

文章编号: 0258-7025(2002)05-0429-04

偏振模色散对 200 Gbit/s 零路径色散控制 光纤链系统的影响

郭淑琴¹, 杨荣草², 周国生², 吴德明³, 徐安士³

(¹ 山西大学¹ 物理系, ² 电子系, 山西太原 030006
³ 北京大学区域光纤通信网与新型光通讯系统国家重点实验室, 北京 100871)

摘要 基于一种二阶和三阶色散都作了完全补偿(路径平均色散为零)的光纤级联系统模型,用数值法研究了偏振模色散对皮秒光脉冲传输的影响。在零路径色散补偿系统中,线性色散得以完全补偿,为了减小非线性效应引起的脉冲窄化,系统必须保持较小的功率,但这样会影响系统的信噪比。计算结果表明,偏振模色散与非线性效应相互平衡,可使系统在较高的功率下保持脉冲宽度基本不变,从而获得较好的传输性能。

关键词 偏振模色散, 随机双折射, 色散控制孤子, 高速光通讯

中图分类号 TN 012 文献标识码 A

Influence of Polarization Mode Dispersion on the Zero-averaged-path Dispersion-managed Optical Fiber Links at 200 Gbit/s

GUO Shu-qin¹, YANG Rong-cao², ZHOU Guo-sheng², WU De-ming³, XU An-shi³

(¹Physical Department, ²Electronic & Information Science Department, Shanxi University, Taiyuan 030006; ³National Laboratory on Local Fiber-optic Communication Networks & Advanced Optical Communication Systems, Peking University, Beijing 100871)

Abstract Through numerical simulation, it is demonstrated that, at zero-averaged-path dispersion managed optical fiber links, after both second-order dispersion and third-order dispersion are full-compensated, nonlinear effect can make optical pulse narrower. So, optical pulse's peak power has to be kept very small. However, when polarization mode dispersion is considered, the nonlinear effect can be balanced. As a result, the system can be operated in higher power, so that signal-to-noise ratio of system will be improved.

Key words polarization mode dispersion, birefringence, dispersion-managed-soliton, high-speed optics communication

1 引言

网络时代的到来促进了通信技术的进一步发展。就光纤而言,限制系统性能的主要因素包括衰减、色散和非线性效应,以及最近几年引起注意的偏振模色散(PMD)。掺铒光纤放大器(EDFA)的发明及各种色散补偿技术的实施基本上解决了损耗和群速度色散的问题,各种新型光纤如非零色散移位光纤(NZDSF)使群速度色散量降到最小,而大有效面

积光纤(LEAF)的非线性效应非常低。至此,偏振模色散对系统的影响就变得越来越突出,随着传输容量的进一步增长,PMD有可能成为限制系统性能的主要因素,因此受到人们的普遍关注。

1986年,C. D. Poole等首次提出双折射光纤中偏振主态(PSP)的概念^[1],偏振模色散是指以两正交偏振主态方向入射的光脉冲在光纤的输出端出现一定的时延差,或光脉冲入射时与主轴存在一定

收稿日期:2001-03-02; 收到修改稿日期:2001-05-14

作者简介:郭淑琴(1970—),女,山西大学物理系讲师,在职博士生,主要从事光纤传输方面的研究工作。E-mail:sq.g

角度,在两个主轴方向的分量分别以不同的群速度传输,从而引起光脉冲的展宽。在光纤的生产、成缆、光缆铺设及环境改变等过程中,使其在材料、形状和应力上产生各向异性,即光纤不再是完美的圆形,而呈现一定的椭圆度,这样导致了光纤的双折射。由于光脉冲两正交偏振分量之间以不同的群速度传输时随机耦合,而偏振随机耦合对温度及压力的轻微波动都非常敏感,因此它随时间而发生随机变化,即 PMD 是一个统计量。近年来,人们从理论上对 PMD 作了大量研究^[2,3],并采用不同方法对 PMD 加以抑制,例如在孤子系统中,用同步调制方法可抑制 PMD^[4],利用克尔效应补偿 PMD^[5]等等,但未见对色散控制系统中的 PMD 作过研究。

