

# 双折射光纤中色散管理孤子研究\*

张向阳<sup>1</sup> 王向朝<sup>2</sup>

(1 江南大学理学院, 江苏无锡 214122)

(2 中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800)

**摘要** 本文研究色散管理孤子在双折射光纤中的传输特性. 应用变分法分析并给出了双折射光纤中色散管理孤子参量演化的常微分方程. 数值分析双折射对孤子参量的影响, 分析发现在双折射光纤中色散管理孤子的宽度和啁啾不再是严格周期性变化. 在色散管理的同时进行周期性偏振补偿可以消除走离效应, 可以产生管理孤子.

**关键词** 光孤子; 变分法; 双折射; 色散管理

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A

## 0 引言

在光纤通信中, 色散是进一步提高通信码率的一个重要限制因素. 为消除色散对脉冲的展宽效应, 人们提出了两种脉冲传输方法, 一种是非线性脉冲即孤子传输; 另一种是线性脉冲传输, 通过色散补偿技术来消除色散对脉冲的展宽效应. 色散管理<sup>[1]</sup>是通过将正常色散与反常色散光纤交替相接来实现色散补偿的一种方法. 色散管理通信系统和普通的非线性孤子通信相比有着独特的优势. 如: 色散管理系统可以有效地降低由于放大所引起的 Gordon-Haus 效应; 除了在色散管理的平均负色散区, 在平均零色散(或平均正色散)区都可以形成稳定的明孤子. 这一发现应用在波分复用系统中, 可以消除由于各段不同负号色散光纤衔接所引起的色散倾斜效应<sup>[2,3]</sup>. 和具有相同平均色散的均匀光纤中的基本孤子相比, 形成色散管理孤子需要很大的能量, 即色散管理孤子能量比基本孤子增强了<sup>[4,5]</sup>. 近年来, 色散管理技术已成为光纤光学的一个重要的研究方向<sup>[6,7]</sup>.

然而, 通常的单模光纤实际上可以传播相互正交的两个模. 研究表明<sup>[8~10]</sup>: 在反常色散域, 通过自相位调制和交叉相位调制的作用可以消除双折射所引起的脉冲两个分量的走离效应; 形成所谓的孤子捕获<sup>[10]</sup>. 然而, 色散管理孤子主要工作在线性区域, 非线性效应只是系统的一种微扰. 这就提出了在色散管理系统中如何消除由于光纤双折射效应引起的走离效应问题.

本文研究双折射光纤中色散管理孤子的传输特性. 应用变分法推导出了色散管理孤子参量演化的

常微分方程, 给出了一种解决走离效应的方法. 并用分步傅里叶变换法对色散管理系统中孤子的传输特性进行模拟. 分析了双折射色散管理系统中, 管理孤子及其两偏振分量各孤子参量的演化过程, 同时数值模拟了在偏振补偿情况下孤子脉冲的演化过程.

## 1 模型及理论分析

忽略四波混频效应和衰减的作用并采用平均群速度坐标系, 光波电场的慢变振幅包络在双折射光纤中传播的耦合 Schrödinger 方程<sup>[8]</sup>可以表示为

$$\frac{\partial u}{\partial \xi} + \sigma(\xi) \frac{\partial u}{\partial s} + \frac{i}{2} k_2(\xi) \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} = i\gamma P_0 (|u|^2 + \frac{2}{3} |v|^2) u \quad (1a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial \xi} - \sigma(\xi) \frac{\partial v}{\partial s} + \frac{i}{2} l_2(\xi) \frac{\partial^2 v}{\partial s^2} = i\gamma P_0 (|v|^2 + \frac{2}{3} |u|^2) v \quad (1b)$$

式中  $\xi$  为传输距离,  $s$  为平均群速度坐标系时间,  $\sigma = \frac{k_1 - l_1}{2}$ , 这里  $k_n = \frac{d^n k}{d\omega^n}$ ,  $l_n = \frac{d^n l}{d\omega^n}$ , ( $n=1, 2$ ) 是光波脉冲在双折射光纤两个偏振方向上的色散关系式.  $\gamma$  为光纤的非线性系数,  $P_0$  为入射脉冲的峰值功率.  $u = A_x / \sqrt{P_0}$ ,  $v = A_y / \sqrt{P_0}$  其中  $A_x$  和  $A_y$  是两个偏振方向上波的振幅包络. 在色散管理系统中,  $k_2(z)$  和  $l_2(z)$  都是传输距离  $z$  的周期函数(如图 1(a)). 下面主要研究脉冲在光纤中传输时两偏振分量相互作用, 所以忽略两偏振方向群速度色散之间的差异认为  $k_2(\xi) = l_2(\xi) = D(\xi)$ . 为了对走离效应的研究, 这里明确表示出的双折射效应  $\sigma(\xi)$  是传输距离的函数.

