

光的差分八相移相键控调制解调原理及偏振模色散补偿性能分析

赵鑫媛^{1,2} 刘慧洋^{1,2} 王少康^{1,2} 张晓光^{1,2}

¹ 北京邮电大学理学院, 北京 100876
² 北京邮电大学光通信与光波技术教育部重点实验室, 北京 100876

摘要 光的 8-DPSK 调制格式是一种新型光调制格式。它具有较窄的频谱宽度,较高的频谱利用率,近似恒定的包络特性,同时能够较好地抑制光纤的非线性效应。根据 8-DPSK 的基本原理,仿真分析了 8-DPSK 信号的调制和解调,建立了 8-DPSK 的仿真系统。在此基础上,研究了将 8-DPSK 调制格式应用于偏振模色散补偿系统的性能。从理论和数值上分析了不同占空比下 8-DPSK 信号的偏振度(DOP)和偏振模色散(PMD)的关系。结果表明,不同占空比下,信号的频谱结构不同,因而 DOP 灵敏度不同。在 PMD 补偿系统中,由于采用 DOP 作为反馈信号,因此不同占空比的 8-DPSK 信号,其补偿效果不同。通过数值仿真分析得出,CSRZ-8-DPSK 信号由于其较窄的频谱宽度和载波抑制的特性,是最具前景的调制格式。

关键词 光纤通信;8-DPSK;偏振模色散补偿;偏振度

中图分类号 TN 929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200929s1.0011

Study of the Principle of Optical 8-DPSK and the Performance Used in the Polarization-Mode Dispersion Compensation System

Zhao Xinyuan^{1,2} Liu Huiyang^{1,2} Wang Shaokang^{1,2} Zhang Xiaoguang^{1,2}

¹ School of Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

² Key Laboratory of Optical Communications and Optical Technologies,

Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract The optical 8-DPSK is a new modulation format. It has narrower spectrum structure, higher spectrum efficiency, nearly invariable envelope, and better nonlinearity suppression characteristic. According to the principle of 8-DPSK, the modulation and demodulation in the back-to-back system of 8-DPSK is analyzed via simulation. Moreover, the polarization-mode dispersion compensation performance of 8-DPSK is studied. The relationship between the signal's degree of polarization (DOP) and polarization-mode dispersion (PMD) of different duty-cycle signals is analyzed theoretically and numerically. The result shows that the DOP sensitivity is different among different duty-cycle signals, because the change in duty-cycle results in the change in spectrum structure. In the polarization-mode dispersion compensation system, DOP is adopted as the feedback signal, therefore, the performance of compensation is different among different duty-cycle signals. Through simulation analysis, CSRZ-8-DPSK has the best compensation performance thanks to its narrower spectrum structure and carrier-suppressed characteristic.

Key words optical communication; 8-DPSK; polarization-mode dispersion compensation; degree of polarization

1 引 言

下一代光网络的目标是在密集波分复用系统中

实现更快的传输速率和更高的频谱利用率。差分八相移相键控(8-DPSK)由于其较高的频谱利用率和

基金项目:北京市共建项目(XK100130637)资助课题。

作者简介:赵鑫媛(1984—),女,硕士研究生,主要从事高速光纤通信系统中不同调制格式的研究。

E-mail: zxyzy247@mail.com

导师简介:张晓光(1961—),男,博士生导师,主要从事光纤通信和光电子学方面的研究。

E-mail: zhang. x. g@263. net (通信联系人)

较好的色度色散(CD)、偏振模色散(PMD)以及非线性容忍度而日益受到重视。在低速短距离的通信系统中,偏振模色散对系统的影响较小,常常可以忽略。然而,随着传输速率的提高和传输距离的增大,偏振模色散对系统的影响变得十分明显。目前主要有两种解决方案:采用 PMD 自适应补偿系统和采用新型调制格式。烽火在 2006 年 5 月开通的上海到杭州的 $80 \times 40\text{G}$ 密集波分复用(DWDM)系统中,采用了自动跟踪补偿的自适应 PMD 补偿器,补偿量大于 25 ps 。爱立信的 40 Gb/s 光传输技术则基于一种 PMD 容忍度较高的新型调制格式^[1]。

