

# 一种全光信号优化结构的设计与实现

邓大鹏 曹东东 廖晓闽 林初善 李 将

(中国人民解放军西安通信学院, 陕西 西安 710106)

**摘要** 利用两段色散互补的单模光纤跨段,并结合一个相位偏移器,设计出了一种基于光纤自相位调制效应的全光信号优化结构。理论分析了光纤中的自相位调制效应,介绍了优化结构的工作原理和基于半导体光放大器(SOA)与马赫-曾德尔干涉仪(MZI)的全光异或原理,并通过光通信系统设计软件 OptiSystem 搭建了全光异或门和全光信号优化结构的仿真模型,分别对速率为 10 Gb/s 和 40 Gb/s 的全光异或输出结果进行了优化,使得异或输出消光比分别从 10 dB 和 9 dB 提高到约 26 dB,并得到质量优良的输出眼图。结果表明,常规的全光异或输出消光比普遍较低,通过全光信号优化结构可以使消光比得到大幅提高,改善输出信号的质量。

**关键词** 光通信;全光信号处理;全光异或门;全光信号优化结构;自相位调制;相位偏移

**中图分类号** TN913.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0605008

## Design and Realization of an All-Optical Signal Optimization Structure

Deng Dapeng Cao Dongdong Liao Xiaomin Lin Chushan Li Jiang

(Xi'an Communications Institute of the People's Liberation Army, Xi'an, Shaanxi 710106, China)

**Abstract** An all-optical signal optimization structure based on the self-phase modulation (SPM) effect of fiber is designed by using two single-mode fiber spans with dispersion compensation, and combining a phase shifter. The self phase modulation effect of fiber is analyzed theoretically. The working principles of optimization structure and all-optical XOR gate based on semiconductor optical amplifier (SOA) and Mach-Zehnder interferometer (MZI) are introduced respectively, and the simulation models of all-optical XOR gate and all-optical signal optimization structure are built by using the optical communication system design software OptiSystem. The all-optical XOR output results at 10 Gb/s and 40 Gb/s rate are optimized respectively, making that the XOR output extinction ratios are improved respectively from 10 dB and 9 dB to about 26 dB, and the eye diagrams with good quality are obtained. The results show that the conventional all-optical XOR output extinction ratio is low generally, the all-optical signal optimization structure can improve the extinction ratio significantly and improve the quality of the output signals.

**Key words** optical communications; all-optical signal processing; all-optical XOR gate; all-optical signal optimization structure; self-phase modulation; phase shift

**OCIS codes** 060.1155; 060.5060; 160.4330; 190.4370; 190.4390

## 1 引 言

近年来,随着通信业务量的迅速膨胀,传统的光纤通信网络正在向全光网(AON)的方向发展,即信号在光网络中的传输和交换等过程都始终在光域进行,采用全光信号处理(AOSP)技术进行全光分组交换(OPS),不需要再经过光/电/光转换,以光节点取代电节点,从而消除了传统光网络中的“电子瓶颈”障碍,提高了带宽利用率和网络速率,降低了网

络运行成本。

全光信号处理技术主要利用光纤和半导体光放大器(SOA)等介质的非线性效应来实现,半导体光放大器以其小体积、低功耗、高集成等优点受到广泛关注,成为实现全光波长变换、全光逻辑运算、全光 3R 再生、全光码型转换等许多全光信号处理技术的首选材料。文献[1]利用 SOA 结合延迟干涉仪(DI)分别进行了 10 Gb/s 和 40 Gb/s 的全光波长转

