

文章编号: 0253-2239(2003)08-0951-4

# 超高偏振模色散光纤中光脉冲传输行为的研究\*

宁提纲 李唐军 刘 艳 傅永军 谭中伟 简水生  
(北方交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

**摘要:** 利用耦合非线性薛定谔方程分析了光脉冲在超高偏振模色散光纤中传输时, 偏振模色散引起脉冲分裂。并用基模的两正交偏振分量耦合走离解释了脉冲分裂的成因。利用偏振模色散为  $237.95 \text{ ps/km}^{1/2}$  的光纤进行了实验验证。

**关键词:** 偏振模色散; 高斯脉冲; 耦合非线性薛定谔方程; 超高偏振模色散光纤

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

## 1 引 言

随着社会的信息化, 用户对通信容量的需求日益增加, 预计在将来全业务服务中每一用户的容量需求可能超过  $100 \text{ Mb/s}$ , 在日益增长需求的推动下, 作为现代长途干线通信主体——光纤通信一直在朝更高速率、更大容量、更长无电中继距离的方向发展。单信道速率不断提升, 从  $2.5 \text{ Gb/s}$  提升到  $10 \text{ Gb/s}$ , 正向  $40 \text{ Gb/s}$  甚至  $160 \text{ Gb/s}$  方向发展, 波分复用(WDM)和密集波分复用(DWDM)也日趋成熟并商用化<sup>[1~3]</sup>。

光纤通信网的不断发展, 就技术而言, 限制光纤向高速率、大容量、长距离的因素主要是光纤的损耗、色散、非线性。掺铒光纤放大器(EDFA)的成功运用, 使光纤损耗对系统的传输距离不再起主要限制作用; 色散补偿光纤、啁啾光纤光栅为解决色度色散(文中均简称为色散)提供了方法<sup>[2,3]</sup>; 今天, 拉曼放大器(Raman amplifier)的成功研制, 为克服光纤损耗及非线性又开辟了一条新的途径<sup>[4]</sup>。

随着单信道传输速率的提高和模拟 CATV 传输带宽的增加, 原来在光纤通信中不太被注意的偏振模色散(Polarization mode dispersion, PMD)问题近来变得十分突出。与色散和光纤非线性一样, 偏振模色散损害系统传输性能, 限制系统传输的比特带宽积和无电中继传输距离, 并被认为是限制高速光纤通信系统传输容量和距离的最终杀手<sup>[5,6]</sup>。

目前, 标准单模光纤的偏振模色散小于  $0.5 \text{ ps/km}^{1/2}$ , 对于  $10 \text{ Gb/s}$  系统, 信号传输的距离限制在  $400 \text{ km}$  以内; 对于  $40 \text{ Gb/s}$  系统, 该距离限制变为  $25 \text{ km}$ 。更为严重的是, 较早敷设的光纤常常具有较高的偏振模色散(甚至大于  $10 \text{ ps/km}^{1/2}$ , 传输  $400 \text{ km}$  的偏振模色散为  $200 \text{ ps}^{[7]}$ )。另外, 用于光纤通信系统偏振模色散补偿的非线性保偏啁啾光纤光栅偏振模色散在  $300 \text{ ps}$  左右<sup>[8]</sup>。虽然偏振模色散导致脉冲宽展的机理不同, 偏振模色散与色散对光纤通信系统具有同样的影响。偏振模色散导致数字系统中造成脉冲失真变形, 使误码率增加, 限制系统的传输带宽; 在模拟系统中, 导致信号失真和信噪比降低, 高阶畸变和偏振依赖损耗(Polarization dependent loss, PDL)导致非线性效应<sup>[5,6]</sup>。由于偏振模色散影响, 在不采取任何措施的情况下, 北美地区有将近  $37\%$  已敷设的光纤系统不能升级到  $10 \text{ Gb/s}$ 。因此, 对偏振模色散的研究, 不仅具有理论价值, 更具有实际价值。偏振模色散补偿, 光脉冲要经历高偏振模色散的媒质, 目前对脉冲在超高偏振模色散光纤中的传输尚未有报道, 我们理论分析与实验研究了光脉冲在  $200 \text{ ps/km}^{1/2}$  以上光纤中的传输。