本文根据含二阶及三阶色散的非线性耦合方程,并对色散作了完全补偿,即路径平均色散为零时,PMD 对系统性能的影响作了讨论。结果发现,当考虑了 PMD 后,需增大系统功率到某一最佳值,可使得 PMD 与非线性效应基本抵消,保持较好的传输性能。可见,保持一定的 PMD,相当于提高了系统的信噪比。

2 理论分析

光脉冲在双折射光纤中的传输一般采用如下的处理方法^[6]:将长距离的光纤系统看作是由许多恒定双折射的光纤段级联而成,并且假定每一小段的光纤长度相等,折射率差均为 Δn ,在每一小段内,两个偏振方向上无耦合,所有的耦合仅发生在各小段的连接点。在连接处,双折射轴的方向随机变化,两个正交偏振主态之间产生随机轴的旋转和附加的相位差。主轴的旋转角度 θ 及相位差 ϕ 为均匀分布在 $[0, 2\pi]$ 之间的随机变量。从相邻段连接端面一侧传到另一侧的两个偏振分量分别满足如下变换

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta e^{i\phi} \\ -\sin\theta e^{-i\phi} & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 u 和 v 为入射一侧的两个正交的偏振主态分量, u' 和 v' 为出射一侧的两个正交的偏振主态分量。

光脉冲在双折射光纤中传输所满足的耦合非线性薛定谔方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_x}{\partial z} + \beta_{1x} \frac{\partial A_x}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2x} \frac{\partial^2 A_x}{\partial t^2} - \frac{1}{6} \beta_{3x} \frac{\partial^3 A_x}{\partial t^3} + \\ \frac{\alpha}{2} A_x = i\gamma \left(|A_x|^2 + \frac{2}{3} |A_y|^2 \right) A_x \end{aligned} \quad (2a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_y}{\partial z} + \beta_{1y} \frac{\partial A_y}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2y} \frac{\partial^2 A_y}{\partial t^2} - \frac{1}{6} \beta_{3y} \frac{\partial^3 A_y}{\partial t^3} + \\ \frac{\alpha}{2} A_y = i\gamma \left(|A_y|^2 + \frac{2}{3} |A_x|^2 \right) A_y \end{aligned} \quad (2b)$$

式中 A_x, A_y 表示 x, y 方向偏振慢变化振幅, z 表示传输距离, t 表示时间, $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 分别代表一、二、三阶群速度色散, α 为光纤的损耗系数, γ 为光纤的非线性系数,方程(2)中的 $2/3$ 因子项代表线双折射,表示 x, y 方向的偏振模耦合效应。

作归一化变换:

$$A_x = \sqrt{p_0} e^{-\alpha z/2} u_x, A_y = \sqrt{p_0} e^{-\alpha z/2} u_y, t = \frac{T - z}{T_0}, \quad \tau = \frac{\beta_{1x} + \beta_{1y}}{2} \tau$$

表示两个偏振方向的平均群速度, T_0 为入射脉冲在 $1/e$ 处脉宽, $\delta_1 = \frac{1}{2}(\beta_{1x} - \beta_{1y})T_0 L_a = \frac{1}{2}\Delta\beta T_0 L_a$,为归一化双折射参量,其中 L_a 为光纤链的放大周期,假定 $\beta_{2x} = \beta_{2y} = \beta_2, \beta_{3x} = \beta_{3y} = \beta_3, L_{2D} = \frac{T_0^2}{|\beta_2|}, L_{3D} = \frac{T_0^3}{|\beta_3|}, \delta_2 = \frac{L_a}{L_{2D}}, \delta_3 = \frac{1}{6} \frac{L_a}{L_{3D}}$, δ_2 与 δ_3 分别为归一化二阶及三阶色散参量。

则方程变为

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial z} + \delta_1 \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{i}{2} \delta_2 \text{sgn}(\beta_2) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \delta_3 \text{sgn}(\beta_3) \frac{\partial^3 u}{\partial t^3} = \\ i\gamma L_a p_0 e^{-\alpha z} \left(|u|^2 + \frac{2}{3} |v|^2 \right) u \end{aligned} \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial z} - \delta_1 \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{i}{2} \delta_2 \text{sgn}(\beta_2) \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} - \delta_3 \text{sgn}(\beta_3) \frac{\partial^3 v}{\partial t^3} = \\ i\gamma L_a p_0 e^{-\alpha z} \left(|v|^2 + \frac{2}{3} |u|^2 \right) v \end{aligned} \quad (3b)$$

