

文章编号: 0258-7025(2010)11-2872-07

一种新的光反转归零码-差分正交相移键控调制方案

文爱军¹ 吕亮¹ 杨蕾¹ 尚磊¹ 李晓军²

(¹ 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)
² 西安电子科技大学理学院, 陕西 西安 710071)

摘要 提出一种新的光反转归零码-差分正交相移键控(IRZ-DQPSK)调制方案,该方案所产生的 IRZ 信号相位连续,易于与相位调制信号相结合,占空比和消光比均可调。并仿真分析了单信道 40 Gb/s 长距离传输时,自相位调制(SPM)对幅移键控-差分正交相移键控(ASK-DQPSK)与 IRZ-DQPSK 两种信号的影响。结果表明,40 Gb/s 长距离传输时,IRZ-DQPSK 具有更好的抗 SPM 性能。

关键词 光通信;幅度相位联合调制;反转归零码;差分正交相移键控;自相位调制

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103711.2872

A Novel Scheme for Optical Inverse Return-to-Zero-Differential Quadrature Phase-Shift-Keying Modulation

Wen Aijun¹ Lü Liang¹ Yang Lei¹ Shang Lei¹ Li Xiaojun²

(¹ State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)
² School of Science, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract A novel scheme to generate inverse return-to-zero-differential quadrature phase-shift-keying (IRZ-DQPSK) modulation format is introduced. The IRZ signal generated in this scheme does not contain any original phase information, so it is convenient to combine IRZ modulation with the phase modulation, and both the duty cycle and the extinction ratio of the IRZ-DQPSK signal are tunable. The influence of self phase modulation (SPM) is compared between IRZ-DQPSK and amplitude shift keying-differential quadrature phase-shift-keying (ASK-DQPSK) in a 40Gb/s single channel long distance transmission by simulation. Results show that IRZ-DQPSK signal offers much better performance against SPM.

Key words optical communications; combined amplitude and phase modulation; inverse return-to-zero; differential quadrature phase-shift-keying; self phase modulation

1 引言

目前,光传输系统的单信道速率和信道容量迅速增长,所带来的传输损伤也更加严重^[1],而且商业化的光放大器集中在 C 波段,有限的传输通道使得人们对于频带利用率的要求越来越高,因此多进制调制引起了人们越来越多的关注。光幅度相位联合键控是多进制调制格式的一种,它频谱效率高,而且调制解调的系统结构相对于多进制数字相移键控(MPSK)要简单得多,是当前光传输技术研究的热点。一种幅度相位联合调制方法是将传统的幅移键控(ASK)与差分正交相移键控(DQPSK)^[2~4]相结合;另一种方法是将反转归零码(IRZ)与 DQPSK 相结合,这种方法作为正交调制标记的方案在光分组

交换网络中也得到了广泛的关注。在文献[5~7]中用多种方法实现了 IRZ 信号的调制,无论是用电处理还是光处理实现的 IRZ 信号都伴有相位变化,这就增加了与 DQPSK 相结合的难度,增加了发射机的复杂性。文献[8]用马赫-曾德尔(MZ)调制器实现的 IRZ 信号虽然没有相位变化,但是它的占空比不易调节。本文提出一种使用 MZ 调制器产生没有相位变化的 IRZ 信号,并将其与 DQPSK 信号结合,实现了占空比和消光比都可调的 40 Gb/s IRZ-DQPSK 信号,并与 ASK-DQPSK 比较,仿真分析了长距离传输时非线性自相位调制(SPM)效应^[9]对两种信号的影响。

收稿日期:2009-12-31;收到修改稿日期:2010-05-24

基金项目:国家 973 计划(2010CB328300)和高等学校学科创新引智计划(D08038)资助课题。

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

2 新型 IRZ 信号的调制原理

利用双臂 MZ 调制器的调制特性设计了一种新的 IRZ 信号产生方法, MZ 调制器的输入输出光场关系的表达式^[7]为

$$E_{\text{out}} = E_{\text{in}} \cos \left[\frac{\pi(V_1 - V_2)}{2V_{\pi}} \right] \exp \left[j \frac{\pi(V_1 + V_2)}{2V_{\pi}} \right], \quad (1)$$

