

文章编号 : 0253-2239(2002)02-0153-04

# 双折射光纤中偏振复用技术的三阶色散抑制和补偿\*

徐文成 陈伟成 罗爱平 张书敏 郭 旗 刘颂豪

(华南师范大学量子电子学研究所, 广州 510631)

摘要: 针对三阶色散对零色散波长附近光脉冲偏振复用技术的破坏作用, 提出了使用色散平坦光纤来抑制三阶色散的影响。然而用色散平坦光纤只能在脉冲短距离传输时有效, 故提出用正负三阶色散交替的光纤补偿三阶色散对光脉冲偏振复用技术的影响。研究发现该补偿方案能有效地抵消线路的总三阶色散, 实现了偏振脉冲长距离稳定传输。

关键词: 双折射光纤; 偏振复用; 三阶色散; 三阶色散补偿

中图分类号: TN25 文献标识码: A

## 1 引 言

基于偏振模色散对未来高速光通信系统的影响, 人们已经提出几种减少或消除偏振模色散的方案<sup>[1-5]</sup>。其中比较好的一种是, 孤子脉冲耦合进强双折射光纤, 利用光纤的非线性效应(交叉相位调制效应), 使孤子脉冲在两偏振主轴上的分量在传输时相互吸引而达到共同的速度, 形成自捕获现象<sup>[6]</sup>, 从而消除两偏振轴脉冲传输的时延(即偏振模色散)。

本文所研究的偏振复用技术就基于上述方案。在强双折射光纤中, 让两孤子脉冲沿光纤的两个偏振轴入射, 利用交叉相位调制效应克服偏振模色散, 自相位调制效应克服群速度色散, 使两偏振脉冲在光纤中互不走离地稳定传输, 在单信道码率不变的情况下就能提高一倍的通信容量。但是目前光通信中采用的工作中心波长在光纤零色散波长附近, 使三阶色散对脉冲传输产生很大的影响。经研究发

现, 无论正负三阶色散均对两偏振分量的某一偏振脉冲有破坏作用, 不利于脉冲长距离传输, 而且三阶色散参量越大, 对偏振脉冲破坏越大。因而有必要研究三阶色散的抑制和补偿问题。若采用色散平坦光纤来抑制三阶色散的影响, 发现它在一定程度上能减少其影响, 但是从长距离传输角度看, 色散平坦光纤仍不能很好地解决问题。因此有必要进一步研究三阶色散的补偿问题。为此, 本文提出正负三阶色散交替补偿的方法, 研究发现, 它能够有效地补偿偏振复用技术中的三阶色散, 使光脉冲的偏振模式能长距离稳定地传输。

## 2 理论模型

研究皮秒量级的光脉冲传输, 若脉冲在线双折射光纤零色散波长附近传输, 需要考虑三阶色散。在无色散区, 耦合非线性薛定谔方程为<sup>[7]</sup>:

$$\frac{\partial A_x}{\partial z} + \delta_b \frac{\partial A_x}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A_x}{\partial t^2} - \frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 A_x}{\partial t^3} + \frac{\alpha}{2} A_x = i\gamma \left( |A_x|^2 + \frac{2}{3} |A_y|^2 \right) A_x, \quad (1)$$

$$\frac{\partial A_y}{\partial z} - \delta_b \frac{\partial A_y}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A_y}{\partial t^2} - \frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 A_y}{\partial t^3} + \frac{\alpha}{2} A_y = i\gamma \left( |A_y|^2 + \frac{2}{3} |A_x|^2 \right) A_y, \quad (2)$$

其中  $\delta_b = (\beta_x - \beta_y)/2$ , 为双折射率系数,  $\beta_x$  和  $\beta_y$  为两偏振方向脉冲群速度的倒数,  $A_j$  表示轴偏振分量脉冲包络 ( $j = x, y$ )。式子左边第三项、第四项代表

二阶色散和三阶色散。 $\beta_2$  和  $\beta_3$  为二阶色散(群速度色散)系数、三阶色散系数。式子右边分别代表自相位调制效应(SPM)和交叉相位调制效应(XPM),  $\alpha$  为光纤损耗系数,  $\gamma$  为非线性系数。

为便于数值求解, 作以下归一化变换:

$$\tau = \frac{t}{T_0}, \quad u = \frac{A_x}{\sqrt{P_0}}, \quad v = \frac{A_y}{\sqrt{P_0}}, \quad \xi = \frac{z}{L_D},$$

