

文章编号: 0253-2239(2004)10-1363-7

## 偏振模色散及非线性效应对 40 Gbit/s 密集波分复用系统的影响\*

孙学明<sup>1,2</sup> 张慧剑<sup>1</sup> 左萌<sup>1</sup> 顾婉仪<sup>1</sup> 徐大雄<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 北京邮电大学光通信中心, 北京 100876)  
(<sup>2</sup> 北京电子科技学院基础部, 北京 100070)

**摘要:** 高速率、大容量的密集波分复用系统是光纤通信系统的最终发展方向,单信道速率达到 40 Gbit/s 时,光纤的非线性效应、偏振模色散现象对系统的影响更加突出。在综合考虑群速度色散、自相位调制、交叉相位调制、四波混合、偏振模色散等因素的基础上,推导了密集波分复用系统中任意信道的耦合非线性薛定谔方程组。利用扩展的分步傅里叶方法对该方程进行了数值计算,通过对 8×40 Gbit/s 密集波分复用系统的仿真,分别研究了非线性效应和偏振模色散对密集波分复用系统的影响。发现由于交叉相位调制和四波混合作用,多波长的密集波分复用系统比单波系统受非线性效应影响严重;系统受偏振模色散与非线性效应的影响程度与输入信号功率有关,在入射光单信道平均功率较低 0.1 mW 时,偏振模色散是影响系统性能的主要因素;当入射光单信道平均功率较高 1 mW 时,系统受非线性效应影响严重。而偏振模色散在使信号脉冲展宽的同时,类似于非零色散位移光纤中的微小色散,对非线性效应又有一定的抑制作用。

**关键词:** 光通信系统; 密集波分复用; 非线性效应; 偏振模色散

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

## Impacts of Polarization Mode Dispersion and Nonlinear Effect on 40 Gbit/s Dense Wavelength Division Multiplexing System

Sun Xueming<sup>1,2</sup> Zhang Huijian<sup>1</sup> Zuo Meng<sup>1</sup> Gu Wanyi<sup>1</sup> Xu Daxiong<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Optical Communications Center, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)  
(<sup>2</sup> Department of Basic Courses, Beijing Electronic and Science Technology Institute, Beijing 100070)

(Received 23 October 2003; revised 15 December 2003)

**Abstract:** Dense wavelength division multiplexing system is a final selection as an optical communication system because of its high speed and big capacities, but the fiber nonlinear effects and polarization mode dispersion limit severely the performance of the system when signal propagates at 40 Gbit/s in a single channel. The coupled nonlinear Schrodinger equations of a single channel in dense wavelength division multiplexing system are derived, considering all factors of group velocity dispersion, self-phase modulation, cross phase modulation, four wave mixing and polarization mode dispersion, and their number results are obtained with extended Split-step Fourier Method. To analyze the impacts of the fiber nonlinear effects and polarization mode dispersion on the optical communication system, the simulated results of a 8×40 Gbit/s dense wavelength division multiplexing system are discussed under different conditions respectively at last. It is found that nonlinear effects influence dense wavelength division multiplexing system more severely than single wave-length system because of the effects of cross

\* 国家自然科学基金(60132020)、国家 863 计划资助课题。

E-mail: sxm@besti.edu.cn

收稿日期: 2003-10-23; 收到修改稿日期: 2003-12-15

phase modulation and four wave mixing. The degree of impacts of polarization mode dispersion and nonlinear effects on system is related to the power of the input signal. When the average power of the input signal is below 0.1 mW, the influence of polarization mode dispersion is dominating; while it is 1 mW, the impact of nonlinear effects is worse than polarization mode dispersion. But polarization mode dispersion, which can widen pulse and is similar to the small chromatic dispersion in G.655 fiber, can mitigate the impact of nonlinear effects.

