

高阶色散与非线性对高斯脉冲传输特性的影响与讨论

蔡 托

(黔南民族师范学院物理与电子科学系, 贵州 都匀 558000)

摘 要:根据孤子脉冲在光纤中传输所遵从的非线性薛定谔方程,对照相关文献和实验给出的数据,对影响孤子脉冲传输的高阶色散和非线性因素进行了综合分析并得到了一些有意义的结论:在啁啾、三阶色散和五阶非线性同时存在的情况下,它们对脉冲的传输特性都会产生很大的影响,这些因素之间存在着相互影响和制约关系。数值模拟表明,当啁啾、三阶色散和五阶非线性选取某一准临界值时,它们对脉冲存在着增益效应和整形作用。本文所得的结论对光孤子通信的实践过程具有一定的参考意义。

关键词:非线性薛定谔方程;高阶色散;高阶非线性;对称分步傅里叶法;增益;整形

中图分类号:0437 **文献标识码:**A

Analysis and discussions of high order chromatic dispersion and non-linearity on the Gauss chirp pulse propagation

CAI Tuo

(Dept. of Physics & Electronic Science, Qiannan Normal College for Nationalities, Duyun 558000, China)

Abstract: By the non-linear Schrödinger equation which satisfies the optical soliton propagation, according to the data of literature and the experiment, high order dispersion and non-linearity affect the orphan pulse transmission analyzed and obtained some meaningful conclusions; when the chirp, high-order chromatic dispersion and the fifth-order simultaneously existing, they can affect the pulse transmission characteristic very tremendous, and between these factors exist the mutual influence and the restriction relations. The numerical simulation indicated that when the parameter of the chirp, high-order chromatic dispersion and the fifth-order selected some value, they have the gain effect and the reshaping effect to the pulse. These conclusions obtained in this article has certain reference significance to the optical soliton communications's practice process.

Key words: non-linear Schrödinger equation; high-order dispersion; high-order non-linearity; symmetry split-step fourier transform method; gain effect; reshaping effect

1 引 言

自1973年人们提出利用光孤子进行光纤通信以来,国内外的科学家和工程师们从各个方面采用不同的方法对此进行了深入的理论和实验研究。近年来,光孤子实验和理论研究不断取得突破性进展,系统试验不断深化。美、日、英等国都建立了光孤子回路试验系统,模拟几千甚至几万公里的长距离传输^[1]。随着光纤通信领域中一些关键器件的相继问世,诸如锁模激光器、滑频滤波器、采样调制器和

掺铒光放大器(EDFA)等的出现和实用化,光纤孤子通信中存在的问题正在逐步得以解决。

光孤子通信的全部研究是如何实现其长距离的保形传输。我们知道,在超长距离波分传输系统和飞秒(fs)脉冲传输中,适当地提高入纤光功率,可以

基金项目:贵州省省长基金项目(No. 200847)资助。

作者简介:蔡托(1953-),男,副教授,主要研究方向为非线性系统和光量子信息理论。E-mail:ct163001@sina.com

收稿日期:2009-11-07;修订日期:2009-12-27

在增加传输距离的同时保持较好的传送质量。但实践表明,当脉冲宽度为皮秒(ps)甚至飞秒(fs)量级或载波波长处于光纤零色散波长附近时,三阶以上色散和高阶非线性的影响将不容忽视;当入射光强较强,或在有相对较高非线性光学系数的材料中,中等光强的光入射,它在与物质相互作用过程中,非线性效应的影响^[2]将表现得非常明显。

下面以高斯脉冲在单模光纤中的传输为例,合理选取方程中的三阶色散系数、脉冲啁啾系数和五阶非线性系数,数值模拟高斯脉冲的演化特性,根据计算结果得到了改善光脉冲传输特性的有意义的结论。

2 理论模型与分析方法

忽略光纤损耗(目前利用集总放大技术、掺铒光纤放大器^[3]等措施已能够解决光纤损耗问题)在二、三阶色散效应三阶非线性(克尔效应)和五阶非线性效应同时存在的情况下,光孤子在单模光纤中传输遵从下面修正 NLS 方程^[2]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} + i\gamma|A|^2 A + i\eta|A|^4 A \quad (1)$$

