

光 DQPSK 在高速传输中三种调制码型的研究

殷爱菡 焦曰里 陈燕燕 吴 凡 刘方仁

(华东交通大学 信息工程学院 江西 南昌 330013)

摘要: 采用 DQPSK 调制方式对 NRZ、RZ 和 CSRZ 3 种码型进行调制, 研究 40 Gb/s 高速传输系统中这 3 种不同类型的光信号。使用色散补偿方式对高速光纤传输系统进行 200 km 的模拟仿真, 比较不同码型的系统传输特性。分析表明 CS-RZ-DQPSK 调制格式, 在较宽的人纤功率范围内都能取得最小的眼图张开代价。

关键词: DQPSK; 调制码型; 色散; 眼图

中图分类号: TN76

文献标识码: A

随着 40 Gb/s 密集波分复用(DWDM)光传输系统的快速发展, 选择合适的码型和调制格式可以有效的减少传输的损伤, 提高光谱效率和系统的传输容量。光四相相对相移键控(ODQPSK)作为一种新型光纤通信系统的调制格式, 最早由 R. A Griffin 在 OFC2002 上提出, 因其光频谱利用率高, 抗色散能力强, 以及抑制非线性效应等特点逐渐成为研究的热点目标^[1]。

光 DQPSK 调制是四相相位调制方式, 强度上近似恒定常数的包络, 对非线性效应有良好的抵御力。在相同的码元速率情况下, DQPSK 的系统容量是 DPSK 的两倍。与传统的二进制振幅键控(OOK)调制方式相比, DQPSK 具有天然的抗非线性抵抗力, 使用平衡接收机能够提高 3 dB 的接收灵敏度, 降低对光信噪比的要求^[2-4]。此外, DQPSK 的信道利用率极高, 在不使用极化复用的情况下就能够超过 0.8 b/s/Hz。在使用极化复用等技术下实现频谱效率为 2 b/s/Hz 的 DWDM 传输, 并且不会像 OOK 那样引起额外损耗。由此可见, 码型的调制方式对于高速光通信传输系统来说具有重要的意义。

1 光 DQPSK 产生原理和特点

1.1 预编码

在光 DQPSK 系统中通常需要一个预编码器, 如图 1 所示, 来避免重复解码、差错传输以及降低硬件的复杂度, 确保接收端在进行差分解调的时候信号能够被准确地探测。由于不同的编码方式采用不同的调制方式, 所以预编码对于光 DQPSK 系统来说至关重要。

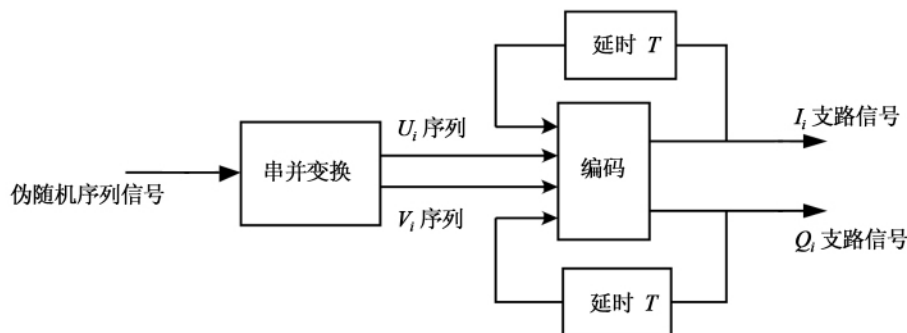


图 1 预编码原理示意图

收稿日期: 2009-10-28

基金项目: 江西省教育厅科研项目(GJJ08242)

