

基于 DFB 激光器腔体内 XGM 效应的阈值判决技术

陈大雷¹, 孟生云¹, 董飞鸿²

(1. 陆军装甲兵学院蚌埠校区, 安徽 蚌埠 233000; 2. 军事科学院 系统工程研究所, 北京 100000)

摘要: 为消除光时分/码分多址等光数字通信系统中的多址干扰(MAI)噪声, 提出了一种新型的基于分布反馈式(DFB)激光器腔内的交叉增益调制(XGM)效应全光阈值判决技术。通过将光数字脉冲信号注入 DFB 激光器, 激光器内部出现 XGM 效应, 使用光带通滤波器(OBPF)滤出 XGM 效应产生的新光谱即可消除信号中的 MAI 噪声, 从而提高数字信号的接收性能。

关键词: 全光阈值判决; 分布反馈式激光器; 交叉增益调制效应

中图分类号: TN929.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2019)11-0049-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.11.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Threshold decision technology based on XGM effect in DFB laser cavity

CHEN Dalei¹, MENG Shengyun¹, DONG Feihong²

(1. Army Armored Force Academy of PLA, Bengbu Campus, Bengbu Anhui 233000, China;

2. Military Academy of Science, Institute of Systems Engineering, Beijing 100000, China)

Abstract: To eliminate multiple access interference (MAI) noise in optical time division/code division multiple access digital communication systems, a novel all-optical threshold decision technique based on cross gain modulation (XGM) effect in distributed feedback (DFB) lasers cavity is proposed. By injecting optical digital pulse signal into DFB laser, XGM effect appears inside the laser. Using optical bandpass filter (OBPF) to filter out the new spectrum produced by XGM effect can eliminate MAI noise in the signal, thus improving the reception performance of digital signal.

Key words: optical threshold; distributed feedback; cross gain modulation effect

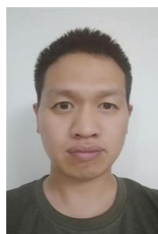
0 引言

基于光学方法的阈值判决可用于消除光纤网络中的多址干扰(MAI)噪声, 准确地判决光脉冲序列中的“1/0”码字, 降低接收端信号误码率(BER)。在光码分/时分多址(OCDMA/OTDMA)系统中, 接收端难免会存在一定功率的 MAI 噪声, 严重影响系统通信质量。因此, 系统接收端的 MAI 噪声的消除非常重要。

目前, 已有多种 MAI 噪声消除技术, 其中最为有效的方法就是全光阈值判决技术, 它具有宽带宽、高速率的特点, 因此得到了比较广泛的重视和深入的研究。

收稿日期: 2019-03-09。

作者简介: 陈大雷(1989-), 男, 博士, 现为陆军装甲兵学院蚌埠校区讲师, 长期从事光通信技术、光电子技术、光学侦察技术等方向的研究工作, 近五年来参与了多项国家和军队的科研项目, 如国家自然科学基金重点项目、国家“973”计划项目等, 并在国内外学术期刊上发表论文 20 余篇。



究。全光阈值判决技术通常利用光纤或半导体介质中的非线性效应, 多为光学器件中的自相位调制(SPM)效应、交叉相位调制(XPM)效应。当“1”码光脉冲的功率足够大时将产生非线性效应, 利用光学滤波器滤出因非线性效应产生的新光谱成分即可滤除 MAI 噪声。现已有多种基于光学的阈值判决方法被国内外的学者提出, 例如: 利用光脉冲在色散位移光纤中的非线性效应实现阈值功能^[1]; 利用色散平坦光纤^[2]、光子晶体光纤^[3]和高非线性光纤^[4]中的 SPM 效应产生超连续谱的方法实现阈值判决功能, 同时, 利用可调谐激光器实现可调谐的阈值判决技术^[5]; 基于非线性光环路镜中产生的 XPM 效应的阈值判决方法在文献[6-8]中被提出来。但是, 上述系统均利用了光纤中的非线性效应, 这类系统所需要的光功率较大, 且系统结构复杂, 难以投入实用。为了降低阈值判决所需要的光功率, 文献[9, 10]利用了周期极化铌酸锂(PPLN)中的二次谐波产生效应。PPLN 的使用极大地降低了阈值判

