

# 高速短距离光互联系统中基于概率整形的 SOA 非线性损伤抑制<sup>①</sup>

付妍 忻海云 胡卫生

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

**摘要** 在高速短距离光互联系统中, 半导体光放大器(SOA)因其成本低、易集成等优点被用来增强信号光功率。然而, SOA 较小的饱和光功率使其很容易进入饱和区, 从而导致频谱展宽以及波形失真等问题。具体来讲, 高电平的波形失真比低电平的波形失真更加严重。针对以上现象, 本文首次提出基于概率整形的方案抑制这种损伤, 并以四进制脉幅调制(PAM4)为例进行了验证。基于概率整形的 PAM4 调制(PS-PAM4)即给损伤较重的高电平分配较小的发送概率, 给损伤较轻的低电平分配较高的发送概率。通过给 PAM4 的四个电平分配不同的概率, 以牺牲频谱效率为代价可以有效降低系统误符号率。随后, 我们通过 Optisystem 和 Matlab 联合仿真搭建了基于强度调制直接检测(IM-DD)方案的 20 km 传输系统来验证以上方案, 仿真结果表明该方案可有效提高信号质量。

**关键词** 概率整形; PAM4; 半导体光放大器

**中图分类号** O437

**文献标识码** A

## 0 引言

当前, 云计算、虚拟现实、高清视频等各种高速新兴业务不断涌现, 短距离光互联系统也亟待扩容和升级来满足用户不断提升的带宽需求。为了延长传输距离和提升信号质量, 短距离光互联系统中不可避免地要使用光放大设备来增强光信号功率。目前, 光放大器技术主要有三类: 掺稀土类光放大器(如掺铒光纤放大器(EDFA)、掺镨光纤放大器等)、非线性效应光放大器(拉曼放大器、布里渊放大器等)和 SOA。相比其他两种放大器, SOA 由于其成本低廉且易于集成, 有着更好的发展前景, 引起了研究人员广泛的讨论和研究<sup>[1-3]</sup>。然而, SOA 较小的饱和光功率限制了它的广泛使用。当注入光功率大于饱和光功率时, SOA 会受到饱和区的模式效应影响, 从而在放大信号的同时引入波形失真。波形失真的主要表现有两点: (1) 各个电平不同的放大增益导致了“大小眼”现象, 即 PAM4 眼图中的三只眼的眼高从上到下依次增大; (2) 相比低电平, 高电平会遭受更多的前沿过冲从而导致眼皮变厚<sup>[4, 5]</sup>。众多研究人员针对以上问题提出了不同的解决方案。香港理工大学的 Khurram Karim Qureshi 提出在普通 SOA 的增益谱边缘引入一个钳制振荡模式, 从而使 SOA 的原有非线性增益锁定在一个固定值<sup>[6]</sup>。塞萨斯德漠克里特大学的 Z. V. Rizou 分析了四种不同的光学陷波滤波器在消除 SOA 模式效应时的性能<sup>[7]</sup>。然而, 以上研究全都基于二进制非归零码(NRZ)这一调制格式展开, 而短距互联的带宽需求迫使主流的 NRZ 技术向高阶的调制码型升级。现阶段几种主流的调制格式有: PAM4、离散多音调制(DMT)和无载波幅相调制(CAP)。相比 DMT 和 CAP, PAM4 的调制解调和数字信号处理(DSP)算法相对简单, 对光电器件的线性度要求也比较低, 因此在成本敏感的短距互联系统中有着极大的应用前景<sup>[8-13]</sup>。

① 收稿日期: 2018-03-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(61431009, 61521062, 61575123)资助

通讯作者: 胡卫生, 男, 汉族, 博士, 教授, 研究方向: 光纤通信, E-mail: wshu@sjtu.edu.cn.

本文针对 SOA 的非线性效应的抑制工作基于 PAM4 调制格式展开. 从不同电平遭受不同程度波形失真这一现象入手, 我们首次提出了用概率整形技术来降低模式效应带来的性能恶化. 通过给低电平信号分配较大的发送概率, 给高电平分配较小的发送概率, 从而降低 PAM4 信号的总误符号率, 进而可使得系统在相同误码要求下获得更高的灵敏度.

