

文章编号:1004-4213(2010)04-0704-5

16 进制相移幅度调制光信号的传输性能研究*

李晓军^{a,b}, 刘增基^a, 文爱军^a

(西安电子科技大学 a. 综合业务网理论与关键技术国家重点实验室; b. 理学院, 西安 710071)

摘要:分析了光纤通信系统中十六进制差分相移幅度键控光信号的色散与非线性传输性能. 依据该信号的调制和解调原理, 理论上推导了背靠背系统中的最佳消光比值为 1.43 dB. 在此基础上, 建立了 40 Gbps 的十六进制差分相移幅度键控光传输系统模型. 仿真结果表明: 该信号的谱宽仅为二进制幅度键控的四分之一; 就抗色散和非线性传输性能表现而言, 十六进制差分相移幅度键控光信号的相位支路均强于幅度支路.

关键词:光通信; 相移键控; 光纤; 色散; 非线性光学

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103904.0704

0 引言

现代互联网的发展加剧了对于通信网络带宽的需求, 单波长通信速率正在由 10 Gbps 逐渐转为 40 Gbps, 这使得光纤通信系统中的色散和非线性传输损伤进一步增加, 10 Gbps 系统中使用的二进制幅度键控 (Binary Amplitude-Shift Keying, BASK) 调制格式难有作为^[1]. 基于相位调制的差分相移键控调制格式显示出了较强优势, 二进制差分相移键控 (Binary Differential Phase-Shift Keying, BDPSK)^[2] 和四进制差分相移键控 (Differential Quadrature Phase-Shift Keying, DQPSK)^[3] 具有相同包络幅度, 能有效降低自相位调制和交叉相位调制等效效应带来的非线性传输损伤. 文献[3]给出了 DQPSK 调制器, 并研究了 DQPSK 在提高频带利用率、色散和偏振模色散^[4] 容限等方面的优势. 另外多进制相移幅度调制技术也是解决该问题的一个重要途径^[5-7]. 十六进制差分相移幅度键控 (Differential Phase-Amplitude-Shift Keying, 16DPASK) 通过在一个码元周期内传输四个比特信息, 使得系统的码元速率成倍降低, 因而具有较高的色散与非线性容忍度; 而且仅需设计更换相应的发射和接收设备, 即可充分利用现有的 10 Gbps 系统光纤链路, 实现 40 Gbps 的通信信息速率.

与单纯的幅度调制或相位调制格式不同, 16DPASK 光信号的幅度和相位分别携带有独立的比特信息, 这就要求在背靠背传输系统中, 幅度和相位支路的光信号应当具有相平衡的传输性能, 而消

光比则是影响该性能的重要因素. 目前, 关于该调制格式的相关研究还比较少.

本文首先给出 16DPASK 光信号的调制和解调实现方法, 接着计算了背靠背系统中最佳的消光比值, 以获得相位与幅度支路相平衡的性能表现. 在此基础上, 建立了信息速率 40 Gbps 的单信道通信系统模型, 仿真研究了该调制光信号的色散与非线性传输性能.

1 16-DPASK 的调制与解调原理

16DPASK 光信号的调制方法如图 1(a), 其中的光脉冲源整形器 (Pulse carver) 是个调制器, 改变其直流偏压和电脉冲信号幅度, 可以得到不同空占

