

文章编号: 0253-2239(2008)02-0226-07

不同调制格式的偏振模色散补偿性能分析

许 玮^{1,2} 段高燕^{1,2} 方光青^{1,2} 席丽霞^{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 研究了不同调制格式的产生及其偏振模色散补偿性能。首先从实验上得到了不同调制格式的频谱和眼图, 并将其输入偏振模色散补偿系统, 实现了缓解与补偿的动态结合。其次, 从数值上比较和分析了不同调制格式应用于以偏振度做反馈信号的偏振模色散补偿系统后的补偿性能, 结果表明, 差分相移键控对偏振度的响应度和偏振模色散补偿效果要比传统开关键控好, 因此差分相移键控非常适合于以偏振度做反馈信号的偏振模色散补偿系统; 而载波抑制码差分相移键控结合了载波抑制码载波抑制特性和差分相移键控的特殊频谱特性, 具有最好的偏振模色散补偿效果。

关键词 光纤通信; 调制格式; 偏振模色散; 偏振度

中图分类号 TN929.11; O436.3 **文献标识码** A

Analysis of Polarization Mode Dispersion Compensation Performance for Different Modulation Formats

Xu Wei^{1,2} Duan Gaoyan^{1,2} Fang Guangqing^{1,2} Xi Lixia^{1,2} Zhang Xiaoguang^{1,2}

¹Department of Physics, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China
²Key Laboratory of Optical Communication and Light-Wave Technologies, Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract The generation of different modulation formats and their polarization dispersion compensation (PMD) performance have been studied. Firstly, the eye diagrams and spectrum of different modulation formats through experiment have been obtained, and then the dynamic combination of their mitigation and compensation in PMD have been accomplished. Secondly, the PMD compensation performance with degree of polarization (DOP) as feedback signal of the mentioned modulation formats has been studied via simulation. It shows that DOP responsibility and PMD compensation performance of differential phase-shift key (DPSK) are better than that of on-off keying (OOK). CSRZDPSK combines the carrier-suppressed characteristic of CSRZ formats and specific spectrum characteristic of DPSK formats, therefore it has the best PMD compensation performance.

Key words optical fiber communication; modulation formats; polarization mode dispersion; degree of polarization (DOP)

1 引 言

对于高速、大容量光纤通信系统来说, 随着传输距离和传输容量及速率的增长, 在低速短距离情况下可以忽略的一些物理效应如色散、偏振模色散(PMD)、非线性效应等对系统的影响变得十分明显。对于 40 Gb/s 及更高速率的系统, 偏振模色散是必须考虑的一个因素^[1, 2]。近几年人们又提出采

用具有紧凑调制带宽和高偏振模色散、色度色散(CD)、非线性容忍度的新型调制格式来缓解偏振模色散^[3, 4], 并与偏振模色散补偿技术动态结合, 达到更好的补偿效果。本文基于 LiNbO₃ 调制器的调制原理, 从实验得到了不同调制格式的眼图和频谱, 包括开关键控(OOK)、差分相移键控(DPSK)和载波抑制码(CSRZ), 并将其应用于偏振模色散补偿系

收稿日期: 2007-04-02; 收到修改稿日期: 2007-08-09

基金项目: 国家自然科学基金(60577046)、北京市共建项目(XK100130637)、山东省科技攻关项目(2006GG2201002)资助课题。

作者简介: 许 玮(1983—), 女, 山东潍坊人, 硕士研究生, 主要从事高速光纤通信系统中调制不同调制格式方面的研究。
E-mail: xuwei.w@tom.com

导师简介: 张晓光(1961—), 男, 北京人, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤通信和光电子学等方面的研究。
E-mail: zhang.x.g@263.net

统,对补偿前后的眼图进行了比较,实现了缓解与补偿的动态结合。

2 不同调制格式调制及其偏振模色散补偿实验

2.1 开关键控调制格式的产生

开关键控调制格式的产生一般采用马赫-曾德尔干涉仪型的 LiNbO₃ 调制器,通过加载数据和偏置电压,实现信号格式的调制^[5]。在具体调制过程中,利用一个强度调制器,加载数据和偏置电压就会得到非归零(NRZ)调制格式。要想得到占空比不同的开关键控调制格式,则需要二级调制。依据调制器的调制曲线(如图 1 所示),在第二级调制器上,选取不同的时钟信号幅度、频率、相位和直流偏置就会在输出端产生占空比不同的开关键控调制格式。

