三种载波抑制归零码光调制格式性能

王现彬[1,2],李 宁[1],卢智嘉[1],杨 洁[1],曹鹤飞[1]

(1. 石家庄学院 电气信息工程系,河北 石家庄 050000;
2. 河北工业大学 信息工程学院,天津 300401)

摘 要:首先分析了基于载波抑制归零码的光载波抑制归零-开关键控(CSRZ-OOK)、载波抑制归零-差分相移键控(CSRZ-DPSK)和载波抑制归零-差分正交相移键控(CSRZ-DQPSK) 三种光调制格式的时域和频域特性,并数字仿真了其在 40 Gbit/s 单信道光纤系统中的传输性能。以 Q 值、眼图和误码率(BER)作为性能评价指标,研究了这三种调制格式对色散(CD)、偏振模色散(PMD)和非线性效应的抑制作用。结果表明:CSRZ-DQPSK 相对于 CSRZ-OOK、CSRZ-DPSK 对色散、偏振模色散和非线性效应有非常好的容忍能力。

关键词:调制格式; 差分正交相移键控; 色散; 非线性效应; 偏振模色散
中图分类号:TN929.11 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2014)11-3694-05

Properties of three types of carried-suppressed return-to-zero optical modulation formats

Wang Xianbin[1,2], Li Ning[1], Lu Zhijia[1], Yang Jie[1], Cao Hefei[1]

(1. School of Information Engineering, Shijiazhuang University, Shijiazhuang 050000, China;
2. School of Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: The time and frequency domain characteristics of three types of modulation formats, Carrier-Suppressed Return to Zero-On Off Keying (CSRZ-OOK), Carrier-Suppressed Return to Zero-Differential Phase Shift Keying (CSRZ-DPSK) and Carrier-Suppressed Return to Zero-Differential Quadrature Phase Shift Keying (CSRZ-DQPSK) based on carrier-suppressed return to zero formats, were analyzed firstly and the transmission performance of the three types of modulation formats was simulated in 40 Gbit/s single channel optical fiber transmission system. The tolerance of the three types of modulation formats to chromatic dispersion (CD), polarization mode dispersion (PMD) and nonlinear effect was evaluated by means of Q value, eye diagrams and bit error rate (BER). The results show that CSRZ-DQPSK has very good tolerance to chromatic dispersion, polarization mode dispersion and nonlinear effect compared with CSRZ-OOK and CSRZ-DPSK.

Key words: modulation formats; differential quadrature phase shift keying; chromatic dispersion; nonlinear effect; polarization mode dispersion

收稿日期:2014-03-20; **修订日期**:2014-04-25
基金项目:河北省自然科学基金(F2013106079);河北省科技计划(13220344);石家庄市科学技术研究与发展指导计划(11113481)
作者简介:王现彬(1981-),男,讲师,博士,主要从事光通信与信号处理方面的研究。Email:wswxb8@163.com

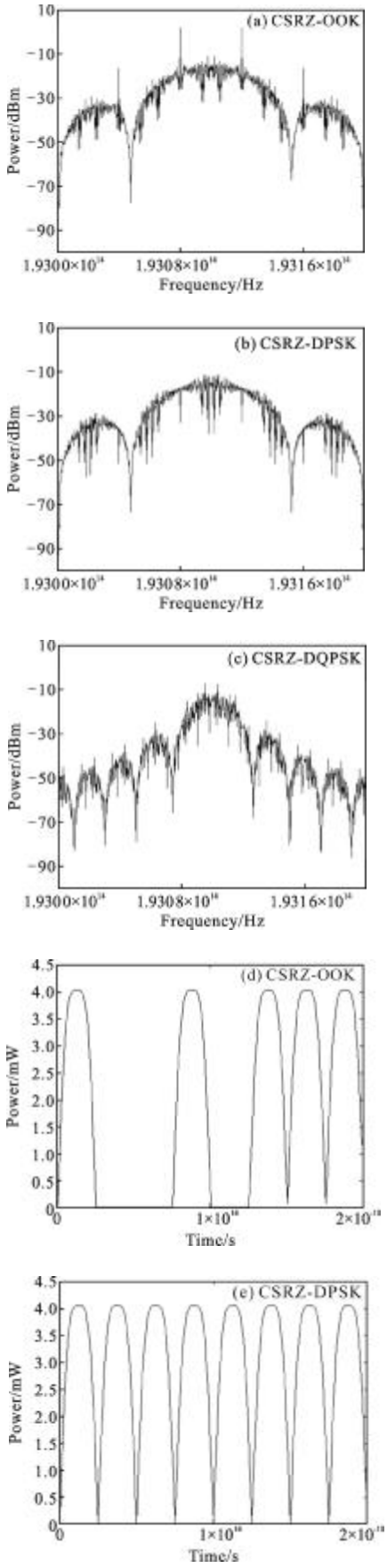
PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

