

文章编号:1004-4213(2010)05-0829-5

色散和非线性效应对高斯脉冲综合影响的理论分析*

蔡托, 桑田, 张小伟

(黔南民族师范学院 物理与电子科学系, 贵州 都匀 558000)

摘要:从光孤子传输所满足的非线性薛定谔方程出发, 采用单独分析和综合分析对比, 分析了影响高斯脉冲传输的色散、非线性等因素, 结果表明: 二阶色散参量只会影响脉冲的幅值, 对脉冲形状影响不大, 而输入脉冲的啁啾则是使脉冲发生形变的主要原因; 在啁啾、三阶色散和五阶非线性的共同作用下, 它们对脉冲都会产生较大的影响, 且存在相互影响和制约作用, 在某一临界值, 对脉冲存在着较高的压缩增益效应和“整形”作用. 从理论上提出了改善高斯光脉冲在光纤中传输特性的解决方案, 这对光纤孤子通信的实践过程具有一定的理论借鉴意义.

关键词:啁啾; 高阶色散; 高阶非线性; 对称分步傅里叶法; 光孤子

中图分类号: O437

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103905.0829

0 引言

随着现代通信网通信流量的需求迅速增长, 大容量、高比特速率及超长距离的光通信已成为迫切需求. 光孤子通信由于其具有高容量传输、长距离、误码率低、抗噪音能力强等优点^[1], 成为满足和实现这一需求的最佳候选者. 自 1973 年人们提出利用光孤子实现光纤通信以来, 国内外的科学家们对此进行了深入的理论分析和实验研究. 近几年来, 光孤子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 km 甚至几万 km 的长距离传输^[2]. 在国内, 各科研院所的诸多学者对光孤子的传输特性也进行了各个方面的理论探索和实验研究. 诸如利用非线性掺铒光纤环境的开关特性及放大功能将拍频弱信号转换为峰值功率高, 占空比大的高质量超短光孤子脉冲串的研究^[3], 色散管理系统 (Dispersion-Managed System, DMS) 的研究^[4], 激光脉冲整形的任意电脉冲产生技术研究^[5] 等等, 并得到了有价值的结论或成果. 随着光纤通信领域中其它关键器件的相继问世, 如锁模激光器、滑频滤波器、采样调制器和掺铒光纤放大器 (Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA) 等的出现和实用化, 光纤光孤子通信中存在的问题正在逐步得以解决并将最终走向商用.

光孤子通信的前景是令人乐观的, 但一些关键性课题仍有待进一步深入研究以求得到最终解决.

实践表明, 当光脉冲的脉宽窄到皮秒或飞秒量

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参量的光纤中, 即便是中等光强的光入射, 它在与物质的相互作用过程中也必然会引起非线性效应^[6].

本文从光孤子在单模光纤中的传输方程出发, 采用单独分析与综合分析比较的方法讨论二阶、三阶色散, 脉冲啁啾和高阶非线性效应对光孤子传输特性影响的强度, 并根据数值计算结果从理论上提出可能的解决方案.

1 光孤子传输方程与分析

光孤子是光纤中群速度色散 (Group-Velocity Dispersion, GVD) 和自相位调制 (Self-Phase Modulation, SPM) 在反常色散区精确平衡的结果, 其数学描述是根据 Maxwell 方程组, 求得光信号在单模非线性色散光纤中的非线性薛定谔 (Non-linear Schrödinger Equation, NLS) 方程来描述的. 实践表明, 当入纤脉冲宽度在皮秒甚至飞秒量级或超短脉冲具有较高的入纤功率时, 高阶色散、非线性、自频移和自陡非线性效应都将不容忽视, 此时光脉冲在光纤中的传输应由广义 NLS 方程^[6] 来描述, 其基本形式为

$$\begin{aligned} \frac{\partial A}{\partial T} + \frac{a}{2}A + \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} + \frac{i}{24}\beta_4 \frac{\partial^4 A}{\partial T^4} = \\ i[\gamma|A|^2A + \eta|A|^4A + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial(|A|^2A)}{\partial T} - \\ T_{RA} \frac{\partial|A|^2}{\partial T}] \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $A(z, T)$ 为光脉冲包络的慢变振幅, Z 为无量

