

文章编号: 1001-3806(2008)04-0390-03

XPM 对非线性光纤环镜微波光子开关的影响

袁明辉^{1,3}, 邬昌峰², 孙小菡³

(1. 上海理工大学 光电学院, 上海 200093; 2 东南大学 电磁兼容研究室, 南京 210096; 3 东南大学 光子学与光通信研究室, 南京 210096)

摘要: 为了研究交叉相位调制 (XPM) 对非线性光纤环镜 (NOLM) 微波光子开关的影响。基于耦合非线性薛定谔方程, 采用分步傅里叶法建立考虑 XPM 在内的数值分析平台, 获得了 MOLM 微波光子开关中 XPM 对微波调制光载波信号和 NOLM 功率输出函数的影响。数值计算表明, XPM 导致调制波波畸变, 信号能量从主瓣泄露; 并且随着调制带宽的增大, 旁瓣泄露愈加严重。同时由于 XPM 效应的非互易性, NOLM 功率传输函数扭变, 在耦合器分光比 $f \in (0, 0.5)$ 区间减少而在 $f \in (0.5, 1)$ 区间增大。

关键词: 光电子学; 微波光子开关; 非线性光纤环镜; 交叉相位调制

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A

Impact of XPM on the microwave photonic switching with NOLM

YUAN Ming-hui^{1,3}, WU Chang-feng², SUN Xiao-han³

(1. College of Optical & Electronic Information Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2 Electromagnetic Compatibility Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China; 3 Laboratory of Photonics and Optical Communications, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In order to obtain the impact of cross-phase modulation (XPM) on the microwave photonic switching with nonlinear optical loop mirror (NOLM) the numeric analysis platform with XPM is established by the split-step Fourier method that can solve the coupled nonlinear Schrödinger equation, and the impact of XPM on the carrier signal modulated by the microwave and the power transmission function of NOLM T_m is obtained. The simulation results showed that XPM induced the distortion of waveforms and the leak of side lobes. And the larger the modulation bandwidth was, the larger the leak of side lobes. Furthermore, T_m was distorted because of the XPM-induced nonreciprocity: T_m decreased when the splitting ratio of the coupler $f \in (0, 0.5)$ and increased when $f \in (0.5, 1)$.

Key words: optoelectronics; microwave photonic switching; nonlinear optical loop mirror (NOLM); cross-phase modulation (XPM)

引 言

微波光子通信是一种采用模拟微波信号对光载波直接调制, 并通过光纤链路传输到接收端并解调的新兴通信技术^[1-2]。它解决了在金属波导中微波信号随着带宽增加传输损耗急剧上升的问题, 可以满足各类微波应用技术对带宽的需求, 获得业界广泛重视。微波光子学打通了微波电子学和光子学的界线, 将两者有机融合, 充分发挥光纤作为宽带大容量信息传输理想载体的优点, 使整个光电通信系统达到最优化。构

成微波光子通信传输链路的主要部件包括传输光纤、调制/发送/解调单元以及各种光信号处理单元。其中, 基于非线性光纤环镜 (nonlinear optical loop mirror, NOLM)^[3-5]的全光纤开关结构简单, 控制灵活方便, 可实现宽带模拟光载波信号处理。

研究表明, 交叉相位调制 (cross-phase modulation, XPM)^[6]造成 NOLM 中高速数字信号脉冲的串扰与畸变^[7-9], 但是对于 NOLM 模拟微波光子开关中 XPM 影响的公开报道尚未见到。

基于求解耦合非线性薛定谔方程的对称分步傅里叶法, 建立了考虑 XPM 在内的 NOLM 微波光子开关数值分析平台。获得了在 NOLM 微波光子开关中 XPM 对微波调制光载波信号和 NOLM 功率传输函数的影响。

1 模型及理论

NOLM 中光波传输原理如图 1 所示, NOLM 输入

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60272048); 上海市高校优秀青年教师科研专项基金资助项目 (563204)

