

基于SOA的平行双抽运结构偏振复用OFDM信号的全光波长变换

卢 嘉^{1,2} 胡园园^{1,2} 刘剑飞^{1,2*} 曾祥焯^{1,2} 高军萍^{1,2}

¹河北工业大学信息工程学院, 天津 300401

²天津市电子材料与器件重点实验室, 天津 300401

摘要 理论研究并模拟仿真了在半导体光放大器(SOA)中的基于平行双抽运结构的偏振复用十六进制正交幅度调制-正交频分复用(16QAM-OFDM)信号的全光波长变换(AOWC)。理论推导及仿真结果表明偏振复用16QAM-OFDM信号可以经过全光波长变换实现偏振不敏感信号无串扰直接接收,并对影响系统转换效率的因素,如频率间隔、SOA注入电流、信号光功率及信号光入射角等进行了分析,同时分析结果验证了理论推导的正确性。

关键词 光通信; 全光波长变换; 半导体光放大器; 正交频分复用; 四波混频; 平行双抽运

中图分类号 TN929.11

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0205005

All-Optical Wavelength Conversion Based on Parallel Dual-Pump for Polarization Multiplexing OFDM Signal in SOA

Lu Jia^{1,2} Hu Yuanyuan^{1,2} Liu Jianfei^{1,2} Zeng Xiangye^{1,2} Gao Junping^{1,2}

¹School of Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China

²Tianjin Key Laboratory of Electronic Materials and Devices, Tianjin, 300401, China

Abstract The all-optical wavelength conversion (AOWC) based on parallel dual-pump for polarization multiplexing 16 quadrature amplitude modulation orthogonal frequency division multiplexing (16QAM-OFDM) signal in semiconductor optical amplifier (SOA) is theoretically analyzed and simulated. The theoretical analysis and simulation results show that the polarization multiplexing 16QAM-OFDM signal can be received without crosstalk after AOWC by direct-detection, besides that several conditions which affect the AOWC conversion efficiency in this system are analyzed, such as frequency spacing of parallel pumps, SOA injection current, average power and the azimuth of optical signal. This simulation results also validate the correctness of theoretical analysis at the same time.

Key words optical communications; all-optical wavelength conversion; semiconductor optical amplifier; orthogonal frequency division multiplexing; four wave mixing; parallel dual-pump

OCIS codes 060.1155; 060.4370; 060.4510; 190.4380

1 引言

全光波长变换是波分复用(WDM)光网络中提供波长再利用和波长路由的关键技术,是未来实现全光网络高速率、大容量的关键。目前全光波长变换有多种实现方式,包括利用半导体光放大器(SOA)的交叉增益调制(XGM)^[1]、交叉相位调制(XPM)^[1-2]和利用非线性介质的四波混频(FWM)效应^[3-6]。

基于SOA中FWM效应的波长变换技术响应时间短,可以避免非线性色散效应对系统产生的影响,其变

收稿日期: 2014-08-12; 收到修改稿日期: 2014-09-10

基金项目: 河北省自然科学基金(F2014202036, F2012202116, F2015202331)、河北省高层次人才资助项目(C2013001048)、天津市高等学校科技发展基金计划项目(20120715)

作者简介: 卢 嘉(1982—),女,博士,讲师,主要从事光通信方面的研究。E-mail: lu_jia8299@163.com

* 通信联系人。E-mail: jfliu@hebut.edu.cn

换效率对信号光偏振态的随机变化不敏感^[7],且采用平行双抽运结构的偏振不敏感系统具有较高的转换效率^[8-9]。偏振复用技术可使系统传输速率加倍,增大通信系统容量提高传输信号的频谱利用率,实现光网络大容量、超高速光的传输。文献[8]对 SOA 中双抽运结构的 2.5 Gbit/s 偏振复用非归零码(NRZ)信号的偏振不敏感全光波长变换实现了无串扰接收。近两年 Zhou 等^[10-11]提出了一种新的系统结构来减少偏振复用信号的串扰,即在不同偏振方上分别使用两个 SOA 进行 FWM,实验实现了偏振复用正交相移键控(QPSK)信号偏振不敏感全光波长变换,并采用相干检测技术对转换信号实现无串扰接收。目前对偏振复用信号的全光波长变换的研究已有相关的理论推导和实验验证。

正交频分复用(OFDM)信号是一类特殊的多子载波调制技术,它利用频谱重叠的多个子载波来传输数据,因此具有很高的频谱效率。陈林等^[12]在直接检测光 OFDM 信号光纤传输系统中发现光正交频分复用信号能很好地抵抗光纤中的色散效应。而偏振复用信号与 OFDM 技术结合调制产生的偏振复用 OFDM 信号提高了信道的频谱利用率和系统容量,且抗衰落性强,可以动态调整子信道和上下行链路的带宽分配,因此引入偏振复用 OFDM 调制技术是非常有发展优势的^[13]。目前对 OFDM 调制信号的全光波长变换已有一些研究和报道,其中文献[14-17]分别对基于 SOA 中 FWM 的调制速率为 2.5 Gbit/s OFDM 信号的全光波长变换进行了理论和实验研究,证明经 SOA 四波混频效应后,产生新的波长信号光携带 OFDM 信号且偏振不敏感。但目前对于偏振复用技术与光 OFDM 相结合的全光波长变换还未见报道。