式中 V_1, V_2 分别为 MZ 调制器的上调制电压和下调制电压。这种新型的 IRZ 信号没有相位变化, 并且占空比和消光比都是可调的, 其调制原理框图如图 1 所示。

原始非归零码 (NRZ) 数据 Data 经过差分预编码电路成为 NRZI 信号, 预编码电路可以使用一个延迟异或电路实现, 如图中虚线框所示。NRZI 信

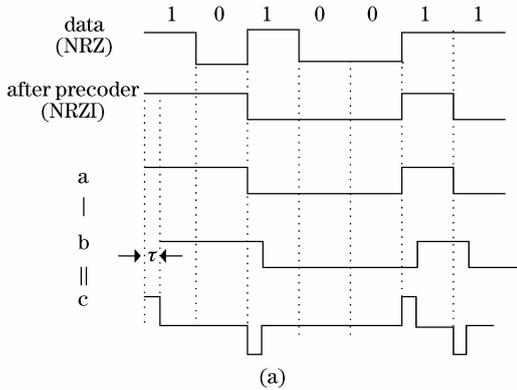


图 2 IRZ 信号产生原理图。(a) MZ 调制器的驱动电信号波形, (b) 光强调制特性

Fig. 2 Principle of IRZ signal generation. (a) driven signal waveform of MZ modulator, (b) optical power modulation

具体过程为: 预编码后的 NRZI 信号分成两路, 一路信号为 a, 另一路信号经过 τ 时间的电信号延迟器输出为 b, 同样延时 τ 被控制在一个码元时间内。两路信号 a 和 b 相减后得到电信号 c, 经过驱动放大器放大电平为 $V_{\pi}/2$ 后驱动 MZ 调制器。图 2 (b) 为 MZ 调制器的光强调制特性图, 如图所示, 通过合理的偏压控制即可产生相位连续的 IRZ 信号。“0”码元时信号保持高功率, “1”码元时光信号反转归零, τ 代表“1”码元的归零区间, 对应区间内为低功率, 通过电信号延迟器改变延迟时间 τ , 就可以调整 IRZ 信号的占空比。

在实际中, 考虑到输入数据信号脉冲的上升沿时间和下降沿时间, 占空比的选择是受限的。因为延迟时间 τ 的取值必须大于输入信号脉冲的上升沿时间 (这里认为信号的上升沿时间和下降沿时间相等, 并设其为 T/M , T 为码元周期, M 为常数), 否则产生的 IRZ 信号消光比太小, 不利于检测, 而且 τ 必

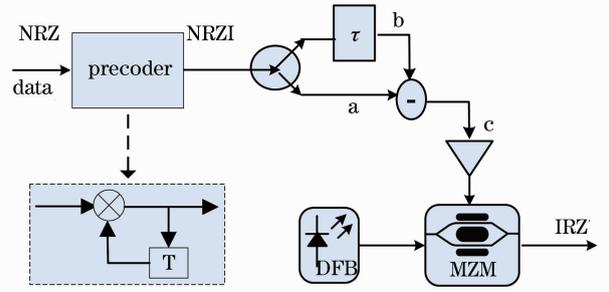
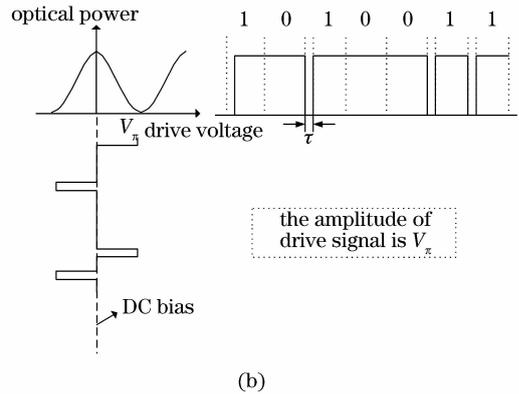


