

文章编号: 0258-7025(2009)03-0614-06

高速光传输系统中八进制差分相位 幅度键控性能分析

文爱军 刘姣姣 李晓军

(西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要 高级光调制格式能够有效抑制随信道速率的增加而给系统带来的色散、非线性等传输损伤,是高速光传输系统的关键技术之一。研究了基于马赫-曾德尔调制器(MZM)产生的八进制差分相位幅度键控非归零码(NRZ-ODPASK)、八进制差分相位幅度键控归零码(RZ-ODPASK)以及八进制差分相位幅度键控载波抑制归零码(CSRZ-ODPASK)在 40 Gbit/s 速率下的传输性能。结果表明,RZ-ODPASK 调制格式抗色散能力较强,且相位支路的色散容限均大于幅度支路;在波分复用(WDM)系统中,CSRZ-ODPASK 信道间串扰代价比 NRZ-ODPASK 和 RZ-ODPASK 分别小 0.81 dB 和 0.19 dB,更加适合高速光纤传输系统。

关键词 光纤通信; 调制格式; 八进制差分相位幅度键控; 色散容限; 串扰

中图分类号 TN929. 11 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL20093603.0614

Analysis of the Transmission Performance of Octal Differential Phase-Amplitude-Shift Keying in High Speed Optical Fiber Communication System

Wen Aijun Liu Jiaojiao Li Xiaojun

(State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract Advanced optical modulation format is one of the key technologies of high-speed optical transmission system because of its capability in mitigating transmission impairments, such as dispersion and nonlinear effects. We study the transmission characteristics of non return-to-zero octal differential phase-amplitude-shift keying (NRZ-ODPASK), return-to-zero octal differential phase-amplitude-shift keying (RZ-ODPASK), and carrier-suppressed return-to-zero octal differential phase-amplitude-shift keying (CSRZ-ODPASK) modulation formats for 40 Gbit/s system. It is shown that RZ-ODPASK format can tolerate more chromatic dispersion than the other two formats, especially in its phase channel. Furthermore, for WDM systems, CSRZ-ODPASK format performs better than NRZ-ODPASK and RZ-ODPASK in crosstalk penalty by 0.81 dB and 0.19 dB, respectively. CSRZ-ODPASK is a good choice for high speed optical fiber communication system.

Key words optical fiber communication; modulation formats; octal differential phase-amplitude-shift keying; dispersion tolerance; crosstalk

1 引 言

光纤通信中的多进制调制能够满足人们对于系统频谱利用率的追求,这其中的代表就是将信息编码于连续光比特差分相位中的差分正交相移键控(DQPSK)^[1,2]。近来备受关注的八进制差分相移键控(8DPSK)则是在 DQPSK 基础上的多进制调制,

它在一个码元周期内传输 3 bit 信息,因而具有更低的码元速率和更高的频谱利用率^[3]。但是,由于其复杂的调制和接收结构,使得光传输系统成本急剧增加。与基于相位的多进制调制相比,幅度相位联合键控多进制调制格式可以简化调制和接收结构,降低系统成本,具有很好的商业前景。因此,八进制

收稿日期: 2008-10-08; 收到修改稿日期: 2008-12-25

基金项目: 高等学校学科创新引智计划(B08038)资助课题。

作者简介: 文爱军(1968—),男,教授,博士,主要从事通信网与光通信的研究。E-mail: ajwen@xidian.edu.cn

差分相位幅度键控(ODPASK)逐渐成为研究热点^[4]。

文献[4]分析了 ODPASK 格式中非归零码(NRZ)和归零码(RZ)传输时的性能差异。在相同的色散补偿条件下,占空比为 67%的载波抑制归零码(CSRZ)比归零码和非归零码有更优的非线性容忍度^[5],因而八进制差分相位幅度键控载波抑制归零码(CSRZ-ODPASK)调制格式的系统性能值得研究。

本文分析了在最优消光比条件下,八进制差分相位幅度键控非归零码(NRZ-ODPASK)、八进制差分相位幅度键控归零码(RZ-ODPASK)和八进制差分相位幅度键控载波抑制归零码系统的误码率、色散容限以及信道串扰等问题。仿真结果表明 RZ-ODPASK 的抗色散能力较强,且相位支路的色散容限均大于幅度支路。而 CSRZ-ODPASK 在波分复