本文采用频域上变换直接检测的光 OFDM(DDO-OFDM)信号,实现了基于 SOA 中偏振复用 16 进制正交幅度调制-正交频分复用(16QAM-OFDM)信号的全光波长变换的研究,理论证明并系统仿真实现了基于平行双抽运结构调制速率为 2.5 Gbit/s 偏振复用 16QAM-OFDM 信号在 SOA 中的偏振不敏感全光波长变换,并采用直接检测方法接收转换光 16QAM-OFDM 信号,最后分析了影响系统转换效率的因素。

2 理论分析

图 1 表示了基于 SOA 中平行双抽运结构偏振复用 OFDM 信号全光波长变换的系统原理图。

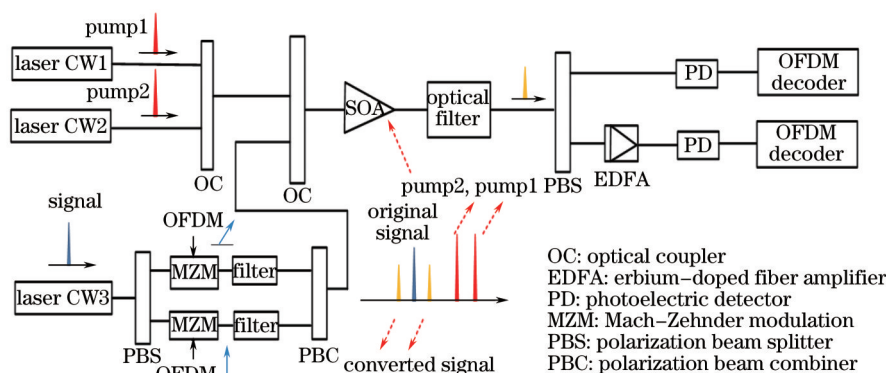


图 1 基于平行双抽运结构偏振复用 16QAM-OFDM 信号全光波长变换系统原理图

Fig.1 Principle of wavelength conversion based on parallel pump for polarization multiplexing 16QAM-OFDM signal

三个连续(CW)波激光器 CW1, CW2, CW3 分别产生两个平行双抽运光和一个信号光,其光场表达式可表示为 $|E_i(\omega_i, t)| = A_i \exp[j(k_i z - \omega_i t + \varphi_i)]$, $i = 1, 2, 3$, 式中 A_i 、 k_i 、 ω_i 、 φ_i 分别是幅度、波矢量大小、角频率、相位。 G_x 、 G_y 分别为 SOA 在 x 和 y 方向上的增益,且系统中 SOA 增益 $G_x = G_y$ 。抽运光与信号光的夹角如图 2 所示。

信号光 $E_3(\omega_3, t)$ 相对于抽运光的偏振角为 φ , 输入的正交 OFDM 调制信号 $s_1(t)$ 、 $s_2(t)$ 可以表示为

$$s_1(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=0}^{N-1} d_1(i) \exp(j\omega_i t), \quad t \in (0, T_s), \quad (1)$$

$$s_2(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=0}^{N-1} d_2(i) \exp(j\omega_i t), \quad t \in (0, T_s), \quad (2)$$

两个正交的 OFDM 调制信号 $s_1(t)$ 、 $s_2(t)$ 相对抽运光的偏振角分别为 θ 和 $\theta + 90^\circ$, 分别在输入光信号的偏振方

向对光信号进行调制,使光信号携带 OFDM 子载波。因此,信号光可表示为

$$\mathbf{E}_3 = \left\{ A_3 \sqrt{\frac{G_x}{N}} \left[\sum_{i=0}^{N-1} d_1(i) \exp(j\omega_i t) \cos(\varphi - \theta) \cos \theta - \sum_{i=0}^{N-1} d_2(i) \exp(j\omega_i t) \sin(\varphi - \theta) \sin \theta \right] \mathbf{x} + A_3 \sqrt{\frac{G_y}{N}} \left[\sum_{i=0}^{N-1} d_1(i) \exp(j\omega_i t) \cos(\varphi - \theta) \sin \theta + \sum_{i=0}^{N-1} d_2(i) \exp(j\omega_i t) \sin(\varphi - \theta) \cos \theta \right] \mathbf{y} \right\} \exp[j(k_3 z - \omega_3 t + \phi_3)] \quad (3)$$