图 1 新型 IRZ 信号调制框图

Fig. 1 Configuration diagrams of IRZ

号通过一个延迟相减电路去驱动 MZ 调制器, 设置直流偏置电压为 0, 并让 MZ 调制器工作在推挽状态 [即 (1) 式中的 $V_1 = -V_2$], 即可得到 IRZ 信号, 由 (1) 式可以看出此时相位完全不会被调制, 更为具体的产生原理如图 2 所示。



须要小于 $t - T/M$, 否则输入信号的下降沿将对相位信息的加载产生影响。综合考虑后 τ 的取值范围应该满足 $T/M < \tau < t - T/M$ 。

这里定义 IRZ 信号的消光比为 IRZ 信号中“1”码元的高功率与“1”码元的低功率的比值, 如图 2 (b) 中所示, 调整输入电信号的幅度可以改变输出光信号中“1”码元的低功率部分的数值, 即通过驱动放大器来控制驱动电信号的电压就可以调整得到的 IRZ 信号的消光比。

图 3 是占空比为 50% 的 13.3 Gb/s IRZ 信号的频谱图和时域相位波形图, 从仿真结果中也可以看出, 载波分量和 13.3 Gb 处的离散分量比较突出, 而且这种新型的 IRZ 信号在相位上确实没有变化。

3 IRZ-DQPSK 信号的调制和解调

IRZ-DQPSK 为八进制幅度相位联合键控调制格式, 图 4(a) 和 (b) 分别为它的发射机和接收机框图。

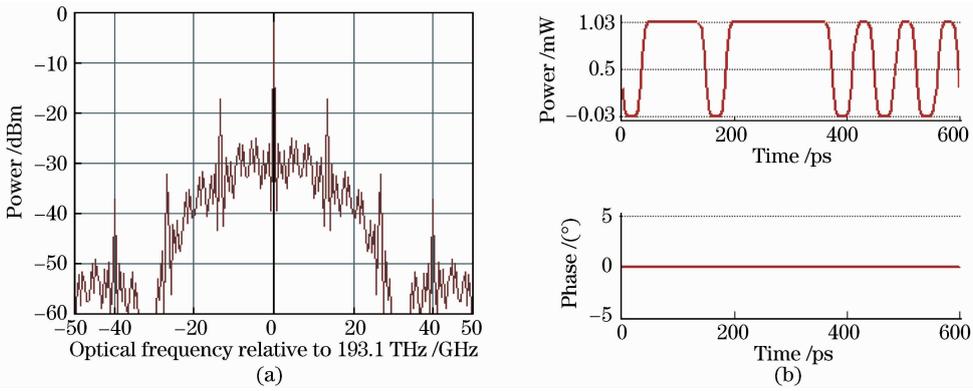


图 3 占空比为 50% 的 13.3 Gb/s IRZ 信号。(a) 频谱图, (b) 时域相位波形图

Fig. 3 Transmitted 13.3 Gb/s IRZ signal with 50% duty cycle. (a) optical spectra, (b) waveform and phase diagrams

