

文章编号: 1001-3806(2008)03-0305-03

五阶非线性下不同形状脉冲对的交叉相位调制

钟先琼, 向安平

(成都信息工程学院 光电技术系, 成都 610225)

摘要: 为了探讨光纤中五阶非线性下不同形状光脉冲对的交叉相位调制特性, 从包含五阶非线性效应的扩展耦合非线性薛定谔方程组出发, 导出了不同形状光脉冲对的非线性相移和频率啁啾公式。计算并比较了它们的相移、啁啾和功率频谱。结果表明, 较强的负五阶非线性对相移、啁啾和频谱曲线中心附近的形状有较大的影响, 而正五阶(较弱的负五阶)非线性则只使相移和啁啾量增大(减小), 使频谱变宽(变窄)、谱峰变多(变少)。孤子对和高斯对的谱形相似, 随五阶非线性系数的不同, 能量最强的谱峰可能在中央附近也可能在最边缘处。各阶超高斯对的谱形也相似, 但能量大部分集中在中央峰处。研究对光脉冲压缩、光开关器件和光纤通信系统性能的提高等有一定的意义。

关键词: 非线性光学; 五阶非线性; 交叉相位调制; 频率啁啾; 功率频谱

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

Cross-phase modulation of pulse pairs with different shapes in case of quintic nonlinearity

ZHONG Xian-qiong, XIANG An-ping

(Department of Optoelectronics and Technology, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract The purpose of the paper is to study cross-phase modulation of pulse pairs with different shapes in optical fibers with quintic nonlinearity. Starting from the extended coupled nonlinear Schrödinger equations including quintic nonlinearity, the expressions for the nonlinear phase shifts and frequency chirps of different pulse pairs were derived, and the phase shifts, chirps and power spectra of pulse pairs with different shapes were simulated, compared and analyzed. The results show that the powerful negative quintic nonlinearity can greatly influence the central regimes of the curve shapes of the phase shifts, chirps and spectra. While the positive quintic nonlinearity (weak negative quintic nonlinearity) can only increase (decrease) the phase shifts, chirps, the spectral width, and the number of spectral peaks. The soliton pairs are similar to Gaussian ones in terms of their spectral shapes. Depending on the quintic nonlinearity coefficients, the spectral peaks with the maximum energy may distribute in the vicinity of the center or near the edge. The super-Gaussian pairs are also similar to each other in terms of their spectral shapes. But the energy remains mainly on the central peak. To some degrees, this investigation may contribute to the pulse compression, optical switching devices and improving the performance of optical fiber communication systems, etc.

Key words nonlinear optics; quintic nonlinearity; cross-phase modulation; frequency chirps; power spectra

引 言

众所周知, 光纤中的交叉相位调制 (cross phase modulation, XPM) 一方面可导致波分复用通信系统性能下降^[1,2], 另一方面又可用于光脉冲压缩^[3]和超快光开关^[4]等。因此, 深入研究 XPM 对提高光纤通信系统的性能以及设计相关光器件具有重要意义。

基金项目: 四川省科技厅应用基础基金资助项目 (05J029-084); 四川省教育厅自然科学基金资助项目 (2006A124)

作者简介: 钟先琼 (1969-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为激光与光通信及非线性光学。

E-mail: zxqkh@yeah.net

收稿日期: 2007-03-27; 收到修改稿日期: 2007-06-03

三阶非线性下光纤中光脉冲的传输已得到了较广泛深入的研究。然而, 当光功率较高, 或对于某些非线性系数相对较大的介质, 如半导体掺杂光纤, 即使是中等大小的光功率也需考虑五阶甚至更高阶非线性折射率的影响^[5]。研究发现, 五阶非线性下光纤中的光孤子^[6]、调制不稳定性^[7]以及自相位调制 (self phase modulation, SPM) 效应^[8]都呈现出一些新的特点。作者则在忽略光纤色散和脉冲间走离效应的情况下, 计算并分析比较了五阶非线性下不同形状光脉冲对由于 XPM 所致的非线性相移 (简称相移)、频率啁啾 (简称啁啾) 和功率频谱 (简称频谱) 特点。