## 1 半导体光放大器饱和效应

图 1(a)描述了 SOA 增益随入 SOA 光功率变化的曲线. 当入 SOA 功率小于  $-20$  dBm 时, SOA 增益几乎保持不变, 增益约为  $16.2$  dB. 当入 SOA 功率大于  $-20$  dBm 时, 随着入 SOA 光功率的逐渐增加, SOA 的增益逐渐减小, 其中当入 SOA 光功率为  $-8$  dBm 时, SOA 增益处于  $3$  dB 饱和功率点, 即 SOA 增益为  $13.2$  dB. 图 1(c)、(d)和(e)分别展示了当入 SOA 光功率处于三个区间段时对应的眼图. 具体来讲, 当入 SOA 光功率远远小于饱和光功率时, 过大的噪声功率会导致 PAM4 信号 4 个电平都很厚; 当入 SOA 功率略小于饱和光功率时, PAM4 眼图中三只眼睛清晰可见, 均匀分布; 当入 SOA 功率大于  $3$  dB 饱和功率点进入饱和区时, 我们可以观察到 PAM4 高电平的前沿增益远大于后沿增益, 高电平眼皮比低电平眼皮厚.

根据参考文献[14], 脉冲前后沿增益差可表示为

$$G_1 - G_2 = G_0 - \frac{G_0}{G_0 - (G_0 - 1)\exp(-E_{in}/E_{sat})}, \quad (1)$$

式中  $E_{in}$  表示输入脉冲能量,  $E_{sat}$  表示 SOA 严重饱和时的脉冲能量,  $G_1$ 、 $G_2$  分别代表 PAM4 脉冲的前沿和后沿增益. 我们将  $G_1 - G_2$  随  $E_{in}/E_{sat}$  的变化趋势作图, 如图 1(b) 所示. 通过曲线中的变化趋势可以看出,  $E_{in}$  的增大会导致 PAM4 前后沿的差距的增大, 从而造成严重的电平间粘连, 与图 1(e) 中的现象相吻合.

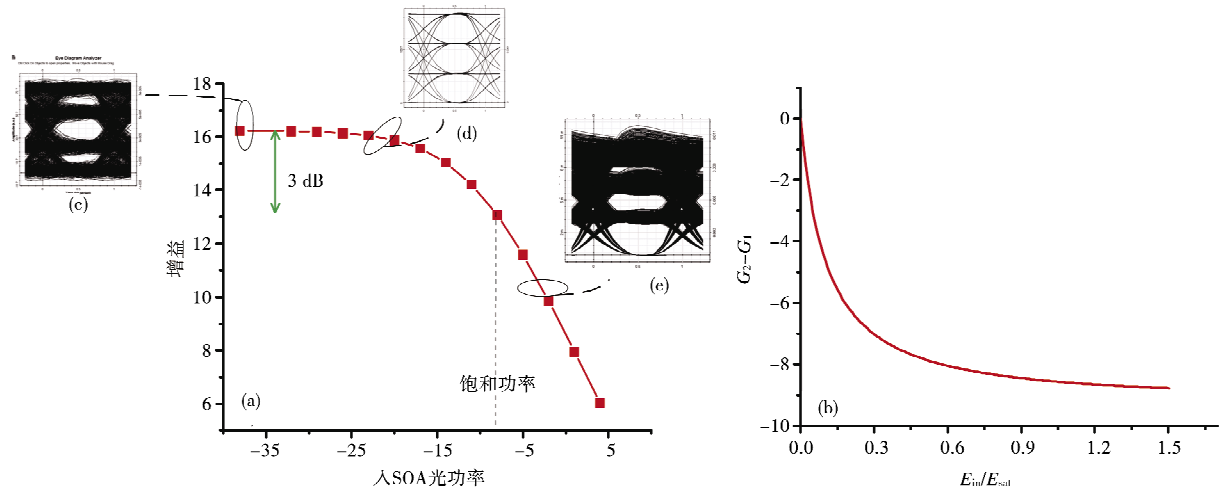


图 1 (a) SOA 增益饱和曲线, (b) PAM4 前沿后沿增益差曲线, (c)(d)(e) SOA 工作在三个区域时的眼图

## 2 概率整形 PAM4

研究表明, 概率整形技术可以提高信道容量, 对于高斯信道来说, 最优的输入信号概率分布服从公式 (2) 中的麦克斯韦-玻尔兹曼 (Maxwell-Boltzmann) 分布<sup>[15-17]</sup>

$$P[x = x_i] = \frac{\exp(-\lambda |x_i|^2)}{\sum_{j=1}^M \exp(-\lambda |x_j|^2)}, \quad (2)$$

