

只需一个解调器的偏分复用差分相移键控系统实验实现

席丽霞 秦江星 赵鑫媛 张晓光

(北京邮电大学信息光子学与光通信教育部重点实验室, 北京 100876)

摘要 偏分复用技术是提高系统传输速率的有效方法之一。搭建了被称为双偏振态差分相移键控(Dual-Pol. DPSK)码的新型偏分复用实验系统,它与具有相同的比特波特比的差分正交相移键控(DQPSK)调制方式相比,接收机要简单很多。与传统的偏振分解复用(POLMUX)技术相比,它无需偏振控制或偏振跟踪,只需一个解调器和一个平衡探测器以及电域的多电平判决就可以将两个偏振正交信号同时解调出来,大大降低了系统的复杂度。利用数值仿真的方法,分析了 Dual-Pol. DPSK 系统对噪声及偏振模色散(PMD)的容忍度,并且与单偏振态的差分相移键控(DPSK)及 DQPSK 系统进行了比较。结果表明,由于受符号间欧氏距离的限制,Dual-Pol. DPSK 码对噪声非常敏感,在误码率为 10^{-3} 时,它对信噪比(SNR)的要求比同速率的 DQPSK 系统高 7 dB;由于频谱利用率高,相比于同速率的 DPSK,Dual-Pol. DPSK 对 PMD 的容忍度高 5 ps,但与 DQPSK 相比,Dual-Pol. DPSK 码抗 PMD 的能力要差一些。

关键词 光通信;偏分复用;差分相移键控;偏振模色散容忍度

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0306001

Experimental Realization of Polarization Multiplexing Differential Phase Shift Keying System Using Only One Demodulator

Xi Lixia Qin Jiangxin Zhao Xinyuan Zhang Xiaoguang

(Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract Polarization multiplexing is one of the effective methods to improve the transmission rate of fiber-optic communication system. A novel configuration polarization multiplexing differential phase shift keying (PolMUX-DPSK) format called dual-polarization differential phase shift keying (DPSK) (Dual-Pol. DPSK) is proposed and realized experimentally. It has the same bits symbol ratio with differential quaternary phase shift keying (DQPSK), but it needs a much simpler receiver. Unlike the conventional POLMUX-DPSK, no polarization control or polarization selection is required at the receiver. The polarization-multiplexed symbols are decoded by one Mach-Zehnder delay interferometer (MZDI) and electrical multilevel detection. The tolerances to noise and polarization mode dispersion (PMD) are analyzed and compared with single polarization state DPSK and DQPSK by numerical simulation. The results show that Dual-Pol. DPSK is more sensitive to the noise than DQPSK due to the smaller distance between symbols. For bit error rate (BER) at 10^{-3} , the desired signal-to-noise ratio of Dual-Pol. DPSK is 7dB higher than DQPSK. Compared with DPSK, Dual-Pol. DPSK has 5 ps higher PMD tolerance, but its PMD tolerance is lower than DQPSK.

Key words optical communications; polarization multiplexing; differential phase shift keying (DPSK); polarization-mode dispersion tolerance

OCIS codes 060.2330; 060.4080; 060.4510; 060.4230

收稿日期: 2010-04-25; 收到修改稿日期: 2010-07-15

基金项目: 国家 863 计划(2009AA01Z224)和北京邮电大学青年创新专项基金(BUPT2009RC0413)资助课题。

作者简介: 席丽霞(1973—),女,博士,副教授,主要从事码型调制及信号损伤恢复等方面的研究。

E-mail: xilixia@263.net

1 引 言

高速大容量传输仍是光纤通信发展的重要方向之一。目前,提高信道容量的方案主要是采用对频带利用率更高的偏分复用技术以及多级相位调制格式。在波特率不变的情况下,采用偏分复用技术可以将系统的传输比特率提高一倍,因此偏分复用技术可有效地实现现有系统的升级^[1~11]。然而要真正实现高速偏分复用系统实用化,偏分解复用还有很多问题急待解决。目前,偏分复用系统偏分解复用有两种方式:1)采用相干检测配以电域处理的方式^[1~6];2)光域直接解复用^[7~9]。

方式 1)要求本地激光源线宽窄(兆赫兹甚至千赫兹量级)、频率稳定;AD 模数转换速率(ADC)要求高(目前国际能够达到的最高 ADC 每路采样率为 50 Gb/s,对于 25 G 信号每个比特只能采样 2 个点);数字信号处理器(DSP)处理速度要求快以及解复用算法要求高。这些要求使得系统成本大大增加,目前只有 Nortel 公司研制出了 46 Gb/s 偏分复