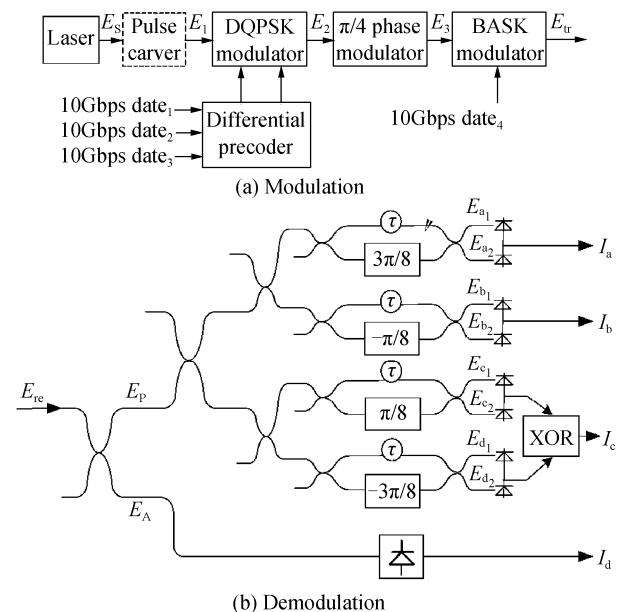


图 1 16-DPASK 光信号的调制与解调方法
Fig. 1 Modulation and demodulation methods of optical 16-DPASK signal

* 高等学校学科创新引智计划 (B08038) 资助
Tel: 029-88204468 Email: xjli@xidian.edu.cn
收稿日期: 2009-02-16 修回日期: 2009-05-27

比的光脉冲,数据调制后可以得到不同占空比的归零(Return-to-Zero)码^[8].三路独立的数字电信号经过差分预编码(Differential Precoder)后,驱动DQPSK调制器(DQPSK Modulator)^[3]和 $\pi/4$ 相位调制器(Phase Modulator)对光信号 E_1 进行相位调制,最终获得具有八个相位状态的光信号 E_3 .其中的DQPSK调制模块可以通过对马赫-曾德尔调制器与相位调制器的并联或串联方式来实现.另外一路数字电信号4通过BASK调制模块(BASK Modulator)对光信号 E_3 进行幅度调制,最终产生的 E_{tr} ,即为具有两个调制幅度和八个调制相位的16DPASK光信号.

图1(b)为16DPASK光信号的解调实现方法,输入的16-DPASK光信号 $E_{re}(t)$ 经过一个3 dB功率耦合器,被分为功率相等的两路信号 $E_P(t)$ 和 $E_A(t)$,分别进入相位支路(Ph-tributary; Phase tributary)和幅度支路(Am-tributary; Amplitude tributary)进行解调.相位支路的解调利用四个延时干涉平衡接收器来完成^[9];幅度支路的解调装置为单个光电探测器,这与单纯的BASK解调一致.最终可以从相位支路解调出三路电信号 I_a 、 I_b 和 I_c ,从幅度支路解调出第四路电信号 I_d .

2 背靠背通信系统中的最佳消光比

为了便于讨论消光比对于背靠背系统中相位支路和幅度支路产生的影响,首先需给出两支路解调电信号的数学表达式.

根据16DPASK信号的调制原理图1(a),激光器产生的脉冲光载波电场可以表示为^[10]

$$E_s(t) = A_s \exp(j\omega_0 t) \quad (1)$$

式中, A_s 表示电场幅度, ω_0 表示光载波的角频率, t 代表时间,初相位选择为零.载波经过光脉冲源整形器,产生归零码光信号 E_1 .DQPSK调制模块和相位调制器对光信号 E_1 相继进行相位调制,产生具有八个相位状态的光信号可以表示为

$$E_3(t) = A_s \exp[j(\omega_0 t + \varphi(t))] \quad (2)$$

式中 $\varphi(t)$ 表示调制后的载波相位,令 T 为码元宽度,当 $t = nT$ ($n = 0, 1, 2, \dots$)时,则有 $\varphi(t) = \varphi(nT) = \varphi_n \in \{0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4, \pi, 5\pi/4, 3\pi/2, 7\pi/4\}$.接着BASK调制模块对光信号 E_3 进行幅度调制,最终产生16-DPASK调制格式的光信号电场为

$$E_{tr}(t) = A(t) \exp[j(\omega_0 t + \varphi(t))] \quad (3)$$

式中 $A(t)$ 代表调制后的载波幅度.在时刻 $t = nT$, $A(t) = A(nT) = A_n \in \{a, b\}$,这里的“ a ”和“ b ”分别表示“0”码和“1”码.