0 引 言

在现代光纤通信系统中，随着传输容量的增加，现阶段单信道系统的传输速率已经无法满足需求，需要将单信道速率从 10 Gbit/s 向 40 Gbit/s 甚至更高速率过度。目前在商用系统中,常用到的调制格式主要是一些 OOK(On-Off Keying)和 PSK(Phase-Shift Keying)等二进制调制格式,即 NRZ-OOK,RZ-OOK、CSRZ-OOK、NRZ-DPSK、RZ-DPSK、CSRZ-DPSK 等调制格式[1-3]。在低速率系统中,这些调制格式基本能够满足系统性能需求，但随着信道传输速率的提高,特别是在 40 Gbit/s 甚至更高速系统中,一些原来低速系统中可以忽略的限制因素，比如偏振模色散(PMD)、非线性效应等,成为限制传输距离和传输容量的关键因素。为此提出了很多新的高阶调制方式，希望借助新型调制格式的特性来抑制 PMD、非线性效应等不利因素。DQPSK 便是一种新型调制格式,它是一种 4 进制调制格式,每个符号可以携带 2 bit 信息，符号率是比特率的一半，而其带宽只是比特率的 1/4。DQPSK 以抗色散(CD)、非线性能力及高的频谱利用率等优势成为近年来的研究热点。Liu 等人系统分析了 D8PSK 的性质及传输性能[4]，Barroso F R C 等人在考虑 PMD 和偏振相关损耗(PDL)的情况下对 DPSK 和 DQPSK 的传输特性进行了对比研究[5],而参考文献[6]主要讨论了 DQPSK 的传输性能。目前低阶和高阶调制格式是并存的,同时分析不同情况下基于载波抑制归零码的低阶和高阶调制格式的传输性能少有报道。文中首先给出了 CSRZ-OOK、CSRZ-DPSK、CSRZ-DQPSK 等调制格式的频谱和时域波形,并在 40 Gbit/s 的单信道光纤系统中进行了仿真。最终得出,CSRZ-DQPSK 调制格式抗 CD、PMD 和非线性能力较强，是未来超高速、超大容量密集波分复用(DWDM)光纤通信系统的首选调制格式。

1 三种调制格式频谱特性及其数学描述

研究者期望在光纤系统中传输的码型对 CD、非线性和 PMD 等几种光学效应有较高的抑制作用和容限,这样能够在不增加系统造价的前提下提高系统性能。图 1 给出了CSRZ-OOK、CSRZ-DPSK、CSRZ-



PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

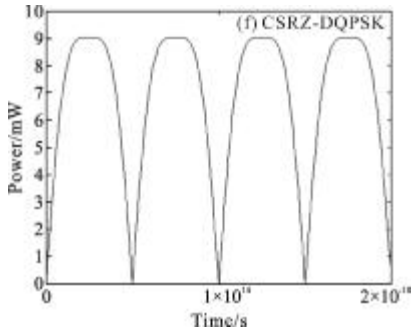


图 1 40 Gbit/s 调制码型的频谱图((a)~(c))及时域波形((d)~(f))