决所需要的光功率, 然而这种新型器件价格非常昂贵, 特别是文献[11]提出的方案, 系统中还引入了额外的掺铒光纤放大器(EDFA)和可调谐激光器(TLS), 使得系统结构更加复杂。近年来, 可用于全光阈值的新材料光纤开始出现^[11,12], 但是当前还无法大规模生产, 成本较高。本文提出一种新型的基于分布反馈式(DFB)激光器腔内交叉增益调制(XGM)效应的阈值判决技术。

1 实验系统结构及原理

新型阈值判决系统构成如图 1 所示。光脉冲经偏振控制器(PC)和光环行器(OC)注入一个无隔离器的 DFB 激光器, 在外部脉冲光的注入下会产生 XGM 效应^[13], 并且可进一步产生增益开关(GS)效应, 使得光谱展宽, 并产生脉冲信号; 在 OC 的 3 端口接入一个光带通滤波器(OBPF)用于滤出 XGM 效应产生的新的光谱成分, 从而获得光脉冲序列。与“1”码脉冲相比, MAI 噪声峰值功率低, 虽然也会产生 XGM 效应, 但不足以引发 GS 效应, 因此不会展宽 DFB 激光器光谱, 在 OBPF 的作用下会被滤除。

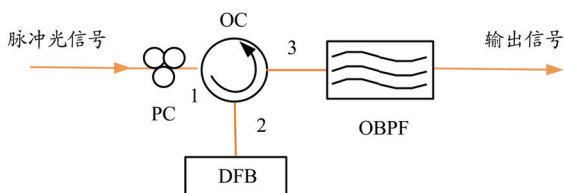


图 1 新型阈值判决系统构成

文献[14]提出了利用 DFB 激光器腔内 XGM 效应的超宽带(UWB)信号产生方法, 当脉冲光注入 DFB 激光器腔体以后, DFB 激光器腔体将为注入的光脉冲提供增益。此时, DFB 激光器在脉冲光的注入下等效于被一个大占空比的方波信号调制, DFB 激光器在外部信号调制的数学方程为:

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{I(t)}{eV} + g_0 \frac{N(t) - N_0}{1 + \varepsilon S(t)} - \frac{N(t)}{\tau_n} \quad (1)$$

$$\frac{dS(t)}{dt} = \Gamma g_0 \frac{N(t) - N_0}{1 + \varepsilon S(t)} S(t) - \frac{S(t)}{\tau_p} + \frac{\Gamma \beta N(t)}{\tau_n} \quad (2)$$

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} = \frac{1}{2} \alpha \left\{ \Gamma g_0 [N(t) - N_0] - \frac{1}{\tau_p} \right\} \quad (3)$$

其中, $N(t)$ 和 $S(t)$ 分别表示瞬态载流子密度和光子密度, $e=3 \times 10^8$ m/s 为电子电荷, $V=450 \mu\text{m}^3$ 为激光器有源区体积, $I(t)$ 为注入电流, $\tau_n=0.83$ ns 和 $\tau_p=0.91$ ps 分别为载流子寿命和光子寿命, $g_0=1.87 \times 10^{-6}$ cm³/s 为增益系数, $N_0=1.46 \times 10^{18}$ /cm³ 为透明载流子密度, $\varepsilon=1.72 \times$

10^{-17} /cm³ 为增益压缩因子(非线性增益系数), $\Gamma=0.3$ 为光限制因子, $\beta=1.2 \times 10^{-4}$ 为自发辐射耦合因子(表示自发辐射光中耦合成谐振模的比率), $a=3$ 为线宽增强因子, $\varphi(t)$ 为输出光的相位。此时, 激光器的输出光功率可表示为:

$$P(t) = \frac{V \eta h \nu}{2 \Gamma \tau_p} S(t) \quad (4)$$

其中, ν 为输出光的频率, η 为微分量子效率, h 为普朗克常量。输出光的频率啁啾 $\Delta\nu(t)$ 可表示为:

$$\Delta\nu(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (5)$$

激光器的输出光脉冲的复振幅可以表示为:

$$U(t) = \sqrt{P(t)} \exp\{j[2\pi\nu + \varphi(t)]\} \quad (6)$$

假设系统利用由增益开关激光器(GSL)获得的光脉冲作为实验中的注入光源, 那么, 此时 $I(t) = I_b + I_m \sin(2\pi f_m t)$, 其中 $f_m=2.5$ GHz。本文利用四阶 Runge-Kutta 法对方程组进行求解, 由此获得的光脉冲波形如图 2(a)所示, 当注入 DFB 激光器后, DFB 激光器腔体将为注入的脉冲光提供增益, 此时, DFB 激光器等效于被一个电信号直接调制, 等效调制信号波形如图 2(b)所示。

