

光纤传输系统中的 SPM 与 XPM 效应分析

李维民, 黄海清, 郭超平

(空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘要: 由于光纤具有非线性传输特性, 根据光纤中的三阶非线性效应(Kerr 效应)导致的材料折射率的改变, 分析了自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)效应的产生机理, 指出了由于一个波长的功率变化会引起同一光纤中其它波长光信号的变化, 以及采用这种现象实现光纤孤子传输及全光波长变换(AOWC)的方法。

关键词: SPM; XPM; AOWC; 光纤孤子

中图分类号: TN761 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2001)03-47-50

在光波通信系统中, 群色散(GVD)和非线性(SPM、XPM、FWM)是导致光信号传输过程中产生畸变, 限制系统性能的两个重要因素^[1-2]。如何消除它们的不利影响, 并加以利用^[3-4], 还有很多课题有待于研究。造成光纤传输系统资源利用率不高的一个原因在于中继站和节点将光信号接收后, 要经过 O/E、E/O 的转换, 由于这种技术受电子元件的电子瓶颈和香农(Shannon)信道容量理论的限制, 使得光波通道的巨大潜能难以发挥。在全光通信系统中, 将摒弃节点中的 O/E、E/O 变换过程, 实现全光网络中光层的透明传输。如果采用 WDM 技术, 光通道利用波长路由, 每个光通道通过波长识别建立连接, 不同节点间的光通道分配以不同的波长, 信息从源到节点的过程中, 波长一直保持不变。在这种波长通道中, 波长是在整个网内分配的, 光通道波长具有全网意义。只有在掌握网络所有波长占用情况后, 才能为新的呼叫选择一条合适路由, 分配的某一波长也只有在接通路的所有链路都未被占用时连接才能成功。这种仅以单一波长经过多个节点建立一条端到端的透明光通道方式显然是不现实的。

AOWC 技术是 WDM 光网络中的关键技术, 它利用有限的波长资源, 支持不同波长之间的连接, 消除了阻塞, 提高了网络利用率。虽然这一技术尚未走入实用阶段, 但关于各种方法实现波长变换的研究^[5-6], 已成为这一领域的热点。本文所做的工作, 有助于进一步理解这种技术的内在机理以及它们的产生条件和最终结果。

1 Kerr 效应与 Kerr 系数

1875 年, Kerr 就发现, 当偏振光通过有沿 z 方向电场作用的玻璃时, 会变成椭圆偏振光的现象, 如图 1 所示。

这表明, 在强电场 E 的作用下, 介质被极化, 极化后的电介质与一定频率振动着的电偶极子体系很相似, 而这种振动着的电偶极子体系将辐射出相应频率的电磁波, 辐射场与原入射场相叠加, 使介质中的电极化强度不再是 E 的线性函数, 即出现了三阶非线性电极化现象, 使介质的介电常数有所改变。玻璃由原来光学上的各向同性变成了各向异性。

如果用光波场代替电场, 如当一束频率为 ω 的光(探测光)作用在介质上的同时, 再用另一束频率为 ω' 的光(泵浦光)作用于该介质, 通过三阶非线性效应, 可以在

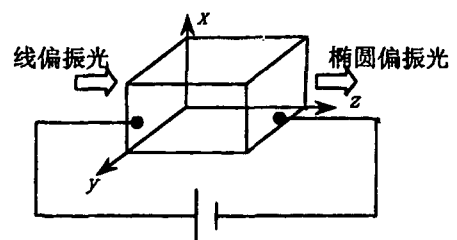


图 1 Kerr 效应原理图

频率 ω 上产生与频率为 ω' 的场强平方有关的三阶非线性电极化强度^[7]。

$$P^{(3)}(\omega) = 6\epsilon_0 \chi^{(3)}(\omega, \omega', -\omega') : E(\omega) E(\omega') E(\omega') \quad (1)$$

