

高阶边带抑制比对全光波长变换系统性能的影响

常海悦^{1,2} 卢嘉^{1,2*} 王杨^{1,2} 马杰^{1,2}¹河北工业大学电子信息工程学院, 天津 300401²天津市电子材料与器材重点实验室, 天津 300401

摘要 理论研究并模拟仿真了高阶边带抑制比对于基于载波抑制平行抽运结构的偏振复用信号的全光波长变换系统的影响。根据贝塞尔函数曲线性质,通过控制射频信号电压,调节马赫-曾德尔调制器的调制深度,改变了各频率成分的光边带功率,进而得到具有不同高阶边带抑制比的偏振方向相同、相位锁定的平行抽运光,分析了不同边带抑制比下转换光的接收误码率性能。结果证明:通过控制调制器的调制深度在(1.7,2.0)范围内,对应得到边带抑制比在(7 dB,18 dB)范围内的平行抽运光,经过全光波长变换系统后 x 和 y 两个偏振方向上的转换光的误码率均达到 10^{-10} ,可实现偏振不敏感信号无串扰地直接接收,因此可以不使用滤波器将残留边带过滤掉,从而降低了系统的复杂度及成本。

关键词 光通信; 全光波长变换; 边带抑制比; 调制深度; 四波混频

中图分类号 TN929.11 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.100605

Influence of High Order Sideband Suppression Ratio on Performance of All-Optical Wavelength Conversion System

Chang Haiyue^{1,2} Lu Jia^{1,2} Wang Yang^{1,2} Ma Jie^{1,2}¹ School of Electronics and Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China² Tianjin Key Laboratory of Electronic Materials and Devices, Tianjin 300401, China

Abstract The influence of the high order sideband suppression ratio on the all-optical wavelength conversion system of the polarization multiplexing signal of parallel pumps based on carrier suppression is theoretically analyzed and simulated. According to the character of Bessel function curve, the optical sideband power with different frequencies is changed by controlling the radio frequency signal voltage and adjusting the modulation depth of the Mach-Zehnder modulator, then the parallel pump light with the same polarization direction, locked phase and different high order sidebands suppression ratios are obtained. The receiving bit error rate performance of the converting light under different sidebands suppression ratios is analyzed. The theoretical analysis and simulation results show that the bit error rate of the converted light on the x and y polarization directions can achieve 10^{-10} by controlling the modulation depth of the modulator in the range of (1.7,2.0), and the parallel pump light with the sidebands suppression ratio in the range of (7 dB,18 dB) is got correspondingly. The signal can be received by direct-detection without crosstalk. So there is no need to filter out the vestigial sidebands by using filter. It not only reduces the complexity of the system but also saves the system cost.

Key words optical communications; all-optical wavelength conversion; sideband suppression ratio; modulation depth; four-wave mixing

OCIS codes 060.1155; 060.4510; 060.4080; 190.4380

1 引言

全光波长变换(AOWC)技术可以充分地利用波长资源,提供操作上的透明性和空闲波长调度的灵活

收稿日期: 2016-06-03; 收到修改稿日期: 2016-06-28; 网络出版日期: 2016-09-20

基金项目: 河北省自然科学基金(F2014202036)