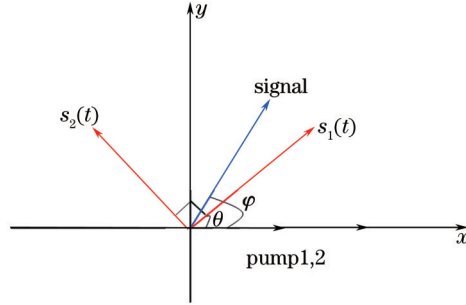


图2 输入光信号矢量图

Fig.2 Algebra model of the input optical signals

两个平行的抽运光与信号光耦合后进入 SOA,由于其中非线性介质产生四波混频效应如图 1 所示。耦合的光波由于非线性效应产生三个拍频波,频率分别为 $\omega_1 - \omega_2$ 、 $\omega_2 - \omega_3$ 、 $\omega_1 - \omega_3$,每个拍频波又分别对输入的抽运光和信号光进行调制从而产生新的光波信号^[18-19]。四波混频效应的产生,需满足有效地相位匹配即 $\Delta k = k_1 + k_2 - k_3 - k_s = 0$ ^[4,20-22]。考虑到转换光波信号要满足偏振不敏感性,在这里讨论转换效率较高的频率为 $\omega_c = \omega_1 - \omega_2 + \omega_3$ 的转换光波信号^[8,16]。它是由拍频为 $|\omega_1 - \omega_2|$ 调制光信号 ω_3 和拍频为 $|\omega_3 - \omega_2|$ 调制抽运光信号 ω_1 产生。拍频信号 $|\omega_1 - \omega_2|$ 和 $|\omega_3 - \omega_2|$ 的幅度为

$$\alpha_1 = r(\omega_1 - \omega_2) A_1 \cdot A_2^* \exp[j(\omega_1 - \omega_2)t], \quad (4)$$

$$\alpha_2 = r(\omega_3 - \omega_2) A_3 \cdot A_2^* \exp[j(\omega_3 - \omega_2)t], \quad (5)$$

$r(\omega_1 - \omega_2)$, $r(\omega_3 - \omega_2)$ 称为转换效率系数,它受非线性介质中三阶非线性 $\chi^{(3)}$ 的影响, $|r(\omega_1 - \omega_2)|^2 = R(\omega_1 - \omega_2)$ 与频率间隔成反比,因此 $r(\omega_1 - \omega_2) \gg r(\omega_3 - \omega_2)$ ^[18],因此转换光信号表达式可以简化为

$$\begin{aligned} E_c(\omega_c, t) = & A_1 A_2 A_3 G_x r(\omega_1 - \omega_2) \exp\{j[(\omega_1 - \omega_2 + \omega_3)t + (\varphi_1 - \varphi_2 + \varphi_3)]\} \\ & \left\{ \sqrt{\frac{G_x}{N}} \left[\sum_{i=0}^{N-1} d_1(i) \exp[j(\omega_i t)] \cos(\varphi - \theta) \cos \theta - \sum_{i=0}^{N-1} d_2(i) \exp[j(\omega_i t)] \sin(\varphi - \theta) \sin \theta \right] \mathbf{x} + \right. \\ & \left. \sqrt{\frac{G_y}{N}} \left[\sum_{i=0}^{N-1} d_1(i) \exp[j(\omega_i t)] \cos(\varphi - \theta) \sin \theta + \sum_{i=0}^{N-1} d_2(i) \exp[j(\omega_i t)] \sin(\varphi - \theta) \cos \theta \right] \mathbf{y} \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

转换信号的功率为

$$P_{\text{out}} = A_1^2 A_2^2 A_3^2 A_{\text{OFDM}} G_x^3 R(\omega_1 - \omega_2), \quad (7)$$

输入调制信号 $s_1(t)$, $s_2(t)$ 功率相同,其中 $P_{s_1} = P_{s_2} = A_{\text{OFDM}}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} |d_i|^2$,因此输出功率大小与输入 OFDM 调制信号的调制格式有关。由(7)式可以看出,频率为 $\omega_1 - \omega_2 + \omega_3$ 的转换光信号的输出功率与偏振角 φ 无关,因此转换光信号是偏振不敏感的。

通常,定义偏振角 $\varphi - \theta = (2n + 1)\frac{\pi}{4}$, $n = 0, 1, 2, \dots$,可以得到转换光信号的偏振角 α :

$$\tan \alpha = \sqrt{\frac{G_x}{G_y}} \times \frac{s_1(t) \cos \theta - s_2(t) \sin \theta}{s_1(t) \sin \theta + s_2(t) \cos \theta}, \quad (8)$$

偏振不敏感的转换光信号在接收端经偏振分束器后,分为两个相互正交偏振复用信号,因此只有当转换光信号偏振角 $\alpha = (2n + 1)\frac{\pi}{4}$, $n = 0, 1, 2, \dots$ 时,两束偏振复用信号功率相同。将偏振角 $\alpha = (2n + 1)\frac{\pi}{4}$, $n = 0, 1, 2, \dots$

