

偏振模色散对非线性光纤环镜微波光子开关的影响及其补偿*

袁明辉 张明德 孙小菡

(东南大学电子工程系光子学与光通信研究室,南京 210096)

摘要 建立了考虑 PMD 在内的 NOLM 微波光子开关光波传输方程, 给出了基于耦合非线性薛定谔方程的分步傅里叶法, 三维庞加莱球理论和琼斯传输矩阵法的数值分析模型。仿真获得在光子开关中微波直接强度调制光载波的传输过程, 以及在不同调制带宽下一阶和二阶 PMD 对光波信号和 NOLM 功率传输函数的影响。指出 PMD 造成 NOLM 开关性能钝化和消光比严重恶化, 并引起信号信噪比下降和旁瓣泄漏。当调制带宽大于 40GHz 时, 二阶 PMD 的影响比一阶 PMD 更加严重。最后讨论了 NOLM 中的 PMD 补偿问题。

关键词 物理电子学; 全光开关; 非线性光纤环镜; 偏振模色散; 补偿

中图分类号 TN929

文献标识码 A

0 引言

微波光子通信是一种采用模拟微波信号对光载波进行调制, 并通过光纤链路传输到接收端进行接收解调的新兴通信技术。它可以满足各类微波应用技术对带宽的需求, 解决在电缆和金属波导中微波信号随带宽增加传输损耗急剧上升的问题, 获得业界广泛重视^[1]。构成微波光子通信传输链路的主要部件为传输光纤、发送/调制/解调单元以及包括宽带光开关、OTDM 和 WDM 器件在内的各种光信号处理单元。其中, 基于 NOLM 的全光纤开关^[2]结构简单, 控制灵活方便, 可实现宽带微波光载波信号处理。

研究表明, PMD 对高速数字光传输系统(40Gbps 或以上)的传输性能产生严重影响, PMD 导致光波波形畸变, 眼图恶化以及系统 Q 值下降^[3,4]。同时, PMD 也会造成用于高速光通信网络系统中的 NOLM 开关性能钝化和消光比严重恶化^[5]等现象, 必须采用补偿技术予以优化。但是 PMD 对用于宽带微波光子通信系统中的 NOLM 开关性能影响的公开报道尚未见到。

本文建立了考虑 PMD 在内的 NOLM 微波光子开关光波传输方程, 给出了基于耦合非线性薛定谔方程的分步傅里叶法, 三维庞加莱球理论和琼斯传输矩阵法的数值分析模型。

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。

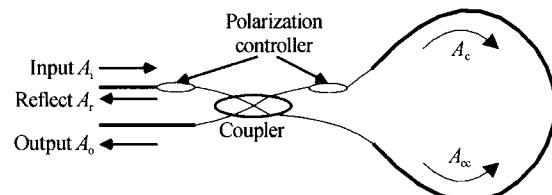


图 1 NOLM 中光波传输原理

Fig. 1 Notation used for describing optical switch in a NOLM

如果不考虑偏振态的影响, NOLM 光纤环中两路光束的传播都可以用标量非线性薛定谔方程来描述^[6]

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \beta' \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta'' \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} A = i\gamma |A|^2 A \quad (1)$$

式中, A 为光波幅值, β' 为 $\frac{1}{v_g}$ (v_g 为光纤中的光群速度), β'' 为二阶色散系数, α 为衰减系数, γ 为非线性系数。

由于 PMD 是由光信号两个垂直并相互影响的偏振态的不同步所造成的, 因此使用考虑偏振态影响的耦合非线性薛定谔方程(CNLSE)^[6]来进行研究

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial A_x}{\partial z} + \beta_x \frac{\partial A_x}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta'' \frac{\partial^2 A_x}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} A_x = \\ \qquad i\gamma (|A_x|^2 + \frac{2}{3} |A_y|^2) A_x \\ \frac{\partial A_y}{\partial z} + \beta_y \frac{\partial A_y}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta'' \frac{\partial^2 A_y}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} A_y = \\ \qquad i\gamma (|A_y|^2 + \frac{2}{3} |A_x|^2) A_y \end{array} \right. \quad (2)$$

