

# 变占空比脉冲测量非线性光环镜阈值特性的 实验研究

陈寅芳 王 荣 蒲 涛 甄 飞 朱 勇 方 涛 孟 楠 郑吉林

(解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007)

**摘要** 光阈值器件是多用户光码分多址(OCDMA)系统接收机中抑制基底噪声和互相关旁瓣峰的重要部件。非线性光环镜(NOLM)是实现光阈值的一种有效方法。对基于高非线性光纤(HNLF)NOLM的阈值特性进行了实验研究及数据分析,提出利用改变抽运脉冲占空比分析阈值特性的方法,实验发现抽运脉冲占空比 $D$ 为 $1/25$ 时出现阈值点,阈值功率为 $3.75\text{ W}$ 。讨论了抽运光与信号光的波长间隔对NOLM输出信号的影响,得出阈值点处的最优波长间隔为 $5.8\text{ nm}$ ,脉冲压缩量为 $114.47\text{ ps}$ 。实验搭建了接收机阈值系统,眼图分析表明该系统能较好地抑制噪声。

**关键词** 光通信;光阈值;非线性光环镜;交叉相位调制;四波混频;脉冲压缩

**中图分类号** TN913.7; TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0605004

## Experimental Demonstration of Measuring Optical Threshold in Nonlinear Optical Loop Mirror Based on Variable Pulse Duty Cycle

Chen Yinfang Wang Rong Pu Tao Zhen Fei Zhu Yong Fang Tao  
Meng Nan Zheng Jilin

(Institute of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology,  
Nanjing, Jiangsu 210007, China)

**Abstract** For suppressing pedestal and cross-correlation noises in receiver, optical thresholder plays an important role in multiple-user optical code-division multiple access (OCDMA) system. Nonlinear optical loop mirror (NOLM) is an effective method to implement optical thresholder. The threshold characteristic is experimentally demonstrated and analyzed. The method of analyzing threshold by changing duty cycle of pump light is proposed, and the power at threshold point is  $3.75\text{ W}$  for the pump duty cycle of  $1/25$ . The relationship between output signal and wavelength spacing between signal and pump is discussed, and the optimal wavelength spacing is  $5.8\text{ nm}$  at the threshold point. Experimental results show that when the duty cycle  $D=1/25$ , the pulse can be suppressed by  $114.47\text{ ps}$ . The noise suppression result is given through eye diagram analysis of a receiver thresholder system built for the experiments.

**Key words** optical communications; optical threshold; nonlinear optical loop mirror; cross phase modulation; four wave mixing; pulse compression

**OCIS codes** 060.4510; 060.4370; 190.4380; 230.4320; 320.5520

## 1 引 言

光码分多址(OCDMA)系统具有异步接入、全光处理、软容量、保密性好等优点,且配置灵活、网管

便捷,是未来全光接入网极具竞争力的方案之一<sup>[1~3]</sup>。在多用户OCDMA传输信道中,存在多用户、差拍、码间串扰等干扰,即多址干扰(MAI)噪

收稿日期: 2012-01-11; 收到修改稿日期: 2012-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(61032005,61177065)和国家973计划(2012CB315603)资助课题。

作者简介: 陈寅芳(1986—),男,博士研究生,主要从事光码分多址技术及光隐藏通信等方面的研究。

E-mail: inforchen@163.com

导师简介: 王 荣(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事集成光电子学、光网络等方面的研究。

E-mail: wr-njice@163.com

声,使得解码后的光信号底噪较大,旁瓣现象较严重<sup>[4]</sup>。因此,利用光域或电域处理抑制多用户噪声和旁瓣对系统性能的影响,是接收机的关键技术。使用光时间门<sup>[5]</sup>或光阈值技术<sup>[6]</sup>能有效抑制 MAI 噪声<sup>[7]</sup>。作为一种基于非线性效应的全光处理器件,非线性光环镜(NOLM)又称光纤 Sagnac 干涉仪,结构简单,耦合效率高,反应速度极快,性能稳定可靠,具有多种功能和用途,如光开关及解复用、被动锁模、脉冲压缩、基底噪声抑制和光脉冲串的幅度整形等<sup>[8,9]</sup>,非常适合在高速 OCDMA 系统接收机中完成光阈值作用,降低 MAI 的影响,提高系统性能<sup>[10,11]</sup>。