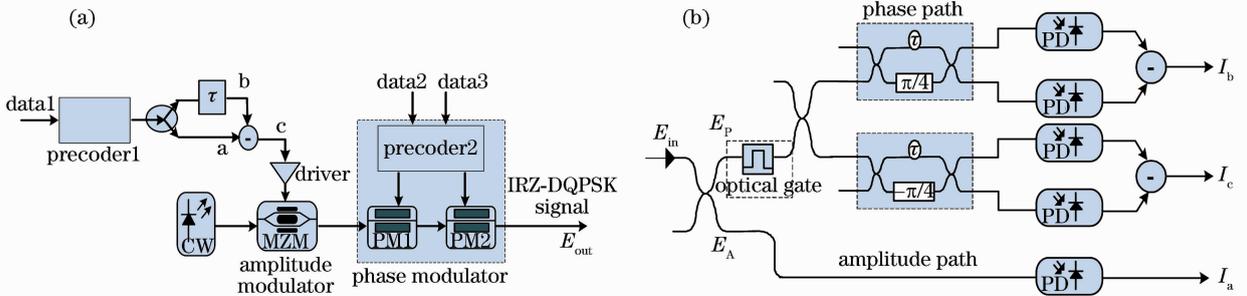


图 4 IRZ-DQPSK 发射机(a)与接收机(b)框图

Fig. 4 Configuration diagrams of IRZ-DQPSK. (a) transmitter; (b) receiver

40 Gb/s 的 IRZ-DQPSK 信号包含 3 路信息, 每一路信息速率为 13.3 Gb/s, 其中一路信息经过预编码后完成延迟相减, 然后驱动 MZ 调制器产生 IRZ 信号, 将信息加载到光脉冲的幅度上, 另两路信息通过预编码后驱动两个相位调制器产生 DQPSK 信号, 将信息加载到光脉冲的相位上。

发射机部分先产生 IRZ 信号, 再经过 DQPSK 调制^[10]就可产生 IRZ-DQPSK 信号。通过电信号延迟器控制延迟时间 τ 以及驱动放大器来控制驱动电信号的电压, 就可以得到不同占空比及不同消光

比的 IRZ-DQPSK 信号。

IRZ-DQPSK 接收机与传统的 ASK-DQPSK 接收机相同, 包括幅度支路接收机和相位支路接收机, 其中幅度支路由 PIN 光电二极管直接检测, 将幅度支路光信号转变为电信号, 经过电低通滤波器后再进行抽样判决解调出数字信息。相位支路接收机与 DQPSK 接收机相同, 由两个时延干涉仪和平衡接收机构成。

图 5 是占空比为 50% 的 40 Gb/s IRZ-DQPSK 信号的频谱图、眼图及时域相位波形图。

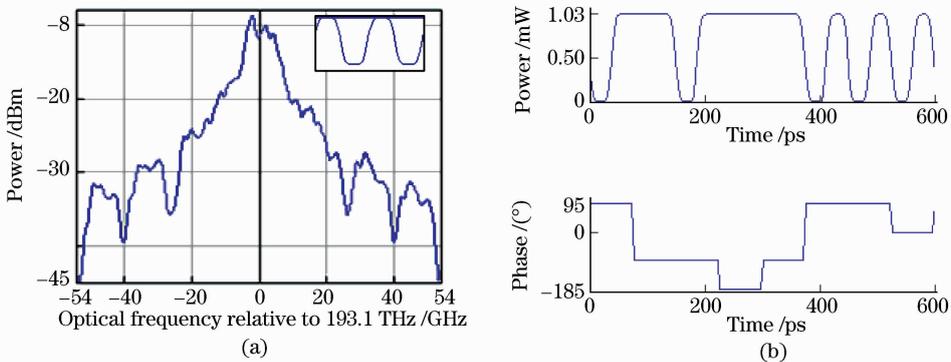


图 5 占空比为 50% 的 40 Gb/s IRZ-DQPSK 信号。(a) 频谱图和眼图, (b) 时域相位波形图

Fig. 5 Transmitted 40 Gb/s IRZ-DQPSK signal with 50% duty cycle

(a) optical spectra and eye diagrams, (b) waveform and phase diagrams

假设连续波(CW)激光器产生的连续光载波的电场强度为

$$E(t) = \sqrt{P} \exp(j\omega_c t + \varphi), \quad (2)$$

式中 P, ω_c, φ 分别代表连续光载波的功率、频率和初相位。通过 MZ 调制器对光信号进行幅度调制以及 DQPSK 调制器对光信号进行相位调制得到的 IRZ-DQPSK 信号为

$$E_{out}(t) = A(t) \exp\{j[\omega_c t + \varphi(t) + \varphi]\}, \quad (3)$$

式中调制幅度 $A(t)$ 可能的取值为 a 和 b , 分别对应“1”码元的低电平和高电平, 调制相位 $\varphi(t)$ 的取值范围为 $\{0, \pi/2, \pi, 3\pi/2\}$ 。