对于背靠背系统而言, $E_{re}(t) = E_{tr}(t)$.根据16-ODPASK信号的解调原理图1(b),输入信号首先被均分为等功率的两路光信号 $E_P(t)$ 和 $E_A(t)$,分别进入相位支路和幅度支路进行解调. $E_P(t)$ 和 $E_A(t)$ 的电场表达式为

$$E_P(t) = E_A(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} E_{re}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} A(t) \cdot \exp[j(\omega_0 t + \varphi(t))] \quad (4)$$

图1(b)中相位支路的四个时延干涉平衡接收结构相同, I_c 的获取虽经过了异或,但其电流的幅度频率和 I_a (或 I_b)也相同.为简便起见,本文仅以电流 I_a 为例来进行分析.经过第一个延时干涉后得到两个光信号电场为

$$\begin{cases} E_{a_1}(t) = \frac{1}{4\sqrt{2}} \{A(t-T) \exp[j(\omega_0(t-T) + \varphi(t-T))] - A(t) \exp[j(\omega_0 t + \varphi(t) + \frac{3\pi}{8})]\} \\ E_{a_2}(t) = \frac{j}{4\sqrt{2}} \{A(t) \exp[j(\omega_0 t + \varphi(t) + \frac{3\pi}{8})] + A(t-T) \exp[j(\omega_0(t-T) + \varphi(t-T))]\} \end{cases} \quad (5)$$

经过平衡接收后,当 $t = nT$,可以得到解调电流为

$$I_a(t) = R |E_{a_2}(t)|^2 - R |E_{a_1}(t)|^2 = \frac{1}{8} R A_n A_{n-1} \cos(\varphi_n - \varphi_{n-1} + \frac{3\pi}{8}) \quad (6)$$

式中, R 表示光电探测器的响应度.同理可以计算出 I_b 和 I_c 的值.同时幅度支路的光信号 $E_A(t)$ 则经过光探测器直接解调出第四路电信号 I_d ,当 $t = nT$,其值为

$$I_d(t) = R |E_A(t)|^2 = \frac{1}{2} R A_n^2 \quad (7)$$

由于 $A_n, A_{n-1} \in \{a, b\}$, $\varphi_n, \varphi_{n-1} \in \{0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4, \pi, 5\pi/4, 3\pi/2, 7\pi/4\}$,由表达式(6)容易看出, I_a 有十二种不同的可能取值,因此相位支路解调的电信号为上下对称的十二电平信号; I_d 只可能有两个不同的可能取值: $Ra^2/2$ 和 $Rb^2/2$,因此幅度支路解调的电信号为两电平信号.该结论与图2的仿真结果完全一致,验证了理论分析的正确性.

解调获得的三路电信号 I_a 、 I_b 和 I_c 还需要进一步抽样判决后才能最终得到二进制比特序列.图2(a)中的眼张开 d_1 如果越大,就越容易进行“1”和“0”的判决.相位支路的12个电平都有可能取值,假定每种可能等概,可以得到 d_1 的均值.具体计算时,由于对称性仅考虑上边的6个电平即可,由表达式(6),可得

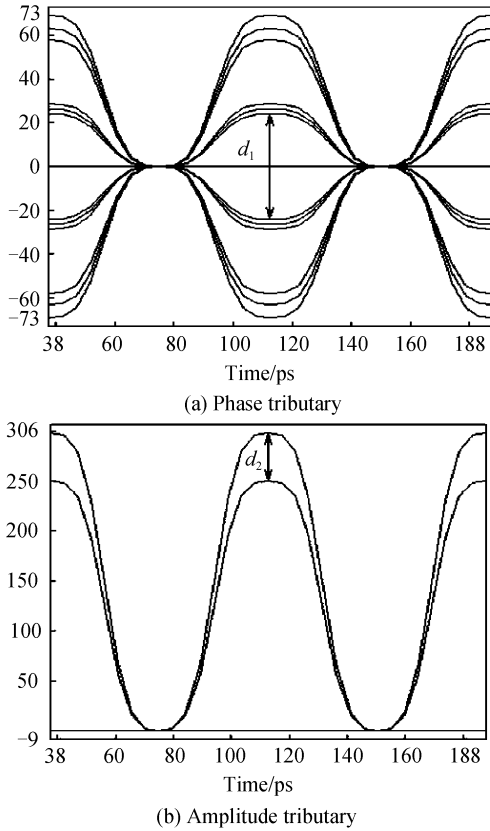


图2 背靠背系统中16DPASK信号的解调电信号眼图
Fig. 2 Demodulated eye diagrams of 16DPASK signal in back-to-back transmission system

$$\overline{d_1} = \frac{R}{24} \left[(a^2 + ab + b^2) \left(\cos \frac{\pi}{8} + \cos \frac{3\pi}{8} \right) \right] \quad (8)$$