1 理论分析

不同载频的两光脉冲在三、五阶非线性光纤中传

输时需满足扩展的耦合非线性薛定谔方程组^[7]。当光纤长度远小于色散长度和脉冲间走离长度但大于非线性长度时,可忽略色散和脉冲间走离效应影响^[1]。采用文献[1]中的方法,当输入脉宽为 T_0 的双曲正割对时,可推知第 j 个脉冲的相移 $\phi_j(z, T)$ 和啁啾 $\delta\omega_j(T)$ 分别为:

$$\begin{aligned} \phi_j(z, T) &= \gamma_{1j} [\operatorname{sech}^2(T/T_0)] (P_j + 2P_{3-j})z + \\ &\gamma_{3j} [\operatorname{sech}^4(T/T_0)] (P_j^2 + 3P_{3-j}^2 + 6P_1P_2)z \quad (j=1, 2) \quad (1) \\ \delta\omega_j(T) &= -\frac{\partial\phi_j}{\partial T} = 2\frac{\gamma_{1j}}{T_0} \left[\operatorname{sech}^2\left(\frac{T}{T_0}\right) \right] \times \\ &\left[\operatorname{th}\left(\frac{T}{T_0}\right) \right] (P_j + 2P_{3-j})z + 4\frac{\gamma_{3j}}{T_0} \left[\operatorname{sech}^4\left(\frac{T}{T_0}\right) \right] \times \\ &\left[\operatorname{th}(T/T_0) \right] (P_j^2 + 3P_{3-j}^2 + 6P_1P_2)z \quad (2) \end{aligned}$$

式中, z 是传输距离, T 是脉冲坐标系的时间坐标, γ_{1j} 和 γ_{3j} 分别是光纤的三阶和五阶非线性系数, P_i 是输入光脉冲的峰值功率。若输入阶数为 m ($m \geq 1$) 的超高斯光脉冲对,同理可推知相移和啁啾分别为:

$$\begin{aligned} \phi_j(z, T) &= \gamma_{1j} [\exp(-T^{2m}/T_0^{2m})] (P_j + 2P_{3-j})z + \\ &\gamma_{2j} [\exp(-2T^{2m}/T_0^{2m})] (P_j^2 + 3P_{3-j}^2 + 6P_1P_2)z \quad (3) \\ \delta\omega_j(T) &= -\frac{\partial\phi_j}{\partial T} = 2m\gamma_{1j} \frac{T^{2m-1}}{T_0^{2m}} \left[\exp\left(-\frac{T^{2m}}{T_0^{2m}}\right) \right] \times \\ &(P_j + 2P_{3-j})z + 4m\gamma_{2j} \frac{T^{2m-1}}{T_0^{2m}} \left[\exp\left(-\frac{2T^{2m}}{T_0^{2m}}\right) \right] \times \\ &(P_j^2 + 3P_{3-j}^2 + 6P_1P_2)z \quad (4) \end{aligned}$$

当以振幅为 $A_j(0, T)$ 的光脉冲对输入时,对应的频谱为:

$$S_j(\omega) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} A_j(0, T) \exp[i\phi_j(z, T) + i(\omega - \omega_0)T] dT \right|^2 \quad (5)$$

式中, $\omega = 2\pi\nu$, $\omega_0 = 2\pi\nu_0$, ν 为频率, ν_0 为中心频率。以上诸式中各参数的定义见文献[8]。

2 计算与讨论

计算中所取公共参数为: $P_1 = 400W$, $P_2 = 200W$, $\gamma_{1j} = 2W^{-1} \cdot km^{-1}$, $z = 200m$ 。脉冲对由脉冲 1 和脉冲 2 组成。为简单起见,只给出了各脉冲对中功率较大的脉冲 1 的相移、啁啾和频谱图。

2.1 相移和啁啾

由图 1 和图 2 可见,较强的负五阶非线性可使相移和啁啾曲线的形状尤其是中心形状改变。而正和较弱的负五阶非线性则分别增大和减小相移和啁啾的大小。从相移和啁啾产生的脉冲范围来看,孤子脉冲对的最大,而超高斯脉冲对的最小,且阶数越高的范围越小。还可看出,具有更陡前后沿的超高斯脉冲对具有更大的啁啾量,脉冲对阶次越高,啁啾量越大。这一特点很容易通过图 1 中反映的相移特点以及啁啾的定义

