

# 偏振模色散对高速光码的影响

饶敏, 孙小菡, 张明德

(东南大学电子工程系, 南京 210096)

**[摘要]** 研究一阶、二阶偏振模色散 (PMD) 对 10 Gb/s 和 40 Gb/s 的光传输系统性能的影响, 考虑 PMD 的统计特性, 基于基本偏振态 (PSP) 理论数值模拟了非归零码 (NRZ) 和归零码 (RZ) 在传输过程中产生的脉冲畸变以及系统 Q 值的变化。结果表明, 传输速率越高 PMD 对系统性能的影响越显著, 二阶 PMD 也将不可忽略。另外, RZ 码传输性能明显优于 NRZ 码并且可通过预啁啾进行改善。

**[关键词]** 偏振模色散 (PMD); 非归零码 (NRZ); 归零码 (RZ); 频率啁啾

**[中图分类号]** TN929 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742 (2002) 11-0067-04

## 1 引言

偏振模色散 (PMD) 是发展下一代高速长距离光纤传输系统的主要限制因素<sup>[1,2]</sup>, 随着 WDM 系统单信道速率达 40 Gb/s 以上, PMD 的影响日益突出。对于受 PMD 限制的高速系统而言, 传输性能的好坏与所采用的数据格式有密切的关系<sup>[3-5]</sup>, 文献 [3] 实验比较了 10 Gb/s 系统中非归零码 (NRZ) 和归零码 (RZ) 受 PMD 影响情况, 结果表明 RZ 码更好, 但在理论上未加以解释。文献 [5] 用分步傅立叶方法求解非线性薛定谔方程, 比较了各种码形格式下的系统 Q 值和功率代价, 但也仅限于 10 Gb/s 系统并且计算复杂。笔者基于基本偏振态 (PSP)<sup>[6]</sup> 理论, 以输入高斯啁啾 RZ 脉冲和超高斯啁啾 NRZ 脉冲为例, 对 10 Gb/s 和 40 Gb/s 系统中一阶、二阶 PMD 产生的光脉冲畸变及 Q 值变化进行数值模拟。

## 2 理论模型

按照三维邦加球 (Poincare sphere) 表示法, PMD 可描述为  $\Omega = \Delta\tau s$ , 式中  $\Delta\tau$  的值为偏振模色散的群时延差 (DGD),  $s$  为指向光纤基本偏振态快轴方向的单位矢量。在一阶近似时,  $\Delta\tau$  和  $s$  是

与频率无关的, PMD 可表示为  $\Omega(\omega_0) = \Delta\tau_0 s_0$ , 式中  $\Delta\tau_0 = \Delta\tau|_{\omega=\omega_0}$ ,  $s_0 = s|_{\omega=\omega_0}$ ,  $\omega_0$  为中心光频率。在二阶近似下, PMD 可表示为<sup>[2]</sup>

$$\Omega(\omega) = \Omega(\omega_0) + \Omega_\omega(\omega - \omega_0) = \Delta\tau_0 s_0 + (\Delta\tau' s_0 + 2k\Delta\tau_0)(\omega - \omega_0) \quad (1)$$

式中  $\Omega_\omega$  表示二阶 PMD 效应, 包括互相垂直的两项  $\Delta\tau' s_0$ ,  $2k\Delta\tau_0$ , 其中  $\Delta\tau'$  导致脉冲的展宽或压缩, 而  $2k$  代表去极化<sup>[2]</sup>,  $\Delta\tau' = \partial\Delta\tau/\partial\omega|_{\omega=\omega_0}$ ,  $2k = \partial s/\partial\omega|_{\omega=\omega_0}$ 。

假设输入光脉冲为线性啁啾脉冲

$$E_a(t) = E_a(t) e_a =$$

$$e_a A_0 \exp\left[-\frac{1}{2}(t/T_0)^{2m} - j(bt^2 - \omega_0 t)\right] \quad (2)$$

式中  $A_0$  为峰值振幅,  $b$  表征线性啁啾的系数,  $e_a$  表征输入偏振状态, 光脉冲瞬时频率为  $\omega_0 - 2bt$ 。

