

NOLM 中反向交叉相位调制作用分析

陶 滢, 吴重庆

(北方交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

摘 要: 提出了反向交叉相位调制(XPM)耦合方程, 得出了非线性光学环路镜(NOLM)中正、反向信号脉冲在传输过程中共同作用的非线性相移, 研究了高斯脉冲情况下 NOLM 的开关特性, NOLM 作为解复用器时反向 XPM 的影响, 及作为光路由选择单元时无放大联接的级数. 最后讨论 NRZ 码情况下的开关特性.

关键词: NOLM; 反向 XPM; 非线性相移; 解复用; 全光路由; NRZ 码

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 05-0712-04

Effect of Counter Cross2Phase Modulation on Nonlinear Optical Loop Mirror

TAO Ying, WU Chongqing

(Institute of Light Wave Technology of Northern Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Coupling equation of counter cross2phase modulation (XPM) is proposed. In nonlinear optical loop mirror (NOLM), nonlinear phase shift difference between the co2propagating and the counter2propagating signal in transmission process is gotten. The switching characteristics on Gaussian pulse, the effect of XPM on de2multiplexer which adopts NOLM and the progression without an2plifier in an experiment adopting NOLM in all optical routing are analyzed. In the end, we discuss the switching characteristics on non2return zero (NRZ) codes.

Key words: NOLM; counter XPM; nonlinear phase shift; de2multiplexer; all optical routing; NRZ code

1 引言

宽带网和全光网的飞速发展对信息传输容量和路由交换速率的要求越来越高. 当今技术条件下, 光传输技术的成熟使得传输容量大大增加, 而在路由交换中, 电子器件受开关速度的限制难于与光纤传输的高带宽相匹配. 因此, 全光信息处理成为高速(> 100GHz)全光网络的关键技术. 非线性光学环路镜(NOLM)利用光纤的非线性效应, 能以低于 1W 的功率实现每秒 T 比特量级的开关操作. 其固有的稳定性、简单性等特点使之不仅在全光解复用^[1]技术中, 而且在全光路由选择^[2]、信号再生^[3]、逻辑操作^[4]、波长变换^[5]等全光信号处理领域得到了应用.

NOLM 据光纤的 Sagnac 干涉原理制成, 如图 1 所示. 它主要由一个对信号光耦合比为 50B50 的 2@2 波分复用耦合器、将控制脉冲引入和引出环路的合

波、分波器及连接光纤组成. 信号光从耦合器端口 1 输入, 从 3、4 两端口分别输出等强度的两束光. 两束光在光纤环路中沿相反方向传输, 重又到达耦合器时在端口 2 进行干涉. 控制光通过耦合器沿顺时针方向注入光纤环路并与两束信号光发生不同程度的交叉相位调制(XPM), 引起两者的非线性相移差. 不同的相移差导致干涉结果不同, 使输出信号光不同, 从而完成了 NOLM 的开关动作.

由于以往的文献只得出了控制光与同向传输信号光的 XPM 耦合方程^[6], 分析 NOLM 开关特性时往往只考虑控制光与正向传输信号光之间的作用. 文献[7]虽然考虑了控制光同反向传输信号脉冲间的作用, 得出一些结果, 但并未作严格证明和更进一步的探讨和研究. 当只有一个控制脉冲对反向信号脉冲作用时, 由于作用时间短, 它的 XPM 可以忽略; 但当我们考虑控制脉冲串时, 这种作用是不能忽视的, 它对 NOLM 的性能有着重要的影响.

本文在导出控制光与反向传输信号光间互作用耦合方程的基础上, 对高斯脉冲通过 NOLM 的开关特性进行深入讨论, 对 NOLM 作为解复用器时反向传输信号的影响进行了分析, 并与实验进行了比较; 对作为全光路由器时的无放大的 NOLM 级联数进行了分析, 指出了文献[2]实验的最大级联

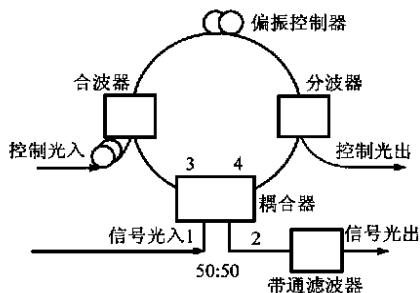


图1 NOLM原理图

数.同时,由于单极性非归零码(NRZ 码)更有利于信息处理,对它的讨论同样具有现实意义.