由式(1)所确定的系统的 Lagrange 密度函数为

$$l = \frac{i}{2} (u^* u_\xi - u u_\xi^*) + \frac{i}{2} (v^* v_\xi - v v_\xi^*) +$$

\* 国家 863 高技术计划(2002AA404050)资助  
Tel: 0510-4998851 Email: xiangyang\_zhang@siom.ac.cn  
收稿日期: 2005-03-07

$$\begin{aligned} & \frac{i}{2}\sigma(u^*u_s - uu_s^*) - \frac{i}{2}\sigma(v^*v_s - vv_s^*) - \\ & \frac{D(\xi)}{2}(|u_s|^2 + |v_s|^2) + \frac{\gamma P_0}{2}(|u|^4 + |v|^4) + \\ & \frac{2\gamma P_0}{3}|u|^2|v|^2 \end{aligned} \quad (2)$$

式中\*表示复共轭. 在变分方法中, 耦合非线性 Schrödinger 方程可以由变分原理  $\delta \int \lambda d\xi ds = 0$  得到. 即耦合 Schrödinger 方程可以由式(3)给出

$$\frac{\delta l}{\delta \varphi^*} = \frac{\partial l}{\partial \varphi^*} - \frac{\partial}{\partial \xi} \frac{\partial l}{\partial (\frac{\partial \varphi^*}{\partial \xi})} - \frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial l}{\partial (\frac{\partial \varphi^*}{\partial s})} = 0 \quad (3)$$

式中  $\varphi$  分别取  $u$  或  $v$ . 以线偏振光入射到双折射色散管理系统中, 设入射脉冲为啁啾高斯脉冲, 即有

$$u(s, \xi) = \cos aA(\xi) \exp\left(-\frac{(s+T_1(\xi))^2}{2a^2(\xi)} + ib(\xi)s^2\right) \quad (4a)$$

$$v(s, \xi) = \sin aA(\xi) \exp\left(-\frac{(s+T_2(\xi))^2}{2a^2(\xi)} + ib(\xi)s^2\right) \quad (4b)$$

$\alpha$  为线偏振光与光纤双折射轴之间的夹角,  $A(\xi)$  为脉冲的复振幅.  $a(\xi)$  和  $b(\xi)$  分别是脉冲强度的特征宽度和啁啾量.  $T_1(\xi)$ ,  $T_2(\xi)$  是脉冲中心位置, 在输入端  $T_1(0) = T_2(0) = 0$ . 将式(4)代入式(2)并对时间  $s$  积分, 得到系统的约化 Lagrange 函数

$$\begin{aligned} L = \int_{-\infty}^{+\infty} l ds = & \frac{\sqrt{\pi}}{2} [ia(A^* \frac{dA}{d\xi} - A \frac{dA^*}{d\xi}) - a^3 |A|^2 \frac{db}{d\xi} - \\ & 2a|A|^2 (T_1^2 \cos^2 \alpha + T_2^2 \sin^2 \alpha) \frac{db}{d\xi} + 4ab|A|^2 \cdot \\ & \sigma(T_1 \cos^2 \alpha - T_2 \sin^2 \alpha) - 4Dab^2 |A|^2 (T_1^2 \cos^2 \alpha + \\ & T_2^2 \sin^2 \alpha) + \frac{\sqrt{2}}{2} \gamma P_0 (\cos^4 \alpha + \sin^4 \alpha) a |A|^4 + \\ & \frac{2\sqrt{2}}{3} \gamma P_0 \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha |A|^4 e^{-\frac{(T_1 - T_2)^2}{2a^2}} - \\ & \frac{D}{2} a^3 |A|^2 (\frac{1}{a^4} + 4b^2)] \end{aligned} \quad (5)$$