随着系统容量的不断增大和传输速率的不断提高,单纯地采用一种方法进行 PMD 补偿可能无法满足系统的要求。本文结合了上述两种方法,将新型调制格式 8-DPSK 应用于 PMD 自适应补偿系统中。建立了 8-DPSK 信号的 40 Gb/s 仿真系统。并在此基础上,引入了 PMD,对不同占空比的 8-DPSK 信号进行自适应 PMD 补偿。仿真结果表明,现有的 PMD 自适应补偿系统能较好的补偿 8-DPSK 信号在传输过程中遇到的偏振模色散。

2 8-DPSK 调制解调原理

光场可以表示为: $E(t) = A\cos(\omega_c t + \phi)$ 。其中, A 表示振幅, ω_c 表示光载波信号频率, ϕ 表示相位。8-DPSK 调制格式将信息编码于连续光比特的差分相位中,即用 $\Delta\phi$ 承载信息。 $\Delta\phi$ 取值为 $\{0, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{4}, \pi, \frac{5\pi}{4}, \frac{3\pi}{2}, \frac{7\pi}{4}\}$ 。采用相位差承载信息,可以有效避免因接收机相位反转而导致的解码失败。

目前,8-DPSK 一共有三种调制方案^[2]。本文采用在传统的 DQPSK 调制器后再级联一个调制深度为 $\pi/4$ 的相位调制器的方案。预编码后的数据,两路直接加载到相互并联的两个调制器上,另一路经过延迟后加载到第三个调制器上。

上述方式得到的是非归零(NRZ)信号。为了得到不同占空比的 8-DPSK 信号,在三个相位调制器后再级联一个马赫-曾德尔调制器,用于对信号进行二级调制^[3]。通过调节加载到马赫-曾德尔调制器的电时钟信号的幅度和偏置电压,可以分别得到占空比为 33% , 50% , 67% 的归零(RZ)信号。发射端框图如图 1 所示。

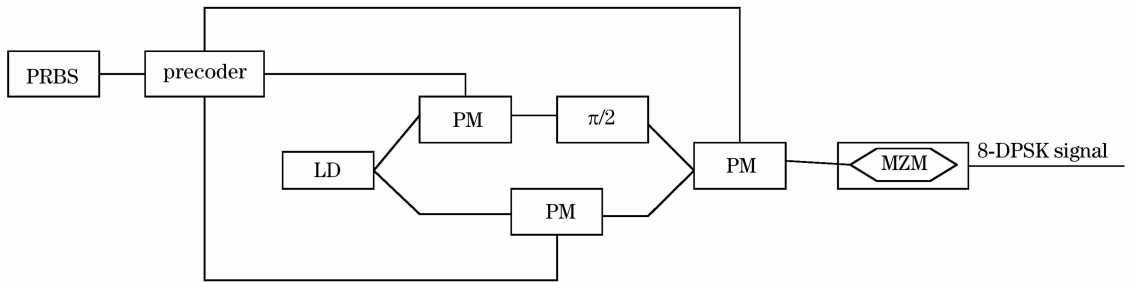


图 1 8-DPSK 发射端框图

Fig. 1 Block diagram of optical 8-DPSK transmitter

调制得到的 RZ33, RZ50, CSRZ (RZ67), NRZ 信号的频谱如图 2 所示。

与 RZ33, RZ50 信号相比, CSRZ-8-DPSK 信号频谱最窄,因而在密集波分复用系统(DWDM)系统中有较好的应用前景。而与 NRZ 信号相比,虽然 CSRZ-8-DPSK 信号的频谱较宽,但是其载波抑制特性及较小的占空比使得它对光纤的非线性效应有更高的容忍度。综上所述, CSRZ-8-DPSK 信号是未来 DWDM 系统中极具前景的调制格式。

8-DPSK 信号的解调采用马赫-曾德尔延迟干涉仪加平衡接收机的方案。由于有 8 个可能的相位差,因而接收端需要使用 4 个马赫-曾德尔延迟干涉仪和四个平衡接收机。延迟干涉仪的时间延迟臂对信号进行 1-bit 的延迟,相位延迟臂分别对信号进行

$-\frac{3\pi}{8}, \frac{\pi}{8}, -\frac{\pi}{8}, \frac{3\pi}{8}$ 的相移。接收端框图如图 3 所示^[2]。“背靠背”系统中接收端解调后的 8-DPSK 一个支路信号的眼图如图 4 所示。