2 反向 XPM 耦合方程

前人在 XPM 的理论研究方面已做出大量卓有成效的工作,推导出同向传输光的 XPM 耦合方程^[5].但反向传输光的 XPM 耦合方程未见报道,为此,本文首先导出波长不同、偏振方向相同,反向传输光的 XPM 耦合方程.

设光频分别与 X_c 为 X_s 的两束光以相反方向沿光纤传输.如两者偏振方向相同,则合成光场为

$$E = (1/2) \{ E_c \exp[-i(X_c t - B_c z)] + E_s \exp[-i(X_s t - B_s(L-z))] \} + c.c \quad (1)$$

其中 E_c 、 E_s 为复振幅, B_c 、 B_s 为传输常数, \hat{x} 为偏振方向, $c.c$ 为共轭项, L 为两束光起始端距.于是,非线性感应电极化强度为

$$P_{NL} = E_0 V^{(3)} s EEE = P_{NL}(X_c) + P_{NL}(X_s) \quad (2)$$

其中, $P_{NL}(X_c) = (3/4) E_0 V_{xxx} (|E_c|^2 + 2|E_s|^2) E_c(X_c)$;

$$P_{NL}(X_s) = (3/4) E_0 V_{xxx} (|E_s|^2 + 2|E_c|^2) E_s(X_s);$$

令 $n_2 = 3 V_{xxx}/8n$ 为非线性折射率系数,如计算中不考虑色散作用,在 $\nabla E_c = 0$ 、 $\nabla E_s = 0$ 的情况下,令 $E_c = A_c(x, y)$, $A_c(z, t)$ 、 $E_s = A_s(x, y)A_s(z, t)$,其中, $f_c(x, y)$ 、 $f_s(x, y)$ 为两个模的模场, A_c 、 A_s 分别为控制脉冲和信号脉冲的慢变化振幅.同时,设 B_{1c} 、 B_{2c} 、 B_{1s} 、 B_{2s} 分别为控制脉冲和信号脉冲的群速度和群速度色散(GVD)系数, A_1 、 A_2 为损耗, C_1 、 C_2 为非线性系数.导出耦合方程为:

$$5 A_s / 5 z - B_{1s} A_s / 5 t - (i/2) B_{2s} A_s / 5 t^2 - A_2 A_s / 2 = -i C_2 [|A_s|^2 + 2 |A_c|^2] A_s \quad (3)$$

可见,与波长相同、偏振方向相同、同向传输光的 XPM 耦合方程相比,左端除第一项外,其余各项系数都变为负号,右端各式也取负值.

3 高斯脉冲情况下的开关特性

3.1 非线性相移差的求解

考虑控制光与信号光皆为无啁啾高斯脉冲,同时设两脉冲初始时延为零,且具有相同的脉冲半高全宽(FWHM),即

$$|A_c(0, T_s)|^2 = P_c \exp(-T_s^2/t_0^2) \quad (4)$$

$$|A_s(0, T_s)|^2 = P_s \exp(-T_s^2/t_0^2) \quad (5)$$

其中, $T_s = t - B_{1s}z$, 为信号脉冲运动坐标系中的时间变量.