\* 广东省青年自然科学基金(980030) \ 广东省教育厅自然科学基金(200019)资助课题。

$T_0$  为入射脉冲初始半宽度(  $1/e$  强度处脉宽 ),  $P_0$  为入射脉冲初始功率,  $L_D = ( T_0^2 / | \beta_2 | )$  为色散距离。得到归一化方程为

$$\frac{\partial u}{\partial \xi} + \delta'_b \frac{\partial u}{\partial \tau} - \frac{i}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} - \delta_p \frac{\partial^3 u}{\partial \tau^3} + \Gamma u = i\gamma N^2 \left( |u|^2 + \frac{2}{3} |v|^2 \right) u, \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial \xi} - \delta'_b \frac{\partial v}{\partial \tau} - \frac{i}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial \tau^2} - \delta_p \frac{\partial^3 v}{\partial \tau^3} + \Gamma v = i\gamma N^2 \left( |v|^2 + \frac{2}{3} |u|^2 \right) v, \quad (4)$$

其中  $\delta'_b = (\beta_x - \beta_y) T_0 (2 | \beta_2 | )$ , 为归一化双折射率参量,  $\delta_p = \beta (2 | \beta_2 | T_0)$  为三阶色散参量。  $N = [ \gamma P_0 T_0^3 ( | \beta_2 | ) ]^{1/2}$ , 整数  $N$  的物理意义为孤子阶数, 本文主要研究基本孤子, 所以  $N = 1$ 。  $\Gamma = (\alpha/2) L_D$  为损耗参量。  $\xi$  为归一化长度,  $\tau$  为归一化时间。

为研究方便, 本文暂时不考虑损耗的影响。实际上, 脉冲损耗可从光纤放大器中得到补偿。沿光纤的两个偏振主轴上同步输入基本孤子脉冲, 其中  $u$  为慢孤子,  $v$  为快孤子。对(3)式、(4)式采用对称分步傅里叶算法<sup>[8]</sup>进行数值模拟。

### 3 数值模拟和分析

#### 3.1 三阶色散的影响

在线双折射光纤中, 若不考虑三阶色散, 两脉冲沿强双折射光纤主偏振轴入射, 恰当地选择孤子阶数  $N$  和归一化双折射参数  $\delta'_b$ , 就能使两偏振脉冲传输中出现自捕获现象, 两偏振脉冲将互不走离且同步等振幅地传输下去, 这就是光脉冲的偏振复用技术。图1为光脉冲以偏振复用技术传输50个归一化距离的演化图, 实线为慢孤子, 虚线为快孤子。从图1可以清晰地看到, 两偏振脉冲总同步地保持着相同峰值功率和脉冲包络, 且相互交叠而不走离地传输。峰值功率在归一化强度的1到1.2周期性震荡。但是当脉冲波长在光纤的零色散波长附近时, 三阶色散将对脉冲传输起作用。图2为脉冲波长在零色散波长附近考虑了三阶色散的影响时偏振脉冲传输50个归一化距离的演化图。图中脉冲传输参数取值为  $\delta'_b = 0.5$ ,  $\delta_p = 0.03$ 。若此时采用色散位移光纤, 工作波长为  $1.55 \mu\text{m}$  附近。对比图1、图2, 发现在三阶色散的影响下, 快慢轴的偏振模式不再同步激发传输, 慢孤子被压缩, 快孤子却因部分能量以色

散波的形式损耗掉而被破坏, 且峰值较慢孤子低很多。针对不同的三阶色散参量进一步研究发现, 正三阶色散参量破坏快轴模式而负三阶色散参量破坏慢轴模式。且随三阶色散参量增大, 对传输模式的破坏作用也越大。若传输脉冲的波长恰好等于零色散波长时, 三阶色散起主要作用, 模式在传输不远距离时就被严重破坏, 两偏振模已不能进行远距离传输。这是因为, 慢孤子的传输方程(1)式中  $\delta'_b$  的符号恰与三阶色散系数符号相反, 正三阶色散在一定程度上补偿了偏振模色散, 增强了交叉相位调制效应对脉冲的压缩作用, 但是对于快孤子,  $\delta'_b$  的符号恰与三阶色散系数符号相同, 二者的联合作用大大削弱交叉相位调制效应, 从而使快慢轴的脉冲通过交叉相位调制效应耦合所得到的能量不同, 慢轴脉冲在传输中得到增强而快轴脉冲在传输中得到抑制。

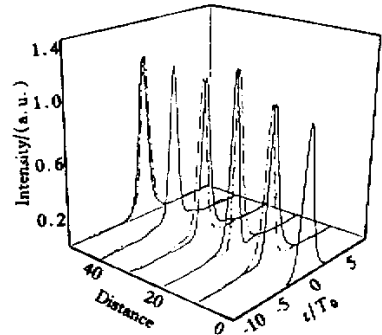


Fig.1 Pulse evolution of fundamental soliton without third-order dispersion for the case of  $\delta'_b = 0.5$ . Solid curve represents slow soliton and dashed curve fast soliton