作者简介: 常海悦(1992—),女,硕士研究生,主要从事光通信方面的研究。E-mail: 2271677032@qq.com

导师简介: 王杨(1979—),女,博士,副教授,硕士生导师,主要从事通信工程等方面的研究。

E-mail: please1615@sohu.com

* 通信联系人。E-mail: lujia8299@163.com

性,满足未来动态路由分配需求。利用半导体光放大器(SOA)中四波混频(FWM)效应的 AOWC 技术具有宽波长转换带宽,低噪声特性,快速的响应时间,以及对信号速率和编码方式透明等优势,可以避免非线性以及色散效应对系统产生的影响,因此逐渐成为近年来的研究热点^[1-7]。利用双抽运结构在 SOA 中可以实现基于 FWM 的 AOWC 偏振不敏感系统。Lu 等^[8]对 SOA 中双抽运结构的 2.5 Gbit/s 偏振复用非零码(NRZ)信号的偏振不敏感全光波长变换实现了无串扰接收。其中,采用平行抽运结构的偏振不敏感 AOWC 系统具有更高的转换效率。Zhou 等^[9]研究了正交频分多路复用(OFDM)信号在 SOA 中基于平行抽运结构实现 AOWC,得到的转换光携带 OFDM 信号并且偏振不敏感。目前,卢嘉等^[10-11]采用转换效率较高的平行抽运结构实现 AOWC 系统,但发送端均是采用两个激光器得到两束抽运光,相位并不锁定,需要使用偏振器(PC)来控制偏振方向,同时也很难精确地控制两个激光器之间的频偏。如果激光器的发射波长不稳定,转换光信号的波长将会出现偏移现象。近几年,卢嘉等^[12-13]提出采用载波抑制方法得到平行抽运光来实现 AOWC。这种方法克服之前平行抽运存在的相位不锁定、频偏等问题,通过控制调制器两分支臂的信号电压,设置相位以及偏置电压来实现载波抑制调制。载波抑制得到的两个抽运光均来自于一个光源,偏振方向相同,相位锁定,不再需要 PC 或保偏光纤来控制光的传输方向,因此大大降低了系统的成本及复杂度。

以上文献主要集中采用载波抑制平行抽运来实现 AOWC,但是载波抑制过程中不同边带抑制比下的残留边带对系统性能影响的研究并未涉及,只是通过增大调制器射频信号电压来抑制高阶奇数边带,最后用滤波器将残留边带滤掉,但是实验过程中由于电子设备存在瓶颈,射频信号电压是有限制的。而高阶边带抑制比对于系统的影响还是存在的,正确控制调制器的调制深度,得到最佳边带抑制比,对信号的透明传输和系统的稳定性有重要的意义,并且可以降低实验过程的复杂度,进而减少系统成本。目前在光载无线通信(ROF)系统中通过调节调制深度得到不同边带抑制比的影响已有一些研究和报道。Ma 等^[14]研究了调制指数对基于单边带幅移键控(ASK)信号在全双工 ROF 链路的影响,实现高速率数据的光载毫米波的传输。王鑫等^[15]对调制深度在副载波 OFDM 光传输系统中的影响进行了理论和实验研究。赵建功等^[16]研究了通过改变调制指数实现 ROF 系统中对光载毫米波信号的无损传输。目前国内外对不同调制深度下得到的边带抑制比对全光波长变换系统性能的影响还缺乏研究。因此,分析边带抑制比在波长变换系统中的影响,对平行抽运结构的偏振不敏感 AOWC 系统的实现起到了完善作用。

本文采用载波抑制得到平行抽运光,实现了基于 SOA 中偏振复用 NRZ 信号的全光波长变换的研究,通过设置马赫-曾德尔调制器两支臂的相位和偏置电压,对载波抑制过程建立了准确的理论模型,不同边带抑制比下的平行抽运光相位锁定,偏振方向相同,接收端采用直接检测方法实现无串扰地接收。理论证明并系统仿真了在不同调制深度下高阶边带抑制比对平行抽运结构的波长转换效率的影响。

2 基本原理

SOA 中基于载波抑制得到平行抽运结构的全光波长变换的系统图如图 1 所示。一个连续激光器(CW1)的输入光强可以表示为

$$E_{in}(t) = A_0 \cos(\omega_0 t) \quad (1)$$

马赫-曾德尔(MZ)调制器的正弦调制电压可以表示为

$$V_{RF}(t) = V_{RF} \cos(\omega_e t) \quad (2)$$

式中, A_0 和 ω_0 分别是光载波幅度和角频率, V_{RF} 和 ω_e 分别是电信号的幅度和角频率。则调制器(MZ1)的输出为

$$\begin{aligned} E_{out}(t) = & \frac{1}{2} A_0 \left\{ \cos \omega_0 t \left[J_0(\beta) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(\beta) \cos [2n(\omega_e t + \phi_1)] \right] + \right. \\ & 2 \sin(\omega_0 t) \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n-1}(\beta) \cos [(2n-1)(\omega_e t + \phi_1)] + \\ & \left. \cos(\omega_0 t + \phi_0) \left[J_0(\beta) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(\beta) \cos(2n\omega_e t) \right] + \right. \\ & \left. 2 \sin(\omega_0 t + \phi_0) \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n-1}(\beta) \cos [(2n-1)\omega_e t] \right\} \quad (3) \end{aligned}$$

