

文章编号: 0258-7025(2009)03-0574-07

四种级联差分相位调制码的 100 Gbit/s 传输

邵宇丰¹ 李 佳^{1,2} 程黎黎¹ 皮雅稚¹ 文双春¹ 陈 林¹

(¹ 湖南大学计算机与通信学院微纳光电及器件教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082)

² 湖南人文科技学院, 湖南 娄底 417000

摘要 在级联相位调制的 100 Gbit/s 光信号传输系统中,对差分相移键控非归零码(NRZ-DPSK)、差分相移键控归零码(RZ-DPSK)、差分四相相移键控非归零码(NRZ-DQPSK)和差分四相相移键控归零码(RZ-DQPSK)进行了比较研究。当四种信号通过 90 km 的标准单模光纤(SMF)和 16 km 的色散补偿光纤(DCF)传输后,在满足相同入纤功率的条件下,NRZ-DQPSK 信号具有最高的色散容限;如果仅仅考虑一阶偏振模色散(PMD),RZ-DQPSK 信号具有最优的抗偏振模色散特性;当入纤功率在 0~10 dBm 的范围内调节时,RZ-DPSK 信号具有最好的非线性容忍度;最后比较了四种相位调制码型传输后通过不同带宽的三阶高斯滤波器后的接收性能,得出滤波器带宽值大于 125 GHz 后,NRZ-DPSK 信号的接收性能最佳。

关键词 光通信;相位调制;非归零;归零;100 Gbit/s

中图分类号 TN 929.11

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL20093603.0574

Four Serial Differential Phase-Shift Keying Modulation Formats for 100 Gbit/s Transmission Applications

Shao Yufeng¹ Li Jia^{1,2} Cheng Lili¹ Pi Yazhi¹ Wen Shuangchun¹ Chen Lin¹

¹ Key Laboratory for Micro/Nano Optoelectronic Devices of Ministry of Education,
School of Computer and Communication, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China

² Hunan Institute of Humanities Science and Technology, Loudi, Hunan 417000, China

Abstract In the 100 Gbit/s optical signal transmission system, by comparing the transmission characteristics of the four serial phase modulation formats with those of NRZ-DPSK, RZ-DPSK, NRZ-DQPSK, and RZ-DQPSK, respectively, we show that, when each signal was transmitted over 106 km optical SMF + DCF, the NRZ-DQPSK signal has the highest chromatic dispersion tolerance when the fiber input powers of four phase modulation formats are same. If only considering first order polarization mode dispersion (PMD), RZ-DQPSK has the largest first order PMD tolerance. When adjusting the fiber input power from 0 ~ 10 dBm, RZ-DPSK format is very robust against nonlinearities. At last, each phase modulation signal was launched into a third-order Gaussian optical bandpass filter (OBPF) with different bandwidth, and their receipt performance was compared. In addition, the NRZ-DPSK signal has the best transmission performance, if it was launched into a third-order Gaussian optical bandpass filter placed with beyond 125 GHz bandwidth.

Key words optical communication; phase modulation; non-return-to-zero; return-to-zero; 100 Gbit/s

收稿日期: 2008-08-11; **收到修改稿日期:** 2008-10-28

基金项目: 湖南大学优秀博士论文资助对象计划、高等学校博士学科点专项科研基金(20040532005)和国家教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目。

作者简介: 邵宇丰(1977—),男,湖南人,博士研究生,主要研究方向为光信号传输系统中的先进码型调制技术、光分组交换网络中的标记交换技术等。E-mail:shaoyufeng2006@yahoo.com.cn

导师简介: 文双春(1966—),男,湖南人,教授,博士生导师,主要研究方向为光纤通信技术、光子材料与器件等。E-mail:scwen@hnu.cn (通信作者)