采用分步傅里叶方法数值解上述耦合非线性薛定谔方程^[7]。

3 计算结果

这里,为防止群速度色散引起脉冲展宽及三阶色散引起脉冲不对称畸变和脉冲峰的时间移动,采用色散完全补偿,即在一个色散补偿周期中,平均色散为零, $\langle\beta_2\rangle = 0, \langle\beta_3\rangle = 0$,放大周期为色散补偿周期的两倍。如图 1 所示,光纤级联系统中每一个色散补偿周期由三段色散符号相反的非零色散位移光纤 NZ-DSF 组成,光脉冲经过两个色散补偿周期后被 EDFA 放大。

色散补偿周期 $L_c = L_1 + L_2 + L_3 = 20$ km。 $L_1 = 5$ km, $\beta_2 = 0.5$ ps²/km, $\beta_3 = 0.1$ ps³/km; $L_2 = 10$ km, $\beta_2 = -0.5$ ps²/km, $\beta_3 = -0.1$ ps³/km; L_3

= 5 km, 色散量同 L_1 。放大周期 $L_a = 2L_c = 40$ km。在整个光纤链中, 损耗和非线性系数分别为 $\alpha = 0.2$ dB/km, $\gamma = 1.27$ W⁻¹/km。EDFA 将一个放大周期长度内的损耗全部补偿, 使脉冲能量恢复到初始值。脉冲的中心波长 $\lambda = 1.55$ μ m。

输入高斯型光脉冲 $U = \exp[-(1 + iC)T^2/2T_0^2]$, $T_0 = 1$ ps, 为简单起见, 假定初始啁啾 $C = 0$ 。当不考虑 PMD 时, 在不同输入功率下, 单个光脉冲传输时脉冲半极大全宽 T_{FWHM} 随距离的变化如图 2 所示。

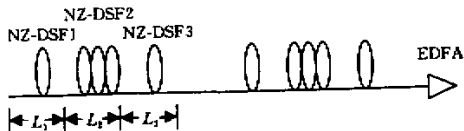


图 1 系统模型

Fig. 1 Model of system

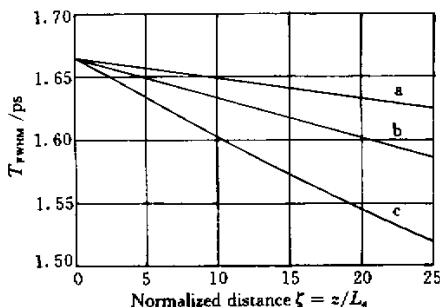


图 2 不考虑 PMD 时, 不同功率下脉冲宽度随距离的变化

Fig. 2 Pulse width variations with the distance at different initial power without considering PMD

a: $p_0 = 1$ mW; b: $p_0 = 2$ mW; c: $p_0 = 3$ mW

显然, 在零路径色散控制光纤链中, 线性色散被完全补偿, 但非线性效应会使脉冲变窄, 由图 2 可见, 在 $p_0 = 1$ mW 时, 脉冲宽度变化不大, 当功率增大时, 脉冲宽度压窄严重。在实际光纤系统中, 总会存在一定的双折射效应, 假定两个正交偏振模的传输常数差为 $\Delta\beta = 0.05$ ps/km, 工程中常用 D_p 表示偏振模色散的大小, $D_p = \Delta\beta / \sqrt{h}$, 其中 h 为反映快慢轴变化的长度参量, 这里假设双折射轴每隔 0.25 km 随机旋转一次, 则 $D_p = 0.1$ ps/ $\sqrt{\text{km}}$ 。根据耦合非线性薛定谔方程(3), 通过计算机模拟可求得光脉冲的脉宽变化情况。图 3(a), (b) 为入射脉冲分别与主轴成 45° 和 30° 角时, 在不同功率下, 脉冲宽度随距离的变化情况。因为 PMD 是随机变化的, 所

