

# 基于强度调制/直接探测系统的偏振解复用方法

周馨雨 闫连山 易安林 陈智宇 潘 炜 罗 斌

(西南交通大学信息光子与通信研究中心, 四川 成都 610031)

**摘要** 针对强度调制/直接探测(IM/DD)系统,采用一种改进型光分路器结合数字信号处理(DSP)算法,实现了一种简单有效的偏振解复用方法。仿真结果表明,在 $2 \times 40$  Gb/s的偏振复用-强度调制/直接探测(PDM-IM/DD)系统中,该方法能够较好地分离两路偏振复用信号,并且算法收敛迅速,与传统IM/DD系统相比,误码率为 $10^{-4}$ 时对应的功率灵敏度仅为 $-2.3$  dBm。

**关键词** 光通信;强度调制/直接探测;偏振解复用;数字信号处理

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1206004

## Polarization Demultiplexing Method for Intensity-Modulation Direct-Detection Optical Communication Systems

Zhou Xinyu Yan Lianshan Yi Anlin Chen Zhiyu Pan Wei Luo Bin

(Center for Information Photonics and Communications, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

**Abstract** A simple and effective polarization demultiplexing method employing improved optical splitter and digital signal processing (DSP) algorithm for intensity-modulation direct-detection (IM/DD) optical communication systems is proposed. Simulation results show that in a  $2 \times 40$  Gb/s polarization-division-multiplexing intensity-modulation direct-detection (PDM-IM/DD) optical transmission system, the PDM signals can be effectively separated. The DSP algorithm can rapidly converge with the receiver sensitivity of  $-2.3$  dBm at bit error rate of  $10^{-4}$ .

**Key words** optical communication; intensity-modulation direct-detection system; polarization demultiplexing; digital signal processing

**OCIS codes** 060.1660; 060.4510; 060.2300; 070.2025

## 1 引 言

在光纤传输领域,随着技术的发展及对通信容量需求的快速增长,对提高信道利用率做了很多研究<sup>[1-4]</sup>。偏振复用作为常用的光纤复用技术,广泛地应用于光纤通信系统中<sup>[5-7]</sup>。

近年来,在接收端使用相干探测结合数字信号处理技术(DSP)实现偏振解复用的方法,因其高灵敏度、强稳定性和可靠性受到人们的广泛关注<sup>[8-9]</sup>。各类DSP算法及改进算法也被相继提出,如最小均方算法(LMS)<sup>[10]</sup>、恒模算法(CMA)<sup>[11]</sup>、基于CMA

的自适应算法<sup>[12]</sup>、独立成分分析法(ICA)<sup>[13]</sup>、Stokes向量分析法<sup>[14]</sup>,以及各种组合算法,如CMA-LMS<sup>[15]</sup>等。但是,对于短距离光纤通信,由于相干探测结构复杂、成本较高且计算量大,人们的视线重新回到了成本低廉且复杂度低的直接探测(DD)系统<sup>[16]</sup>。而在2009年,文献<sup>[17]</sup>就提出了基于光域直接检测的解复用技术,但该方法是在接收端采用偏振分束器分离两路信号,重点是分析光纤链路中偏振模色散(PMD)和偏振相关损耗(PDL)分别对信号产生的影响。而文献<sup>[18]</sup>则首次提出了

收稿日期: 2014-07-23; 收到修改稿日期: 2014-08-25

基金项目: 国家杰出青年基金项目(61325023)、国家自然科学基金重点项目(61335005)

作者简介: 周馨雨(1990—),女,硕士研究生,主要从事多维光通信与数字信号处理方面的研究。

E-mail: 348106443@qq.com

导师简介: 闫连山(1971—),男,教授,博士生导师,主要从事光子学与通信、光纤传感与检测等方面的研究。

E-mail: lsyan@home.swjtu.edu.cn

在强度调制/直接探测(IM/DD)系统中,利用 DSP 对信号进行解复用。

本文基于 IM-DD 系统提出了一种改进的偏振解复用方案。与现有方案见文献[18]的最大不同在于,本方案在接收端利用一种改进的光分路器将光信号仅仅分为两路并直接探测后转化为电信号,然后再进行 DSP 处理,极大地简化了偏振解复用结构和算法复杂度,降低了系统成本。同时在数字算法中利用输入信号的简化 Stokes 向量特征,追踪其偏振态(SOP)的变化,实现了偏振解复用。