代入(8)式,可知输入信号偏振角为 $\theta = \frac{n\pi}{2}$, $n = 0, 1, 2, \dots$ 时可在接收端得到无串扰偏振不敏感转换光信号。由(6)式可得

$$E_{c-x} = \sqrt{\frac{G_x}{N}} A_1 A_2 A_3 G_x r(\omega_1 - \omega_2) \sum_{i=0}^{N-1} d_1(i) \exp(j\omega_i t) \exp\{j[(\omega_1 - \omega_2 + \omega_3)t + (\varphi_1 - \varphi_2 + \varphi_3)]\} x, \quad (9)$$

$$E_{c-y} = \sqrt{\frac{G_y}{N}} A_1 A_2 A_3 G_x r(\omega_1 - \omega_2) \sum_{i=0}^{N-1} d_2(i) \exp(j\omega_i t) \exp\{j[(\omega_1 - \omega_2 + \omega_3)t + (\varphi_1 - \varphi_2 + \varphi_3)]\} y, \quad (10)$$

可知,转换信号光偏振分束后信号功率分别为

$$P_{c-x} = G_x^3 A_1^2 A_2^2 A_3^2 A_{\text{OFDM}} R(\omega_1 - \omega_2), \quad (11)$$

$$P_{c-y} = G_x^3 A_1^2 A_2^2 A_3^2 A_{\text{OFDM}} R(\omega_1 - \omega_2), \quad (12)$$

可知,基于平行双抽运结构的四波混频当信号光偏振角为 $\theta = \frac{n\pi}{2}$, $n = 0, 1, 2, \dots$ 时,可在接收端得到频率为 $\omega_s = \omega_1 - \omega_2 + \omega_3$ 携带 OFDM 调制信号的无串扰的偏振不敏感转换光信号。同时由(11)和(12)式可知 SOA 增益、信号光功率、抽运光信号间的频率间隔等因素对系统转换效率均存在一定影响。

3 仿真结果及分析

在基于平行结构的 SOA 的偏振复用信号的全光波长变换系统理论分析的基础上,用 VPI 搭建系统平台并仿真,实现了调制信号速率为 2.5 Gbit/s 时基于 SOA 中平行双抽运结构偏振复用 16QAM-OFDM 信号全光波长转换系统的波长变换,仿真结果如图 3 所示。

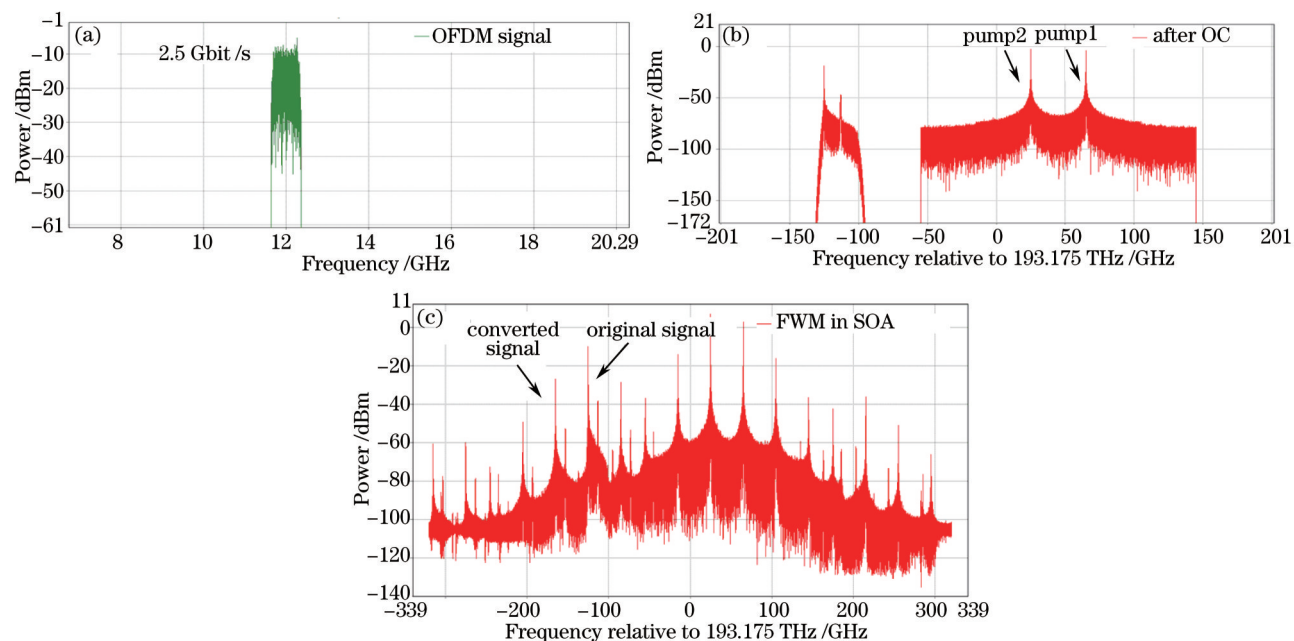


图3 系统仿真结果频谱图。(a) 2.5 Gbit/s 16QAM-OFDM 信号电频谱; (b) 信号光与抽运光耦合后的光频谱; (c) SOA 后四波混频光频谱