幅度支路解调电信号则是根据高低电平来判定“1”和“0”码。同理,图2(b)中的眼张开 d_2 也应该尽可能的大。由表达式(7),易得

$$d_2 = \frac{R}{2} (b^2 - a^2) \quad (9)$$

为了使相位支路和幅度支路具有平衡的传输性能,该两支路解调的电信号须满足关系 $\overline{d_1} = d_2$ 。因而最佳的消光比为

$$ER = 10 \lg \frac{b^2}{a^2} = 1.43 \text{ dB} \quad (10)$$

3 16-DPASK 传输性能仿真

3.1 仿真系统模型

仿真模型是比特速率为40 Gbps的16-DPASK光信号传输系统。如图3,发送机产生16DPASK调制格式光信号,经过掺铒光纤放大器(Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA)后进入光纤链路进行传输,再经过带通滤波器后进入接收机进行解调。其中光纤链路的每个跨段由标准单模光纤(SSMF,色散系数 $D = 16 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$,衰减系数 $\alpha = 0.2 \text{ dB/km}$,非线性折射率系数为 $n_2 = 2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$)和色散补偿光纤(DCF,色散系数 $D =$

$-80 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$,衰减系数 $\alpha = 0.5 \text{ dB/km}$,非线性折射率系数为 $n_2 = 4 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$)组成。光滤波器为3阶高斯型带通滤波器,消光比为1.43dB。采用分步傅里叶算法求解非线性薛定谔方程,来计算光信号在光纤链路中所受的传输效应。

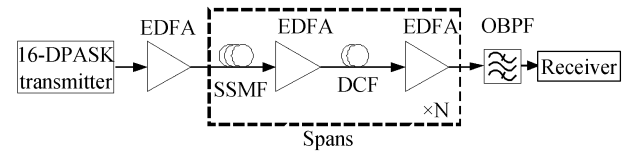
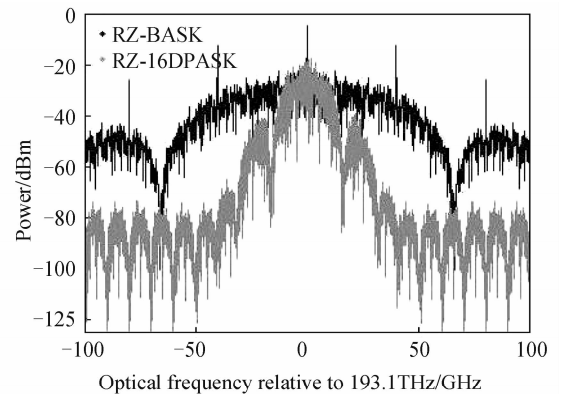


图3 16DPASK光信号传输系统

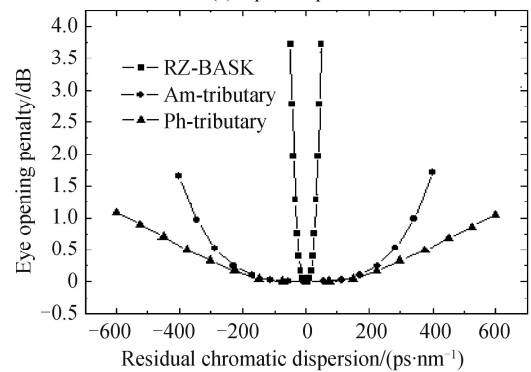
Fig. 3 Transmission system of 16DPASK signal