式 (2) 中  $T_0$  为脉宽的参数:  $T_0 = \Delta T/[2(\ln 2)^{1/2m}]$ , 对于 NRZ 码,  $\Delta T$  为一个比特周期,  $m = 1.436$ ; 而对于 RZ 码,  $\Delta T$  为脉冲的半高全宽 (FWHM),  $m = 1$ 。为能公平比较 NRZ 码和 RZ 码受 PMD 影响后的传输性能, 应使它们发送的平均光功率相等。

由文献 [7~9] 知, PMD 影响后的光脉冲输

[收稿日期] 2002-02-18; 修回日期 2002-06-27

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目 (60272048)

[作者简介] 饶敏 (1977-), 女, 安徽安庆市人, 东南大学博士研究生

出光场时域表达式可写为

$$\begin{aligned} E_b(t) = \frac{1}{2\sqrt{2}} \{ & (a_1 u^* + a_2 u)(E_+(t + \Delta\tau_0/2) + \\ & E_-(t - \Delta\tau_0/2)) + a_1 u(E_+(t - 4k + \\ & \Delta\tau_0/2) - E_-(t - 4k - \Delta\tau_0/2)) + \\ & a_2 u^*(E_+(t + 4k + \Delta\tau_0/2) - \\ & E_-(t + 4k - \Delta\tau_0/2)) \}. \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $a_1, a_2$  为输入 PSP 相关系数:  $a_1 = e^{j\theta} \cos(\epsilon + \pi/4)$ ,  $a_2 = e^{-j\theta} \cos(\epsilon - \pi/4)$ ,  $\theta$  和  $\epsilon$  分别代表输入 PSP 的方位角和椭圆度<sup>[7]</sup>;  $u$  为一单位向量:  $u = [1, j]$ ,  $u^*$  为  $u$  的共轭;

$$\begin{aligned} E_{\pm}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{E}_a(\omega) \exp[\alpha L + j\omega t \pm \\ j\Delta\tau'(\omega - \omega_0)^2/4] d\omega, \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $\tilde{E}_a(\omega)$  为输入脉冲光场的 Fourier 变换,  $\alpha$  和  $L$  分别表示衰减常数和光纤长度。将式 (2) 代入式 (3) 和式 (4), 则可得出输出光脉冲形状。

PMD 影响后的系统 Q 值可利用下式计算:

$$Q = \frac{U_1 - U_0}{\sqrt{N_1} + \sqrt{N_0}}. \quad (5)$$

式中  $N_1, N_0$  分别代表发送 1 和 0 时的噪声, 包括热噪声  $N_{th}$ 、散弹噪声  $N_{shot,1/0}$ 、信号-ASE 拍频噪声  $N_{s-sp}$  和 ASE-ASE 拍频噪声  $N_{sp-sp}$  的总和 (平均功率参见文献 [10] 的式 (8) 至式 (11))。假设以上噪声分量均为高斯分布, 则总噪声平均功率为:  $N_{1/0} = N_{th} + N_{shot,1/0} + N_{s-sp,1/0} + N_{sp-sp}$ ;  $U_1, U_0$  分别代表发送 1 和 0 时的平均接收光功率, 考虑码间干扰, 不难发现 010 和 101 这两种比特形式最易产生误码, 因此考虑最差情况,  $U_1, U_0$  为

$$U_1 = \int_{t_d - \frac{T}{2}}^{t_d + \frac{T}{2}} |E_b(t)|^2 dt, \quad (6)$$

$$U_0 = \int_{t_d - \frac{T}{2}}^{t_d + \frac{T}{2}} (|E_b(t - T)|^2 + |E_b(t + T)|^2) dt, \quad (7)$$

式中  $t_d$  为接收机的判决时刻, 取在比特周期的中间位置。由于 PMD 是一个随时间变化的量, 因此导致的 Q 值也会具有一定的统计特性, 根据文献 [11] 推导出一阶、二阶 PMD 统计规律, 对式 (5) 进行数值模拟, 得出 Q 值的统计规律。

定义 PMD 导致的 Q 值代价为  $p_Q = 20 \lg(Q/Q_0)$ ,  $Q_0$  代表光纤中 PMD 为零时的系统 Q

值。若系统平均 PMD 与传输距离的关系为  $\tau_i = D_{PMD} \sqrt{L}$ ,  $D_{PMD}$  (ps/km<sup>1/2</sup>) 为光纤的 PMD 系数, 则根据上述模型可计算出 Q 值代价与传输距离之间的关系。