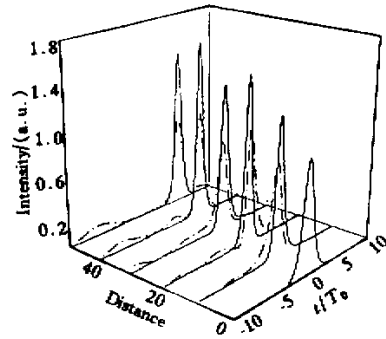


Fig.2 Pulse evolution of fundamental soliton with third-order dispersion. Solid curve represents slow soliton and dashed curve fast soliton

从偏振复用技术来讲, 希望两偏振脉冲能等振幅且保持脉冲波形同步地传输, 传输过程中脉冲能量不能太多地相互耦合和转移, 以避免信息的串道, 因而三阶色散成为零色散波长附近超短光脉冲偏振复用技术的一大障碍, 有必要研究对其抑制和补偿

的问题。

### 3.2 色散平坦光纤对三阶色散的抑制

基于三阶色散对偏振复用技术的影响,人们采用色散平坦光纤来降低三阶色散的影响。色散平坦光纤与其它光纤的明显不同在于,二阶色散参量很小,二阶色散系数比三阶色散系数低一个数量级。在  $1.55 \mu\text{m}$  处,二阶色散参量  $D = 1 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ ,  $\beta_3 = 1.6 \times 10^{-2} \text{ ps}^3/\text{km}$ 。图 3 为两偏振脉冲在色散平坦光纤中传输 50 个归一化距离的演化图。从图 3 很容易发现三阶色散对色散平坦光纤中的两偏振模传输的影响明显低于色散位移光纤  $1.55 \mu\text{m}$  零色散波长处三阶色散的影响(图 2)。而且两偏振模峰值几乎相等,变化不明显,能认为两模是同等激发。但是脉冲传输更远距离时,三阶色散对其偏振模的影响就不能忽略,进一步研究发现,若该偏振传输到 200 个归一化距离时,三阶色散已经对偏振模产生明显的破坏作用。所以,色散平坦光纤只是在短距离传输中对三阶色散有一定的抑制作用,不利于偏振脉冲的长距离传输。

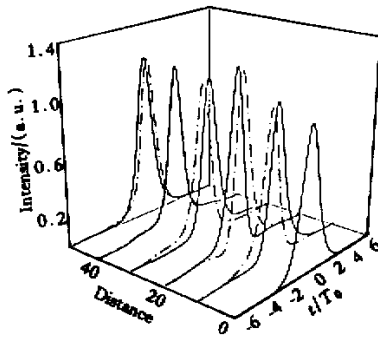


Fig.3 Pulse evolution of fundamental soliton with third-order dispersion in dispersion-flatten fibers. Solid curve represents slow soliton and dashed curve fast soliton

### 3.3 三阶色散的补偿

鉴于脉冲长距离传输时色散平坦光纤仍不能有效地抑制三阶色散的影响,本文提出用交替正负三阶色散的方法来补偿三阶色散。其基本思想是,长距离光纤由许多正负三阶色散系数交替出现的一段段光纤级联组成,并且每段光纤的三阶色散系数的绝对值相等。这与光纤的色散管理和色散补偿光纤<sup>[9]</sup>的思想一样。这种补偿方案被认为能有效地补偿三阶色散的原因是,当光纤正三阶色散起作用时,正三阶色散对慢孤子有压缩作用,慢孤子峰值在传输过程中不断地提高,而快孤子却在正三阶色散的影响下以色散波辐射形式破坏自身偏振模,峰值明显低于慢孤子;但当负三阶色散起作用时,快孤子此时

有压缩效果而慢孤子却因负三阶色散效应被破坏。图 4 为快慢轴孤子只在正三阶色散影响下传输 50 个归一化距离时的波形图。图 5 为快慢轴孤子只在负三阶色散影响下传输 50 个归一化距离的波形图。实线为慢孤子,虚线为快孤子。从两图可以清晰地看到,被破坏的偏振模辐射色散波的同时,脉冲底座相对其另一偏振脉冲在展宽,被压缩的偏振模较稳定传输时(图 1)峰值更高。本文所提出的补偿方案就是基于上述现象,让正负三阶色散周期性交替压缩慢快孤子,以提高各自的峰值功率,从而减少色散波的影响,达到脉冲能比较稳定地传输。

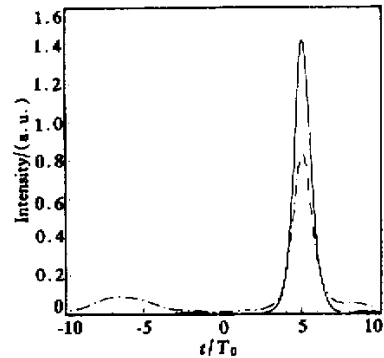


Fig.4 Pulse shape of fundamental soliton with position values of third-order dispersion. Solid curve represents slow soliton and dashed curve fast soliton