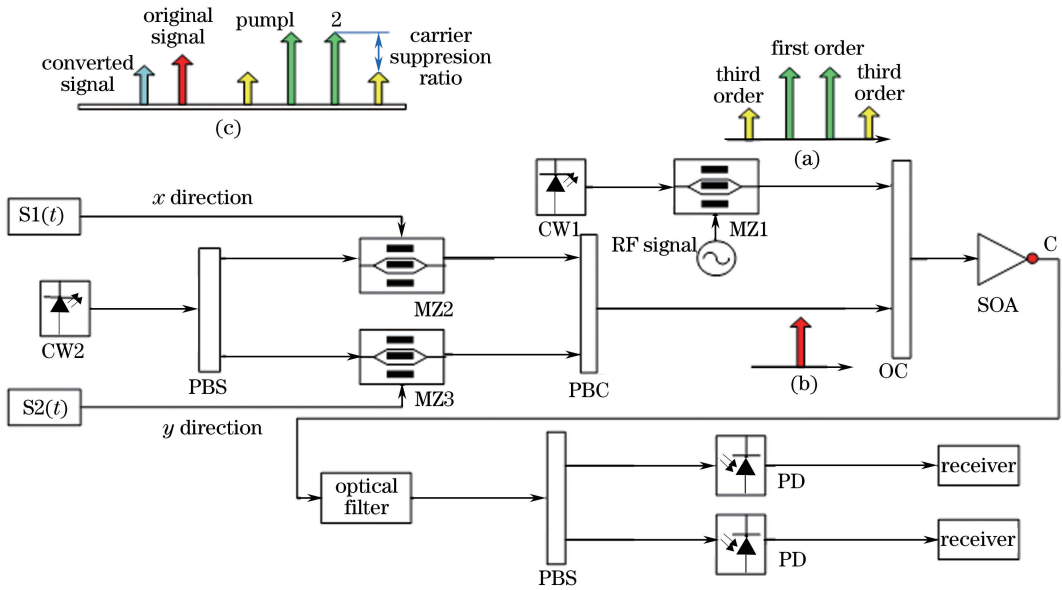


图 1 系统原理图。(a)载波抑制制得到的抽运光;(b)信号光;(c)C点处经过 SOA 波长转换后的光谱示意图

Fig. 1 System principle diagram. (a) Pump signal after carrier suppression; (b) signal light; (c) spectrum of converted signal after SOA at point C

式中, J_n ($n=0, 1, \dots$) 表示第 n 阶第一类贝塞尔函数, $\beta = \pi V_{RF} / V_{\pi}$ 表示调制器的调制深度。 $\phi_0 = \pi V_{b1} / V_{\pi DC}$ 是直流偏置电压引起的相位偏转, ϕ_1 为两臂电信号的相位差。从(3)式可以看出, 令相位差 $\phi_1 = \pi$, 直流偏置电压 $V_{b1} = V_{\pi DC}$, 即 $\phi_0 = \pi$ 时可以实现载波抑制, 载波与偶阶边带被抑制。载波抑制过程增加 β 数值可以抑制高阶边带的产生, 使整个系统的色度色散受到限制。射频信号的电压与调制深度 β 呈正比例关系, 在实验过程中, 由于电子设备存在瓶颈, 射频信号的电压是有限的, 所以载波抑制过程中会出现三阶边带抑制不彻底的现象。因此, 从理论上研究三阶边带对全光波长变换系统性能的影响。

分析 $n=2$ 时, 一阶边带与三阶边带同时存在的情况, 输出公式可以表示为

$$E_{out}(t) = 2A_0 \cos(\omega_0 t) \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n-1}(\beta) \cos[(2n-1)(\omega_e t + \pi)] \approx -A_0 \{ J_1(\beta) \{ \cos[(\omega_0 + \omega_e)t] + \cos[(\omega_0 - \omega_e)t] \} + J_3(\beta) \{ \cos[(\omega_0 + 3\omega_e)t] + \cos[(\omega_0 - 3\omega_e)t] \} \} \quad (4)$$

两个平行抽运光具有相同的偏振方向为 x 轴, 分别可以表示为

$$E_1(t) = A_0 \sqrt{G_x} [J_1(\beta) \cos(\omega_0 t - \omega_e t) + J_3(\beta) \cos(\omega_0 t - 3\omega_e t)] \hat{x}, \quad (5)$$

$$E_2(t) = A_0 \sqrt{G_x} [J_1(\beta) \cos(\omega_0 t + \omega_e t) + J_3(\beta) \cos(\omega_0 t + 3\omega_e t)] \hat{x}. \quad (6)$$

