

交叉相位调制对非线性光纤环境中 光脉冲传输的影响*

袁明辉 张明德 孙小蕊

(东南大学电子工程系光子学与光通信研究室, 南京 210096)

摘要 基于耦合非线性薛定谔方程, 采用分步傅里叶方法分析了在单波长信道和 WDM(波分复用)4 波长信道中 XPM(交叉相位调制)对高速 NOLM(非线性光纤环镜)光开关中脉冲传输的影响. 数值计算表明: XPM 造成 NOLM 中信号脉冲串扰与畸变, 并造成 NOLM 开关性能的下降. WDM 系统 NOLM 光纤环中的同向传播的各波长之间的 XPM 串扰比相向脉冲之间的 XPM 效应的影响更大, 并且波长越短输出功率越低, 中间信道受 XPM 的影响所导致的脉座现象和走离效应比两侧波长信道严重.

关键词 物理电子学; 全光开关; 非线性光纤环镜; 交叉相位调制

中图分类号 TN929 **文献标识码** A

0 引言

1988 年非线性光纤环镜 (NOLM) 在英国伯明翰 Aston 大学问世, 它可以灵活地构成各种全光器件, 如光开关^[1]、被动锁模光纤激光器^[2]、光纤陀螺仪^[3]、全光波长转换器^[4,5]、OTDM 解复用器^[6]、全光逻辑门^[7]等. 目前, 基于 NOLM 的全光器件技术已经比较成熟, 它们具有结构简单、控制灵活方便、工作速度极高的优点.

由于 NOLM 光纤环中两路相向传播的脉冲串在时域有叠加, 从而产生有害的 XPM 串扰, 造成 NOLM 中信号畸变与开关性能的下降. 而且随着 NOLM 工作速度的提高, 这种叠加所导致的 XPM 影响日益严重. 如果是 WDM 多波长信道, 除了相向脉冲时域叠加所导致的 XPM 之外, 脉冲本身各个波长之间的 XPM 串扰, 并且波长间的 XPM 串扰比时域叠加所导致的 XPM 更为严重.

本文基于耦合非线性薛定谔方程, 采用分步傅里叶法, 仿真分析了在单波长信道和 WDM4 波长信道中 XPM 对 NOLM 光开关性能的影响.

1 模型及理论

NOLM 中光波传输原理如图 1, NOLM 输入的线偏振光 A_i 经耦合器后被分成两束反向传播的线偏振光, 其幅值比率由耦合器的分光比 f 决定: $|A_c| = \sqrt{f}|A_i|$; $|A_{cc}| = \sqrt{1-f}|A_i|$; 它们绕环一周后再次回到耦合器处耦合输出, 一部分 (A_r) 被反射, 一

部分 (A_o) 透射输出.

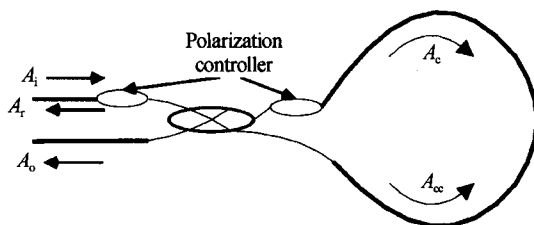


图 1 NOLM 中光波传输原理
Fig. 1 Notation used for describing optical switch in a NOLM

NOLM 光纤环中两路相向传播脉冲串在时域有叠加过程并由此产生有害的 XPM 效应^[8]. 对于单波长信道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^[9]

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial z} + \beta' \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta'' \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} A = \\ \quad i\gamma(|A|^2 + [u]c|B|^2)A \\ \frac{\partial B}{\partial z} + \beta' \frac{\partial B}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta'' \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} B = \\ \quad i\gamma(|B|^2 + [u]c|A|^2)B \end{cases} \quad (1)$$

式中, A, B 为光纤环中两路相向传播脉冲的包络慢变振幅, $\beta' = v_g^{-1}$ (v_g 是光纤中的光速), β'' 为二阶色散常量, 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 $\frac{2}{3}$ 和 2 之间,

$[u]$ 在两路脉冲在时域有叠加时为 1, 否则为 0.

