

垂直双抽运结构 PM-OFDM 信号对全光波长变换系统的影响

卢 嘉^{1,2} 马 杰^{1,2} 刘剑飞^{1,2} 孟 娇^{1,2}

¹河北工业大学电子信息工程学院, 天津 300401

²天津市电子材料与器件重点实验室, 天津 300401

摘要 对垂直双抽运结构的偏振复用信号在半导体光放大器(SOA)中的全光波长变换(AOWC)进行了研究。理论分析了激光器线宽对此系统性能的影响,仿真研究了偏振复用-正交频分复用(PM-OFDM)信号在此系统中传输的性能。仿真结果显示,当系统的光信噪比为 10 dB 时,10 Gbit/s 的 PM-OFDM 信号经过 SOA 中的四波混频效应后,在接收端能够实现无串扰偏振不敏感 PM 信号的接收,其中 x 和 y 方向对应的系统误码率分别为 1.16×10^{-4} 和 1.06×10^{-5} 。仿真结果表明激光器线宽,OFDM 信号的子载波个数,信道功率,以及 OFDM 调制格式均与系统波长转换效率有关,且仿真结果与理论推导结果一致。

关键词 光通信; 正交频分复用; 偏振复用; 半导体光放大器; 四波混频

中图分类号 TN929.11

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0606001

Influence of Orthogonal Dual-Pump PM-OFDM Signal on All-Optical Wavelength Conversion System

Lu Jia^{1,2} Ma Jie^{1,2} Liu Jianfei^{1,2} Meng Jiao^{1,2}

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

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

Abstract The all-optical wavelength conversion (AOWC) based on orthogonal dual-pump for polarization multiplexing signal in semiconductor optical amplifier (SOA) is investigated. The influence of laser line-width on the performance of all-optical wavelength conversion is theoretically investigated, and the transmission performance of polarization-multiplexing-orthogonal-frequency-division-multiplexing (PM-OFDM) signal in the system is simulated. The simulation results show that when the optical signal-to-noise ratio is 10 dB, the polarization insensitive signal can be received as two light waves without crosstalk as a result of four-wave mixing effect for 10 Gbit/s PM-OFDM signal propagating in the SOA, and the bit error rates are 1.16×10^{-4} in x -direction and 1.06×10^{-5} in y -direction, respectively. Meanwhile, the simulation results indicate that laser line-width, number of sub-carriers of OFDM signal, channel power, and modulation format, obviously influence the AOWC conversion efficiency. The theoretical derivation is well consistent with the simulation result.

Key words optical communications; orthogonal frequency division multiplexing; polarization multiplexing; semiconductor optical amplifier; four-wave mixing

OCIS codes 060.1155; 060.4230; 060.4370; 060.4510

1 引 言

在通信网中全光波长变换(AOWC)能够实现波长重用,有效解决网络内受到有限波长信道数量限制的波

收稿日期: 2015-11-23; 收到修改稿日期: 2016-01-04

基金项目: 河北省自然科学基金青年基金(F2014202036)、河北省高层次人才项目(C2013001048)、河北省高等学校高层次人才科学研究项目(GCC2014011)、天津市自然科学基金(15JCYBJC17000)

作者简介: 卢 嘉(1982—),女,博士,讲师,主要从事光通信等方面的研究。E-mail: lujia8299@163.com

长争用问题,提高网络的容量利用率和传输速率,因此受到广泛研究。四波混频(FWM)信号携带了信号光的振幅和相位信息,是一种能对输入信号进行完全透明波长变换的AOWC。目前利用FWM效应实现的AOWC^[1-7]多采用半导体光放大器(SOA)或高非线性光纤(HNLF)。基于SOA中的FWM效应的波长变换,响应时间短,可以避免非线性色散效应对系统产生的影响,实现系统的集成化、小型化。在SOA的FWM的实现中,基于单抽运的系统是偏振敏感的,而双抽运的系统是偏振不敏感的^[8-10]。近几年,相关文献^[10]对双抽运结构的2.5 Gbit/s偏振复用(PM)非归零复用信号的偏振不敏感AOWC实现了无串扰接收。周慧等^[11-13]实现了PM正交相移键控(QPSK)信号的偏振不敏感AOWC的研究。