用(WDM)系统中抑制信道间串扰的能力较强,比其他两种码型更加适合高速光传输系统。

2 ODPASK 信号的发射与接收

ODPASK 为八进制幅度相位联合键控调制格式,发射机包括相位调制和幅度调制两部分,如图 1(a)所示。40 Gbit/s 的 ODPASK 信号包含三路信息,其中两路信息经过预编码驱动 DQPSK 调制器,将信息加载到光脉冲的相位上;另一路信息驱动幅度调制器,加载到光脉冲的幅度上。DQPSK 调制器采用并联调制方法,通过选取马赫-曾德尔调制器(MZM3)中不同的时钟信号幅度、频率以及相位就可以在输出端产生不同调制格式的信号脉冲。

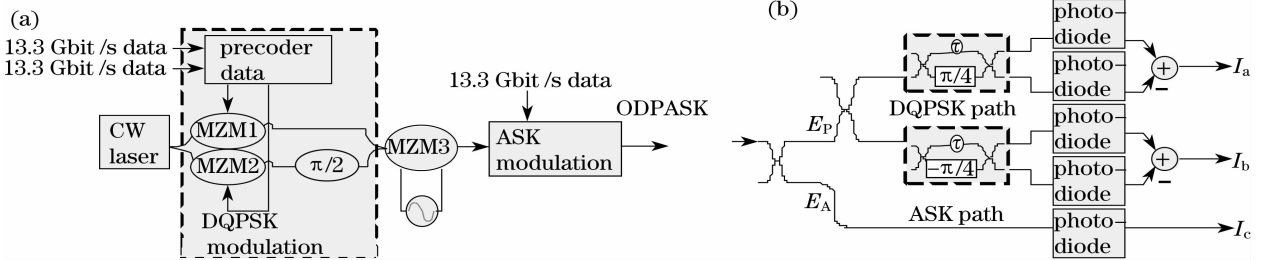


图 1 ODPASK 发射机(a)与接收机(b)原理图

Fig. 1 Schematic representation of optical ODPASK. (a) transmitter; (b) receiver

ODPASK 接收机包括幅度支路接收机和相位支路接收机,如图 1(b)所示。其中相位支路接收机由两个平衡接收机构成;幅度支路由直接检测接收机组成,直接将幅度支路光信号转变为电信号,再进行抽样判决解调出数字信息。

3 传输性能分析

影响高速光传输系统性能的主要是光纤的非线性以及色散效应^[6]。非线性效应主要是四波混频

(FWM)和交叉相位调制(XPM)。FWM 会产生鬼脉冲,形成码间串扰,导致接收端解码错误。信号长距离传输,受色散影响严重^[7],虽然利用色散补偿光纤或其他色散补偿器件可以对系统的色散值进行补偿,但由于环境的因素使得传输线路中的色散值发生变化,残余色散值将影响系统的性能。因此,色散容限以及抵抗非线性的能力都是衡量采用不同调制格式的系统健壮性的重要指标。

3.1 系统配置

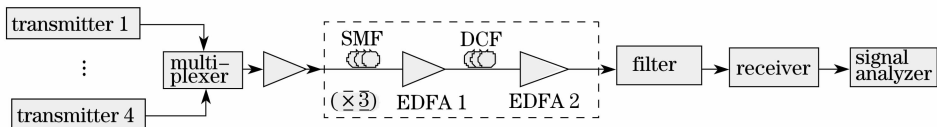


图 2 ODPASK 传输系统配置

Fig. 2 Schematic model of the ODPASK transmission system

图 2 为 ODPASK 系统仿真配置图,采用无前向纠错编码(FEC)情况下的 4×40 Gbit/s 的 WDM 系统,信道间隔 100 GHz(193~193.3 THz)。传输链路有 3 个跨段,每个跨段包含一个 100 km 的标准单模光纤(SMF)和一个 20 km 的色散补偿光纤(DCF)。DCF 对 SMF 中的色散进行补偿。SMF