式中  $\lambda$  可根据信道具体情况优化,  $\{x_1, x_2, \dots, x_M\}$  是星座符号的集合. 然而, 考虑到以下三点因素: 1) IM-DD 系统中 PAM4 的星座不服从以 0 为中心的对称分布; 2) 概率整形的核心思想是给小幅度分配大几率; 3) SOA 工作在饱和区时会给 PAM4 的较高电

表 1 NRZ、PAM4 和 PS-PAM4 四个电平的发送概率对比

|              | P(Amp0) | P(Amp1) | P(Amp2) | P(Amp3) |
|--------------|---------|---------|---------|---------|
| NRZ          | 1/2     |         |         | 1/2     |
| PAM4         | 1/4     | 1/4     | 1/4     | 1/4     |
| PS-PAM4 组合 1 | 1/2     | 1/4     | 1/8     | 1/8     |
| PS-PAM4 组合 2 | 3/8     | 3/8     | 1/8     | 1/8     |
| PS-PAM4 组合 3 | 3/8     | 1/4     | 1/4     | 1/8     |

平带来更多损伤,我们给出了表 1 所示的三种概率组合,PS-PAM4 组合 1,PS-PAM4 组合 2 和 PS-PAM4 组合 3. 其中, Amp0、Amp1、Amp2 和 Amp3 依次对应 PAM4 的从低至高的四个电平,仿真过程中各电平对应取值为 0,1,2,3. 这里引入 NRZ 调制格式作为参考. 表 1 中的 5 种调制格式的信道容量将在下一节中给出.

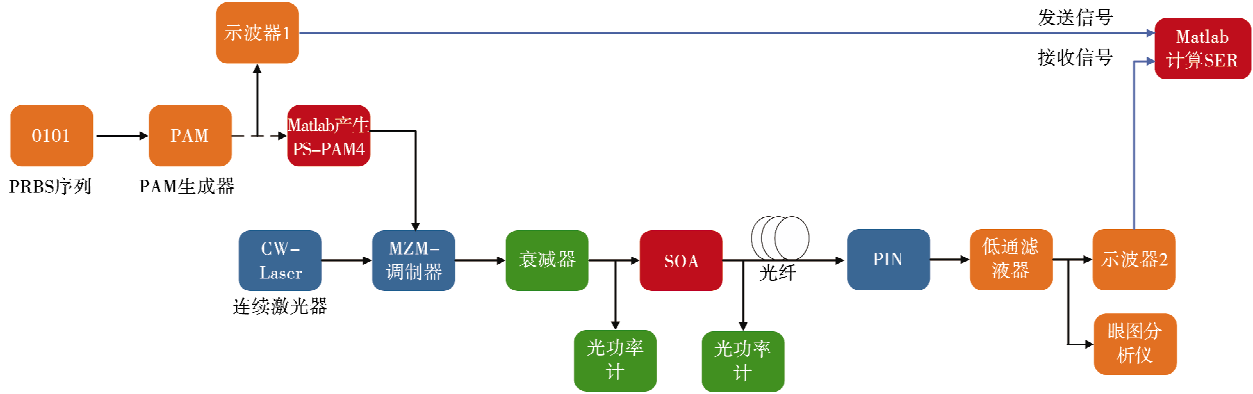


图 2 仿真框图

### 3 仿真框架

为了分析 PS-PAM4 方案对抑制 SOA 饱和区波形失真的效果,我们联合 Optisystem 和 Matlab 软件来搭建图 2 中系统框图. 伪随机二进制序列 (PRBS) 生成的“0101”序列进入一个 PAM 生成器后转换为 PAM4 信号. 然后 PAM4 信号经过 PS-PAM4 转换器转换为四个电平不等概率出现的 PAM4 信号,即 PS-PAM4 信号. 以上电信号经过马赫-曾德尔调制器 (MZM) 调制器后转换为光信号,随后 SOA 被用来对 MZM 发射光信号进行预放大. 衰减器被放置在 SOA 之前来分析不同入 SOA 功率时 PS-PAM4 相比 PAM4 的优势. 经过 20 km 标准单模光纤之后,光信号经过光电探测器 (PIN) 转换为电信号. 经低通滤波器滤波后,电信号分别进入眼图分析仪分析眼图和示波器. 其中,PS-PAM4 转换器程序在 Matlab 中生成封装后作为一个组件出现在 Optisystem 中. 此外,通过在 Matlab 中比较从示波器 1 中采集到的 PAM4 发送信号和从示波器 2 中采集到的 PAM4 接收信号,可以计算出该系统的误符号率.