我们将 $I(t)$ 的信号波形代入方程组可以计算得到 DFB 激光器输出的光谱和时域波形如图 3 所示。可以看出, 当 DFB 激光器被一束脉冲光注入时, 激光器腔体在外部电流的驱动下, 将为进入腔体的脉冲光提供

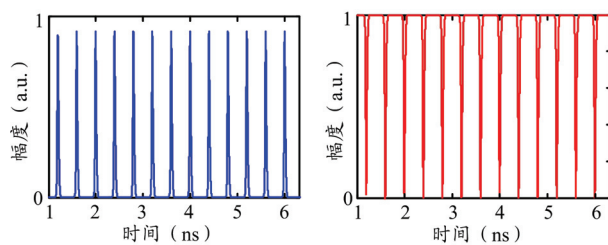


图 2 注入脉冲光波形和 DFB 激光器的等效调制信号波形

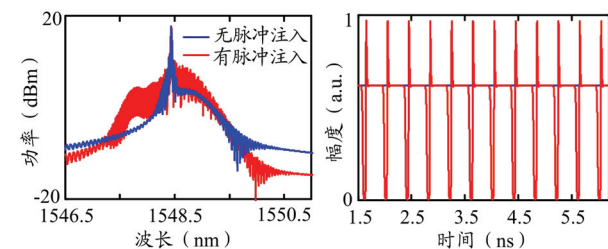


图 3 脉冲注入下 DFB 激光器光谱及波形

增益,从而使得DFB激光器出现XGM效应。当XGM效应足够强时将出现GS效应,此时,DFB激光器输出的光谱明显展宽,同时输出一阶超宽带信号。

2 实验验证及结果分析

阈值判决实验系统框图如图4所示。中间部分为阈值判决子系统,作为核心部件的DFB激光器的输出功率为5.21 dBm,OBPF中心波长为1548.51 nm,其3 dB带宽为100 GHz。左侧为光脉冲序列产生子系统,脉冲波形产生器(PPG, Anritsu MP1763C)的2.5 GHz时钟信号经微波功率放大器(PA)放大至25 dBm后直接调制DFB激光器,从而实现DFB激光器的GS效应以获得速率为2.5 Gb/s的光脉冲,脉冲光源的输出功率为4.01 dBm。光脉冲随后进入马赫-曾德尔调制器(MZM)被PPG输出的伪随机码(PRBS)信号调制,获得光脉冲序列,脉冲光功率由可调谐掺铒光纤放大器(T-EDFA)进行控制,并用光功率计(PM_1)监控。系统右侧为测量子系统, PM_2 用于测量阈值判决子系统输出的光功率;一个带有放大功能的光电探测器(PD)用于将光信号检测为电信号,并对电信号进行放大;光谱仪(OSA, Anritsu MS9710C)用于测量实验中的光谱;数字采样示波器(OCS, Lecroy NRQ9000)用于测量阈值前后的信号波形特征;误码仪(BERT, Anritsu MP1763C)用于进行功率阈值判决以前和判决以后的BER测量。