前置的掺铒光纤放大器(EDFA)用于设定 SMF 的平均入纤光功率,SMF 和 DCF 后置的 EDFA 用于补偿各自的传输功率损耗。

在 ODPASK 调制格式中,调制幅度可能的取值为 a 和 b ,分别对应“0”和“1”。为了使幅度支路和相位支路具有同等的传输性能,需使两支路在背

靠背系统中的眼张开满足相等的条件,这就取决于调制消光比的取值。如图 1(a)所示发射机结构,连续光载波经过相位和幅度模块调制后,ODPASK 信号可以表示为

$$E(t) = A(t) \exp\{j[\omega_0 t + \theta(t)]\},$$

其中, $A(t)$ 为调制幅度, ω_0 为光载波频率, $\theta(t)$ 为调制的差分相位,可以取 $\{0, \pi/2, \pi, 3\pi/2\}$ 四个值。经过解调,可以得到相位支路和幅度支路解调电信号的电流为

$$I_a(t) = \frac{1}{4} K A(t) A(t - \tau) \cos[\theta(t) - \theta(t - \tau) + \pi/4],$$

$$I_c(t) = \frac{1}{2} K [A(t)]^2,$$

其中, K 为光电二极管的响应系数, $A(t)$, $A(t - \tau) \in \{a, b\}$ 。根据电流表达式,可以得到相位支路(P)和幅度支路(A)的眼张开分别为

$$d_p = \sqrt{2} K a^2 / 4, \quad d_A = K(b^2 - a^2) / 2$$

当 $d_A = d_p$ 时,可以得到 $10 \lg(b^2/a^2) = 2.32$ dB 为 ODPASK 系统最优消光比。

为了分析 NRZ-ODPASK, RZ-ODPASK 和 CSRZ-ODPASK 三种调制码型的传输性能,在最优消光比条件下,依次对误码性能、单信道传输时系统的色散容限以及在 WDM 系统中信道串扰等方面的特性进行分析比较。

3.2 背靠背系统误码性能

图 3 给出了背靠背传输时,ODPASK 系统接收功率(ROP)与误码率(BER)的关系。当误码率达到 1.0×10^{-10} 时, NRZ-ODPASK 的接收功率为 -13.0 dBm, RZ-ODPASK 和 CSRZ-ODPASK 的接收功率分别为 -17.8 dBm 和 -17.7 dBm。非归零码系统的接收功率比载波抑制归零码和归零码系统大 4.8 dBm 左右。而入纤功率过大会引起自相位调制(SPM)、四波混频等非线性效应^[8]。因此,由非归零码产生的 NRZ-ODPASK 并不适用于 40 Gbit/s 的高速传输系统。由于归零码相邻的光脉冲之间的光功率会回到零,时钟信号更容易提取。所以, RZ-ODPASK 和 CSRZ-ODPASK 更适合于高速传输系统。

3.3 色散性能

幅度相位联合键控调制格式属于多进制调制的一种,多进制调制的引入使得系统的抗色散能力得到加强。对于三种不同的调制码型,其相应的幅度相位联合键控调制格式的色散容限也会有所不同。首先分析在忽略偏振模色散存在的情况下,各种调

制码型的色散容限。

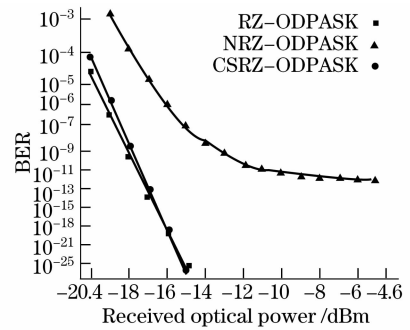


图 3 接收功率与误码率的关系

Fig. 3 BER versus received optical power

从图 4 可以看到,相位支路容忍度最差的是占空比为 50% 的 RZ-ODPASK,其次是占空比为 67% 的 CSRZ-ODPASK,最后是 NRZ-ODPASK;而幅度支路容忍最好的是占空比为 50% 的 RZ-ODPASK,其次是占空比为 67% 的 CSRZ-ODPASK,最后是 NRZ-ODPASK。可见,占空比越小,幅度和相位两支路的色散代价差就越小。对于占空比为 50% 的 RZ-ODPASK,在累积色散绝对值小于 80 ps/nm 的范围内,两支路的色散容忍度基本一致。当累积色散绝对值超过该范围,逐渐变大时,两支路的色散代价差也逐渐变大。相比之下, NRZ-ODPASK 两支路的色散代价差最大, CSRZ-ODPASK 所受的影响居中。

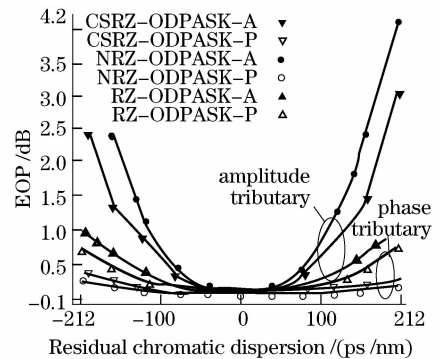


图 4 色散容限

Fig. 4 Dispersion tolerance

另外,由图 4 还可以看到,ODPASK 相位支路的抗色散能力优于幅度支路信号,这主要归因于相位支路加载信息的方式。相位支路是将相邻码元的相位信息转换成功率信号进行解调。在有色散存在的情况下,光场幅度受影响比较严重,导致码元包络发生畸变,而相位则受影响相对比较小,并且码元幅度上的抖动对相位支路的解调影响较小。所以,幅度支路是影响 ODPASK 整体色散性能的主要因素。