3.2 仿真结果分析

图4(a)为信息速率40 Gbps时RZ-16DPASK与RZ-BASK光信号的频谱图,归零码占空比选择50%。可以看出RZ-BASK调制光信号的主瓣宽度约为132 GHz, RZ-16DPASK光信号的仅为33 GHz,是RZ-BASK信号的四分之一。这是由于在相同信息速率40 Gbps的条件下,RZ-16-DPASK的码元速率仅为10 Gbps,而RZ-BASK信号的码速率为40 Gbps。另外,RZ-16DPASK光信号的产生,除了幅度调制外,同时进行了相位调制,其频谱图中的离散谱分量得到很好的抑制,这在一定程度上提高了该信号抗非线性传输损伤的能力。



(a) Optical spectrum



(b) Chromatic dispersion tolerance performance

图4 RZ-16DPASK和RZ-BASK光信号的频谱图与色散容忍性能

Fig. 4 Optical spectrum and chromatic dispersion tolerance performance of RZ-16DPASK and RZ-BASK signal

群速度色散是高速光通信中重要传输损伤之一,图 4(b)给出了 40 Gbps RZ-16DPASK 与 RZ-BASK 光信号的眼张开代价随残留色散数值变化情况.对于 1 dB 眼张开代价,RZ-BASK 的所对应的残留色散容限范围为 60 ps/nm,RZ-16DPASK 幅度支路(Am-tributary)的色散容限范围为 691 ps/nm,相位支路(Ph-tributary)的容限范围达 1 155 ps/nm.可见 RZ-16DPASK 比相同信息速率的 RZ-BASK 具有更强的抗色散能力,而且 RZ-16DPASK 的平均色散容忍范围为 923 ps/nm,接近 RZ-BASK 的 $16(4^2)$ 倍.就 RZ-16DPASK 本身而言,其相位支路的容限值约为幅度支路的 1.67 倍.在 ± 100 ps/nm 范围内,两支路的抗色散能力基本相当;随着残留色散值的增大,两支路的代价曲线差异逐渐变得明显,其中相位支路的眼张开代价缓慢增加,而幅度支路的代价则上升较快.

图 5 为信息速率 40 Gbps 光纤传输系统中,RZ-16DPASK 调制信号的幅度支路与相位支路的非线性容忍性能曲线.可以看出,随着平均入纤功率的增加,幅度与相位支路眼张开代价均单调增加;经过相同数目的跨段传输后,相位支路的眼张开代价均小于幅度支路,而且幅度支路的眼张开代价增加速度要快于相位支路.原因是,光纤链路中的非线性作用主要为自相位调制,16DPASK 光信号的高低两个幅度受到自相位调制与色散作用的影响后展宽,导致幅度支路解调电信号眼张开 d_2 与相位支路解调电信号眼张开 d_1 同时变小,但相位支路由于采用延时相干平衡检测装置,使得该支路眼张开 d_1 恶化的速度较慢.可见幅度支路抗非线性能力不如相位支路.

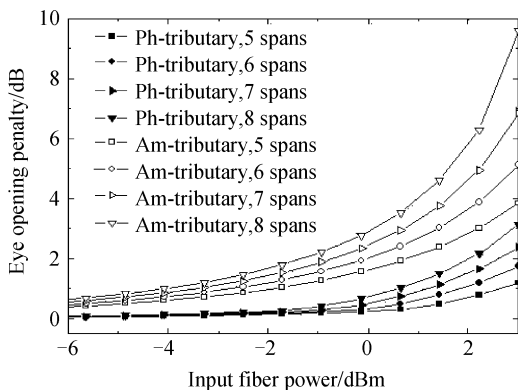


图 5 RZ-16DPASK 信号的非线性容忍性能

Fig. 5 Nonlinearity tolerance performance of RZ-16DPASK signal

在具体的 16DPASK 光传输系统中,平均入纤功率和传输跨段数确定,考虑到幅度支路受非线性

效应产生的传输损伤大于相位支路,可以适当地调节消光比值,使得接收端幅度和相位支路解调电信号的眼张开基本一致,从而总体上获得最佳的传输性能.