* 贵州省省长基金(200847)资助

Tel: 0854-8738047

Email: caituo@yeah.net

收稿日期: 2009-10-20

修回日期: 2009-12-13

纲的传输距离,而 T 是脉冲在以群速度 v_g 移动的参考系中的时间量度 ($T=t-z/v_g$), β_2 为群速度色散参量, γ 是对应于自相位调制效应的非线性参量,而 a 则为归一化损耗常量, β_3 为三阶色散系数, η 为五阶非线性系数,右边正比于 ω_0^{-1} 的项是由包含了非线性极化率 P_{NL} 的一阶导数引起的,代表自陡和冲击的产生,右边最后与 T_R 成正比一项与延迟喇曼响应有关,对应于脉冲内喇曼散射诱发的自频移效应.

1.1 二阶色散、脉冲啁啾和三阶色散对光脉冲传输的影响

当入纤光脉冲宽度 $T_0 \geq 100$ fs 时,在忽略光纤损耗的情况下,方程(1)简化为^[6]

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

对于只有色散效应时,一般情况下二阶色散对脉冲的展宽是主要的,但当入纤波长在光纤的零色散波长附近和对于超短脉冲传输系统,三阶色散对脉冲的影响是明显^[7]的.在不考虑非线性效应的情况下,方程(2)可简化为

$$\frac{\partial A(z, T)}{\partial z} + \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A(z, T)}{\partial T^2} - \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3 A(z, T)}{\partial T^3} = 0 \quad (3)$$

利用 Fourier 积分变换法易于求得方程(3)的解析解为

$$A(z, T) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [\tilde{A}(0, \omega) \exp(\frac{i}{2}\beta_2 \omega^2 z - \frac{i}{6}\beta_3 \omega^3 z + i\omega T)] d\omega \quad (4)$$

具有初始啁啾的高斯脉冲^[8]见式(5)

$$A = A_0 \exp\left[-\frac{1+ik}{2}\left(\frac{T}{T_0}\right)^2\right] \quad (5)$$

式中 T_0 为 $1/e$ 强度的半宽, k 为啁啾参量.将式(5)的 Fourier 变换代入式(4)得

$$A(z, T) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A_0 \left(\frac{2\pi T_0}{1+ik}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left[\frac{i}{2}\beta_2 \omega^2 z - \frac{i}{6}\beta_3 \omega^3 z + i\omega z - \frac{\omega^2 T_0^2}{2(1+ik)}\right] d\omega \quad (6)$$

令 $a = \frac{1}{6}\beta_3 z$, $b = \frac{iT_0^2}{2(1+ik)} - \frac{\beta_2}{2}z$, 利用 $\int_{-\infty}^{\infty} \sin x dx = 0$ 和埃里(Airy)函数的积分关系可得

$$A(z, T) = \frac{A_0 T_0}{\sqrt{2\pi(1+ik)}} \exp\left[i\left(\frac{2b^3}{27a^2} + \frac{b}{3a}T\right)\right] \cdot (3a)^{-\frac{1}{3}} \pi \text{Ai}\left[\pm(3a)^{-\frac{1}{3}}\left(T + \frac{b^2}{3a}\right)\right] \quad (7)$$

式(7)即为具有初始啁啾的高斯脉冲在考虑了高阶色散时沿单模光纤传输的解析结果.利用 Matlab 模拟 β_2 和 β_3 对脉冲传输特性的影响强度时参量选取 $T_0 = 0.1$ ps, 峰值功率 $p_0 = |A_0|^2 = 0.5$ mW, 传输距离 $z = 50$ km, $\beta_3 = 0$, k, β_2 分别取不同数值时的模拟结果见图 1.