用的 POLMUX-DQPSK 演示系统^[4]。

方式 2)要求有快速响应的偏振控制器及反馈控制信号和算法。如果要同时接收两路偏振信号的话,还要有两套相同的接收系统,接收部分结构也很复杂。

本文搭建了一种叫做双偏振态 DPSK (Dual-Pol. DPSK)码的新型结构的偏分复用系统,与目前普遍采用的偏分解复用方式不同,它无需偏振跟踪或偏振控制,在接收端只用一个解调器和一个平衡探测器以及电域的多电平判决就可以将两个偏振正交信号同时解调出来,大大降低了系统的复杂度。本文还数值仿真了双偏振 DPSK 码型对噪声及偏振模色散的容忍度,并且与单偏振态的 DPSK 及 DQPSK 进行了对比。

2 偏分复用实验系统工作原理

搭建的双偏振态 DPSK 系统如图 1 所示。

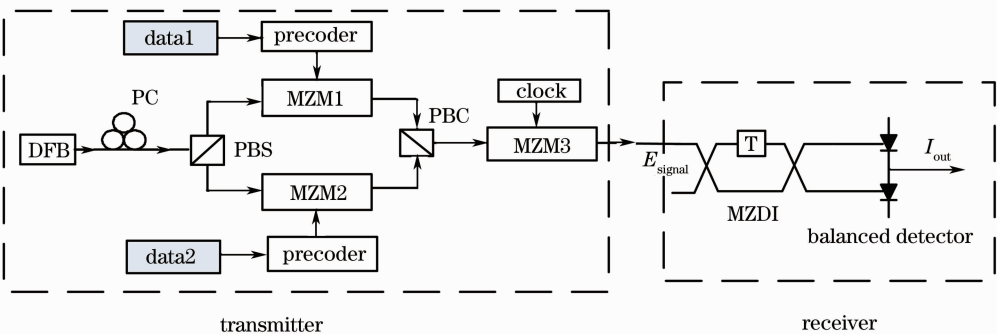


图 1 双偏振 DPSK 发射与接收系统框图

Fig. 1 Diagram of dual-polarization DPSK transmission and receiving system

发射部分:激光器(DFB)输出的连续光首先经偏振控制器(PC)后入射到光纤偏振分束器(PBS),得到两路振动方向相互垂直的线偏振光,不失一般性,假定上支路为水平偏振态,下支路为垂直偏振态,然后经过两个马赫-曾德尔调制器(MZM)调制,得到两路振动方向相互垂直的 NRZ-DPSK 信号,再通过光纤偏振合束器(PBC)后就得到偏分复用信号即 Dual-Pol. NRZ-DPSK。如果在输出端再加一个马赫-曾德尔调制器,并且在马赫-曾德尔调制器上加不同的偏置电压及时钟信号,就可以得到不同占空比的 Dual-Pol. RZ-DPSK 码,其数学表达式为

$$E_{\text{signal}} = \begin{bmatrix} A_h \exp(i\pi I_k) \\ A_v \exp(i\pi Q_k) \end{bmatrix} \times \cos \left\{ \frac{\pi}{2V_\pi} [V_{\text{clock}}(t) - V_{\text{bias}}] \right\} \exp \left(i \frac{V_{\text{bias}} \pi}{2V_\pi} \right), \quad (1)$$

式中 A_h, A_v, I_k, Q_k 分别为水平偏振态和垂直偏振态的振幅及预编码后的数据, V_π 和 V_{bias} 为马赫-曾德尔调制器的半波电压及偏置电压, V_{clock} 为加在调制器上的时钟信号。手动调整激光器后的偏振控制器,可以改变两偏振态信号的功率比。

接收部分:与单偏振态 DPSK 接收机相同,仅由一个上下两臂时延差为 1 bit 时延的马赫-曾德尔延时干涉仪(MZDI)和一个平衡探测器组成,然后将输出电信号输入到判决电路及解码器,进行多电平判决及解码,从而完成解调过程。由于两偏振态振动方向相互垂直,偏分复用信号互不相干,平衡探测器输出的电流是两偏分复用电流的简单相加,因此平衡探测器输出电流可表示为

$$I_{\text{out}} = (I_{\text{cons,h}} - I_{\text{des,h}}) + (I_{\text{cons,v}} - I_{\text{des,v}}) = \alpha (P_h \cos \Delta\phi_h + P_v \cos \Delta\phi_v), \quad (2)$$