首先分析同向传输光耦合方程.设信号脉冲的振幅足够小以忽略其自身的自相位调制(SPM).忽略损耗,引入走离参量 $d = B_{1s} - B_{1c}$, 得到正向传输信号脉冲慢变化振幅 A_s^+ 解为^[5]:

$$A_s^+(L, T_s) = A_s(0, t - B_{1s}L) \exp(i\phi_s^+) \quad (6)$$

其中非线性相移

$$\begin{aligned} \phi_s^+ &= 2C_2 \int_0^L A_c(T_s + dz) |^2 dz \\ &= \begin{cases} 2C_2 P_c L \exp\{-T_s^2/t_0^2\}, & d=0 \\ C_2 P_c \int_0^L \sqrt{P} \{ \exp[(T_s + dL)/t_0] - \exp(T_s/t_0) \} / d, & d \neq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

式中 erf 为误差函数.显见 $d \neq 0$ 时,上式在 $T_s = -dL/2$ 达最大值,即有 $\phi_{s, \max}^+ = 2C_2 P_c \int_0^L \sqrt{P} \text{erf}(dL/2t_0) / d$. 误差函数的自变量近 3 时,其值即接近于 1, 这时有 $\phi_{s, \max}^+ = 2\sqrt{P} C_2 P_c \int_0^L d = 2C_2 E_c / d$, 其中 $E_c = \int_0^L P_c \exp\{-T_s^2/t_0^2\} dT_s = P_c \int_0^L \sqrt{P}$ 为控制脉冲能量.

分析反向信号脉冲耦合方程(3),设 $d = B_{1s} - B_{1c}$ 表示反向信号脉冲与控制脉冲间的走离, f 为控制脉冲比特率,令 $t_c = ? [(Lf/v_s) - n]/f$, 其中 $n = 0 \sim [Lf/v_s]$. 由于反向传输信号脉冲在传输中受到 $[2Lf/v_s]$ 个控制脉冲的作用.若 $2Lf/v_s \gg 1$, 得反向传输信号脉冲慢变振幅 A_s^- 解为:

$$A_s^-(0, T_s) = A_s[L, t - B_{1s}L] \exp(i\phi_s^-) \quad (8)$$

非线性相移 $\phi_s^- = E_c \phi_s^+$, 其中 ϕ_s^+ 表示反向信号与第 i 个控制脉冲相遇时的非线性相移,且

$$\begin{aligned} \phi_s^- &= 2C_2 \int_0^L A_c(T_s - B_{1c}L + dz + t_c) |^2 dz = C_2 P_c \int_0^L \sqrt{P} \{ \text{erf}[(T_s - B_{1c}L + t_c)/t_0] - \text{erf}[(T_s - B_{1s}L + t_c)/t_0] \} / d \cdot dL \quad (9) \end{aligned}$$

反向相移亦在 $T_s = -dL/2$ 达最大值,即 $\phi_s^- = \phi_{s, \max}^- \gg 2Lf/v_s = 2C_2 L I_c$, 其中 $I_c = E_c / L$ 为控制脉冲平均功率.由此可见,正向传输信号脉冲获得非线性相移正比于控制脉冲能量,而反向的正比于控制脉冲平均功率.在干涉端共同作用的非线性相移差为: $\phi_s = \phi_s^+ - \phi_s^-$.

3.1.2 开关特性分析

考虑一个 5Gbps 的全光解复用系统,设 $t_0 = 40\text{ps}$, $n_2 = 312 @ 10^{-20} \text{m}^2/\text{s}$, $A_{\text{eff}} = 28\text{Lm}^2$, $P_c = 11.8\text{W}$, $P_s = 21.5\text{mW}$, $K_c = 11.54\text{Lm}$, $K_s = 11.32\text{Lm}$, $L = 200\text{m}$. 图 2(a)、2(c) 分别为只考虑正向信号脉冲所受 XPM 的窗口波形和输出脉冲波形;图 2(b)、2(d) 分别为考虑反向信号脉冲所受 XPM 情况下,不考虑 d 时,不同 f 情况的窗口波形和输出脉冲波形.可见, NOLM 开关窗口不仅依赖控制脉冲的波形,同时和走离 d 、控制脉冲比特率