使用普通单模光纤的 NOLM,阈值较高,500 m 长的光纤分光比为 0.501 时第一阈值达 1937 W<sup>[12]</sup>。高非线性光纤(HNLF)在同样条件下峰值功率到瓦级即可,显著降低了阈值,具有实际应用价值。但是,由于光放大器输出功率和高非线性光纤长度限制,如何在常规实验室条件下测量基于非线性效应的阈值器件的阈值功率是一个技术难题。本文提出了利用改变抽运归零脉冲占空比分析 NOLM 阈值特性的方法。通过变化占空比而无需其他器件改变抽运峰值功率,使得该方法具有零额外功率损耗、操作灵活便捷、结果准确可靠等优点。

## 2 原 理

利用 HNLF 中的交叉相位调制(XPM)效应和 NOLM 的开关效应实现光阈值的原理如图 1 所示。耦合器分光比为  $\rho$ ,端口 1、2 为耦合器的输入端,3、4 为输出端。信号光  $E_0$  由端口 1 输入环路,经耦合器分成幅度相同、方向相反的  $E_{cw}$  和  $E_{ccw}$  光;处于不同波长的抽运控制光由波分复用耦合器(WDM-C)引入环路。控制光峰值功率高,经过 HNLF 产生自相位调

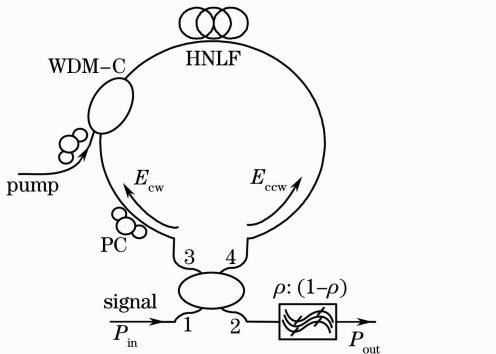


图 1 NOLM 原理图

Fig. 1 Schematic diagram of NOLM

制(SPM)效应,光纤折射率发生改变,与其同向传输的  $E_{cw}$  光产生非线性相移,即 XPM 效应。而逆向传输的  $E_{ccw}$  产生的非线性相移小。产生不同相移的  $E_{cw}$  和  $E_{ccw}$  在耦合器重新相遇并发生干涉。当两者相移差满足干涉条件时,信号光将全部由端口 2 透射。滤波器的中心频点处于信号光频点,滤除抽运光。

由光纤耦合器传输矩阵并假定  $E_0$  仅由端口 1 输入,则顺时针和逆时针传输光场振幅为<sup>[12]</sup>

$$E_{cw} = \sqrt{\rho}E_0, \quad (1)$$

$$E_{ccw} = i\sqrt{1-\rho}E_0. \quad (2)$$

环路透射率为<sup>[13]</sup>

$$T(t) = 1 - 4\rho(1-\rho)\cos^2[\Delta\phi(t)/2], \quad (3)$$

式中  $\Delta\phi(t) = \phi_{cw}(t) - \phi_{ccw}(t)$ ,为两相向信号光之间的相位差,文献[14]给出了其具体表达式。3 dB 耦合器条件下,当  $\Delta\phi(t) = \pi$  时,透射率为 1.0,信号光将全部由端口 2 透射;而当相位差为 0 或  $2\pi$  时,透射率为 0,没有信号光透射。OCDMA 系统中,解码后信号作为抽运光引入环路,其自相关峰值较高,XPM 效应产生的相移差大,信号光透射率高;而互相关峰值及 MAI 峰值低,产生的相移差小,透射率小。由此可实现自相关峰时透射信号光而互相关峰时抑制信号光,达到抑制互相关旁瓣及 MAI 噪声的阈值效应。

图 2 是抽运脉冲在相同平均功率、不同占空比下的脉冲峰值功率特性图。当平均功率不变时[阴影部分面积不变,不考虑放大自发辐射(ASE)噪声影响],改变占空比,则脉冲峰值功率随之改变。不同的抽运峰值功率在 HNLF 中因 XPM 效应对同向信号光产生的非线性相移不同,导致两信号光产生不同的相移差。由(3)式知,相移差与透射率相关。最终表现为抽运光平均功率一定时,占空比影响透射率。因此,改变抽运光占空比可影响输出信号光功率,而透射功率最大处即为 NOLM 的阈值