* 国家自然科学基金(60272048)资助项目

式中, A_x, A_y 为信号在两个偏振方向上的光波幅值, $\beta_x - \beta_y$ 为差分群时延(DGD)。

在单模光纤中,由于两个垂直的偏振模之间群速度的不同,使得在传播中光信号畸变,从而形成偏振模色散(PMD)。PMD 是一个随时间缓慢变化的随机统计量,满足麦克斯韦分布。它的两个主偏振态(PSP)之间的差分群时延(DGD)在时域的统计平均值满足: $\Delta\tau = D_{\text{pmd}}\sqrt{L}$, 其中 D_{pmd} 为一阶 PMD 系数, L 是光纤长度。

按照三维庞加莱球表示法^[7], PMD 可以描述为 $\Omega(\omega) = \Delta\tau \cdot s$, 式中, $s = (s_x, s_y, s_z)$ 为指向光纤基本偏振态快轴方向的单位矢量

$$\begin{aligned} s_x &= \frac{|A_x|^2 - |A_y|^2}{|A_x|^2 + |A_y|^2} \\ s_y &= \frac{2\text{Re}(A_x A_y^*)}{|A_x|^2 + |A_y|^2} \\ s_z &= \frac{2\text{Im}(A_x A_y^*)}{|A_x|^2 + |A_y|^2} \end{aligned} \quad (3)$$

在二阶近似下,PMF 可以表示为^[7]

$$\Omega(\omega) = \Omega(\omega_0) + \Omega_\omega(\omega - \omega_0) = (s \cdot \Delta\tau)|_{\omega=\omega_0} + (\Delta\tau' \cdot s)|_{\omega=\omega_0} + 2k \cdot \Delta\tau|_{\omega=\omega_0}(\omega - \omega_0) \quad (4)$$

式中, $\Omega(\omega_0)$ 和 $\Omega_\omega(\omega - \omega_0)$ 分别表示一阶和二阶 PMD, $\Delta\tau' = \partial\tau/\partial\omega|_{\omega=\omega_0}$, $k = |\partial s/\partial\omega|_{\omega=\omega_0}|$ 代表解偏振。从式(4)可以看出:一阶 PMD 的影响体现在时域($\Delta\tau$);二阶 PMD^[8]与频率有关,其影响包括时域($\Delta\tau'$)和频域($\Delta\tau''$)。

在分步傅里叶法中,假定光纤是由 N 段等长的 PMF 构成,相邻的两段 PMF 之间随机耦合^[9]。其传输方程可以用琼斯矩阵 $T(\omega)$ 来描述^[7]

$$T(\omega) = \prod_{n=1}^N B_n(\omega) R_n(\omega) = \prod_{n=1}^N \begin{bmatrix} e^{j(\frac{\sqrt{3}\pi h}{2} D_{\text{pmd}}\omega + \varphi_n)} & 0 \\ 0 & e^{-j(\frac{\sqrt{3}\pi h}{2} D_{\text{pmd}}\omega + \varphi_n)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_n & \sin \theta_n \\ -\sin \theta_n & \cos \theta_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, $B_n(\omega)$ 是表征长度为 $h=L/N$ 的第 n 段 PMF 的双折射矩阵; $R_n(\omega)$ 是表征相邻两段 PMF 之间耦合的旋转矩阵; φ_n 和 θ_n 分别是在 0 到 2π 之间随机均匀分布的附加相位和耦合角。

在单模光纤中,非线性系数 γ 并不是稳定的^[6],而且由于 PMD 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纤内光束是线偏振的,这样就在很大程度上减少了由于偏振态影响所造成的 γ 不稳定。

2 数值计算及分析

基于耦合非线性薛定谔方程,利用分步傅里叶数值计算法对微波光子通信系统基本 NOLM 光开关单元中一阶和二阶 PMD 的影响进行了仿真研究。

计算中, NOLM 耦合器分光比 $f=0.45$, 光纤环长度 5 km; 光载波波长 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$, 功率 $P_{\text{in}}=10 \text{ mW}$; 光纤性能参数分别为: 衰减系数 $\alpha=0.2 \text{ dB/km}$, 二阶色散系数 $\beta_2=-20 \text{ ps}^2/\text{km}$ 和非线性系数 $\gamma=20 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 。

2.1 一阶 PMD 的影响

图 2 是 NOLM 中输入 40GHz 和 80GHz 调制带宽的正弦强度调制波受一阶 PMD 影响的归一化输出波形图, 图中 D_{pmd} 单位为 $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ 。一阶 PMD 的影响主要表现为调制信号波形的畸变,从而极大地降低了传输信号的信噪比。