3 8-DPSK 信号的 PMD 补偿性能研究

3.1 反馈信号的研究

PMD 自适应补偿系统可以采用电功率或偏振度(DOP)作为反馈信号。采用电功率作为反馈信号,虽然反馈信号的采集较为方便,速度较快,但它需要使用光探测器,而光探测器所需的带宽与光信号的码速率密切相关。因而在高速系统中,使用电功率作为反馈信号对光探测器的要求较高。而光信号的斯托克斯矢量是光强信号,它与码速率无关,由

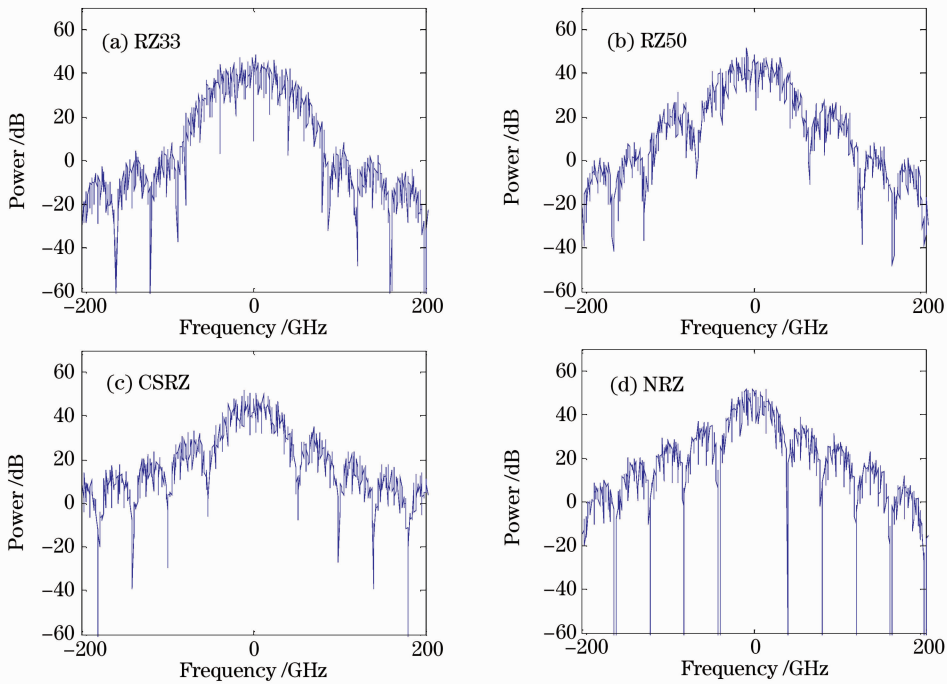


图 2 8-DPSK 调制后频谱

Fig. 2 Spectrum of 8-DPSK signal

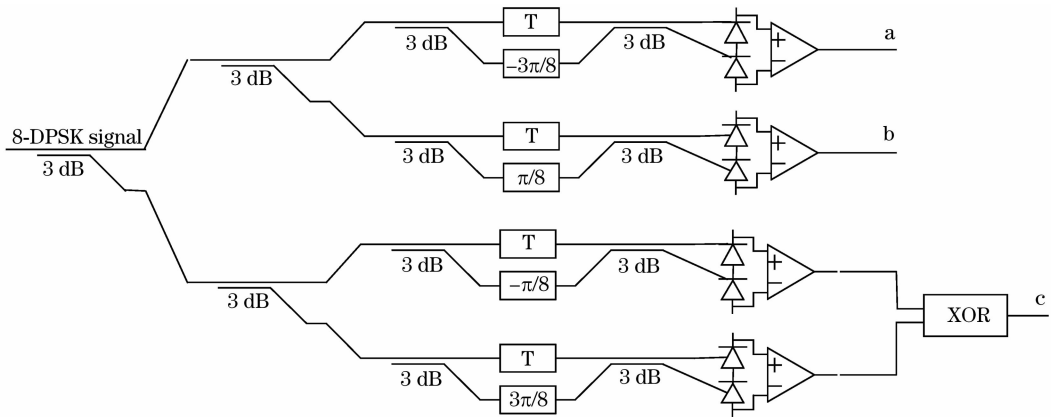


图 3 8-DPSK 接收端框图

Fig. 3 Schematic diagram of 8-DPSK demodulator

斯托克斯矢量可以计算出信号的偏振度 (DOP), 且只有当差分群时延 (DGD) 为 0 时, DOP 才为 1, 因而用 DOP 作为反馈信号无需使用高速器件, 同时还可以补偿大于一个比特周期的偏振模色散。此外, 它不会受链路中色度色散的影响, 因此偏振模色散和色度色散可以分别补偿而不会相互影响。综上所述, 在高速 PMD 自适应补偿系统中, 采用 DOP 作为反馈信号性能较好^[4]。