正交频分复用(OFDM)信号是特殊的子载波调制系统,它利用频谱重叠的多个子载波传输数据,各个子载波之间相互正交,因此具有很强的抗干扰、抗衰落能力以及很高的频谱效率^[14-16]。随着人们对通信质量及业务量的需求越来越高,系统传输率逐渐向更高速率过渡,单载波系统的复杂度急剧上升,尤其是采用多进制调制格式时,在可控的复杂度下OFDM提供了极大的系统灵活性。OFDM信号的AOWC由于具有较高的频谱利用率和通信容量,成为未来实现高速全光网络系统的关键技术之一。目前对PM-OFDM信号的AOWC已有了一些研究。相关文献^[17]实现了在SOA中平行双抽运结构的PM-OFDM信号的AOWC,PM技术与OFDM信号相结合的技术,极大地提高了系统通信容量和频谱利用率。

此外,激光器的相位噪声对光OFDM的影响较大,尤其是采用高阶星座图实现调制的信号^[18]。目前许多研究人员已经致力于激光器的研究设计,通过降低激光器的线宽^[19-20]来降低相位噪声对系统的影响。虽然双抽运系统是偏振不敏感的,但平行双抽运结构系统,其新产生的信号与原始信号的频率差较小,易产生串扰。而采用垂直抽运结构的系统,新产生的信号与原始信号的频率差比较大,不易产生串扰,且系统的转换范围较大。本文理论分析并模拟仿真实现了基于SOA垂直双抽运结构的偏振复用OFDM(PM-OFDM)信号的AOWC系统。同时理论分析了激光器线宽以及PM-OFDM信号对全光波长变换系统性能的影响,并模拟仿真验证了理论分析的准确性。

2 系统原理及理论分析

垂直抽运结构的PM-OFDM信号在SOA中的AOWC原理图如图1所示。两路抽运光和信号光分别由连续激光器CW1、CW2、CW3生成。OC为光耦合器,PD为光电探测器,MZ为马赫-曾德尔调制器,PBS为偏振分束器,PBC为偏振合束器。图1(a)是垂直抽运结构中输入光信号矢量方向的表示图, φ 是输入信

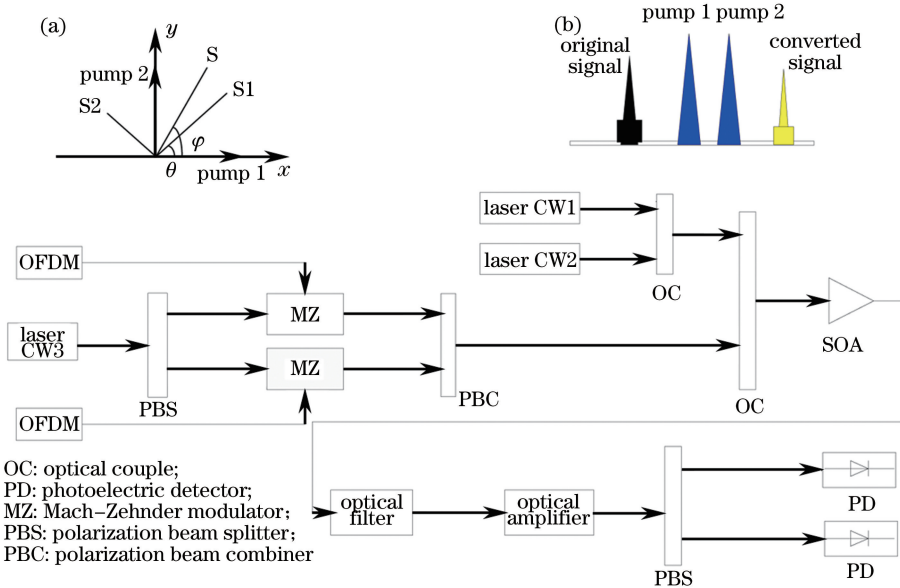


图1 垂直抽运结构的PM-OFDM信号在SOA中AOWC原理图。(a)光谱矢量图;(b)波长变换频谱图

Fig. 1 Principle of AOWC of PM-OFDM signal in SOA with orthogonal pumping.