**Key words:** optical communication system; dense wavelength division multiplexing; nonlinear effect; polarization mode dispersion

## 1 引 言

单信道速率 40 Gbit/s 的密集波分复用系统因具有更高的频谱效率和更低的每比特每公里费用等优点而被视为下一代传输系统<sup>[1]</sup>。但是高速率也导致了新的问题:宽频谱使得一阶和高阶色散的影响更加严重,必须加以补偿<sup>[2,3]</sup>;信号脉冲很窄对非线性效应的容忍能力更差;偏振模色散是 40 Gbit/s 系统必须要考虑的问题,因为仅考虑一阶偏振模色散的影响,高斯脉冲在功率代价 1 dB 的情况下,对于偏振模色散系数为 0.5 ps/km<sup>1/2</sup> (大量已敷光纤均为该值)的传输光纤,40 Gbit/s 信号的受限距离为 25 km。因此,进行系统设计时必须综合考虑各种因素的影响。本文推导了综合考虑群速度色散、自相位调制、交叉相位调制、四波混合、偏振模色散效应的光纤传输方程并给出了数值计算结果。

## 2 理论推导

保偏光纤级联模型可以模拟真实光纤的偏振模

色散行为,图 1 给出了该模型的示意图。每段保偏光纤的长度为  $l_0$ ,  $\Delta\tau_i$  是第  $i$  段保偏光纤快慢轴的时延差,本文取  $\Delta\tau_i = \Delta\tau_0$ 。  $\theta_i$  表示第  $i$  段保偏光纤的快轴与固定坐标系的  $x$  轴的夹角,  $(\theta_{i+1} - \theta_i)$  服从  $0 \sim 2\pi$  的均匀分布且两两独立。该模型的偏振模色散系数表达式如下

$$D_{\text{PMD}} = \sqrt{\frac{8}{3\pi l_0}} \Delta\tau_0 = \sqrt{\frac{8}{3\pi}} \frac{\Delta n}{c} \sqrt{l_0}, \quad (1)$$

式中  $\Delta n$  为快慢轴折射率差,  $c$  为真空光速。若已知偏振模色散系数,即可求出  $\Delta n$ 。

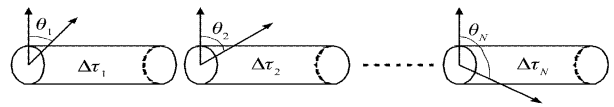


Fig. 1 Sketch map of polarization maintain fiber concatenation model

光信号在光纤中传输满足非线性薛定谔方程,下面推导路密集波分复用光信号在保偏光纤中传输所满足的方程。在通信上只对光信号的包络感兴趣,假设第路信号具有下面形式的电场

$$\mathbf{E}_l(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} F_l(x, y) A_{lx}(z, t) \exp[i(\omega_l t - \beta_{lx} z)] + c. c. \\ F_l(x, y) A_{ly}(z, t) \exp[i(\omega_l t - \beta_{ly} z)] + c. c. \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} F(x, y) A_{lx}(z, t) \exp[i(\omega_l t - \beta_{lx} z)] + c. c. \\ F(x, y) A_{ly}(z, t) \exp[i(\omega_l t - \beta_{ly} z)] + c. c. \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中  $F_l(x, y)$  是第  $l$  路信号的横模,由于采用单模传输可以认为  $F_l(x, y)$  均为  $F(x, y)$ ,  $A_{lp}(z, t)$  是第  $l$  路信号的  $p$  ( $p = x, y$ ) 分量的慢变包络,  $\beta_{lp}$  是第  $l$  路信号的  $p$  ( $p = x, y$ ) 分量的传输常量,  $c. c.$  表示复共轭。 $N$  路信号总电场可以写成

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \sum_{l=1}^N F(x, y) A_{lx}(z, t) \exp[i(\omega_l t - \beta_{lx} z)] + c. c. \\ \sum_{l=1}^N F(x, y) A_{ly}(z, t) \exp[i(\omega_l t - \beta_{ly} z)] + c. c. \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \sum_{l=1}^N E_{lx}(z, t) \exp[i(\omega_l t - \beta_{lx} z)] + c. c. \\ \sum_{l=1}^N E_{ly}(z, t) \exp[i(\omega_l t - \beta_{ly} z)] + c. c. \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中  $E_{lp} = F(x, y)A_{lp}(z, t)$ 。非线性电极化率

$$p_{NL}(r, t) = \epsilon_0 \chi^{(3)} : \mathbf{EEE} = \epsilon_0 \begin{bmatrix} \sum_{rst} \chi_{xrst}^{(3)} E_r E_s E_t \\ \sum_{rst} \chi_{yrst}^{(3)} E_r E_s E_t \\ 0 \end{bmatrix}, \tag{4}$$