DOP 可以由斯托克斯矢量值计算得到。在某一频率下:

$$DOP = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2} / S_0,$$

式中 S_0, S_1, S_2, S_3 为光信号的斯托克斯矢量。对于

完全偏振光, $DOP = 1$; 对于部分偏振光, $DOP < 1$; 对于自然光, $DOP = 0$ ^[5]。

假设入射光在两个偏振主态上的归一化投影为 $[a, b]^T$, a, b 与频率无关, 并且 $|a|^2 + |b|^2 = 1$ 。信号的归一化频谱为 $f(\omega)$ 。不考虑色度色散、非线性效应、以及损耗, 光纤的琼斯矩阵可以表示为

$$M(\omega) = \begin{pmatrix} u_1 & u_2 \\ -u_2^* & u_1^* \end{pmatrix},$$

式中 $|u_1|^2 + |u_2|^2 = 1$ 。则入射光经光纤传输后的出射光在偏振主态上的两个场分量为

$$[E_x(\omega), E_y(\omega)] = M(\omega) \times [a, b]^T \times f(\omega),$$

在某一频率下, 斯托克斯矢量值由光场在偏振主态

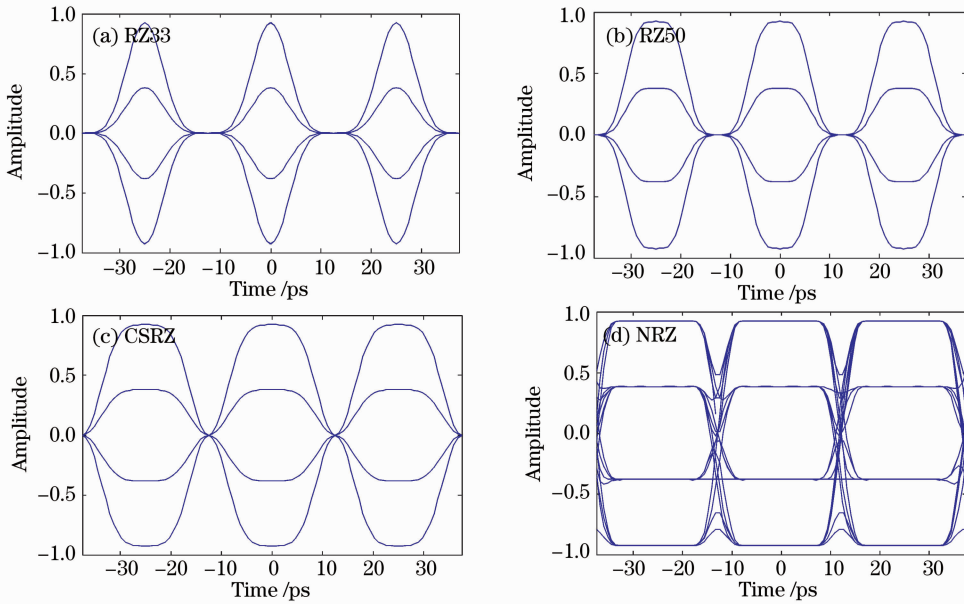


图 4 8-DPSK“背靠背”解调后眼图(1支路)

Fig. 4 Eye diagram of 8-DPSK “back-to-back” demodulation

上的分量 E_x, E_y 计算得到

$$S_0 = E_x^2 + E_y^2, \quad S_1 = E_x^2 - E_y^2$$

$$S_2 = 2\text{Re}(E_x E_y^*), \quad S_3 = -2\text{Im}(E_x E_y^*)$$

为计算输出光的斯托克斯矢量值,只需将单频率下的 S_0, S_1, S_2, S_3 对频率积分即可。由此可以看出,输出光信号的 DOP 实质是频谱上各个频率分量的 DOP 对功率谱进行加权平均的结果。因而,信号的 DOP 与输入信号的偏振态、光纤的琼斯矩阵、以及输入信号的频谱有关。