对于接收到的光信号 $E_{in}(t)$, 首先使其经过一个 3 dB 耦合器分为两路 E_A 和 E_P , 再分别进行幅度支路解调和相位支路解调。经过理论推导, 幅度支路解调的电信号 I_a 和相位支路解调的电信号 I_b, I_c 分别为

$$\begin{cases} I_a(t) = \frac{1}{2}RA(t)^2 \\ I_b(t) = \frac{1}{4}RA(t)A(t-T)\cos\left(\Delta\varphi + \frac{\pi}{4}\right) \\ I_c(t) = -\frac{1}{4}RA(t)A(t-T)\cos\left(\Delta\varphi - \frac{\pi}{4}\right) \end{cases}, \quad (4)$$

其中 R 为光电二极管的响应度, 差分相位 $\Delta\varphi = \varphi(t) - \varphi(t-T)$, 且 $\Delta\varphi \in \{0, \pi/2, \pi, 3\pi/2\}$ 。由于此时

$$A(t) = \begin{cases} b & \tau < t \leq T \\ a & 0 < t \leq \tau \end{cases}, \text{ 所以有}$$

$$A(t)A(t-\tau) = \begin{cases} b^2 & 0 < t < T_s \\ b^2 & \tau < t \leq T_s \\ ab & 0 < t < \tau \\ b^2 & \tau < t \leq T_s \\ a^2 & 0 < t < \tau \\ b^2 & \tau < t \leq T_s \\ ab & 0 < t < \tau \end{cases}. \quad (5)$$

由(5)式可知, 只要接收端相位支路的判决时间 T_s 选为 $\tau < T_s < T$ (这里可以使用光门^[11]来判决, 得到加载了相位信息的光信号), 此时相位支路的信号即可正确解调, 根据

$$I_b(t) = \frac{1}{4}A(t)A(t-T)\cos\left(\Delta\varphi + \frac{\pi}{4}\right) = \frac{1}{4}b^2\cos\left(\Delta\varphi + \frac{\pi}{4}\right) \quad (6)$$

的正负即可恢复出原始信号, 同理可恢复出 $I_c(t)$ 的值, 这与幅值 a 无关, 所以并不需要减少幅度支路的消光比来传输相位信息, 因此幅度支路的消光比可以很大 (理想情况下可以达到无限大, 即 $a \rightarrow 0$ 时, $b^2/a^2 \rightarrow \infty$)。这与传统的 ASK-DQPSK 不同, 对于 ASK-DQPSK 信号, 消光比是幅度支路与相位支路的权衡^[12]。

4 仿真分析

由 3 节的分析可以知道, IRZ-DQPSK 信号的相位支路信息加载在光信号的恒定高功率上, 而 ASK-DQPSK 信号的相位信息则分别加载在光信号的高功率和低功率上。单信道 40 Gb/s 长距离传输时, 由于码元速率降低到 13.3 Gb/s, 考虑色散补偿的情形下, 非线性 SPM 成为对系统影响最大的因素, 而信号传输时 SPM 带来的非线性相移与光信号的功率有关, 其表达式为^[7]

$$\phi_{NL} = \gamma L_{eff} P, \quad (7)$$

式中 γ 为光纤的非线性系数, P 为光纤的入纤功率, L_{eff} 为光纤的有效长度。所以对于 ASK-DQPSK 信号, “1”码元与“0”码元不同的光功率会产生不同的非线性相移, 这样不同功率的两个相邻码元会因 SPM 效应累积所产生的不同相移而出现相位偏差, 从而影响 ASK-DQPSK 信号相位支路的差分解调。

由(7)式可知, SPM 效应与光信号本身的功率及传输距离有关, 功率越大或者传输距离越远所累积的非线性相移越大。图 6 为系统仿真图, 其中发射机分别对应 IRZ-DQPSK 发射机与传统的 ASK-DQPSK 发射机^[12], 设连续波激光器的工作波长为

