk C R. Nonlinear pulse propagation in birefringence optical fibers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1987, **23**(2):174~176
- 11 Xu Ming, Xan Xiangling, Cai Ju *et al.*. Analysis of performance in dispersion managed soliton system schemes. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(1): 31~36 (in Chinese)