3.2 不同占空比信号的 DOP 与 DGD 关系

根据上面的分析,DOP 与输入信号的频谱有关,因而仿真分析了当输入信号的偏振态一定时,不同占空比信号的 DOP 与 DGD 关系。图 5 是 40 Gb/s 的系统中 RZ33, RZ50, CSRZ 以及 NRZ 信号 DOP 随 DGD 的变化。

由图 5 可以看出,信号占空比越小,DOP 随 DGD 的增大下降越快,即 DOP 对 DGD 的灵敏度越高,但是三种占空比 RZ 信号的 DOP 对 DGD 灵敏度相差不大。此外,三种占空比 RZ 信号 DOP 随

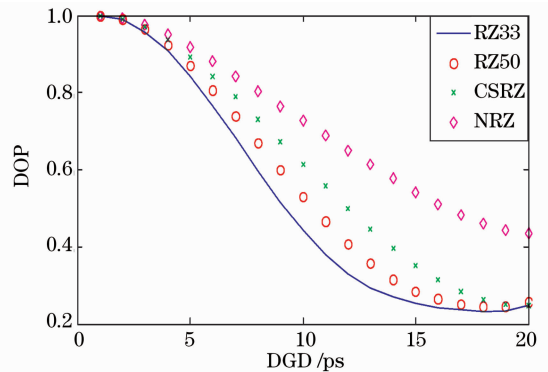


图 5 不同占空比下 8-DPSK 信号的 DOP-DGD 关系曲线

Fig. 5 DOP-DGD curves of different duty-cycle 8-DPSK signals

DGD 变化关系的响应范围也基本一致,且都比 NRZ 信号大。

3.3 不同占空比信号的 PMD 补偿性能分析

PMD 自适应补偿系统由发射端,PMD 模拟器,PMD 补偿器以及接收端四部分组成。框图如图 6 所示^[5]。其中,模拟器由一段保偏光纤和一个偏振

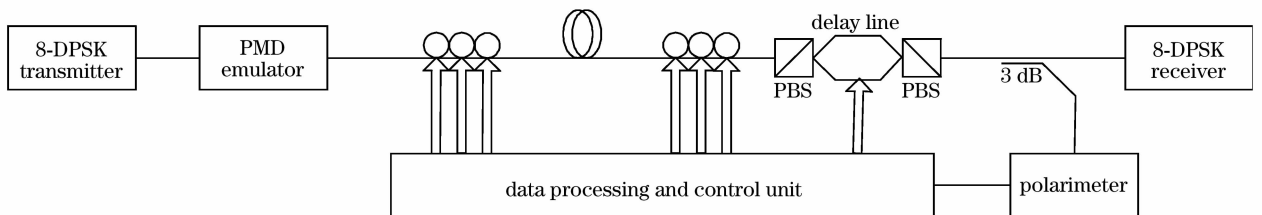


图 6 8-DPSK PMD 自适应补偿系统

Fig. 6 Schematic diagram of 8-DPSK PMD self-adaptive compensation system

控制器(PC)组成。保偏光纤的 DGD 服从高斯分布,均值为20 ps,方差为5 ps²。偏振控制器的状态随机变化。补偿器由两个偏振控制器和两段时延线组成。其中,一个时延线的时延固定为10 ps,另一个时延可变,变化范围为0~30 ps,与两个偏振控制器一起作为控制算法的控制对象。控制算法采用粒子群优化算法(PSO 算法)^[6,7]。发射端和接收端则采用前面介绍的 8-DPSK 的调制和解调方案。

由上面的分析可知,不同占空比的信号,其

DOP 对 DGD 的灵敏度不同。PMD 自适应补偿系统由于采用 DOP 作为反馈信号,因而不同占空比的信号其 PMD 的补偿效果不同。图 7 是四种占空比信号:RZ33, RZ50, CSRZ, NRZ 在 PMD 补偿前后的眼图。