Fig.1 Spectrum ((a)-(c)) and domain waveforms ((d)-(f)) of modulation formats in 40 Gbit/s

DQPSK 三种调制格式的光频谱图及其时域图。其中，图 1(a)、(b)和(c)为三种调格式的频谱图，图 1(d)、(e)和(f)为时域波形，其电域信号为“10010111”，共 8 个二进制码。对于三种调制格式，载波都选取 193.1 THz。在 CSRZ-OOK 调制格式的频谱中，载波被抑制了，这样可以减小光纤入射功率，从而减小非线性的影响。CSRZ-OOK 码比 RZ-OOK 码时域脉冲宽，频域较窄，故受色散影响比 RZ-OOK 码小。CSRZ-DPSK 每两个相邻码之间的相位差为 180°，光功率均匀分布在相位调制信号的每个比特中，结果使得非线性效应所导致的码间串扰影响大大降低。CSRZ-DQPSK 也具有相同的特性。但是 CSRZ-DQPSK 比 CSRZ-DPSK 频谱利用率要高，其原因为 CSRZ-DQPSK 是一种四进制调制格式，在相同符号速率情况下，比特率是 CSRZ-DPSK 的 2 倍。同时 CSRZ-DPSK 和 CSRZ-DQPSK 中信息没有包含在码元的绝对相位之中，而是包含在前后两个码元的相位差里面，在接收端只需检测相位的改变量即可，不需关注绝对相位，这样也避免了本地载波的同步问题[7]。图 1 中的 CSRZ-DQPSK 比 CSRZ-DPSK 调制格式的带宽窄，主要是为了方便进行性能对比，将 CSRZ-DQPSK 的符号速率设置成了 20 G symbol/s，使其比特率和另外两种调制格式一样，都为 40 Gbit/s，故 CSRZ-OOK 和 CSRZ-DPSK 调制格式的带宽相同。同时在表 1 中给出了三种调制格式的数学表达式。

表 1 基于 CSRZ 的三种调制格式表达式

Tab.1 Expression of three modulation formats based on CSRZ

Modulation formats	Expressions of modulation formats
CSRZ-OOK	$\mathbf{E}_{out}(t)=\mathbf{E}_{in}(t)\cos^2[\pi\cos(\pi\mathbf{B}t)/2]$
CSRZ-DPSK	$\mathbf{E}_{out}(t)=-j\mathbf{E}_{in}(t)\exp(j\mathbf{LB})\sin[\pi\sin(\pi\mathbf{B}t)/2]$
CSRZ-DQPSK	$\mathbf{x}(t)=\mathbf{A}\cos(2\pi f_c t+\theta(\mathbf{k}))$, $\mathbf{kT}\leqslant t<(\mathbf{k}+1)\mathbf{T}$, $\theta(\mathbf{k})-\theta(\mathbf{k}-1)=\begin{cases}0 & \text{if}(\mathbf{I}(\mathbf{k}),\mathbf{Q}(\mathbf{k}))=11\\ \pi/2 & \text{if}(\mathbf{I}(\mathbf{k}),\mathbf{Q}(\mathbf{k}))=01\\ \pi & \text{if}(\mathbf{I}(\mathbf{k}),\mathbf{Q}(\mathbf{k}))=00\\ 3\pi/2 & \text{if}(\mathbf{I}(\mathbf{k}),\mathbf{Q}(\mathbf{k}))=10\end{cases}$