对于 WDM 系统多波长信道情况比较复杂, 除了 NOLM 中两路相向传播脉冲串之间的 XPM 以外, 还有脉冲自身各波长之间的 XPM 串扰, n 路波长的耦合非线性薛定谔方程可以表述为^[9]

* 国家自然科学基金(编号: 60272048)资助项目
Tel: Email: yuanminghui@seu.edu.cn
收稿日期: 2005-10-09

$$\begin{cases} \frac{\partial A_i}{\partial z} + \beta' \frac{\partial A_i}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta'' \frac{\partial^2 A_i}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} A_i = \\ i\gamma_i (|A_i|^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n 2|A_j|^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n [u_j] c_j |B_j|^2) A_i \\ \frac{\partial B_i}{\partial z} + \beta' \frac{\partial B_i}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta'' \frac{\partial^2 B_i}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} B_i = \\ i\gamma_i (|B_i|^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n 2|B_j|^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n [u_j] c_j |A_j|^2) B_i \end{cases} \quad (2)$$

($i=1, \dots, n$)

式中, 等式右边第二项为脉冲自身波长之间的 XPM 串扰, 第三项为相向脉冲串的 XPM 效应。

在单模光纤中, 非线性系数 γ 并不是稳定的^[9,10], 而且由于 PMD 偏振模色散的影响, 这种不稳定性会加剧。为了限制这种不稳定性, 在 NOLM 输入端和光纤环入口处添加偏振控制器以保证光束是线偏振的, 这样就在很大程度上减少了由于偏振态的影响所造成 γ 的不稳定。

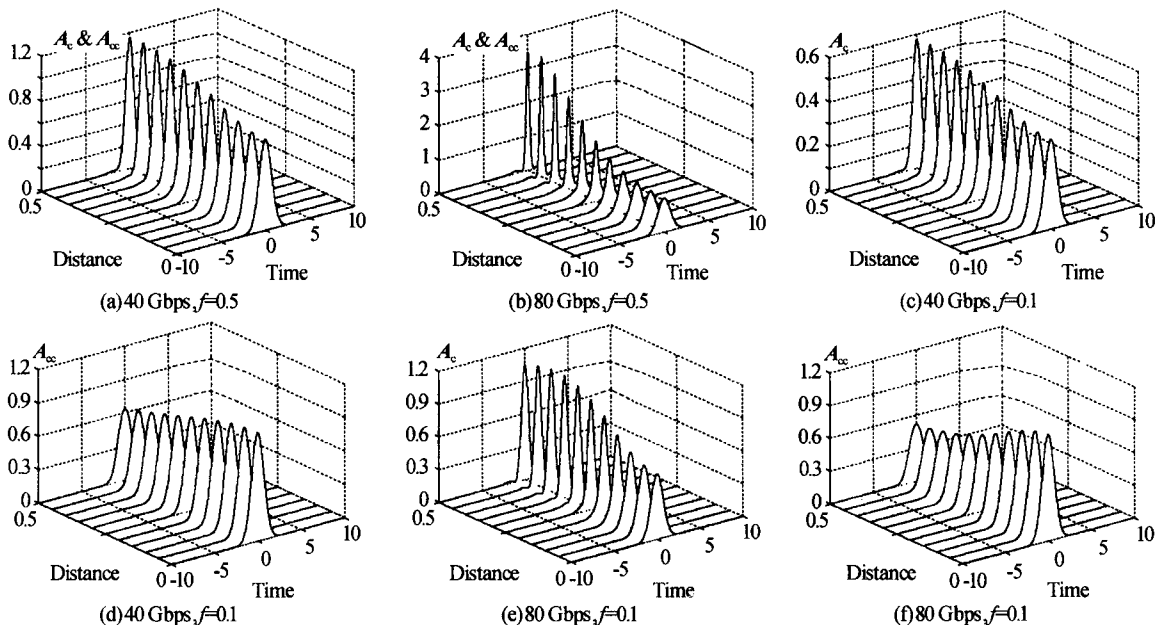


图 2 单波长信道受 XPM 影响的光纤环中脉冲演化图

Fig. 2 Pulse evolution with XPM in the single wavelength channel in the fiber loop

波形也发生畸变。NOLM 工作速度越高, 环中每个脉冲传播过程中所遇到的相向脉冲数也越多, 相应 XPM 效应的积累也就越大。

图 3 是在 40Gbps 和 80Gbps 速率下 XPM 对分光比 $f=0.2$ 的 NOLM 输出脉冲的影响。可以看出, 由于 XPM 的影响, 输出脉冲被压缩, 同时输出峰值功率也发生改变。这是由于 XPM 效应的非互易性, 即如果两路相向传播的脉冲功率不同 (即 $f \neq 0.5$), XPM 对它们的影响也不同, 这种不平衡性对 NOLM 的开关性能造成较大的影响。