可将式(1)简写为:

$$\frac{\partial A}{\partial T} = (\hat{D} + \hat{N})A \quad (2)$$

其中, $\hat{D} = \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2}{\partial T^2} + \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3}{\partial T^3}$ 为色散微分算符; $\hat{N} = i(\gamma|A|^2 + \eta|A|^4)$ 为非线性算符,代表克尔效应和五阶非线性效应。采用对称分步傅里叶方法,精确到分步步长 h 的三阶项,忽略算符 \hat{D} 和 \hat{N} 的非对易性,式(2)的形式解为:

$$A(z+h, T) \approx \exp\left(\frac{h}{2}\hat{D}\right) \exp\left[\int_z^{z+h} \hat{N}(z')\right] \cdot$$

$$\exp\left(\frac{h}{2}\hat{D}\right)A(z, T) \quad (3)$$

利用梯形规则和近似积分可将式(3)改写为:

$$A(z+h, T) \approx \exp\left(\frac{h}{2}\hat{D}\right) \exp\left\{\frac{h}{2}[\hat{N}(z) + \hat{N}(z+h)]\right\} \exp\left(\frac{h}{2}\hat{D}\right)A(z, T) \quad (4)$$

由对称分步傅里叶变换得:

$$A(z+h, T) = F^{-1}\left\{F\left[A_N\left(z+\frac{h}{2}, T\right)\right] \cdot \exp\left(\frac{h}{2}\hat{D}\right)\right\} \quad (5)$$

式(4)中的 $\hat{N}(z+h)$ 是未知的,但可由初始值 $\hat{N}(z)$ 进行迭代而得,一般只需两次迭代即可^[4]。根据傅里叶变换, $\hat{D}(i\omega)$ 中的算符 $\frac{\partial}{\partial T}$ 简单地用 $i\omega$ 代替, ω 是傅里叶域中的圆频率。

3 数值计算结果与比较

设输入如下的啁啾高斯脉冲^[5]:

$$A(0, T) = \sqrt{p_0} \exp\left[-\frac{1}{2}(1+iC)\left(T/T_0\right)^2\right] \quad (6)$$

式中, p_0, T_0, C 分别为脉冲的峰值功率、脉冲半宽和啁啾参数,脉冲中心波长为 λ_0 , 光纤长度为 L , 并取 $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$, $p_0 = 1 \text{ mW}$, $T_0 = 20 \text{ ps}$, $L = 100 \text{ km}$ 非线性折射率 n_2 取 $10^{-9}/\text{W}$ 为单位,则五阶非线性系数 η 取 $10^{-8}/\text{m} \cdot \text{W}^2$ 为单位,三阶色散系数的单位取 ps^3/m 。下面利用 MATLAB7.1 编程模拟并讨论当啁啾、三阶色散和五阶非线性取不同值^[6](如图1所示)时它们对高斯脉冲传输特性的影响情况。

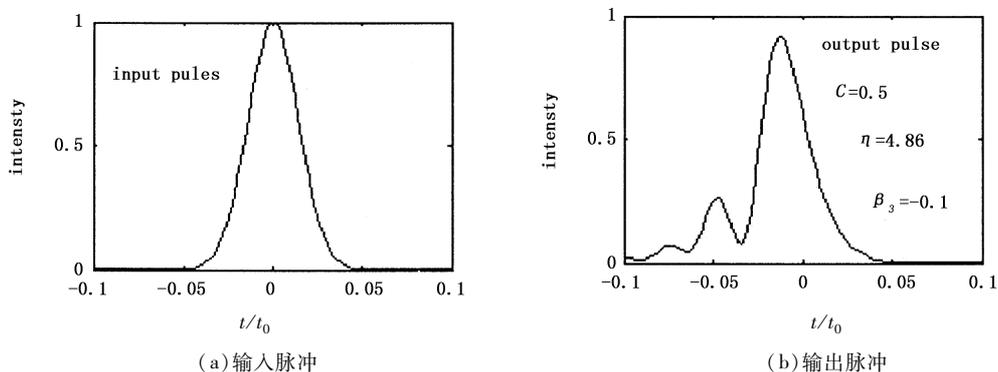


图1 三阶色散和五阶非线性同时存在时对啁啾脉冲传输特性的影响

Fig. 1 effect of third-order dispersion and fifth-order non-linearity on chirp pulse propagation character