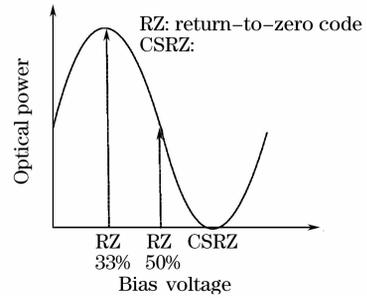


图 1 调制器的调制曲线

Fig. 1 Modulation curve of the modulator

实验中采用的原理框图如图 2,所得的调制信号的速率为 10 Gb/s,当偏置电压偏置在中间点,且加入 10 GHz 的时钟信号,就会得到占空比为 50% 的归零(RZ)码;当偏置电压偏置在谷底点,且加入 5 GHz 的时钟信号,就会得到载波抑制码。依据上述原理在实验中得到图 2~图 4 的不同调制格式的眼图(图 3)和频谱(图 4)。

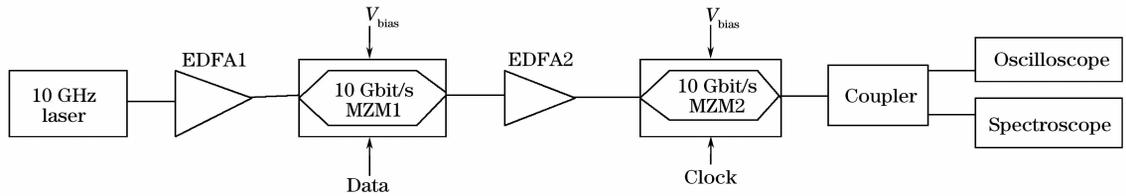


图 2 开关键控调制格式的调制实验框图

Fig. 2 Experimental setup of the OOK formats

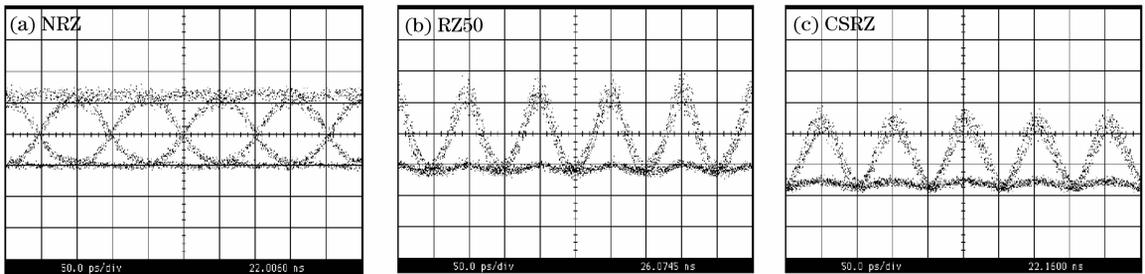


图 3 不同调制格式的眼图

Fig. 3 Eye diagrams of different modulation formats

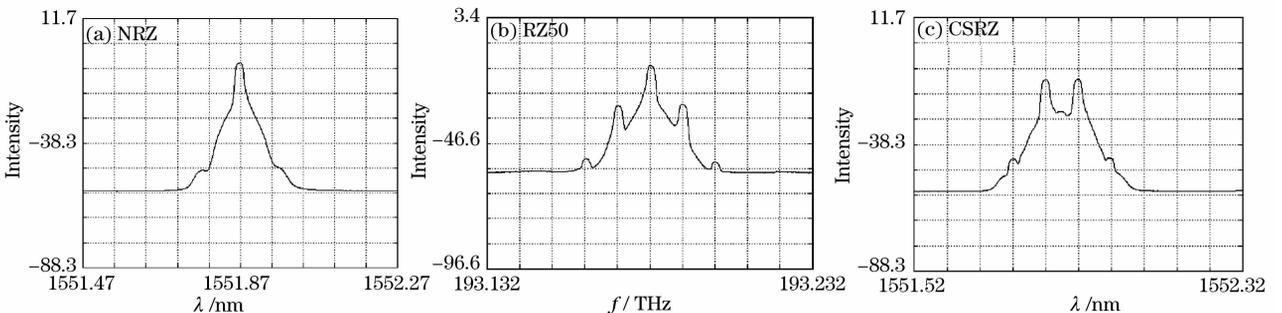


图 4 不同调制格式的频谱

Fig. 4 Spectrum of different modulation formats

2.2 差分相移键控格式的调制与解调

差分相移键控调制格式的产生原理^[6]框图如图5所示,将经过差分预编码的非归零数据加载到相位调制器上进行调制就可以得到非归零-差分相移键控信号。如果要得到归零-差分相移键控/载波抑制码-差分相移键控信号,则需要再加一个强度调制器,依据2.1中所述的二级调制的原理,通过加载不