为了限制 XPM 的有害影响, 一方面可以采用尽量减少 NOLM 的输入功率和采用超短脉冲减少

2 数值计算与分析

基于耦合非线性薛定谔方程, 利用分步傅里叶数值算法分别对 NOLM 在单波长信道和 4 波长信道时 XPM 效应的影响进行了仿真研究。数值计算中参量取值为: 光纤环长度为个色散长度 ($0.5L_D$); 输入信号: 单波长信道为 1550 nm 的标准高斯脉冲 (归一化峰值功率 $N = \sqrt{L_D/L_{NL}} = 1$), WDM4 波长信道 ($\lambda_1 = 1560.61$ nm, $\lambda_2 = 1557.36$ nm, $\lambda_3 = 1554.13$ nm, $\lambda_4 = 1550.92$ nm, 间隔 400 GHz) 时每个信道信号速率与单波长信道相同。

2.1 单波长信道 XPM 的影响

图 2 是单波长信道在 40Gbps 和 80Gbps 速率下受 XPM 影响的 NRZ 码高斯脉冲在 NOLM 光纤环中的演化图。可以看出, 光纤环中两路相向传播的脉冲由于 XPM 效应而被压缩或展宽, 同时脉冲

脉冲串之间重叠时间的方法来减少 XPM 的影响, 另一方面也可以采用预调制的方法^[11], 让两路反向传播的光波在入环之前功率被调制, 从而减少 XPM 的影响, 利用有限相干时间的宽带光源也可起到同样的效果^[12]。

2.2 4 波长信道 XPM 的影响

对于 WDM 系统多波长信道情况比较复杂, 其自身的各个波长之间的 XPM 串扰远超过相向脉冲串的 XPM 效应。

图 4 是 4 波长信道 NRZ 码高斯脉冲在 40Gbps 和 80Gbps 速率下 XPM 对分光比 $f=0.2$ 的 NOLM 输出脉冲的影响。可以看出: 由于 XPM 效

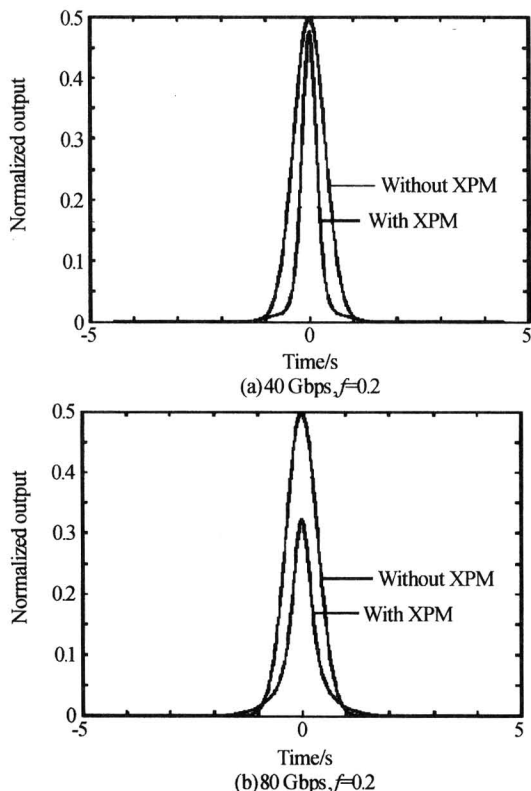


图3 单波长信道 XPM 对 NOLM 输出脉冲的影响
Fig. 3 Output pulses of the NOLM with XPM in the single wavelength channel

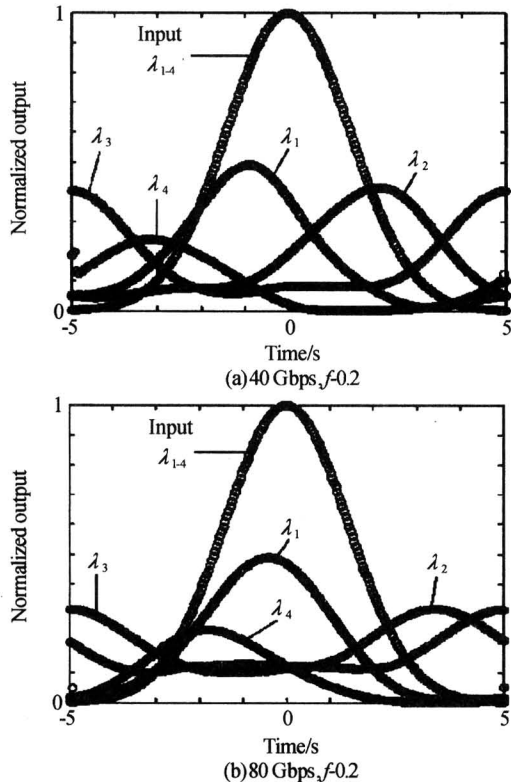


图4 4 波长信道 XPM 对 NOLM 输出脉冲的影响
Fig. 4 Output pulses of the NOLM with XPM in the 4-wavelength channel

应的影响,NOLM 输出的信号波形畸变,一部分能量从主瓣泄漏形成脉座,中间波长信道的脉座比两

侧波长信道大,并且波长越短输出脉冲的峰值越低.由于 XPM 效应的非互易性,各个波长信道的信号在时间轴上都发生了走离,中间波长的走离比两侧波长严重.