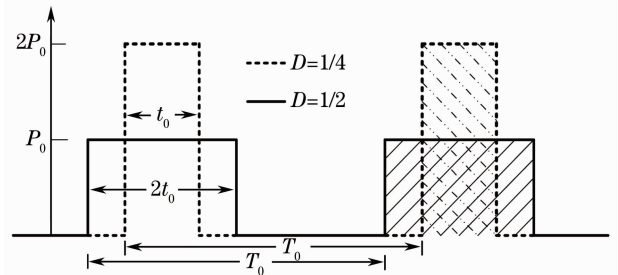


图 2 相同平均功率不同占空比下的脉冲峰值功率特性

Fig. 2 Characteristic of pulse peak power under the same mean power with different duty cycles

点。实验中利用脉冲序列发生器(PPG)改变调制后的抽运脉冲占空比,经掺铒光纤放大器(EDFA)输出恒定的平均功率。这种方法不需要额外器件改变抽运峰值功率,减少了光路的插入损耗。在只能达到有限抽运峰值功率的条件下,这种插入损耗的减少对实验的影响非常可观。

### 3 实验结构

实验装置如图 3 所示,抽运光源为可调谐激光器(TLD),信号光源为分布反馈(DFB)激光器。TLD 输出抽运光经偏振控制器(PC)输入马赫-曾德尔(M-Z)强度调制器(MOD),PPG 产生速率为 10 Gb/s 占空比可调的脉冲做调制信号,调制抽运光经 23 dB 的 EDFA 放大后由 WDM-C 引入环路。

DFB 激光器输出连续的信号光由 3 dB 耦合器的端口 1 输入环路,端口 3、4 构成环路的两臂,顺时针方向处的 PC,目的是调整信号光偏振方向与抽运光偏振方向一致,使 XPM 效应最充分。使用 800 m HNLF 作为非线性介质。光谱仪(OSA)和示波器分别用于观察各点光谱和信号波形。由于实验条件限制,用滤波器代替 WDM-C。实验结果表明,这种替代是合理的。

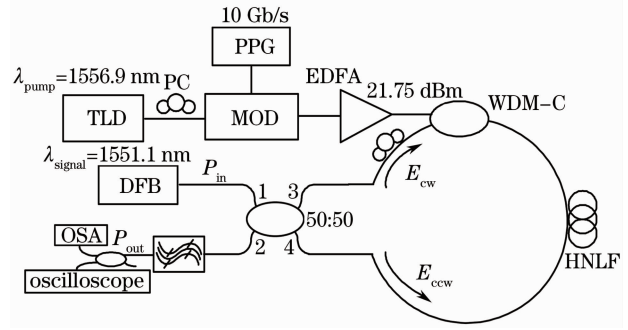


图 3 实验结构图

Fig. 3 Experimental setup

### 4 实验结果

信号光波长  $\lambda_{\text{signal}} = 1551.1 \text{ nm}$ , 功率  $P_{\text{in}} = 2.88 \text{ dBm}$ , 调节可调激光器的波长  $\lambda_{\text{pump}}$  在 1551.8~1560.2 nm 变化, PPG 输出 10 Gb/s 脉冲, 占空比  $D = 1/25$ , 实测 EDFA 输出稳定的平均功率  $P_{\text{pump}} = 21.75 \text{ dBm}$ , 3 dB 耦合器实际分光比为 0.504。

图 4 为不同抽运波长时端口 2 的光谱, 1551.1 nm 为需滤出的信号光。图 5 是输出光功率与波长间隔之间的关系。由图 4 和图 5 可以看出,  $\lambda_{\text{pump}} = 1556.1 \text{ nm}$  时信号光功率较其他抽运波长时大, 且四波混频(FWM)效应更加明显。波长间隔为

