

激光与光电子学进展

基于波长变换的概率整形正交频分复用光信号传输系统

胡霞¹, 赵利^{2*}, 余建军²¹空军航空维修技术学院, 湖南 长沙 410124;²复旦大学信息科学与工程学院, 上海 200433

摘要 本文首先从理论上分析了在共极化双泵浦方案中, 波长转换不会改变概率整形(PS)信号的概率分布, 并且正交频分复用(OFDM)信号子载波的顺序可以保持不变的原因。然后, 通过实验验证了全光波长转换后, PS-64QAM-OFDM 信号通过高非线性光纤在零差相干检测系统中的传输。最后, 通过实验证明, 当波特率为 20 Gbaud、误码率为 1×10^{-2} 时, 普通 64QAM 信号的光信噪比(OSNR)损耗为 1 dB, PS-64QAM 信号的 OSNR 损耗改善了 0.5 dB。

关键词 光纤光学与光通信; 概率整形; 正交频分复用; 波长变换; 非线性光纤

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221106

Probability Shaping Orthogonal Frequency Division Multiplexing Optical Signal Transmission System Based on Wavelength Conversion

Hu Xia¹, Zhao Li^{2*}, Yu Jianjun²¹Airforce Aviation Repair Institute of Technology, Changsha 410124, Hunan, China;²School of Information Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China

Abstract This study theoretically analyzed the reasons why, in the copolarized dual-pump scheme, wavelength conversion does not change the probability distribution of the probability shaping (PS) signal and the order of orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) signal subcarriers can remain unchanged. Then, after all-optical wavelength conversion, the transmission of the PS-64QAM-OFDM signal through a highly nonlinear optical fiber in a homodyne coherent detection system was experimentally verified. Finally, the experimental results indicate that when the baud rate is 20 Gbaud and the bit error rate is 1×10^{-2} , the optical signal-to-noise ratio (OSNR) loss of an ordinary 64QAM signal is 1 dB, and the OSNR loss for PS-64QAM signal is improved by 0.5 dB.

Key words fiber optics and optical communication; probability shaping; orthogonal frequency division multiplexing; wavelength conversion; nonlinear optical fiber

1 引言

随着对生活质量要求的提高, 网络用户数量呈指数级快速增长, 使得通信流量急剧增加, 网络上数据传输的带宽也在不断增加。因此, 高速、大容量、高质量成为通信网络发展的需要。概率整形(PS)技术作为一种新兴技术, 能够通过改变星座点的分布概率, 让星座图外圈的分布概率小、内圈的分布概率大, 从而在同样的发射功率下能够增加星座点之间的欧氏距离, 以

达到延长传输距离、提高系统容量的目的^[1-6]。

另外, 全光波长转换(AOWC)技术能实现通信网络中的波长重用, 解决网络内部多个波长信道的波长争用, 实现对网络的便捷灵活管理。AOWC还可以实现光对光的直接转换, 能够克服电子设备带宽受限的问题, 提高网络的波长利用率和灵活性, 使光网络通信能力轻松扩展, 适应未来宽带发展的趋势和未来全光网络的要求。AOWC可以通过多种方案实现, 例如交叉增益调制、交叉相位调制和四波混频(FWM)^[7-14]等。

收稿日期: 2022-03-24; 修回日期: 2022-05-10; 录用日期: 2022-06-13; 网络首发日期: 2022-06-23

基金项目: 国家自然科学基金(61527801, 61675048, 61720106015)

通信作者: *16110720097@fudan.edu.cn

在这些方案中,考虑到比特率和调制格式的透明度,FWM成为实现AOWC最有前途的方案之一。由于基于FWM的单泵浦方案的AOWC对偏振敏感,信号频谱将和原始信号频谱保持反向^[13-14]。另外,垂直双泵浦方案的AOWC虽然在偏振敏感上有所改善,但是改善力度并不明显^[15]。然而共极化双泵浦方案能够最大限度改善偏振敏感度,并且转换后的信号的输出功率在输入信号极化灵敏度较低的情况下能够获得最大的转换效率^[7-9,16]。FWM可以在半导体光放大器(SOA)或高非线性光纤(HNLF)中运行,一般来说,基于FWM的AOWC可以在HNLF中以更高的速度运行,而AOWC在SOA中的速度由于载波的响应时间长而受到限制^[9,16]。本文在零差相干检测系统中通过共极化双泵浦方案在HNLF上演示了PS-64QAM正交频分复用(OFDM)信号波长转换后的传输。从理论上讲,波长转换后,光学子载波的频率顺序将保持不变。但是,目前还没有关于波长转换对PS-OFDM系统性能影响的相关研究。