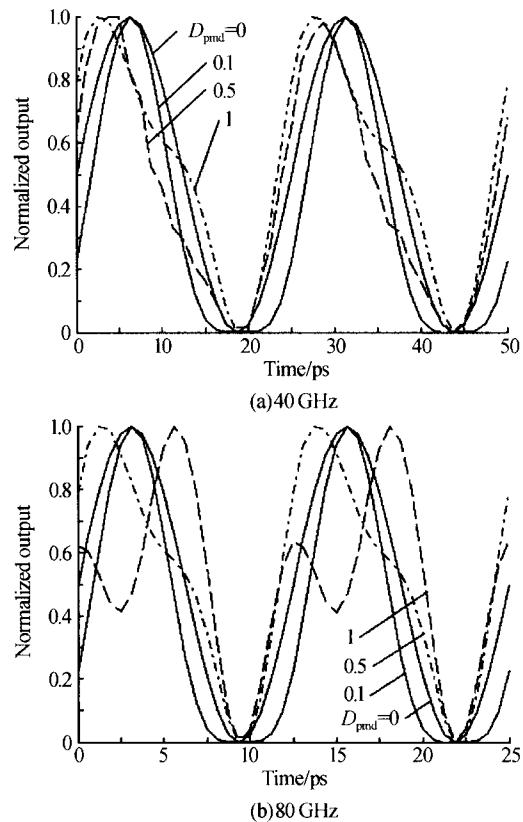


图 2 一阶 PMD 对正弦调制信号的影响

Fig. 2 Impact of the first-order PMD on the sinusoidal modulated signal

图 3 是在 40 GHz 和 80 GHz 调制带宽(调制深度为 1)下, 一阶 PMD 对 NOLM 开关性能的影响, 其中 $\gamma P_{\text{in}} L = 1$, 图中 D_{pmd} 单位为 $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ 。定义 NOLM 的功率传输函数 $T_m = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{|\mathbf{A}_{\text{out}}|^2}{|\mathbf{A}_{\text{in}}|^2}$, 式中 P_{out} 和 P_{in} 分别是输入和输出的瞬时光功率。如果不考虑 PMD 的影响有^[6]

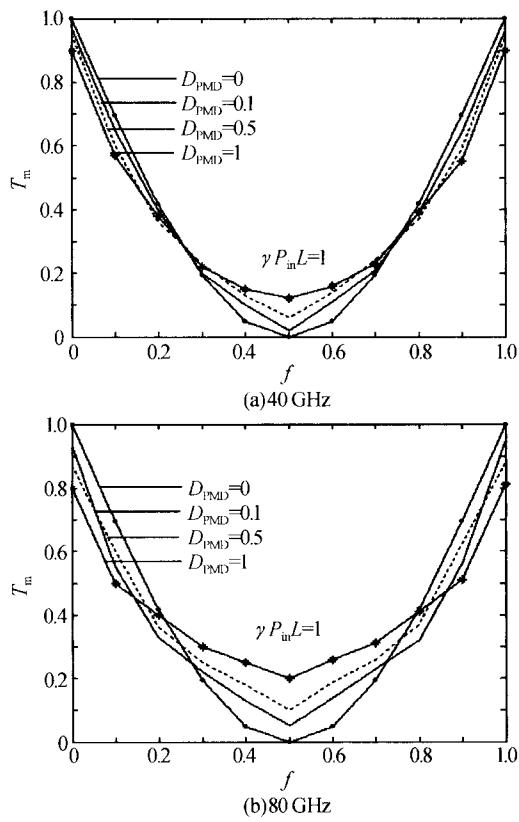


图3 一阶 PMD 对 NOLM 开关性能的影响
Fig. 3 Impact of the first-order PMD on the switching performance of NOLM

$T_m = 1 - 2f(1-f)\{1 + \cos[(1-2f)\gamma P_{in}L]\}$ (6)
从式(6)可以看出, $T_m \in [0, 1]$ 是输入光功率 P_{in} 的