作者简介: 袁明辉 (1976-), 男, 博士, 讲师, 主要研究领域为非线性光纤光学。

E-mail: yuan minghui@163.com

收稿日期: 2007-04-02; 收到修改稿日期: 2007-05-29

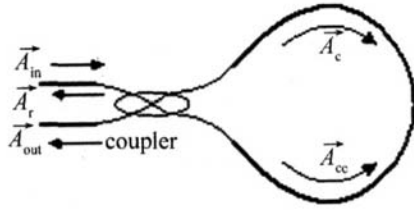


Fig 1 Notation used for describing optical switch in a NOLM

偏振光 \vec{A}_c 的线偏振光经 \vec{A}_{in} 耦合器后被分成两束反向传播的线(和 \vec{A}_{cc}), 其比值由耦合器的分光比 f 决定: $|\vec{A}_c| = \sqrt{f} |\vec{A}_{in}|$; $|\vec{A}_{cc}| = \sqrt{1-f} |\vec{A}_{in}|$ 它们绕环一周后再次回到耦合器处耦合输出, 一部分被反射 (\vec{A}_r), 一部分透射输出 (\vec{A}_{out})。定义 NOLM 的一个最主要的参量——功率传递函数为 (仅考虑群速度色散和自相位调制效应)^[10]:

$$T_m = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{A_{out}^2}{A_{in}^2} =$$

$$1 - 2f(1-f) \{1 + \cos[(1-2f)\gamma P_m L]\} \quad (1)$$

式中, P_{out} 和 P_{in} 分别为输出和输入的瞬时光功率, L 为光纤总长度。

NOLM 光纤环中两路相向传播的光场在时域有叠加过程并由此产生有害的 XPM 效应, 可以用波长和偏振态相同而传播方向相反的耦合非线性薛定谔方程表述^[7-8]:

$$\begin{cases} \frac{\partial A_c}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A_c}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A_c}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} A_c = \\ \quad i\gamma (|A_c|^2 + [u] |A_{cc}|^2) A_c \\ \frac{\partial A_{cc}}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A_{cc}}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A_{cc}}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} A_{cc} = \\ \quad i\gamma (|A_{cc}|^2 + [u] |A_c|^2) A_{cc} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\beta_1 = \frac{1}{v_g}$ (v_g 是光纤中的光速) 为一阶色散常数; β_2 为二阶色散常数; α 为衰减系数; γ 为非线性系数; c 为 XPM 耦合系数, 由两路光波之间的重叠量决定, 介于 $2/3$ 和 2 之间; $[u]$ 在两路光场在时域有叠加时为 1 , 否则为 0 。

2 数值计算与分析

基于 NOLM 理论模型, 采用分步傅里叶法对 NOLM 微波光子开关中 XPM 的影响进行了数值分析。数值计算中参量取值为: 光纤环长度为 0.5 个色散长度 ($0.5L_d$), 输入信号为归一化强度 $N = \sqrt{L_d/L_{NL}} = 1$ (L_d 和 L_{NL} 分别为光纤的色散长度和非线性长度) 的正弦调制波 (调制深度 1), 图 2~图 4 中所有数据均为归一化值。图 2 是 NOLM 光纤环中受 XPM 影响的 $40\text{GHz}/80\text{GHz}$ 正弦调制波演化图。可以看出, 光纤环中两路相向传播的调制波 \vec{A}_c 和 \vec{A}_{cc} 的波形发生畸变。调