其中  $r, s, t = x, y, z$ 。x, y 是保偏光纤的本征轴。在石英光纤中可取

$$\chi_{xxyy}^{(3)} = \chi_{xyxy}^{(3)} = \chi_{xyyx}^{(3)} = \frac{1}{3} \chi_{xxxx}^{(3)}$$

另外,  $p_{NL}(r, t)$  还可以表示为

$$P_{NL}(r, t) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \sum_{l=1}^N p_{lx} \exp[i(\omega_l t - \beta_{lx} z)] + c. c. \\ \sum_{l=1}^N p_{ly} \exp[i(\omega_l t - \beta_{ly} z)] + c. c. \\ 0 \end{bmatrix}, \tag{5}$$

将(3)式代入(4)式,对比(4)式、(5)式可以得到

$$P_{lx} = \frac{3\epsilon_0 \chi_{xxxx}^{(3)}}{4} \left\{ |E_{lx}|^2 + 2 \sum_{j=1, j \neq l}^N |E_{jx}|^2 + \frac{2}{3} \sum_{j=1}^N |E_{ly}|^2 + \sum_{\substack{j, k, m, j \neq m \text{ 且 } k \neq m \\ \omega_l = \omega_j + \omega_k - \omega_m}} (2 - \delta_{jk}) E_{jx} E_{kx} E_{mx}^* \exp[i(\beta_{lx} + \beta_{mx} - \beta_{jx} - \beta_{kx})z] + \frac{2}{3} \sum_{\substack{j, k, m, k \neq m \\ \omega_l = \omega_j + \omega_k - \omega_m}} E_{jx} E_{ky} E_{my}^* \exp[i(\beta_{lx} + \beta_{my} - \beta_{jx} - \beta_{ky})z] + \frac{1}{3} \sum_{\substack{j, k, m \\ \omega_l = \omega_j + \omega_k - \omega_m}} (2 - \delta_{jk}) E_{jy} E_{ky} E_{mx}^* \exp[i(\beta_{lx} + \beta_{mx} - \beta_{jy} - \beta_{ky})z] \right\}, \tag{6}$$

上式右端大括号内第一项对应非线性效应的自相位调制和交叉相位调制,后面三项对应四波混合。因为光纤中的四波混合大多数属于部分简并的情形,即上式中  $j = k$ , 这样

$$\begin{aligned} \beta_{lx} + \beta_{mx} - \beta_{jx} - \beta_{kx} &= \beta_{lx} + \beta_{mx} - 2\beta_{jx} = \beta'_{jx} (\omega_m - \omega_j)^2, \\ \beta_{lx} + \beta_{my} - \beta_{jx} - \beta_{ky} &= \beta'_{jx} (\omega_m - \omega_j)^2 + \frac{\Delta n}{c} (\omega_m - \omega_j), \\ \beta_{lx} + \beta_{mx} - \beta_{jy} - \beta_{ky} &= \beta'_{jx} (\omega_m - \omega_j)^2 - 2 \frac{\omega_j \Delta n}{c}, \end{aligned}$$

代入数据计算可以发现

$$\begin{aligned} |\beta'_{jx} (\omega_m - \omega_j)^2| &\ll \left| \beta'_{jx} (\omega_m - \omega_j)^2 - 2 \frac{\omega_j \Delta n}{c} \right|, \\ \left| \beta'_{jx} (\omega_m - \omega_j)^2 + \frac{\Delta n}{c} (\omega_m - \omega_j) \right| &\ll \left| \beta'_{jx} (\omega_m - \omega_j)^2 - 2 \frac{\omega_j \Delta n}{c} \right| \end{aligned}$$