收稿日期: 2013-01-14; 收到修改稿日期: 2013-03-08

作者简介: 邓大鹏(1963—),男,硕士,教授,硕士生导师,主要从事光传送网关键技术方面的研究。

E-mail: ddp9999@sina.com

\* 通信联系人。E-mail: xty\_cdd2010@163.com

换(AOWC)实验,文献[2]提出一种基于单个 SOA 的“两路输入两路输出”的全光波长转换方案,实现了对两路独立信号的同时波长变换。目前,基于 SOA 的交叉增益调制效应已经实现了 320 Gb/s 的全光波长转换<sup>[3]</sup>,基于 SOA 的全光逻辑运算的工作速率已经可以超过 100 Gb/s<sup>[4~7]</sup>。然而 SOA 中的载流子恢复时间较长,导致基于 SOA 交叉增益调制(XGM)和交叉相位调制(XPM)等非线性过程实现的全光信号处理功能的输出信号的码型效应通常较为严重,输出信号消光比较低。文献[8]通过仿真实验表明基于 SOA-XGM 的波长变换器的输出信号的消光比只有几个 dB,因而成为该波长变换器的最大制约因素。文献[9]基于 SOA 的交叉增益调制效应实现了对两路 10 Gb/s 光信号的全光异或和解异或运算,输出信号消光比分别只有 7 dB 和 5.5 dB。与此相比,基于 SOA 的 XPM 效应实现的全光信号处理功能的输出信号消光比会稍微高一点,但是通常也只能达到 11 dB 范围<sup>[10,11]</sup>。

本文通过将两段色散系数互为正负且绝对值相等的单模光纤(SMF)跨段相连接,并结合一个相位偏移器设计出一种基于光纤自相位调制(SPM)效应的全光信号优化结构,在光通信系统设计软件 OptiSystem11 仿真平台上对工作速率分别为 10 Gb/s 和 40 Gb/s 的全光异或门的输出结果进行了优化,优化后输出信号消光比分别从 10 dB 和 9 dB 提高到约 26 dB。这种优化结构对信号的处理功能几乎不受脉冲信号比特速率的限制,可以推广到其他全光信号处理应用中。

## 2 理论基础

### 2.1 光纤中的 SPM 效应

光纤本质上是一种非线性波导,在常规的光纤信道中,光纤主要表现出其线性特征,但随着光信号比特速率的提高和入纤光功率的增大,光纤就会表现出极强的非线性效应。光纤中的大部分非线性效应起源于非线性折射率,而折射率受光强的影响很大。在强光场输入的情况下,光纤折射率可表示为<sup>[12]</sup>:  $n(\omega, |A|^2) = n(\omega) + n_2 |A|^2$ ,其中,  $n(\omega)$  为与频率有关的线性折射率,  $n_2 |A|^2$  是由光强引起的非线性折射率。由于折射率变化而导致的非线性效应包括 SPM 效应、XPM 效应和四波混频(FWM)。其中, XPM 和 FWM 主要在波分复用(WDM)系统中表现强烈,对于单波长光纤信道来说 SPM 起主要作用。SPM 是指光纤折射率在单波

长强光场的作用下发生非线性改变,使得光脉冲在光纤信道中传输时发生非线性相移,从而产生了新的频率分量,导致光脉冲频谱展宽。SPM 效应导致光脉冲产生的非线性相位偏移量表示为<sup>[12,13]</sup>

$$\phi_{NL} = \gamma P_0 L_{eff}, \quad (1)$$

其中  $\gamma = 2\pi n_2 / (\lambda A_{eff})$  表示光纤的非线性参量,  $n_2$  为非线性折射系数,  $A_{eff}$  为有效模场面积,  $P_0$  为光信号峰值功率,  $L_{eff} = [1 - \exp(-\alpha L)] / \alpha$  表示实际长度为  $L$  的光纤的有效非线性长度,  $\alpha$  为光纤的损耗系数。通过适当减小  $A_{eff}$  和  $\alpha$ , 并增大  $L$  和  $P_0$ , 就可以引起很大的非线性相移。

可以看出, SPM 会引起频率啁啾导致光频谱展宽, 与此同时, 光纤的群速度色散(GVD)使不同频率的光脉冲在传播过程中产生时延差, 从而导致光脉冲畸变, 引起信道串扰, 降低了系统性能。因此, 通常需要采用适当的色散管理方案来消除光纤信道中的色散积累, 保证传输信道中总的色散值为零。

### 2.2 基于 SPM 的全光信号优化原理

图 1 为基于光纤 SPM 效应的全光信号优化结构原理框图。常规的全光信号处理输出结果经过 1 端口被分解成光功率完全相等的两路信号, 将其中一路通过相位偏移器, 对其产生  $\pi(180^\circ)$  的相位偏移; 将另一路通过两段长度相等、色散系数互为正负且绝对值相等的 SMF 消除信道中的色散积累, 使单波长光纤信道中的 SPM 效应显著表现出来, 从而导致全光信号处理输出结果中表示“1”码的高功率光脉冲发生  $\pi$  的非线性相移, 与此相比, 表示“0”码的光脉冲由于其峰值功率极小, 因此产生的非线性相位偏移量约为 0。两路光信号在 2 端口重合并发发生干涉, 由于两路光信号中“1”码脉冲之间的相位差为 0, 因此发生相长干涉被进一步增强, 而“0”码脉冲之间的相位差约为  $\pi$ , 因此发生相消干涉被进一步减弱, 从而使“1”和“0”脉冲之间的功率差值进一步增大, 则信号消光比得到提高。