式中 $I_{\text{cons,h}}, I_{\text{des,h}}$ 分别是平衡探测器“加口”和“减口”输出的水平偏振态的电流; $I_{\text{cons,v}}, I_{\text{des,v}}$ 是竖直偏振态在平衡探测器“加口”和“减口”输出的电流; P_h, P_v 分别为水平偏振态和竖直偏振态对应的光功率; $\Delta\phi_h, \Delta\phi_v$ 则为水平偏振态和竖直偏振态前后相邻码元之间的相位差, 它们的取值为 0 或 π ; α 是光电探测器的响应度。从(2)式可看出, 若 $P_h = P_v$, 则只有三个输出电平 $2\alpha P_h, 0$ 和 $-2\alpha P_h$, 无法区分 $\Delta\phi_h = 0, \Delta\phi_v = \pi$ 和 $\Delta\phi_h = \pi, \Delta\phi_v = 0$ 的情况; 如果设定 P_h, P_v 具有不同的光功率, 则有四个不同的输出电平, 从而可以解调出两个偏振态携带的信息。在实验中, 手动调整偏振控制器, 使得两偏振态具有不同的光功率。为了保证误码率最低, 应该满足任何相邻电平的差值相等, 为此设定 $P_h = 2P_v$ 。表 1 给出了输入

信号、相邻码元对应相位差以及输出的电平之间的关系。

表 1 输出电平与解调信号的对应关系
Table 1 Relation between output electrical levels and demodulation signals

u_k, v_k	$\Delta\phi_h, \Delta\phi_v$	I_{out}
0 0	$\pi \pi$	$-3\alpha P_v$
0 1	$\pi 0$	$-\alpha P_v$
1 0	0π	αP_v
1 1	$0 0$	$3\alpha P_v$

根据上面的发射与接收框图, 在实验室中搭建了 20 Gb/s 的 Dual-Pol. NRZ-DPSK 系统, 得到了复用后的频谱图及解调后“减口”的眼图, 如图 2 所示, 可见实验结果与理论预期结果基本一致。

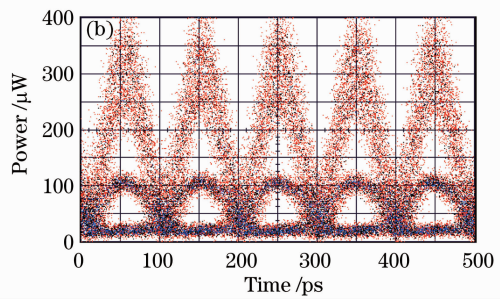
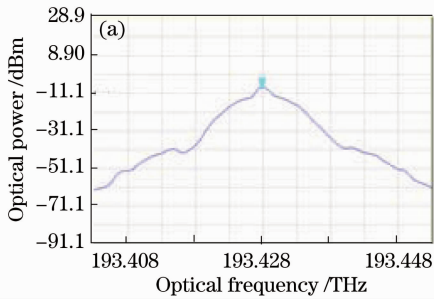


图 2 (a)偏复用 DPSK 信号的频谱图, (b)解调后“减口”的眼图

Fig. 2 (a) Spectrum of polarization multiplexing DPSK signal, (b) eye diagram of “destructive port” of demodulated signal

搭建的 Dual-Pol. DPSK 系统是同时利用偏振态及相位来承载信息, 与相同波特率的单偏振态 DPSK 相比, 传输的信息容量增加了一倍; 与相同波特率的单偏振态 DQPSK 相比, 具有相同的传输速率, 但接收机比 DQPSK 接收机结构简单很多, 成本也大大降低。下面对其传输性能进行分析。

3 传输性能分析

由于实验中没有三电平的判决电路, 采用数值仿真的方法对新型结构偏复用 DPSK 系统对噪声及偏振模色散的容忍度进行了分析, 且与相同传输速率的单偏振态 DPSK 及 DQPSK 进行了对比。

图 3 给出了传输速率为 40 Gb/s, 调制格式分别为 RZ-DPSK, RZ-DQPSK 及 Dual-Pol. RZ-DPSK 码的传输系统误码率 (BER) n_{BER} 随信噪比 (SNR) 的变化关系。从图中可以看出, Dual-Pol. RZ-DPSK 码对噪声最敏感, 而 RZ-DPSK 码的抗噪声能力最强; 当误码率为 10^{-3} 时, Dual-Pol. RZ-DPSK 对信噪比的要求比 RZ-DQPSK 高出 7 dB。这是由于符号