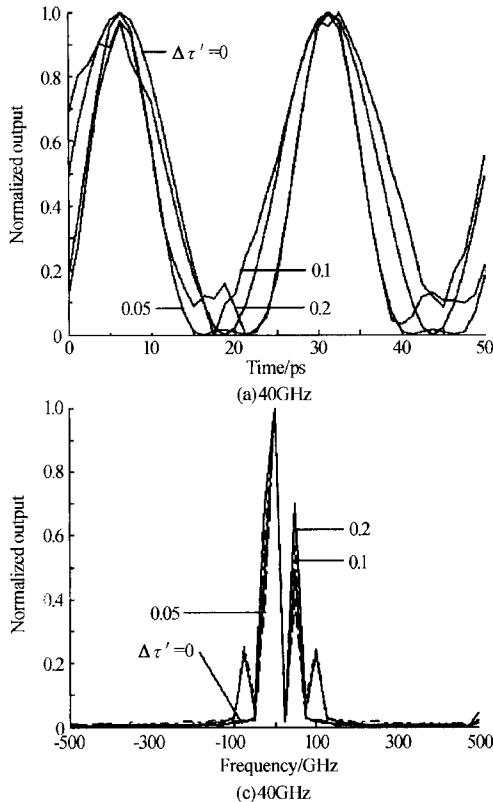


图5 二阶 PMD(仅考虑 $\Delta\tau'$)对正弦调制信号波形(a)、(b)和频谱(c)、(d)的影响
Fig. 5 Impact of $\Delta\tau'$ on the waveform (a), (b) and spectrum (c), (d) of the sinusoidal modulated signal

余弦函数,而且 $f=0.5$ 时 $T_m=0$. 由于 PMD 的影响,NOLM 的开关性能钝化,而且 T_m 值总是大于 0 (即使在 $f=0.5$ 的情况下),也就是说 NOLM 不能全“关”,这就在很大程度上降低了 NOLM 光开关的消光比.

定义 SNR 代价 $P_s = 20\lg(\frac{\text{SNR}_{\text{PMD}=0}}{\text{SNR}})$ (dB),

从图 4 可以看出, P_s 和 D_{pmd} 近似成线性关系.

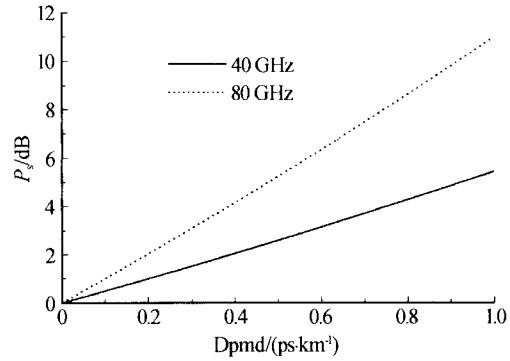


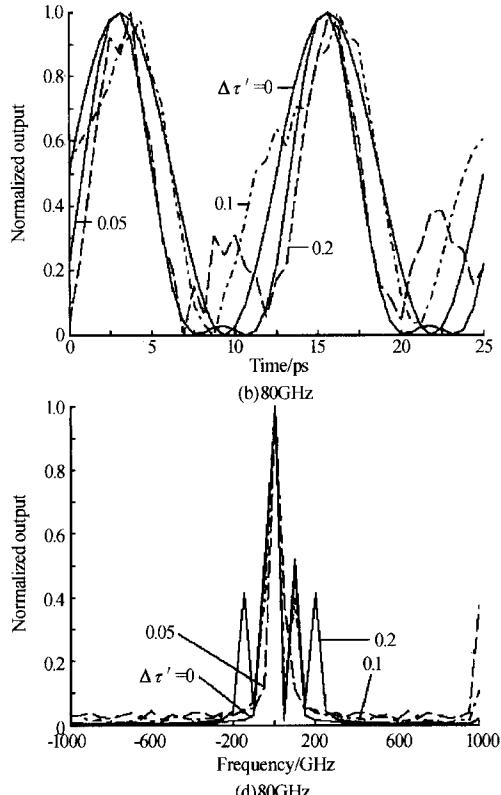
图4 一阶 PMD 对 SNR 的影响

Fig. 4 Impact of the first-order PMD on the SNR of the sinusoidal modulated signal

2.2 二阶 PMD 的影响

在调制带宽较小时,NOLM 主要受一阶 PMD 的影响,高阶 PMD 的影响不大. 而当调制带宽高于 40 GHz 时,高阶 PMD 比一阶 PMD 的影响更大.

图 5 是 NOLM 中输入 40 GHz 和 80 GHz 调制



带宽的正弦强度调制波(调制深度为1)受二阶PMMD(仅考虑频域部分 $\Delta\tau'$,单位为:ps/GHz)影响的归一化输出波形图5(a)、(b)和频谱图(c)、(d). $\Delta\tau'$ 的影响主要表现为附加频率啁啾,不但造成信号波形失真而且导致信号频谱的展宽和旁瓣泄漏.