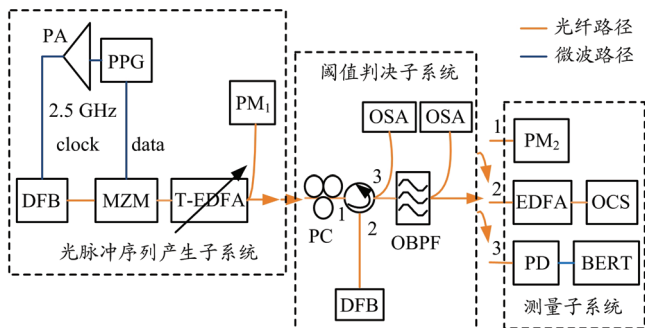


图4 阈值判决实验系统

2.1 DFB激光器在脉冲光注入下产生XGM效应的实验验证

本文先将OSA直接接入OC的3输出端,并利用T-EDFA调谐脉冲光注入功率,如图5右上侧插图所示,测量得到的DFB激光器在脉冲光注入下的光谱变化情况如图5所示。可以看出,随着输入光功率的增加,DFB激光器光谱随注入脉冲光功率提高的变化趋势,符合图3(a)的仿真结果。

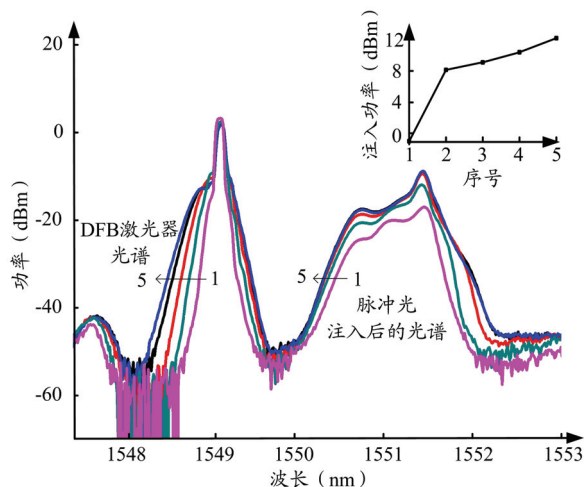
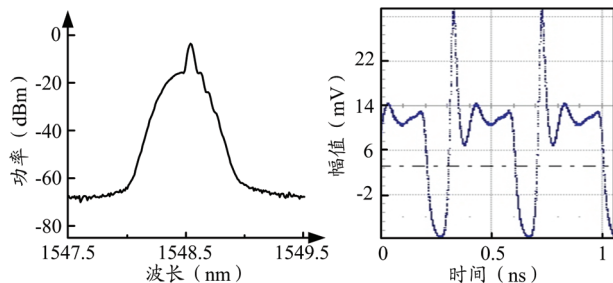


图5 DFB激光器的输出光谱随注入光功率增加的变化趋势

我们利用T-EDFA将注入DFB激光器的脉冲光功率调谐为4.2 dBm,并利用OBPF滤出DFB激光器的光谱,此时DFB激光器的波长可通过温度进行调谐。OBPF的输出端分别采用OSA及OCS测量滤波以后的光谱以及其所对应的波形,首先将DFB激光器的全部输出光谱滤出并放大,其测量结果如图6所示。可以看出,XGM效应足以使得DFB激光器产生增益开关效应。

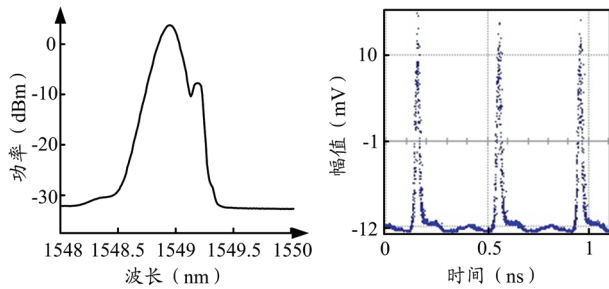


(a) 因XGM效应产生的光谱展宽现象 (b) XGM效应产生的脉冲波形

图6 脉冲光注入下DFB激光器输出光谱和波形特性

如果将DFB激光器展宽后的光谱滤出来,那么就可以获得UWB波形,实验结果与图3的仿真结果非常符合。如果利用OBPF将光谱的展宽部分滤出,那么就可以获得全“1”码光脉冲,滤波以后的光谱以及其所对应的时域波形如图7所示。

功率传递(PTF)曲线是描述全光阈值判决性能的重要参数,为获得阈值判决子系统的PTF曲线,系统采用 PM_1 和 PM_2 分别测量阈值判决子系统的输入和输出脉冲光功率,测量得到的PTF曲线如图8所示。可以看出,PTF曲线明显存在一个低功率区域,这个低功率区正是阈值判决可以实现的关键。此外,在低功率