(a) Spectral vector graphics; (b) spectrum after wavelength conversion

号光 $E_3(\omega_3, t)$ 相对于 x 方向抽运光的偏移量。信号光经偏振分束器分成两个相互垂直的信号光 S1 和 S2, S1、S2 相对于 x 方向抽运光的偏振角分别为 θ 和 $\theta+90^\circ$ 。

信号光和两抽运光耦合注入 SOA, 由于 SOA 的非线性效应发生 FWM 产生转换光, 在接收端对转换光信号进行无串扰接收, 转换光信号经偏振分束得到两束相互正交的偏振信号, 功率分别为

$$P_{c-x} = \frac{1}{2} A_1^2 A_2^2 A_3^2 A_{\text{OFDM}} G_x^3 R(\omega_1 - \omega_3), \quad (1)$$

$$P_{c-y} = \frac{1}{2} A_1^2 A_2^2 A_3^2 A_{\text{OFDM}} G_x^3 R(\omega_2 - \omega_3), \quad (2)$$

式中 A_1 、 A_2 分别为两抽运光幅度, A_3 为信号光幅度, A_{OFDM} 为 OFDM 调制信号光功率, $R(\omega_1 - \omega_3)$ 为拍频波 $\omega_1 - \omega_3$ 的转换效率系数, $R(\omega_2 - \omega_3)$ 为拍频波 $\omega_2 - \omega_3$ 的转换效率系数, G_x 为 SOA 在 x 方向的增益。由于转换光信号与偏振角无关, 因此在垂直双抽运结构的 FWM 过程中, 频率为 $\omega_c = \omega_1 + \omega_2 - \omega_3$ 的转换光信号是偏振不敏感的。

2.1 激光器线宽对系统的影响

在半导体激光器中, 造成光谱展宽的因素有很多, 如激光器自发辐射导致的静态线宽即相位噪声, 注入载流子起伏产生的强度噪声, 调制产生的啁啾等。此处主要考虑激光器静态线宽, 即相位噪声对系统转换效率的影响。激光器的相位噪声是由光子自发辐射产生的光场相位波动引起的。在时间区间 τ 内, 相位噪声 $\Delta\varphi_{\text{ns}}(t)$ 的变化服从高斯分布, 方差可表示为^[21]

$$\langle \Delta\varphi_{\text{ns}}^2(\tau) \rangle = W_{\varphi_{\text{ns}}} |\tau| = \frac{2|\tau|}{t_c}, \quad (3)$$

式中 $W_{\varphi_{\text{ns}}}$ 为相位噪声的功率谱密度, t_c 为激光器的相干时间。

激光器的线宽是光场功率谱密度的半峰全宽, 可表示为

$$\Delta\lambda = \frac{W_{\varphi_{\text{ns}}}}{2\pi} = \frac{1}{\pi t_c}, \quad (4)$$

由(3)式和(4)式可知, 激光器的相位噪声和线宽的关系表达式为

$$\langle \Delta\varphi_{\text{ns}}^2(\tau) \rangle = 2\pi\Delta\lambda |\tau|, \quad (5)$$

由(5)式可知, 随着激光器线宽的增大, 相位噪声也增大。

已知输出激光相位噪声的误码率 B_{BER} 与信噪比的表达式为^[22-23]

$$\lg B_{\text{BER}}(\gamma, \sigma_\varphi) \approx -6.05 - 0.265(\gamma - 20), \quad (6)$$

式中 σ_φ 为相位噪声方差, γ 为信噪比。由(6)式可知, B_{BER} 随信噪比的增大而减小。当 B_{BER} 加倍时, 信噪比损失 0.5 dB。因此, 为减小系统相位噪声, 改善系统 B_{BER} , 应适当提高系统的信噪比。然而实际情况并不能随意提高信噪比。此处通过减小激光器线宽来达到目的。如图 1 所示, 在光信噪比保持不变的条件下, 减小激光器线宽, 则相位的不确定性减小, 即相位噪声减小, 接收机的灵敏度变大, B_{BER} 得到改善, 从而提高了系统的波长转换效率。由(1)式和(2)式可知, 信号光和抽运光的功率均会对系统的 B_{BER} 产生影响。输出光功率 P_{out} 与激光器线宽的表达式为

$$\Delta\lambda = \frac{V_g^2 h\nu g_{\text{th}} n_{\text{sp}} \alpha_i}{8\pi P_{\text{out}}} (1 + \beta_c^2), \quad (7)$$