### 3 模拟结果及分析

1) PMD 导致的码形变化 40 Gb/s 系统中一阶、二阶 PMD 及频率啁啾对脉冲形状的影响见图 1, NRZ 码在一阶 PMD 作用下产生很明显的码间干扰, RZ 码的顶端发生分裂并且码间也有重叠现象; 若同时考虑二阶 PMD, NRZ 码形会进一步变差, 同时频率啁啾对其性能没有改善作用, 而 RZ 码形变得有些接近 NRZ 码形状, 并且当输入脉冲带有正啁啾  $C = -bT_0^2 = 1$  时, 输出码形会有一定改善。由于图 1 中假设 NRZ 和 RZ 两种码形的峰值均为 1 W, 为公平比较, 应使两种码的平均光功率相等, 即 RZ 码的峰值应比 NRZ 码大, 从图 1 中可看出 RZ 码性能明显优于 NRZ 码。此结论与文献 [5, 12] 用分步傅立叶法数值模拟结果一致。

2) PMD 对系统 Q 值的影响 NRZ 码和 RZ 码分别在 10 Gb/s, 40 Gb/s 系统中受 PMD 影响后的系统 Q 值分布情况见图 2。当传输速率为 10 Gb/s 时, 假设系统平均 PMD 为 40 ps, 二阶 PMD 和频率啁啾对 RZ 码的传输性能影响很小, 可以忽略; 而对于 NRZ 码, 二阶 PMD 使 Q 值分布曲线有比较明显的展宽且左移了约 1 dB。当传输速率为 40 Gb/s 时, 假设系统平均 PMD 为 10 ps, 对于 RZ 码, 二阶 PMD 使系统 Q 值减小了约 2 dB, 如果输入高斯脉冲带有一定的频率啁啾, 则会适当地提高系统性能; 对于 NRZ 码, 二阶 PMD 会使系统 Q 值降低约 3 dB, 而频率啁啾对其影响较小。不论是 NRZ 码或 RZ 码, PMD 对速率越高的系统影响越大, 并且 NRZ 码受 PMD 的影响更大。

3) PMD 产生的系统代价与传输距离的关系 图 3 描述了一阶、二阶 PMD 对系统 Q 值代价的影响, 这里  $D_{PMD}$  取 1 ps/km<sup>1/2</sup>。在 10 Gb/s 系统中, RZ 码性能明显优于 NRZ 码, 这与文献 [3] 实验结论一致; 二阶 PMD 对 NRZ 码的性能的影响更大, 并且当输入脉冲具有正的频率啁啾时 RZ 码性能会有较大的改善, 该现象与图 1 结论一致。若系统传输速率为 40 Gb/s, 在传输距离相等的情况下, 系统 Q 值代价比 10 Gb/s 系统大得多, 并且二阶 PMD 的影响更加显著。