同的数据和时钟信号得到。

差分相移键控格式是用相位来携带信息,而且相邻比特间的相位差为0或 π ,因此必须在接收时采用延时一个比特周期的马赫-曾德尔干涉仪来进行解调。实验中得到了解调器“加口”(图6)和“减口”处(图7)的频谱。如果采用平衡接收会提高3 dB的接收灵敏度。

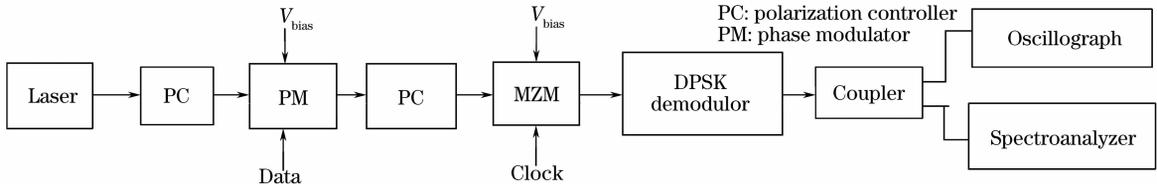


图5 差分相移键控(差分相移键控)调制格式产生与接收实验框图

Fig. 5 Experimental setup of DPSK formats' modulation and demodulation

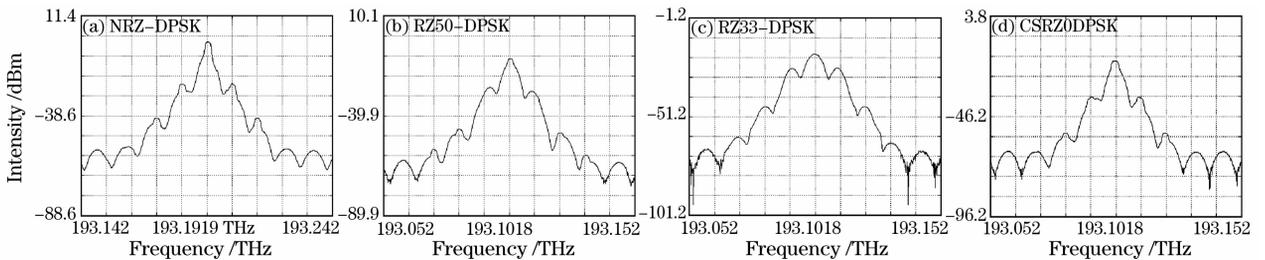


图6 加口处的频谱

Fig. 6 Spectrum of "constructive port"

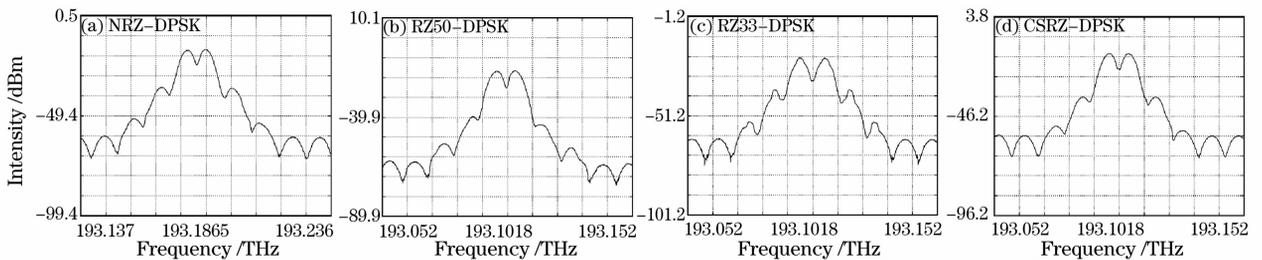


图7 减口处的频谱

Fig. 7 Spectrum of "destructive port"