偏振模色散(PMD)是由光纤截面微小的不对

称性引起的色散,其产生的因素包括预制棒或折射率分布的不对称性,以及光缆制造、铺设过程中的侧向挤压、扭曲和弯曲等^[9]。在传输距离相对较短、数据速率较低时,PMD的影响并不显著。然而随着光纤系统的改进以及其在 WDM 系统中的应用,PMD 已日益成为长距离、多信道高速率系统潜在的限制因素,就需要详细分析^[10,11]。1996 年国际电信联盟远程通信标准化组 (ITU-T) 规定,成品的单模光纤其偏振模色散系数应小于 $0.5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ 。在 20 世纪 90 年代以前铺设光纤的偏振模色散较大,其偏振模色散系数一般大于 $0.5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ 。而近年来铺设的干线和系统,广泛采用 G. 655 非零色散位移单模光纤,其偏振模色散系数一般较小(典型值为 $0.1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$)。为了更加全面地分析 ODPASK 调制系统的色散性能,分别测试了偏振模色散系数在 $0.1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$, $0.5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ 两种情况下对于 ODPASK 系统色散容限的影响(如图 5 所示)。

图 5(a) 中 PMD 系数为典型值 $0.1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ 。可以看到,当累积色散达到 $200 \text{ ps}/\text{nm}$ 时,眼张代价 (EOP) 最大的是 NRZ-ODPASK-A (幅度支路),其 EOP 为 4.7 dB。最小的是 NRZ-ODPASK-P (相位支路),只有 0.4 dB。在图 5(b) 中,PMD 系数升高到 $0.5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$,几种码型的 EOP 均有所增加,但程度有所不同。当累积色散为 $200 \text{ ps}/\text{nm}$ 时,NRZ-ODPASK-A 的眼张代价最大为 6.5 dB,相比图 5(a) 中的结果高出 1.8 dB。RZ-ODPASK-P, CSRZ-ODPASK-P 以及 NRZ-ODPASK-P 的 EOP 分别为 1 dB, 0.83 dB 和 0.41 dB,相比图 5(a) 增加的代价小。这表明相位支路在抑制偏振模色散方面有较强的能力,综合考虑幅度和相位两条支路的容限范围,可以看出占空比较小的 RZ-ODPASK 系统的眼张代价较小,且曲线较为平稳,抗色散能力较好。

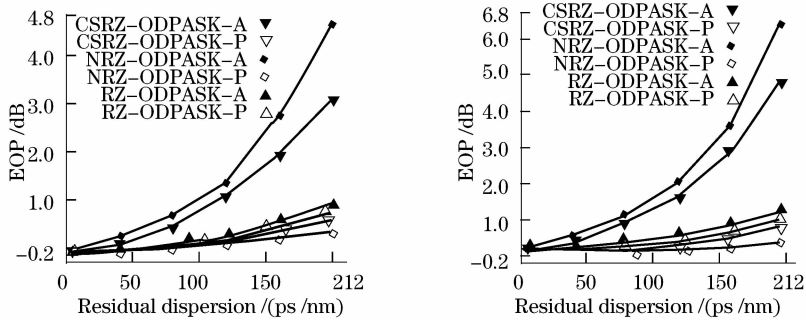


图 5 考虑偏振模因素的色散容限。(a) PMD: $0.1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$; (b) PMD: $0.5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$

Fig. 5 Dispersion tolerance with PMD of (a) $0.1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$, (b) $0.5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$

3.4 WDM 系统信道串扰分析

图 6 为传输速率为 40 Gbit/s,信道间隔分别为 100 GHz 和 50 GHz 时,四信道 NRZ-ODPASK, RZ-ODPASK 和 CSRZ-ODPASK 信号的频谱特性。