本文通过实验展示了波长转换对PS的影响,并将波长转换后的PS信号的性能与没有转换的PS信号的性能进行了比较。实验结果表明,由于AOWC,20 Gbaud和40 Gbaud的PS-64QAM信号,在误码率(BER)为 1×10^{-2} 时,光信噪比(OSNR)的损失分别约为0.5 dB和1.1 dB。

2 理论分析

PS-64QAM内部星座点多,外部星座点少,而外部星座点幅度较小,外部星座点则相反。因此,信号被采用PS后,发射机的平均功率可以降低。在相同发射功率下,相当于增加了PS-64QAM星座点之间的欧氏距离,提高了系统的抗噪声能力,保证了系统的鲁棒性。关于PS的原理在之前的文献报道中都有提到过。通常,玻尔兹曼分布被用于信号的PS。在符号周期内,传输的PS-64QAM OFDM信号 $s(t)$ 可以表示为

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N_c-1} d_k g(t) e^{j2\pi f_k t}, \quad (1)$$

式中: N_c 是子载波的数量; $k \in [0, N_c - 1]$ 是子载波指数; d_k 是第 k 子载波 f_k 中调制的复数数据; $g(t)$ 是矩形脉冲整形函数。

两个泵浦和信号光波表示为

$$\vec{E}_i(\omega_i, t) = A_i \exp[j(k_i z - \omega_i t + \beta_i)], \quad (i=1, 2, 3), \quad (2)$$

式中, β_i 、 ω_i 、 k_i 、 A_i 分别是相位、角频率、波矢量、信号和泵浦光波的幅度。调制信号为

$$\vec{E}_M = A_3 s(t) \exp[j(k_3 z - \omega_3 t + \beta_3)]. \quad (3)$$

图1显示了泵浦和信号光波波长转换前的代数模型。假设信号光波跟 x 轴有同样的极化方向,而pump 1和pump 2与 x 轴分别成 φ 和 ϕ 角度。

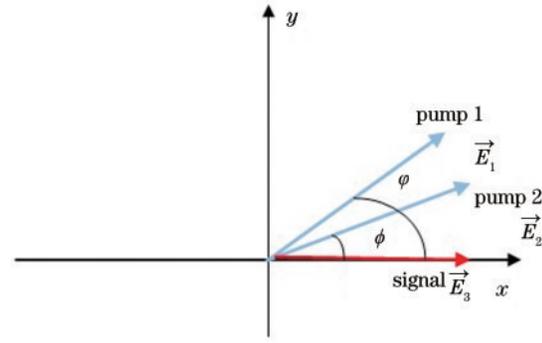


图1 泵浦和信号光波的代数模型

Fig. 1 Algebraic model of pump and signal light waves

在高非线性光纤中,最低阶非线性效应源于三阶极化率,这是四波混合的原因。因此,当泵浦和信号光波在高非线性光纤中传输时,会发生四波混频,产生3个拍频频率: $(\omega_1 - \omega_2)$ 、 $(\omega_2 - \omega_3)$ 、 $(\omega_1 - \omega_3)$,每个拍频频率调制每个光波,并产生2个边带。在这里只考虑上边带 $(\omega_1 - \omega_2 + \omega_3)$,它由两个部分组成。所以转换波为

$$E_{\text{converted}} = (E_M E_2^*) E_1 + (E_1 E_2^*) E_M = A_1 A_2 A_3 s(t) e^{j(\beta_1 - \beta_2 + \beta_3)} e^{j(\omega_1 - \omega_2 + \omega_3)t} [r(\omega_1 - \omega_2) \cos(\varphi - \phi) + r(\omega_2 - \omega_3) \cos \varphi]. \quad (4)$$