## 2 工作原理

在偏振复用系统中,假设偏振态正交的两路信号高逻辑电平为“1”,低逻辑电平为“0”。根据信号总逻辑强度的差异将信号分为三类,如表 1 所示。在此基础上引入简化 Stokes 向量  $\mathbf{S}' = (S_0, S_1)^T$ ,根据  $\mathbf{S}'$  的不同再将 II 类信号分为(a)、(b)两小类,则三类向量在  $S_0 S_1$  平面的关系如图 1 所示。

从图中可看出,I 类的  $S_0$  和  $S_1$  都为 0;II(a)、II(b)类信号的  $\mathbf{S}'$  向量大小相同且相互垂直。III 类信号  $S_0$  参量为 2,  $S_1$  参量为 0。本文算法将根据三

表 1 三类信号的  $S_0$  和  $S_1$  参量值

Table 1 Values of  $S_0$  and  $S_1$  for three types of signal

	I	II(a)	II(b)	III
$S_0$	0	1	1	2
$S_1$	0	1	-1	0
Total logical intensity	0	1	1	2

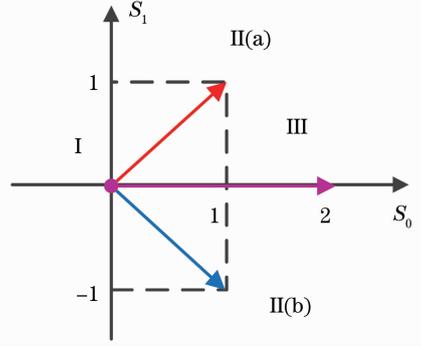


图 1  $S_0 S_1$  平面上 I、II、III 类信号的关系  
Fig. 1 Relationship among signals I, II and III in  $S_0 S_1$  plane

类信号的相互关系分离两路信号。

图 2 描述了接收端配置及工作原理。其中改进型分路器的输出为  $I_1$  和  $I_2$ 。

信号通过光分路器接收并转变为电信号之后,进行 DSP 处理。DSP 流程图如图 3 所示。

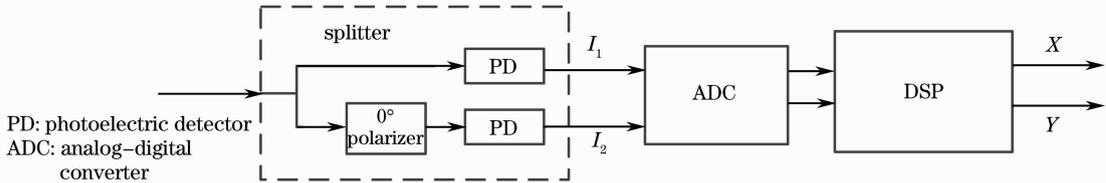


图 2 接收端工作原理框图  
Fig. 2 Operation principle of receiver

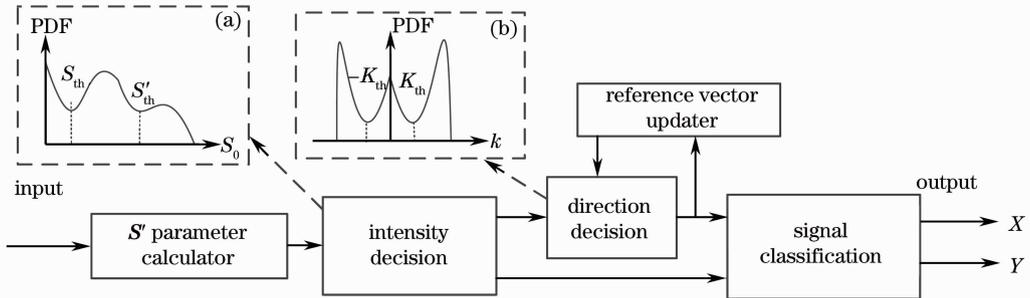


图 3 DSP 算法流程图。(a)  $S_0$  概率密度分布趋势;(b)  $k(n)$  概率密度分布趋势

Fig. 3 Flow schematic of DSP algorithm. (a) Probability density tendency of  $S_0$ ; (b) probability density tendency of  $k(n)$

首先在  $\mathbf{S}'$  参量计算模块中,计算出  $\mathbf{S}'$  参量值:

$$S_0 = I_1, \quad (1)$$

$$S_1 = 2I_2 - I_1. \quad (2)$$

其次在强度判决模块,根据  $S_0$  参量的概率密度分布(PDF),算法引入两个阈值  $S_{th}$ 、 $S'_{th}$  分离三类信

号,如图 3(a)所示。

在方向判决模块,根据 II、III 类信号在  $S_0 S_1$  平面的关系,引入新的参量  $k(n)$ 。假设参考向量  $\mathbf{v}(n)$  是与 II(a)类信号的 Stokes 向量方向相同的单位向量,则  $k(n)$  的表示如下:

$$k(n) = \left[ \frac{S'(n)}{S_0(n)} \right] \cdot v(n) - \lambda, \quad (3)$$

同时通过引入新的参量  $\epsilon$  和  $\Delta$  更新  $v(n)$  的值,从而模拟两路信号在光纤传输中相互影响所产生的变化。

$$v(n+1) = \frac{v(n) + \epsilon \cdot \Delta(n)}{\|v(n) + \epsilon \cdot \Delta(n)\|}, \quad (4)$$