1 引言

2008 年 5 月 20 日,在首次由中国北京承办的第 43 届 IEEE 世界通信大会(ICC)上,工业和信息化部副部长娄勤俭指出,目前我国已建成覆盖全国的有较强通信能力的骨干网络,光纤通信已得到了充分发展;通信网、互联网、广电网正在向 IP 化、宽带化和多媒体化发展,三网融合的进程正在加快;固定光网络通信和移动通信正在向更高速率和下一代通信网络发展^[1]。此前,2006 年 9 月 19 日在 DALLAS 举行的“Light Reading’s Optical Expo”会议上,AT&T 的 Simon Zelingher 指出考虑到视频及多媒体业务的需求,到 2010 年底,需要进行 100 Gbit/s 的光信号传输^[2]。这两个著名的国际会议极大地激发了国内外科研组织和光通信产业界对发展具有更多承载业务光网络的研究热情,也指明具有 100 Gbit/s 传输速率的光网络将是未来着重发展的一种基础级电信网络。而为了满足光信号大容量和长距离的传输需求,选择合适的光信号码型将是未来发展 100 Gbit/s 光通信网络的关键。一方面,需要增加光通信系统的频带利用率、色散容限、偏振膜色散容限和抗非线性负面效应的能力;另一方面,需要在不增加系统设备即不提高网络成本的前提下选用最合适的光电器件。传统的光通信系统采用幅移键控(ASK)进行信号调制,但随着信号速率的增加,信号在光纤中传输所受的非线性负面效应影响会加重,也制约了传输距离的提高。此外,ASK 光信号的带宽利用率较低,又限制了密集波分复用系统(DWDM)中信道的可利用数量。因此,传统的 ASK 调制方式与光通信系统高速率高效率的大发展方向产生了矛盾。2002 年 Bell Lab 采用差分相移键控(DPSK)调制方式将密集波分复用的 40 Gbit/s 信号的传输距离从 2000 km 增加到 4000 km。这个革命性实验指明相位调制码型将是未来光通信系统中需要着重发展的一种调制格式。2004 年 6 月在 San Francisco 举行的“Workshop on Advanced Modulation Formats”会议上,专门就相位调制码型进行了研究,并进一步研究了差分四相相移键控(DQPSK)调制码型在光信号传输系统中的应用。但据作者所知,迄今为止,尚未有 100 Gbit/s 的四种传统级联差分相位调制码型的传输比较研究见诸报道。本文基于级联调制的 100 Gbit/s 光信号传输系统,对差分相移键控非归零码(NRZ-DPSK)、差分相移键控归零码(RZ-

DPSK)、差分四相相移键控非归零码(NRZ-DQPSK)和差分四相相移键控归零码(RZ-DQPSK)进行了比较研究。

2 100 Gbit/s 级联差分相位调制传输系统的配置

对于 100 Gbit/s 标准的光信号传输系统^[3],国外许多研究机构在不同调制码型的选择上表现出浓厚的兴趣,例如非归零码(NRZ)^[4],双二进制码(duobinary)^[4],以及差分四相相移键控码^[5]。在这些工作的基础上,为了比较研究四种级联差分相位调制码型的 100 Gbit/s 传输,我们建立了如图 1 所示的四种码型信号的发送装置(值得注意的是,两幅图中的双臂 M-Z 调制器如果不连接,会产生两种非归零码的相位调制信号,反之,则产生两种归零码的相位调制信号)。图 1(a)中经过预编码处理后的输入数据比特流(Data)可表示为

$$\text{Data} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k q(t - kT), \quad c_k = 0, 1 \quad (1)$$

式中 c_k 为发送端经过预编码处理后的输入数据序列, k 为发送的伪随机信号的比特字长, $q(t)$ 为发送的脉冲波形(发送的是非归零矩形脉冲), $T = 1/R$ (R 为码元的传送速率)为码元时间宽度。设输入相位调制器 1(PM_1)前端未经调制的载波信号光场为 $E_{\text{in}}(t) = |E_0| e^{j\omega_c t}$,其中 $|E_0|$ 为光载波信号的场强, ω_c 为光载波信号的频率。那么,经过相位调制器 1 后输出的信号光场为

$$E_{1,\text{out}}(t) = E_{\text{in}}(t) e^{j\Delta\phi_1 c_k}, \quad (2)$$

式中 $\Delta\phi_1 = \pi$ 为相位偏移值, $E_{1,\text{out}}(t)$ 为相位调制器 1 的输出信号光场。相位调制器 1 的输出光信号为 NRZ-DPSK 信号。图 1(b)中经过预编码处理后的输入数据比特流(Data)还需进行串并变换(Serial Parallel Transform),分为两部分连续且速率相等的比特流。类似地,经串并变换后的两路数据比特流表达式都如(1)式所示,同样,相位调制器 2(PM_2)的输出光信号为 NRZ-DPSK 信号,再将该信号输入相位调制器 3(PM_3)后得到输出的信号光场为

$$E_{3,\text{out}}(t) = E_{2,\text{out}}(t) e^{j\Delta\phi_2 \cdot d_k} = E_{\text{in}}(t) e^{j\pi(c_k + \frac{1}{2}d_k)}, \quad (3)$$