式中 V_g 为光的群速率, $h\nu$ 为光子能量, g_{th} 为阈值增益, α_i 为腔损耗, n_{sp} 为自发辐射因子, β_c 为线宽增强因子。由(7)式可知, 多种因素如激光器材料、光学谐振腔和激光器的工作模式等都可以影响激光器的线宽。当增大激光器的输出功率时, $\Delta\lambda$ 将减小。同时, 由(1)式和(2)式可知, 增大输出光功率, 转换信号光功率会增加, 系统 B_{BER} 得到改善。

2.2 OFDM 子载波个数对系统的影响

该系统的 OFDM 信号包含 64 个子载波。系统中的两个抽运光用来产生激发 SOA 增益机制的注入电流, SOA 中活跃区的载流子浓度速率方程可表示为^[24]

$$\frac{\partial n(t)}{\partial t} \approx \frac{I_{\text{el}}}{q_e V_k} - R_{\text{ASE}} - R_{\text{NSTI}} - R_{\text{SIG}}, \quad (8)$$

式中 I_{ei} 、 V_k 分别是 SOA 中的注入电流和活跃区体积。 q_e 为电子的绝对值, R_{ASE} 、 R_{NSTI} 和 R_{SIG} 分别为受激辐射速率, 自发复合率和信号重组率。经过 SOA 后, 各参量均会变化。在稳定状态下, 不考虑 R_{ASE} 和 R_{NSTI} 的变化率, 则归一化后的信号重组率为^[25]

$$R_{SIG} = g_m \frac{\exp(gL_s)}{gL_s} \left| \sum_n a_n \exp(jn\Delta\omega t) \right|^2, \quad (9)$$

式中 g 是载流子密度变化的净增益, g_m 是 SOA 的材料增益, L_s 是 SOA 活跃区长度, a_n 是第 n 个子载波的幅度, $\Delta\omega$ 是相邻子载波间的频率间隔。

由于 $g = \Gamma g_m - \alpha$, Γ 为限制因子, 且 $\Gamma > 0$, α 与内部损失有关。

由(9)式可知, 在保持信号功率不变的条件下, 增加子载波个数 n , 会使 g 相应减小, 产生的载流子浓度随之减小。而 SOA 内的增益系数与载流子浓度和入射波长有关, 因此增加子载波个数会相应减小 SOA 的增益。由(1)式和(2)式可知, 转换光功率随 SOA 增益的减小而降低, 这样会导致系统波长转换效率变低。

2.3 OFDM 信道功率对系统的影响

通过 FWM 过程新产生的频率总数为 $N = M^2(M-1)/2$, OFDM 信号包含 64 个子载波, 因此系统会产生很多个新频率。其中有些新频率会对系统产生重要影响, 特别是那些与已存在的信道一致的频率。已知新产生光频率的功率与处理过程中涉及的光信号功率有关, 即

$$P_{ijk} \sim \left(\frac{2\pi f_{ijk} n_1 d_{ijk}}{3cA_{eff}} \right)^2 P_i P_j P_k L_{eff}^2, \quad (10)$$

式中 f_i 、 f_j 、 f_k 为三个光信号的频率, f_{ijk} 为转换光信号的频率, d_{ijk} 为退化度, 它在退化情况下为 3, 在非退化情况下为 6。 P_{ijk} 为转换光信号的功率, c 为光速, n_1 为折射率, L_{eff} 为转换介质有效长度, 新产生的多个频率如果与某个原有信道频率一致, AOWC 系统中的 FWM 将会对信号退化产生重要影响, 从而不可避免地影响转换信号光功率。在不改变子载波个数的情况下, 减小每一个信道功率, 阻止形成理想的相位匹配, 从而减小 OFDM 信号子载波之间的 FWM, 降低新产生频率与转换光信号频率重叠的概率, 进而减小存在于转换光信号中的噪声, 使接收机灵敏度变大, B_{BER} 得到改善。

2.4 OFDM 调制格式对系统的影响

光 OFDM 技术可与多种先进复用技术、高阶调制技术等结合, 从而提高整个光纤通信系统的传输容量。OFDM 信号的调制格式有很多种, 其中多进制正交幅度调制 (M -QAM) 是最常用的调制格式之一。假设已调信号的最大幅度为 1, 对于绝对相位调制 (M -PSK) 而言, 星座图上信号间的最小距离为

$$d_{M-PSK} = 2 \sin \left(\frac{\pi}{M} \right), \quad (11)$$

对于 M -QAM 来说, 若星座图为矩形, 则星座图上信号间的最小距离为

$$d_{M-QAM} = \frac{\sqrt{2}}{L-1} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{M}-1}, \quad (12)$$