为了说明四种信号的 PMD 补偿效果,对四种信号的 PMD 补偿过程做了 500 次仿真,得到补偿前 DGD 以及补偿后剩余 DGD 的柱状图,如图 8 所示。

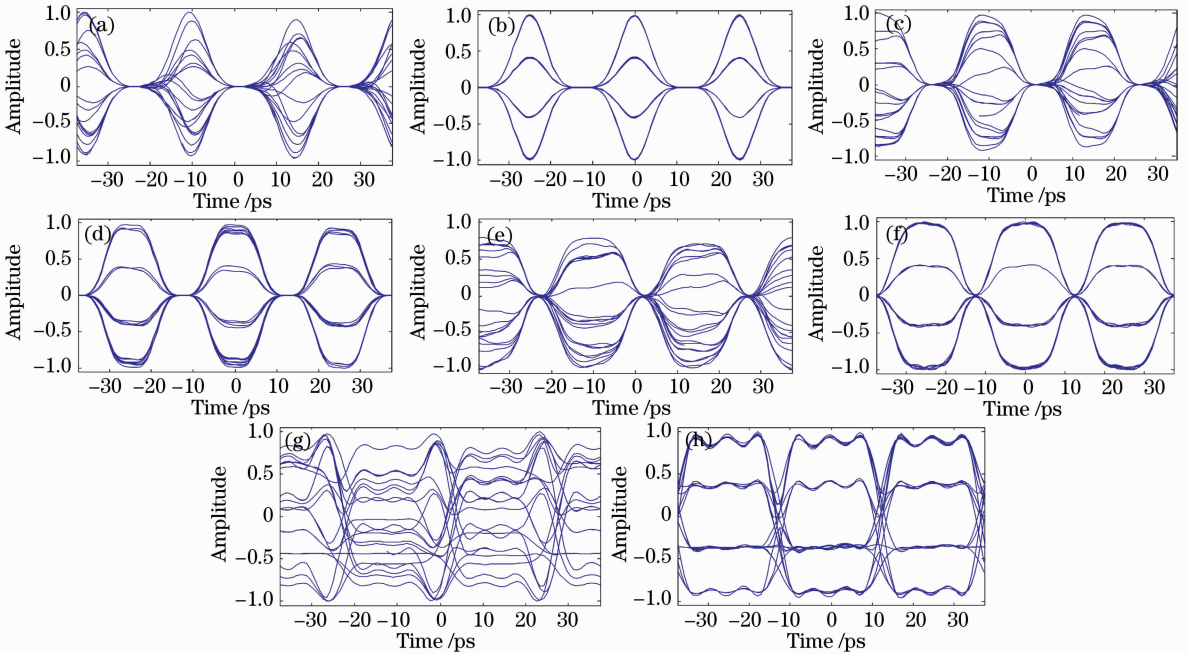


图 7 8-DPSK 补偿前后解调眼图。(a) RZ33 补偿前;(b) RZ33 补偿后;(c) RZ50 补偿前;(d) RZ50 补偿后;
(e) CSRZ 补偿前;(f) CSRZ 补偿后;(g) NRZ 补偿前;(h) NRZ 补偿后

Fig. 7 Eye diagram of 8-DPSK demodulated signal before and after compensation. (a) RZ33 before compensation; (b) RZ33 after compensation; (c) RZ50 before compensation; (d) RZ50 after compensation; (e) CSRZ before compensation; (f) CSRZ after compensation; (g) NRZ before compensation; (h) NRZ after compensation