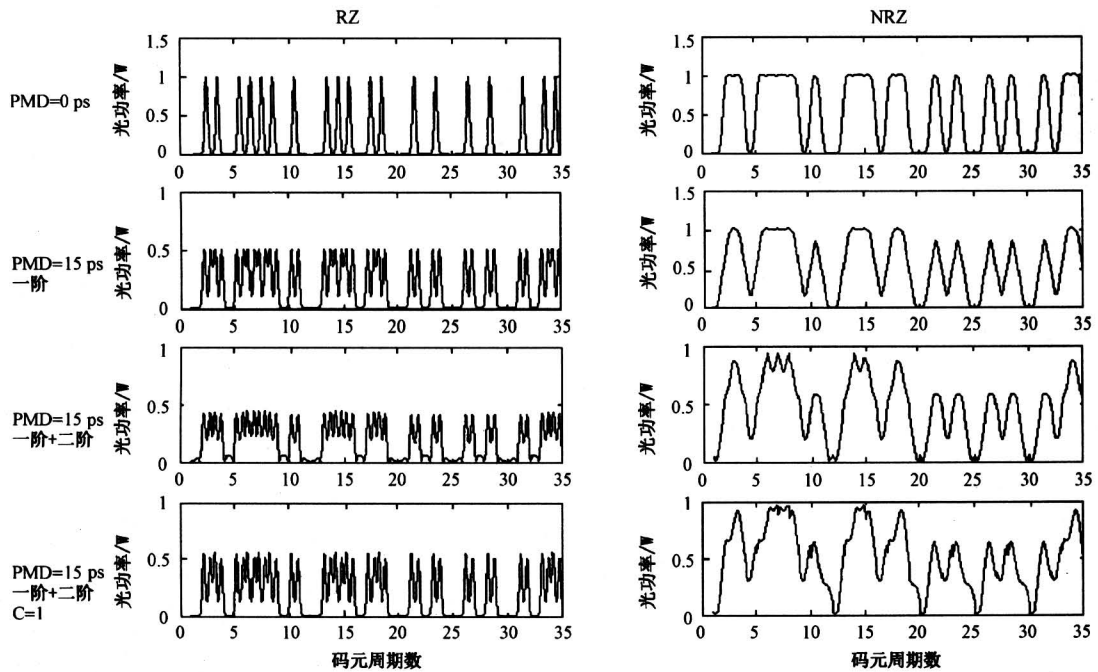
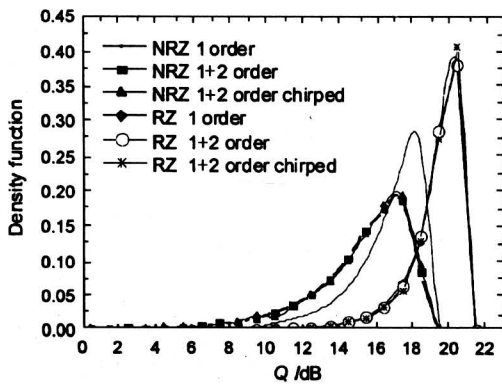
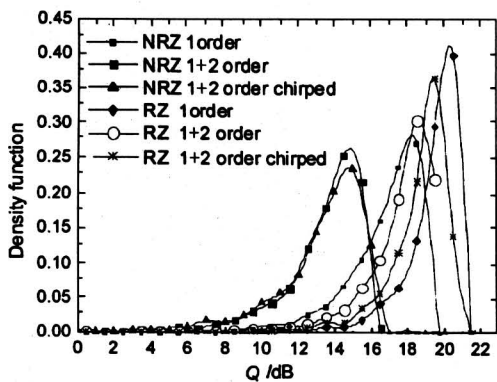


图 1 40 Gb/s 系统中一阶、二阶 PMD 产生的码形变化

Fig.1 The impact of the first and second-order PMD on the pulses in 40 Gb/s systems

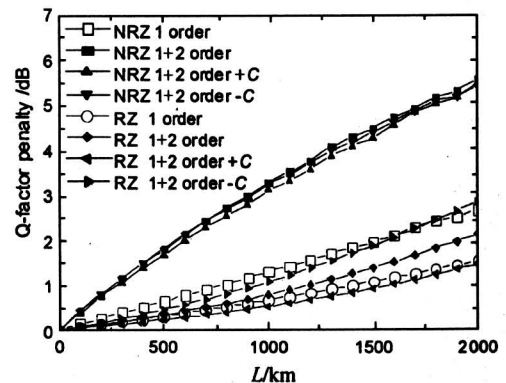


a. 10 Gb/s 系统, 平均 PMD = 40 ps

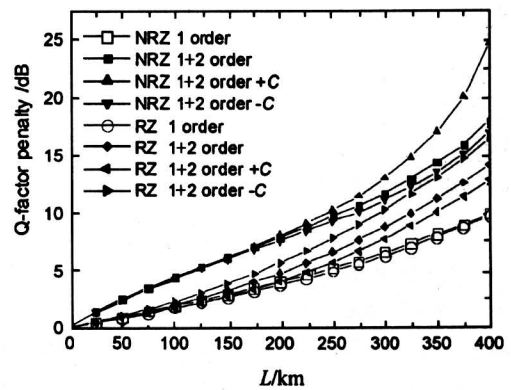


b. 40 Gb/s 系统, 平均 PMD = 10 ps

图 2 一阶、二阶 PMD 对系统 Q 值分布的影响  
Fig.2 The impact of the first and second-order PMD on the Q-factor distribution



a. 10 Gb/s 系统



b. 40 Gb/s 系统

图 3 一阶、二阶 PMD 对系统 Q 值代价的影响  
Fig.3 The impact of the first and second-order PMD on the Q-factor