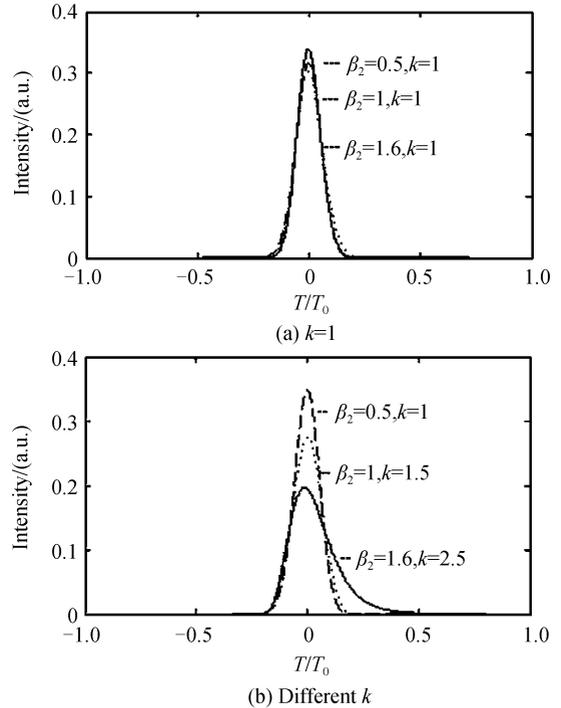


图1 二阶色散对高斯光脉冲传输特性的影响

Fig.1 Effect of second-order dispersion on Gauss optical pulse propagation character

由图 1(a)可见,二阶色散对脉冲传输特性的影响主要是使脉冲展宽,峰值下降,当啁啾系数 k 较小且相同的情况下,脉冲的形状失真不大;而由图 1(b)可见, β_2 值(其正负对应正常色散与反常色散,在此取归一化^[9]的 β_2 值进行计算)与图 1(a)相同,但啁啾系数 k (可人为改变输入脉冲啁啾系数)的增大使脉冲展宽很快,峰值下降也很快(图 1 中虚线与实线采用了不同的强度标度).同时还发现,脉冲随着啁啾系数 k 值的增大其展宽存在漂移且是不对称的,脉冲出现了严重的变形,但脉冲中心不会发生偏移.由此可以得出结论:群速度色散的影响可通过自相位调制(SPM)来平衡或通过色散管理系统^[10](DMS)加以解决,而减小或消除输入脉冲啁啾是这一环节中使孤子脉冲保形传输的主要措施.

对于飞秒脉冲, β_3 的典型值为 0.1 ps³/km,在 GVD 补偿光纤链路中,其有效值^[6]在 $0.076 \sim 0.125$ ps³/km 之间变化.当 $\beta_2 = 0$ 时,二阶色散完全得到补偿.由图 2 可见,三阶色散单独作用的结果是

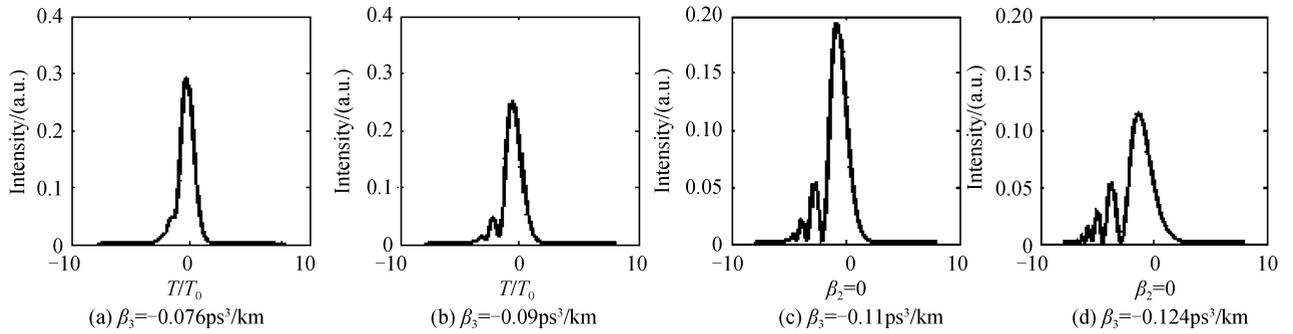


图2 三阶色散对高斯光脉冲传输特性的影响

Fig. 2 Effect of third-order dispersion on Gauss optical pulse propagation character

使脉冲发生畸变,脉冲中心偏移,且偏移一沿出现拖尾振荡,峰值功率下降,脉冲展宽;随着 β_3 绝对值的增大(见图2中),峰值下降、中心偏移和拖尾振荡加剧,这将会使脉冲的部分能量逸出比特时间以外而形成码间干扰,同时由于脉冲的展宽,在比特时间内光脉冲能量的降低,导致信噪比(Signal-Noise Ratio, SNR)降低从而降低接收灵敏度。