式中 $M = L^2$, L 是星座图上信号点在水平轴和垂直轴投影的电平数。由(11)式和(12)式可知, 当 $M = 4$ 时, $d_{4QAM} = d_{4PSK}$, 但当 $M > 4$ 时, $d_{16QAM} > d_{16PSK}$ 。这说明 16QAM 的抗干扰性能优于 16PSK。当平均功率受限时, M -QAM 的优点更为显著。因此, 本系统采用 M -QAM 的调制格式, 随着星座点数 M 的增加, 符号传输的信息量就会越大。由(6)式可知, 相位噪声与信噪比有关, 对于信噪比要求更高的高阶调制对相位噪声更加敏感。在理论分析的基础上对 4QAM 和 16QAM 调制格式进行比较, 当光信噪比为 10 dB 时, 在星座图的平均能量保持不变的情况下增加 M , 会使星座点之间的距离减小, 从而导致 B_{BER} 上升。

3 仿真结果及分析

采用仿真软件 VPI 搭建系统平台并仿真实现了基于 SOA 的垂直双抽运结构的偏振复用 OFDM 信号的全光波长变换。仿真中, 系统采用连续光模块产生系统光载波, 其中抽运光 CW1、CW2 和信号光频率分别为 193.24、193.2、193.1 THz, 光功率分别为 10、10、5 mW。OFDM 信号采用多载波调制方式, 在发射端首先对比特流进行 4QAM 调制, 然后依次经过串并变换和傅里叶逆变换, 再将并行数据转化为串行数据, 添加

保护间隔,形成 OFDM 码元。OFDM 信号光的调制速率为 5 Gbit/s,采用 4QAM 编码格式,该信号经过马赫曾德尔调制器直接调制后与两抽运信号耦合,如图 2(a)所示。耦合后的信号进入 SOA 中发生 FWM 效应,如图 2(b)所示,SOA 的工作电流为 0.32 A,再由光滤波器将系统中频率为 193.34 THz 的转换信号光滤出。转换光信号经过 PBS 后分别用光电探测器直接拍频,最后对 4QAM-OFDM 信号进行解调。接收端首先进行同步和信道估计,然后经过傅里叶变换,得到 4QAM 的已调数据,最后对该数据进行相应解调,得到比特流。图 3(a)和图 3(b)分别为系统中 4QAM-OFDM 信号在 x 和 y 方向的星座图,当光信噪比为 10 dB 时,相应的 B_{BER} 分别为 1.16×10^{-4} 和 1.06×10^{-5} ,实现了转换光信号的无串扰接收。由于在传输过程中直接检测 PM-OFDM 信号不可避免地受到偏振相关损耗、偏振模式色散以及 OFDM 载波间干扰^[26]等因素的影响,出现了相位偏移,导致图中一些星座点产生较小偏移,可以通过相位补偿及信道均衡来提高系统性能^[27-28]。