## 4 结论

笔者利用 PSP 理论数值模拟了 10 Gb/s 和 40 Gb/s 传输系统中一阶、二阶 PMD 导致的光脉冲畸变以及 Q 值统计特性和 Q 值代价的变化, 其中 10 Gb/s 系统的结果与文献中结果相一致。

1) 传输速率越高 PMD 对系统性能的影响越显著, 二阶 PMD 亦不可忽略;

2) 在保证平均发送光功率相等的条件下, RZ 码性能明显优于 NRZ 码;

3) 当二阶 PMD 作用较明显时, 若在输入脉冲上加适当的频率啁啾会对 RZ 码的传输性能有所改善。上述结论可为下一代高速光网络的设计提供一定的指导作用。

### 参考文献

- [1] Francia C, Bruyère F, Penninckx D, et al. PMD second-order effects on pulse propagation in single-mode optical fibers [J]. IEEE Photon Technol Lett, 1998, 10: 1739~1741
- [2] Bruyère F. Impact of first- and second-order PMD in optical digital transmission systems [J]. Opt Fiber Technol, 1996, 2: 269~280
- [3] Taga H, Suzuki M, Namihira Y. Polarization mode dispersion tolerance of 10 Gbit/s NRZ and RZ optical signals [J]. Electron Lett, 1998, 34(10): 2098~2100
- [4] Marcuse D, Menyuk C R. Simulation of single-channel optical systems at 100 Gb/s [J]. J Lightwave Technol, 1998, 17(4): 564~569
- [5] Khosravani R, Willner A E. Comparison of different modulation formats in terrestrial systems with high polarization mode dispersion [A]. OFC'2000, Paper WL5 [C]. Baltimore, MD, 2000
- [6] Poole C D, Wagner R E. Phenomenological approach to polarization dispersion in long single-mode fibers [J]. Electron Lett, 1986, 22 (19): 1029~1030
- [7] Francia C, Penninckx D, Bruyère F, et al. Time impulse response of second order PMD in single-mode fibers [A]. ECOC[C].1, 1998. 143~144
- [8] Kogelnik H, Nelson L E, Gordon J P, et al. Jones matrix for second-order polarization mode dispersion [J]. Opt Lett, 2000, 1(25): 19~21
- [9] Penninckx D, Morenas V. Jones matrix of polarization mode dispersion [J]. Opt Lett, 1999, 24(13): 875~877
- [10] Vu V S, Hoang V V. Accurate estimation of receiver sensitivity for 10 Gb/s optically amplified systems [J]. Optics Communications, 2000, 6(181): 71~78
- [11] Foschini G J, Nelson L E, Jopson R M, et al. Probability densities of second-order polarization mode dispersion including polarization dependent chromatic fiber dispersion [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2000, 12(3): 293~295
- [12] Khosravani R, Willner A E. System performance evaluation in terrestrial systems with high polarization mode dispersion and the effect of chirping [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2001, 13(4): 296~298

## Impact of Polarization Mode Dispersion on High-Speed Optical Codes

Rao Min, Sun Xiaohan, Zhang Mingde

(Department of Electronics Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**[Abstract]** The first and second-order polarization mode dispersion (PMD) effect on the performance of 10 Gbit/s and 40 Gbit/s systems is studied. The statistical behavior of PMD is considered by simulating the non-return-to-zero (NRZ) and return-to-zero (RZ) pulses distortion and the system's Q-factor based on principal states of polarization (PSP) theory. It is found that the effect of PMD is significant in higher bit rate systems and the second-order PMD cannot be neglected. Furthermore, the RZ format is more tolerant to PMD than is the NRZ format, and the system performance is improved if the input pulses are appropriately chirped.

**[Key words]** polarization mode dispersion (PMD); non-return-to-zero (NRZ); return-to-zero (RZ); frequency chirp