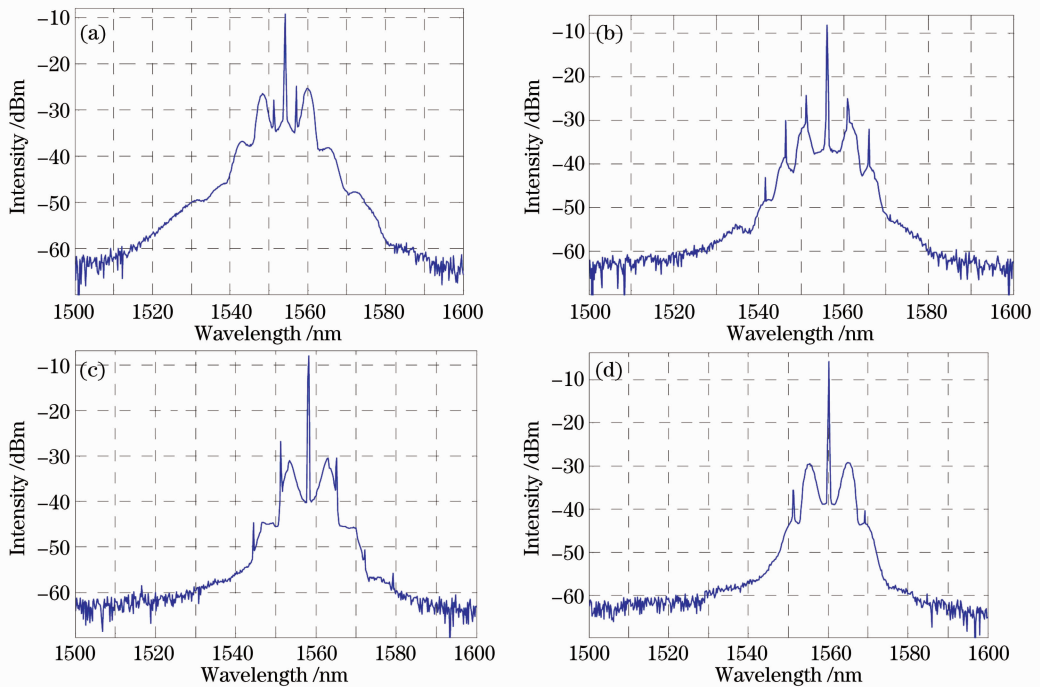


图 4 不同抽运波长时的输出光谱(滤波前)。(a)  $\lambda_{\text{pump}} = 1554.1 \text{ nm}$ ; (b)  $\lambda_{\text{pump}} = 1556.1 \text{ nm}$ ; (c)  $\lambda_{\text{pump}} = 1558.1 \text{ nm}$ ; (d)  $\lambda_{\text{pump}} = 1560.1 \text{ nm}$

Fig. 4 Output spectra (before filtering) at different pump wavelengths. (a)  $\lambda_{\text{pump}} = 1554.1 \text{ nm}$ ; (b)  $\lambda_{\text{pump}} = 1556.1 \text{ nm}$ ; (c)  $\lambda_{\text{pump}} = 1558.1 \text{ nm}$ ; (d)  $\lambda_{\text{pump}} = 1560.1 \text{ nm}$

5.0~6.0 nm时,输出功率较其他处大。综合输出波形及光谱,实验发现最优波长间隔为 5.8 nm。由于抽运光峰值功率高,经 HNLF 产生的非线性效应强,SPM 使光谱展宽,抽运中心频点两侧产生边频。当信号光频率处于边频峰值点频率时,FWM 效应最为明显,输出功率较其他波长间隔时明显增大[图 4(b)]。由于 DFB 激光器波长调节范围限制,此处仅对左边频做了分析,右边频有类似结果。波长间隔与输出功率的关系曲线的第一个峰值,是使用滤波器代替 WDM-C 所致,对分析结果无重要影响。

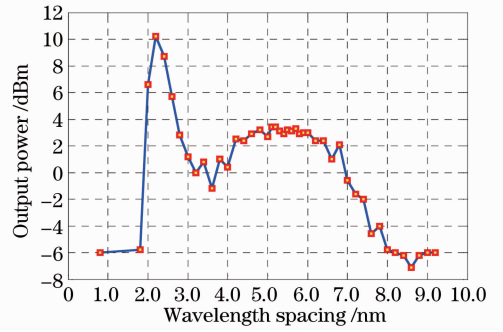


图 5 输出功率与波长间隔的关系  
Fig. 5 Relationship between output power and wavelength spacing