上边带转换波的输出功率为

$$P_{\text{converted}} = P_1 P_2 P_3 [r^2(\omega_1 - \omega_2) \cos^2(\varphi - \phi) + r^2(\omega_2 - \omega_3) \cos^2 \varphi], \quad (5)$$

式中, P_1 、 P_2 和 P_3 分别是泵浦光pump 1、pump 2和调制信号的功率。从式(4)~(5)中可以看到,转换后的信号功率会受到角度的影响。由于采用了共极化双泵方案,因此角度 φ 等于角度 ϕ , $r^2(\omega_1 - \omega_2)$ 表示转换效率^[6]。由于 $r^2(\omega_1 - \omega_2)$ 远大于 $r^2(\omega_2 - \omega_3)$,转换后的信号功率大约为

$$P_{\text{converted}} = P_1 P_2 P_3 [r^2(\omega_1 - \omega_2)]. \quad (6)$$

从式(3)~(4)中可以看到,转换后的信号与原始的64QAM信号成正比。此外,文献[6]已经证明,转换的频率不会反转。因此,经过波长转换后的信号保留了调制OFDM信号的子载波顺序,并且还将保持与原始信号相同的概率分布。

3 实验装置

图2显示了基于共极化双泵浦方案AOWC实验设置图。本文采用OFDM的快速傅里叶变换(FFT)长度为1024,其中980个子载波用于数据传输。发射端的数据可以通过以下步骤进行处理,包括串行到并行转换、64QAM映射、1024点的快速傅里叶逆变换(IFFT)、添加循环前缀以及并行到串行转换以生成OFDM信号。数据帧由12个OFDM数据符号和2个训练序列(TS)组成。在数据帧的前面添加了两种类型的训练序列:第一个训练序列用于同步数据;第二个训练序列用于信道估计。后续对波长转换后

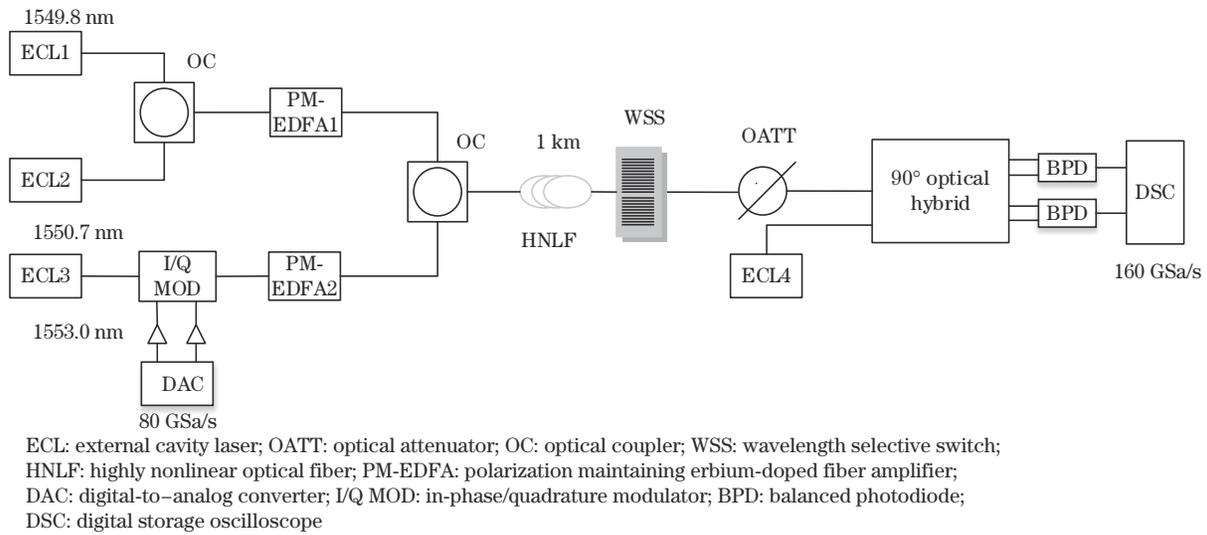


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Diagram of experimental setup