## 2 理论背景

单模光纤中传输的基模  $LP_{01}$  由两个正交偏振分量  $HE_{11}$  和  $HE_{11}$  组成的, 光纤的双折射引起这两个正交偏振分量走离, 形成偏振模色散。光纤中的偏振模色散是与温度、环境、时间有关的随机变量, 离散随机波片模型(Discrete random waveplate model, DRWM)是与实际光纤比较相符的仿真法, 离散随机波片模型法假定光纤被分为  $N$  段, 每段双

\* 国家“863”项目(2001AA122042)、国家自然科学基金(69999612)、北方交通大学校人才科研基金(2003RC011)资助课题。

E-mail: ntigang@etang.com

收稿日期: 2002-06-13; 收到修改稿日期: 2002-10-14

折射  $\delta\beta$  大小保持不变,但双折射轴的方位角  $\alpha$  的导数为白噪声过程。那么琼斯矩阵由波片的时延矩阵和波片之间的角度矩阵来表示。光脉冲在光纤中传

输,其传输行为可以由耦合非线性薛定谔方程(coupled nonlinear Schrödinger equation, CNLS)描述<sup>[9,10]</sup>:

$$i \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} + \frac{1}{2} \delta\beta \mathbf{\Xi} \mathbf{A} + i 2 \delta\beta \mathbf{\Xi} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} + n_2 k_0 \left[ \frac{5}{6} |\mathbf{A}|^2 \mathbf{A} + \frac{1}{6} (\mathbf{A}^+ \mathbf{p}_3 \mathbf{A}) \mathbf{p}_3 \mathbf{A} + \frac{1}{3} (\mathbf{A}^+ \mathbf{p}_2 \mathbf{A}) \mathbf{p}_2 \mathbf{A}^* \right] = 0, \quad (1)$$

其中  $\mathbf{A} = (\mathbf{A}_x, \mathbf{A}_y)^T$  为一列向量,为正交偏振分量的缓变复包络,上标“T”表示转置,上标“+”表示转置共轭,上标“\*”表示共轭。 $\delta\beta = \beta_x - \beta_y$  为光纤双折射,双折射的微分定义为  $\delta\beta' = \left( \frac{\partial \beta}{\partial \omega} \right)_{\omega_0} = \beta'_x - \beta'_y$ ,并且假定群速度色散  $\beta_2 \approx \beta_x = \beta_y = \beta_2$ ,  $n_2$  为光纤非线性因子,  $k_0 = 2\pi/\lambda$ , 矩阵  $\mathbf{\Xi}$  为

$$\mathbf{\Xi} = \begin{bmatrix} \cos 2\alpha & \sin 2\alpha \\ \sin 2\alpha & -\cos 2\alpha \end{bmatrix} = \mathbf{p}_3 \cos 2\alpha + \mathbf{p}_1 \sin 2\alpha, \quad (2)$$

在(1)式和(2)式中,  $\mathbf{p}_i (i = 0 \sim 3)$  为泡利(Pauli)矩阵,分别为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{p}_0 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, & \mathbf{p}_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{p}_2 &= \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix}, & \mathbf{p}_3 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

利用上面的公式就可以仿真偏振模色散对系统的影响。但解(1)式的方程,最大的难点在于  $\alpha$  变化的长度在 0.3 ~ 100 m,而偏振模色散长度、色散长度、克尔非线性效应的长度等通常在上百甚至上千千米,要精确地解耦合非线性薛定谔方程,采用的计算步长应该取得很小,需要较多的计算时间。

### 3 高斯脉冲在超高偏振模色散光纤中传输的仿真与实验

利用在理论背景中指出的离散随机玻片模型和耦合非线性薛定谔方程就可以仿真偏振模色散对光脉冲传输的影响。为了与实验一致,光纤仿真参量选择用实验测试数据如下:光纤长度 1.18 km,光纤色散  $-102 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ ,纤芯有效截面面积  $20.47 \mu\text{m}^2$ ,偏振模色散为  $237.95 \text{ ps}/\text{km}^{1/2}$ ,非线性因子取  $3.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ ,高斯脉冲半峰全宽(FWHM) 24.3 ps,入纤光功率为 10 dBm,信号波长 1550 nm。用分步快速傅里叶求解高斯脉冲在超高偏振模色散光纤中传输,仿真结果如图 1,实线为传输后的脉冲,点划线为输入的脉冲波形。从图 1(a)可以看出,高斯脉冲经过 400 m 超高偏振模色散光