Fig.3 Spectra of simulation results in this system. (a) 2.5 Gbit/s 16QAM-OFDM signal electrical spectrum; (b) optical spectrum of signal and pumps after coupling; (c) optical spectrum of FWM after SOA

系统采用连续激光模块生成系统光载波,其中抽运光 CW1、CW2 和信号光频率分别为 193.24、193.2、193.05 THz,光功率分别为 10、10、5 mW。偏振复用 OFDM 信号的调制速率为 2.5 Gbit/s,中心载波频率为 12 GHz,采用 16QAM 编码格式,如图 3(a)所示。OFDM 信号经过马赫-曾德尔调制器(MZM)直接调制后与两平行抽运信号耦合[见图 3(b)],进入 SOA 发生四波混频效应[见图 3(c)],由光滤波器将频率为 193.01 THz 转换光信号滤出,偏振分束后分别用光电探测器(PD)直接拍频,最后对接收到的转换 16QAM-OFDM 信号进行解

调。图 4(a)和(b)则为接收端解调后 OFDM 信号 x 方向和 y 方向的星座图,相应误码率分别为 2.45×10^{-5} 和 6.60×10^{-5} ,可知转换信号最终可实现无串扰接收。但是由图 4(a)和(b)可以看出由于偏振复用后信号传输过程中会出现相位偏移,且直接检测的光 OFDM 产生的偏振相关损耗和偏振模色散^[22],以及非线性因素引起的 OFDM 信号间的载波干扰^[23]均会对系统产生影响,因此图中一些星座点出现较小的偏转,这种现象可通过相位补偿和信道均衡来提高系统性能。

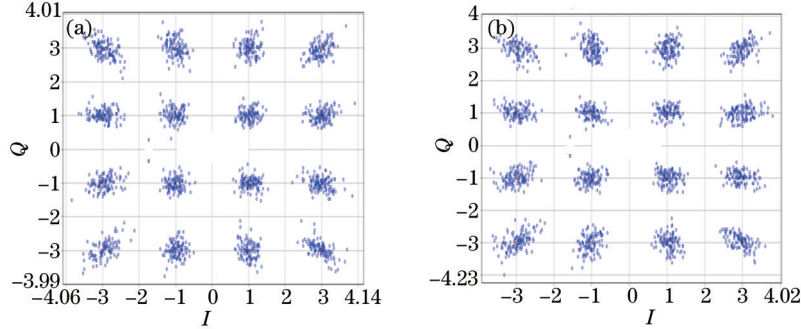


图 4 转换信号在接收端星座图。(a) x 方向; (b) y 方向

Fig.4 Constellation diagrams of polarization converted signal. (a) x direction; (b) y direction

下面通过改变系统参数讨论系统参数对系统转换效率的影响。

图 5 显示了信号光和抽运光之间的频率间隔 Δf_{p_1-s} 变化的误码曲线。由(11)式和(12)式可知偏振分束后的转换信号功率与 Δf_{p_1-s} 无关,因此抽运光和信号光频率间隔对系统转换效率影响不大,由图 5 可以看出误码曲线近似两条平行的直线,因此系统对不同光波长信号的全光波长转换具有一定的稳定性。图 6 为两平行抽运光间的频率间隔 $\Delta f_{p_1-p_2}$ 变化的误码曲线。由(11)式和(12)式可知相对转换效率系数 $r(\omega_1 - \omega_2)$ 与 $\Delta f_{p_1-p_2}$ 成反比,即当两抽运频率间隔增大时转换信号功率会随之降低,系统转换效率也越来越低。由图 6 可以看出随着 $\Delta f_{p_1-p_2}$ 的增大系统转换效率越低,误码率逐渐增大,当 $\Delta f_{p_1-p_2} = 0.055$ THz 时 y 方向接收的转换信号出现串扰,当 $\Delta f_{p_1-p_2} < 0.03$ THz 由于抽运光间的频率间隔太小,四波混频时信号串扰严重,因此当抽运光间的频率间隔为 $0.03 \text{ THz} \leq \Delta f_{p_1-p_2} \leq 0.05 \text{ THz}$ 时可实现转换信号无串扰的接收。