间欧氏距离不同造成的, 欧氏距离越小, 受噪声的影响越大, 对信噪比的要求也就越高。图 4 给出了 RZ-DPSK, RZ-DQPSK 及 Dual-Pol. RZ-DPSK 码的星座图。从图中可以看出, Dual-Pol. RZ-DPSK 码符号间的欧氏距离最小, 而 RZ-DPSK 码符号间的欧氏距离最大。因此, DPSK 码的抗噪声能力最强, 而 Dual-Pol. RZ-DPSK 码的抗噪声能力最差。

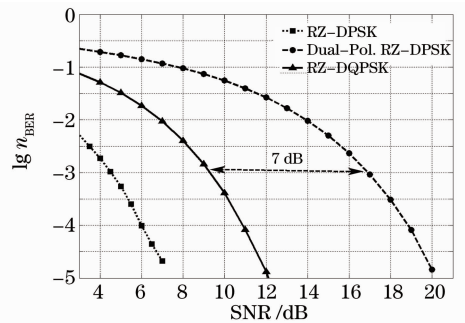


图 3 40 Gb/s 不同调制格式传输系统误码率随信噪比的变化关系

Fig. 3 BER versus SNR for 40 Gb/s transmission systems with different modulation formats

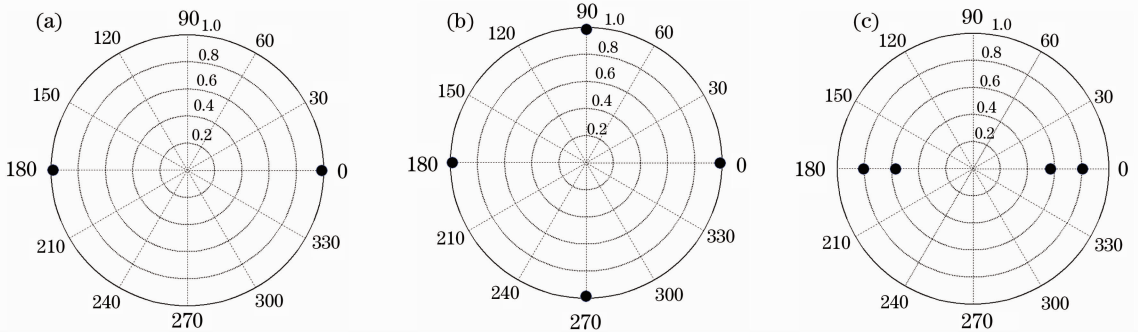


图 4 星座图。(a) DPSK 码, (b) DQPSK 码, (c) Dual-Pol. DPSK 码

Fig. 4 Constellations of (a) DPSK, (b) DQPSK, (c) Dual-Pol. DPSK

此外,还数值仿真了 Dual-Pol. RZ-DPSK 码对偏振模色散的容忍度,如图 5(a)所示。结果表明,在不考虑其他因素影响的情况下,Dual-Pol. DPSK 码对一阶 PMD 即差分群时延(DGD)的容忍度约为 25 ps;DPSK 码对偏振模色散的容忍度最低,约为 20 ps;DQPSK 码抗 PMD 能力最强,其 DGD 容忍

度高达 45 ps。信号抗 PMD 的能力跟频谱宽度密切相关,频谱越窄,其抗 PMD 及色度色散(CD)的能力越强。图 5(b)给出了相同传输速率情况下三种码型的频谱图,其中 DPSK 的频谱宽度约为 DQPSK 和 Dual-Pol. DPSK 码的两倍,因此它抗 PMD 的能力最弱。