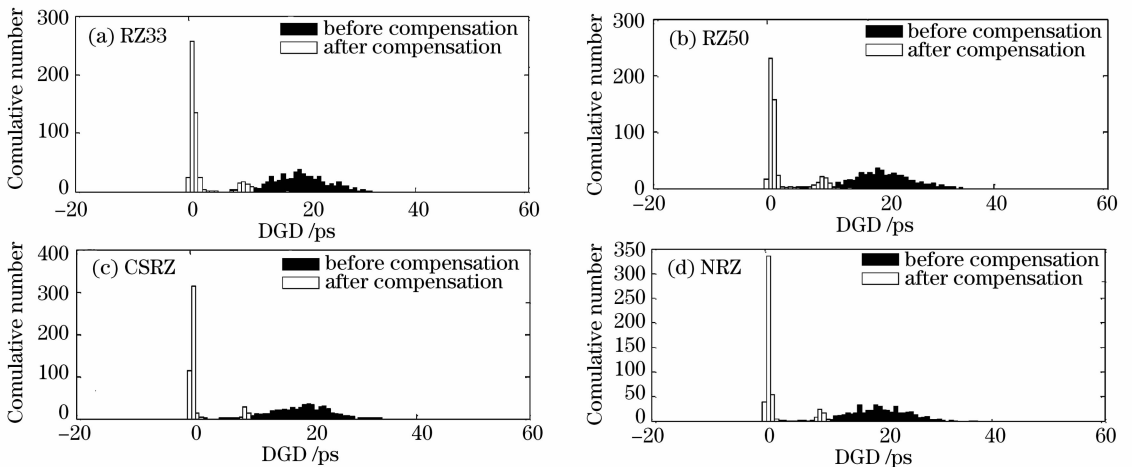


图 8 8-DPSK 信号补偿前后 DGD

Fig. 8 DGD of 8-DPSK signals before and after compensation

从图 8 可以看到,补偿前链路中的 DGD 较大,经过补偿,DGD 基本分布在 0 附近。说明该 PMD 自适应补偿系统成功地补偿了 8-DPSK 信号的偏振模色散。

4 结 论

研究了光的 8-DPSK 调制和解调原理。建立了 40 Gb/s 的 8-DPSK 仿真系统,并在系统中引入 PMD 模拟和 PMD 补偿,仿真分析了不同占空比信号的 PMD 补偿效果。结果表明,CSRZ-8-DPSK 信号由于其较窄的频谱结构,PMD 补偿效果最好。此外,CSRZ-8-DPSK 信号由于其较窄的频谱结构和载波抑制特性,将是高速率、长距离、大容量通信系统中最具前景的调制格式。

参 考 文 献

- Xu Wei. The Study of Modulation Techniques and Polarization Mode Dispersion Compensation Techniques in High-speed Optical Fiber Communications [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2008. 19~72
许 玮. 高速光纤通信系统中码型调制技术与偏振模色散补偿技术的研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2008. 19~72
- Cheolhwan Kim, Guifang Li. Direct-detection optical differential 8-level phase-shift keying (OD8PSK) for spectrally efficient transmission [J]. *Opt. Express*, 2004, **6**(15):~
- Xu Kun, Zhou Guangtao, Wu Jian *et al.*. Comparisons of high speed optical modulation formats using LiNbO₃ optical waveguide modulators [J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2004, **27**(4):50~54
徐 坤,周光涛,伍 剑 等. 基于 LiNbO₃ 光波导调制器高速码型调制技术的比较[J]. 北京邮电大学学报, 2004, **27**(4):50~54
- Zhang Xiaoguang. Researches on Adaptive Compensation System for Polarization Mode Dispersion [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2004. 57~61
张晓光. 光纤偏振模色散自适应补偿系统的研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2004. 57~61
- Duan Gaoyan. Researches on Polarization Mode Dispersion Mitigation and Compensation in the Optical Fiber Communication Systems [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2006. 30~83
段高燕. 光纤通信系统中偏振模色散缓解与补偿的研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2006. 30~83
- Zhang Xiaoguang, Yu Li, Zheng Yuan *et al.*. Adaptive PMD compensation using PSO algorithm [J]. *OFC/NFOEC 2004*, Paper THF1
- Zhang Xiaoguang, Zheng Yuan, Shen yu *et al.*. Particle swarm optimization used as a control algorithm for adaptive PMD compensation [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**:85~87
- Xu Wei, Duan Gaoyan, Fang Guangqing *et al.*. Analysis of polarization mode dispersion compensation performance for different modulation formats [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2):227~232
许 玮,段高燕,方光青 等. 不同调制格式的偏振模色散补偿性能分析[J]. 光学学报, 2008, **28**(2):227~232
- Xu Wei, Duan Gaoyan, Fang Guangqing *et al.*. Study of polarization mode dispersion compensation using new modulation formats [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, **10**(5):717~720
许 玮,段高燕,方光青 等. 偏振模色散补偿系统中新型调制格式的研究[J]. 半导体光电, 2007, **10**(5):717~720
- Liao Yanbiao. Polarization Optics[M]. Beijing: Science Press, 2003. 172~183
廖延彪. 偏振光学[M]. 北京:科学出版社, 2003. 172~183