2.3 不同调制格式的偏振模色散补偿实验

实验中选取 RZ50、CSRZ、RZ33-DPSK、RZ50-DPSK 和 CSRZ-DPSK 格式作为信号源,进行了偏振模色散的补偿实验。偏振模色散补偿实验系统如

图8所示,包括不同调制格式发射部分、模拟器部分、补偿和控制算法部分^[7]。不同调制格式发射部分用于信号源的产生;三阶段模拟器由三个偏振控制器和三段保偏光纤组成,这样的模拟器能够产生

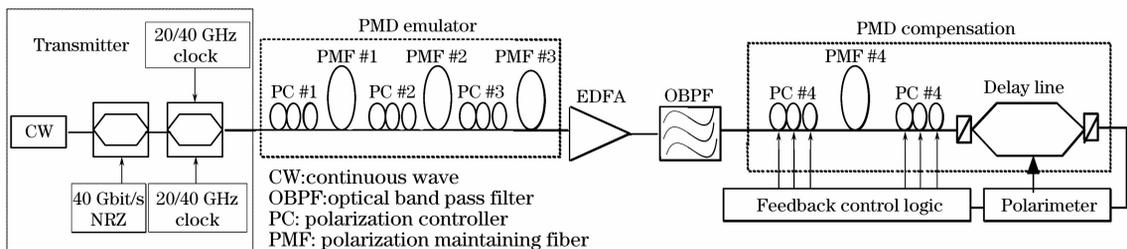


图8 偏振度做反馈信号的偏振模色散补偿实验系统框图

Fig. 8 Experimental setup of PMD compensation system using DOP as feedback signal

二阶和更高阶偏振模色散。补偿器是两阶段的，由两个偏振控制器、一段保偏光纤和一个可变时延线组成，总共有 7 个可变自由度。保持模拟器、补偿器

和控制算法不变，依次将不同的调制格式经过三阶段模拟器，然后经过补偿器进行补偿，最后输出，图 9~图 13 是不同调制格式在补偿前后的眼图，由此可见，将缓解与补偿技术动态结合后，眼图与补偿前的相比，得到了明显改善。