式中 c_k 和 d_k 是经串并变换后的两路比特流的输入数据序列, $\Delta\phi_2 = \pi/2$ 为相位偏移值, $E_{2,\text{out}}(t)$ 和 $E_{3,\text{out}}(t)$ 分别为相位调制器 2 和相位调制器 3 的输出信号光场。从(3)式可以看出,来自分布反馈式激光器的连续光载波信号经过两个级联的相位调制器

后,输出光强恒定的 NRZ-DQPSK 信号,但其相位变化取决于 $c_k + \frac{1}{2}d_k$ 的值,四种可能的相位取值为 $(0, \pi/2, \pi, 3\pi/2)$ 。在这种串联调制方式中,如果将两个调制器的顺序颠倒也是可行的。之所以不采用并联调制方式,是因为串联调制方式产生 NRZ-DQPSK 信号在结构配置上更简单^[6];之所以不采用级联双臂 M-Z 调制器进行相位调制,是因为串联调制方式对双臂 M-Z 调制器的失调比较敏感,并且采用相位调制器不需外加电路来设置直流偏置电压

(DC),能简化发送装置。产生 RZ-DPSK 信号和 RZ-DQPSK 信号的过程是在相位调制器之后再级联一个双臂 M-Z 调制器来实现。双臂 M-Z 调制器在许多光通信领域得到应用^[7, 8],本文中双臂 M-Z 调制器的电调制信号是幅度为 $V_\pi/2$ (V_π 为调制器开关电压或称半波电压),频率值等于比特率值一半的正弦脉冲 $V_\pi \cdot [1 + \sin(\omega t - \pi/2)]/4$; 双臂 M-Z 调制器的偏置电压点为 V_π 。在图 1(a)中的时钟信号频率值为 50 GHz,图 1(b)中的时钟信号频率值为 25 GHz。

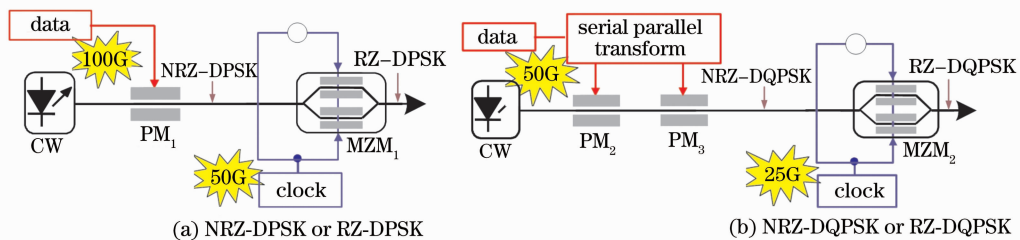


图 1 四种级联差分相位调制信号的发送装置

Fig. 1 Transmitter configuration of four serial differential phase modulation signals

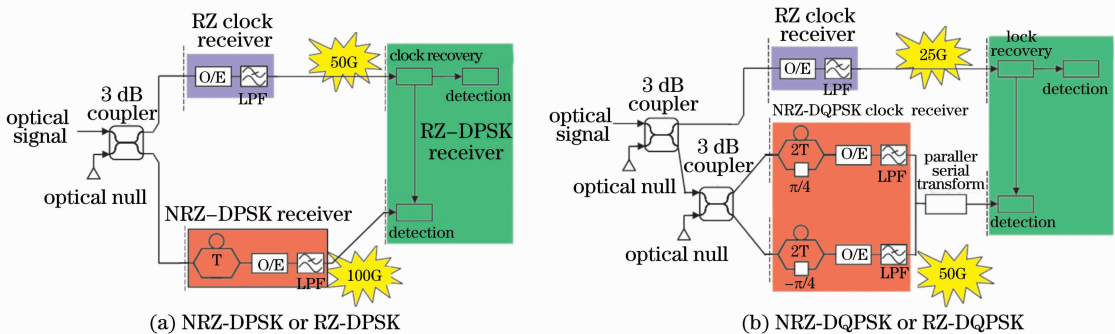


图 2 四种级联差分相位调制信号的解调及检测

Fig. 2 Demodulation and detection of four serial differential phase modulation signals