纤后,脉冲开始分裂,经过 1.18 km 高偏振模色散光纤后,波形严重变形分裂,已经无法识别原来信号。多次仿真结果,波形变形分裂可能不一样,因为偏振模色散的影响是随机的。

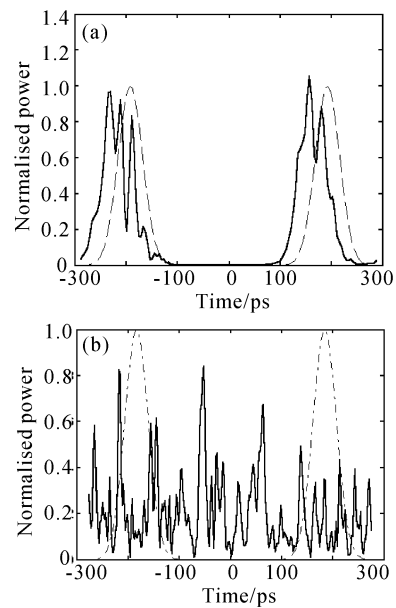


Fig. 1 Simulated result of Gauss pulse transmission over ultra-high PMD fiber. (a) 300 m; (b) 1.18 km

用同样参量的光纤进行实验,对它的多个参量进行了测量。光纤的色散与长度由 EG&G 公司的 CD400 测出,纤芯有效面积利用 EXFO 公司的 NR9200 光纤测试仪得到,偏振模色散由惠普公司 8509B 偏振模色散分析仪测试得到,琼斯矩阵法测得的结果如图 2,其统计平均为  $237.95 \text{ ps}/\text{km}^{1/2}$ ,光

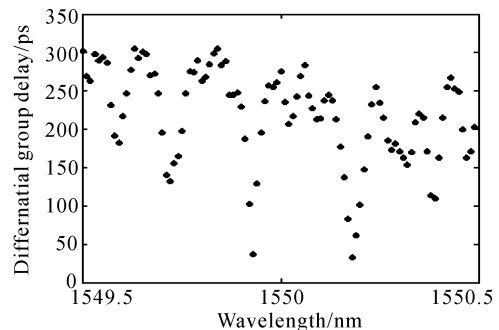


Fig. 2 Measured PMD of fiber

源使用 Santec TSL-210。实验采用的波长为 1550 nm, 输出的脉冲宽度被压缩至 24.3 ps, 调节输出功率为 10 dBm, 经过超高偏振模色散光纤传输后, 用 Tektronix CSA803A 测试输出脉冲, 测试结果如图 3。图 3(a) 为原始脉冲, 图 3(b) 为经过超高

偏振模色散光纤 400 m 传输后的脉冲, 脉冲开始分裂。图 3(c) 为经过超高偏振模色散光纤 1.18 km 传输后的脉冲, 波形分裂严重, 在没有峰的地方也出现了峰, 从图 3(c) 中已经无法判断初始脉冲的情况。

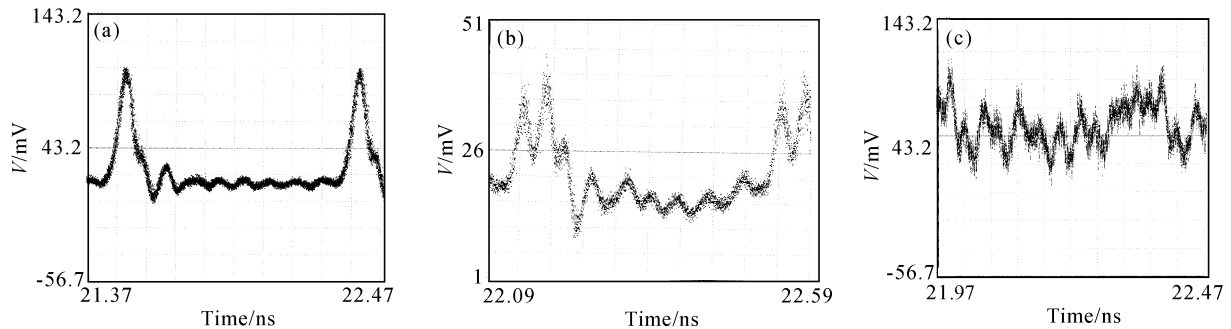


Fig. 3 Experimental result of Gauss pulse transmission over ultra-high PMD fiber. (a) original; (b) 400 m; (c) 1.18 km