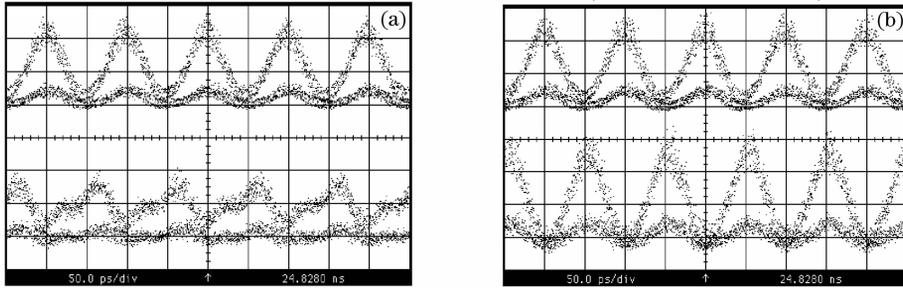


图 9 RZ50 补偿前(a),后(b)眼图

Fig. 9 Eye diagrams of RZ50 format before (a) and after (b) compensation

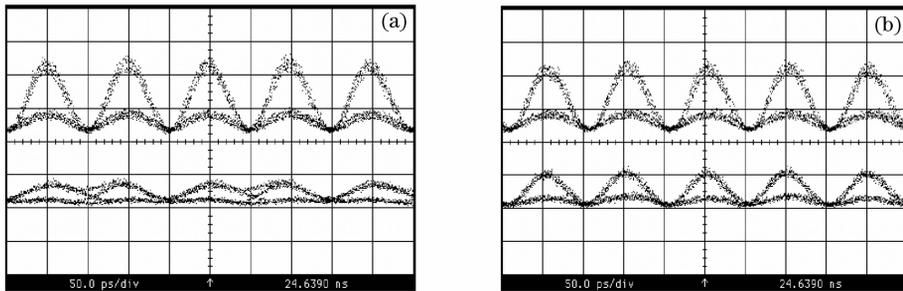


图 10 载波抑制码补偿前(a),后(b)眼图

Fig. 10 Eye diagrams of CSRZ format before (a) and (b) after compensation

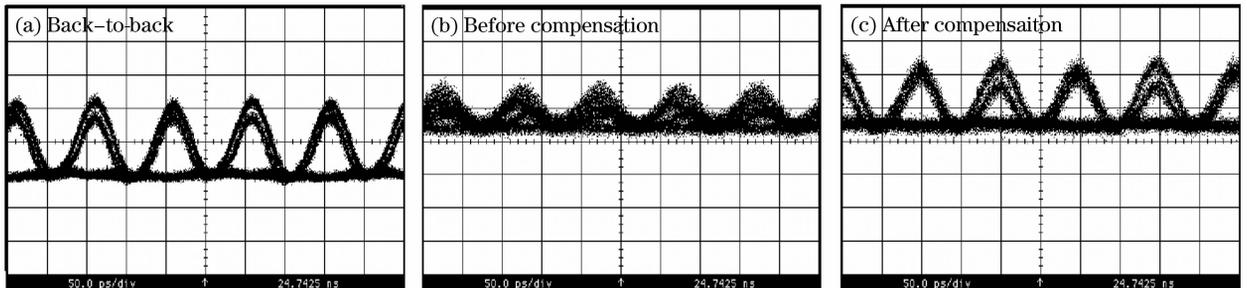


图 11 RZ33-DPSK 信号眼图

Fig. 11 Eye diagram of RZ33-DPSK

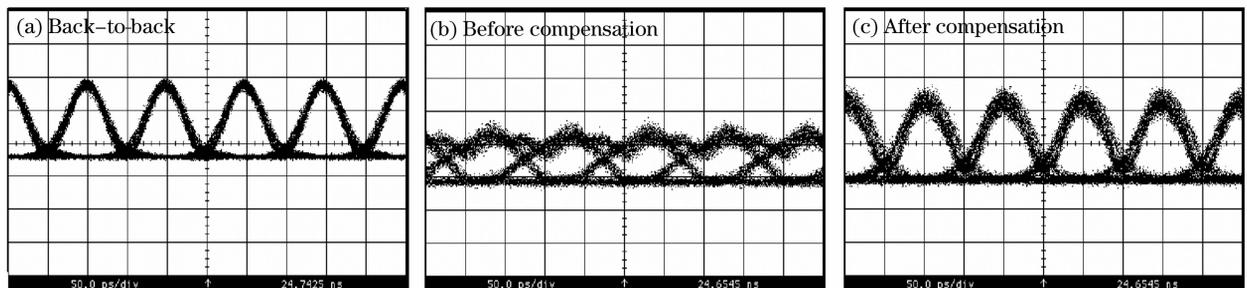


图 12 RZ50-DPSK 信号眼图

Fig. 12 Eye diagram of RZ50-DPSK

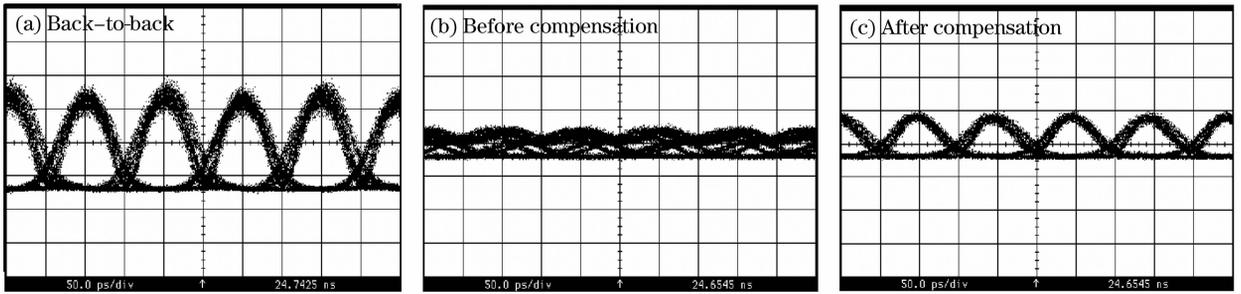


图 13 CSRZ-DPSK 信号眼图

Fig. 13 Eye diagram of CSRZ-DPSK

3 不同调制格式的偏振模色散补偿性能仿真

3.1 反馈信号的研究

在偏振模色散补偿系统中一般以偏振度作反馈信号^[8, 9]来进行偏振模色散补偿。在单一频率下偏振度定义为

$$D = \frac{\sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2}}{s_0}, \quad (1)$$