接收四种级联差分相位调制信号的过程如图 2 所示。其中图 2(a)是解调 NRZ-DPSK 信号和 RZ-DPSK 信号的示意图,图 2(b)是解调 NRZ-DQPSK 信号和 RZ-DQPSK 信号的示意图(值得注意的是,两幅图中的时钟恢复模块如果不连接,则解调两种非归零码的相位调制信号,反之,则解调两种归零码的相位调制信号)。在图 2(a)和(b)中,RZ 时钟信号只须采用一个光电检测二极管来实现接收。NRZ-DPSK 信号需要一个上臂有 1 比特延时的干涉仪来接收, NRZ-DQPSK 信号则需要一个上臂有 2 比特延时且下臂分别有 $\pm\pi/4$ 相移的干涉仪来接收。不同的是,解调后的两路 NRZ-DQPSK 信号还需要进行并串变换(Parallel Serial Transform),将检测到的两部分连续且速率相等的比特流合并恢复

为初始数据信息。如果数据是采用非归零码调制型进行发送(如 NRZ-DPSK 信号和 NRZ-DQPSK 信号),因为在光纤中调相信号的传输是恒定包络或近似恒定包络的传输,从接收信号中提取比特时钟,需将相位信息转变为强度信息,实现起来较为复杂,尤其是当数据中的相位信息连续时,提取比特时钟更加困难。如果数据采用归零码调制型进行发送(如 RZ-DPSK 信号和 RZ-DQPSK 信号),因为叠加了进行强度调制的时钟信号,相邻信号脉冲之间的光功率能恢复到零,所以定时信息丰富且可以直接采用一个光电检测二极管来实现时钟恢复。此外,如图 2 所示,解调后时钟的比特速率低于数据的比特速率,也降低了提取比特时钟的难度。

3 结果及分析

设连续波激光器的工作波长为193.1 THz,输出功率为10 dBm。图 1(a)和(b)中电信号源产生字长为 $2^{15} - 1$ 的伪随机二进制序列,分别发送 100 Gbit/s和50 Gbit/s的数据信号。数据信息流经过预编码处理后^[9~12],再经过相位调制分别得到 100 Gbit/s的 NRZ-DPSK 信号和 NRZ-DQPSK 信号。对双臂 M-Z 调制器 1(MZM₁)和双臂 M-Z 调制器 2(MZM₂)进行调制的电信号分别是50 GHz和 25 GHz的正弦时钟信号。在背对背系统中,采用相干检测的平衡接收机检测得到的眼图如图 3 所示。因为 NRZ-DQPSK 信号和 RZ-DQPSK 是采用 2 倍

比特率的延时平衡检测,所以检测到的眼图信号周期值为20 ps,是检测到的 NRZ-DPSK 和 RZ-DPSK 眼图信号周期值(10 ps)的 2 倍。

图 4 所示为四种级联差分相位调制信号的频谱图。不难看出,100 Gbit/s的非归零码相位调制信号的频带利用率总是高于归零码相位调制信号的频带利用率;其中,NRZ-DQPSK 具有最高的频带利用率。众所周知,光信号的频带利用率高,在一定程度上可以增加掺铒光纤放大器(EDFA)增益带宽范围内的通信传输容量。但是否叠加时钟信号传输和是否采用比 DPSK 信号更复杂的 DQPSK 信号传输,应根据设计系统的具体用途来考虑。