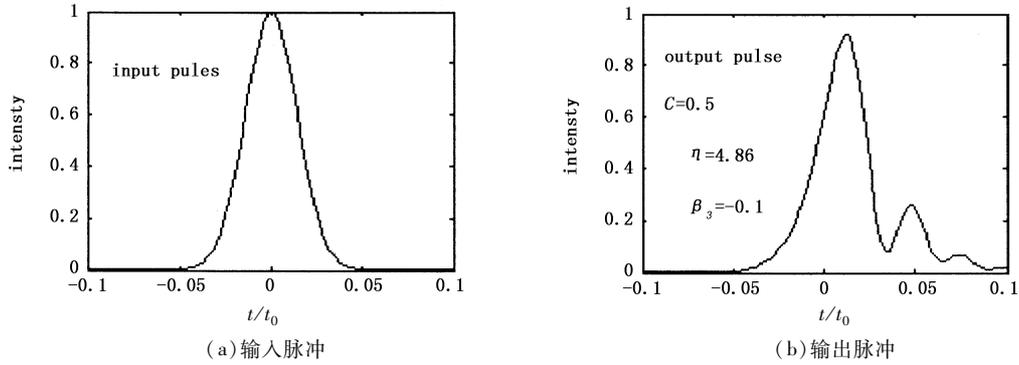


图2 三阶色散和五阶非线性同时存在时对啁啾脉冲传输特性的影响

Fig. 2 effect of third-order dispersion and fifth-order non-linearity on chirp pulse propagation character

由图1、图2可见,三阶色散(β_3)、五阶非线性(η)和输入脉冲的啁啾参数(C)对高斯脉冲在光纤中的传输都会产生较大的影响:图1和图2为 C, η

和 β_3 的绝对值相同时的输出波形,由于这些因素的存在,使得输出脉冲的幅值下降,中心向前沿或后沿(取决于 β_3 的正负号)明显偏移且出现拖尾振荡。

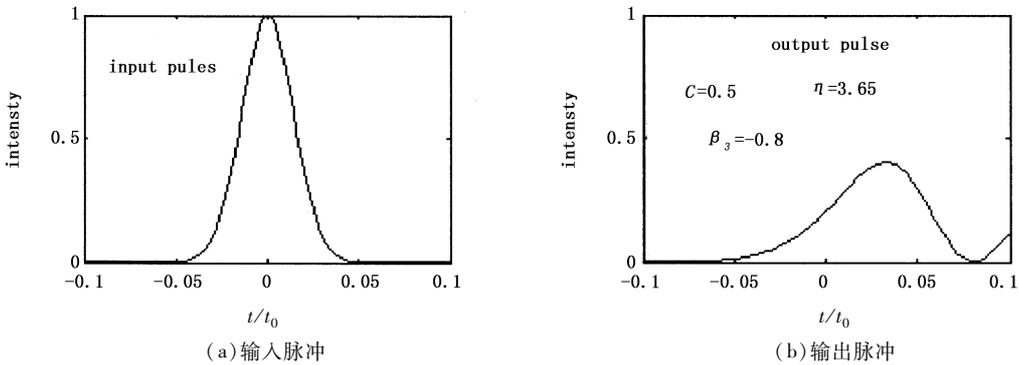


图3 三阶色散和五阶非线性同时存在时对啁啾脉冲传输特性的影响

Fig. 3 effect of third-order dispersion and fifth-order non-linearity on chirp pulse propagation character