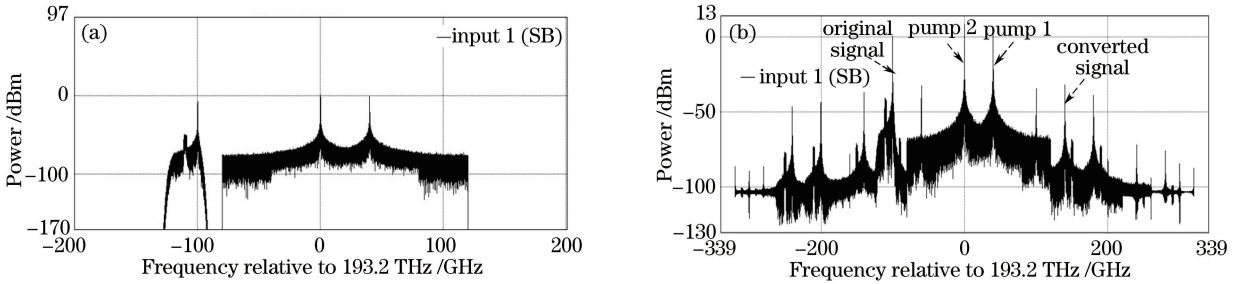


图 2 仿真结果频谱图。(a) 进入 SOA 前;(b) 进入 SOA 后

Fig. 2 Spectrum of simulation results. (a) before SOA; (b) after SOA

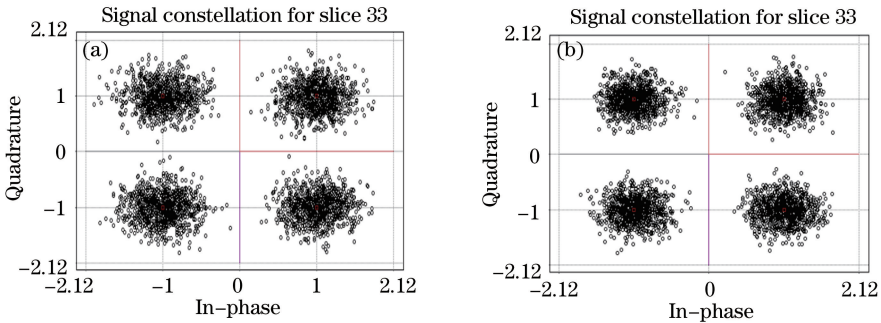


图 3 4QAM-OFDM 信号接收星座图。(a) x 方向;(b) y 方向

Fig. 3 Constellation diagram of 4QAM-OFDM signal. (a) x direction; (b) y direction

由图 4 可以看出,当系统的光信噪比保持不变时,系统 B_{BER} 随激光器线宽的增大而增加。当抽运线宽为 5 MHz 时,在 x 和 y 方向系统的 B_{BER} 分别为 5.03×10^{-5} 和 1.18×10^{-6} ;当抽运线宽为 25 MHz 时,在 x 和 y 方向系统的 B_{BER} 分别为 4.9×10^{-3} 和 5.27×10^{-4} 。通过仿真结果比较,进一步验证了理论分析的准确性。

图 5 描述了 4QAM-OFDM 不同子载波个数下的 B_{BER} 。从图中可以看出,当子载波个数大于 256 时,系

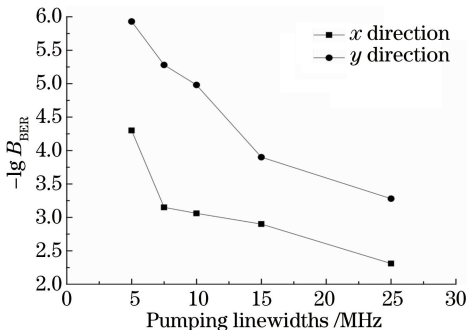


图 4 抽运线宽对 B_{BER} 的影响

Fig. 4 Influence of pumping linewidth on B_{BER}

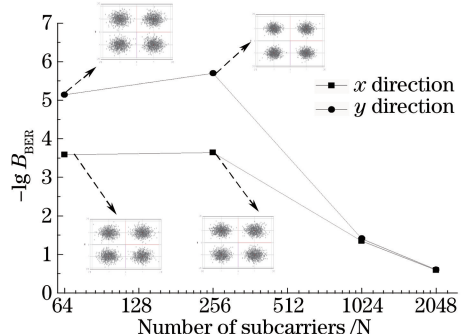


图 5 4QAM-OFDM 不同子载波个数下的 B_{BER}

Fig. 5 B_{BER} versus number of sub-carriers of 4QAM-OFDM

统 B_{BER} 才发生明显的变化,符合理论推导。当子载波个数小于 256 时, B_{BER} 没有明显的变化,主要原因是子载波个数比较少,引起的变化可以忽略不计,使得系统 B_{BER} 基本不变。而当子载波个数为 1024 和 2048 时,两系统中的 OFDM 信号依旧可以被解调出来,但是 B_{BER} 不符合系统要求。

图 6 描述了不同信道功率下的 B_{BER} 对系统的影响。从图中可以看出,随着信道功率的增加,系统 B_{BER} 越来越差,影响系统的无串扰接收。在系统中,当信道归一化功率大于 12.5 时,不能满足系统对 B_{BER} 的要求。仿真结果再次验证了理论分析的合理性。