应用 Anderson 变分方法<sup>[11]</sup>, 得到脉冲参量演化的常微分方程

$$\frac{d}{d\xi} (a|A|^2) = 0 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{da}{d\xi} + \frac{2}{a} (\cos^2 \alpha T_1 \frac{dT_1}{d\xi} + \sin^2 \alpha T_2 \frac{dT_2}{d\xi}) = \\ 2Dab - \frac{2}{a} \sigma (T_1 \cos^2 \alpha - T_2 \sin^2 \alpha) + \\ 4D \frac{b}{a} (T_1^2 \sin^2 \alpha + T_2^2 \cos^2 \alpha) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{db}{d\xi} = & -\sqrt{2} \left[ \frac{1}{4} (\cos^4 \alpha + \sin^4 \alpha) + \frac{1}{3} (1 - \right. \\ & \left. \frac{(T_1 - T_2)^2}{a^2}) e^{-\frac{(T_1 - T_2)^2}{2a^2}} \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha \right] \frac{E_0}{a^3} \gamma P_0 + \end{aligned}$$

$$\frac{D}{2} (\frac{1}{a^4} - 4b^2) \quad (8)$$

式(6)是能量守恒的结果. 这里  $E_0 = a|A|^2$  是输入脉冲的能量. 由式(7)和式(8)可知, 在双折射光纤中, 输入脉冲的特征宽度和啁啾量同时都与入射光与双折射轴之间的夹角  $\alpha$  和脉冲两偏振分量的中心位置  $T_1, T_2$  有关. 这是由于两偏振分量之间交叉相位调制受走离效应影响的结果. 如果忽略双折射效应, 式(7)和式(8)便退化为文献[2, 12]中的形式.

色散管理系统中非线性只是一个微扰, 忽略非线性的作用, 在线性域, 脉冲两偏振分量在平均群速度坐标系中的群速度分别为  $1/\sigma$  和  $-1/\sigma$ . 所以这里可以取  $T_1 = \sigma\xi, T_2 = -\sigma\xi$ . 这时式(7)和式(8)可以化简为

$$\frac{da}{d\xi} = 2Dab - \frac{4}{a} \sigma^2 \xi + 4D \frac{b}{a} \sigma^2 \xi^2 \quad (9)$$

$$\frac{db}{d\xi} = \sqrt{2} \left[ \frac{1}{4} (\cos^4 \alpha + \sin^4 \alpha) + \frac{1}{3} (1 - \frac{4\sigma^2 \xi^2}{a^2}) \right] \cdot$$

$$e^{-\frac{2\sigma^2 \xi^2}{a^2}} \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha \left] \frac{E_0}{a^3} \gamma P_0 + \frac{D}{2} (\frac{1}{a^4} - 4b^2) \quad (10)$$

式(9)、(10)是在双折射光纤中色散管理孤子参量的动力学方程, 也是本文的一个结论.

## 2 数值分析

色散管理图如图 1(a), 正常色散和反常色散的光纤长度分别为  $L_1, L_2$ , 在数值分析中都取为 100 km. 光纤  $L_1, L_2$  中的群速度色散值分别为 4.8 ps<sup>2</sup>/km, -5.0 ps<sup>2</sup>/km, 非线性系数均为 2.65/W/km. 输入脉冲的峰值功率  $P_0 = 500 \mu\text{W}$ , 全半高宽(FWHM)为 20 ps,  $\alpha = \pi/4$  即两个偏振方向的强度相等. 取  $b(0) = 0$ , 由文献[11]知, 此时要在色散管理系统中形成自相似结构的色散管理孤子, 脉冲必须在色散管理线中的正常色散或反常色散光纤的中点注入系统.

在分析双折射效应对孤子参量的影响中, 设各段连接的光纤的双折射轴都彼此平行. 图 1(b), (c)给出了当  $\sigma = 0.02$  ps/km 时, 脉冲的宽度和啁啾量随传输距离的变化, 其中实线是变分法的结果, 虚线是应用分步傅里叶变换法<sup>[13]</sup>直接对式(1)的数值模拟结果. 当  $\sigma < 0.03$  ps/km 时, 变分法的结果和式(1)的数值结果在基本相同. 通过数值分析发现脉冲的两个分量都可以形成自相似结构的色散管理孤子, 每个分量的宽度的变化都不随双折射强度的增加而变化. 由于双折射的作用, 脉冲的两个分量之间存在走离效应, 结果会使得脉冲展宽(如图 2). 同时, 两脉冲分量之间的交叉相位调制减弱, 使得每个脉冲分量的啁啾量减小, 图 3 给出了这种变