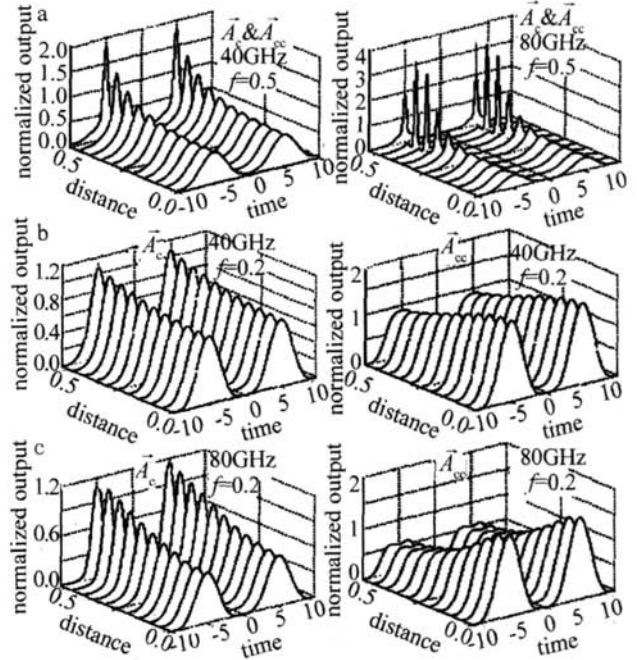


Fig. 2 Waveforms evolution figures with XPM in the fiber loop of NOLM

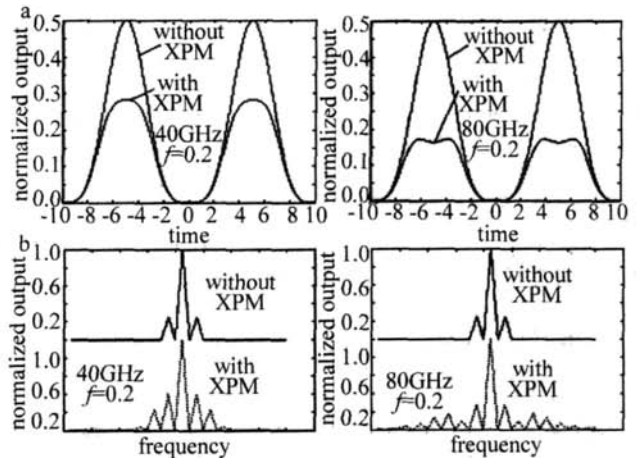


Fig. 3 Impact of XPM on the waveforms and spectrums of NOLM output

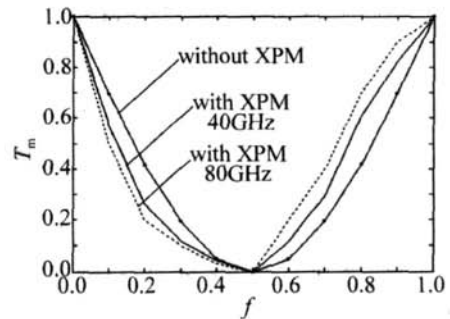


Fig. 4 Impact of XPM on the switching performance of NOLM

制带宽越大, 相应的 XPM 效应积累也越大, 波形畸变程度也就越深。当 $f=0.5$ 时, \vec{A}_c 和 \vec{A}_{cc} 强度相同, XPM 相移也相同, 此时的 XPM 相移最大, 波形畸变最为严重。当 $f \neq 0.5$ 时, \vec{A}_c 和 \vec{A}_{cc} 强度不同, 由于 XPM 效应的非互易性, XPM 相移也不同, 因而一路振幅增大, 一路振幅减小。

图3是在40GHz/80GHz调制带宽下XPM对分光比 $f=0.2$ 的NOLM输出信号波形(见图3a)和频谱(见图3b)的影响。由于XPM的影响,输出调制波波形畸变,同时由于XPM效应的非互易性,输出功率也发生改变。在频谱上,XPM导致输出信号旁瓣泄露,调制带宽越大,出现的谐波分量也越多。

图4是在40GHz/80GHz调制带宽下XPM对NOLM开关性能的影响,其中 $\gamma P_m L = 1$ 。当 $f=0$ 和 $f=1$ 时,光纤环内只有一个方向的光场,因而也就没有XPM;当 $f=0.5$ 时,光纤环内两光场相等,XPM相移完全相同而互相抵消,因而也不会影响NOLM的通断性能。由于XPM效应的非互易性,XPM对NOLM开关性能的影响在 $f \in (0, 0.5)$ 和 $f \in (0.5, 1)$ 区间明显不同:在 $f \in (0, 0.5)$ 区间由于反射增强而透射减少从而导致 T_m 下降;而在 $f \in (0.5, 1)$ 区间则情况刚好相反。