2 三种调制格式系统性能仿真分析

在仿真时，所用的系统结构模型如图 2 所示。

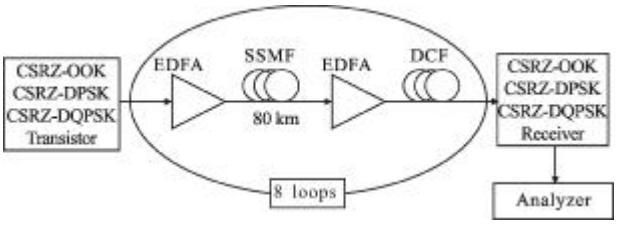


图 2 传输系统模型

Fig.2 Model of transmission system

系统信息传输速率为 40 Gbit/s，选用 27 个伪随机码作为待传的二进制信息，对于光信号，为了提高仿真速度，每个符号抽样 32 点。EDFA(掺铒光纤放大器)的增益设为 5 dB，噪声指数为 6 dB。SSMF(标准单模光纤)每段长 80 km，衰减为 0.2 dB/km，色散值为 17 ps/(nm·km^{-1})，有效纤芯面积为 70 μm^2，色散斜率为 0.075 ps/(nm^2·km)。DCF(色散补偿光纤)每段设为 10 km，衰减为 0.5 dB/km，色散为-80 ps/(nm·km^{-1})，色散斜率为-0.3 ps/(nm^2·km)，有效纤芯面积为 22 μm^2。接收机响应度为 1 A/W。为了观测眼图，在电接收机部分采用 4 阶低通贝塞尔滤波器进行滤波。CSRZ-OOK 和 CSRZ-DPSK 采用两个偏置在不同点的铌酸锂马赫增德尔外调制器产生，而 DQPSK 采用三个铌酸锂马赫增德尔外调制器来产生。

比较传输码型性能时，采用 Q 因子作为其中一

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

个评价指标。Q 因子被定义为接收机判决电平信号和噪声的比值，较高的 Q 值意味着有较好的误码率(BER)。两者关系为[8]:

$$\mathbf{BER}=\frac{\exp(-\mathbf{Q}^2/2)}{\mathbf{Q}\sqrt{2\pi}}$$

当 **Q**=6 时,BER 约为 10^{-9}。

图 3 为只考虑色散时三种调制格式 Q 值随色散值的变化情况。在仿真时,忽略了 PMD 和非线性效应。由图可见，在色散值小于每千米 18 ps/nm 时，CSRZ-OOK 和 CSRZ-DPSK 调制格式比 CSRZ-DQPSK 调制格式的 Q 值高，即在色散较小时,CSRZ-OOK 和 CSRZ-DPSK 可以满足性能需求。而随着色散值的变大,CSRZ-OOK 和 CSRZ-DPSK 两种调制格式的性能急剧恶化，CSRZ-DQPSK 也是随着色散增大而误码率有所增加,但性能变化相对较为平稳。可以看出，如果能够对色散进行有效补偿，可以使用 CSRZ-OOK 和 CSRZ-DPSK 作为传输码型而不必采用高阶调制格式，原因是高阶调制格式调制和解调都较为复杂。

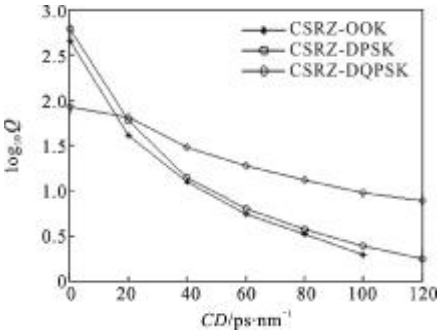


图 3 只考虑色散时三种调制格式 Q值随色散值的变化情况

Fig.3 Value of Q of three modulation formats versus chromatic dispersion only considering CD

图 4 为只考虑非线性时三种调制格式的 BER 随入射光功率的变化情况。在仿真时,为了单独观测非线性的影响,忽略了色散和偏振模色散。由于是单信道系统,故非线性中只考虑自相位调制(SPM)。从图 4中可以看出,CSRZ-DQPSK 调制格式性能始终比CSRZ-OOK 和 CSRZ-DPSK 调制格式要好,即对非线性效应的容忍度要高。输入功率大于 8 dBm 后，CSRZ-OOK 和 CSRZ-DPSK 两种调格式性能较为近似。当 BER 为 10^{-9} 时,CSRZ-DQPSK 入射功率为 13.5 dBm,CSRZ-DPSK 为 12.76 dBm，而 CSRZ-OOK 为 11.8 dBm，故在非线性方面,CSRZ-DQPSK 调制格式容忍度最大,CSRZ-DPSK 次之,CSRZ-OOK 最差。