三阶色散因素对脉冲传输特性的影响可通过波分复用(Wavelength-Division Multiplying, WDM)和色散管理技术^[6]加以解决,目前已制造出在一定波长范围内使三阶色散 β_3 接近于零而二阶色散 $|\beta_2|$ 保持为有限值的色散平坦光纤,利用色散平坦光纤,三阶色散因素几乎可忽略,但此时可能需要考虑更高阶色散因素的影响。

1.2 高阶色散和五阶非线性同时对光孤子传输特性的影响

当存在二、三阶色散效应和五阶非线性效应时,光孤子在单模光纤中传输遵从修正的NLS方程^[11]

$$\frac{\partial A}{\partial T} = \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} + i\gamma|A|^2 A + i\eta|A|^4 A \quad (8)$$

式(8)可简写为

$$\frac{\partial A}{\partial T} = (\hat{D} + \hat{N})A \quad (9)$$

为突出高阶效应的影响,式(8)忽略了光纤损耗,且设GVD与SPM严格平衡,则此时只需考虑 β_3 和 η 的影响即可。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(9)的形式解为

$$A(z+h, T) \approx \exp\left(\frac{h}{2}\hat{D}\right) \exp\left[\int_{z'}^z \hat{N}(z') dz'\right] \cdot \exp\left(\frac{h}{2}\hat{D}\right) A(z, T) \quad (10)$$

利用梯形规则和近似积分^[6]可将式(10)改写为

$$A(z+h, T) \approx \exp\left(\frac{h}{2}\hat{D}\right) \exp\left\{\frac{h}{2}[\hat{N}(z) + \hat{N}(z+h)]\right\} A(z, T) \quad (11)$$

$$\hat{N}(z+h)] \exp\left(\frac{h}{2}\hat{D}\right) A(z, T) \quad (11)$$

式(11)即为进行数值模拟的依据。

设输入脉冲为啁啾高斯脉冲

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

式中 p_0 , T_0 , k 分别为脉冲的峰值功率、脉冲半宽和啁啾参量, λ_0 为脉冲中心波长。

利用MATLAB编程模拟并讨论当啁啾、三阶色散系数 β_3 和五阶非线性系数 η 取不同值^[12]时它们对脉冲传输特性的共同影响(选取参量 $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$, $P_0 = 1 \text{ mW}$, $T_0 = 0.1 \text{ ps}$, $L = 100 \text{ km}$ 。根据文献^[17],五阶非线性系数 η 约在 $-0.06 \sim 0.06 / \text{kmW}^2$ 之间)。

在图3中,为便于比较,同时绘出了输入和输出脉冲波形。计算结果表明,输入脉冲啁啾、三阶色散和五阶非线性是相互影响并在一定范围内具有制约作用的。由图3(b)、(c)可见,当啁啾参量、五阶非线性系数和三阶色散系数分别为 $k=1.2$, $\eta=0.0005$, $\beta_3 = \pm 0.08$ 时,传输100 km后的输出脉冲峰值明显下降,脉冲波形发生严重畸变,而三阶色散是使脉冲中心产生偏移和引起前沿或后沿(取决于 β_3 的正负号)振荡的主要因素,五阶非线性的存在则加剧了拖尾振荡。由图3(d)明显看到,当五阶非线性参量增大到 $\eta=0.0015$ 时,脉冲峰值进一步下降,拖尾振荡愈加剧烈,这将会使脉冲更多的能量逸出比特时间以外,脉冲能量进一步降低,同时将由于脉冲的进一步展宽而形成码间干扰,导致信噪比(Signal Noise Rate, SNR)降低。而由图3(e)却发现,当输入脉冲的啁啾参量、光纤的三阶色散和五阶非线性系数分别为 $k=2.8$, $\eta=0.0507$, $\beta_3 = 0.412$ 时,输出脉冲波形得到了很好的改善,这说明脉冲啁啾、五阶非线性和三阶色散三者某一特定值附近时,能对脉冲起到很好的整形作用并由于脉冲被压缩而获得增益,且拖尾振荡完全消除,虽然仍有微小失真,但传输特性已得到极大改善。就这一点而言,当输入高斯