(a) OBP 滤出的展宽部分光谱图

(b) 对应的脉冲波形

图 7 经滤波以后的信号光谱以及其所对应的光脉冲

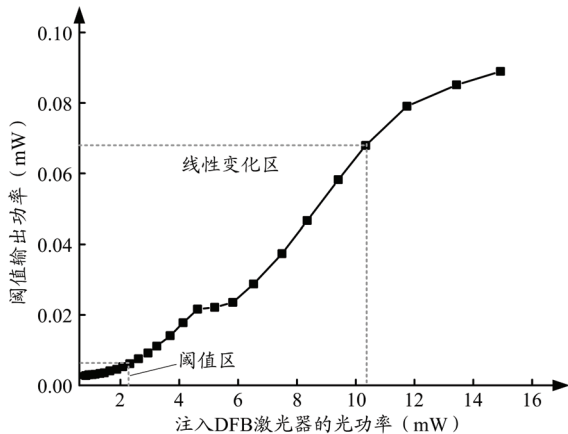


图 8 阈值器件的功率传递关系

区的输出功率没有达到 0 mW, 这是因为 OBP 无法将 DFB 激光器的自由振荡频率的光谱成分全部滤除。

2.2 阈值判决下光脉冲信号眼图改善的实验验证

为验证阈值的实际作用, 本文利用 OCS 测量阈值判决前/后的光脉冲波形、眼图以及光电检测后的电信号眼图。实验过程中, 利用 PPG 所产生的 2^7-1 PRBS 序列对光脉冲进行调制, 同时调谐 MZM 的偏置电压降低光脉冲序列的消光比, 以“0”码上的低功率脉冲用作 MAI, 其幅度约为“1”码光脉冲幅度的 $1/5$, 光脉冲的调制方式如图 9 所示。其中, V_{bias} 为调制器的实际偏置电压, V_{π} 为调制器的半波电压, $\Delta V = V_{\text{bias}} - V_{pi}$ 。此时, 输入 DFB 激光器的光功率为

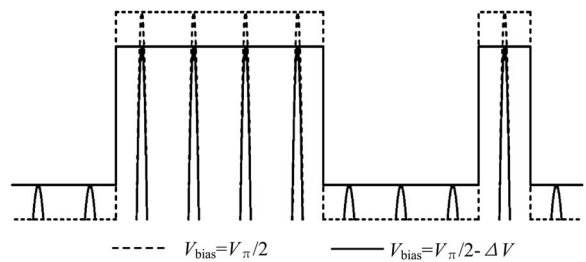
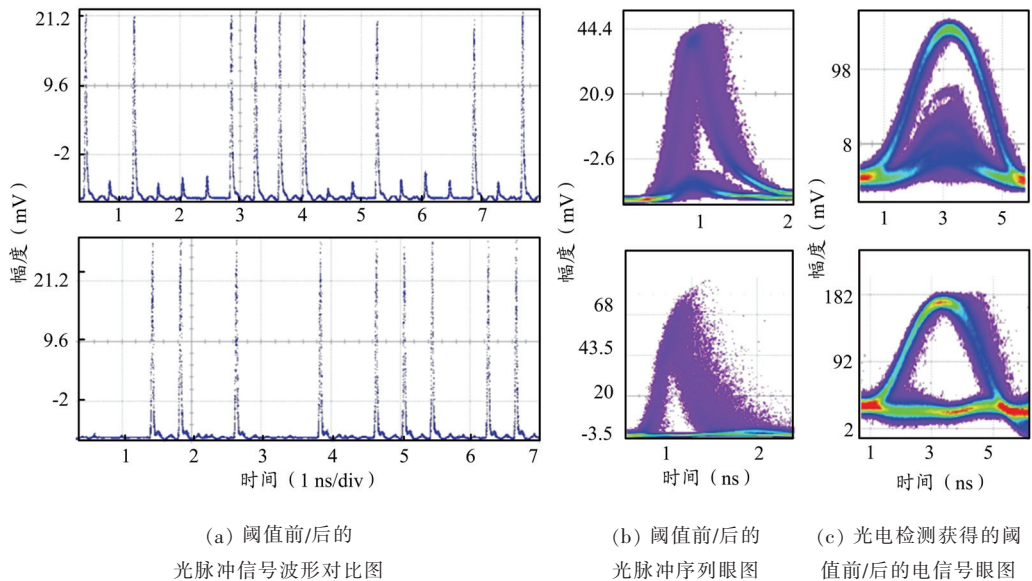