化趋势. 图 4 是  $\sigma=0.04 \text{ ps/km}$  时两个偏振分量和合成脉冲的三维演化曲线, 图中可以明显看出两偏振分量都形成自相似结构的孤立波, 然而, 走离效应使得脉冲展宽, 经过一个管理周期后脉冲的两个

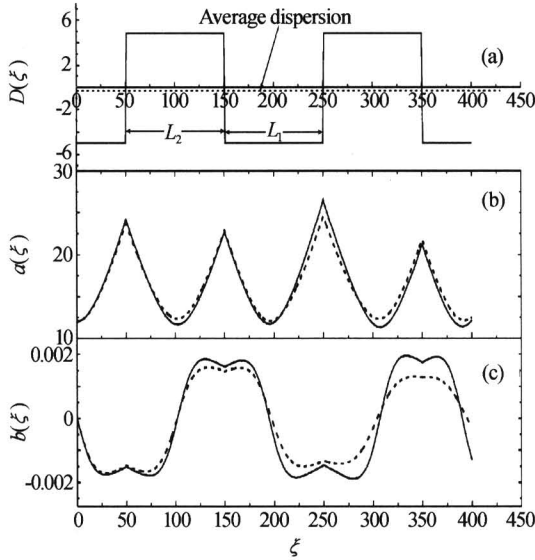


图 1 (a) 色散图; (b)、(c) 分别为双折射光纤中脉冲宽度与脉冲啁啾量沿光纤的变化曲线

Fig. 1 (a) Schematic illustration of the dispersion map. Variations of the parameters of the dispersion-managed soliton in the birefringent fiber, (b) pulse duration, (c) frequency chirp

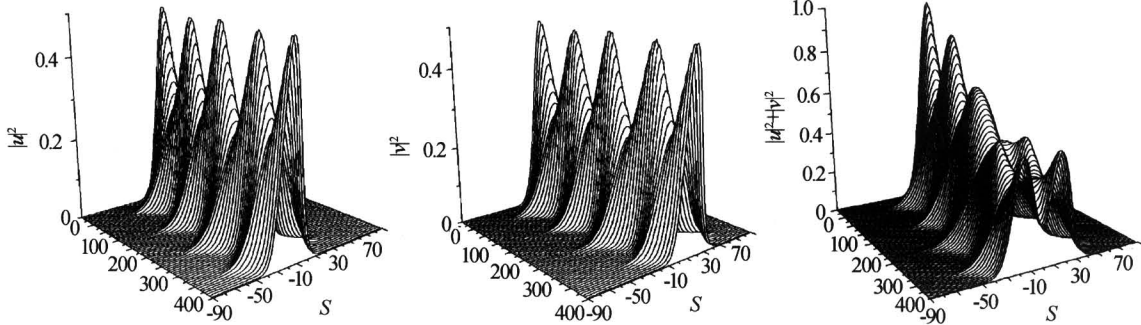


图 4 脉冲沿光纤演化的三维图

Fig. 4 Detail of the evolutions of pulse and its components along the fiber

偏振分量分裂开来.

为了消除双折射引起的脉冲展宽和脉冲的分裂, 在色散管理系统中将彼此连接的光纤的双折射轴垂直相接, 使得  $\sigma(\xi)$  在相邻的两根光纤中改变符号, 即在色散管理的过程中同时进行对偏振引起的走离效应进行周期性补偿. 此时, 如果在管理系统中满足  $|\sigma|L \leq a(0)$ , 这里  $L$  是正常色散和反常色散的光纤长度  $L_1$  或  $L_2$ ,  $a(0)$  为初始脉冲宽度, 这样就可以消除由于双折射引起的走离效应. 图 5 给出了脉冲参量随传播距离的变化. 由于两偏振分量之间