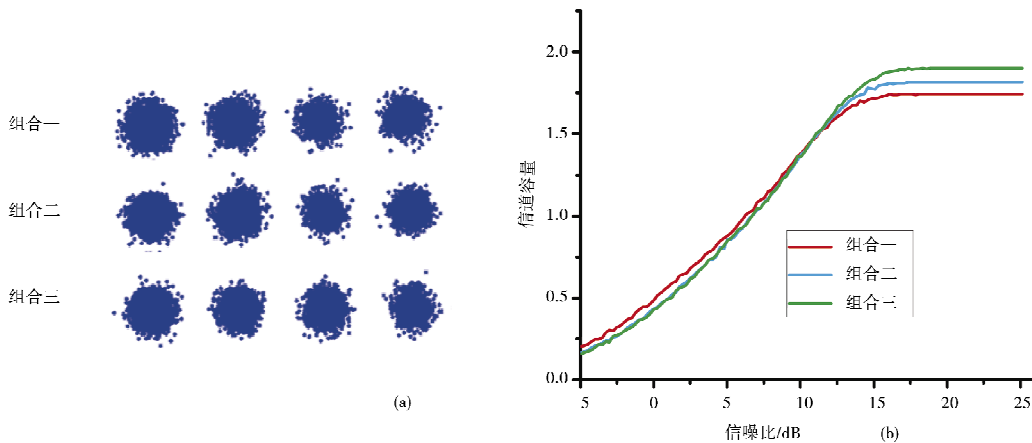


图 3 (a) 三种 PS-PAM4 概率组合的星座图,(b) 和它们的信道容量

### 4 仿真结果

#### 4.1 不同概率分配组合的对比

已知这三种组合的频谱效率计算公式

$$H(x) = - \sum_i p_i \log P_i, \tag{3}$$

其中  $p_i$  表示集合内每个符号的概率. 图 3(a)、(b) 分别展示了没有 SOA 时,表 1 中的 PS-PAM4 组合一、二和三的星座图和信道容量. 从图 3(b)中可以看出,组合一、二、三的最大信道容量依次增加,最大信道容

量分别为 1.75、1.81 和 1.90 bits/s。此外,相比组合二,组合三在低信噪比时信道容量与组合二几乎相等且高信噪比时高于组合二的信道容量。但是考虑到当把 SOA 加入系统中,且其工作在非线性区时,PAM4 的较高两个电平粘连在一起对较高两个电平的判决都有影响,我们决定放弃组合三,选择组合二。接下来的仿真中也将选用组合二分析,即从低到高的四个电平服从  $3/8, 3/8, 1/8, 1/8$  的概率分布。