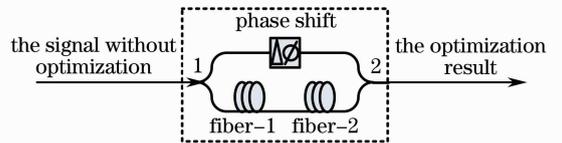


图 1 优化结构原理框图

Fig. 1 Schematic diagram of optimization structure

### 2.3 基于 SOA-MZI 的全光异或原理

基于 SOA-MZI(MZI 为马赫-曾德尔干涉仪)的全光异或门是利用 SOA 中的交叉增益调制和 XPM 效应来实现的。图 2 为基于 SOA-MZI 的全光异或原

理框图,两个 SOA 对称放置于 MZI 的上下两臂,且参数设置完全一致,一路波长为  $\lambda_{cw}$  的连续探测光经过 1 端口一分为二,分别与波长为  $\lambda_s$  的两路数据脉冲信号 A 和 B 耦合,然后注入 MZI 结构中的 SOA1 和 SOA2。两路数据脉冲信号分别调制上下两个 SOA 中的载流子浓度,从而引起 SOA 有源区的增益和有效折射率改变,这将导致连续探测光通过上下两个 SOA 时发生非线性相位偏移,并产生相位差。某一时刻,当两路数据脉冲信号 A 和 B 一路输出“0”一路为“1”时,不同的相位调制产生  $\pi$  的相位差,则两路探测光在 2 端口干涉输出“1”脉冲;当两路数据脉冲信号 A 和 B 同为“0”或者同为“1”时,相位差为 0,则在 2 端口无脉冲信号输出,视为输出“0”脉冲,在输出端通过高斯滤波器提取  $\lambda_{cw}$  波长的脉冲信号,从而实现了数据脉冲信号 A 和 B 的异或运算。假设数据脉冲信号 A 和 B 的初始相位相同,则异或输出信号的光功率可表示为<sup>[5,11]</sup>

$$P_{XOR}(t) = \frac{P_{in}(\lambda_{cw})}{4} \{G_1(t) + G_2(t) - 2\sqrt{G_1(t)G_2(t)}\cos[\phi_1(t) - \phi_2(t)]\}, \quad (2)$$

式中  $P_{in}(\lambda_{cw})$  是输入的连续探测光功率, $G_1(t)$ 、 $G_2(t)$ 、 $\phi_1(t)$ 、 $\phi_2(t)$  分别是连续探测光经过 SOA-MZI 上下两个 SOA 所产生的增益变化和非线性相移。

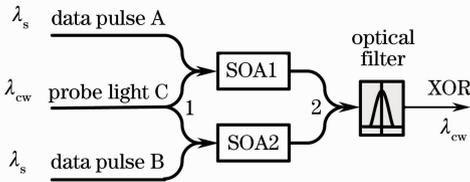


图 2 基于 SOA-MZI 的全光异或原理框图

Fig. 2 Schematic diagram of all-optical XOR based on SOA-MZI

基于 SOA-MZI 结构实现的全光异或门是目前输出性能最好的异或方案之一,已有多篇文献报道了这种全光异或门。然而,由于 SOA 中的载流子恢复时间较长,导致基于 SOA 的交叉增益调制和 XPM 效应实现的全光信号处理功能的工作速率受到极大的限制,随着信号比特速率的增大,基于这些非线性过程实现的全光信号处理功能的输出性能会逐渐变差,主要表现为输出信号的消光比变小。对于这个问题,利用 2.2 节中的全光信号优化结构可以很好地解决,使得输出消光比成倍增加。