作者简介: 殷爱菡(1963-), 女, 教授, 研究方向为光通信网络技术。

我们采用伪随机序列 (PRBS) 发生器产生 1 个 40 Gbit/s 的信号, 将这个 PRBS 信号进行串并变换, 产生 U_i 和 V_i 2 列伪随机序列作为输入信号, 按照下式的编码规则来进行预编码

$$I_i = \overline{(Q_{i-1} \oplus I_{i-1})} (U_i \oplus I_{i-1}) + (Q_{i-1} \oplus I_{i-1}) \overline{(V_i \oplus I_{i-1})}$$

$$Q_i = \overline{(Q_{i-1} \oplus I_{i-1})} (V_i \oplus I_{i-1}) + (Q_{i-1} \oplus I_{i-1}) \overline{(U_i \oplus I_{i-1})}$$

其中 U_i 和 V_i 作为初始的输入信号 I 和 Q 作为编码后的信号。这时候 I 和 Q 的输出组合有 4 种情况 (00, 01, 10, 11), 分别对应 4 个相位 (0, $\pi/2$, π , $3\pi/2$) 或者 ($\pi/4$, $3\pi/4$, $5\pi/4$, $7\pi/4$)。DQPSK 是利用连续光比特的差分相位的信息 $\Delta\varphi$ 来表示的, 这样 $\Delta\varphi$ 的值只能是 (0, $\pi/2$, π , $3\pi/2$)。由于使用差分编码的方式, 能够有效地避免由于接收机相位反转而导致解码的错误判决。

1.2 调制方式

目前研究的 DQPSK 的调制方式主要有 3 种: 串联 2 个马赫曾德尔调制器 (MZM) 的调制、并联 2 个 MZM 的调制和只使用单个相位调制器 (PM) [5]。

本文讨论的是串联调制的情况, 如图 2 所示。经过预编码输出的 I 和 Q 分别进入 2 个 MZM 中进行相位调制, 实现 DQPSK 的相对四相相位控制目的。其中 I 支路进行相位差为 π 的相位调制, 当 I 的输出为 0 的时候调制的光信号相位为 0, 而当输出为 1 时相位为 π ; 同理可知 Q 支路的输出为 0 的时候调制相位为 0, 而当输出为 1 的时候光相位为 $\pi/2$ 。

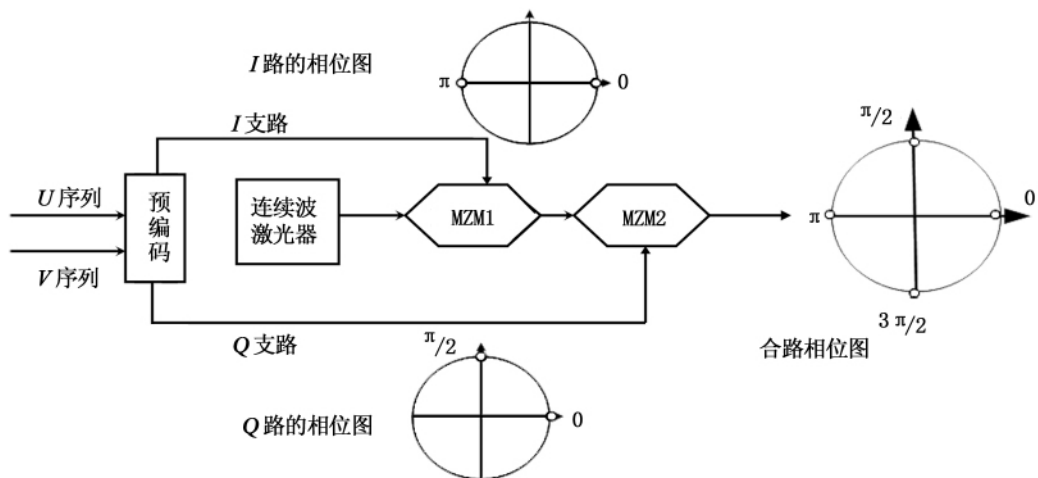


图 2 DQPSK 串联调制方式示意图

当 I 和 Q 的输出为 (00, 01, 10, 11) 联合调制产生的 4 个相位就是 (0, $\pi/2$, π , $3\pi/2$)。这与预编码中的第一种方式相对应, 在输出端产生的就是四相相位差 $\pi/2$ 的 DQPSK 信号。正如之前说的, 调制方式与预编码是密不可分的。