#### 4.2 NRZ、PAM4 和 PS-PAM4 的信道容量对比

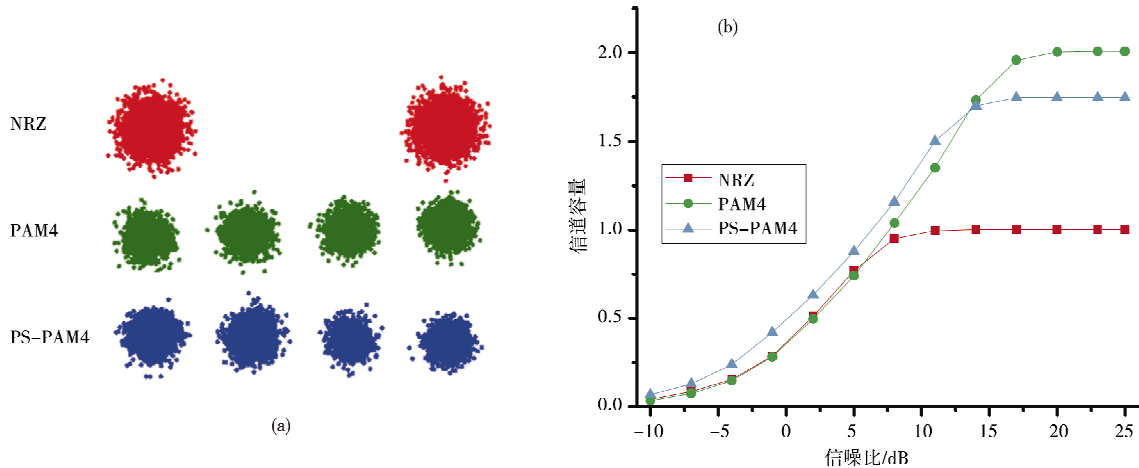


图 4 (a) NRZ、PAM4 和 PS-PAM4 的星座图,(b) 和它们的信道容量

图 4(a)展示了 NRZ、PAM4 和 PS-PAM4 三种调制格式的星座图。结合公式(3),我们可知 NRZ、PAM4、PS-PAM4 的频谱效率分别 1、2 和 1.811 3 bits/s。如图 4(b)所示,我们仿真对比了 NRZ、PAM4 和 PS-PAM4 三种调制格式的信道容量,从图中可以看出当信噪比小于 13 dB 时,PS-PAM4 比 PAM4 更接近香农极限。所付出的代价为牺牲了 9.435% 的频谱效率。

#### 4.3 BtB 和 20 km 传输后 PAM4 和 PS-PAM4 的对比

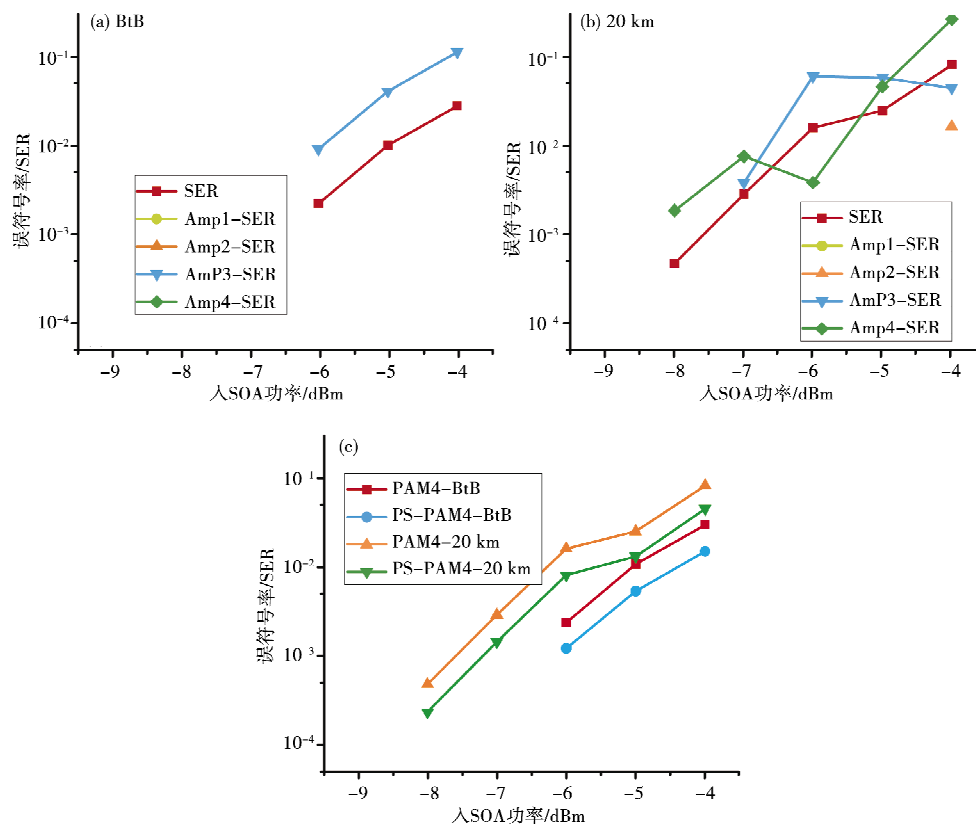


图 5 PAM4 在不同入 SOA 功率下经过(a)BtB 和(b)20 km 传输后的误符号率  
(c) PAM4 和 PS-PAM4 在经过 BtB 和 20 km 传输后的误符号率对比

图5(a)和(b)分别展示了不同入SOA功率时,PAM4经过背靠背(BtB)和20 km传输后的总误符号率以及各个电平的误符号率(因为涉及到对各个电平的分析,此处皆采用误符号率)。从该图可以看出,BtB传输时,当入SOA功率小于-7 dBm时可以实现零误码传输。当入SOA功率大于-7 dBm时,随着入SOA功率的增大,饱和区的模式效应明显增强。第三个电平Amp3的错误率的不断增加也直接导致了整体错误率的增加。经过20 km传输后,增加入SOA光功率同样会导致误符号率的增大。从图5(b)中可以看出入SOA功率增加带来的误符号率的增加主要归因于较高的两个电平Amp3和Amp4。