在 WDM 系统中,不同信道间信号的串扰将会导致系统性能的恶化^[12]。由于串扰是在通信间隔减小时受到窄光滤波引起的,当通道间隔减小时,串扰代价就会逐渐增加。

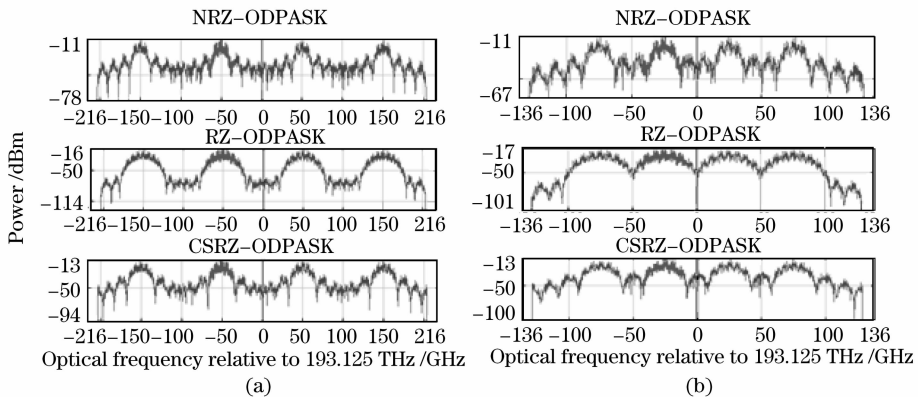


图 6 WDM 系统中不同信道间隔信号的频谱图。(a) 100 GHz 信道间隔; (b) 50 GHz 信道间隔

Fig. 6 Spectrum in WDM transmission for (a) 100 GHz spacing and (b) 50 GHz spacing

在接收端,对中心频率为 193.1 THz 的第二信道进行分析。从图 6(a)可以看到,当信道间隔为 100 GHz 时,NRZ-ODPASK 和 CSRZ-ODPASK 的频谱相比 RZ-ODPASK 要窄,对于 33.25 GHz 的光滤波带宽,信号主瓣带宽的富余量较大,相邻信道间的影响较小。而在图 6(b)中,当信道间隔为 50 GHz 时,对于同样的光滤波带宽,三种格式主瓣信号的富余量均相应地减少,信号发生串扰的概率

增大。从频谱宽度来看,CSRZ-ODPASK 和 NRZ-ODPASK 比 RZ-ODPASK 更窄,经过光纤传输后所产生的串扰代价要小。

ODPASK 信号在 100 GHz 信道间隔时,经过光纤传输后的眼图如图 7 所示。从左到右依次为 NRZ-ODPASK, RZ-ODPASK, CSRZ-ODPASK。可以看到,RZ-ODPASK 和 CSRZ-ODPASK 的眼图较清晰,和我们分析频谱时得到的结论一致。

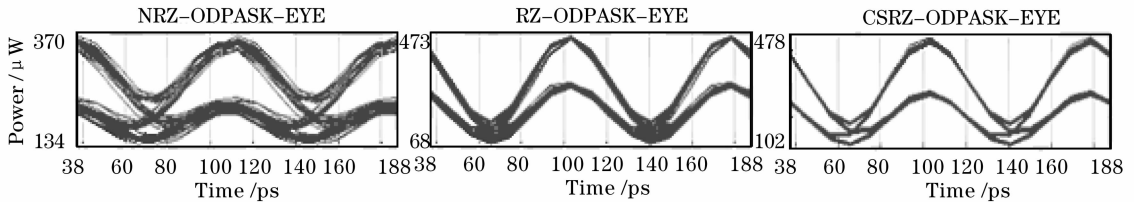
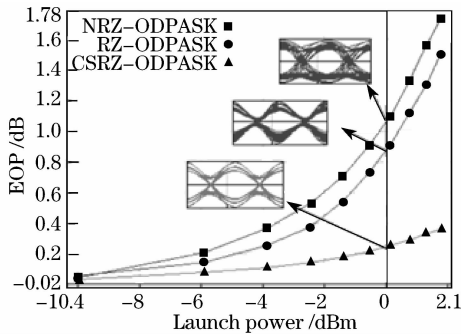


图 7 ODPASK 信号经过光纤传输后的眼图

Fig. 7 Eye diagrams of ODPASK after 3 spans optical fiber transmission



8 经过光纤传输后 ODPASK 相位支路眼图以及串扰代价
Fig. 8 Eye diagrams and crosstalk penalty of ODPASK phase channel after optical fiber transmission