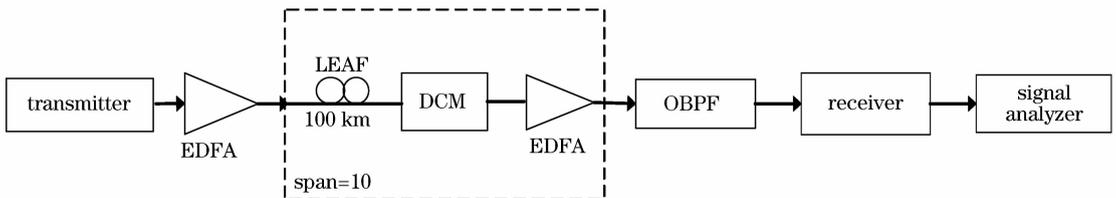


图 6 长距离传输系统框图

Fig. 6 Block diagram of long distance transmission

193.1 THz,发射机后的掺铒光纤放大器(EDFA)规定平均入纤功率为2 mW,光纤传输链路包括10个跨段的大有效面积光纤(LEAF),每跨段光纤长度为100 km,色散补偿器(DCM)采用后置色散补偿光纤(DCF)将色散完全补偿,DCM后的EDFA

用于补偿每跨段的传输损耗,在接收机前端使用一个光带通滤波器(OBPF)来滤除带外光噪声,其中EDFA的噪声指数为4 dB.光纤参数的具体设置如表1所示。

表1 光纤参数设置

Table 1 Fiber parameters

Fiber type	α / (dB/km)	D / [ps/(nm · km)]	n_2 / (10^{-20} m ² /W)	A_{eff} / μm^2
LEAF	0.2	4	3.0	72
DCF	0.5	-80	4.0	30

用光传输系统仿真软件 VPI Transmissionmaker 对 IRZ-DQPSK 和 ASK-DQPSK 的传输性能进行了仿真和比较。仿真中 ASK-DQPSK 信号为经过脉冲成型的占空比为 50% 的 RZ-ASK-DQPSK 信号,消光比为 2.32 dB^[12], IRZ-DQPSK 信号的占空比通过电信号延迟器也调为 50%,消光比调为最大。图 7 给出了两种信号 40 Gb/s 传输时眼开度代价(EOP)随传输距离的变化,从图中可以看出,对相位支路(实心符号表示)来说,传输 3 个跨距以后 ASK-DQPSK 信号的相位支路性能开始急剧下降。图 8 为背靠背情形和传输 3 个跨距以及传输 7 个跨距后 ASK-DQPSK 信号的相位支路解调眼图,由(4)式可知 ASK-DQPSK 相位支路解调信号有正负 6 个电平,如图 8(a)所示,当长距离传输时,由于 SPM 累计的非线性相移导致该相位支路差分解调时,解调电信号的中间电平 I_2 逐渐分离成两层,若分离的电平未穿过最低电平 I_3 时,相位支路的性能主要由 I_3 决定,当分离的低电平一旦与 I_3 重合甚至穿过 I_3 时,相位支路的性能将急剧恶化,从图 8(b)和(c)的眼图能看出图 7 中 ASK-DQPSK 传输 3 个跨距后相位支路性能急剧下降的原因。作为对比,图 9 给出了 IRZ-DQPSK 信号的相位支路解调眼图,可以看出由于相位信息加载在恒定功率上,所以解调电信号只有正负两个电平,两个相邻码元的相位差不会出现偏移量即在差分解调时由 SPM 产生

的非线性相移几乎不起作用,引起相位支路性能下降的主要原因来自放大器的噪声累积。

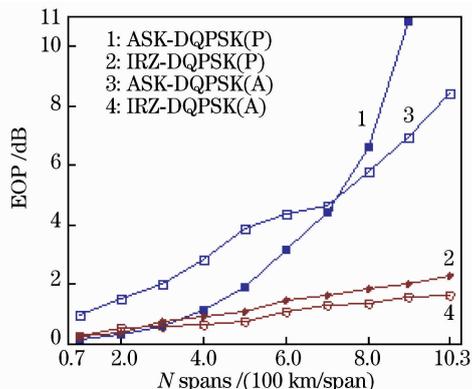


图7 传输距离和眼开度代价的关系

Fig. 7 Measured EOP versus transmission span

对幅度支路(空心符号表示)来说,影响其性能的主要原因有 SPM 导致的频率啁啾^[7]与色散的相互作用以及放大器噪声的影响。图 10,11 为背靠背情形以及传输 7 个跨距后两种信号幅度支路的解调电信号眼图,结合图 7 可以看出,ASK-DQPSK 中的幅度支路性能远差于 IRZ-DQPSK 信号的幅度支路,ASK 信号由于小的消光比导致其抗噪性能较差,值得注意的是,虽然增大 ASK 信号的消光比可以改善幅度支路的性能,但相位支路的性能会进一步恶化。所以综合考虑幅度支路和相位支路的性能,IRZ-DQPSK 更适合于 40 Gb/s 的长距离传输。