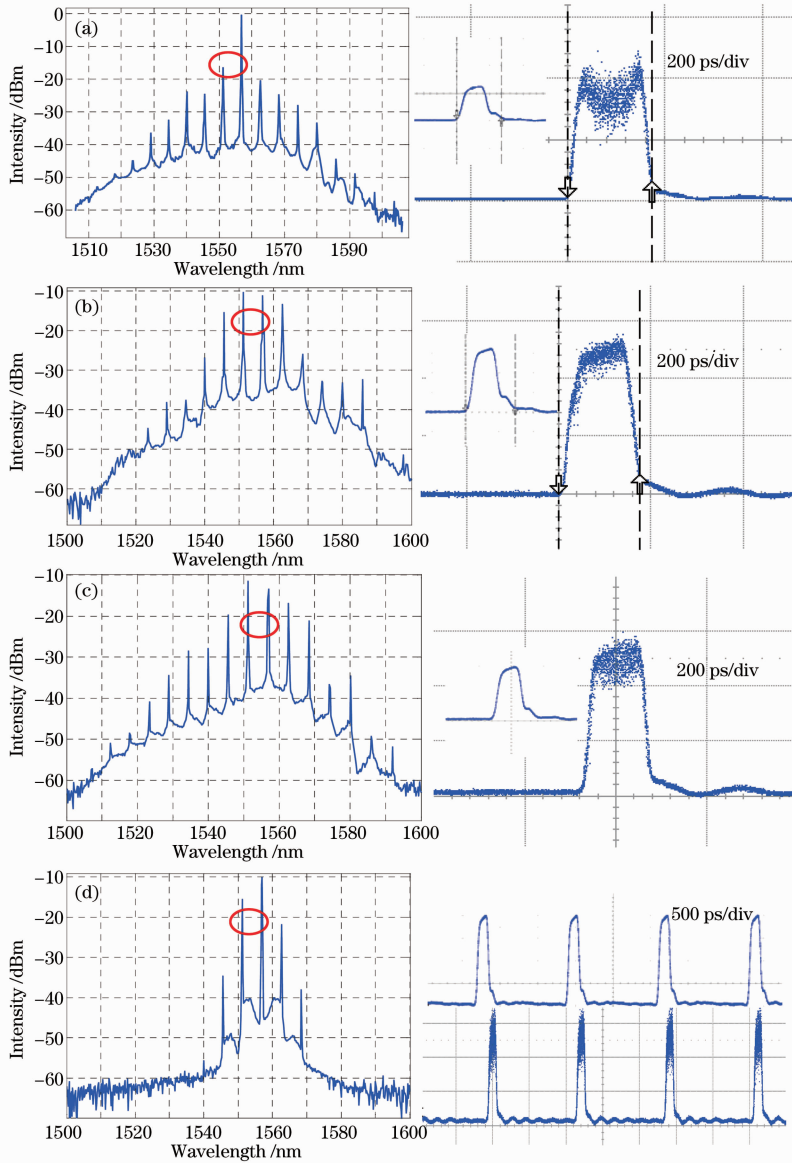


图 6 抽运光占空比  $D$  不同时,滤波前光谱及输出波形。(a)  $D=1/40, P_{out}=1.0$  dBm; (b)  $D=1/30, P_{out}=2.4$  dBm; (c)  $D=1/20, P_{out}=3.0$  dBm; (d)  $D=1/12, P_{out}=-3.0$  dBm

Fig. 6 Spectra before filtering and output waveforms at different pump duty cycles  $D$ . (a)  $D=1/40, P_{out}=1.0$  dBm; (b)  $D=1/30, P_{out}=2.4$  dBm; (c)  $D=1/20, P_{out}=3.0$  dBm; (d)  $D=1/12, P_{out}=-3.0$  dBm

图 6 是抽运光在不同占空比时,端口 2 光谱以及滤波后输出波形,反映了抽运光占空比对输出信号的影响。从图 6 可以看出,抽运光占空比不同时,端口 2 处信号光与抽运光相对强度不同(图中圈示)。在阈值点附近[图 6(b)、(c)],环路透射率大,信号光强度高,输出波形更清晰。信号拖尾小功率部分被抑制,脉冲受到压缩。实验观测占空比为 1/25 时,脉冲压缩量为 114.47 ps。当抽运峰值过大时[图 6(a)],超过阈值点,透射率降低,输出信号脉冲波形发生畸变,顶部破裂。图 7 的 NOLM 阈值效果图给出了相应解释。信号顶部的抖动是因为非线性效应受偏振影响<sup>[15]</sup>。图 8 是抽运光占空比与环路透射率的关系。占空比在 1/2~1/40 间变化,实验发现,在占空比为 1/25 时,达到环路阈值点,对应峰值功率为 3.75 W。此时输出信号光平均功率达到 3.4 dBm,大于输入功率 2.88 dBm。如图 8 中曲线顶点所示,透射率大于 100%,多出的能量来自于抽运光在 HNLF 中 SPM 效应的贡献。