上面两式左右端大约相差 3 个数量级,比较而言含有  $\exp\left\{i\left[\beta'_{jx} (\omega_m - \omega_j)^2 - 2 \frac{\omega_j \Delta n}{c}\right]z\right\}$  的项属于相位严重失配的项,可以将其忽略,(6)式可以简化为

$$P_{lx} = \frac{3\epsilon_0 \chi_{xxxx}^{(3)}}{4} \left\{ \left( |E_{lx}|^2 + 2 \sum_{j=1, j \neq l}^N |E_{jx}|^2 + \frac{2}{3} \sum_{j=1}^N |E_{ly}|^2 \right) E_{lx} + \sum_{\substack{j, m, j \neq m \\ \omega_l = 2\omega_j - \omega_m}} E_{jx}^2 E_{mx}^* \exp[i\beta'_{jx} (\omega_m - \omega_j)^2 z] + \frac{2}{3} \sum_{\substack{j, m, j \neq m \\ \omega_l = 2\omega_j - \omega_m}} E_{jx} E_{jy} E_{my}^* \exp\left\{i\left[\beta'_{jx} (\omega_m - \omega_j)^2 + \frac{\Delta n}{c} (\omega_m - \omega_j)\right]z\right\} \right\}, \tag{7}$$

参照非线性薛定谔方程的推导过程<sup>[4]</sup>,可以得到适用于密集波分复用系统的同时考虑偏振模色散及各种非

线性效应的光纤传输方程组

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_{lp}}{\partial z} + \frac{\alpha}{2} A_{lp} - \beta'_{lp} \frac{\partial A_{lp}}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta''_{lp} \frac{\partial^2 A_{lp}}{\partial t^2} + \frac{1}{6} \beta'''_{lp} \frac{\partial^3 A_{lp}}{\partial t^3} = i\gamma_l \left( |A_{lp}|^2 + 2 \sum_{j=1, j \neq l}^N |A_{jp}|^2 + \frac{2}{3} \sum_{j=1}^N |A_{jq}|^2 \right) A_{lp} + \\ i\gamma_l \sum_{\substack{j, m, j \neq m \\ \omega_l = 2\omega_j - \omega_m}} A_{jp}^2 A_{mq}^* \exp[i\beta''_{jp} (\omega_m - \omega_j)^2 z] + \\ i\gamma_l \frac{2}{3} \sum_{\substack{j, m, j \neq m \\ \omega_l = 2\omega_j - \omega_m}} A_{jp} A_{jq} A_{mq}^* \exp \left\{ i \left[ \beta''_{jp} (\omega_m - \omega_j)^2 + \frac{\Delta n}{c} (\omega_m - \omega_j) \right] z \right\}, \end{aligned} \quad (8)$$

式中  $p, q = x, y$  且  $p \neq q, \gamma_l$  为第  $l$  路的非线性系数, 定义为

$$\gamma_l = n_2 \omega_l / (cA_{\text{eff}}),$$

$A_{\text{eff}}$  称为有效纤芯截面积。由图 1 的级联模型, 前一段保偏光纤的输出信号与后一段保偏光纤的输入信号满足如下关系<sup>[5]</sup>:

$$\begin{bmatrix} A_{lx}^{(j+1-\text{in})} \\ A_{ly}^{(j+1-\text{in})} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi_j & \exp(i\varphi_j) \sin \psi_j \\ -\exp(-i\varphi_j) \sin \psi_j & \cos \psi_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{lx}^{(j-\text{out})} \\ A_{ly}^{(j-\text{out})} \end{bmatrix},$$

式中右上角标 ( $j_{\text{in}}$ ) 和 ( $j_{\text{out}}$ ) 分别表示第  $j$  段保偏光纤的输入信号和输出信号。  $\psi_j (= \theta_{j+1} - \theta_j)$  与  $\varphi_j$  (随机相位) 均服从  $0 \sim 2\pi$  的均匀分布且两两独立。