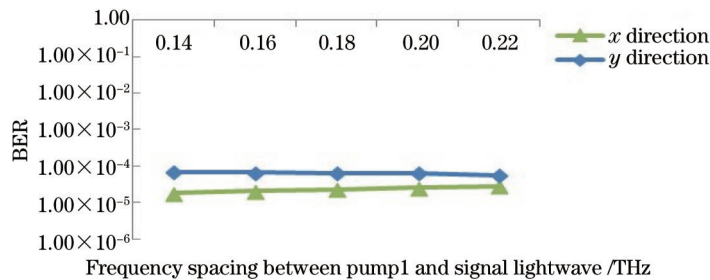


图 5 抽运光和信号光间频率间隔误码率

Fig.5 BER trend curve versus frequency spacing between pump1 and signal lightwave

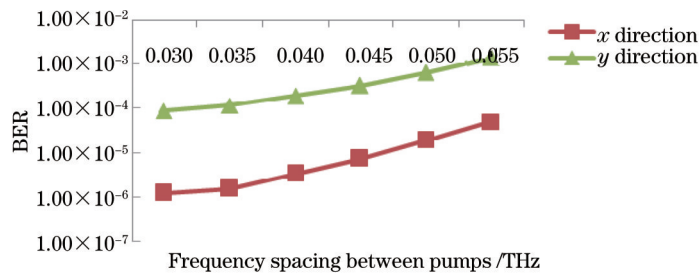


图 6 平行双抽运间频率间隔误码率

Fig.6 BER trend curve versus frequency spacing between pumps

通过增大 SOA 注入电流,可以提高 SOA 的增益。图 7 可以看出随着 SOA 中注入电流的增大,其误码率减小率变缓,即当注入电流越大时其增益也越大。由(7)式可知增益对转换信号光功率呈正比例关系,因此增大注入电流可提高系统转换效率。但 SOA 注入电流增大到 0.38 A 以后会逐渐达到饱和状态,此时系统误码率将趋于稳定不再随着注入电流增大而降低。

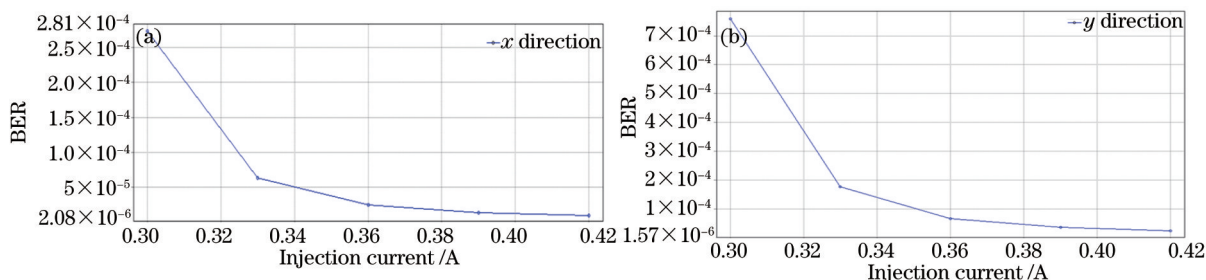


图 7 SOA 注入电流(光功率)对误码率的影响。(a) x 方向;(b) y 方向

Fig.7 BER trend curve versus SOA injection current. (a) x direction; (b) y direction

由图 8 可以看出信号光功率大小对系统误码率的影响,信号光功率小于 3 mW 时系统误码率增大,此时系统转换效率较低,转换信号功率太小导致接收时串扰严重。因此,增大信号光功率可提高系统转换效率,减少信号之间的串扰,当信号光功率在 7 mW 左右时系统误码率最低,此时系统转换效率较高,继续增加信号光功率后误码率曲线趋于缓和此时系统已达饱和状态。