系统设定 5 Gbit/s 的比特速率,分别对 4QAM 和 16QAM 两种编码格式下的星座图进行分析。当系统光信噪比为 10 dB 时,图 3(a)、(b)分别为 4QAM 在 x 和 y 方向接收的星座图,其对应的系统 B_{BER} 分别为 1.16×10^{-4} 和 1.06×10^{-5} 。图 7(a)、(b)分别为 16QAM 在 x 和 y 方向接收的星座图,其对应的系统 B_{BER} 分别为 2.4×10^{-2} 和 9.7×10^{-3} 。通过仿真结果比较,进一步验证了理论分析的准确性。

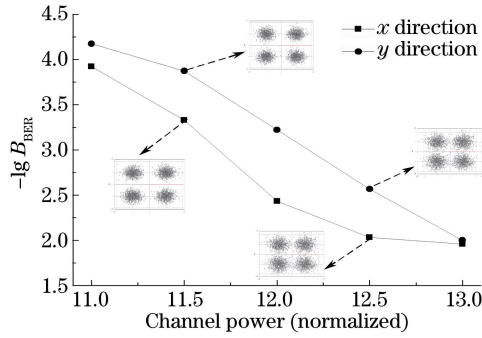


图 6 4QAM-OFDM 不同信道功率下的 B_{BER}

Fig. 6 B_{BER} versus channel power of 4QAM-OFDM

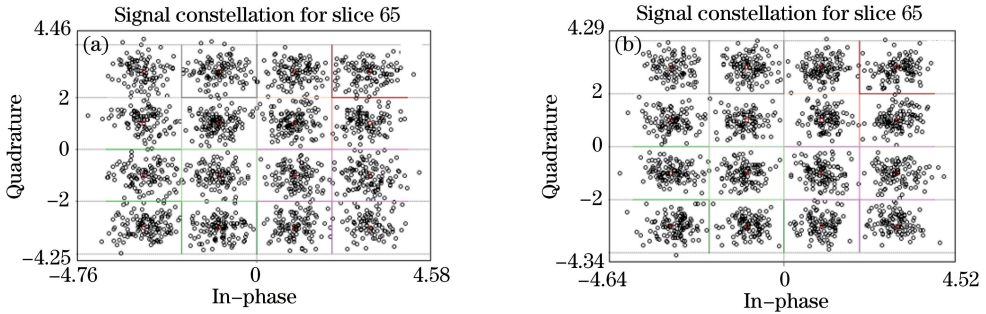


图 7 16QAM 信号的星座图。(a) x 方向; (b) y 方向

Fig. 7 Constellation diagram of 16QAM signal. (a) x direction; (b) y direction

4 结 论

理论及模拟仿真了垂直双抽运结构的偏振复用 4QAM-OFDM 信号在半导体光放大器中的 AOWC 系统,得出以下结论:1) 转换信号光在角频率为 $\omega_1 + \omega_2 - \omega_3$ 时是偏振不敏感的,可以无串扰分离成两束相互正交的信号光,且在光信噪比为 10 dB 时, x 和 y 方向对应的系统 B_{BER} 分别为 1.16×10^{-4} 和 1.06×10^{-5} ; 2) 对系统波长转换效率进行了分析,增大激光器线宽,系统转换效率降低;此外,改变 OFDM 信号参数如增加子载波个数、采用高阶调制格式、增加信道功率等均会使系统转换效率降低。

参 考 文 献

- 1 Khaleghi H, Sharaiha A, Rampone T, *et al.*. Semiconductor optical amplifiers in coherent optical-OFDM systems[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(7): 560-562.
- 2 Krzeczanowicz L, Connelly M. 40 Gb/s NRZ-DQPSK data all-optical wavelength conversion using four wave mixing in SOA[C]. Irish Signals & Systems Conference 2014 and 2014 China-Ireland International Conference on Information and