由图3可见,在保持输入脉冲的啁啾参数不变的情况下,同时改变 β_3 和 η 的值,输出脉冲的幅值急剧下降,且脉冲中心偏移得更加严重,拖尾振荡的次级脉冲加剧,这将会使逸出比特时间以外的脉冲

能量增加而形成码间干扰,同时由于脉冲的展宽,在比特时间内光脉冲能量的降低,将导致信噪比(SNR)降低从而降低接收灵敏度。

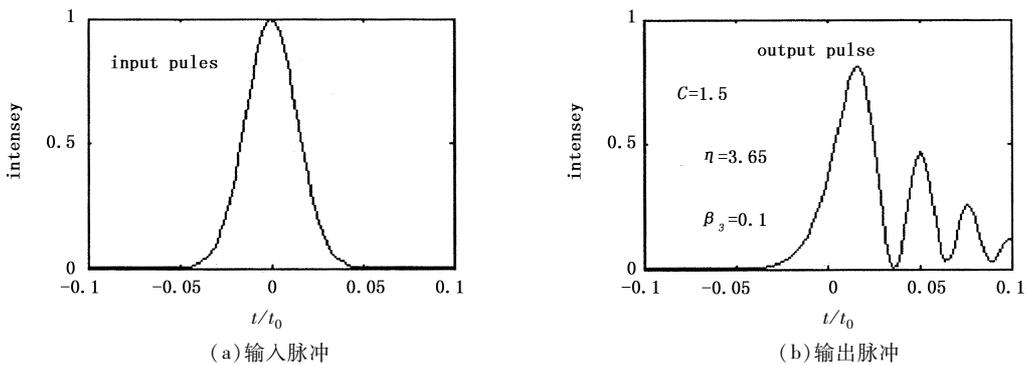


图4 三阶色散和五阶非线性同时存在时对啁啾脉冲传输特性的影响

Fig. 4 Effect of third-order dispersion and fifth-order non-linearity on chirp pulse propagation character

图4则是减小 β_3 的值(与图1相同), η 值保持与图3相同,但增大了输入脉冲啁啾参数后的输出波形。可见啁啾的存在会加剧输出脉冲的拖尾振荡,同时比较图3和图4可知,三阶色散效应是使脉冲展宽和幅度降低的主要因素。

图5所示是 C, η 和 β_3 与图4中选取相同参数时的输出脉冲波形,但脉宽为 $T_0 = 15$ ps,由图5可见,输出脉冲的幅幅值比图4的小得多,这表明超短脉冲的脉宽越窄,高阶效应的影响就越明显,这与实验结果是一致的。

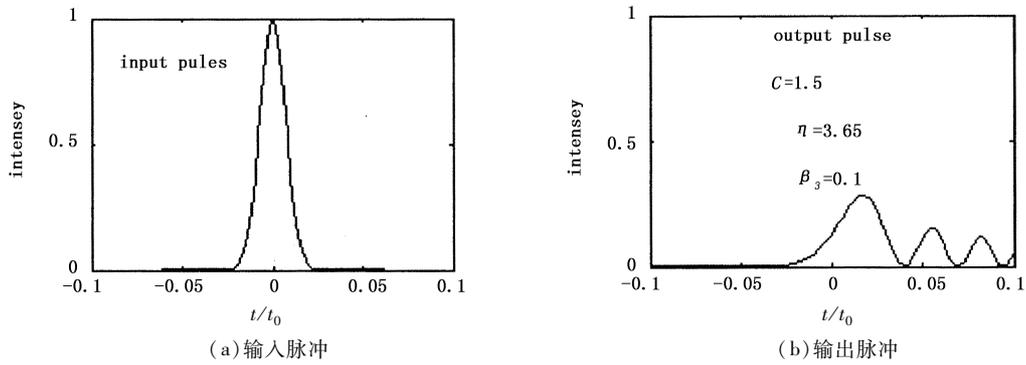


图5 三阶色散和五阶非线性对不同脉宽的啁啾脉冲传输特性的影响

Fig. 5 effect of third-order dispersion and fifth-order non-linearity on different pulse width chirp pulse propagation character