20 Gbaud 和 40 Gbaud 的 64-QAM 光 OFDM 信号的性能进行了研究。系统的总比特率分别为 77 Gb/s (20 Gbaud 数据) 和 155 Gb/s (40 Gbaud 数据) [波特率 $\times 5.148 \times 12 \times 980 / [512 + 14 \times (1024 + 64)]$ Gb/s]。发射端有三个外腔激光器 (ECL)。它们的线宽小于 100 kHz, 它们的输出光功率为 14.5 dBm。在 1549.8 nm 和 1550.7 nm 处的 pump 1 (P1) 和 pump 2 (P2) 分别由 ECL1 和 ECL2 产生。接下来, 它们将在光耦合器中进行耦合。之后被保偏的掺铒光纤放大器 (PM-EDFA1) 放大后的光功率为 18.9 dBm。由 ECL3 (1553.0 nm) 产生的连续波将会被 3 dB 带宽为 32 GHz 的同相/正交 (I/Q) 调制器调制, I/Q 调制器由 64QAM OFDM 电基带信号驱动。基带信号由具有 20 GHz 的 3 dB 带宽和 80 GSa/s 采样速率的高速 DAC 产生。调制器的插入损耗为 6 dB。在驱动 I/Q 调制器之前, 采用两个并联线性放大器来放大 64QAM 基带信

号。光 64QAM 信号通过 EDFA2 放大。P1、P2 和光学 PS-64QAM OFDM 信号通过光耦合器进行耦合, 然后一起被发送到长度为 1 km 的 HNLF 中用于 AOWC。本实验中 HNLF 的衰减系数为 0.36 dB/km, 非线性系数为 $10 \text{ W}^{-1}/\text{km}$ 。从图 3(a) 可以看出, 在原始信号 (S) 的两侧产生两组转换信号, 一组在 1552.1 nm (C1) 处, 另一组在 1553.9 nm (C2) 处。光衰减器用于调节信号进入 EDFA 的输入功率, 经过 EDFA 放大后可以获得不同的 OSNR。EBR 是在不同的 OSNR 下测量的。在相干检测之前信号 C2 通过波长选择开关 (WSS) 被选中。该 WSS 的插入损耗为 7 dB, 最小网格为 10 GHz。WSS 之后的光谱如图 3(b) 所示。线宽小于 100 kHz 的 ECL4 用作本振 (LO) 源。在接收器端, 使用具有 160 GSa/s 采样速率和 65 GHz 的 3 dB 带宽的数字存储示波器 (DSC) 进行数据捕捉。捕捉到的数据将通过离线数字信号处理技术进行恢复。

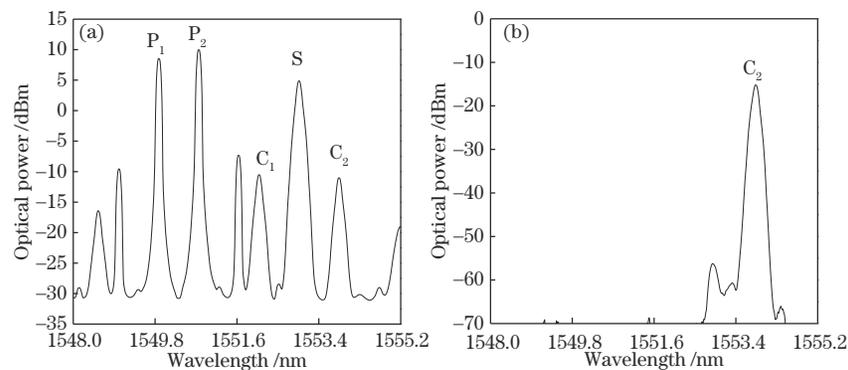


图 3 波长转换后和 WSS 后的光谱。(a) 波长转换后的光谱; (b) WSS 后的光谱

Fig. 3 Spectra after wavelength conversion and WSS. (a) Spectra after wavelength conversion; (b) spectra after WSS