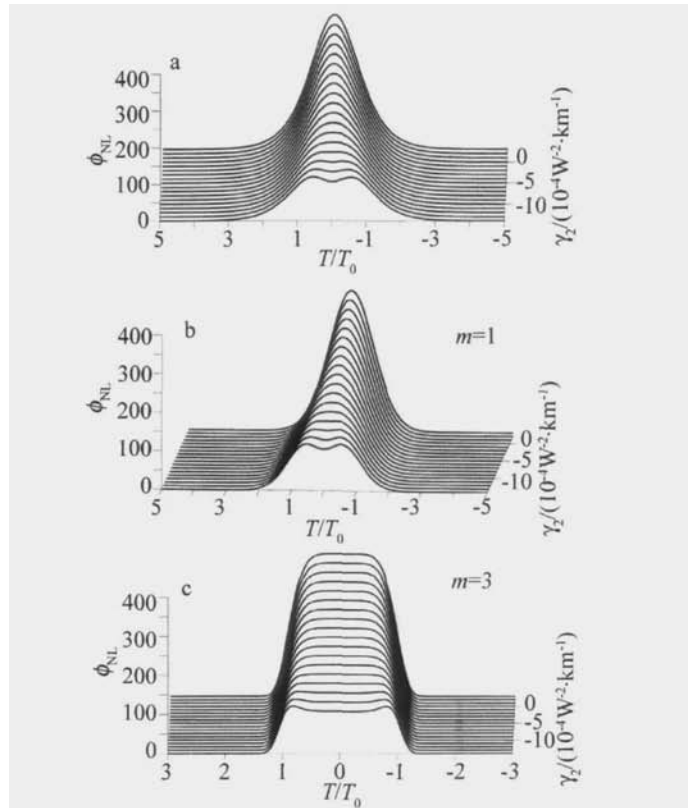


Fig. 1 Variations of phase shifts with quintic nonlinear coefficients for pulse 1 with different shapes

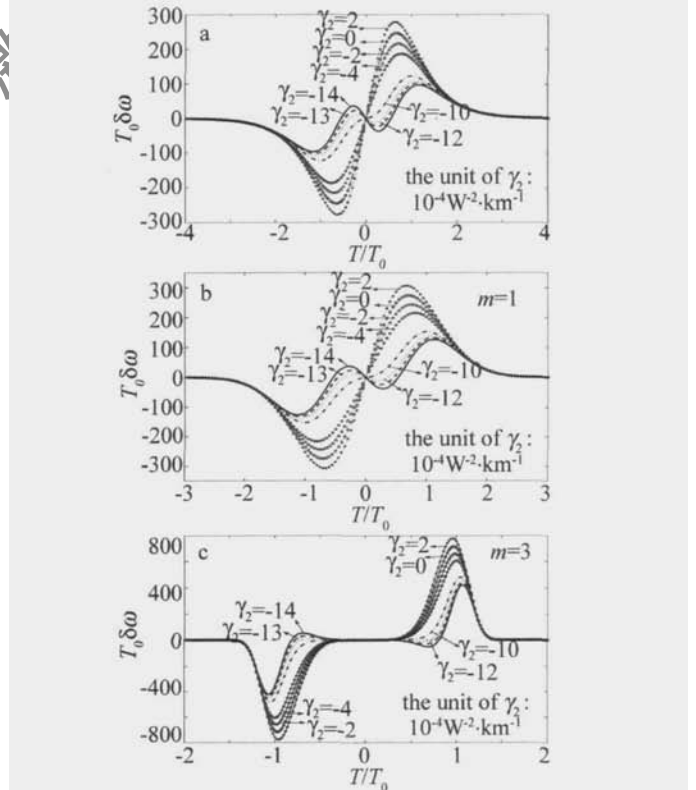


Fig. 2 Variations of chirps with quintic nonlinear coefficients for pulse 1 with different shapes

式而得到理解。同理,由于超高斯脉冲中心附近很大范围内的相移不随时间而变,因而该范围内对应的啁啾为 Q 阶次越高,零啁啾的范围越宽。啁啾的特性与

相移是密切相关的。

研究还表明,在其它参数相同时,功率较低的脉冲 2 将具有更大的相移和啁啾,而各曲线形状与脉冲 1 相似,这点可从 (1) 式 ~ (4) 式得到解释,因为各式中的第 1 项和第 3 项分别是三阶和五阶非线性下 SPM 对相移和啁啾的贡献,而第 3 项和第 4 项、第 5 项则分别是三阶和五阶非线性下 XPM 的贡献。可看出,在三阶非线性下, XPM 的贡献是 SPM 的两倍,在五阶非线性下,第 4 项 XPM 的贡献是第 3 项 SPM 的 3 倍。