设偏置电压为 0, 则经过 DQPSK 相位调制后的输出信号为 $E_{out} = E_{in} \exp(\pi V_1)$, 其中: V_1 取值为 0 或 1, 两个输入差分预编码的分支比特流, 经过调制后的输出信号可表示为 $E_I = E_{in} \exp(j\pi/2) \exp(j\pi I_k)$, $E_Q = E_{in} \exp(j\pi Q_k)$, 综上可得

$$E_{DQPSK} = E_{in} [\exp(j\pi/2) \exp(j\pi I_k) + \exp(j\pi Q_k)]$$

式中: E 表示输出信号的大小; j, k 分别表示在信号产生过程中取得正整数值。

1.3 光 DQPSK 的解调

光 DQPSK 的解调方式较为复杂, 采用平衡检测的方法, 如图 3 所示, 这种结构需要 2 个基于马赫曾德尔时延干涉仪 (MZDI) 来使信号 I 和 Q 的相位在两臂间完成的时延 T 为 $2/B$ (B 为信息传输速率), 实现光信号之间的相干和相消。此外, 接收机需要两个平衡接收探测器, 上下 2 个支路的干涉仪相移分别是 $\pi/4$ 和 $-\pi/4$ 。实验表明该接收机具有同 DPSK 接收机一样的优点, 相比 OOK 接收来说有 3 dB 的接收灵敏度。而且发射机和 MZDI 都对波长有严格的要求, 因此每个 MZDI 必须有紧密的反馈控制以锁定发射机的波长。

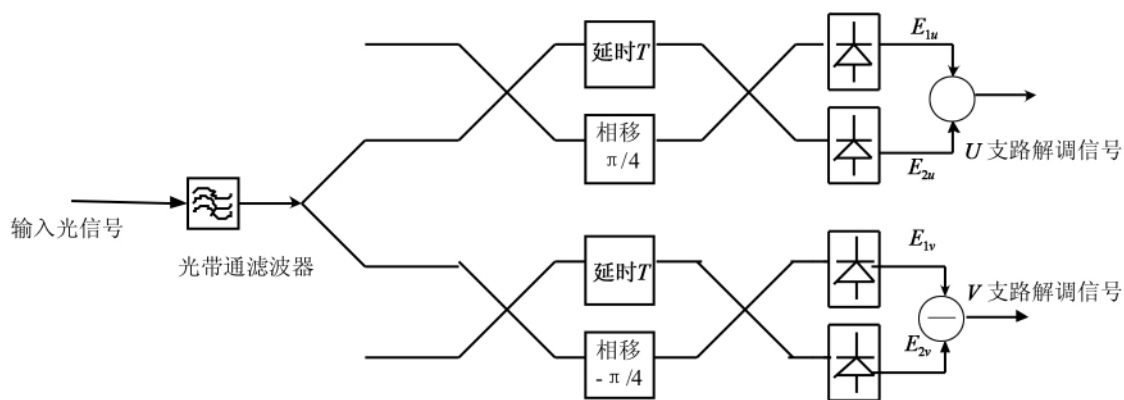


图3 DQPSK 信号的解调接收

其中 E_u 和 E_v 分别为经过干涉仪之后高、低端口的光信号的幅度值,由此可得到平衡光电检测器的差分电流为

$$i_u = |E_{1u}|^2 - |E_{2u}|^2 = \sqrt{2}/2A^2 [\cos(\varphi_{n+1} - \varphi_n) - \sin(\varphi_{n+1} - \varphi_n)]$$

$$i_v = |E_{1v}|^2 - |E_{2v}|^2 = \sqrt{2}/2A^2 [\cos(\varphi_{n+1} - \varphi_n) + \sin(\varphi_{n+1} - \varphi_n)]$$