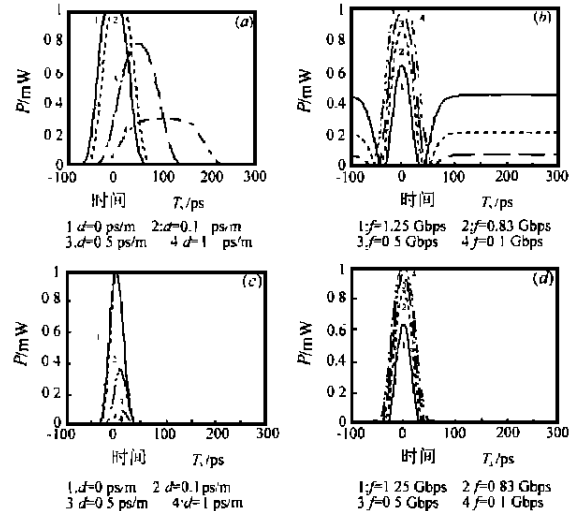


图 2 (a) 不考虑反向 XPM 的开关窗口; (b) $d=0$, 考虑反向 XPM 的开关窗口; (c) 不考虑反向 XPM 的解复用信号形状; (d) $d=0$, 考虑反向 XPM 的解复用信号形状

f 密切相关. 它们直接影响着开关窗口的宽度及中心位置. 由图 2(a) 可见, 随 d 的增大, 开关开通时间增长, 但中心位置偏移. 故而实际信号通过率降低, 信噪比下降. 由图 2(d) 可见, 随 f 的减小, 反向作用减弱. f 为 100Mbps 时的输出已经与不考虑反向 XPM 情况相差无几, 这与文献 [7] 的实验结果完全吻合.

上述 $L = 200\text{m}$ 的选择是有理论依据的. 它近似为忽略反向 XPM 时的第一最佳解复用长度 L_{deMUX} . L_{deMUX} 与正向走离 d 关系曲线如图 3(a) 所示.

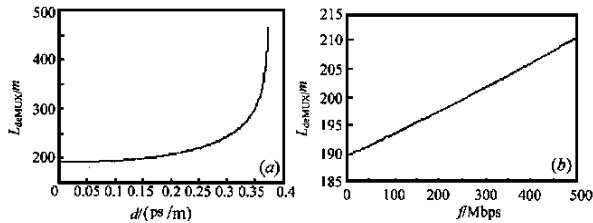


图 3 (a) $L_{\text{deMUX}} \sim d$ 关系曲线; (b) $d = 0, L_{\text{deMUX}} \sim f$ 关系曲线

可见, 在一定的走离范围内, 随 d 的增大, L_{deMUX} 从 $d = 0\text{ps}/\text{m}$ 时的 187m 开始逐渐增大. 这表明, 虽然走离的存在使得控制脉冲在时域上的 XPM 作用减弱, 但该效果可通过延长光纤给予补偿. 然而, 当 d 增大到某一数值 (近于 0.38) 时, 解复用条件就不再能满足了. 这是因为光纤长度达到一定值后, 正向传输信号脉冲同控制脉冲由于走离的作用而完全分开, XPM 不再存在的缘故. 这说明, 光纤长度对走离的补偿是有限度的.

同时考虑反向传输信号脉冲所受 XPM, 不考虑走离, 第一最佳解复用长度 L_{deMUX} 与控制脉冲比特率 f 间关系曲线如图 3(b) 所示. 可见, 随着 f 的增大 L_{deMUX} 值也是增大的. 这是因为 f 增加时, 反向传输信号脉冲所获得非线性相移随之增大, 进而非线性相移差 \leq_s 减小的缘故. 这种效果同样也必须通过延长光纤给予补偿. 若认为窗口函数在 $d = 0\text{ps}/\text{m}$, $T_s = 0$ 时大于 0.9, NOLM 满足使用条件, 即该情况下完全可以忽略反向信号脉冲的非线性相移, 求得 f 必须小于 625Mbps. 这就意味着, 在高速光解复用系统中, 以高的控制频率解复用将会受到很大限制. 通常认为解复用路数越少 (比如 2 路) 越有利于解复用. 但对于极高速系统, 考虑反向 XPM 作用时, 复用路数越少, 反而越不利于解复用.

3.1.3 采用 NOLM 的全光路由实验分析

全光路由中可采用 NOLM 进行信头识别和比较. 可识别的信头位数取决于可级联的 NOLM 个数. 为了保证可靠级联, 必须进行级间放大, 但增加了系统的成本. 因此在保证性能的前提下, 准确计算无需放大的 NOLM 级数是十分重要的.