式中 $\chi^{(3)}(\omega, \omega', -\omega')$ 是三阶电极化率张量。若探测光、泵浦光均沿 z 轴方向传播,且泵浦光沿 y 方向偏振。定义 Kerr 系数为

$$n_2 = \frac{\Delta n_y(\omega) - \Delta n_x(\omega)}{E^2(\omega')} \quad (2)$$

式(2)中 $\Delta n_y(\omega)$ 、 $\Delta n_x(\omega)$ 分别是偏振方向与泵浦光场平行和垂直的折射率的改变量。由式(1)及耦合波基本方程可得 Kerr 系数与 $\chi^{(3)}$ 及泵浦光场强的关系为

$$\Delta n_y = \frac{3}{4n_0(\omega)} E^2(\omega') \chi_{yyyy}^{(3)}(\omega, \omega', -\omega') \quad (3)$$

$$\Delta n_x = \frac{3}{4n_0(\omega)} E^2(\omega') \chi_{xxyy}^{(3)}(\omega, \omega', -\omega') \quad (4)$$

式(3)、(4)中 $n_0(\omega)$ 为线性折射率, $E(\omega)$ 为泵浦光的复振幅,将式(3)、(4)代入式(2)得

$$n_2 = \frac{3}{4n_0(\omega)} [\chi_{yyyy}^{(3)}(\omega, \omega', -\omega') - \chi_{xxyy}^{(3)}(\omega, \omega', -\omega')] \quad (5)$$

当 $\omega' = \omega$ 时,折射率

$$n = n_0(\omega) + \frac{3}{4n_0(\omega)} (\chi_{yyyy}^{(3)}(\omega, \omega', -\omega') E^2(\omega) = n_0(\omega) + n_2(\omega) \quad (5)$$

2 SPM 与孤子脉冲

上述的非线性效应在任何材料中都能产生,光纤也不例外。虽然石英光纤本质上不是高非线性材料, Kerr 系数 $n_2 = 1.3 \times 10^{-22} \text{m}^2/\text{v}^2$ 。但由于光纤传输距离很长,光场被限制在横截面很小的纤芯内,其非线性效应还是很显著的。由式(5)可得光信号在光纤中传播时相位改变为

$$\phi = \phi_0 + \phi_{NL} \quad (6)$$

式(6)中, ϕ_{NL} 为非线性相移,由于 n_2 的出现,使导模传输常数为

$$\beta' = \beta + \gamma P(z) \quad (7)$$

式(7)中, β 为线性折射率对应的传输常数, $P(z)$ 为光纤中的传输功率, $\gamma = k_0 n_2 / A_{\text{eff}}$ 为非线性系数。若考虑光纤损耗,设输入功率为 P_{in} ,则经长为 L 的光纤后,非线性相移

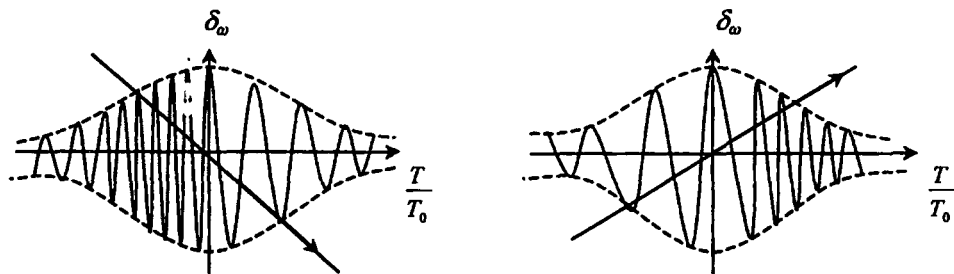
$$\phi_{NL} = \int_0^L (\beta' - \beta) dz = \int_0^L \gamma P(z) dz = \int_0^L \gamma P_{\text{in}} \exp(-\alpha z) dz = \gamma P_{\text{in}} L_{\text{eff}} \quad (8)$$