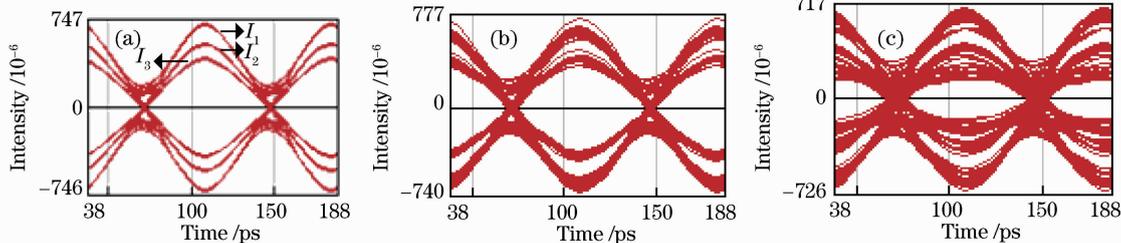


图8 ASK-DQPSK 信号相位支路解调眼图。(a) 背靠背情形,(b) 传输 3 个跨距,(c) 传输 7 个跨距

Fig. 8 Received electrical eye diagrams for phase path of ASK-DQPSK

(a) back to back, (b) after 3 spans transmission, (c) after 7 spans transmission

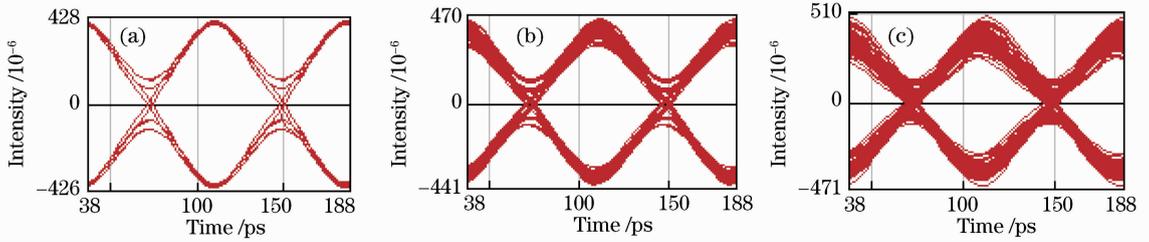


图 9 IRZ-DQPSK 信号相位支路解调眼图。(a) 背靠背情形,(b) 传输 3 个跨距,(c) 传输 7 个跨距

Fig. 9 Received electrical eye diagrams for phase path of IRZ-DQPSK

(a) back to back, (b) after 3 spans transmission, (c) after 7 spans transmission

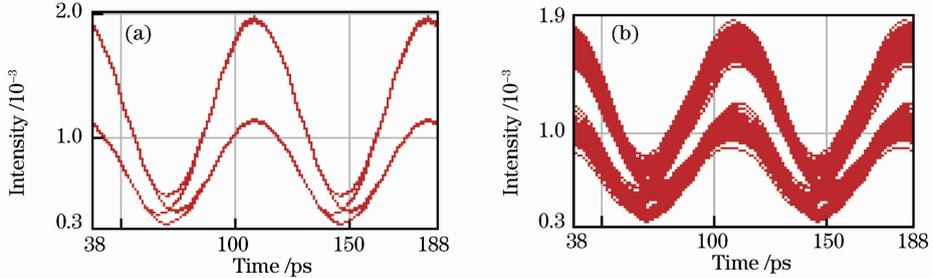


图 10 ASK-DQPSK 信号幅度支路解调眼图。(a) 背靠背情形,(b) 传输 7 个跨距

Fig. 10 Received electrical eye diagrams for amplitude path of ASK-DQPSK

(a) back to back, (b) after 7 spans transmission

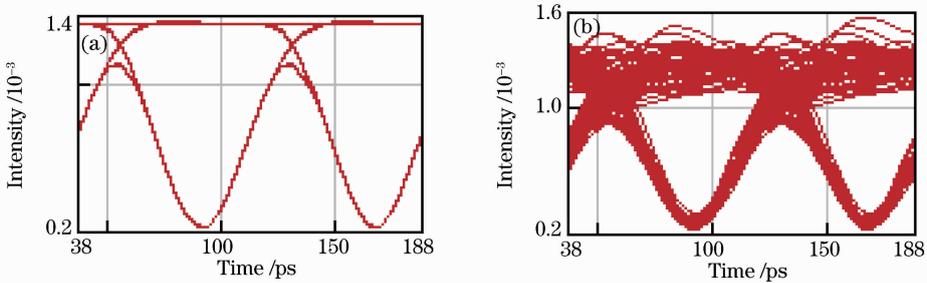


图 11 IRZ-DQPSK 信号幅度支路解调眼图。(a) 背靠背情形,(b) 传输 7 个跨距

Fig. 11 Received electrical eye diagrams for amplitude path of IRZ-DQPSK

(a) back to back, (b) after 7 spans transmission

5 结 论

阐述了一种实现八进制调制即产生 IRZ-DQPSK 信号的新方法,该方法产生的 IRZ 信号相位连续易与 DQPSK 信号结合,并与传统的 ASK-DQPSK 进行比较,仿真分析了单信道 40 Gb/s 长距离传输时非线性 SPM 效应对两种信号的影响,结果表明 IRZ-DQPSK 有更优的传输性能。

参 考 文 献

1 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. 40Gb/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

2 Shigenori Hayax, Nobuhiko Kikuchi, Keno Sekine *et al.*. Proposal of 8-state per symbol (binary ASK and QPSK) 30-Gbit/s optical modulation/demodulation scheme [C]. ECOC 2003, Th2. 6. 4

3 Torger Tokle, Murat Serbay, Jesper Bevenssee Jensen *et al.*. Investigation of multilevel phase and amplitude modulation formats in combination with polarization multiplexing up to 240 Gb/s [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(20): 2090~2092

4 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