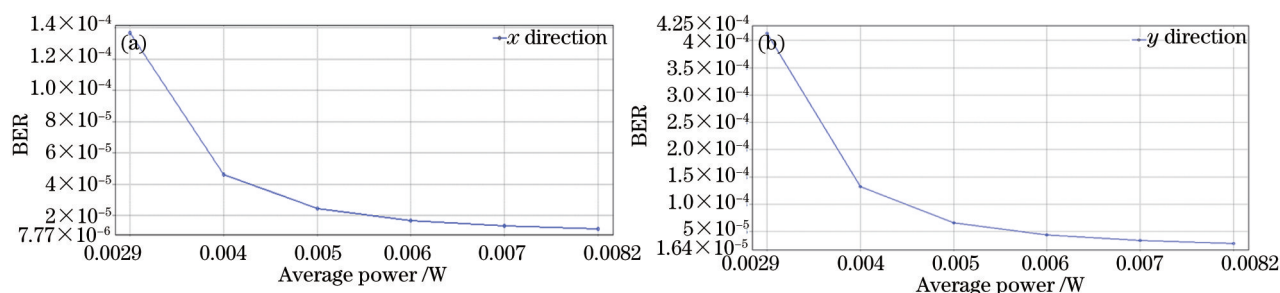


图 8 信号光功率对误码率的影响。(a) x 方向;(b) y 方向

Fig.8 BER trend curve versus power of signal. (a) x direction; (b) y direction

由(6)式可知信号光偏振角 φ 对转换信号的转换效率有影响,图 9 可以看出信号光偏振角对不同偏振方向转换信号影响不同, x 方向和 y 方向的误码率曲线的趋势是相反的,当信号光入射角在 $40^\circ \sim 60^\circ$ 时误码是在可以接受范围内的。由理论推导可知只有满足偏振不敏感全波长变换信号光入射角 $\varphi = \frac{n\pi}{4}$ 时可实现转换信号无串扰接收。由以上可知,当入射角为 45° 时系统误码率最低,转换信号功率达到最大值。

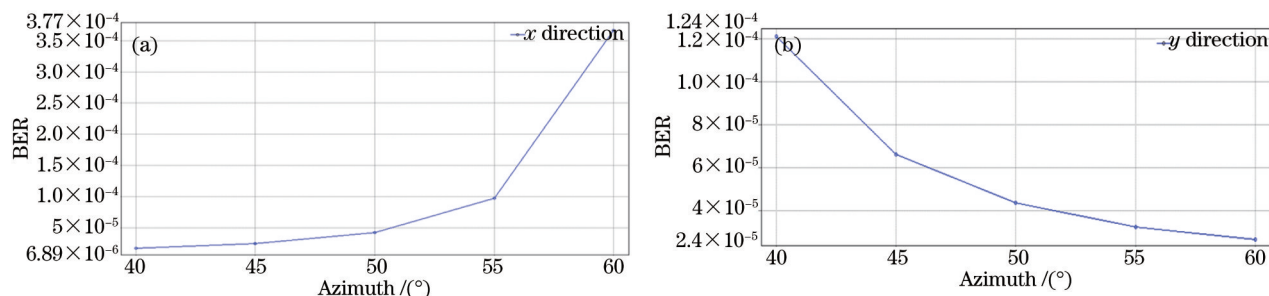


图 9 信号光入射角对误码率的影响。(a) x 方向;(b) y 方向

Fig.9 BER trend curve versus azimuth of signal. (a) x direction; (b) y direction

4 结 论

理论证明了基于 SOA 中平行双抽运结构偏振复用 16QAM-OFDM 信号的全波长变换,并得出实现偏振不敏感转换光信号接收的条件。通过 VPI 软件进行系统仿真,得出如下结论:1) 四波混频后得到频率为

$\omega_s = \omega_1 - \omega_2 + \omega_3$ 的转换光信号是偏振不敏感的且携带 OFDM 调制信号, 可实现无串扰的直接接收; 2) 由结论 1) 对系统转换效率进行了分析, SOA 注入光功率、信号光功率、信号光入射角及频率间隔都对系统转换效率有重要影响。以上系统仿真结果同时验证了理论分析的正确性。