图5(c)展示了PAM4和PS-PAM4两种调制格式在BtB和20 km传输后误符号率的对比。从该图可以看出,PS-PAM4可以有效减小因为SOA非线性导致的PAM4过高的误符号率。PS-PAM4相比PAM4在BtB传输时,误符号率可降低到原来的1/2,这是因为当SOA工作在非线性区时,PAM4的错误只发生在Amp3电平,我们在PS-PAM4调制格式中将Amp3电平的发送概率降为原来的1/2。当入SOA光功率小于-5 dBm时,PS-PAM4相比PAM4在20 km传输时的误符号率也可降低到原来的1/2,这是因为此时的误符号率主要是由Amp3和Amp4导致。当入SOA光功率大于-4 dBm时,误符号率的降低将略小于原来的1/2,因为Amp2电平上也出现了错误。

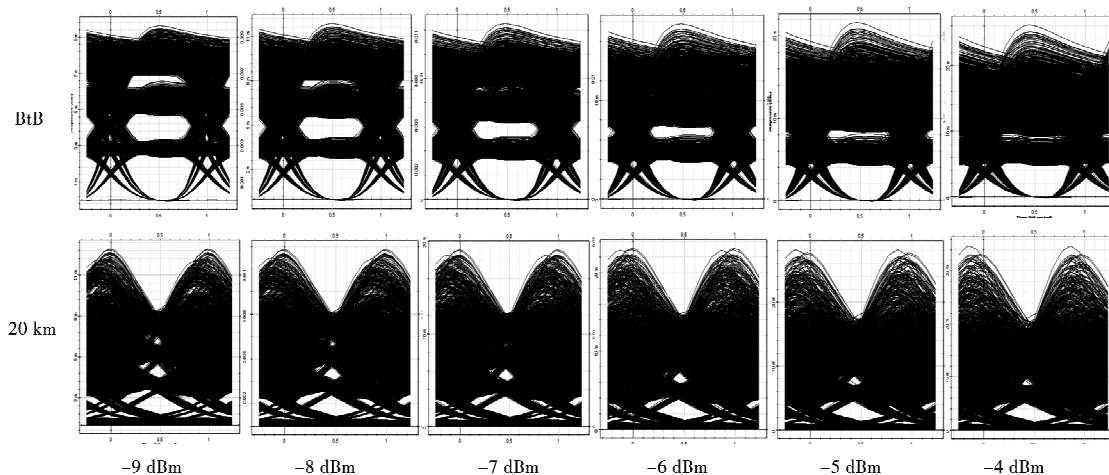


图6 PAM4在不同入SOA功率时,BtB和20 km传输后的眼图

图6展示了在不同入SOA功率时,PAM4经过BtB和20 km传输后的眼图,BtB传输时,当入SOA功率在-9 dBm时,眼图受到模式效应影响呈现出:从上到下眼高依次变大和较高电平眼皮较厚的现象。随着入SOA功率从-9 dBm增大到-4 dBm,最上面的眼睛几乎完全闭合,而且可以看到明显的高电平前沿过冲现象。以上现象在20 km传输时依然存在,此外,因为20 km光纤传输中的色散作用,光信号中的不同频率成份以不同的速度传播进而引起脉冲展宽,前后脉冲相互重叠,对判决造成难度。

## 5 结论

SOA因为其低价、易集成等优点成为未来高速传输系统中必不可少的器件之一,然而其饱和光功率较小带来的非线性效应阻碍了其广泛应用。本文针对SOA非线性效应导致的高低电平损伤不一致的情况,利用PS-PAM4调制格式(四个电平不等概率传输的PAM4调制格式)来有效对抗SOA饱和区带来的非线性效应。仿真结果表明,PS-PAM4牺牲了较小的频谱效率换取了误符号率的减小。

## 参 考 文 献

- [1] 曹秀丽,温新竹.论大数据时代智慧城市建设的应用研究[J].聊城大学学报(自然科学版),2015,28(2):103-110.
- [2] Bonk Rene. SOA for future PONs [C]. // Proc OFC, Tu2B, 2018.
- [3] Miguez Phil. What applications are driving higher capacity in access [C]. // Proc OFC, M2B, 2018.
- [4] Duill Sean PO, Landais Pascal, Barry Liam P. Estimation of the performance improvement of pre-amplified PAM4 systems when using multi-section semiconductor optical amplifiers [J]. Appl Sci, 2017, 7(9): 908.
- [5] Zhang Junwen, Wey Junshan, Shi Jianyang, et al. Experimental demonstration of unequally spaced PAM-4 signal to improve receiver sensitivity to 50-gbps PON with power-dependent noise distribution [C]. // Proc OFC, M2B, 2018.