即可得到解调出来的原始信号 U 和 V 。式中: A 表示信号的幅度。

2 光 DQPSK 不同码型及光谱分析

光 DQPSK 的码型产生与 DPSK 调制的码型产生相似,都是使用 MZM 先进行相位调制,再使用时钟信号对其整形,从而得到不同占空比的码型。本文研究的 DQPSK 是四相相位键控的方式,采用串联调制,因此加上整形所需的 MZM,总共需要 3 个 MZM 来调制。

在进行光调制的时候,通常采用双驱动的 MZM 作为调制器,来产生不同的码型。MZM 是将输入光分成两路相等的信号分别进入调制器的 2 个光支路,其折射率随外部施加的电信号大小而变化,由于光支路的折射率变化会导致信号相位的变化,当 2 个支路信号调制器输出端再次结合在一起时,相当于把电信号的变化转换成了光信号的变化,通过合理地设置上下调制电压,可以实现强度调制或者相位调制。

2.1 不同占空比 RZ 码的产生原理

不同占空比 RZ 码的产生需要经过 2 个 MZM 的调制,先经过 MZM1 的电 NRZ 调制产生光 NRZ 信号,再经过 MZM2 进行电时钟信号调制产生不同占空比的 RZ 码,这里研究的 RZ 码是占空比为 33% 的 RZ 码,而 CS-RZ 码的占空比即为 67%。

设输入光场为

$$E_{in}(t) = |E_o| e^{j\omega t}$$

经过调制器后输出信号光强为

$$E_{out}(t) = E_{in}(t) \cos \left\{ \frac{\pi}{2V_\pi} [V_{in}(t) - V_{bias}] \right\} e^{\frac{\pi V_{bias}}{2V_\pi}}$$

其中: ω 为光信号载波频率; $V_{in}(t)$ 为调制的输入电时钟信号; V_π 为调制器单臂工作时输出光强由最大变为最小所需的开关电压的大小; V_{bias} 为两臂之间施加调制固定的偏置电压。通过选择不同输入电压信号和偏置电压信号,调制器工作在数据加载和时钟的工作方式,从而产生不同占空比的 RZ 信号^[6]。

对于占空比为 33% 的 RZ 信号来说,输入偏置电压为 0,频率为 ω_0 和振幅为 V_π 的输入电信号 $V_{in}(t) = V_\pi \sin \omega_0 t$,输出调制光信号为 $E_{out}(t) = E_{in}(t) \cos(\frac{\pi}{2} \sin \omega_0 t)$;而对于 CS-RZ 来说输入电信号 $V_{in}(t) = V_\pi \sin \omega_0 t$,输出光信号为 $E_{out}(t) = jE_{in}(t) \sin(\frac{\pi}{2} \sin \omega_0 t)$ 。表 1 即为软件仿真中对 MZM 进行光调制产生

不同占空比 RZ 信号的相关参数设置。

表 1 不同占空比 RZ 码的参数值设置

项目	调制电压 1/v	调制电压 2/v	调制频 Q 率/GHz	时钟相位 1	时钟相位 2	偏置电压 /v
RZ	V_{π}	$-V_{\pi}$	$R/2$	$-\pi/2$	0	0
CS-RZ	V_{π}	$-V_{\pi}$	$R/2$	0	0	V_{π}

其中: R 为光信号的传输速率 经过上述对 MZM 的参数设置之后 ,可以得到不同占空比 RZ 码的输出调制光信号频率都为 $2\omega_0$,RZ 码的脉冲宽度为 $\pi/3\omega_0$,而 CS-RZ 码的脉宽则为 $2\pi/3\omega_0$ 。