调制了偏振复用信号的信号光表达式为

$$E_3(t) = \{ [A_3 s_1(t) \sqrt{G_x} \cos(\varphi - \theta) \cos \theta + A_3 s_2(t) \sin(\varphi - \theta) \cos(\theta + 90^\circ)] \hat{x} + [A_3 s_1(t) \sqrt{G_y} \cos(\varphi - \theta) \sin \theta + A_3 s_2(t) \sin(\varphi - \theta) \sin(\theta + 90^\circ)] \hat{y} \} \cos(\omega_3 t), \quad (7)$$

式中, A_3 和 ω_3 分别表示幅度和角频率。 G_x 和 G_y 分别表示 SOA 中 x 轴和 y 轴的增益, 在理想情况下, $G_x \approx G_y$ 。两个平行抽运光与信号光耦合后进入 SOA, 由于其中非线性介质产生 FWM 效应。考虑到转换光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 $\omega_c = \omega_3 - 2\omega_e$ 的转换光信号。转换光信号表达式为

$$E_c(t) = G_x A_0^2 A_3 [J_1(\beta)^2 r(2\omega_e) \cos(\omega_3 t - 2\omega_e t) + A_0^2 J_1(\beta) J_3(\beta) r(4\omega_e) \cos(\omega_3 t - 4\omega_e t) + J_3(\beta)^2 r(6\omega_e) \cos(\omega_3 t - 6\omega_e t)] \left[\frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{G_x} s_1(t) \hat{x} + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{G_x} s_2(t) \hat{y} \right]. \quad (8)$$

频率为 $\omega_3 - 2\omega_e$ 处的转换光的转换功率与一阶边带的功率值有关, 而光边带分量的功率与贝塞尔阶数

的数值相关,从(8)式可以看出,转换光的效率与 $J_1(\beta)$ 数值呈正比例关系。由于存在三阶边带,FWM 过程会产生一些闲频光,进而影响系统的转换效率。因此着重分析了在调制深度的某一定范围内,三阶边带的存在对整个系统的波长转换效率的影响。由第一类贝塞尔函数曲线可知,当调制深度过大的时候,其他阶边带分量 $J_i(i=5, \dots, 2n-1)$ 幅值不断增加,使得(4)式中的高阶分量不能被忽略,因为转换光的功率只与 $J_1(\beta)$ 大小有关,所以 β 选取值不能过大。由第一类贝塞尔函数表查得,当 $\beta=1.84$ 时, $J_1(\beta)$ 为最大值。当 $0 \leq \beta \leq 1.84$ 时,随着调制深度的增加, $J_3(\beta)$ 与 $J_1(\beta)$ 同时增加, $J_1(\beta)$ 增加的速度明显大于 $J_3(\beta)$ 增加速度,进而出现了边带抑制比。当 $1.84 \leq \beta \leq 3$ 时, $J_3(\beta)$ 与 $J_1(\beta)$ 呈反比例关系, $J_3(\beta)$ 增加的同时 $J_1(\beta)$ 在减小,最后当 $\beta=3$ 时, $J_1(\beta)=J_3(\beta)$ 。当 $\beta \geq 3$ 时,三阶边带功率大于一阶边带功率,影响系统的转换效率。

设边带抑制比 $C_{SR} = J_1(\beta) - J_3(\beta)$,图 2 是根据贝塞尔曲线得到的 C_{SR} 的关系图。由图 2 可知,随着 β 的增加, C_{SR} 呈现出两个阶段,第一阶段是当 $\beta \leq 1.6$ 时,呈现单调递增趋势,当 $\beta=1.6$ 时,一阶与三阶的贝塞尔差值达到最大值;第二阶段是随着 β 的增大,呈现单调递减的趋势,当 $\beta=3$ 时,一阶边带与三阶边带幅度相等即差值为 0,随着 β 的继续增大, C_{SR} 在负方向呈现增大趋势。通过对图 2 的分析,当 $\beta=1.6$ 即边带抑制比最大时所对应的 $J_1(\beta)$ 并不是最大值,当 $\beta=1.84$ 时,对应的 $J_1(\beta)$ 为最大值。由(8)式可知, $J_1(\beta)$ 数值影响的是转换光的功率。论证了在全光波长变换系统中,并不是边带抑制比越大越好,应该根据贝塞尔曲线性质选取调制深度的取值。因此,在考虑转换光的效率的基础上,应选择 β 在(1.6,3)这个单调区间。