首先, 采用互相关算法实现信号同步。其次, 利用 1024 点的 FFT 将信号从时域转换为频域, 在频域中完成信道估计。均衡后, 信号将根据 64QAM 解映射规

则进行去映射。最后, 通过比较发送位和接收位之间的差异来计算 BER。

4 实验结果

图 4 显示了波长转换前后的 20 Gbaud 均匀和 PS-64QAM OFDM 信号的 BER 与 OSNR 的关系曲线。图 4 中的插图 (a) 和 (b) 分别是 OSNR 为 30 dB 时波长转换后的 PS 和均匀 64QAM OFDM 信号的星座图。如图 5 所示,与均匀方案相比,PS 方案无论在波长转换之前还是之后,都能获得更好的 BER 性能。均匀的 64QAM OFDM 信号的曲线正好可以达到 1×10^{-2} 的 BER 门限,而在 PS 的帮助下可以达到 1×10^{-3} 的门限。由于 PS 技术的引入,在 BER 为 1×10^{-2} 时,OSNR 提高了约 7.5 dB。由于 20 Gbaud 均匀 64QAM OFDM 信号的波长转换,在 BER 为 1×10^{-2} 时大约有 1 dB 的 OSNR 损失。此外,在同样的条件下引入 PS 时,OSNR 损失可能会降至约 0.5 dB。

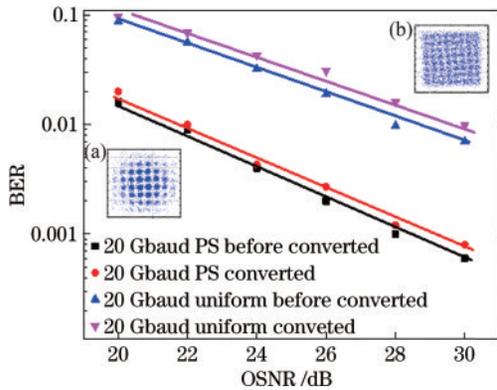


图 4 20 Gbaud 信号在不同 OSNR 下的 BER 曲线

Fig. 4 BER curves of 20 Gbaud signal under different OSNRs

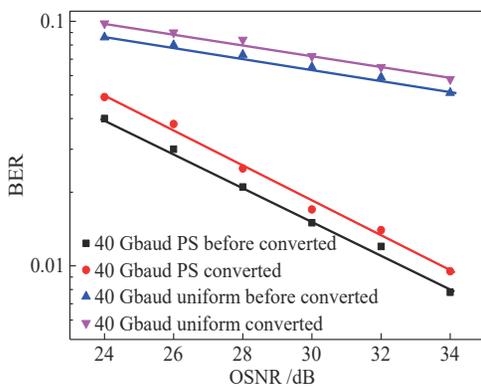


图 5 40 Gbaud 信号在不同 OSNR 下的 BER 曲线

Fig. 5 BER curves of 40 Gbaud signal under different OSNRs

为了增加系统的传输容量,将波特率从 20 Gbaud 提高到 40 Gbaud。图 5 描述了波长转换前后 40 Gbaud 均匀和 PS-64QAM OFDM 信号的 BER 与 OSNR 的关系曲线。与图 4 相比,40 Gbaud 的信号与 20 Gbaud 的信号相比,BER 性能较差。随着 OSNR 的增加,当 OSNR 为 34 dB 时,只有带有 PS 的曲线才能达到 1×10^{-2} 的 BER 门限。由于信号的波特率超过了器件的 3 dB 带宽,因此会降低该系统的性能,从而导致 BER

性能不佳。此外,在误码率为 1×10^{-2} 时,40 Gbaud PS-64QAM 信号的波长转换会带来大约 1.1 dB 的 OSNR 损失。

5 结 论

本文在零差相干检测系统中,采用共极化双泵浦方案,并通过实验展示了 PS-64QAM OFDM 信号的 AOWC。实验证明,采用 PS 技术的 64QAM 信号在波长转换后具有更好的性能。尽管光信号在波长转换中存在频移,但理论分析表明,它不会影响 PS-OFDM 子载波的顺序,也不会改变 PS 信号的概率分布。在 BER 为 1×10^{-2} 时,经过波长转换后的 20 Gbaud 和 40 Gbaud PS-64QAM 信号的 OSNR 损耗分别仅约为 0.5 dB 和 1.1 dB。因此,在未来 6G 时代,采用共极化双泵浦方案,将 PS 技术和基于 FWM 的 AOWC 相结合,具有良好的应用潜力。