2.2 光 DQPSK 码型及频谱分析

光 DQPSK 的产生可以分为调相和信号整形两个部分。在之前的调制方式中已经提到采用串联的调制方式 ,使得输出的 I 和 Q 支路的信号经过两个 MZM ,分别进行 π 和 $\pi/2$ 的相位差 这样在进行信号整形之前就完成调相 ,产生的就是 NRZ-DQPSK 信号。表 2 为产生 NRZ-DQPSK 的 MZM 的参数设置。

表 2 级联的 MZM 参数值设置

项目	开关电压 /v	射频电压 /v	调制电压 1/v	调制电压 2/v	偏置电压 /v	消光比
MZM1	V_{π}	V_{π}	4	4	0	100
MZM2	V_{π}	V_{π}	-2	-2	0	100

由上述中的串联调制方式可知 ,光 DQPSK 信号是经过连续 2 个 MZMs 后产生的 ,通过在 MZM2 后面加入一个 MZM3 进行再调制 ,即可产生不同占空比的光 DQPSK 信号。图 4 是在 MZM3 后使用光谱分析仪测试产生 3 种不同的光 DQPSK 码型 ,并对其光谱进行比较。

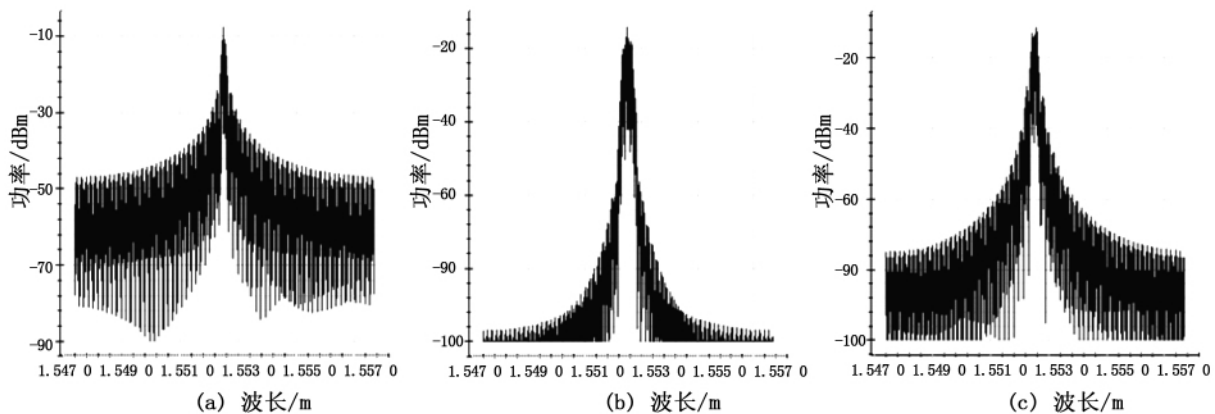


图 4 不同调制码型的光谱图

图 4(a) 中可以看出 NRZ-DQPSK 的脉冲宽度最大 ,这样它的频谱比较窄 ,有利于抑制色散的影响 ,同时有利于减低 DWDM 系统相邻信道之间的串扰 ,但是较大的脉冲宽度较易导致码间干扰 ,且易受到非线性效应的影响。

图 4(b) 中的 RZ-DQPSK 的脉冲宽度最小 ,虽然可以很好的抑制非线性效应带来的误码率的降低 ,但是最大的光频谱使其色散容限大大降低 ,不利于色散的控制。

图 4(c) 中的 CSRZ-DQPSK 的脉冲宽度介于其它两者之间 ,光频谱是最小的 ,这不仅有利于提高频谱效率 ,增加传输的信息量 ,而且有更高的色散容限和非线性效应的损耗 ,与 RZ-DQPSK 相比有更好的抑制信道间串扰的效果。

此外 ,从不同码型的光谱图上可以看到 ,由于都采用 DQPSK 的调制方式大大降低了线状谐谱的产生 ,这样能够提高光谱的接收准确度 ,降低信道间的干扰 ,降低误码率。