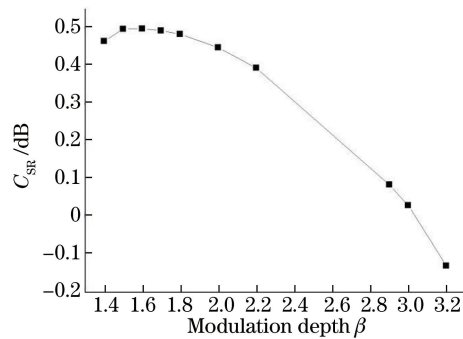


图 2 C_{SR} 随调制深度 β 变化的理论曲线图

Fig. 2 Theoretical plot of C_{SR} versus modulation depth β

3 仿真结果及分析

在采用载波抑制得到平行抽运光在 SOA 中实现全光波长变换系统理论分析的基础上,用 Optisystem 搭建系统平台并仿真,实现信号速率为 2.5 Gbit/s 的 NRZ 偏振复用信号的全光波长变换。激光器(CW1)产生频率为 193.22 THz 的连续光,射频信号的驱动频率为 20 GHz,通过调节射频信号的电压改变调制器的调制深度,实现载波抑制调制方式,整个过程中三阶与一阶边带功率会随着参数发生变化,得到不同的边带抑制比 C_{SR} 。图 3 为通过改变调制器的调制深度,得到 C_{SR} 的系统仿真图。图 3 中同样有两个阶段,当 $\beta=1.5$ 时, C_{SR} 为 22 dB, $\beta=1.6$ 时, C_{SR} 达到最大值为 48 dB,然后随着调制深度的增加 C_{SR} 呈现单调递减趋势,系统仿真证明了理论分析的正确性,因此主要研究 β 在(1.6,3)范围内边带抑制比对波长变换的影响。

图 4 为所截取的 β 值分别为 1.6,1.84,3.0,3.2 的情况下对应 C_{SR} 分别为 48 dB,11 dB,0 dB,-5 dB 的光谱图。由图 4 可以看出,光谱图趋势与理论分析趋势结果一致,证明了该调制器参数取值范围与理论分析数值一致。

从激光器 CW2 输出频率为 193.05 THz,偏振角度为 45° 的连续光作为信号光。采用极化式光束分离器(PBS)将信号光偏振分离成两路正交光,将基带信号 NRZ 分别调制到两路正交光上,并利用偏振耦合器(PBC)耦合实现偏振复用。两平行抽运光和偏振复用信号光利用 OC 进行耦合。图 5(a)为 $\beta=1.84$, $J_1(\beta)$ 为最大值, $C_{SR}=11$ dB 下偏振复用 NRZ 信号进入 SOA 之前光谱图,根据(8)式可知,此时得到的转换光误码特性最好,虽然同时会产生一些闲频光,但此时 $J_3(\beta)$ 数值很小,所以闲频光功率也很小,对转换光功率影响不大。此系统采用了 2.5 Gbit/s 的 NRZ 信号。耦合后的信号进入 SOA 中,SOA 的工作电流为 0.32 A。