## 3 仿真实验分析

### 3.1 实验参数设置

本文在光通信系统设计软件 OptiSystem11 平台上搭建了基于 SOA-MZI 的全光异或门以及基于光纤 SPM 效应的全光信号优化结构的仿真模型。仿真实验中的连续波(CW)探测光是由连续波激光器直接输出的连续光波;数据脉冲信号 A 和 B 的产生机制相同:由比特序列发生器产生的二进制序列经过归零(RZ)脉冲生成器先转换为 RZ 码电脉冲,再由电脉冲通过马赫-曾德尔电光调制器对连续波激光器输出的连续光波进行电光调制,最后由电光调制器输出的就是 RZ 码数据光脉冲。设置数据脉冲信号 A 和 B 的输出消光比为 30 dB,脉冲占空比为 0.5,脉冲序列分别为 128 位比特序列“100101101110011000110101110000011101100……”和“110110010011100001001101100111011010010……”,所在波长为  $\lambda_s = 1557$  nm;设置连续探测光所在波长为  $\lambda_{cw} = 1550$  nm,且各连续波激光器的输出光功率同为 0 dBm。SOA 的参数设置如表 1 所示;相位偏移器的偏移参量设置为  $\pi$ 。由于非零色散位移光纤(G. 655 和 G. 656 光纤)具有非常优异的色散特性,不但适合 40 Gb/s 的传输系统,还适应于部署新一代 100 Gb/s 的光网络,而且不断涌现出许多新的制造工艺技术,提高了非零色散位移光纤的生产效率,降低了成本<sup>[14,15]</sup>,因此在仿真实验中,两段色散互补光纤的参数设置模拟非零色散位移光纤即 G. 655 光纤,如表 2 所示。通过这些参数分别对 10 Gb/s 和 40 Gb/s 的全光异或输出结果进行全光优化仿真实验,实验结果见下节。

表 1 SOA 的主要参数设置

Table 1 Main parameter setting of SOA

Parameter	Value
Bias current	0.3 A
Active region length	$5 \times 10^{-4}$ m
Active region width	$8 \times 10^{-7}$ m
Active region thickness	$8 \times 10^{-8}$ m
Confinement factor for optical field	0.3
Differential gain coefficient	$2.78 \times 10^{-20}$ m <sup>2</sup>
Transparent carrier concentration	$1.4 \times 10^{24}$ m <sup>-3</sup>
Initial carrier concentration	$3.0 \times 10^{24}$ m <sup>-3</sup>
Linewidth enhancement factor	5
Recombination coefficient A	$1.43 \times 10^8$ s <sup>-1</sup>
Recombination coefficient B	$1.0 \times 10^{-16}$ m <sup>3</sup> /s
Recombination coefficient C	$3.0 \times 10^{-41}$ m <sup>6</sup> /s

表 2 G. 655 光纤的主要参数设置

Table 2 Main parameter setting of G. 655 fiber

Parameter	Value
Reference wavelength	1550 nm
Fiber length	0.05 km
Fiber loss	0.2 dB/km
Dispersion coefficient	$\pm 4.067$ ps/(nm · km)
Dispersion slope	$0.074$ ps/(nm <sup>2</sup> · km)
Mode field area	$85 \mu\text{m}^2$
$n_2$	$2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$

### 3.2 10 Gb/s 实验结果

设置数据脉冲信号 A 和 B 的比特速率为 10 Gb/s,即脉冲周期为 100 ps,则基于 SOA-MZI 的全光异或输出信号时域波形图如图 3 所示,由图 3(a)可以看出,异或输出序列为

“0100111111011110000100110000111000111110……”,与数据脉冲序列 A 和 B 的理论异或结果完全一致,但是在“0”码脉冲处的光功率并不为零,而是出现了许多小峰,结果使得基于 SOA-MZI 的全光异或输出消光比较低,如图 3(b)所示,输出消光比只有约 10 dB。图 4 为基于光纤 SPM 效应的全光信号优化结构输出信号的时域波形图。由图 4(a)可以看出,多余的小峰消失了,“0”码脉冲处的光功率几乎完全为零。由图 4(b)可以看出,输出信号消光比可以达到约 26 dB。为了更好地比较优化前后的信号质量,仿真实验中通过眼图分析仪来观察系统的眼图,如图 5 所示,可以看出,优化后的信号眼图更加清晰,眼睛睁开度更大、质量更好。