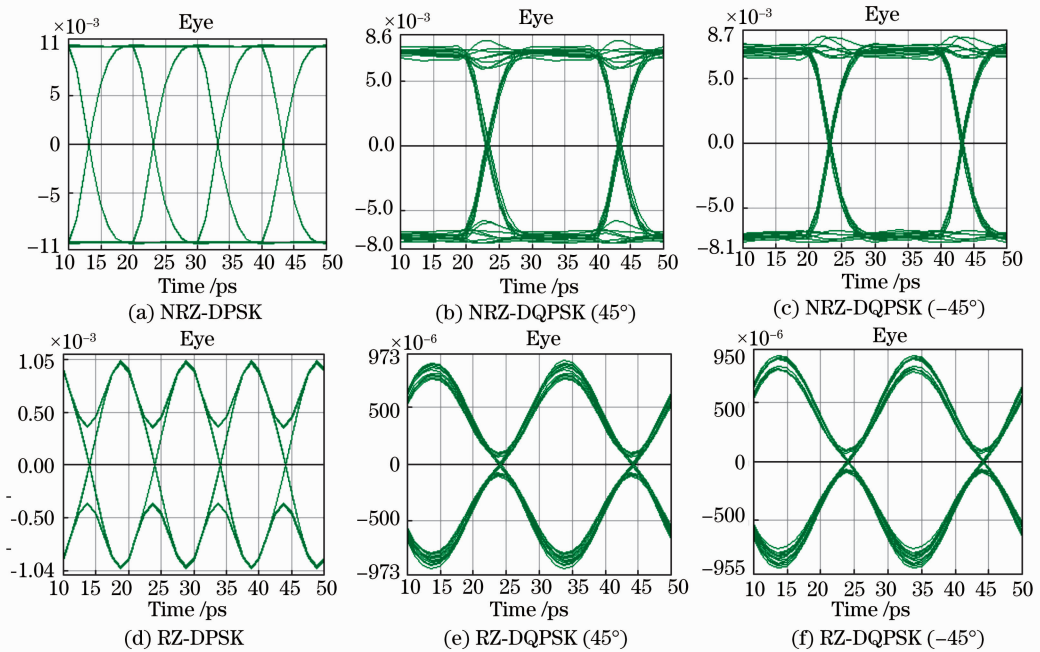


图 3 检测四种级联差分相位调制信号的眼图

Fig. 3 Measured eye diagrams of four serial differential phase modulation signals in the back-to-back case

表 1 使用的光纤参数

Table 1 Used optical fiber parameters

Fiber parameters	SMF	DCF
Length (amplifier spacing /km)	90	16
Dispersion D / (ps/(nm · km))	16	-90
Fiber loss / (dB/km)	0.2	0.6
Nonlinear coefficient γ / (W · km) ⁻¹	2.6	4
Dispersion slope $dD/d\lambda$ / (ps/(nm ² · km))	0.08	-0.21

在实际的光信号传输系统中,通常每一个传输段(Amplifier Span)都会进行线路色散补偿。在本方案中(如图 5 所示),四种级联差分相位调制信号采用90 km的标准单模光纤(SMF)和16 km的色散补偿光纤(DCF)(SMF+DCF,进行后置色散补偿)

进行传输。使用的两种光纤参数如表 1 所示。为了降低非线性负面效应,设置入纤功率为0 dBm。在一个传输段中,都会连接一个掺铒光纤放大器(EDFA)来补偿信号在光纤中传输的衰减。在接收机前端,光信号通过一个100 GHz带宽的光带通滤波器(OBPF)来抑制 EDFA 放大自发辐射噪声的负面影响。

在实际的光信号传输系统中,因为一些不可预测的因素,后置色散补偿过程不能完全理想地完成。不失普遍性,在一个传输段(光信号通过90 km的 SMF 和16 km的 DCF)进行研究,测得四种级联差分相位调制信号的剩余色散值(Residual Dispersion)和信号的眼开度代价(EOP)的关系如