式中 s_0, s_1, s_2, s_3 分别为光场的四个斯托克斯分量。对于完全偏振光, $D = 1$, 对于部分偏振光, $D < 1$ 。偏振度就是其信号频谱上各个频率分量的偏振度对功率谱加权平均的结果, 因此信号的偏振度与输入信号的偏振态、偏振模色散以及信号的频谱有关。

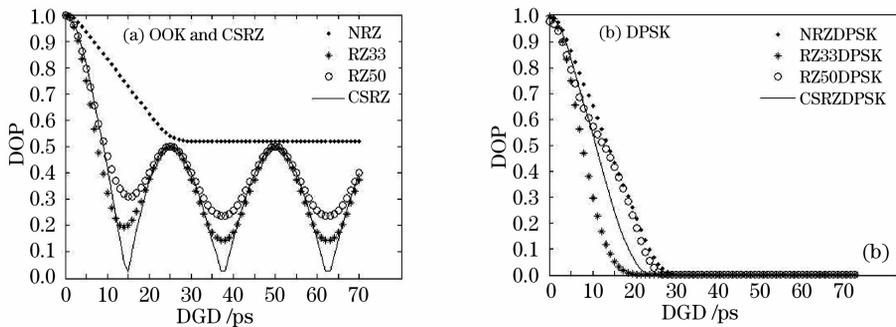


图 14 不同调制格式的偏振度与差分群时延的关系

Fig. 14 The relationship of degree of polarization and differential group delay among different modulation formats

3.2 不同调制格式的偏振模色散补偿性能仿真与分析

仿真中采用的系统模型为 2.3 节中的图 8, 信号源所用的调制格式包括 NRZ、RZ33、RZ50、CSRZ、NRZ-DPSK、RZ33-DPSK、RZ50-DPSK、CSRZ-DPSK; 模拟器中三段保偏光纤的时延分别为 $\Delta T_{DGD_1} = 5$ ps, $\Delta T_{DGD_2} = 5$ ps, $\Delta T_{DGD_3} = 5$ ps; 补偿器中保偏光纤的时延为 8 ps。

首先得到了各种不同调制格式在补偿前后的偏

图 14 是仿真得到的各种调制格式的偏振度随差分群时延(DGD)的变化情况。在开关键控格式中, 除非归零码的偏振度动态范围较小以外, 其他几种不同调制格式的偏振度初始下降的速度相差不多。RZ33、RZ50 和载波抑制码格式下降后又开始上升, 呈现来回波动状态, 在补偿过程中容易使搜索算法陷入局部极值, 增加了搜索难度。从图中还可看出, 在开关键控格式中以载波抑制码格式的偏振度响应范围最大。而差分相移键控格式中, 偏振度随着差分群时延的增大整体呈单调下降趋势, 没有波动状况, 这对偏振模色散补偿非常有利, 也不会使搜索算法陷入局部极值。在这几种调制格式当中, 差分相移键控格式用于偏振模色散补偿系统中是最适合的。

振度 D 值, 结果如图 15 所示。比较补偿前的 D 值, 非归零码的 D 值分布范围是比较小, 而其他不同调制格式的 D 值分布范围相对较大, 这与 3.1 中的结果相符。比较各种调制格式在补偿前后的 D 值可以看出, 非归零补偿后 D 值最好, 几乎全部分布在 0.95~1。CSRZ、NRZDPSK、CSRZDPSK 补偿前后 D 值大部分为 0.95, 补偿前后 D 值变化也比较明显。这对于以 D 作反馈信号的偏振模色散补偿系统来说是有利的。