图6是在40 GHz和80 GHz调制带宽(调制深度为1)下一阶和二阶PMMD对NOLM开关性能的影响,其中 $\gamma P_{in}L=1$. $\Delta\tau$ 的单位为ps,其影响体现在时域,表现为信号波形的畸变,而 $\Delta\tau'$ 的影响主要在频域(频率啁啾).在大调制带宽(≥ 80 GHz)下, $\Delta\tau'$ 过大(≥ 0.2 ps/GHz)将造成NOLM开关性能的彻底失效.而且在某些情况下,由于 $\Delta\tau'$ 引入正的频率啁啾使得其与光纤的二阶色散系数乘积 $\beta_2 C < 0$ (在负色散区域),产生啁啾压缩效应, T_m 将大于1.

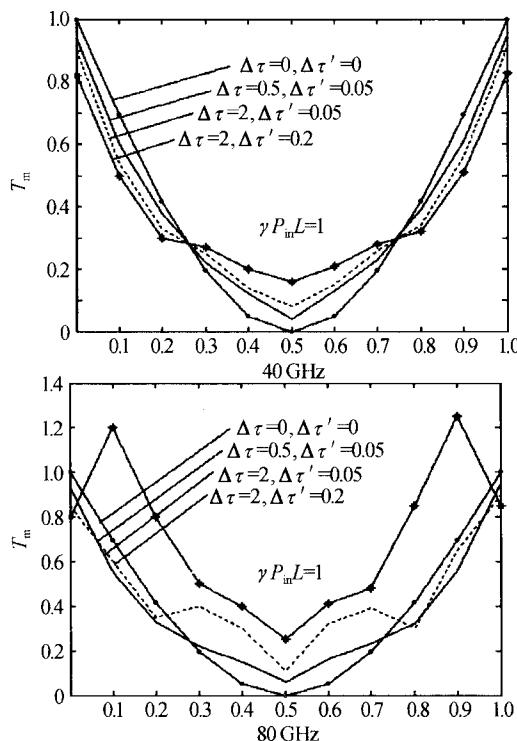


图6 一阶和二阶PMMD对NOLM开关性能的影响
Fig. 6 Impact of the first- and second-order PMD on the switching performance of NOLM

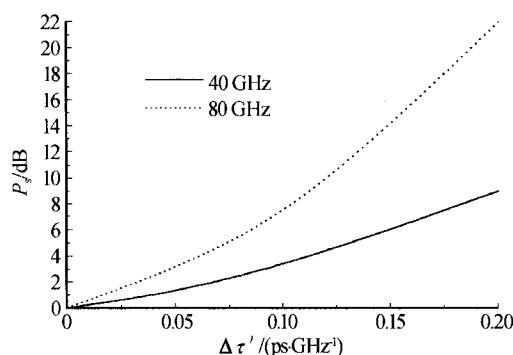


图7 $\Delta\tau'$ 对SNR的影响
Fig. 7 Impact of $\Delta\tau'$ on the SNR of the sinusoidal modulated signal

从图7可以看出, P_s 和 D_{pmd} 近似成指数增长关系.因而当调制带宽比较大(大于40 GHz)时,二阶PMMD的影响将远超过一阶PMMD的影响.

3 PMD的补偿

目前,主要有两种补偿NOLM中PMMD的方法:一是采用将NOLM光纤环从中点断开,然后将两段光纤快慢轴交叉拼接,使得它们的PMMD相互抵消的方法^[10];二是采用较长的色散位移光纤(DSF)使脉冲的偏振随机化^[11].快慢轴交叉拼接的方法简单实用,但是只对快慢轴固定的特种光纤(如熊猫光纤)补偿效果较好.由于普通光纤上主偏振态(PSP)的随机性,普通光纤交叉拼接的补偿效果有限.方法二尽管采用较长的色散位移光纤(DSF)在一定程度上随机减少了PMMD,但是增加了NOLM光纤环的长度,导致损耗增加、非线性效应积累增强,而且不够紧凑.