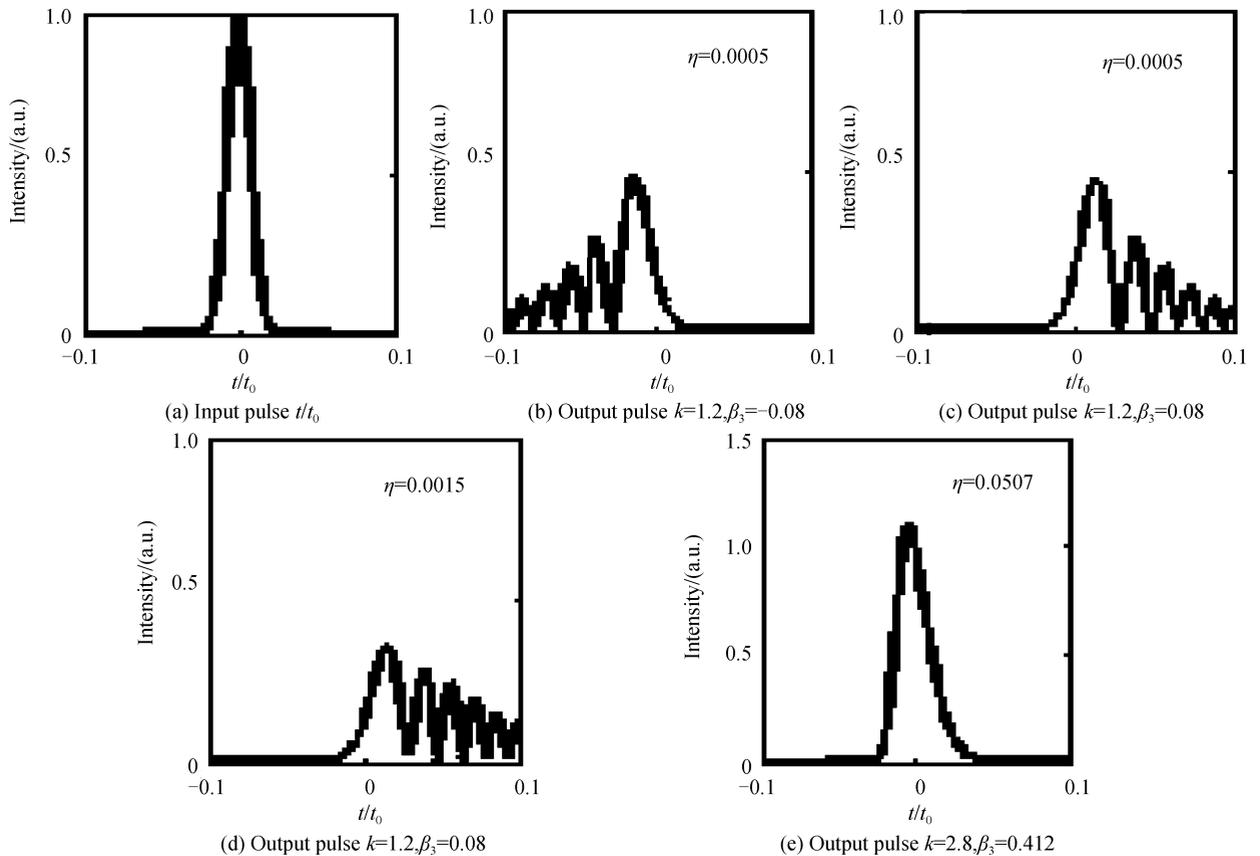


图3 三阶色散和五阶非线性同时存在时对啁啾脉冲传输特性的影响

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

脉冲的啁啾参量一定时,选择具有不同高阶色散和五阶非线性系数的光纤,或对于具有确定高阶色散和高阶非线性系数的光纤,通过调整输入脉冲的啁啾参量,都有可能使光孤子的传输质量得到较好的改善。

2 结论

理论分析和模拟计算结果可知,当入纤脉冲为亚皮秒甚至飞秒量级的孤子脉冲时,高阶效应对其传输特性的影响是非常明显的,其作用的结果是使输入脉冲严重变形并引起程度不同的拖尾振荡,但有意思的是,当输入脉冲的啁啾参量、光纤的三阶色散和五阶非线性系数分别在某一临界值附近时,却能对脉冲产生较高的“增益”和整形作用,且拖尾振荡完全消除,使传输特性得到极大的改善.这在理论和实践中都是具有探讨价值的。

参考文献

[1] HASEGAWA H, KODAMA Y. Solitons in optical communication[M]. New York:Oxford University Press,1996, 87-108.
 [2] HASEGAWA A. Soliton effects in optical waveguides[J]. *Rep Prog Phys*,2002,(65):999-1024.
 [3] JIN Wan-ling, YANG Xiao-lai, CAO Wen-hua. Ultrashort soliton pulse train generation erbium-doped nonlinear amplifying and amplification in a fiber loop mirror [J]. *Acta Photonica Sinica*,2007,**36**(3):448-450.