2.2 频谱

为了看清较弱的谱峰,图 3c 是采用了谱图下部分的放大图。由图 3 可见,谱宽和谱峰数目都随五阶非

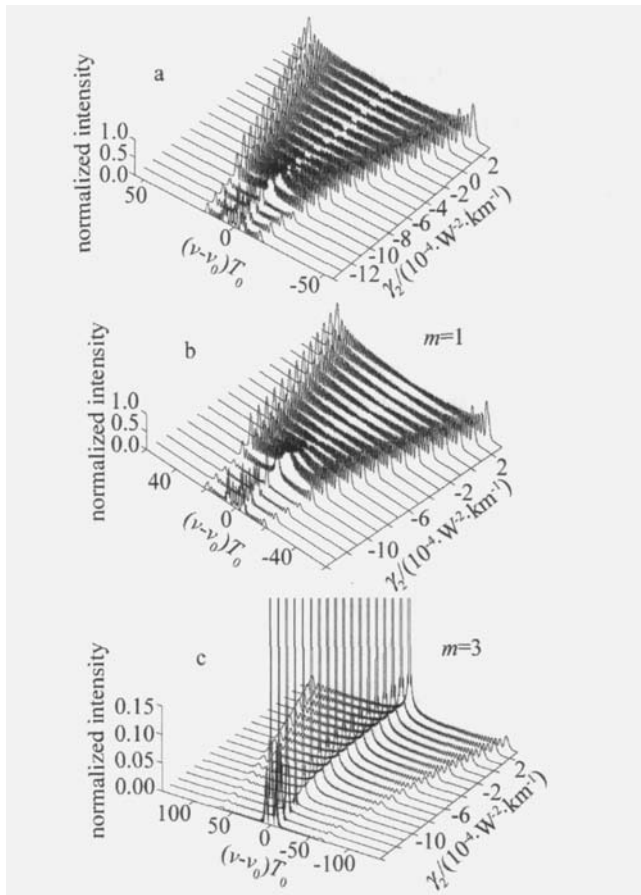


Fig. 3 Variations of spectra with quintic nonlinear coefficients for pulse 1 with different shapes

线性系数的增大而增大。较强的负五阶非线性主要影响频谱中心附近的形状,而对谱宽和谱峰数影响较小。而正五阶和较弱的负五阶非线性则分别增大和减小谱宽和谱峰数目,对谱形几乎无影响。从谱形看,双曲正割对的谱形与高斯对的谱形相似,各阶超高斯对的谱形也相似,因为它们相应的相移和啁啾特点是相似的。对双曲正割对和高斯对而言,在负五阶非线性较强时,能量主要集中在中央峰附近,随着负五阶非线性从强

变弱,能量先是移到中央峰,最边缘的两个峰也变强,然后是中央峰减弱,边缘的两对称谱峰开始变得很强,逐渐形成中央最弱,越边缘的峰越强的谱形,之后,随着五阶非线性由负到正的增大,谱形不变,只是谱宽和谱峰数增大。在相同的五阶非线性参数下,高斯对比双曲正割对有更宽的频谱和更多的谱峰。对各阶超高斯脉冲对而言,谱展得很宽,且脉冲阶数越高,谱越宽,但能量主要集中在中央峰处,周围的小峰很弱甚至不可见,最边缘的两对称峰稍强。研究还表明,由于 XPM 对频谱的贡献比 SPM 的更大,在其它参数相同时,功率较低的脉冲 2 将具有更宽的频谱和更多的谱峰数目。

3 结 论

研究了不同形状的光脉冲对在五阶非线性光纤中的 XPM 特点。结果发现,较强的负五阶非线性对相移、啁啾和频谱曲线中心附近的形状有较大影响,而正五阶或较弱的负五阶非线性则只使各量增大或减小。双曲正割光脉冲对的啁啾量和频谱宽度最小,而超高斯光脉冲对的最大。双曲正割和高斯光脉冲对的谱形相似,随着五阶非线性系数的不同,能量最强的谱峰可能在中央附近也可能在最边缘处。各阶超高斯光脉冲对的频谱形状也相似,但能量大部分集中在中央峰处。

参 考 文 献

- [1] AGRAWAL G P. Non linear fiber optics [M]. 2nd ed New York Academic Press 1995 238-276
- [2] MIKHAILOV V. Limitation to WDM transmission distance due to cross-phase modulation induced spectral broadening in dispersion compensated standard fiber systems [J]. IEEE Photonics Technology Letters 1999 8(11): 994-996
- [3] XIANG W H, CHEN X W, TAN B *et al*. A study on monocycle optical pulse generation by crossed phase modulation in a single mode fiber [J]. Acta Physica Sinica 2004 53(1): 137-144 (in Chinese).
- [4] UMAROV BA, ABDULLAEV F K, WAHIDDIN M R B. Soliton interaction and switching in a coupler with third order dispersion and Raman effect [J]. Opt Commun 1999, 162: 340-346
- [5] TANEV S, PUSHKAROV D I. Solitary wave propagation and bistability in the normal dispersion region of highly nonlinear optical fibers and waveguides [J]. Opt Commun, 1997, 141: 322-328.
- [6] PALACIOS S L, FERNÁNDEZ-DÍAZ JM. Black optical solitons for media with parabolic nonlinearity law in the presence of fourth order dispersion [J]. Opt Commun 2000, 178: 457-460
- [7] ZHONG X Q, CHEN J G, LI D Y. Modulation instability in the decreasing dispersion fibers with quintic nonlinearity [J]. Laser Technology 2006 30(1): 27-30 (in Chinese).
- [8] ZHONG X Q, XIANG A P, CHEN J G, *et al*. Frequency chirps and spectra of optical pulses propagating in optical fibers with cubic-quintic nonlinearity [J]. Laser Technology, 2006, 30(5): 479-482 (in Chinese).