- 5 Siu-Sun Pun, Chun-Kit Chan, Lian-Kuan Chen. Demonstration of a novel optical transmitter for high-speed differential phase-shift-keying/inverse-return-to-zero (DPSK/Inv-RZ) orthogonally modulated signals [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(12):2763~2765
- 6 Jianjun Yu, Lei Xu, Yong-Kee Yeo *et al.*. A novel scheme for generating optical dark return-to-zero pulses and its application in a label switching optical network [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(14):1524~1526
- 7 Yufeng Shao, Lin Chen, Shuangchun Wen *et al.*. Novel optical orthogonally modulation scheme for superimposing DPSK signals on dark RZ signals [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(14):3658~3667
- 8 T. Tokle, M. Serbay, W. Rosenkranz *et al.*. 32. 1 Gbit/s inverse RZ-ASK-DQPSK modulation with low implementation penalty [C]. LEOS'06, 2006, Paper WH2
- 9 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. 3rd ed.. San Diego: Academic Press, 2001. 99
- 10 Wang Chengwei, Wen Aijun, Wu Jianhong. The implementation of differential precoder for high speed optical DQPSK modulation [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2007, **18**(6):679~682
王成巍,文爱军,吴建红. 高速光 DQPSK 调制中预编码器的实现 [J]. *光电子 • 激光*, 2007, **18**(6):679~682
- 11 H. Sanjoh, E. Yamada, Y. Yoshikuni. Optical orthogonal frequency division multiplexing using frequency/time domain filtering for high spectral efficiency up to 1 bit/s/Hz [C]. OFC' 2002. D1
- 12 Wen Aijun, Liu Jiaojiao, Li Xiaojun. Analysis of the transmission performance of octal differential phase-amplitude-shift keying in high speed optical fiber communication system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3):614~619
文爱军,刘娇娇,李晓军. 高速光传输系统中八进制差分相位幅度键控性能分析[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3):614~619