- [6] Qureshi Khurram Karim, Tam H Y. Multiwavelength fiber ring laser using a gain clamped semiconductor optical amplifier [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(6): 1646-1648.
- [7] Rizou Z V, Zorios K E, Hatziefremidis A. Semiconductor optical amplifier pattern effect suppression using optical notch filtering [J]. *J Eng Sci Tech Rev*, 2016, 9(4): 198-201.
- [8] Zhang Kuo, Zhuge Qunbi, Xin Haiyun, et al. Demonstration of 50 Gb/s/λ Symmetric PAM4 TDM-PON with 10 G-class optics and DSP-free ONUs in the O-band [C]. // *Proc OFC, M1B*, 2018.
- [9] Zhang Kuo, Zhuge Qunbi, Xin Haiyun, et al. Investigation on the dispersion tolerance in dual-drive MZM-based DAC-less optical PAM4 transmission [C]. // *Proc OFC, Tu2C*, 2018.
- [10] Zhang Kuo, Zhuge Qunbi, Xin Haiyun, et al. Intensity directed equalizer for the mitigation of DML chirp induced distortion in dispersion-unmanaged C-band PAM transmission [J]. *Opt Express*, 2017, 25(23): 28123-28135.
- [11] Zhong Kangping, Zhou Xian, Gui Tao, et al. Experimental study of PAM-4, CAP-16, and DMT for 100 Gb/s short reach optical transmission systems [J]. *Opt Express*, 2015, 23(2): 1176-1189.
- [12] Miao Xin, Bi Meihua, Fu Yan, et al. Experimental study of NRZ, duobinary, and PAM-4 in O-band DML-based 100 G-EPON [J]. *IEEE Photon Technol Let*, 2017, 29(17): 1490-1493.
- [13] Li Longsheng, Bi Meihua, Fu Yan, et al. Power budget enhancement in NG-EPON system employing novel twisted-PAM4 [J]. *Opt Commun*, 2018, 410: 627-631.
- [14] Agrawal Govind P, Olsson N Anders. Self-Phase Modulation and Spectral Broadening of Optical Pulses in Semiconductor Laser Amplifiers [J]. *IEEE J quantum Electron*, 1989, 25(11): 2297-2306.
- [15] Fehenberger Tobias, Alvarado Alex, Bocherer Georg, et al. On probabilistic shaping of quadrature amplitude modulation for the nonlinear fiber channel [J]. *J Lightwave Technol*, 2016, 34(21): 5063-5073.
- [16] Fehenberger Tobias, Bocherer Georg, Alvarado Alex, et al. LDPC coded modulation with probabilistic shaping for optical fiber systems [C]. // *Proc OFC, Th2A*, 2015.
- [17] Fehenberger Tobias, Alvarado Alex, Bayvel Polina, et al. On achievable rates for long-haul fiber optic communications [J]. *Opt Express*, 2015, 23(7): 9183-9191.

## Probabilistic Shaping-PAM4 for the Nonlinear Effect Suppression in HighBit Rate Short Reach Optical Transmission System

FU Yan XIN Hai-yun HU Wei-sheng

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract** SOA is a promising component in future short reach transmission system due to its low cost and easy integration, which can be extensively used for booster and pre-amplifier. However, an additional drawback of SOA is that the saturation power can be low, and SOA amplified signals suffer from a considerable spectral broadening when the input power exceeds gain saturation limit. Specifically, this nonlinear effect induced pulse distortion is larger for the higher amplitude than for the lower amplitude. Thus, aiming to solve this problem, we firstly proposed to utilize probabilistic shaping PAM4 (transmitting different amplitude levels with different probability). Fortunately, the simulation result verifies that PS-PAM4 can improve BER performance effectively compared with PAM4.

**Key words** probabilistic shaping; PAM4; SOA