图 9 光脉冲的调制方式

8.57 dBm, DFB 激光器的输出功率为 5.21 dBm。本文利用带有功率放大功能的 PD 检测光信号, 利用可调光衰减器 (VOA) 将进入 PD 的平均光功率调谐至 -15 dBm。阈值前/后的光脉冲信号波形及眼图对比如图 10(a) 和图 10(b) 所示。可以看出, 阈值判决确实可以滤除 MAI 噪声, 改善接收端的光信号波形和眼图。此外, 图 10(a) 中的脉冲信号时间范围不同, 这是受到阈值判决引入延时的影响。通过对比图 10(c) 所示的阈值前/后获得的电信号眼图可知, 即使是低功率的 MAI 噪声, 在 PD 的放大作用下, 光电转换得到的电信号眼图也会严重劣化; 与此同时, 在阈值判决的作用下, 眼图将得到改善。

2.3 新型阈值判决技术改善系统对信号接收的实验验证

在实验最后, 本文对未经阈值判决和经阈值判决的数字信号的 BER 进行了测量。系统分别引入长度为 2^7-1 和 $2^{31}-1$ 的 PRBS 信号进行了测量, 测量结果如图 11 所示。当 PRBS 的长度为 2^7-1 时, 随着输入 PD 功率的升高, 未经阈值判决的信号误码率存在一个 10^{-7}



(a) 阈值前/后的光脉冲信号波形对比图

(b) 阈值前/后的光脉冲序列眼图

(c) 光电检测获得的阈值前/后的电信号眼图

图 10 未经阈值和经阈值判决以后的信号波形和眼图

的下限, 继续提高光功率将使 BER 再次升高。如果引入阈值判决, 那么随着信号功率的提高, BER 可控制在 10^{-12} 以下。如果采用长度为 $2^{31}-1$ 的 PRBS 序列, 未经阈值的信号 BER 随信号功率的提高而提高, 在引入阈值判决以后, 随着信号功率的增加, 接收端信号的 BER 逐步降低, 可在 10^{-10} 以下。这是因为在 PD 放大作用下, 噪声脉冲会被逐步放大, 而“1”码光脉冲的放大将达到饱和, 从而使得信号信噪比降低。信号 BER 的测量说明阈值判决对信号的改善与 PRBS 码的长度无关。

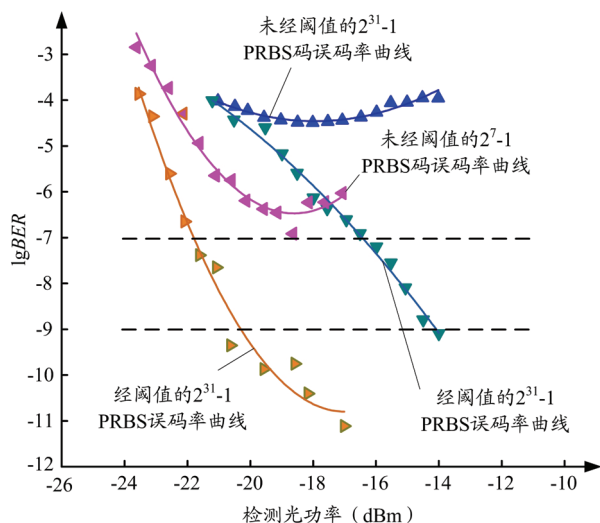


图 11 阈值前/后的误码率曲线

3 结束语

本文提出了一种新型的基于 DFB 激光器腔体内 XGM 效应的阈值判决技术, 其核心部件为一个无隔离器的 DFB 激光器。只有“1”码光脉冲才具备足够的峰值光功率, 使得 DFB 激光器在 XGM 效应的作用下引发 GS 效应, 从而大幅展宽 DFB 激光器的输出光谱, 同时, 输出脉冲光利用 OBPF 滤出 DFB 激光器光谱的展宽部分即可滤除信号的 MAI 噪声。