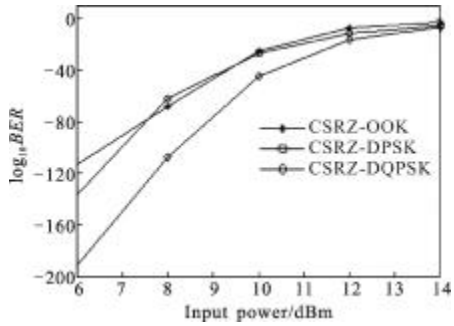


图 4 只考虑非线性时误码率随三种调制格式入射光功率的变化情况

Fig.4 Value of BER of three modulation formats versus input power only considering nonlinear effect

图 5 为只考虑 PMD 时 Q 值随差分群时延(DGD)的变化情况。在仿真时,忽略了色散和非线性效应。偏振模色散满足统计特性,随机性较大,这在图 5 中得到了很好体现，即随着 DGD 的变化,Q 值呈现不规则变化,这种不规则的变化正是由 PMD 的随机特性造成的。由于在实验中只进行了一次仿真,曲线变化较为明显,但整体趋势是随着 DGD 的变大而 Q值变小,即随着 PMD 影响的加剧,系统性能越来越差。从整体来看,CSRZ-DQPSK 调制格式的抗 PMD能力最强，其次为 CSRZ-DPSK,CSRZ-OOK 最差。图 6 为只考虑 PMD 情况下系统的背靠背(back to back)眼图(图 6(a)~(c))和 DGD 为 20 ps 时的眼图(图 6(d)~(e))。通过对比也可以看出,CSRZ-DQPSK 的抗 PMD 能力要优于 CSRZ-DPSK 和 CSRZ-OOK。

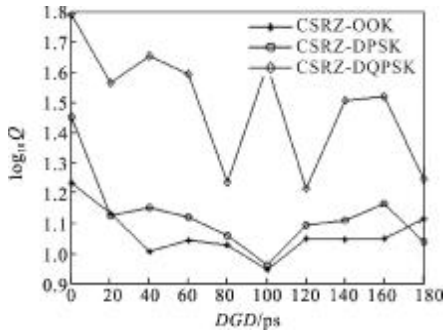


图 5 只考虑 PMD 时差分群时延随 Q 值的变化情况

Fig.5 Value of Q of three modulation formats versus DGD only considering PMD

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

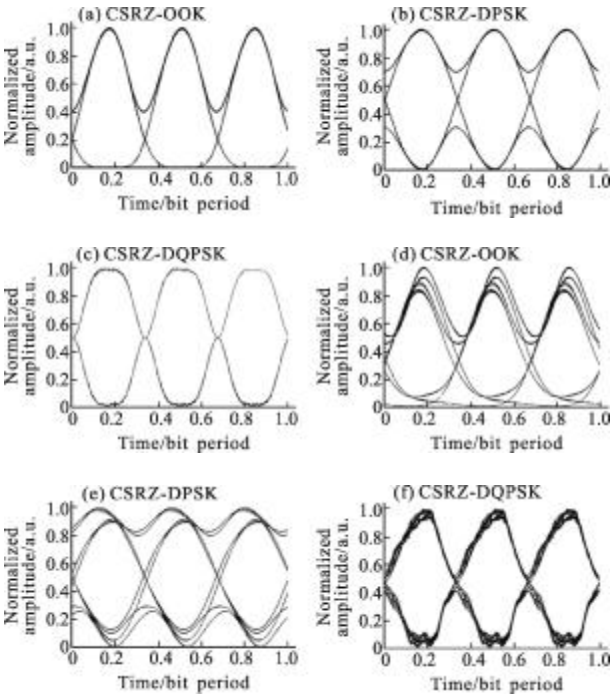


图 6 只考虑 PMD 时三种调制格式的背靠背眼图和 DGD 为 20 ps 时的眼图

Fig.6 Eye diagrams of three modulation formats with back to back and **DGD**=20 ps