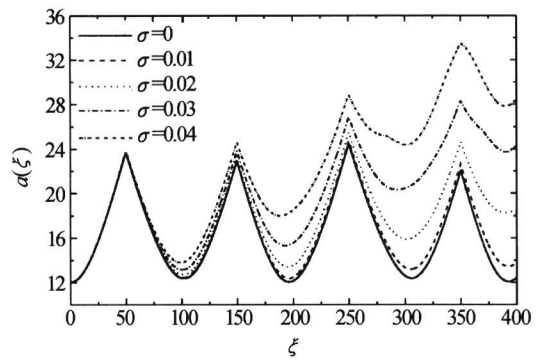


图 2 脉冲宽度随传播距离的变化

Fig. 2 Variation of the pulse duration along the fiber with different values of  $\sigma$

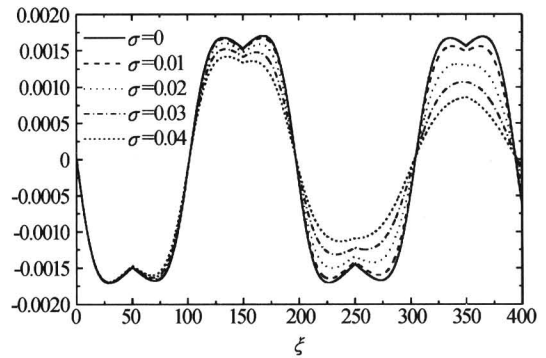


图 3 脉冲啁啾随传播距离的变化

Fig. 3 Variation of the pulse chirp along the fiber with different values of  $\sigma$

的走离被周期性地补偿, 脉冲的宽度也将沿着光纤周期性地变化, 如图 5(a). 双折射的大小只是影响脉冲宽度变化的幅度. 由图 5(b) 可以发现脉冲的啁啾量也是周期性变化, 双折射的大小也只是影响它的变化幅度. 在图 5(c) 中给出了在不同偏振强度下, 两偏振分量中心位置随传输距离的变化. 图 6 是在进行偏振补偿时脉冲沿光纤演化的三维演化曲线 ( $\sigma=0.2 \text{ ps/km}$ ), 图中清楚地显示出在偏振补偿下色散管理系统中形成了自相似结构的管理孤子.

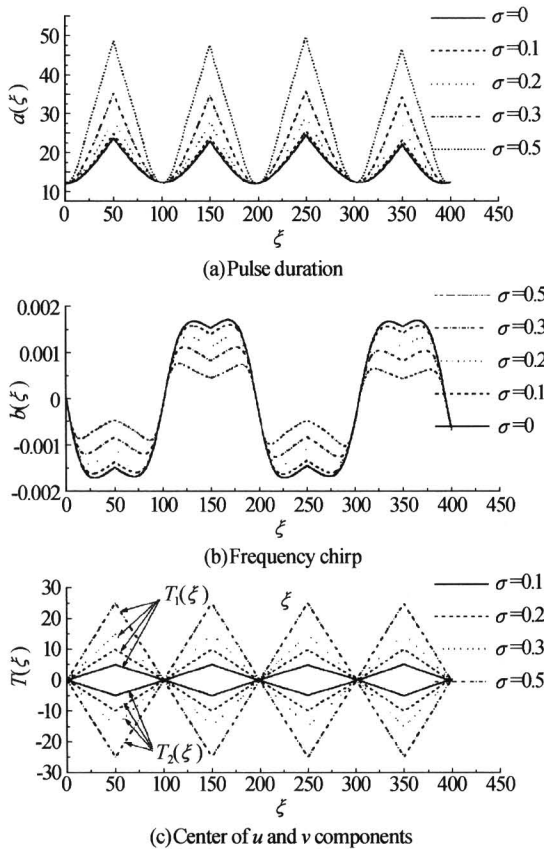


图5 在偏振补偿情况下,脉冲参量随传输距离的变化  
Fig. 5 Variations of the parameters of the dispersion-managed soliton under polarization compensated

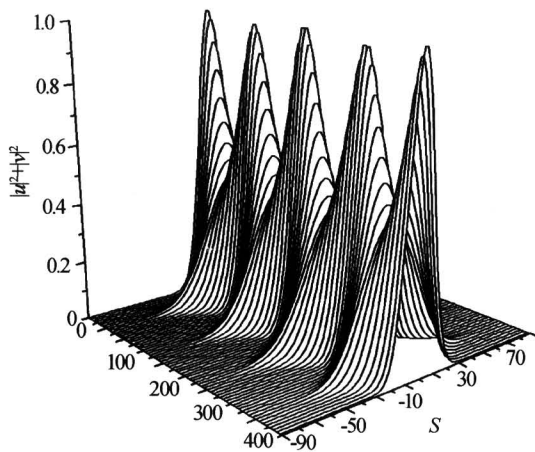


图6 偏振补偿情况下,脉冲沿光纤的演化的三维图  
Fig. 6 Detail of the evolutions of pulse along the fiber under the polarization compensated