3 结论

在宽带NOLM微波光子开关中,XPM造成调制波波形畸变,信号功率旁瓣泄露,并且随着调制带宽的增大,旁瓣泄露愈加严重。同时由于XPM效应的非互易性,NOLM功率传输函数扭变,在耦合器分光比 $f \in (0, 0.5)$ 区间减少,而在 $f \in (0.5, 1)$ 区间增大。

(上接第389页)

交解耦。通过分析斜率探测噪声对各阶最优模式的影响程度后合理剔除受噪声影响严重的模式项,从而可提高波前模式复原精度。最优复原模式主要跟H-S传感器的子孔径空间分布有关,因此,也反映了H-S波前传感器对于波前斜率探测噪声的忍受程度。通过仿真方形 8×8 个子孔径分布的H-S波前传感器,上述最优模式确实能减少斜率探测噪声对波前复原的影响,因此具备一定的研究应用价值。

参考文献

- [1] ZHOU R Zh. The adaptive optics theory [M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 1996: 1-50 (in Chinese).
- [2] PLATTB C, ROLAND S. History and principles of Shack-Hartmann wavefront sensing [J]. Refractive Surgery, 2001, 17(5): S573-S577.
- [3] SEIFERT L, LIESENER J, TZAN I H J, et al. The adaptive Shack-Hartmann sensor [J]. Opt Commun, 2003, 216: 313-319.
- [4] LIB, YU X. Application of wavelet transform to zonal wavefront reconstruction [J]. Optical Technique, 2001, 27(3): 206-211 (in Chinese).

参考文献

- [1] SEEDS A J, WILLIAMS K J. Microwave photonics [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(12): 4628-4641.
- [2] SEEDS A J. Microwave photonics [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3): 877-887.
- [3] DORAN N J, DAV D W. Nonlinear optical loop mirror [J]. Opt Lett, 1988, 13(1): 56-58.
- [4] NELSON B P, BLOW K J, CONSTANTINE P D, et al. All-optical Gbit/s switching using nonlinear optical loop mirror [J]. Electron Lett, 1991, 27(9): 704-705.
- [5] MA H Q, ZHAO W, ZHANG W, et al. Wavelength-tunable passively-mode locked fiber lasers [J]. Laser Technology, 2006, 30(3): 289-291 (in Chinese).
- [6] ZHONG X Q, LI D Y, CHEN J G. Further analysis of modulation instability induced by cross-phase modulation [J]. Laser Technology, 2004, 28(4): 427-430 (in Chinese).
- [7] YUAN M H, SUN X H. Impact of XPM on the performance of optical switching with NOLM [J]. Proc SPIE, 2006, 6389: 638919-1-638919-10.
- [8] YUAN M H, ZHANG M D, SUN X H. Impact of XPM on the performance of NOLM switch [J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(6): 838-841 (in Chinese).
- [9] CHEN J, KIM H, CHUNG Y C. Cross-phase modulation in short-period dispersion managed fiber [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 13(7): 663-665.
- [10] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics [M]. 2nd ed. New York: Academic, 1995: 122.
- [11] LANE R G, TALLON M. Wavefront reconstruction using a Shack-Hartmann sensor [J]. Appl Opt, 1992, 31(32): 6902-6908.
- [12] NOLL R J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence [J]. Opt Engng, 1977, 16(8): 1065-1072.
- [13] YANG H F, JIANG Z F. Research of Zernike modal wavefront reconstruction of 19-element Hartmann-Shack wavefront sensor [J]. Laser Technology, 2005, 29(5): 484-487 (in Chinese).
- [14] DUAN H F, LI D Y, WANG H Y, et al. The effect of mode orthogonality on precision of wavefront measurement and correction using Hartmann-Shack sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(9): 1143-1148 (in Chinese).
- [15] JIANG W H, XIAN H, SHEN F, et al. Detecting error of Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 1998, 15(2): 218-318 (in Chinese).
- [16] LIX Y, JIANG W H. Zernike modal wavefront reconstruction error of Hartmann-Shack wavefront sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(10): 1236-1241 (in Chinese).
- [17] RODDIER N. Atmospheric wavefront simulation using Zernike polynomial [J]. Opt Engng, 1990, 29(10): 1174-1180.