### 3 数值分析

一般来说, 方程组(8)没有解析解而只能数值求解, 利用其仿真  $8 \times 40$  Gbit/s 密集波分复用系统, 信道间隔为 100 GHz, 光放大器采用理想的掺铒光纤放大器, 可完全补偿光纤损耗。每路输入信号为 64 bit 伪随机超高斯脉冲, 每个码元抽样点数为 64 个, 平均功率为 1 mW。在小信号近似和只考虑一阶偏振模色散的条件下, 超高斯脉冲的功率代价不存在解析表达式, 其 1 dB 功率代价的受限距离有待进一

步研究。又因本文中输入信号光功率在级联光纤中存在模式耦合, 且信号在传输过程中偏振模色散与非线性效应相互作用, 因此不受 40 Gbit/s 信号仅考虑偏振模色散时的距离限制, 系统采用 6 段 80 km G. 655 光纤级联而成。计算利用扩展的分步傅里叶方法<sup>[6]</sup>, 并在单步计算中采用二次叠代以提高精度。为了消除随机因素的影响, 仿真中没有考虑自发辐射噪声并且在多次计算时相应的随机数发生器采用同一随机数种子。系统框图如图 2 所示。

光纤参量取 G. 655 的典型值, 第一路信号中心波长为 1550 nm, 色散补偿光纤不考虑偏振模色散, 其长度为 16 km, 恰好能完全补偿 G. 655 光纤第一信道的色散。仿真中所采用两种光纤的参量值见表 1。

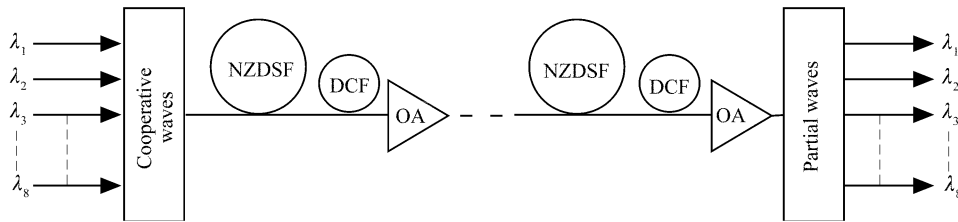


Fig. 2 Sketch map of system

Table 1 The typical attributes of two kind fibers

Fiber kinds	G. 655	DCF
Attenuation coefficient / (dB/km)	0.22	0.5
Effective area / $\mu\text{m}^2$	64	20
Nonlinear refractive index / ( $\text{m}^2/\text{W}$ )	$2.6 \times 10^{-20}$	$2.6 \times 10^{-20}$
1550 nm dispersion coefficient / [ $\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ ]	3	-48
1550 nm dispersion slope / [ $\text{ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ ]	0.045	-0.7
Polarization mode dispersion coefficient / ( $\text{ps}/\text{km}^{1/2}$ )	0.5	—

为观察偏振模色散和非线性效应对密集波分复

用系统的影响, 分别对系统输入和输出信号的脉冲波

形和眼图作比较。输出结果分为四种情况：不考虑偏振模色散的单波系统输出信号的脉冲波形和眼图[图 4(a)];考虑偏振模色散的单波系统输出信号的脉冲波形和眼图[图 4(b)];不考虑偏振模色散的 8 波系