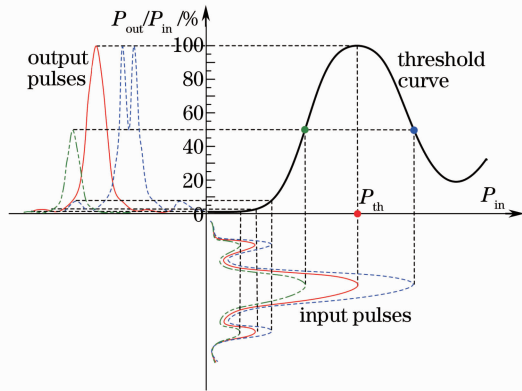


图 7 阈值特性效果图

Fig. 7 Threshold characteristic

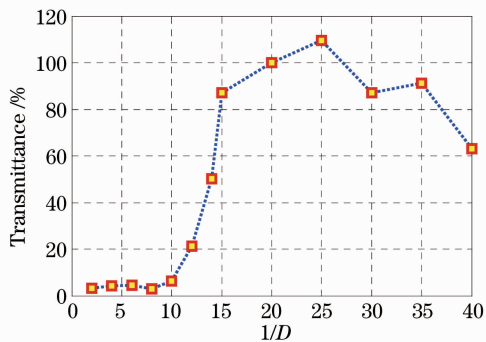


图 8 抽运光占空比与透射率关系

Fig. 8 Relationship between pump duty cycle  $D$  and NOLM transmittance

如图 9 所示,使用增益开关 DFB 激光器内调制产生 10 GHz 脉冲信号,经 10 Gb/s,  $2^7 - 1$  位伪随

机码(PRBS7)调制,同时调整 M-Z 调制器的偏压电平,使调制后信号产生小脉冲噪声,引入环路。参考图 5 的结果调整 TLD 的输出波长。噪声抑制眼图效果如图 10 所示。图 10(a)是图 9 中 a 点带有小脉冲噪声抽运信号。经 NOLM 环路输出后[图 10(b)]噪声被较好地抑制。

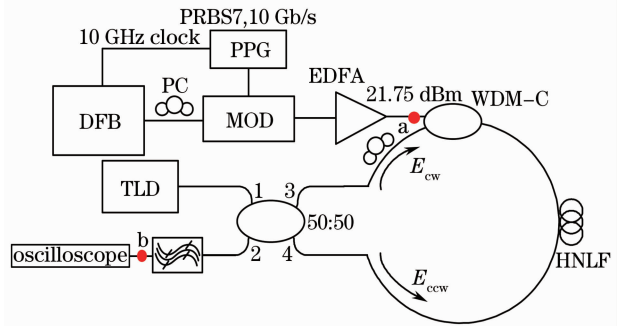


图 9 阈值系统原理图

Fig. 9 Schematic diagram of threshold system

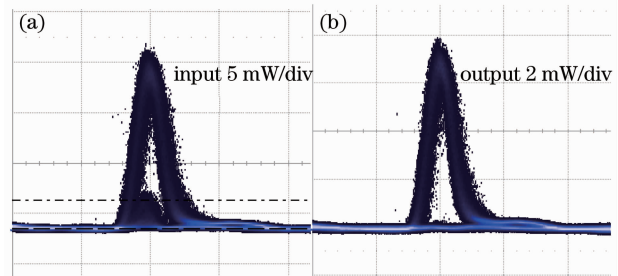


图 10 噪声抑制眼图。(a)带有小脉冲噪声的 a 点输入;  
(b)经 NOLM,噪声被抑制

Fig. 10 Eye diagram of noise suppression. (a) Input with noise at point a; (b) noise suppression after NOLM