4 结论

本文对于多进制 16DPASK 光信号,结合其调制和解调原理,理论计算了背靠背系统中的最佳消光比值为 1.43 dB.进一步建立了 40 Gbps 光传输仿真系统模型,仿真结果表明,16DPASK 光信号带宽是相同信息速率 BASK 信号带宽的四分之一;就色散传输性能而言,16DPASK 信号的幅度支路色散容忍值比相位支路要小,整体上 16DPASK 信号的抗色散传输损伤能力要强于 BASK 信号;就非线性传输性能而言,16DPASK 信号的相位支路要优于幅度支路.通过对 16DPASK 信号消光比的适当调节,可以达到平衡两支路传输性能的效果.

参考文献

- [1] HAYEE M I, WILLNER A E. NRZ versus RZ in 10-40-Gb/s dispersion-managed WDM transmission systems [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, **11**(8): 991-993.
- [2] HE Jing, CHEN Lin, WEN Shuang-chun. Performance research on 40 Gb/s DPSK format against polarization-mode dispersion [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 660-664. 何晶,陈林,文双春. 40 Gb/s 差分相移键控格式抗偏振模色散的性能研究 [J]. *光子学报*, 2009, **38**(3): 660-664.
- [3] GRIFFIN R A, CARTER A C, COMPONENTS M O, et al. Optical differential quadrature phase-shift key (oDQPSK) for high capacity optical transmission [C]. OSA Proc Opt Fiber Commun Conf (OFC), Anaheim: LEOS, 2002: WX6.
- [4] YUAN Fu-lai, LIU Han-kui, XIAO Shun-wen, et al. Evaluation of outage probability of optical communication system impaired by polarization effects [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(2): 329-333. 袁福来,刘汉奎,肖顺文,等. 偏振效应损伤的光通信系统失效概率估算 [J]. *光子学报*, 2009, **38**(2): 329-333.
- [5] WALKLIN S, CONRADI J. Multilevel signaling for increasing the reach of 10 Gb/s lightwave systems [J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1999, **17**(11): 2235-2248.
- [6] HONGOU J, KASAI K, YOSHIDA M, et al. 1 Gsymbol/s 64 QAM coherent optical transmission over 150 km with a spectral efficiency of 3 bit/s/Hz [C]. OSA Proc Opt Fiber Commun Conf (OFC), mAnaheim: LEOS, 2007: OMP3.
- [7] NAKAZAWA M. Challenges to FDM-QAM coherent transmission with ultrahigh spectral efficiency [C]. OSA Proc Europ Conf Opt Commun (ECOC), Brussels: LEOS, 2008: Tu. 1. E. 1.
- [8] WINZER P J, ESSIAMBRE R J. Advanced optical modulation formats [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2006, **94**(5): 952-985.
- [9] SERBAY M, WREE C, ROSENKRANZ W. Experimental Investigation of RZ-8DPSK at 3×10.7 Gb/s [C]. The 18th Annual Meeting of the IEEE, Sydney: LEOS, 2005: 483-484.
- [10] AGRAWAL G P. Fiber-optic communication systems [M]. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002.

Transmission Performance Study of 16-ary Phase-amplitude Modulated Optical Signal

LI Xiao-jun^{1,2}, LIU Zeng-ji¹, WEN Ai-jun¹

(*a. State Key Lab. of Integrated Service Networks; b. School of Science, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

Abstract: The chromatic dispersion and nonlinear performances of 16DPASK modulation format in optical communication are analyzed. Based on the modulation and demodulation principles of this optical signal, the optimal extinction ratio for back-to-back configuration is theoretically derived as 1.43 dB, which is verified by simulation. Then transmission system model of 16DPASK is established. Simulation results show that the spectrum width of 16DPASK is one quarter of that of BASK. Both the chromatic dispersion and nonlinear tolerances of phase tributary are larger than that of amplitude tributary.

Key words: Optical communication; Phase shift keying; Fibers; Chromatic dispersion; Nonlinearity optics



LI Xiao-jun is working for the Ph. D. degree, and his research interests focus on optical fiber communication systems.



LIU Zeng-ji is currently a professor, and his research interests focus on optical communication systems and windband networks.