式(8)中 $L_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha L)] / \alpha$ 为考虑光纤损耗时的有效长度。当不考虑光纤损耗时,

$$\phi_{NL} = \gamma P_{\text{in}} L = n_2 k_0 L < E^2(t) > \quad (9)$$

式(9)中 $E(t)$ 是 $E(\omega)$ 对应的 Fourier 变换。这种由模场自己产生的非线性效应而引起的非线性相移称为 SPM,由(9)式可见输入功率越高,相移值越大。因此在相干光通信系统中,为了保持高的相位稳定性,必须控制系统的输入功率。

考虑到 GVD 对光脉冲在光纤中传输的影响,图 2 给出了在正常、反常色散区,由于 GVD 引起的频率啁啾。



(a) 正常色散区频率上啁啾

(b) 反常色散区频率下啁啾

图 2 色散导致的脉冲频率啁啾

由于脉冲不同部分具有略微不同的频率,使它们在光纤中以不同速度传输。不同频率分量在传输过程中的任何延迟,都将导致脉冲展宽。无论是在正常色散区,还是反常色散区的频率啁啾,都会使脉冲展宽,而只有在反常色散区,当上述的 GVD 展宽与非线性压缩相平衡时,在一定的传输距离和入纤功率下就可形成光孤子脉冲,实现孤子传输。

3 XPM 与波长变换

如果在介质中同时存在频率分别为 ω_1, ω_2 和 ω_3 的三个光场,通过 $\chi^{(3)}$ 的作用将产生第四个光场,考虑到式(1)及辐射遵从的 Maxwell 方程组,其极化强度为

$$P_4 = \frac{3\epsilon_0}{4}\chi_{xxxx}^{(3)}\{[|E_4|^2 + 2(|E_1|^2 + |E_2|^2 + |E_3|^2)]E_4 + 2E_1E_2E_3\exp(j\theta_+) + 2E_1E_2E_3\exp(j\theta_-) + \dots\} \quad (10)$$

式(10)中,第一项对应于 SPM,第二项对应于 XPM,其余项对应于四波混频(FWM)。可见当多个不同波长的光信号同时在光纤中传输时,折射率与光强的相关性将导致另一种非线性效应 XPM,它表明某一波长的光信号产生的非线性相移不仅取决于其自身的场强与功率,也取决于同时传输的其它波长的场强或功率。由于 SPM 和 XPM 而引起的第 j 个光信道的总相移为

$$\phi_j^{NL} = \gamma L_{eff}(P_j + 2 \sum_{m \neq j}^M P_m) \quad (11)$$

式(11)中, M 是信道总数, P_j 是信道功率。对 ASK 调制,各信道的功率应有所限制,如对 10 个信道的光波系统,各信道的平均发射功率应限制在 1mW 以下。随着波长复用数的增多和调制速率的上升,这种影响将迅速增大,在复用信道数 > 10 的情况下,XPM 将成为非线性效应中造成光功率代价的主要因素^[2]。利用 XPM 中各信道的光场可以相互耦合影响而产生的非线性效应,可以实现全光通信网中的波长变换。波长变换是全光通信网中的关键技术,目前波长变换的方法很多,但大多是基于光纤、激光器和半导体光放大器(SOA)中的非线性效应来实现的。

Sagnac 干涉仪型波长变换器的基本原理如图 3 所示,一个 3 dB 功率耦合器,光纤环路,和引入光信号的 WDM 耦合器(由波分复用器和一个偏振控制器组成)。光纤环路作为 Kerr 介质,非线性作用就在其中完成。

波长为 λ_p 的探测光和波长为 λ_s 的信号光(或泵浦光)分别从不同的端口进入光纤环时,由于 3 dB 耦合器将探测光分成了光强相等分别沿顺时针、逆时针两反方向传输的两束光。经过 WDM 耦合器进入光纤环的信号光 λ_s ,沿顺时针方向传输,使得同向传输的那一路探测光经历了一个非线性相移,从而使顺时针方向和逆时针方向传输的探测光产生相位差。信号光功率“0”、“1”的变化,使得探测光相位在“0”“ π ”之间变化,端口 2 处输出的信号,也就实现了从 λ_s 到 λ_p 的变换。