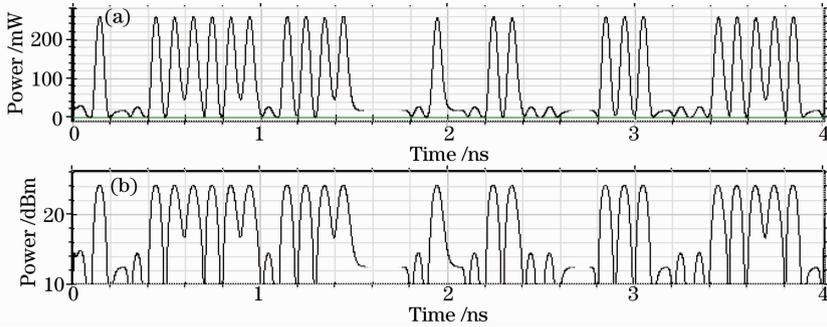


图 3 10 Gb/s 全光异或输出信号时域波形图。(a)Y 轴用 mW 表示;(b)Y 轴用 dBm 表示

Fig. 3 Time-domain waveform diagrams of 10 Gb/s all-optical XOR output signal. (a) Y axis is indicated in mW; (b) Y axis is indicated in dBm

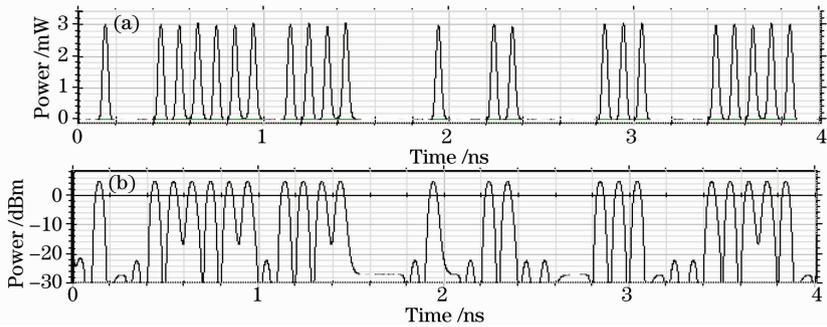


图 4 优化结构 10 Gb/s 输出信号时域波形图。(a)Y 轴用 mW 表示;(b)Y 轴用 dBm 表示

Fig. 4 Time-domain waveform diagrams of 10 Gb/s all-optical optimization structure output signal.

(a) Y axis is indicated in mW; (b) Y axis is indicated in dBm

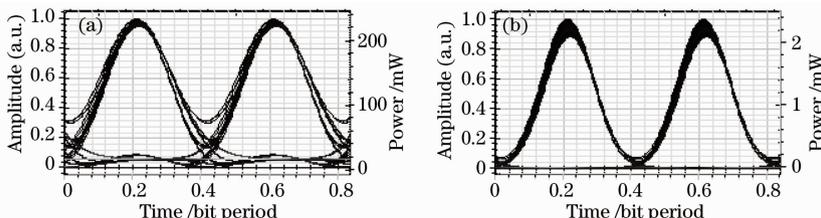


图 5 10 Gb/s 信号眼图。(a)优化前的眼图;(b)优化后的眼图

Fig. 5 Eye diagram for 10 Gb/s signal. (a) Eye diagram before optimizing; (b) eye diagram after optimizing

### 3.3 40 Gb/s 的实验结果

设置数据脉冲信号 A 和 B 的比特速率为 40 Gb/s, 即脉冲周期为 25 ps, 则仿真实验中所得到的全光异或输出结果, 以及经过全光信号优化结构进行优化处理后的输出结果分别如图 6、图 7 和图 8 所示。可以看出, 40 Gb/s 的实验结果与 10 Gb/s 的实验结果基本相似, 普通的 SOA-MZI 型全光异或门的输出消光比较低, 只有约 9 dB, 通过全光信号

优化结构处理以后, 消除了“0”码脉冲处多余的峰值功率, 使得消光比提高到约 26 dB, 并且经过优化的信号眼图更加清晰, 眼睛睁开度更大。因此可以推测, 该全光信号优化结构对速率透明, 优化功能不受数据脉冲信号比特速率的限制, 可以推广到其他全光信号处理应用中, 为未来全光网络的全面建设奠定基础。