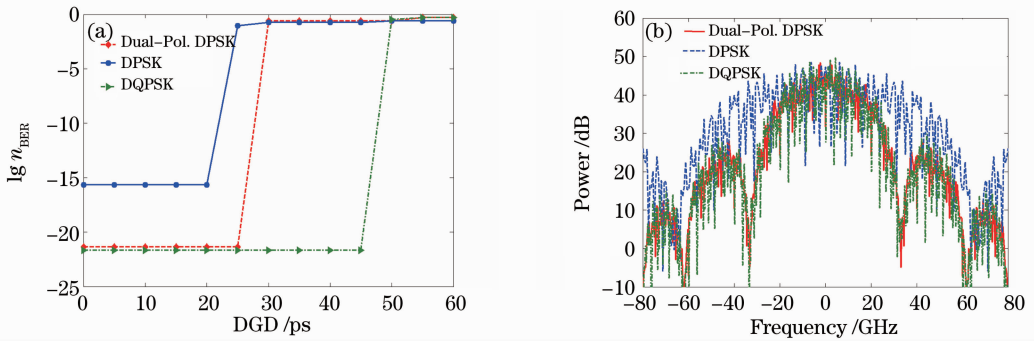


图 5 40 Gb/s 不同调制格式传输系统,(a)误码率随差分群时延的变化关系,(b)背靠背频谱图

Fig. 5 (a) BER versus DGD and (b) simulated back-to-back optical spectrum for 40 Gb/s transmission systems with different modulation formats

4 结 论

同时采用偏振态与相位承载信息,实验实现了双偏振态 DPSK 的发射与接收。利用数值仿真的方法,比较了传输速率相同的 Dual-Pol. DPSK,单偏振态 DPSK 及 DQPSK 系统的传输性能。对于 Dual-Pol. DPSK 码,由于符号间的欧氏距离小,导致了较高的噪声敏感度,在误码率为 10^{-3} 的情况下,Dual-Pol. DPSK 码对信噪比的要求比 DQPSK 高 7 dB,也就是说简单的接收机结构是以牺牲信噪比为代价的。因此,双偏振态 DPSK 不太适合长距离传输,但它可以适用于传输距离短但速率高的接入网。另外,在不考虑其他因素的情况下,对于具有相同传输速率的单偏振态 DPSK 和双偏振态 DPSK 系统,由于单偏振态 DPSK 的频谱宽度是双偏振态 DPSK 频谱宽度的两倍,导致了单偏振态 DPSK 抗

PMD 的能力比双偏振态 DPSK 的差。

参 考 文 献

- 1 S. Chandrasekhar, X. Liu *et al.*. 155×100 Gb/s coherent PDM-QPSK transmission over 7,200 km [C]. ECOC, 2009, PD2.6
- 2 Jianjun Yu, Xiang Zhou, Dayou Qian *et al.*. 20×112 Gbit/s, 50 GHz spaced, PolMux-RZ-QPSK straight-line transmission over 1540 km of SSMF employing digital coherent detection and pure EDFA amplification [C]. ECOC, 2008, Th. 2. A. 2
- 3 D. Mongardien, P. Bousset, O. Bertran-Pardo *et al.*. 2.6 Tb/s (26×100 Gb/s) unrepeated transmission over 401 km using PDM-QPSK with a coherent receiver [C]. ECOC, 2009, Paper 6.4.3
- 4 Han Sun, Kuang-Tsan Wu, Kim Roberts. Real-time measurements of a 40 Gb/s coherent system [J]. *Opt. Express*, 2008, 16(2): 873~879
- 5 O. Bertran-Pardo, J. Renaudier, G. Charlet *et al.*. System benefits of temporal polarization interleaving with 100 Gb/s coherent PDM-QPSK [C]. ECOC, 2009, Paper 9.4.1
- 6 Feng Yong, Wen He, Zhang Hanyi. Digital optical coherent detection of polarization-multiplexed differential phase shift

- keying signal and analysis of adaptive digital polarization demultiplexing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1268~1273
- 冯 勇, 闻 和, 张汉一. 偏振复用差分相移键控信号的数字相干解调与偏振解复用算法研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1268~1273
- 7 Wang Tiecheng, Lan Shoufeng, Jiang Junfeng *et al.*. A novel method of polarization state control for polarization division multiplexing system [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(11): 812~814
- 8 B. Koch, R. Noé, D. Sandel *et al.*. 200-Gb/s, 430-km PDM-RZ-DQPSK (4 bit/symbol) transmission with 10 krad/s endless polarization tracking [C]. OFC/NFOEC 2010, OTuD4
- 9 X. Steve Yao, L. S. Yan, B. Zhang *et al.*. All-optic scheme for automatic polarization division demultiplexing [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(12): 7407~7414
- 10 Wang Tiecheng, Yao Xiaotian, Wan Musen *et al.*. Effect of the polarization dependent loss on the orthogonality of channels in polarization division multiplexing system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 879~883
- 王铁城, 姚晓天, 万木森 等. 偏振相关损耗对偏振复用系统信道正交性的影响[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 879~883
- 11 Xiang Liu, S. Chandrasekhar. Direct detection of 107-Gb/s polarization-multiplexed DQPSK with electronic polarization demultiplexing [C]. OFC 2008, OTuG4