统的第一路输出信号的脉冲波形和眼图[图 5(a)];考虑偏振模色散的 8 波系统的第一路输出信号的脉冲波形和眼图[图 5(b)]。

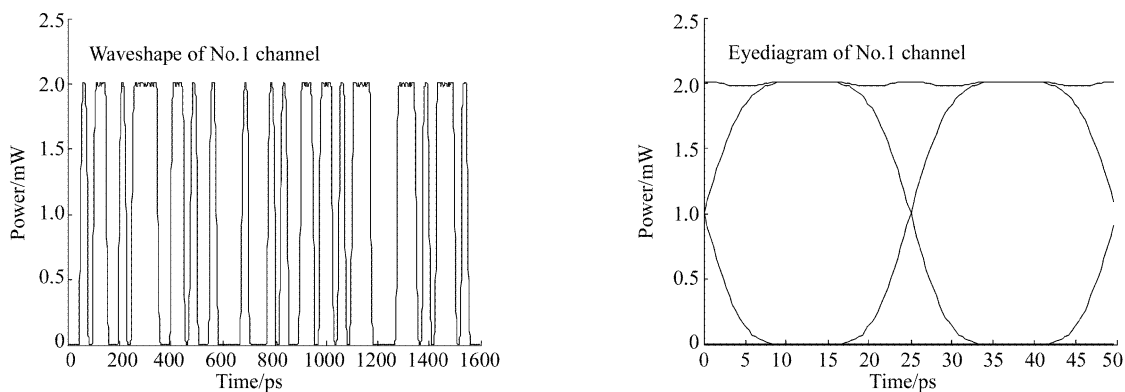


Fig. 3 Wave plot and eye diagram of original signal

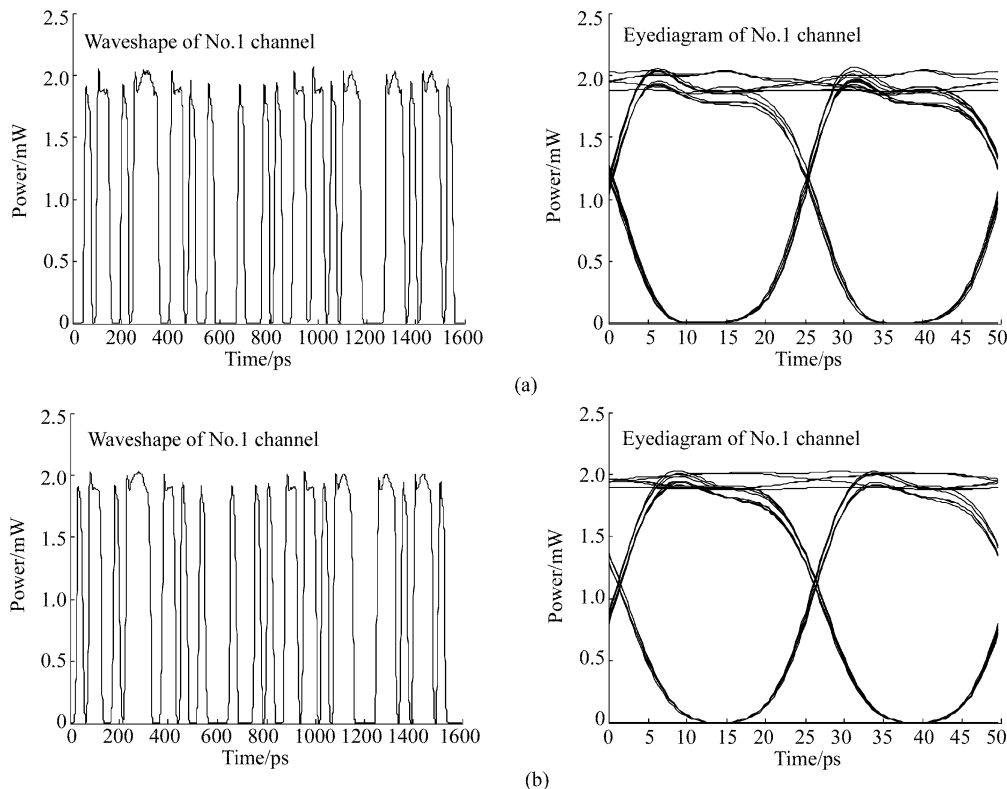


Fig. 4 Wave plot and eye diagram of single channel after propagation 480 km. (a) Without polarization mode dispersion; (b) with polarization mode dispersion

比较图 3,图 4,图 5 可以发现:不考虑偏振模色散时,单波系统的自相位调制效应使得信号发生畸变,脉冲前沿出现过冲;多波长系统还要引入交叉相位调制及四波混合,这使得波形进一步恶化眼皮变厚;考虑偏振模色散后,脉冲出现随机相移并且有一定展宽,但是非线性效应的影响得到了一定程度的抑制,这一点从图 6 也能看到。图 6 给出了不同信道数