本文通过仿真说明了阈值判决技术的实现原理, 并通过实验证明: 该阈值判决方案可以有效改善信号接收端的信号波形和眼图, 极大地降低信号接收 BER。此外, 这种阈值判决技术所需要的光功率小于大部分已有方案, 同时由于系统中的核心部件为普通的商用 DFB 激光器, 因此本方案还具有成本低、结构简单和便于集成等无可比拟的优势, 对未来的数字光信号的接入及末端处理具有重要的意义。

参考文献:

- [1] WANG X, WADA N, HAMANAK T, et al. 10-user truly-asynchronous OCDMA experiment with 511-chip SSFBG en/decoder and SC-based optical threshold[C]//Optical Fiber Communication (OFC) Conference 2005, November 3–6, 2005, Anaheim, America. New York: OSA, 2005: 1–6.
- [2] LEE J H, TEH P C, YUSOBPF Z, et al. A holey fiber-based nonlinear thresholding device for optical CDMA receiver performance enhancement [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2002, 14(6): 876–878.
- [3] LI K, CONG W, HERNANDEZ V J, et al. 10 Gbit/s optical CDMA encoderdecoder BER performance using HNLF threshold [C]// Optical Fiber Communication Conference on Optical Communication, Feb. 23–27, 2004, Anaheim, America. New York: OSA, 2004.
- [4] LEE J H, TEH P C, PETROPOULOS P, et al. A grating-based OCDMA coding-decoding system incorporating a nonlinear optical loop mirror for improved code recognition and noise reduction [J]. J. Lightw. Technol., 2002, 20(1): 36–46.
- [5] 朱华涛, 蒲涛, 陈寅芳, 等. 一种新型可调谐光阈值器件[J]. 光电子·激光, 2014(6): 1104–1108.
- [6] 陈寅芳, 王荣, 蒲涛, 等. 变空比脉冲测量非线性光环境阈值特性的实验研究[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 106–111.
- [7] 李强, 王智, 吴重庆, 等. 基于非线性光纤环形腔镜的全光阈值器[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0705001-1–0705001-3.
- [8] CHEN Yinfang, WANG Rong, TAO Pu, et al. Effect of filter parameters on enhanced performance of highly nonlinear fiber-based all optical thresholding[J]. Optical Engineering, 2013, 52(4), 045002-1–045002-5.
- [9] JIANG Z, SEO D S, YANG S D, et al. Four user 10 Gb/s spectrally phase-coded O-CDMA system operating at ~30 fJ/bit [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2005, 17(3): 705–707.
- [10] HAMANAKA T, WANG X, WADA N, et al. Compound Data Rate and Data-Rate-Flexible 622 Mb/s~10 Gb/s OCDMA Experiments Using 511-Chip SSFBG and Cascaded SHG-DFG-Based PPLN Waveguide Optical Threshold [J]. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., 2007, 13(5): 1516–1521.
- [11] SONG Yufeng, CHEN Yunxiang, JIANG Xiantao, et al. Few-Layer Antimonene Decorated Microfiber as an All Optical Threshold and Wavelength Converter for Optical Signal Processing[C]// Asia Communication and Photonics Conference, (ACP) 2017, November 10–13, 2017, Guangzhou, China. New York: OSA, 2017.
- [12] SONG Yufeng, LIANG Zhiming, JIANG Xiantao, et al. Few-layer antimonene decorated microfiber: ultra-short pulse generation and all-optical thresholding with enhanced long term stability [J]. 2D Materials, 2017, 4(4): 1–18.
- [13] WANG X, MATSUSHIMA K, KITAYAMA K, et al. High-performance optical code generation and recognition by use OBPF a 511-chip, 640-Gchip/s phase-shifted superstructured fiber Bragg grating[J]. Opt. Lett., 2005, 30(4): 355–357.
- [14] JIN X, KEATING T, CHUANG S L. Theory and experiment of high-speed cross-gain modulation in semiconductor lasers [J]. IEEE J. Quantum Electron., 2000, 36(12): 1485–1493.