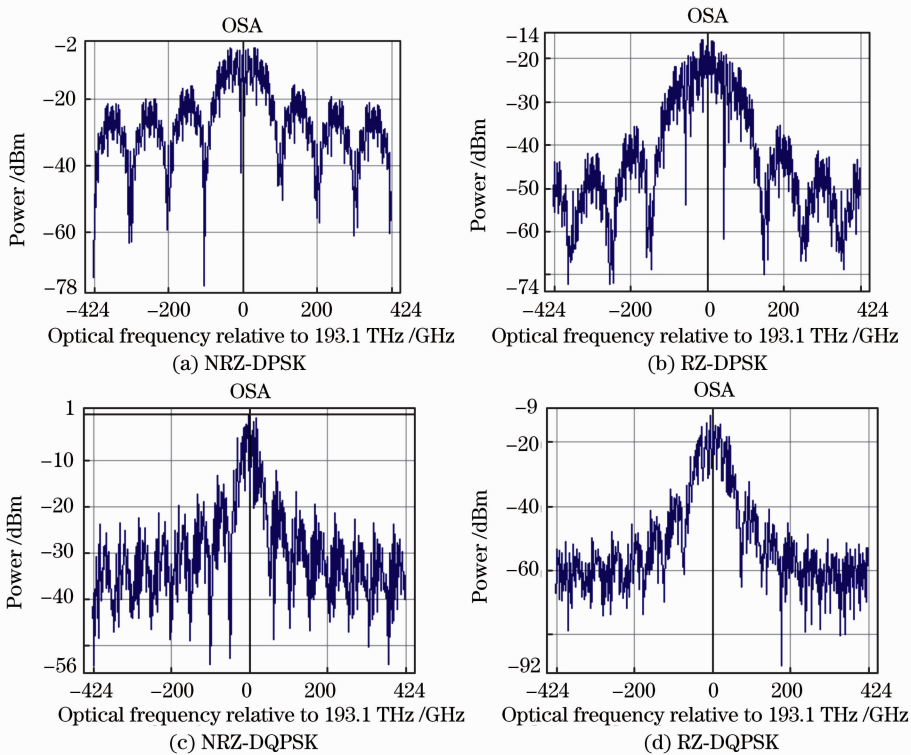


图 4 四种级联差分相位调制信号的频谱图

Fig. 4 Measured optical spectra diagrams of four serial differential phase modulation signals

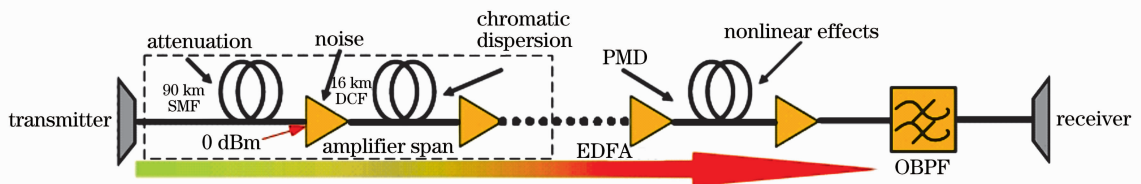


图 5 四种级联差分相位调制信号的传输方案

Fig. 5 Transmission scheme of four serial differential phase modulation signals

图 6(a)所示。不难发现,非归零码的两种相位调制信号比两种归零码相位调制信号有更高的色散容限,并且 NRZ-DQPSK 具有最高的色散容限,这是由于非归零码相位调制信号的频谱比归零码相位调制信号的频谱更紧凑,并且 NRZ-DQPSK 的频带利用率是最高的。因此仅考虑增加通信系统的容量和色散容限而忽略收发设备的复杂性,选用 NRZ-DQPSK 码型传输信号是较为妥当的。

当单信道的传输码率达到 10 Gbit/s 以上,特别是超过 40 Gbit/s 时,偏振模色散(PMD)对传输系统的损害就很明显,PMD 已成为实现超高速光纤通信系统的主要限制因素之一。在一个传输段,四种级联差分相位调制码的一阶 PMD 与 EOP 的关系如图 6(b)所示。其中定义归一化的群时延色散(DGD)的取值范围为 0~0.8。可以发现,归零码的

两种相位调制信号比两种非归零码的相位调制信号有更高的 PMD 容限,尤其是 RZ-DQPSK 信号有最高的 PMD 色散容限。仅考虑便于提取信号的时钟和增加 PMD 容限而忽略其他因素,选用 RZ-DQPSK 码型传输信号是最好的。

非线性负面效应的影响也是需要考虑的一个因素。四种级联差分相位调制码型的入纤功率与 EOP 的关系如图 6(c)所示。由于归零码的两种相位调制信号脉冲间的光功率在一个码元周期能恢复到零,所以比非归零码的两种相位调制信号更能抵抗非线性效应的负面影响。因此只考虑简化系统收发装置、便于提取时钟和提高抵抗非线性负面影响的能力而忽略其他因素,选用 RZ-DPSK 码型进行 100 Gbit/s 信号的传输是最佳的。