文献 [2] 实验中, 信号速率为 155Mbps, $I_s = 1145\text{mW}$, $n_2 = 312 \times 10^{-20} \text{m}^2/\text{s}$, $A_{\text{eff}} = 50124 \text{m}^2$, $t_0 = 10\text{ps}$, 信号脉冲和控制脉冲交替采用 11531m 与 115681m. 且分别采用 6km 和 10km 光纤作为选择环路和比较环路. 实验中由于考虑光器件损耗等各种因素影响, 使控制光功率分别为 145mW 和 95mW. 理论分析中, 只简单考虑光纤传输损耗为 0.25dB/km, 在光功率分别为 100mW 和 61mW 的情况下, 设 f 为 1515Mbps, 对进入路由器

的数据流进行比较时只经过一级比较单元, 便得到如图 4 波形 3 的输出波形, 同实验结果基本相同. (基于考虑的损耗因素少的原因, 理论输出脉冲幅度要大于实验值).

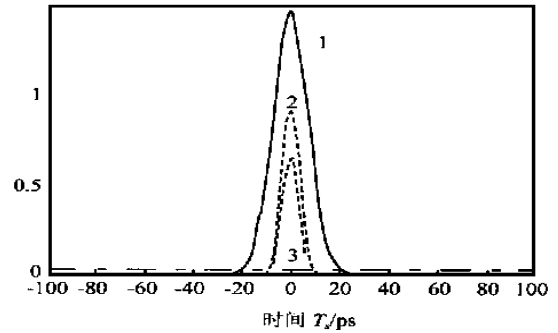


图 4 全光路由实验波形. (1) 输入; (2) 选择单元输出; (3) 比较单元输出; (4) 噪声

由图 4 可见, 与输入波形相比, 输出脉冲的功率幅值有很大程度的降低. 而经过的 NOLM 越多, 这种降低的影响就越大. 因此, 在对多比特地址进行识别时, 必须根据情况对输出脉冲进行放大才能满足实际的需要. 设输出信号噪声功率为 0.02mW, 以脉冲输出功率幅值接近噪声功率为衡量输出脉冲湮没于噪声导致比较单元失效的标准. 对不考虑反向 XPM 的情况, 由于非线性相移不会因反向相移的作用而减小, 所以要经过 13 级 NOLM 比较单元输出功率才接近噪声功率电平. 而考虑到反向 XPM, 只经过 10 级就达到噪声功率电平, 说明反向 XPM 对级联数有重要影响. 而且不同的噪声功率电平, 其级联数也是不一样的.

4 单极性 NRZ 码情况下的开关特性

考虑无啁啾单极性 NRZ 码, 其他条件同上, 即有

$$|A_c(0, T_s)|^2 = P_c, \quad (-t_0/2F T_s F t_0/2) \quad (14)$$

$$|A_s(0, T_s)|^2 = P_s, \quad (-t_0/2F T_s F t_0/2) \quad (15)$$

得到正向传输信号脉冲非线性相移:

$$\begin{aligned} \leq_s^+ = & 2C_2 P_c [(t + dL + t_0/2) u(t + dL + t_0/2) - (t \\ & + t_0/2) u(t + t_0/2) - (t + dL - t_0/2) u(t + dL - t_0/2) \\ & + (t - t_0/2) u(t - t_0/2)] / d \end{aligned} \quad (16)$$

其中, $u(t)$ 为阶跃函数.

同样, 反向传输信号脉冲非线性相移为: $\leq_s^- = E_{\leq_{si}}^-$. 其中,

$$\begin{aligned} \leq_{si}^- = & 2C_2 P_c [(t + B_1 L + t_0/2) u(t + B_1 L + t_0/2) - (t \\ & - B_1 L + t_0/2) u(t - B_1 L + t_0/2) - (t + B_1 L + t_0/2) \\ & - t_0/2) u(t + B_1 L + t_0/2) + (t - B_1 L + t_0/2) \\ & \# u(t - B_1 L + t_0/2)] / d \end{aligned}$$

设控制脉冲也是周期性出现的, 且 $2Lf/v_s \ll 1$ 则 $\leq_s^- = \leq_{si}^- \# 2Lf/v_s = 2C_2 Ln$, 其中 $n = t_0 f$. 信号脉冲在光纤中传输时所获得总的非线性相移仍为: $\leq_s = \leq_s^+ - \leq_s^-$.