3 系统模型仿真结果分析

本文通过使用 Optisystem 仿真软件构建系统的仿真模型,设置各个模块的运行参数并得出相关分析的结果。光发送机采用的是波长 1 550 nm 的连续波激光器,发送端电信号分别经过 3 个 MZM 调制,其中前两个 MZM 是实现 DQPSK 调制产生 NRZ-DQPSK 信号,第 3 个 MZM 经过电时钟信号的驱动产生不同占空比的 RZ-DQPSK 信号,从而产生不同的调制码型。设定传输速率为 40 Gbit/s,选择 4 段 50 km 的光纤进行传送,总长度达到 200 km,采用色散补偿光纤,具体参数设置表 3 所示。

表 3 SMF 和 DCF 的参数设置

项目名称	标准单模光纤(SMF)	色散补偿光纤(DCF)
衰减/dB·m ⁻¹	0.2	0.6
色散/ps(nm·km) ⁻¹	17	-85
色散斜率/ps(nm ² ·km) ⁻¹	0.075	-0.315
非线性指数/e ⁻²⁰ m ² ·W ⁻¹	2.6	2.6
有效面积/μm ²	75	20

这里采用眼图张开代价(EOP)作为衡量不同调制码型性能的参数,它表示调制码型的背靠背眼图张开度与经过光纤传输后的眼图张开度的对数比值。从图 5 可以看出不同的码型随着入纤功率的增长 EOP 也在不断的增加,会出现一段较为平稳的过程,对应于不同的码型可以找到合适的入纤功率,在既满足良好的 EOP 的情况下又增加了系统的传输距离和容量。从图 6 可以看出,当入纤功率一样的时候,CS-RZ-DQPSK 的眼图张开度要大于其它两种码型。其中 CS-RZ-DQPSK 具有较好的 EOP 性能,特别是当入纤功率较大的情况下优势更为明显。图 6 是经过上述传输参数设置后,接收端产生的不同码型解调后的眼图。从图 6 可以看出,与 NRZ-DQPSK 相比而言 CS-RZ-DQPSK 具有较高的噪声容限;而与 33% RZ-DQPSK 相比,CS-RZ-DQPSK 还具有较好的定时误差敏感度和无畸变的交叉点发散度。由上可知,CS-RZ-DQPSK 具有更高的色散、非线性容限和更低的信道间串扰,它的眼图具有较好的传输性能。