图 8 给出了三种格式在 100 GHz 信道间隔的情况下,接收端相位支路的眼图以及眼张开代价曲线。随着入纤光功率的增加,三种格式的眼张开度总的趋势都在增加,但程度有所不同。当入纤光功率为 0 dBm 时,NRZ-ODPASK, RZ-ODPASK 和 CSRZ-ODPASK 的代价分别为:1.06 dB, 0.87 dB 和 0.25 dB。表明 NRZ-ODPASK 的抗串扰能力较差,RZ-ODPASK 其次。CSRZ-ODPASK 的代价比 NRZ-ODPASK 小 0.81 dB,比 RZ-ODPASK 小 0.19。说明由于 CSRZ-ODPASK 中的 CSRZ 相邻码元有 π 相位差,能够有效地减小色散管理系统不希望出现的脉冲。

另外,经过光纤传输后,NRZ-ODPASK 的眼图畸变较大。这说明虽然非归零码窄的频谱使其在抗串扰上具有一定的优势,但由于在同样误码率情况下,它的接收功率要大于其他两种码型。所以系统受到非线性的影响也就较为强烈,会导致传输性能

较差,并不适合长距离高速传输系统。而非归零码有相当频谱优势的载波抑制归零码所产生的调制格式 CSRZ-ODPASK,由于其信道间的非线性耦合比较小,眼图畸变较小,系统性能较好。并且随着信道间隔的增大,CSRZ-ODPASK 所表现出的抗串扰性能会更加突出。

4 结 论

讨论了三种八进制差分相位幅度键控调制格式的误码率、色散以及信道串扰对系统的影响,并相应地进行了仿真分析。比较结果表明,RZ-ODPASK 调制格式的抗色散能力较强,且其相位支路的色散容限均大于幅度支路。在 WDM 系统中,CSRZ-ODPASK 的信道串扰较其他两种格式要小,并且随着通道间隔的增大,这种优势会更加明显。优越的性能结合相对低廉的商用化成本,CSRZ-ODPASK 成了高速光传输系统当中较有优势的候选调制格式。

参 考 文 献

- 1 R. A. Griffin, A. C. Carter. Optical differential quadrature phase-shift key (oDQPSK) for high capacity optical transmission [C]. *OFC*, 2002, paper WX6;367~368
- 2 He Jing, Liu Limin, Chen Lin *et al.*. Generation of advanced modulation formats based on Mach-Zehnder modulators [J]. *Chinese. J. Lasers*, 2008, **35**(8):1185~1190
何晶,刘丽敏,陈林等.基于马赫-曾德尔调制器的先进调制格式的产生[J]. *中国激光*, 2008, **35**(8):1185~1190
- 3 M. Serbay, C. Wree, W. Rosenkranz *et al.*. Experimental investigation of RZ-8DPSK at 3×10.7 Gb/s [C]. *IEEE/LEOS*, 2005, paper WE-3;483~484
- 4 S. Hayase, N. Kikuchi, K. Sekine *et al.*. Chromatic dispersion

- and SPM tolerance of 8-state/symbol (binary ASK and QPSK) modulated signal[C]. *OFC*, 2004,(2):paper ThM3
- 5 Xu Xiaogeng, Zhang Xinliang, Liu Deming *et al.*. Experimental study on transmission performance of three different formats in 40 Gb/s optical fiber communication system[J]. *Chinese. J. Lasers*, 2005, **32**(10):1371~1376
- 徐晓庚, 张新亮, 刘德明 等. 40 Gb/s 光纤通信系统中不同码型传输特性的实验研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(10):1371~1376
- 6 P. J. W, R. J. E.. Advanced optical modulation formats[J]. *IEEE*, 2006, **94**(5):952~985
- 7 A. E. Willner. Introduction to the feature issue on fundamental challenges in ultra high capacity optical fiber communications systems[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(11):2053~2103
- 8 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. 3rd ed., San Diego: Academic Press, 2001:205~209
- 9 N. Gisin, J. P. Von der Weid, J. P. Pelloux. Polarization mode dispersion of short and long signal-mode fibers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(7):
- 10 Xi Lixia, Zhang Xiaoguang, Li Yu. An experiment of automatic PMD compensation in 40-Gb/s RZ optical communication system [J]. *Chin. Opti. Lett.*, 2004, **2**(5):262~264
- 11 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):226~232
- 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):226~232
- 12 Liu Ning, Liao Changjun, Liu Songhao. Analysis of the crosstalk in WDM systems caused by cross-phase modulation in erbium-doped fiber amplifiers[J]. *Chinese. J. Lasers*, 2001, **A28**(5):360~364