参 考 文 献

- 1 Hanlim Lee, Hyunjae Yoon, Yonggyoo Kim, *et al.*. Theoretical study of frequency chirping and extinction ratio of wavelength-converted optical signals by XGM and XPM using SOA's[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1999, 35(8): 1213-1219.
- 2 Yueying Zhan, Min Zhang, Mintao Liu, *et al.*. All-optical format conversion of NRZ-OOK to QPSK and 16QAM signals via XPM in a SOA-MZI[J]. Chin Opt Lett, 2013, 11(3): 030604.
- 3 Jia Lu, Lin Chen, Z Dong, *et al.*. Polarization insensitive wavelength conversion based on orthogonal pump four-wave mixing for polarization multiplexing signal in high-nonlinear fiber[J]. J Lightwave Technol, 2009, 27(24): 5767-5774.
- 4 A Mecozzi, S Scotti, A D'Ottavi, *et al.*. Four-wave mixing in traveling-wave semiconductor amplifiers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1995, 31(4): 689-699.
- 5 Yueying Zhan, Min Zhang, Zhuo Liu. Simultaneous format conversion of parallel multichannel based on FWM in symmetric highly nonlinear fiber loop[J]. Chin Opt Lett, 2014, 12(3): 030602.
- 6 J Lu, Z Dong, L Chen, *et al.*. Polarization insensitive wavelength conversion based on four-wave mixing for polarization multiplexing signal in high-nonlinear fiber[J]. Opt Commun, 2009, 282(7): 1274-1280.
- 7 Huang Xinning, Xie Xiaoping, Zhao Wei, *et al.*. A high-efficiency tunable polarization-insensitive wavelength convertor based on degenerate four-wave mixing in a highly nonlinear photonic crystal fiber[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0505005.
黄新宁, 谢小平, 赵卫, 等. 基于光子晶体光纤中简并四波混频效应的高效可调谐偏振不敏感波长变换器[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0505005.
- 8 J Lu, J Yu, H Zhou, *et al.*. Polarization insensitive wavelength conversion based on dual pump four wave mixing for polarization multiplexing signal in SOA[J]. Opt Commun, 2011, 284(22): 5364-5371.
- 9 Jonathan P R Lacey, Mark A Summerfield, S J Madden. Tunability of polarization-insensitive wavelength converters based on four-wave mixing in semiconductor optical amplifiers[J]. J Lightwave Technol, 1998, 16(12): 2419-2427.
- 10 Hui Zhou, Jing He, Zizheng Cao, *et al.*. All-optical wavelength conversion scheme to reduce the crosstalk among the two multiplexed channels for polarization multiplexing system[J]. Optical Fiber Technology, 2013, 19(6): 549-555.
- 11 Hui Zhou, Jing He, Ze Dong, *et al.*. Theoretical and experimental study on wavelength conversion based on FWM for PDM-QPSK signals with digital coherent detection in HNLF[J]. Opt Commun, 2014, 376: 161-167.
- 12 Chen Lin, Cao Zizheng, Dong Ze, *et al.*. Experimental investigation of direct-detection optical orthogonal frequency division multiplexing transmission system[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(3): 554-557.
陈林, 曹子峥, 董泽, 等. 直接检测的光正交频分复用信号光纤传输系统实验研究[J]. 中国激光, 2009, 36(3): 554-557.
- 13 Jean Armstrong. OFDM for optical communications[J]. J Lightwave Technol, 2009, 27(3): 189-204.
- 14 Cao Zizheng, Dong Ze, Lu Jia, *et al.*. All optical orthogonal-pump wavelength conversion of optical OFDM signal[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2009, 20(5): 622-627.
曹子峥, 董泽, 卢嘉, 等. 光正交频分复用信号垂直泵浦全光波长变换研究[J]. 光电子·激光, 2009, 20(5): 622-627.
- 15 Zhou Hui, Dong Ze, Cao Zizheng, *et al.*. All-optical wavelength conversion for orthogonal frequency division multiplexing optical signal[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(4): 959-964.
周慧, 董泽, 曹子峥, 等. 正交频分复用信号的全光波长变换性能的研究[J]. 光学学报, 2010, 30(4): 959-964.
- 16 Lu Jia, Dong Ze, Cao Zizheng, *et al.*. All-optical wavelength conversion based on parallel dual-pump four-wave mixing in semiconductor optical amplifier for OFDM optical signal[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(11): 2858-2862.
卢嘉, 董泽, 曹子峥, 等. 基于半导体光放大器平行双抽运对 OFDM 光信号进行全光波长变换性能的研究[J]. 光子学报, 2009, 38(11): 2858-2862.
- 17 Dong Ze, Cao Zizheng, Lu Jia, *et al.*. All optical wavelength conversion based on four-wave mixing in semiconductor optical amplifier for OFDM optical signal[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(11): 2952-2956.
董泽, 曹子峥, 卢嘉, 等. 基于半导体光放大器的四波混频效应对正交频分复用光信号进行全光波长变换[J]. 中国激光, 2009, 36(11): 2952-2956.

- 18 Jianxin Ma, Jianjun Yu, Chongxiu Yu, *et al.*. Wavelength conversion based on four-wave mixing in high-nonlinear dispersion shifted fiber using a dual-pump configuration[J]. *J Lightwave Technol*, 2006, 24(7): 2851-2858.
- 19 Jianxin Ma, Jianjun Yu, Chongxiu Yu, *et al.*. Reducing polarization sensitivity for all-optical wavelength conversion of the optical packets based on FWM in the HNL-DSF using co-polarized pump scheme[J]. *Opt Commun*, 2006, 260(2): 522-527.
- 20 Jianhui Zhou, N Park, Jay W D, *et al.*. Efficiency of broadband four-wave mixing wavelength conversion using semiconductor traveling-wave amplifiers[J]. *IEEE Photonics Technology*, 1994, 6(1): 50-52 .
- 21 Nori S, Ralf P B, Robert G W. Phase-mismatch dependence of efficiency of wave generation through four-wave mixing in a single-mode optical fiber[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1987, 23(7): 1205-1210.
- 22 Hao Yaohong, Wang Rong, Li Yuquan, *et al.*. Investigation of polarization on 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.
- 23 Lu Zhenlong, Wang Junhua, Sun Yanzan, *et al.*. Inter-carrier interference suppression algorithm for OFDM-PON system based on pseudo-symmetrical training sequence[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 1006002.
路振龙, 王军华, 孙彦赞, 等. 基于伪对称序列的OFDM-PON系统载波间干扰抑制算法[J]. *光学学报*, 2013, 33(10): 1006002.

栏目编辑: 王晓琰