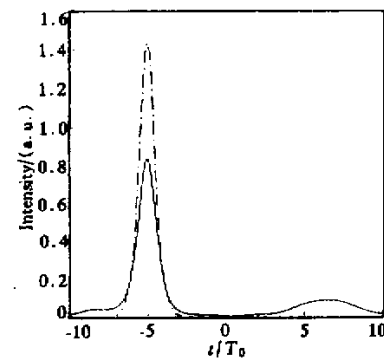


Fig.5 Pulse shape of fundamental soliton with negative values of third-order dispersion. Solid curve represents slow soliton and dashed curve fast soliton

图 6 是采用图 2 的数据参数,并利用三阶色散补偿方案对脉冲进行三阶色散补偿后的演化图。图中可以清楚地看到,偏振脉冲周期性地被破坏和被补偿。图 6 中最终补偿后的偏振脉冲已经相对无畸变了,与图 1 没考虑三阶色散的演化几乎一样。这说明了偏振脉冲在补偿方案下在长距离传输中三阶色散效应得到补偿,整个线路的总三阶色散为零,实现了光脉冲长距离传输的偏振复用,既稳定了两偏

振脉冲的传输,又增加了信息的流量。

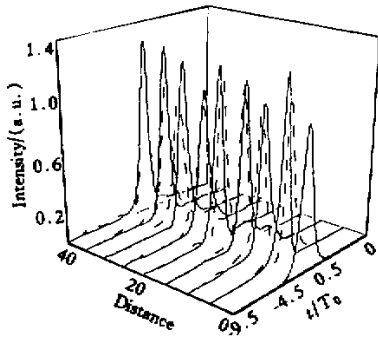


Fig. 6 Pulse evolution of fundamental soliton for the case of the compensation of the third-order dispersion. Solid curve represents slow soliton and dashed curve fast soliton

结论 针对三阶色散对零色散波长超短光脉冲的偏振复用的影响,提出用色散平坦光纤抑制三阶色散效应。从研究结果看,这种方法只是在脉冲短距离传输时有效,从长距离脉冲传输看仍不能很好地解决三阶色散对脉冲传输影响的问题。若采用交替的正负三阶色散光纤,研究发现它能够有效地补偿线路上的三阶色散,使两偏振脉冲不受破坏地稳定传输。这对于超短光脉冲以偏振复用技术进行高速光信息传输有一定的指导意义。

## 参 考 文 献

- [1] Matsumoto M, Akagi Y, Hasegawa A. Propagation of soliton in fibers with randomly varying birefringence: Effects of soliton transmission control. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(4):584~589
- [2] Kubota H, Nakazawa M. Soliton transmission control in time and frequency domains. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1993, **QE-29**(7):2189~2197
- [3] Liu Xiumin, Zhang Xiaoguang, Lin Ning *et al.*. Theoretical analysis reducing the influence of polarization mode dispersion on optical solitons system by synchronous modulation. *Acta Photonica Sinica*(光子学报), 2000, **29**(8):722~725 (in Chinese)
- [4] Xu Kun, Xie Shizhong. PMD in high bitrate optical fiber communication and its compensation technology. *Semiconductor Optoelectronic*(半导体光电), 2000, **21**(1):1~5 (in Chinese)
- [5] Rashleigh S C. Origin and control of polarization effects in single mode fibers. *J. Lightwave Technol.*, 1983, **LT-1**(1~6):312~331
- [6] Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics* (Second Edition). New York: Academic Press, 1995. 258~263
- [7] Horowitz M, Silberberg Y. Nonlinear filtering by use of intensity-dependent polarization rotation in birefringent fibers. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(23):1760~1762
- [8] Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics* (Second Edition). New York: Academic Press, 1995. 50~54
- [9] Yang Bangxiang. Development and applications of optical fiber technology. *World Telecommunications*(世界电信), 1998, (1):24~27 (in Chinese)

## Suppression and Compensation of the Third-Order Dispersion by Polarization Multiplexing Technique in Linearly Birefringent Fibers

Xu Wencheng Chen Weicheng Luo Aiping Zhang Shumin Guo Qi Liu Songhao  
(Institute of Quantum Electronics, South China Normal University, Guangzhou 510631)

(Received 13 October 2000; revised 9 March 2001)

**Abstract:** Dispersion-flatten fibers are used to suppress the third-order dispersion to some extent based on the effect of third-order dispersion on pulse transmission by polarization multiplexing technique with zero dispersion wavelength. However dispersion-flatten fibers are only useful in short distance transmission. A new method is proposed to compensate the effects of the third-order dispersion by means of the cascade of many short fibers with alternate positive and negative values of the third-order dispersion. The method is proved practicable in long distance transmission by numerical simulation.

**Key words:** birefringent fibers; polarization multiplexing; third-order dispersion; compensation of third-order dispersion