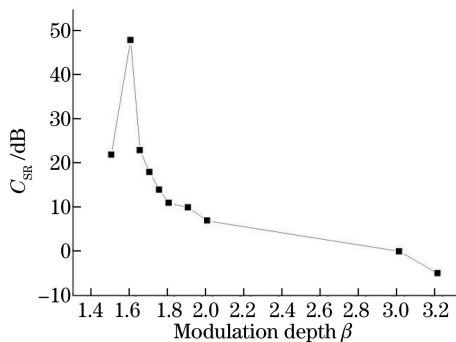
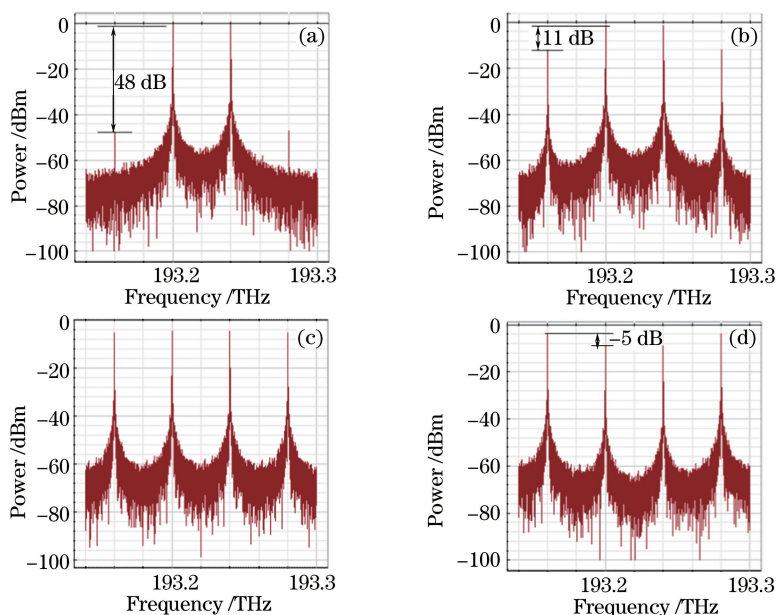
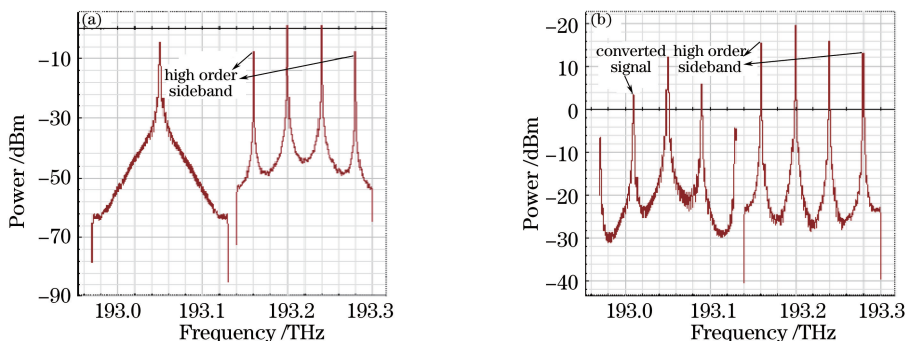
图 3 C_{SR} 随调制深度 β 变化的仿真曲线图Fig. 3 Simulated plot of C_{SR} versus modulation depth β 图 4 不同 C_{SR} 的光谱图。(a) $C_{SR} = 48$ dB; (b) $C_{SR} = 11$ dB; (c) $C_{SR} = 0$ dB; (d) $C_{SR} = -5$ dBFig. 4 Optical spectrum with different C_{SR} . (a) $C_{SR} = 48$ dB; (b) $C_{SR} = 11$ dB; (c) $C_{SR} = 0$ dB; (d) $C_{SR} = -5$ dB

图 5 频谱图。(a) 进入 SOA 之前; (b) 进入 SOA 之后

Fig. 5 Spectrogram. (a) Before entering SOA; (b) after entering SOA

由于 SOA 中的四波混频效应而产生的光谱图如图 5(b)。

接收端采用直接检测方式, 转换光经 PBS 分离成两个相互垂直的光波, 图 6(a) 和 (b) 分别为偏振复用 NRZ 信号的接收信号 x 方向和 y 方向的眼图, 在接收光功率为 -20 dBm 时, x 方向的误码率 (BER) 为 1.7×10^{-10} , y 方向的 BER 为 2.9×10^{-10} 。偏振复用信号间的串扰会有一些噪声在眼图中, 会导致一小部分能量的损失, 但基本上与理论分析一致。

图 6(a)和图 6(b)分别是 x 和 y 两个方向在接收光功率为 -20 dBm 时,控制 β 在 $(1.6, 3)$ 这个范围内时对应不同 C_{SR} 下的 BER。图中分别给出了 x 和 y 两个方向上 BER 最好与最差所对应的眼图。由眼图可以看出,当调制器的 $\beta=1.84$, 对应的 C_{SR} 为 11 dB 时,并没有因为三阶边带的存在影响接收端 BER 的性能。由图 6 可知,采用载波抑制得到抽运光时,将调制器的调制深度控制在 $(1.7, 2.0)$ 内,边带抑制比在 $(7, 18)$ dB 内, x 和 y 两个方向得到的 BER 均在同一个数量级,可以达到 10^{-10} , 能够实现转换光的无串扰接收。因此,可以省略掉滤波器滤掉三阶边带的步骤,既简化了实验装置的过程,也降低了整个系统的成本。