式中  $\epsilon$  为步长,  $\Delta$  为误差向量。

由于  $S'_{th}$  会随着接收端信号强度的减弱而逐渐消失,因此算法将分为两种情况对信号进行分类。当  $S'_{th}$  存在时,通过判断  $k(n)$  的正负,来分离 II(a) 和 II(b) 类信号。

$k(n) > 0$  时,信号为 II(a) 类,即第一路信号为高电平,第二路信号为低电平。同时更新参考量  $v$ :

$$\Delta(n) = \frac{S'(n)}{S_0(n)} - v(n). \quad (5)$$

$k(n) < 0$  时,信号为 II(b) 类,即第一路信号为高电平,第二路信号为低电平。同时更新参考量  $v$ :

$$\Delta(n) = -\frac{S'(n)}{S_0(n)} - v(n). \quad (6)$$

当  $S'_{th}$  不存在时,引入新的阈值  $K_{th}$ ,通过判断  $k(n)$  与  $K_{th}$  的关系来分离 II(a)、II(b)、III 类信号,如图 3(b) 所示。即当  $k(n) > K_{th}$  时,信号属于第

II(a) 类;  $k(n) < -K_{th}$  时,信号属于第 II(b) 类;  $-K_{th} < k(n) < K_{th}$  时,信号属于第 III 类。参考量更新方法不变。如图 3(b) 所示。当信号属于 I 类或 III 类时,参考量  $v(n)$  不需要进行更新。

### 3 仿真装置及仿真结果

为了验证本文算法的可行性,在 OptisyStem 仿真软件中搭建了  $2 \times 40$  Gb/s 的偏振复用-强度调制/直接探测 (PMD-IM/DD) 系统,系统框图如图 4 所示。首先,在发送端 (TX) 产生伪随机序列 (PRBS) 不归零码 (NRZ) 信号,分为两路分别通过马赫-曾德尔调制器 (MZM) 调制到波长为 1550 nm,功率为 3 dBm 的连续 (CW) 光上,其中一路光信号再通过  $90^\circ$  的偏振片,然后通过偏振耦合器 (PBC) 将两个偏振态正交的光信号耦合到光纤中,得到 80 Gb/s 的偏振复用-开关键控 (PDM-OOK) 信号。该信号经过单模光纤 (SMF) 和掺铒光纤放大器 (EDFA) 传输后输入接收端 (RX),进入分路器转变为两路电信号,通过模数转换器 (ADC) 进行采样,最后送入 DSP 模块中进行偏振解复用。

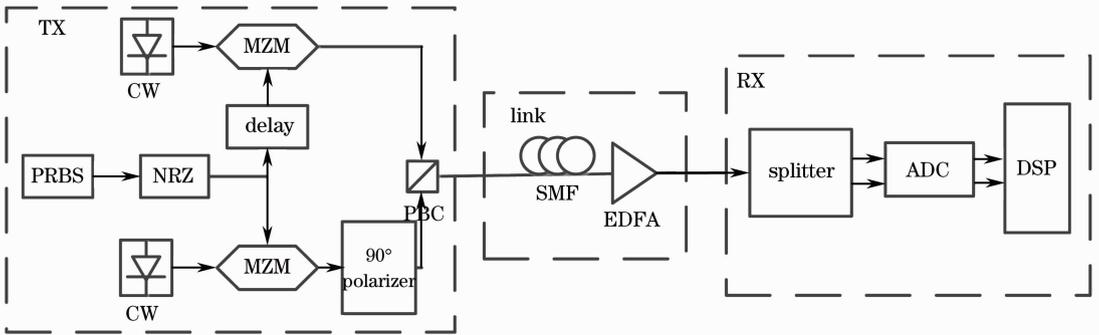


图 4 双偏振-强度调制/直接探测系统仿真模型图

Fig. 4 Simulation model of DP-IM/DD system

在仿真中,考虑光纤的 PMD 参数为  $0.1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ ,传输距离为 20 km。