### 3 结论

本文应用变分法分析并给出了双折射光纤中色散管理孤子参量的常微分方程;数值分析了双折射效应对孤子传输特性的影响.发现在色散管理系统中脉冲之间存在走离效应,由于走离的影响脉冲的宽度和啁啾都偏离周期变化;在色散管理的同时进

行偏振补偿可以消除走离效应对脉冲传输的影响,产生自相似结构的管理孤子.

### 参考文献

- Gordon J P, Haus H A. Random walk of coherently amplified solitons in optical fiber transmission. *Opt Lett*, 1986, **11**(10):665~667
- Grigoryan V S, Menyuk C R. Dispersion-managed solitons at normal average dispersion. *Opt Lett*, 1998, **23**(8):609~611
- 陈伟成,谢嘉宁,张书敏,等.强双折射光纤中暗孤子的传输特性研究. *光子学报*, 2003, **32**(8):951~955  
Chen W C, Xie J N, Zhang S M, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(8):951~955
- Smith N J, Knox F M, Doran N J, et al. Enhanced power solitons in optical fibres with periodic dispersion management. *Electron Lett*, 1996, **32**(1):54~55
- Gino Biondini, Sarbarish Chakravarty. Nonlinear chirp of dispersion-managed return-to-zero pulses. *Opt Lett*, 2001, **26**(22):1761~1763
- 殷德京,李宏.具有周期非均匀扰动的色散管理系统中的孤子传输. *光子学报*, 2003, **32**(6):718~722  
Yin D J, Li H. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(6):718~722
- 张帆,叶培大.在时域和频域控制下色散管理孤子系统的定时抖动. *光子学报*, 2003, **32**(2):133~136  
Zhang F, Ye P D. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(2):133~136
- Zhang X Y, Wang X Z. Soliton propagation in birefringent optical fiber near the zero-dispersion wavelength. *Optik*, 2004, **115**(1):36~42
- Menyuk C R. Stability of soliton in birefringent optical fibers. II: Arbitrary amplitudes. *J Opt Soc Am B*, 1988, **5**(2):392~402
- Islam M N, Poole C D, Gordon J P. Soliton trapping in birefringent optical fibers. *Opt Lett*, 1989, **14**(18):1011~1013
- Anderson D. Variational approach to nonlinear pulse propagation in optical fibers. *Phys Rev A*, 1983, **27**(6):3135~3145
- Grigoryan V S, Yu T, Golovchenko E A, et al. Dispersion-managed soliton dynamics. *Opt Lett*, 1997, **22**(21):1609~1611
- 张向阳,王向朝.双折射光纤中三阶色散对孤子脉冲传输的影响. *光学学报*, 2004, **24**(1):15~20  
Zhang X Y, Wang X Z. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1):15~20

## Study on Dispersion-managed Soliton in Birefringent Optical Fibers

Zhang Xiangyang<sup>1</sup>, Wang Xiangzhao<sup>2</sup>

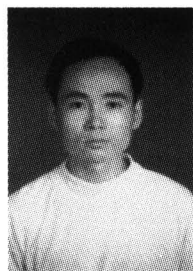
*1 School of Science, Southern Yangtze University, Wuxi 214122*

*2 Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800*

Received date: 2005-03-07

**Abstract** Propagation of dispersion-managed soliton in birefringent optical fibers is considered. A set of ordinary differential equations is obtained by means of approximate variational method. Effects of the birefringence on parameters of the dispersion-managed soliton are analysed numerically. It is found that evolutions of pulse duration and frequency chirp are not periodical due to effects of walk-off. When the walk-off is compensated through rotating the axis of the birefringent by  $\pi/2$  in the dispersion line, managed soliton can be obtained.

**Keywords** Optical soliton; Variational method; Birefringence; Dispersion-managed



**Zhang Xiangyang** was born in Shaanxi, China. He graduated from Shaanxi Normal University, and received Ph. D. degree in Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics in 2003, CAS. His current research interests are mainly propagation of pulses in the nonlinear media.