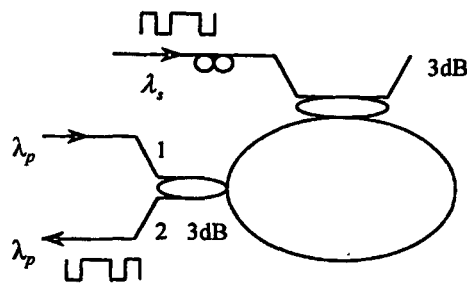


图 3 基于非线性光纤环的波长变换原理图

基于 SOA 的 MZI 干涉仪型波长变换器原理与上述情况相同,所不同处是在 MZI 的两个臂中各接入了一只 SOA,如图 4 所示。在这类波长变换器中,不论是向上($\lambda_p > \lambda_s$)还是向下($\lambda_p < \lambda_s$)转换,输出信号都能获得高的消光比。

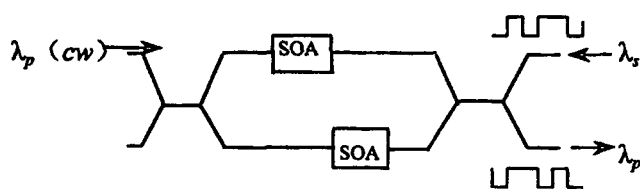


图 4 基于 SOA 的 MZI 干涉仪型波长变换器原理图

在 WDM 光纤传输系统中,由于 Kerr 效应的作用,一个波长的功率变化会引起同一光纤中,其它波长光信号相位的波动,而 GVD 的存在又使得这种波动引起的相位调制,转化为强度调制,从而使 ASK 直

接 ASK 调制信号在传输过程中发生畸变。

接检测系统的传输性能受损,并使相邻信道的间隔受到限制^[1]。而 XPM 型波长变换器,信号光调制只能采用 ASK 制,即对调制格式不透明。因此基于 SOA 的 FWM 型波长变换器已逐渐受到人们的青睐^[5,8]。

参考文献:

- [1] Cartazo A V. Impact of modulation frequency on cross - phase modulation effect in intensity modulation direct detection WDM system[J]. IEEE Photonics Lett,1998,10(9):1268 - 1271.
- [2] Marcuse D. Dependence of cross - phase modulation on channel number in fiber WDM systems[J]. Lightwave Tech,1994,12(5):885 - 890.
- [3] Maeda M W. The effect of four - wave mixing in fibers on optical frequency - division multiplexed systems[J]. Lightwave Tech,1990,8(9):1402 - 1408.
- [4] Watanabe S,Kuwatsuka H,Takeda. Polarization - insensitive wavelength conversion and phase conjugation using bi - directional forward four - wave mixing in a lasing DFB - LED[J]. Electron Lett,1997,33(2):316 - 318
- [5] Durhuus,Mikkelsen. All - optical wavelength conversion by semiconductor optical - amplifiers[J]. Lightwave Tech,1996,14(6):942 - 945.
- [6] Byrav Ramamurthy. Wavelength conversion in WDM network[J]. IEEE Selected Areas in communications 1998,16(7):1061 - 1073.
- [7] 过巴吉. 非线性光学[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1986.
- [8] Tomkos,Zacharopoulos,Syvridis D. Improved performance of a wave mixing in a bulk semiconductor optical amplifier[J]. App Phys Lett 1998,72(5):2499 - 2501.

Analyzing the SPM and XPM Effect in Optical Fiber Transmission System

LI Wei - min, HUANG Hai - qing, GUO Chao - ping

(The Telecommunication Engineering Institute of the Air force Engineering University,Xi'an 710077,China)

Abstract: The principle of SPM,XPM effect in optical fiber transmission communication system is discussed based on the character of nonlinear effect of optical fiber. The result shows if the power of one species wavelength optical signal changes,the other optical signals in the same optical fiber will be changed. With this phenomenon,we can realize optical soliton transmission and all optical wavelength conversion in WDM system.

Key words: SPM;XPM;AOWC;optical soliton