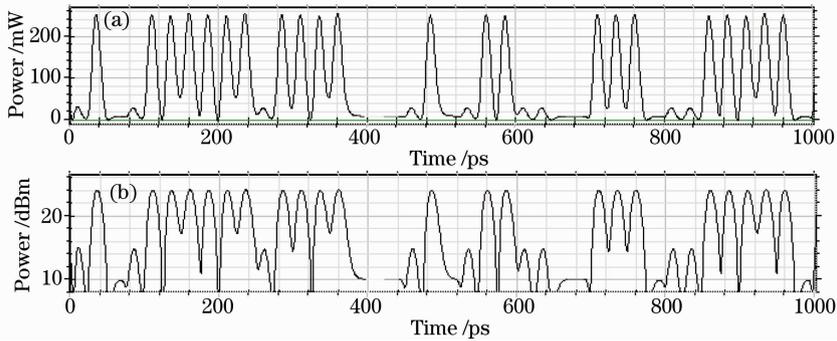


图 6 40 Gb/s 全光异或输出信号时域波形图。(a)Y 轴用 mW 表示; (b)Y 轴用 dBm 表示

Fig. 6 Time-domain waveform diagrams of 40 Gb/s all-optical XOR output signal. (a) Y axis is indicated in mW; (b) Y axis is indicated in dBm

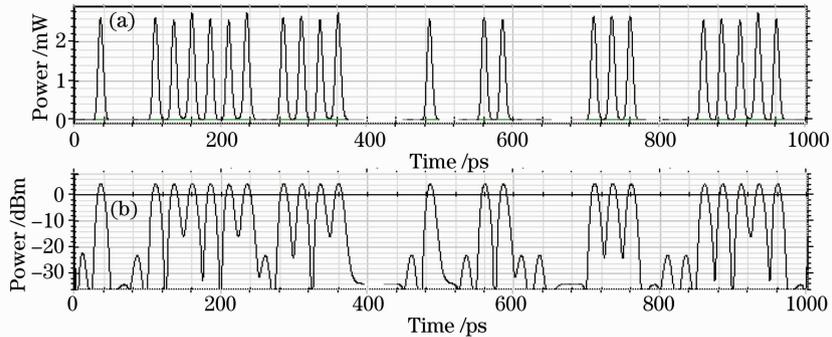


图 7 优化结构 40 Gb/s 输出信号时域波形图。(a)Y 轴用 mW 表示; (b)Y 轴用 dBm 表示

Fig. 7 Time-domain waveform diagrams of 40 Gb/s all-optical optimization structure output signal.

(a) Y axis is indicated in mW; (b) Y axis is indicated in dBm

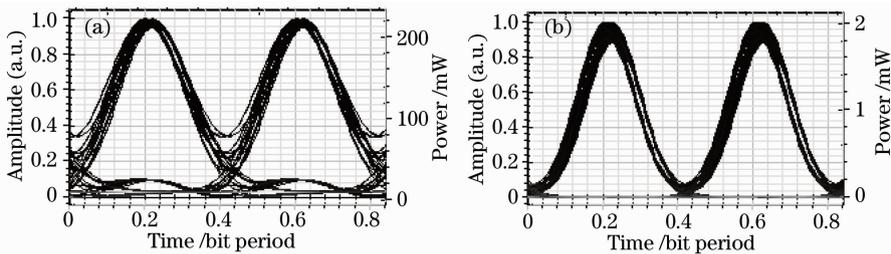


图 8 40 Gb/s 信号眼图。(a)优化前的眼图; (b)优化后的眼图

Fig. 8 Eye diagram for 40 Gb/s signal. (a) Eye diagram before optimizing; (b) eye diagram after optimizing

## 4 结 论

利用两段距离相同、色散系数互为正负且绝对值相等的 G. 655 光纤跨段和一个相位偏移器设计

出一种基于光纤 SPM 效应的全光信号优化结构, 理论分析了光纤中的 SPM 效应, 介绍了基于光纤 SPM 效应的全光信号优化原理和基于 SOA-MZI

结构的全光异或原理,并通过光通信系统设计软件 OptiSystem11 搭建了全光异或门和全光信号优化结构的仿真模型,分别对 10 Gb/s 和 40 Gb/s 的数据脉冲信号进行了仿真实验,将全光异或输出消光比分别从 10 dB 和 9 dB 提高到约 26 dB。并且经过优化,得到了线迹更加清晰、眼睛睁开度更大、质量更好的眼图。实验结果表明,本文所设计的全光信号优化结构能够大幅提高全光信号处理输出的信号消光比,改善输出信号的质量。可以推测,该全光信号优化结构对速率透明,优化功能不受数据脉冲信号比特速率的限制,可以推广到其他全光信号处理应用中。