算法中需根据接收到信号的总强度,即  $S_0$  分离 I, II, III 类信号。图 5 给出了在不同接收功率 ( $P_R$ ) 下的归一化  $S_0(n)$  的概率密度曲线。从图中可看出, I 类信号与 II, III 类信号有着明显的隔离带 ( $S_{th}$ ), 如图 5(a) 中实线处所示。而 II, III 类信号的隔离带 ( $S'_{th}$ ) 随着接收端强度的减小逐渐消失,如图 5(a) 中虚线处所示。

从图 5(b) 可看出,  $k(n)$  的值分布于零点及左

右两侧,且隔离带明显,因此当  $S'_{th}$  不可判定时可通过判断  $k(n)$  与  $K_{th}$  的关系,来分离 II(a)、II(b)、III 类信号。同时,为了更好地模拟信号 SOP 在传输过程中的变化以达到自适应的效果,取参考向量  $v(n)$  为 21 个连续信号的平均值。

系统误码率 (BER) 如图 6 所示。在功率达到  $-2.3 \text{ dBm}$  以上时,误码率达到  $10^{-4}$  及更低, X 和 Y 两路 SOP 信号误码率也逐级下降,直至  $10^{-5}$ 。同时 X、Y 两路性能基本一致,验证了本算法的可行性。

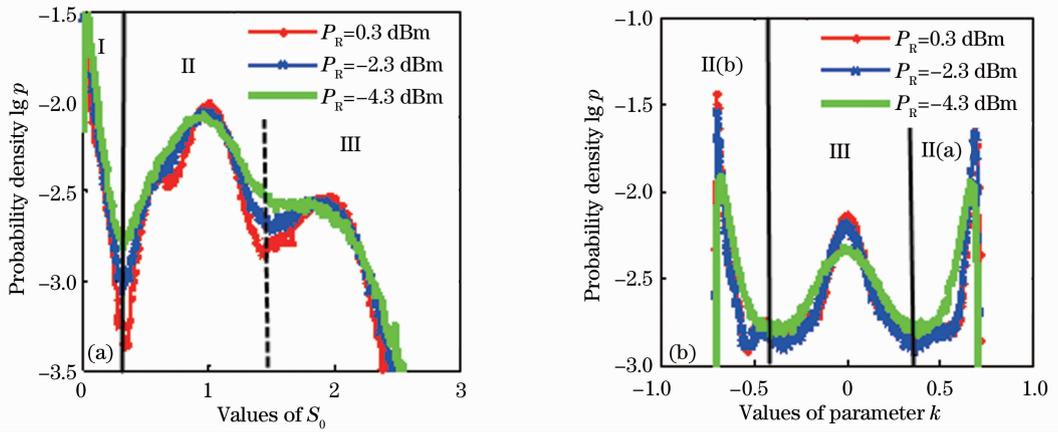


图 5 不同接收功率下的参数值对比。(a)  $S_0$  值概率密度曲线；(b)  $k$  值的概率密度曲线

Fig. 5 Contrast values of parameters with different receive powers. (a) Probability density of  $S_0$ ; (b) probability of  $k$

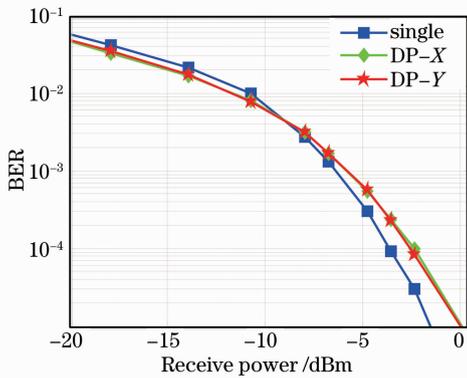


图 6 IM/DD 解双偏振(DP)的误码率曲线

Fig. 6 BER curves using the proposed algorithm

## 4 结 论

提出了自适应 IM/DD 偏振解复用方案,可以在 DSP 算法中利用简化的 Stokes 向量模拟信号在光纤传输中 SOP 的变化,快速将偏振态正交的两路信号分开。仿真结果表明,当接收端功率达到  $-2.3$  dBm 时,误码率可达到  $10^{-4}$  或更低。该方案采用的 DSP 算法收敛迅速,且结构简单,成本低廉,对于偏振复用的短距离光纤通信系统十分适用。