在图 6(a)~(c)的测试过程中,一个带宽

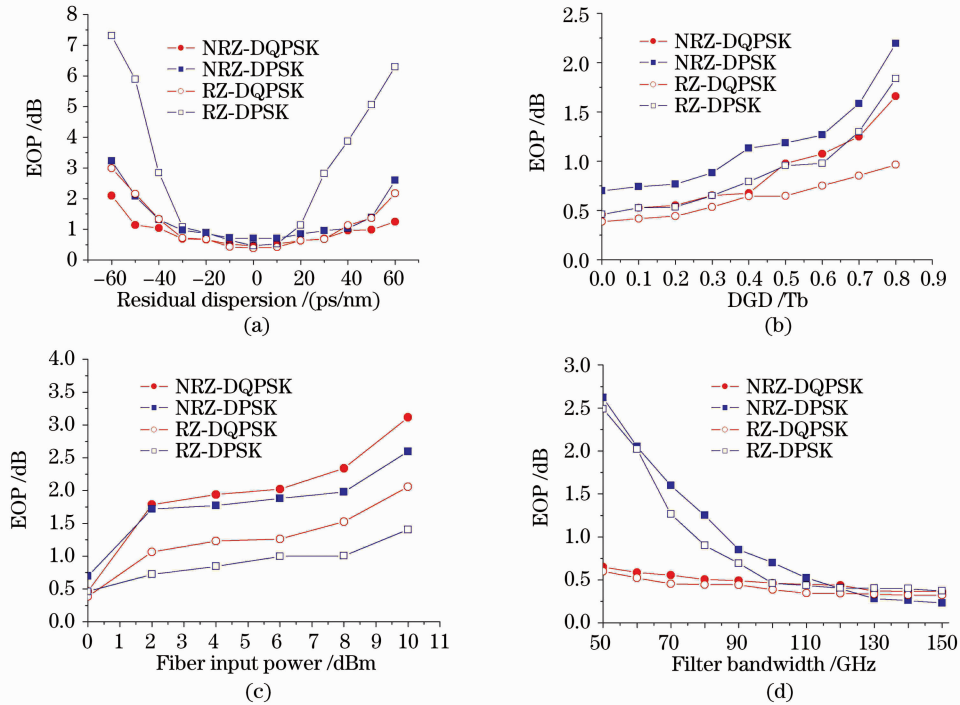


图 6 (a) 剩余色散和眼开度的代价关系;(b) 一阶偏振模色散和眼开度的代价关系;
(c) 入纤功率和眼开度的代价关系;(d) 三阶高斯带通滤波器带宽和眼开度的代价关系

Fig. 6 EOP versus (a) residual dispersion, (b) first-order-PMD,

(c) fiber input power, and (d) bandwidth of third-order Gaussian OBPF

100 GHz的三阶高斯型光带通滤波器(OBPF)被用来抑制 EDFA 放大自发辐射噪声的负面影响。如果始终保持入纤功率值为 0 dBm,采用不同带宽的 OBPF 来对信号滤波,得到滤波器带宽(Filter Bandwidth)和 EOP 的关系如图 6(d)所示。可以得到,OBPF 的带宽值越高,滤波性能越优;并且只要 OBPF 的带宽值大于 125 GHz, NRZ-DPSK 信号始终保持最低的 EOP 值。因此,在系统设计中,应该选择具有较大带宽值的 OBPF;当选用的滤波器带宽值大于 125 GHz 时, NRZ-DPSK 信号能表现出最佳的接收性能。

4 结 论

目前,信息社会对大容量、无缝连接的全球光网络的需求增长刺激着宽带宽、长距离、高容量的光传输系统的发展。100 Gbit/s 的光信号传输系统的设计和发展因而成为研究的热点^[13]。与目前电信运营商用的 2.5 Gbit/s, 10 Gbit/s 和 40 Gbit/s 系统相比,发展 100 Gbit/s 的光信号传输系统面临着新的挑战。由于码率提高,诸多传输效应的影响,如非线性效应、剩余色散效应、偏振模色散效应、滤波器的带宽选择等都是需要引起足够重视的问题。这些问