实验的直观解释是: 单模光纤中传输的基模是由两个正交偏振分量  $HE_{11}$  和  $HE_{11}$  组成的, 由于存在随机的偏振模色散影响, 输入脉冲的两个正交偏振分量之间能量发生模式耦合, 一个模式的能量耦合到另一个模式中, 由于偏振模色散较大, 产生的走离较大, 两个偏振分量成为独立的两个脉冲, 这样, 脉冲由一个分裂成两个脉冲。偏振模色散的扰动沿光纤长度是不断的, 两个脉冲会分裂成四个脉冲, 继续变成八个、十六个..., 这样不断持续直至光纤末端。最后输出的就是大量的小脉冲, 各子脉冲的时延不一样, 脉冲就在时域散开, 波形分裂。过高的偏振模色散会使波形分裂, 难以恢复, 因此在高速通信系统中, 应该尽可能选用低偏振模色散光纤。利用色散补偿光纤补偿光纤色散时, 应充分考虑偏振模色散的影响, 因为色散补偿光纤的偏振模色散一般较大。本文所用的就是一段色散补偿光纤。对早期敷设的光纤升级时, 应充分考虑到偏振模色散的影响, 另外, 链路偏振模色散不能累积很大后一次补偿, 否则波形劣化, 无法恢复。

**结论** 完成了光脉冲在超高偏振模色散光纤中传输特性的仿真, 光脉冲在超高偏振模色散光纤中传输时, 观察到的不是脉冲展宽, 也是脉冲分裂。并用实验验证了理论分析结果。

### 参 考 文 献

1 Ning Tigang, Jian Shuisheng, Pei Li *et al.*. 4×10 Gb/s 412 km DWDM dispersion compensation using multiwavelength chirped fiber Bragg grating. *Acta Optica*

*Sinica* (光学学报), 2002, **22**(7):839~841 (in Chinese)

2 Ning Tigang, Liu Yan, Tan Zhongwei *et al.*. 4×10 Gb/s WDM transmission over 640 km of standard fiber using cascaded chirped FBG dispersion compensation. *OECC '2002 Japan*. 262~263

3 Gnauck A H, Wiesenfeld J M, Garrett L D *et al.*. 16×20-Gb/s, 400-km WDM transmission over NZDSF using a slope-compensating fiber-grating module. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(4):437~439

4 Jia Dongfang, Li Shichen, Song Lijun. Optimized design of fiber Raman amplifiers. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(7):808~811 (in Chinese)

5 Cammeron J, Chen Liang, Bao Xiaoyi. Impact of chromatic dispersion on the system limitation due to polarization mode dispersion. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(1):47~49

6 Poole C D, Wanger R A. Phenomenological approach to polarization dispersion in long single fibers. *Electronic. Lett.*, 1986, **22**(19):1029~1030

7 Willner A E, Feng K M, Cai J *et al.*. Tunable compensation of channel degrading effects using nonlinearly chirped passive fiber Bragg gratings. *IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron.*, 1999, **5**(5):1298~1311

8 Lee S, Khosravani R, Peng J *et al.*. Adjustable compensation of polarization mode dispersion using a high-birefringence nonlinearly chirped fiber Bragg grating. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(10):1277~1279

9 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

10 Wai P K A, Kath W L, Menyuk C R *et al.*. Nonlinear polarization-mode dispersion in optical fibers with randomly varying birefringence. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1997, **14**(11):2967~2979

## Study on Gaussian Pulse Transmission Over Ultra-High Polarization Mode Dispersion Fiber

Ning Tigang Li Tangjun Liu Yan Fu Yongjun Tan Zhongwei Jian Shuisheng

(*Institute of Lightwave Technology, Northern Jiaotong University, Beijing 100044*)

(Received 13 June 2002; revised 14 October 2002)

**Abstract:** The transmission performance of Gaussian pulses over ultra-high polarization mode dispersion (PMD) fiber is studied. The Gaussian pulses are broken into a series of deformed pulses in the experiment. And the phenomenon has been explained as the walk-off of the deformed pulses caused by ultra-high PMD. Transmission experiment has been done by using a fiber with PMD coefficient of  $237.95 \text{ ps/km}^{1/2}$ . The simulated result is consistent with the experimental one.