- Communications Technologies, 2013: 349-351.
- 3 Wang D W, Cheng T H, Yeo Y K, *et al.*. Performance comparison of using SOA and HNLf as FWM medium in a wavelength multicasting scheme with reduced polarization sensitivity[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(24): 3497-3505.
 - 4 Fillion B, Amiralizadeh S, Nguyen A T, *et al.*. Wideband wavelength conversion of 16 Gbaud 16-QAM signals in a semiconductor optical amplifier[C]. Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), 2013: 19825-19833.
 - 5 Spyropoulou M, Pleros N, Vyrsoinos K, *et al.*. 40 Gb/s NRZ wavelength conversion using a differentially-biased SOA-MZI: Theory and experiment[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(10): 1489-1499.
 - 6 Lu G W, Sakamoto T, Kawanishi T. Coherently-pumped FWM in HNLf for 16QAM wavelength conversion free of phase noise from pumps[C]. 2014 The European Conference on Optical Communication, 2014: 1-3.
 - 7 Fok M P, Shu C. Tunable optical delay using four-wave mixing in a 35-cm highly nonlinear bismuth-oxide fiber and group velocity dispersion[J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(5): 499-504.
 - 8 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.
 - 9 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]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(24): 5767-5774.
 - 10 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): 623-627.
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): 623-627.
 - 11 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]. Optics Communications, 2011, 284(22): 5364-5371.
 - 12 Zhou H, He J, Cao Z Z, *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.
 - 13 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]. Optics Communications, 2014, 316: 161-167.
 - 14 Schmidt B J C, Lowery A J, Armstrong J. Experimental demonstrations of electronic dispersion compensation for long-haul transmission using direct-detection optical OFDM[J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(1): 196-203.
 - 15 Alves T M F, Cartaxo A V T. Analytical characterization of four wave mixing effect in direct-detection double-sideband OFDM optical transmission systems[J]. Optics Express, 2014, 22(7): 8598-8616.
 - 16 Chen Y X, Li J H, Zhu P K, *et al.*. Experimental demonstration of 400 Gb/s optical PDM-OFDM superchannel multicasting by multiple-pump FWM in HNLf[J]. Optics Express, 2013, 21(8): 9915-9922.
 - 17 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): 0205001.
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): 0205001.
 - 18 Yi X, Shieh W, Ma Y. Phase noise effects on high spectral efficiency coherent optical OFDM transmission[J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(10): 1309-1316.
 - 19 Wyatt R, Devlin W J. 10 kHz linewidth 1.5 μm InGaAsP external cavity laser with 55 nm tuning range[J]. Electronics Letters, 1983, 19(3): 110-112.
 - 20 Brid D M, Armitage J R, Kashyap R, *et al.*. Narrow line semiconductor laser using fibre grating[J]. Electronics Letters, 1991, 27(13): 1115-1116.
 - 21 Li Xiaofeng, Pan Wei, Ma Dong, *et al.*. Effect of spontaneous emission noise on chaotic optical communication system [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(10): 5094-5104.
李孝峰, 潘 炜, 马 冬, 等. 激光器自发辐射噪声对混沌光通信系统的影响[J]. 物理学报, 2006, 55(10): 5094-5104.
 - 22 Henry C H. Theory of the linewidth of semiconductor lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1982, 18(2): 259-264.

- 23 Kojima K, Kyuma K, Nakayama T. Analysis of the spectral linewidth of distributed feedback laser diodes[J]. Journal of Lightwave Technology, 1985, 3(5): 1048-1055.
- 24 Khaleghi H, Morel P, Sharaiha A, *et al.*. Experimental validation of numerical simulations and performance analysis of a coherent optical-OFDM transmission system employing a semiconductor optical amplifier [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(1): 161-170.
- 25 Morel P, Sharaiha A. Wideband time-domain transfer matrix model equivalent circuit for short pulse propagation in semiconductor optical amplifiers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2009, 45(2): 103-116.
- 26 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.
- 27 Zeng Xiangye, Liu Jianfei, Wang Jingyi, *et al.*. An improved ISFA channel estimation algorithm [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2014, 25(8): 1481-1486.
曾祥焯, 刘剑飞, 王静宜, 等. 一种改进的 ISFA 信道估计算法[J]. 光电子 • 激光, 2014, 25(8): 1481-1486.
- 28 Gu Xin, Lu Jin, Ren Hongliang, *et al.*. Channel equalization using independent component analysis with adaptive variable step in PDM-CO-OFDM[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(10): 1006003.
顾欣, 卢瑾, 任宏亮, 等. 基于自适应 ICA 的 PDM-CO-OFDM 系统信道均衡算法[J]. 光学学报, 2015, 35(10): 1006003.