题的研究,可以指导我们在实际中根据系统设计和升级需要对各种通信码型进行灵活选择,而本文正是基于这样的考虑对四种级联差分相位调制码型进行了比较研究,并发现四种级联相位调制码型在 100 Gbit/s 传输时各具其独到的优点,相信这些结果对实际的 100 Gbit/s 相位调制信号传输系统的设计具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- 1 <http://www.ieee-icc.org/2008/>
 - 2 http://www.lightreading.com/document.asp?doc_id=104321
 - 3 F. Horst, R. Germann, U. Bapst *et al.*. Compact tunable FIR dispersion compensator in SiON technology [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**:1570~1572
 - 4 P. J. Winzer, G. Raybon, C. R. Doerr *et al.*. 107-Gb/s optical signal generation using electronic time-division multiplexing [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**:3107~3113
 - 5 C. Schubert, R. H. Derksen, M. Möller *et al.*. 107 Gbit/s transmission using an integrated ETDM receiver [C]. ECOC 2006, Tu1. 5. 5
 - 6 O. Michael, F. Torsten. Comparison of different DQPSK transmitters with NRZ and RZ impulse shaping [C]. IEEE/LEOS, 2002, paper ThB2. 7~8
 - 7 Zhang Huijian, Zuo Meng, Zhong Jinshun *et al.*. Study of two stage modulation formats in high-speed dense wavelength division multiplexing systems [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6):815~819
- 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
- 8 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
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
- 9 Shao Yufeng, Chen Lin, Wen Shuangchun *et al.*. Novel coding and decoding scheme for modified optical duobinary signal transmission [J]. *Journal on Communications*, 2007, **28**(2):58~63
邵宇丰,陈 林,文双春等. 新型改进光双二进制传输的编解码方案[J]. 通信学报, 2007, **28**(2):58~63
- 10 Yufeng Shao, Lin Chen, Shuangchun Wen. Novel optical orthogonally modulation scheme for superimposing DPSK signals on dark RZ signals [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**:3658~3667
- 11 Shao Yufeng, Chen Lin, Wen Shuangchun *et al.*. A novel scheme for generation of optical dark return-to-zero label signals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9):1580~1584
邵宇丰,陈 林,文双春等. 产生暗归零码光标记信号的新方案[J]. 光学学报, 2007, **27**(9):1580~1584
- 12 Shao Yufeng, Wen Shuangchun, Chen Lin *et al.*. Additional application of modified duobinary return-to-zero signal in a label switching optical system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8):1201~1207
邵宇丰,文双春,陈 林等. 改进型双二进制归零码信号在标记交换系统中的新应用[J]. 中国激光, 2008, **35**(8):1201~1207
- 13 Yufeng Shao, Shuangchun Wen, Lin Chen *et al.*. A staggered differential phase-shift keying modulation format for 100 Gbit/s applications [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**:12937~12942

《激光与光电子学进展》“光学制造”栏目征稿启事

《激光与光电子学进展》是中国科学院上海光学精密机械研究所主办的激光、光电子领域行业性期刊,中国科技核心期刊。该刊 1964 年创刊,至今已出刊 500 余期,旨在促进国内外学术交流,沟通科研单位、生产部门与用户的联系。2009 年,《激光与光电子学进展》将加大光学制造方向的报道力度,深入研讨光学制造的技术发展及其在工业、科研各方面的应用。主要涉及方向有光学元器件、光学仪器、光学加工、光学设计、光学材料、光学薄膜、光学检测等领域。

欢迎相关的科研、技术、市场人员根据我们栏目内容定位,撰写或向我们推荐涉及上述领域的优秀技术论文。来稿不收取审稿费和版面费,一经录用将优先发表并支付丰厚稿酬。

• 本栏目基本要求:

- 1) 稿件内容应为光学制造领域的最新进展、研究动态、科研和新品开发成果等方面;
- 2) 文章要求内容新颖、论点正确、论据充分、数据可靠、文理通顺;
- 3) 技术文章字数一般为 5000 字左右;综述文章字数最多不超过 10000 字,且第一作者需为副教授及以上职称。

• 投稿方式:通过网上投稿系统(<http://www.opticsjournal.net/lop.htm>)直接上传稿件(主题标明“光学制造”投稿),也可以直接将稿件 word 版发至邮箱:dingjie@siom.ac.cn(主题标明“光学制造”投稿),如有问题欢迎垂询 021-69918198 与栏目编辑丁洁联系。

《激光与光电子学进展》编辑部