由图6发现,当输入脉冲的啁啾参数、三阶色散和五阶非线性系数分别在某一特定值附近时,它们的共同作用能对脉冲产生增益(在本文的计算中,没有引入人为的放大器增益因素)和整形作用,虽然波形仍有微小的失真,但已完全消除了图1至图

5中的拖尾振荡现象,且脉冲中心没有产生偏移,脉冲的传输质量得到极大的改善。这一“自增益”和“整形”效应的最佳状态对 C 、 η 和 β_3 的依赖关系或许存在着一个确定的临界值,其机理也有待进一步的理论探讨并通过实验进行检验。

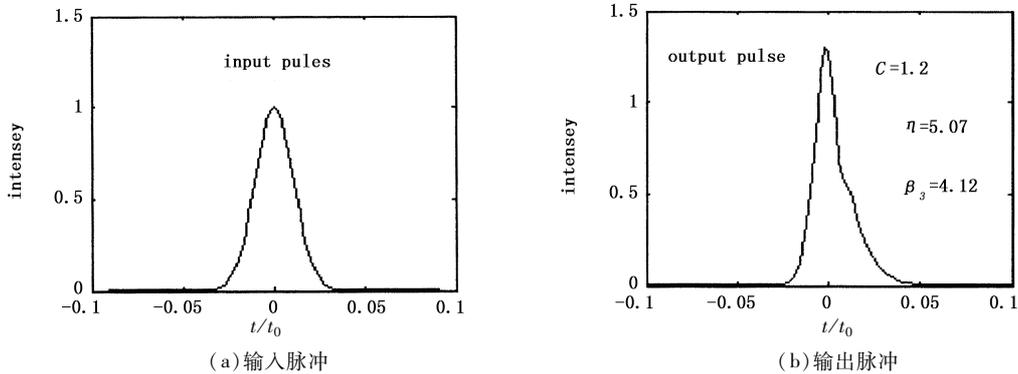


图6 三阶色散和五阶非线性对啁啾脉冲的增益和整形作用

Fig. 6 effect of gain and reshaping by third-order dispersion and fifth-order non-linearity on chirp pulse propagation character

4 结语

本文讨论了高阶色散、五阶非线性和输入脉冲啁啾等因素对光脉冲在光纤中传输的影响。从理论分析和模拟计算结果可知,当入纤脉冲为皮秒甚至飞秒量级的高斯型孤子脉冲时,高阶效应对其传输特性的影响是非常明显的,各因素产生不同类型的影响,且其影响强度也不同。三阶色散、五阶非线性和输入脉冲的啁啾参数之间存在着相互影响和制约关系,对于给定的输入脉冲,当这三者在某一“临界值”附近时,它们能对脉冲的传输起到“整形”作用并存在着“自增益”效应。若这一结论能得到实验的证实,则光孤子通信将会变得比过去想象的容易并极大地降低通信成本。

参考文献:

[1] A Hasegawa. Soliton effects in optical waveguides [J]. Rep. Prog. Phys., 2002(65):999-1024.

[2] Gan Gui-rong, Luo Kai-ji. Variational study on influence of high-order dispersion and fifth-order nonlinearity on propagation properties of Gaussian pulse in optical fibers [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(6):1041-1046. (in Chinese)
甘桂蓉, 罗开基. 用变分法研究高阶色散和五阶非线性对高斯脉冲在光纤中传输特性的影响 [J]. 光学学报, 2008, 28(6):1041-1046.

[3] Govind P Agrawal. Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics [M]. Elsevier Science (USA), 2002:376-380.

[4] Govind P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics [M]. Elsevier Science (USA), 2002:34-35.

[5] 王晶, 苗洪利. 单模光纤中三阶色散所致啁啾 [J]. 中国激光, 1998, 25(8):739-742.

[6] 胡涛平, 罗青, 颜森林, 等. 五阶非线性下零色散附近的调制不稳定性 [J]. 光子学报, 2008, 37(7):1326-1327.