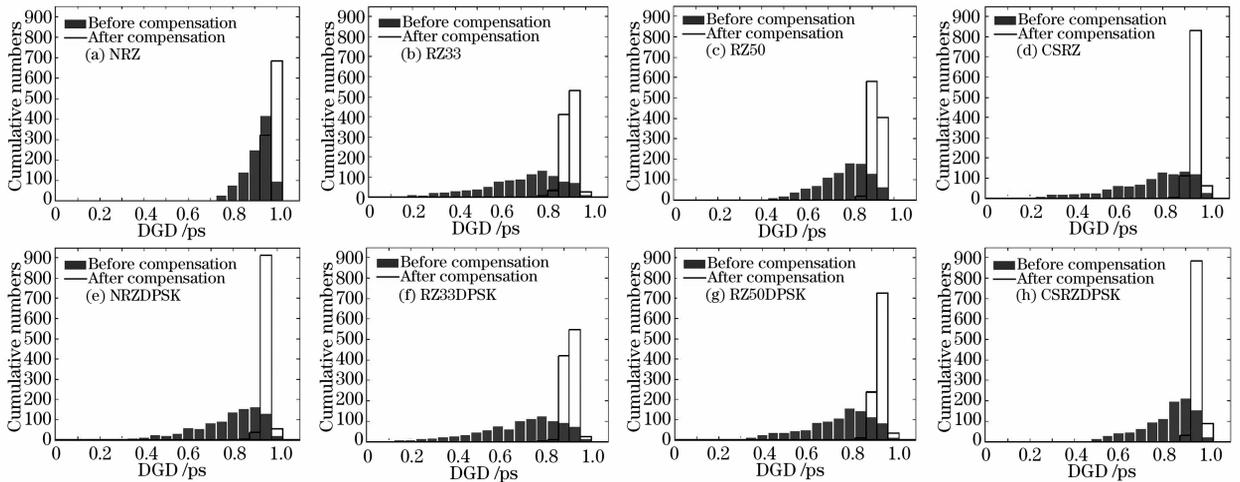


图 15 补偿前后偏振度值的比较

Fig. 15 Comparison of degree of polarization before and after compensation

为了更好地比较这几种调制格式的偏振模色散补偿效果,又计算了补偿后的剩余差分群时延值,结果如图 16 所示。从图中可以看出,对于开关键控和差分相移键控来说,占空比越小,补偿效果越差^[8]。这是因为占空比小的信号对应其带宽比较大,因此受高阶偏振模色散的影响更加严重,这就限制了系统的偏振模色散补偿效果。对于相同的占空比的调制格式来说,差分相移键控的补偿性能要好于开关键控。在开关键控格式中,如图 16(a)~图 16(d)所示,载波抑制码和非归零格式的偏振模色散补偿效果要好于归零格式,这对补偿来说是有利的。但是非归零格式功率较高,受非线性影响较大,不适合长距离传输,这也是长距离大容量光纤通信系统不选

用非归零格式的原因。归零格式虽然具有较好的光纤非线性容忍度,但因其频带较宽,受偏振模色散的影响很大,补偿效果比较差。载波抑制码格式相比非归零和归零有更高的色散和偏振模色散容忍度,而且它还具有归零脉冲的形状,所以对自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)等非线性效应也有较好的容忍度。而且由于其载波被抑制特性,将载波抑制码格式用于偏振模色散补偿系统中,更能缓解偏振模色散的影响,其补偿性能要比非归零和归零码好的多。因此在开关键控格式中,综合考虑偏振模色散补偿效果、偏振模色散、色度色散和非线性效应容忍度来说,载波抑制码是最理想的格式。