最近,本研究组提出了一种基于高双折射非线性啁啾Bragg光纤光栅(HN-FBG)的PMMD补偿方案^[12].它是在NOLM光纤环中点插入由一个四端口光环流器、一个90°的法拉第偏振旋转器和一个双端口HN-FBG构成的PMMD补偿系统.HN-FBG实际上是一个在保偏光纤上制作的啁啾Bragg光纤光栅(CFBG).它能够使得输入信号在快慢轴之间产生时延以补偿输入光束的DGD.同时,HN-FBG的预啁啾可以补偿二阶PMMD所造成的频率啁啾.

4 结论

PMMD造成NOLM微波光开关性能钝化和消光比的严重恶化,成为限制其性能提高的主要因素之一.一阶PMMD造成信号波形畸变导致信噪比降低;二阶PMMD不但造成信号波形失真而且导致信号频谱的展宽和旁瓣泄漏,并且当调制带宽大于40 GHz时,二阶PMMD比一阶PMMD的影响更大.

参考文献

- 1 Alwyn J S. Microwave photonics. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, **50**(3): 877~887
- 2 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
- 3 饶敏,孙小菡,张明德. 一、二阶偏振模色散对高速光码的影响. *中国工程科学*, 2002, **4**(11): 67~70
Rao M, Sun X H, Zhang M D. *Chinese Engineering Science*, 2002, **4**(11): 67~70
- 4 王岚,赵文玉,王宏祥,等. 高速传输系统中高阶PMMD的

- 影响. 光子学报, 2002, **31**(8): 941~945
- Wang L, Zhao W Y, Wang H X, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(8): 941~945
- 5 Yuan Minghui, Zhang Mingde, Sun Xiaohan. Impact and compensation of PMD on the performance of optical switching with NOLM. *Proc SPIE*, 2005, **6027**: 22-1~8
- 6 Agrawal G P. Nonlinear fiber optics, 2nd Edition. New York: Academic, 1995. 122
- 7 Bruyère F. Impact of first- and second-order PMD in optical digital transmission systems. *Optical Fiber Technology*, 1996, **2**(3): 269~280
- 8 刘开贤, 黄永清, 任晓敏. 单模光纤中的二阶偏振模色散及其统计特性. 光子学报, 2005, **34**(1): 89~93
- Liu K X, Huang Y Q, Ren X M. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(1): 89~93
- 9 张慧剑, 孙学明, 左萌, 等. PMD 分析中的 PMF 级联模型研究. 光子学报, 2004, **33**(8): 945~948
- Zhang H J, Sun X M, Zuo M, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8): 945~948
- 10 Uchiyama K. Ultrafast polarization-independent all optical switching using a polarization diversity scheme in the nonlinear optical loop mirror. *Electronics Letters*, 1992, **28**(20): 1864~1866
- 11 Olsson B E, Andrekson P A. Polarization-independent all optical AND gate using randomly birefringent fiber in a nonlinear optical loop mirror. *Optical Fiber Communication Conference' 98 (OFC' 98)*, America, 1998. 375~376
- 12 Yuan Minghui, Zhang Mingde, Sun Xiaohan. Impact of PMD on the Performance of NOLM and Compensation by HN-FBG in Microwave Photonic Systems. *IEEE 2005 International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies For Wireless Communications (MAPE2005)*, Beijing: 2005. 236~240

Impact and Compensation of PMD in the Microwave Photonic Switching Based on NOLM

Yuan Minghui, Zhang Mingde, Sun Xiaohan

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

Received date: 2005-10-10

Abstract It is established that the propagation equation of the optical field including PMD and the numerical simulation model in the microwave photonic switching based on NOLM by the split-step Fourier method (SSFM) that can solve the coupled nonlinear Schrödinger equation (CNLSE), the three-dimensional Poincare sphere theory and the Jones matrix method. It is obtained by simulation that the propagation process of optical carrier directly intensity modulated by the microwave in NOLM and the impact of the first-order and second-order PMD on the optical wave and the power transmission function of NOLM. The switching performance and the extinction ratio of the NOLM with large modulation bandwidth are deteriorated badly by PMD. And it induces the descent of the SNR and the side lobe leak of the signal. The impact of the second-order PMD is far more than that of the first-order PMD when the modulation bandwidth is larger than 40GHz. Furthermore, the compensation of PMD in the NOLM is discussed.

Keywords Physical electronics; All optical switch; Nonlinear optical loop mirror (NOLM); Polarization mode dispersion (PMD); Compensation



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 is studying for Ph. D. at Southeast University. His main research field is the nonlinear fiber optics.