密集波分复用系统的眼图张开度损伤随距离的变化情况,虚线和实线分别为不考虑偏振模色散和考虑偏振模色散的结果。由于偏振模色散具有随机性,实线的结果都是通过 20 次计算取平均得到的。当信号功率较小,单路信号平均功率为 0.1 mW 时,考虑偏振模色散的系统眼图张开度损伤要劣于不考虑偏振模色散的系统,说明光纤非线性效应较偏振模色散影响

弱[图 6(a)];信号功率较大,单路信号平均功率为 1 mW时,眼图劣化加剧,但考虑偏振模色散的系统眼图张开度损伤要优于不考虑偏振模色散的系统[图 6(b)],说明非线性效应是影响系统性能的主要因素。由上述比较,单路系统考虑偏振模色散前后眼图张开度损伤变化不大(图 4),而多波长系统考虑偏振模色散时的眼图张开度损伤要优于不考虑偏振模色散时的眼图张开度损伤(图 6),这表明偏振模色散

对非线性效应有一定的抑制作用。这是因为偏振模色散使得信号展宽,信号峰值瞬时功率下降,同时偏振模色散降低了四波混频的相位匹配条件,从而削弱了非线性效应。但是信号峰值瞬时功率的下降会导致信号光消光比下降,Q 因子减小,进而影响系统的误码率。因此,偏振模色散和非线性效应是 40 Gb/s 密集波分复用系统必须要克服的问题。

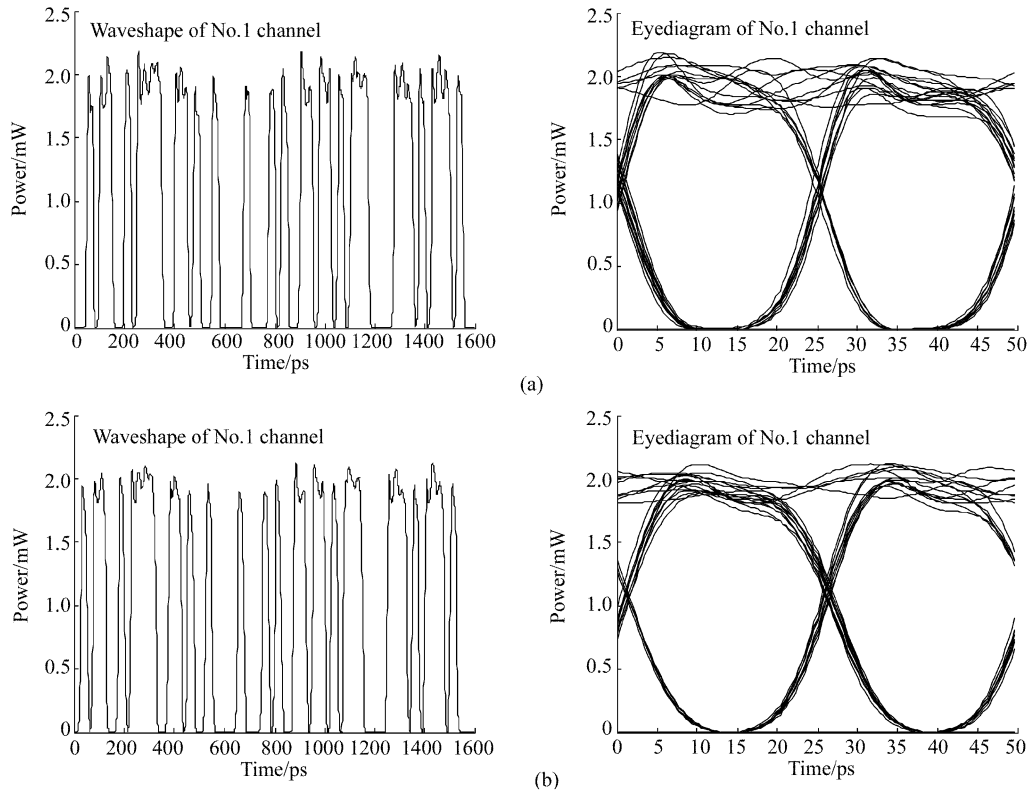


Fig. 5 Wave plot and eye diagram of NO. 1 of eight channels after propagation 480 km. (a) without polarization mode dispersion, (b) with polarization mode dispersion