### 参 考 文 献

- Zhao Xiaofan, Pan Shilong, Yang Yanfu *et al.*. All-optical wavelength conversion based on semiconductor optical amplifier and delay interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 892~896  
赵晓凡, 潘时龙, 杨彦甫 等. 基于半导体光放大器结合延迟干涉仪的全光波长转换[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 892~896
- Han Bingchen, Yu Jinlong, Zhang Litai *et al.*. Experimental research of simultaneously wavelength conversions with two independent signals based on a single semiconductor optical amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 330~334  
韩丙辰, 于晋龙, 张立台 等. 利用单个半导体光放大器实现两个独立信号同时波长变换的实验研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 330~334
- Y. Liu, E. Tangdionga, Z. Li *et al.*. Error-free 320 Gb/s SOA-based wavelength conversion using optical filtering [C]. Optical Fiber Communication Conference, 2006. PDP28
- S. Randel, A. M. de Melo, K. Petermann *et al.*. Novel scheme for ultrafast all-optical XOR operation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(12): 2808~2815
- Wang Qiang, Zhu Guanghao, Chen Hongmin *et al.*. Study of all-optical XOR using Mach-Zehnder interferometer and differential scheme [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2004, **40**(6): 703~710
- R. Gutierrez-Castrejon. 160 Gb/s XOR gate using bulk SOA turbo-switched Mach-Zehnder interferometer [C]. 2007 4th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE2007), 2007. 134~137
- Deng Ning, K. Chan, C. K. Chan *et al.*. An all-optical XOR logic gate for high-speed RZ-DPSK signal by FWM in semiconductor optical amplifier[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2006, **12**(4): 702~707
- Zhang Hongbin, Qiu Kun, Li Zhonggui. Investigation on characteristics of all-optical wavelength converter based on SOA-XGM[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(3): 337~344  
张宏斌, 邱 昆, 李中桂. 基于半导体光放大器交叉增益调制(SOA-XGM)波长变换器仿真研究[J]. *光子学报*, 2002, **31**(3): 337~344
- Y. J. Jung, C. W. Son, S. Lee *et al.*. Demonstration of 10 Gbps all optical encryption and decryption system utilizing SOA XOR logic gates[J]. *Opt. Quantum Electron.*, 2008, **40**(5-6): 425~430
- M. L. Nielsen, J. D. Buron. Demonstration of an all-optical 3-input XOR-gate and a data encryption/decryption scheme at 10 Gb/s based on all-active Mach-Zehnder interferometers [C]. *Optical Amplifiers and Their Applications*, 2002. OTuD3 Optical Society of America
- Sun Hongzhi, Wang Qiang, Dong Hao *et al.*. All-optical logic XOR gate at 80 Gb/s using SOA-MZI-DI[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2006, **42**(8): 747~751
- Li Changchun. Extra-Long Distance Optical Transmission Technology Foundation and Application [M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2008. 22~24  
李长春. 超长距离光传输技术基础及其应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008. 22~24
- G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics* [M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong, Tan Bin *et al.* Transl. Beijing: Electronic Industry Press, 2010. 61~62  
G. P. Agrawal. 非线性光纤光学原理及应用 [M]. 贾东方, 余震虹, 谈 斌 等译. 北京: 电子工业出版社, 2010. 61~62
- Wu Jindong, Wu Xingkun, Lu Weimin *et al.*. Improved fiber design and fabrication of non-zero dispersion-shifted fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2692~2697  
吴金东, 吴兴坤, 卢卫民 等. 非零色散位移光纤的改进设计及制造 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2692~2697
- Wu Jindong, Li Qingguo, Wu Wenwen *et al.*. Study of novel fabrication process for non-zero dispersion-shifted fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0806008  
吴金东, 李庆国, 吴雯雯 等. 非零色散位移光纤的制造新工艺研究 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0806008

栏目编辑: 王晓琰