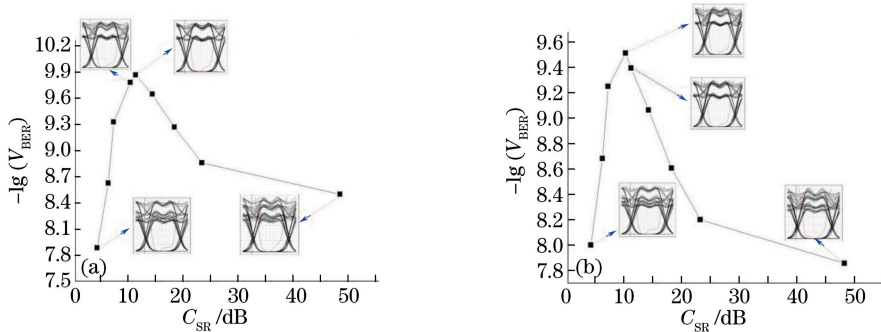


图 6 不同 C_{SR} 下的 BER。(a) x 方向;(b) y 方向

Fig. 6 BER with different C_{SR} . (a) x direction; (b) y direction

4 结 论

理论分析并模拟仿真了高阶边带抑制比对于基于载波抑制平行抽运结构的偏振复用 NRZ 信号在光半导体放大器中的全光波长变换系统性能的影响。通过系统仿真得出当控制调制器调制深度在 $(1.7, 2.0)$ 范围内,对应边带抑制比在 $(7, 18)$ dB 范围内时,高阶边带的存在对整个系统的转换光功率影响不大,对接收端的 BER 性能没有影响。省去了利用滤波器过滤三阶边带的步骤,降低系统的复杂度和成本。并且达到调制器的调制深度的控制范围,对光电器件的带宽和射频信号的频率需求低,接收机灵敏度高,频谱效率高,功率损耗小。

参 考 文 献

- 1 Porzi C, Bogoni A, Contestabile G. Regenerative wavelength conversion of DPSK signals through FWM in an SOA[J]. Ieee Photonic Tech L, 2013, 25(2): 175-178.
- 2 Lu J, Chen L, Dong Z, *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.
- 3 Lu J, Dong Z, Chen L, *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.
- 4 Zhou H, He J, Dong Z, *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.
- 5 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.
- 6 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.
- 7 Dong Z, Yu J, Chien H C, *et al.* Wavelength conversion for 1.2 Tb/s optical OFDM superchannel based on four-wave mixing in HNLF with digital coherent detection[C]. European Conference and Exhibition on Optical Communication, 2011: 1-3.
- 8 Lu J, Yu J, Zhou H, *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 Zhou H, He J, Dong Z, *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, 316(316): 161-167.
- 10 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): 2857-2862.
- 11 Lu Jia, Hu Yuanyuan, Liu Jianfei, *et al.* All-optical wavelength conversion based on parallel dual-pump for polarization Multiplexing OFDM signal in SOA[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(2): 0205005.
卢嘉,胡圆圆,刘剑飞,等. 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[J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 0205005.
- 12 Lu Jia, Meng Jiao, Liu Jianfei, *et al.* Research on all optical wavelength conversion for cost-effective polarization multiplexing OFDM signal[J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2016, 45(1): 13-18.
卢嘉,孟娇,刘剑飞,等. 高性价比偏振复用信号全光波长变换的研究[J]. *河北工业大学学报*, 2016, 45(1): 13-18.
- 13 Yu J, Huang M F. Wavelength conversion based on copolarized pumps generated by optical carrier suppression[J]. *Ieee Photonic Tech L*, 2009, 21(6): 392-394.
- 14 Ma J, Yu J, Yu C, *et al.* Influence of the modulation index of Mach-Zehnder modulator on ROF link with ASK millimeter-wave signal[J]. *Opt Laser Technol*, 2009, 41(1): 11-16.
- 15 Wang Xin, Chen Lin, Cao Zizheng. Influence of modulation depth on optical subcarrier OFDM system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 0506002.
王鑫,陈林,曹子峥. 调制深度对副载波正交频分复用光传输系统性能的影响[J]. *光学学报*, 2011, 31(5): 0506002.
- 16 Zhao Jiangong, Liu Zengji, Liu Xiangling, *et al.* Optimum Modulation Index for Single Sideband Radio over Fiber System [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(7): 1960-1964.
赵建功,刘增基,刘香玲,等. 单边带光纤承载射频系统的最佳调制指数[J]. *光学学报*, 2010, 30(7): 1960-1964.