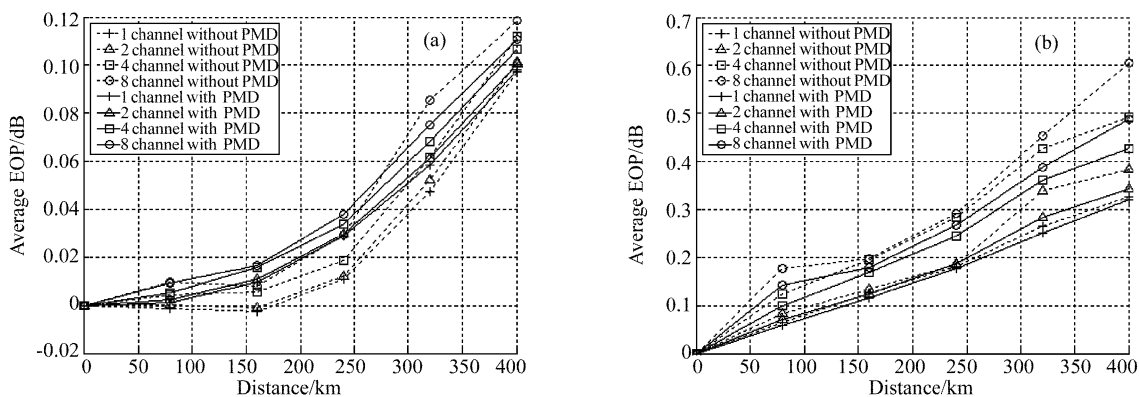


Fig. 6 Relation diagram of eye opening penalty and propagation distance. (a) the average power of a single channel is 0.1 mW, (b) the average power of a single channel is 1 mW

**结论** 推导了综合考虑偏振模色散、自相位调制、交叉相位调制、四波混频的密集波分复用系统的传输方

程组,并对 40 Gb/s 密集波分复用系统进行了数值模拟。结果表明,信号功率较小时偏振模色散对系统影

响较大;信号功率较大时,非线性效应占主导地位,但偏振模色散对非线性效应有一定抑制作用。若将偏振模色散看作非零色散位移光纤中的微小色散效应,本文的仿真结果与实际密集波分复用系统中存在的现象是一致的,因此,本文得出的光纤传输方程是正确的。基于以上分析,40 Gb/s 密集波分复用系统必须综合考虑各种因素的影响,本文结果可用于高速长距离密集波分复用系统的辅助设计和分析。

### 参 考 文 献

- 1 Zhu B, Nelson L, Leng L *et al.*. Transmission of 1.6 Tb/s ( $40 \times 42.7$  Gb/s) Over Transoceanic Distance with Terrestrial 100-km Amplifier Spans. *OFC2003*, FN2: 742~743
- 2 Ning Tigang, Jian Shuisheng, Pei Li *et al.*.  $4 \times 10$  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)
- 3 Li Tangjun, Ning Tigang, Wang Muguang *et al.*. Dispersion compensators based on overlapped linearly chirped fiber gratings for DWDM systems. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2001, **B10**(6): 417~421
- 4 Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics Second Edition*. New York: The Institute of Optics University of Rochester, 1995
- 5 Wai P K A, Menyuk C R, Chen H H. Stability of solitons in randomly varying birefringent fibers. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(16): 1231~1233
- 6 Wang Jianquan, Gu Wanyi. The analysis of fiber nonlinear effects. *J. Beijing University of Posts and Telecommunications* (北京邮电大学学报), 2003, **26**(1): 73~77 (in Chinese)