## 5 结 论

研究了基于 HNLF 的 NOLM 阈值技术,对信号光与抽运光的波长间隔、抽运光占空比对输出的影响进行了实验研究。提出通过改变抽运光占空比来研究 NOLM 阈值特性的方法。结果表明,存在最优波长间隔 5.8 nm,信号光透射率最大;抽运占空比为 1/25 时,透射率出现峰值,对应抽运峰值功率即 NOLM 阈值为 3.75 W。占空比稍大或变小,输出都受到影响。抽运峰值功率的大小影响最终输出信号波形,即噪声抑制的效果。

## 参 考 文 献

- 1 K. Kitayama, X. Wang, N. Wada, OCDMA over WDM PON-resolution path to gigabit-symmetric FTTH [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(4): 1654~1662
- 2 Zheng Jilin, Wang Rong, Fang Tao *et al.*. Improvement of

- application of low-cost chirped optical pulse source in optical code-division multiple-access system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1238~1244
- 郑吉林, 王 荣, 方 涛等. 低成本啁啾脉冲光源用于光码分多址系统的优化改进[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1238~1244
- 3 Li Chuanqi, Zhou Xu, Song Biao *et al.*. A new OCDMA passive access network and its performance analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 660~664
- 李传起, 周 谱, 宋 标等. 一种光码分多址无源接入网及其性能研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 660~664
- 4 Zheng Jilin, Wang Rong, Pu Tao *et al.*. Multi-user 10 Gb/s optical code division multiple access experiment[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(s1): s105007
- 郑吉林, 王 荣, 蒲 涛等. 光码分多址系统 10 Gb/s 多用户系统实验[J]. *中国激光*, 2011, **38**(s1): s105007
- 5 H. Sotobayashi, W. Chujo, K. Kitayama. 1.6-b/s/Hz 6.4-Tb/s QPSK-OCDM/WDM (4 OCDM  $\times$  40 WDM  $\times$  40 Gb/s) transmission experiment using optical hard thresholding [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(4): 555~557
- 6 Z. Jiang, D. S. Seo, S. D. Yang *et al.*. Four-user, 2.5-Gb/s, spectrally coded OCDMA system demonstration using low-power nonlinear processing[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(1): 143~158
- 7 X. Wang, N. Wada, T. Hamanaka *et al.*. 10-user, truly-asynchronous OCDMA experiment with 511-chip SSFBG en/decoder and SC-based optical thresholder [C]. OFC/NFOEC, 2005, 97~99
- 8 O. Pottiez, E. A. Kuzin, B. Ibarra-Escamilla *et al.*. Experimental demonstration of NOLM switching based on nonlinear polarization rotation [J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(14): 892~894
- 9 Tian Jiajun, Yao Yong, Sun Yunxu *et al.*. Study on generation of the multiwavelength laser using the symmetric nonlinear optical loop mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 787~792
- 田佳峻, 姚 勇, 孙云旭等. 利用对称非线性光纤环镜产生多波长激光的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 787~792
- 10 K. Uchiyama, T. Morioka, S. Kawanishi *et al.*. Signal-to-noise ratio analysis of 100 Gb/s demultiplexing using nonlinear optical loop mirror[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(2): 194~201
- 11 Liu Xianbing, Ye Peida. Analyzing the switching characteristics of a NOLM demultiplexer with on analytic and numerical methods [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **B8**(5): 419~424
- 12 N. J. Doran, D. Wood. Nonlinear-optical loop mirror[J]. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(1): 56~58
- 13 Yang Yanfu, Lou Caiyun, Zhao Xiaofan *et al.*. Demultiplexing from 160 Gb/s to 10 Gb/s using nonlinear optical loop mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 611~616
- 杨彦甫, 娄采云, 赵晓凡等. 利用非线性光纤环镜 160 Gb/s 到 10 Gb/s 解时分复用[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 611~616
- 14 Jia Dongfang. Optimal design of all-optical wavelength conversion using nonlinear optical loop mirror (NOLM) [J]. *J. Liaodong University (Natural Sciences)*, 2007, **14**(3): 125~132
- 贾东方. NOLM 全光波长变换的优化设计[J]. *辽东学院学报 (自然科学版)*, 2007, **14**(3): 125~132
- 15 H. C. Hansen Mulvad, M. Galili, L. K. Oxenlowe *et al.*. Polarization-independent high-speed switching in a standard nonlinear optical loop mirror[C]. OFC/NFOEC, 2008, OMN3

栏目编辑: 谢 婧