## 参 考 文 献

- 1 J L Wei, J D Ingham, D G Cunningham, *et al.*. Performance and power dissipation comparisons between 28 Gb/s NRZ, PAM, CAP and optical OFDM systems for data communication applications [J]. *J Lightwave Technol*, 2012, 30(12): 3273–3280.
- 2 R Rodes Lopez, M Wieckowski, T T Pham, *et al.*. Carrierless amplitude phase modulation of VCSEL with 4 bit/s/Hz spectral efficiency for use in WDM-PON [J]. *Opt Express*, 2011, 19(27): 26551–26556.
- 3 M I Olmedo, Z Tianjian, J B Jensen, *et al.*. Towards 400GBASE 4-lane solution using direct detection of multiCAP signal in 14 GHz bandwidth per lane [C]. *OFC*, 2013; PDP5C. 10.
- 4 Wang Chao, Zhu Yijun, Yang Yuhong. Interleave-division

- multiple-access for high-speed visible light communication in parallel [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0406003.
- 王超,朱义君,杨育红.可见光并行高速通信交织分多址技术研究[J].*光学学报*, 2014, 34(4): 0406003.
- 5 Hao Yaohong, Wang Rong, Li Yuquan, *et al.*. Investigation of polarization effect in coherent optical orthogonal frequency division multiplexing system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0706021.
- 郝耀鸿,王荣,李玉权,等.相干光正交频分复用系统偏振效应研究[J].*光学学报*, 2013, 33(7): 0706021.
- 6 Li Chunlei, Zhang Xiaoguang, Xi Lixia, *et al.*. Experimental validation of effective nonlinearity compensation by FIR-BP algorithm in polarization multiplexing system [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(12): 1205001.
- 李春蕾,张晓光,席丽霞,等.偏振复用系统中 FIR-BP 算法有效补偿非线性损伤的实验研究[J].*中国激光*, 2013, 40(12): 1205001.
- 7 M S Erkilinc, S Kilmurray, S Pachnicke, *et al.*. Nyquist-shaped dispersion-precompensated subcarrier modulation with direct detection [C]. *OFC*, 2014; Th3K. 4.
- 8 J Renaudier, G Charlet, M Salsi, *et al.*. Linear fiber impairments mitigation of 40-Gbit/s polarization-multiplexed QPSK by digital processing in a coherent receiver [J]. *J Lightwave Technol*, 2008, 26(1): 36–42.
- 9 L E Nelson, S L Woodward, S Foo, *et al.*. Performance of a 46-Gb/s dual-polarization QPSK transceiver with real-time coherent equalization over high PMD fiber [J]. *J Lightwave Technol*, 2009, 27(3): 158–167.
- 10 C Laperle, B Villeneuve, Z Zhang, *et al.*. WDM performance and PMD tolerance of a coherent 10-Gbit/s dual-polarization QPSK transceiver [J]. *J Lightwave Technol*, 2008, 26(1): 168–175.
- 11 N Kaneda, A Leven. Coherent polarization-division-multiplexed QPSK receiver with fractionally spaced CMA for PMD compensation [J]. *Photon Technol Lett*, 2009, 21(4): 203–205.
- 12 Di Xuejing, Tong Cheng, Zhang Xia, *et al.*. Adaptive step-size constant-modulus algorithm for high-speed optical coherent communication system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1006004.
- 邸雪静,童程,张霞,等.高速相干光通信系统中的自适应步长恒模算法[J].*光学学报*, 2012, 32(10): 1006004.
- 13 H Zhang, Z Tao, L Liu, *et al.*. Polarization demultiplexing based on independent component analysis in optical coherent receivers [C]. *ECOC* 2008; Mo. 3. D. 5.
- 14 Z F, Wu, D Schmidt, B Lankl. Modulation-format-transparent

- polarization tracking using a neural network [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2013, 25(7): 671–674.
- 15 X Zhou, L E Nelson, P Magill, *et al.*. High spectral efficiency 400 Gb/s transmission using PDM time-domain hybrid 32-64 QAM and training-assisted carrier recovery [J]. J Lightwave Technol, 2013, 31(7): 999–1005.
- 16 Liu Binhui, Chen Lin, Xiao Jiangnan. Least mean square adaptive algorithm for direct-detection optical orthogonal frequency division multiplexing transmission system [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(9): 0905005.
- 刘彬晖, 陈 林, 肖江南. 直接检测的光正交频分复用传输系统最小均方自适应算法[J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0905005.
- 17 Z Wang, C Xie, X Ren. PMD and PDL impairments in polarization division multiplexing signals with direct detection [J]. Opt Express, 2009, 17(10): 7993–8004.
- 18 K Kikuchi. Electronic polarization-division demultiplexing based on digital signal processing in intensity-modulation direct-detection optical communication systems [J]. Opt Express, 2014, 22(2): 1971–1980.

栏目编辑：王晓球