靳婉玲,杨小来,曹文华.非线性掺铒光纤环中超短光孤子串的产生及放大[J]. *光子学报*,2007,**36**(3):448-450.
 [4] WANG Zhong-qing, WAN Peng, LAI Chang. Investigation on the communications feasibility of picoseconds soliton transmitted in dispersion management fibers [J]. *Acta Photonica Sinica*,2007,**36**:127-130.
 汪仲清,万鹏,赖昌.孤子色散管理传输及其在常规光纤通信中的可行性研究[J]. *光子学报*,2007,**36**(增刊):127-130.
 [5] LI Xiao-kun, LIU Bai-yu, OU-YANG Xian, et al. Research on arbitrary electrical pulse generation technology for laser pulse shaping[J]. *Acta Photonica Sinica*,2009,**38**(8):1943-1945.
 李晓坤,刘白玉,欧阳娟,等.用于激光脉冲整形的任意电脉冲产生技术研究[J]. *光子学报*,2009,**38**(8):1943-1945.
 [6] AGRAWAL Govind P. Nonlinear fiber optics & applications of nonlinear fiber optics[M]. Elsevier Science (USA),2002,114-115,26-39.
 [7] SANG Zhi-wen, LUO Kai-ji, SANG Ming-huang, et al. Influence of the third-order dispersion on the propagation properties of Gaussian-shaped pulses in optical fibers[J]. *J Quant Electron*,2005,**22**(6):946-948.
 桑志文,罗开基,桑明煌,等.三阶色散对光纤中高斯型脉冲传输特性的影响[J]. *量子电子学报*,2005,**22**(6):946-948.
 [8] DAVYDOVA T A, Z ALIZNYAK Y A. Schrödinger ordinary solitons and chirped solitons; fourth-order dispersive effects and cubic-quintic nonlinearity[J]. *Physica D*,2001,**156**(3-4):260-282.
 [9] WANG Zhong-qing, WAN Peng. Transmission of femtosecond soliton and its dispersion management [J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications*,2007,**16**(6):650-652.
 汪仲清,万鹏.飞秒孤子的传输与色散管理研究[J]. *重庆邮电大学学报*,2007,**16**(6):650-652.

- [10] KNOX F M, FORSVYSAK W, DORAN N J. 10 Gbit/s soliton communication over standard fiber at 1.55 μm and the use of dispersion compensation[J]. *Lightwave Technol*, 1995, (13):1955-1963.
- [11] 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.
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.
- [12] HU Tao-ping, LUO Qing, YAN Sen-lin, *et al.* Modulational instability in the region of minimum-velocity dispersion with quintic nonlinearity[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(7):1326-1327.
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.

Theoretical Analysis on Dispersion and Non-linearity Affecting Gauss Pulse Propagation

CAI Tuo, SANG Tian, ZHANG Xiao-wei

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

Abstract: By properly choosing the parameters of the non-linear Schrödinger equation which satisfies the optical soliton propagation, and by using independent analysis and the comprehensive analysis for the factors such as dispersion and non-linearity which influences Gauss pulses propagation, two conclusions are obtained. The second-order dispersion mainly influences the pulse amplitude but the pulse shape, and the chirp effect is the key factor for the pulse distortion. The chirp, the third-order dispersion and the fifth-order nonlinearity simultaneously influence the pulse propagation, and they also influence and interact with each other. As they approach a certain parameter, the high gain effect and the reshape effect occur in the propagation of the pulse. The improvement method for the characteristics of pulse propagation is theoretically proposed based on the analysis and simulation results, which has theoretical importance for the practice of soliton optical fiber communication.

Key words: Chirp; High-order dispersion; High-order non-linearity; Symmetry split-step Fourier transform method; Optical soliton



CAI Tuo was born in 1953. He received the M. S. degree in theoretical physics from Sichuan University, in 1987. Now he is an associate professor, and his research interests focus on nonlinear fiber optics.