同样绘出窗口波形以及输出脉冲, 可以看到, NRZ 码情况下的结论同高斯脉冲情况下是类似的. 但由于在光信息处理

中,控制脉冲并非周期性出现,而是随机的序列,因此可能出现长连 00 和长连 10 情况.如对于编码传号反转码(CMI 码),最大连 00 与连 10 数为 3.长连 00 时,信号脉冲在传输中受控制脉冲反向作用减小;长连 10 情况则受到的作用加剧.因此,NOLM 开关特性出现随机的起伏,进而输出脉冲幅度随机起伏.因此,实际达到 100% 的开关效率是不可能的.

5 结论

本文在导出反向 XPM 耦合方程的基础上,证明了正向的传输信号脉冲获得的非线性相移正比于控制脉冲能量,反向的正比于控制脉冲平均功率的结论.在一定的走离范围内,控制脉冲比特率 f 的影响可以通过延长光纤给予补偿,但补偿也是有限度的.在不考虑走离的情况, f 大于一定值时 NOLM 中反向 XPM 的作用是不容忽视的,对于 5Gb/s 的系统,在开关窗口中心值不低于 0.9 的条件下,最高解复用频率不得超过 625Mb/s.在采用 NOLM 进行全光路由选择的实验中,考虑和不考虑反向 XPM 的作用对多比特地址信息识别时放大器级数的选取影响显著.此外,实际应用中,无论码型为高斯型或 NRZ 码,如果信号为随机序列,在经过 NOLM 后都会引起输出脉冲幅度的起伏,100% 的开关效率是不可能实现的.

参考文献:

- [1] G. R. Williams, M. Vaziri, K. H. Ahn, B. C. Bamett, M. N. Islam, K. O. Hill, and B. Malo. Soliton logic gate using low birefringence fiber in a nonlinear loop mirror [J]. Opt. Lett., 1995, 20: 1671- 1673.
- [2] K. Hwan Park, Tetsuya Mizumoto. Address recognition and generation of switching control signal for all optical routing [J]. Photonic Instrumentation Engineers, 1999, 38(11): 1848- 1852.

- [3] M. Jinno. All optical signal regularizing/ regeneration using a nonlinear fiber Sagnac interferometer switch with signal/clock walk-off [J]. J. Lightwave Tech., 1994, 12: 1648- 1659.
- [4] M. Jinno and T. Matsumoto. Ultrafast all optical logic operations in a nonlinear Sagnac interferometer with two control beams [J]. Opt. Lett., 1991: 220- 222.
- [5] Wang Ding, Golovchenko E. A., Pilipetskii A. N., et al. Nonlinear optical loop mirror based on standard communication fiber [J]. IEEE/ SOAJ of Lightwave Tech., 1997, 15(4): 642- 646.
- [6] G. P. Agrawal. 非线性光纤光学 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1992: 189- 197.
- [7] Masahiko Jinno and Takao Matsumoto. Nonlinear Sagnac interferometer switch and its application [J]. IEEE J. Quantum Electronics, 1992, 28(4): 875- 882.

作者简介:



陶 滢 1974 年出生, 1997 年毕业于北方交通大学通信与控制工程系, 获工学学士学位. 同年考入北方交通大学光波技术研究所攻读硕士学位, 1999 年硕博连读, 现为在校博士生. 目前主要研究方向为光纤通信、光网络、宽带网络等.



吴重庆 教授, 博士生导师, 主要从事光纤通信、光纤传感、光网络方面的科研与教学工作, 发表论文 50 余篇、专著一部, 先后完成科研项目十余项, 专利一项.