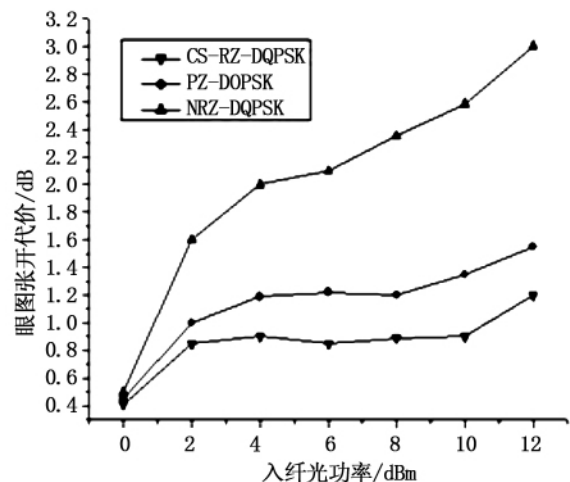


图 5 不同码型入纤功率与眼图张开代价的比较

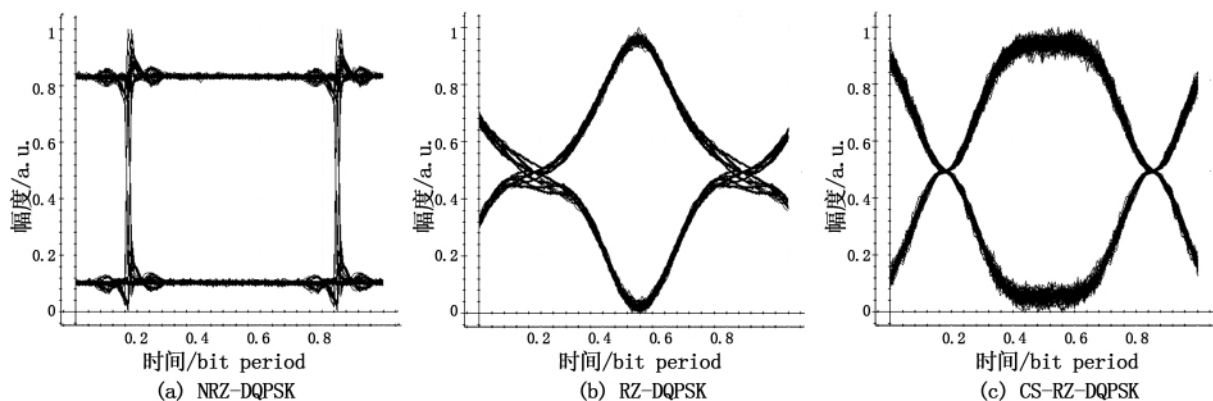


图 6 不同码型的接收端眼图

4 结束语

本文分析光 DQPSK 的调制原理和实现方式,对比 3 种 40 Gb/s 不同码型光信号,经仿真得到调制后的频谱图和解调后的眼图。结果表明,在色散补偿的情况下,与 RZ-DQPSK 和 NRZ-DQPSK 相比较,CSRZ-DQPSK 具有更窄的频谱,对 PMD 有更好的色散容忍,能有效地抑制光纤的非线性效应,并且在较宽的入纤功率范围内都能取得最小的眼图张开代价。另一方面,光 DQPSK 调制方式具有更高的接收灵敏度和传输容量,并降低了对调制器件速率的要求,成本更低,在未来的长距离大容量高速光通信系统中有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] MASAHIRO D,ITSURO M,HIDENORI T,et al. 100-Gb/s DQPSK transmission without OTDM for 100G ethernet transport[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(1): 139-145.
- [2] CHEN W,FRED B,YI X W,et al. Chromatic dispersion and PMD mitigation at 10 Gb/s using viterbi equalization for DPSK and DQPSK modulation formats[J]. Optics Express, 2007, 15(9): 5271-5276.
- [3] PAK S C,VLADIMIR S,GRIGORYAN Y A,et al. Transmission of 25-Gb/s RZ-DQPSK signals with 25-GHz channel spacing over 1000 km of SMF-28 fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(3): 473-475.
- [4] PIERPAOLO B,MADDALENA F,LUCIA M,et al. Measurement of PMD tolerance in 40-Gb/s polarization-multiplexed RZ-DQPSK[J]. Optics Express, 2008, 16(17): 13398-13404.
- [5] 刘慧洋,张晓光,许玮,等. 光 DQPSK 调制格式原理及仿真[J]. 光通信研究, 2008(5): 1-3.
- [6] 徐坤,周光涛,伍剑,等. 基于 LiNbO3 光波导调制器高速光码型调制技术的比较[J]. 北京邮电大学学报, 2004, 27(4): 50-54.

A Research on Three Modulation Formats of Optical DQPSK in the High Speed Transmission

Yin Aihan, Jiao Yueli, Chen Yanyan, Wu Fan, Liu Fangren

(School of Information Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: DQPSK modulation is used to modulate nonreturn-to-zero (NRZ), return-to-zero (RZ), and carrier-suppressed return-to-zero (CSRZ) modulation patterns. The three different types of optical signals in the 40 Gb/s high speed transmission system are studied. The high speed transmission system is simulated in 200 km fibers by means of dispersion compensation. Different transmitting characteristics of system are compared. The analysis shows that CSRZ-DQPSK modulation format has the smallest eye-opening penalty (EOP) with a wider range of fiber power.

Key words: DQPSK; modulation format; dispersion; eye diagram

(责任编辑 王建华)