以我们重复计算 30 次取其平均值, 图 3 中给出的脉冲宽度都是平均结果。a, b, c, d 四条曲线分别对应初始功率为 1, 2, 4, 10 mW。显然, 当 $p_0 = 4$ mW 时, 脉冲宽度基本不变。另外, 脉冲宽度变化仅与功率相关, 与入射角度无关。当功率在 2~6 mW 范围时, 传输 1000 km, 脉冲宽度的变化小于 5%, 基本保持不变, $p_0 = 4$ mW 为最佳功率。

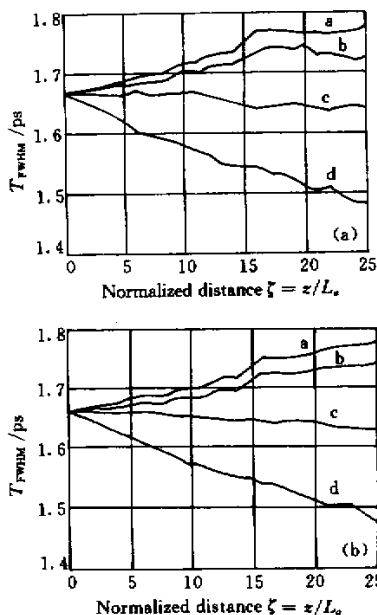


图 3 入射脉冲与主轴成 45° 角(a)与 30° 角(b)时, 脉宽随距离的变化

Fig. 3 Pulse width variations with the distance at different initial power when initial polarization is 45° (a) and 30° (b)

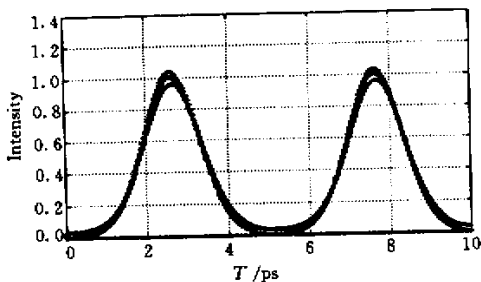


图 4 间距为 5 倍脉宽的 64 位随机码传输 1000 km 后的眼图

Fig. 4 Eye diagrams (unfiltered) after transmitting over 1000 km

为了进一步讨论 PMD 对脉冲间相互作用的影响,在图 4 中画出了 64 位随机码在入射峰功率为 4 mW,脉宽为 1 ps,码间距为 5 倍脉宽(相当于 200 Gbit/s)的高斯光脉冲序列在上述完全补偿光纤链中传输 1000 km 后的眼图,由于偏振模色散与非线性效应相互平衡,在较高的功率下,仍得到非常清晰的眼图。

4 小 结

零路径色散控制光纤链结构简单,易于规划,能有效防止二阶色散引起的脉冲展宽及三阶色散造成的脉冲不对称畸变,大大改善传输系统的性能。但不足之处是,非线性使脉冲变窄,因此要求系统的功率必须较小。当我们考虑了光纤中的随机双折射效应引起的偏振模色散后发现,偏振模色散与非线性效应相互平衡可防止脉冲展宽,从而可增大零路径色散控制光纤链的输入功率,提高系统的信噪比。

参 考 文 献

- 1 C. D. Poole, R. E. Wagner. Phenomenological approach to polarisation dispersion in long single-mode fibres [J]. *Electron. Lett.*, 1986, **22**(19):1029~1030
- 2 Y. Chen, H. A. Haus. Solitons and polarization mode dispersion [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(5):290~292
- 3 C. Xie, M. Karlsson, P. A. Andrekson. Soliton robustness to the polarization-mode dispersion in optical fibers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(7):801~803
- 4 Liu Xiumin, Zhang Xiaoguang, Lin Ning *et al.*. Theoretical analysis reducing the influence of polarization mode dispersion on optical solitons system by synchronous modulation [J]. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 2000, **29**(8):722~725 (in Chinese)
- 5 F. Matera, M. Settembre. Compensation of polarization mode dispersion by means of the Kerr effect for nonreturn-to-zero signals [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(1):28~30
- 6 C. A. Eleftherianos, D. Syvridis, T. Sphicopoulos *et al.*. Influence of polarisation mode dispersion on the transmission of parallel and orthogonally polarised solitons at 40 Gbit/s [J]. *Opt. Comm.*, 1998, **154**(1/3):14~18
- 7 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. 2nd ed., San Diego, CA: Academic, 1995