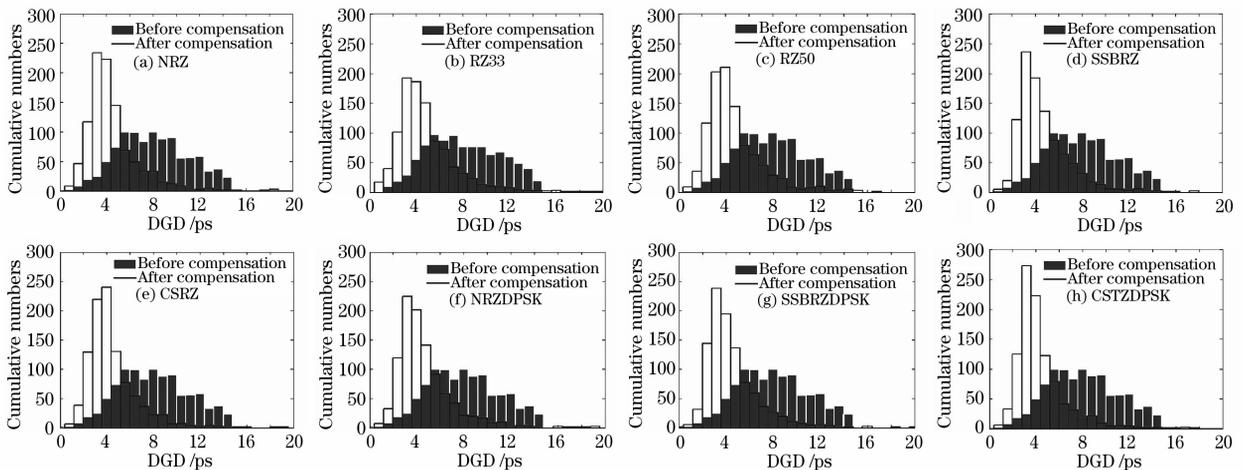


图 16 补偿前后剩余差分群时延

Fig. 16 Residual differential group delay before and after compensation

图 16 中可以看出,相对于开关键控格式,差分相移键控格式的偏振模色散补偿性能有明显提高。而其中的载波抑制码差分相移键控格式具有最窄的带宽,受高阶偏振模色散的影响最小,因此具有最好的偏振模色散补偿效果。相比于开关键控中的载波抑制码格式,载波抑制码差分相移键控的偏振模色散容忍度更高,偏振模色散补偿效果更好。综上所述,如果要综合考虑偏振模色散容忍度、偏振模色散补偿效果容量、距离、光谱效率、等因素的话,载波抑制码—差分相移键控无疑是最具优势的调制方式。

4 结 论

从实验上得到了不同调制格式的频谱和眼图,并将其应用于偏振模色散补偿实验系统,得到了补偿前后的眼图,实现了不同调制格式偏振模色散缓解与补偿的动态结合。同时利用 DOP 作反馈信号,比较了不同调制格式的偏振模色散被偿效果,结果表明,信号的占空比越大,对应的带宽就越窄,受高阶偏振模色散的影响就越小,补偿效果就越好。在相同占空比下,差分相移键控格式的补偿效果好于开关键控格式。载波抑制差分相移键控格式具有最好的偏振模色散补偿效果,加之其较高的光谱效率和 PMD 容忍度,是高速率、大容量、长距离光纤通信系统中最具优势的调制格式。

参 考 文 献

1 Zhang Xiaoguang, Yu Li, Zheng Yuan *et al.*. Two-stage adaptive

PMD compensation experiment for 10-Gb/s optical communication system[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(11): 630~633

2 Li Tangjun, Wang Muguang, Jian Shuisheng *et al.*. Dynamic PMD compensation in 40-Gb/s optical communication system[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(5): 264~267

3 Chongjin Xie, Lothar Möller, Herbert Haunstein *et al.*. Comparison of system tolerance to polarization-mode dispersion between different modulation formats[J]. *Photonics Technology Letters*, 2003, **15**(8): 1168~1170

4 Chen Yong, Cao Jihong, Chen Ting *et al.*. Optimal modulation formats for 2560 km optical transmission with low-power penalty [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 331~335 (in Chinese)
陈 勇,曹继红,陈 婷等. 优化调制格式实现 2560 km 低代价无误码传输[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3): 331~335

5 Zhang Huijan, Zuo Meng, Zhong Jinshun *et al.*. Study of two stage modulation formats in high-speed dense wavelength division multiplexing system[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(6): 815~819 (in Chinese)

张慧剑,左 萌,钟锦舜等. 高速密集波分复用系统中的二级调制格式研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(6): 815~819

6 Hao Bin, Gu Wanyi. Principle of optical DPSK modulation format[J]. *Modern Wire Transmission*, 2005, **4**: 70~73 (in Chinese)

郝 宾,顾皖仪. 光差分相移键控调制格式原理[J]. *现代有线传输*, 2005, **4**: 70~73

7 Xiaoguang Zhang, Yuan Zheng, Yu Shen *et al.*. Particle swarm optimization used as a control algorithm for adaptive PMD compensation[J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(1): 85~87

8 Nobuhiko Kikuchi. Analysis of signal degree of polarization degradation used as control signal for optical polarization mode dispersion compensation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(4): 480~486

9 Chen Lin, Zhang Xiaoguang, Zhou Guangtao *et al.*. Study polarization mode dispersion compensation with degree of polarization as feedback signal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 443~448 (in Chinese)

陈 林,张晓光,周光涛等. 偏振度作为反馈信号进行偏振模色散补偿的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(4): 443~448