3 结论

在高速 NOLM 光开关中,XPM 造成 NOLM 中信号串扰与畸变,PMD 造成 NOLM 光开关性能恶化,而且 WDM 系统中在 NOLM 光纤环中的同向传播的各波长之间的 XPM 串扰比相向脉冲之间的 XPM 效应影响更为严重,并且波长越短输出功率越低,中间信道受 XPM 所导致的脉座现象和走离效应比两侧波长信道严重.

参考文献

- Blow K J, Doran N J, Nelson B P. Demonstration of the nonlinear fibre loop mirror as an ultrafast all-optical demultiplexer. *Electronics Letters*, 1990, **26**(14): 962~964
- Seong N H, Kim D Y. A new figure-eight fiber laser based on a dispersion-imbalanced nonlinear optical loop mirror with lumped dispersive elements. *Photonics Technology Letters*, 2002, **14**(4): 459~461
- Bergh R, Lefevre H, Shaw H. An overview of fiber-optic gyroscopes. *Lightwave Technology*, 1984, **2**(2): 91~107
- Chi N, Chen S, Guan K J. All-optical wavelength conversion based on a nonlinear optical loop mirror. *APCC/OECC '99*, 1999, **2**: 1396~1398
- 余建军, 陈树强, 管克俭, 等. 利用 NOLM 实现连续光到归零码脉冲和波长的同时变换. *光子学报*, 1999, **28**(3): 271~275
Yu J J, Chen S Q, Guan K J, et al. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(3): 271~275
- Andrekson P A, Olsson N A, Simpson R J, et al. 64 Gb/s all-optical demultiplexing with the nonlinear optical-loop mirror. *Photonics Technology Letters*, 1992, **4**(6): 644~647
- Jinno M, Matsumoto T. Ultrafast all-optical logic operations in a nonlinear Sagnac interferometer with two control beams. *Optics Letters*, 1991, **16**(4): 220~222
- 陶滢, 吴重庆. 反向交叉相位调制对 NOLM 开关特性影响. *光子学报*, 2000, **29**(12): 1077~1082
Tao Y, Wu C Q. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(12): 1077~1082
- Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics*, 2nd Edition. New York: Academic, 1995, 247
- 贾维国, 杨性愉. 非线性双折射色散光纤中极化调制不稳定性分析. *光子学报*, 2002, **31**(6): 693~696
Jia W G, Yang X Y. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(6): 693~696

- 11 Bergh R A, Lefevre H C, Shaw H J. Compensation of the optical Kerr effect in fiber-optic gyroscopes. *Optics Letters*, 1982, 7(6): 282~284
- 12 Frigo N J, Taylor H F, Goldberg L, *et al.* Optical Kerr effect in fiber gyroscopes: effects of nonmonochromatic sources. *Optics Letters*, 1983, 8(2): 119~121

Impact of XPM on the pulse transmission in NOLM

Yuan Minghui, Zhang Mingde, Sun Xiaohan

Laboratory of Photonics and Optical Communications, Department of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing 210096

Received date: 2005-10-09

Abstract The impact of XPM effect on the pulse transmission in the NOLM switch with high working speed in the single wavelength channel and WDM 4-wavelength channel is analyzed by the split-step Fourier method based on the coupled nonlinear Schrödinger equation. The simulation results show that XPM induces the crosstalk and aberration of signals and deteriorates the switching performance of NOLM. Furthermore, the impact of XPM crosstalk of wavelengths of the pulse is far more than that of XPM effect of counterpropagating pulses in the fiber loop in the WDM system. The shorter the wavelength is, the lower the output power of NOLM is. The pulse pedestal and walk-off effect induced by XPM in the middle wavelength channels are more than those in the edge wavelength channels.

Keywords Physical electronics; All optical switch; Nonlinear optical loop mirror (NOLM); Cross-phase modulation (XPM)



Yuan Minghui Male, a native of Hunan Province. He received B. S. degree in Nanjing University of Science & Technology in 1998 and M. S. degree in Wuyi University in 2003. At present, he studies for Ph. D. at Southeast University. His main research field is the nonlinear fiber optics.