图 7 给出了不同跨段(**N**)下三种调制格式在综合考虑色散、偏振模色散和非线性效应时的误码率情况。可以看出,随着传输距离增加,残留色散、PMD 和噪声影响越来越严重,导致 BER 增大,系统性能恶化。但从整体来看,CSRZ-DQPSK 调制格式具有最好的特性,表明 CSRZ-DQPSK 相对于 CSRZ-OOK、CSRZ-DPSK 对色散、偏振模色散和非线性效应有非常好的容忍能力。

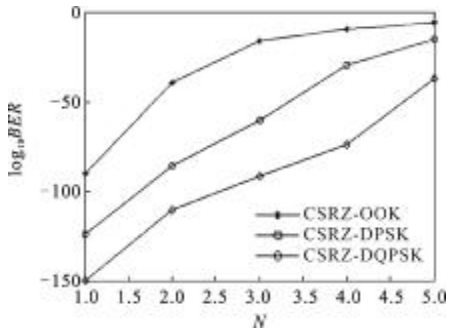


图 7 考虑色散、偏振模色散和非线性效应时三种调制格式 BER 随传输距离的变化关系

Fig.7 BER of three modulation formats versus transmission distance considering CD, PMD and nonlinear effect

3 结 论

分析了基于载波抑制归零码的三种光调制格式 CSRZ-OOK、CSRZ-DPSK 和 CSRZ-DQPSK 的时域和频域特性,并数字仿真了三种调制格式在40 Gbit/s 单信道光纤系统中的传输性能。采用 Q 值、眼图和误码率作为性能评价指标,研究了 CSRZ-OOK、CSRZ-DPSK 和 CSRZ-DQPSK 调制格式对色散、偏振模色散和非线性效应的抑制作用。仿真结果表明:CSRZ-DQPSK 作为一种高阶调制格式,在高频谱利用率的前提下,相对于 CSRZ-OOK 和 CSRZ-DPSK,对色散、偏振模色散和非线性都有非常好的容忍能力。CSRZ-OOK 和 CSRZ-DPSK 调制格式实现简单,而 CSRZ-DQPSK 调制格式调制、解调都较为复杂。故在短距离传输系统中可以采用 CSRZ-OOK 和CSRZ-DPSK,对于超长距离、超大容量 DWDM 光纤传输系统,CSRZ-DQPSK 则是较为合适的调制格式。

参考文献:

[1] Daikoku M, Morita I, Taga H, et al. 100-Gb/s DQPSK transmission experiment without OTDM for 100 G ethernet transport[J]. Lightwave Technology, 2011, 25(1): 139-145.

[2] Ying Xiangyue, Xu Tiefeng, Liu Taijun, et al. New method for generation of RZ/CSRZ-DQPSK signals based on MZM [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(3): 755-758.

[3] Shao Yufeng, Zhang Junwen, Huang Bo, et al. 100 Gbit/s transmission performance of serial staggered phase-shift keying modulation formats signal [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(3): 464-468. (in Chinese)

[4] Liu Yuchen, Zhang Xiaolei, Wang Yongjun, et al. Research on D8PSK modulation formats and analysis of its transmission performance[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(5): 1271-1276. (in Chinese)

[5] Barroso F R C, Silva J B R. The impact of PMD and PDL on the performance of DPSK and DQPSK optical signals at 40 and 100 Gb/s [C]//Microwave & Optoelectronics Conference, 2011: 808-813.

[6] Yin Aihan, Jiao Yueli, Zhou Wei, et al. Performance analysis on 40 Gbit/s optical DQPSK transmission system [J]. Optical Communications, 2010, 34(1): 46-49. (in Chinese)

[7] Zhang Lijia, Xin Xiangjun, Liu Bo, et al. Novel high-speed orthogonal optical label switching technology based on the 8PSK modulation[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(1): 103-105. (in Chinese)

[8] Agrawal G P. Nonlinear Fiber Optics [M]. New York: Academic Press, 1989: 485-487.

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com