参 考 文 献

- [1] 杨雄伟, 赵峰, 赵林仙, 等. 基于 K-means 的自适应 PS 信号相位恢复算法[J]. 光学学报, 2022, 42(9): 0906001. Yang X W, Zhao F, Zhao L X, et al. Phase recovery algorithm for adaptive probabilistic shaping signal based on K-means[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(9): 0906001.
- [2] 丁俊杰, 王演祯, 张教, 等. W 波段 PS-PAM8 信号在太赫兹空芯光纤中的有线传输[J]. 光学学报, 2021, 41(24): 2406003. Ding J J, Wang Y Y, Zhang J, et al. Wired transmission of PS-PAM8 signal at W-band over terahertz hollow-core fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(24): 2406003.
- [3] Zhao L, Zhang Y, Zhou W. Probabilistically shaped 64QAM OFDM signal transmission in a heterodyne coherent detection system[J]. Optics Communications, 2019, 434: 175-179.
- [4] Liu B, Xinying L, Zhang Y, et al. Probabilistic shaping for ROF system with heterodyne coherent detection[J]. APL Photonics, 2017, 2(5): 056104.
- [5] Wang K H, Li X Y, Kong M, et al. Probabilistically shaped 16QAM signal transmission in a photonics-aided wireless terahertz-wave system[C]//2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC), March 11-15, 2018, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2018.
- [6] Pan C P, Kschischang F R. Probabilistic 16-QAM shaping in WDM systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(18): 4285-4292.
- [7] Li X Y, Yu J J, Dong Z, et al. Wavelength conversion of 544-Gbit/s dual-carrier PDM-16QAM signal based on the co-polarized dual-pump scheme[J]. Optics Express, 2012, 20(19): 21324-21330.
- [8] Ma J X, Yu J J, Yu C X, et al. Wavelength conversion based on four-wave mixing in high-nonlinear dispersion shifted fiber using a dual-pump configuration[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(7): 2851-2858.
- [9] Ma J X, Yu J J, Yu C X, 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]. *Optics Communications*, 2006, 260(2): 522-527.
- [10] 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.
- [11] Lu J, Yu J 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] Yu J J, Zheng X Y, Peucheret C, et al. 40-Gb/s all-optical wavelength conversion based on a nonlinear optical loop mirror[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2000, 18(7): 1001-1005.
- [13] Fok M P, Shu C, Blumenthal D J. 40-Gb/s polarization multiplexed RZ-ASK-DPSK signal wavelength conversion using a 32-cm bismuth-oxide highly nonlinear fiber[C]// *The European Conference on Lasers and Electro-Optics 2007*, June 17, 2007, Munich, Germany. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2007: CI4_2.
- [14] Watanabe S, Takeda S, Ishikawa G, et al. Simultaneous wavelength conversion and optical phase conjugation of 200 Gbit/s (5×40 Gbit/s) WDM signal using a highly nonlinear fiber four-wave mixing[C]// *Integrated Optics and Optical Fibre Communications, 11th International Conference on, and 23rd European Conference on Optical Communications (Conf. Publ. No.: 448)*, September 22-25, 1997, Edinburgh, UK. London: IET, 1997: 1525-1529.
- [15] 卢嘉, 马杰, 刘剑飞, 等. 垂直双抽运结构 PM-OFDM 信号对全光波长变换系统的影响[J]. *中国激光*, 2016, 43(6): 0606001.
Lu J, Ma J, Liu J F, et al. Influence of orthogonal dual-pump PM-OFDM signal on all-optical wavelength conversion system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(6): 0606001.
- [16] 卢嘉, 胡园园, 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.
Lu J, Hu Y Y, Liu J F, et al. All-optical wavelength conversion based on parallel dual-pump for polarization multiplexing OFDM signal in SOA[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(2): 0205005.