**Key words:** polarization mode dispersion (PMD); Gaussian pulse; coupled nonlinear Schrödinger equations; ultra-high PMD fiber

\*\*\*\*\*

(上接封四)

3.7 参考文献 参考文献应是公开出版物,以便审者、编者、读者查证。文后参考文献以 GB/T 7714-1987 顺序编码制列出,每条内容应包括:作者(或译者,论文集编者,多于3人者用等或 *et al.*),文题,期刊名(或书名,会议名),出版年、卷、期(书或会议文集应相应列出出版次、出版地、出版者、出版年、会议地点时间),起止页码。专利文献需列出专利性质及专利号。引用的网上出版物必须是固定的、可一直查阅的文献。参考文献请全部译英,非英语参考文献应用原出版语言写明期刊名、书名、学位论文题目、会议文集名等。具体格式实例如下:

(1) 期刊: Yan Fengping, Yao Yi, Jian Shuisheng. Characteristics of Lyot optical fiber depolarizer. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1996, **16**(6): 848~852 (in Chinese)

(2) 专著: Jin Guofan, Li Jingzhen. *Laser Metrology* (激光测量学). Beijing: Science Press, 1998, 162~165 (in Chinese)

(3) 译著: Born M, Wolf E. *Principles of Optics* (光学原理). Yang Jiasun transl. Beijing: Science Press, 1978, 182~190 (in Chinese)

(4) 学位论文: Zhang Jing. *LD Sensor for Weak Vibration Measurement and its Application in Muscle Vibration Measurement* (LD 微振动传感器及其在肌肉颤动测量中的应用)[MS dissertation]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2000, 21~30 (in Chinese)

(5) 技术标准: National Standardization Technical Committee. GB 3100~3102-93. Quantities and Units (量和单位). Beijing: China Standard Press, 1994

为避免漏引,并扩大你的论文及《光学学报》等中国光学类期刊的国际、国内影响,希望作者增引您自己和同行近2年在《光学学报》等中国光学类期刊上发表的文章作为参考文献。

3.8 资助来源 所投文章项目受到资助的,应标明资助名称及批准号。

3.9 投寄要求 为了加速期刊的电子化、网络化,加快稿件处理速度,从2003年5月1日起一律采用E-mail投稿。稿件需附一份显示来稿创新点的说明(100~300字);标明“稿件内容不涉及国家机密”、“此稿无一稿两投”、“作者排名不再随意更改”的证明文件(盖章),挂号寄往:201800上海800-211信箱光学学报编辑部(请不要交寄个人,以免延误稿件的受理时间)。稿件录用后,请提供文章的电子版。

3.10 本刊现已进入《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和《万方数据数字化期刊网》等,不再另行通知作者,对版权有特殊要求者,请事先声明。

4 审稿程序 稿件收到评审费后分送两位同行评议、主编终审、择优录用;编辑部自收稿日起4个月内将初审意见函告作者,逾期,作者可另行处理原稿,但需告知编辑部。凡具有突破性创新成果的文章,经审稿专家审阅通过后,可以快报形式优先发表。

5 版权转让 在审稿通过后,作者须转让著作权人作品版权(包括各种介质、媒体的版权)给编辑部,并把全部作者签名附单位盖章的版权转让函(空白函在 <http://gxxb.chinajournal.net.cn> “本刊动态”上复制,或在 [www.actaoptica.com](http://www.actaoptica.com) 上下载)寄给编辑部。

6 录用与否 录用稿作者应遵照中国科协有关文件精神,支付适量版面费以聊补期刊的高额亏损。由于近年来来稿量猛增,为了缩短发表周期,请作者精炼文章内容(更不要加附录),否则,超过4页的文章将加收版面费。编辑部有权对录用稿件作编辑意义的增删加工。录用稿一经本刊刊登,本刊享有版权,并向作者酌付稿酬,寄送该期期刊一册和抽印本17份。

7 投稿及回复时,请告知作者的有效联系方式:除“姓名、通讯地址、邮政编码”外;E-mail、电话(办公室及家庭或宿舍)、手机、QQ号等是必不可少的。并请用E-mail回复修改意见和修改稿(修改部分须划线)。最好注明通讯作者(作者单位相对稳定)。