

doi: 10.3788/gzxb20124108.1004

线性啁啾光脉冲在具有纵向增益光纤中的自相似传播研究

任丽平

(陕西教育学院 物理与电子技术系, 西安 710061)

摘 要:非线性薛定谔方程是光脉冲在光纤中传播时所遵循的基本方程. 本文利用分步傅里叶方法从数值结算的角度研究了具有线性啁啾的光脉冲在具有纵向增益光纤中的自相似传播特性. 研究表明:当群速度色散系数和光脉冲的啁啾系数符号相同时,由于在传播过程中自相位调制和群速度色散分别起主要作用,不论何种形式的光脉冲在传输过程中均会受到压缩,但随着传播距离的增加压缩的光脉冲会展宽;埃尔米特高斯输入和正弦输入在传播过程中的光强分布是对称的,拉盖尔高斯输入在传播过程中会发生能量交换而表现出明显的偏转;当群速度色散系数和光脉冲的啁啾系数符号不相同,在传播过程中群速度色散始终起主要作用,脉冲一直展宽. 这些研究结论可能为未来光纤压缩器、光纤放大器以及新型 THz 调制波源的制备提供新的理论基础和方法.

关键词:光纤光学; 自相似; 增益; 啁啾; 光传播

中图分类号: O437 **文献标识码:** A

文章编号: 1004-4213(2012)08-1004-5

0 引言

关于非线性方程自相似解的研究不仅可以有助于人们充分理解众多的非线性现象^[1],诸如:辐射模式的形成^[2],在非线性介质中旋转激光束的自相似塌陷区域^[3],受激拉曼散射^[4],自写入波导的演化^[5],孤子系统中 Cantor 分形的形成^[6],在正色散光纤中的非线性抛物型光脉冲的传播^[7-10],以及啁啾孤立波的非线性压缩问题^[11-12]等,而且还可能有助于发现新的应用前景和空间^[13-14].

近年来,光纤中的自相似脉冲传输的研究引起了科研人员的广泛关注^[8, 14-23],一些新的研究方法和结果不断报道,比如关于自相似孤子光纤激光器的研究^[24-26]等. 在文献[15, 17-18]中,输入的光脉冲是非啁啾的,它们在传播过程中表现出自相似的特性,即不论光脉冲的输入分布是何样式,经过演化总是可以得到一个类抛物脉冲;文献[16]找到了一个带有啁啾的光脉冲按照线性薛定谔方程传播的分析解.

本文研究了带有啁啾的光脉冲在可用非线性薛定谔方程描述的光纤中的自相似传播特性. 由于非线性效应在光纤中是普遍存在的,所以本文的工作旨在完善光纤中自相似脉冲的研究. 研究发现,当群

速度色散系数和啁啾系数同号时,不论何种输入形式的光脉冲在传播一定距离后(因为自相位调制起主要作用)都会受到压缩而使其峰值功率大大加强;当传播超出这个特定的距离压缩的光脉冲会随着距离的增加而展宽(因为群速度色散起主要作用),并且压缩过程不再出现. 光强对称分布的输入在传播过程中的光强分布也是对称的,而光强分布不对称的输入在传播过程中会因为能量交换而发生明显的偏转. 这些现象的产生均是源于自相似性. 当群速度色散系数与啁啾系数不同号时,因为群速度色散其主要作用,所以脉冲只展宽. 因自相似性引起的这种现象在未来光纤压缩器、光纤放大器以及 THz 调制波的波源等方面具有极大的应用潜力.

1 理论模型

一般地,带有纵向增益的非线性薛定谔方程(Nonlinear Schrödinger Equation, NLSE)为

$$i \frac{\partial \Psi}{\partial z} = \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} - \gamma |\Psi|^2 \Psi + i \frac{g}{2} \Psi \quad (1)$$

该方程描述的是光脉冲在光纤中传播过程中的增益或衰减特性. 其中 Ψ 为光脉冲在传播过程中的复振幅, β_2 是群速度(Group Velocity Dispersion, GVD)色散系数, γ 为非线性系数, g 为光脉冲在光

第一作者:任丽平(1979-),女,讲师,硕士,主要研究方向为光学、物理教育等. Email: renlp78@163.com

收稿日期:2012-01-16;修回日期:2012-03-17

纤中传播时的增益系数, z 为光脉冲在光纤中的传播长度, t 为光脉冲的时间延迟. 包络函数 Ψ 具有

$$\Psi(t, z) = \psi(t, z) \exp[i\varphi(t, z)] \quad (2)$$

式中, ψ 为光脉冲的慢变包络, φ 为光脉冲的相位分布. 与式形式上保持一致, 本文考虑的输入形式

$$\Psi_n(t) = \exp(ic_0 t^2) \times \begin{cases} H_n(t/t_0) \exp[-t^2/(2t_0^2)] \\ \sin(t/t_0) \\ L_n(t/t_0) \exp[-t^2/(2t_0^2)] \end{cases} \quad (3)$$

式中, c_0 为光脉冲的啁啾参量, H_n 为埃尔米特(Hermite)多项式, L_n 为拉盖尔(Laguerre)多项式, n 为多项式的阶数, t_0 为高斯函数的半高全宽度(Full-Width Half-Maximum, FWHM)参量, 且 $t_0 = \text{FWHM}/2 \sqrt{\ln 2}$. 这样式表示的输入可以分别称之为埃尔米特高斯输入、正弦输入与拉盖尔高斯输入. 与文献[16]类似, 本文也选取三阶埃尔米特和拉盖尔多项式进行研究, 即^[27]

$$\begin{cases} H_3(x) = 8x^3 - 12x \\ L_3(x) = (-x^3 + 9x^2 - 18x + 6)/6 \end{cases} \quad (4)$$

当啁啾参量 $c_0 = 0$ 且 $n = 1$ 时, 公式表示的输入

与文献[18]中的输入类似, 且在 β_2 为正的光纤中该输入会自相似演化为一个类抛物脉冲^[14]. 由于本文光脉冲传播方程(1)是非线性的, 所以文献[16]中报道的近似分析解是不适用于本模型的. 本文将采用数值方法来模拟不同输入形式的光脉冲在光纤中的传播特性.

2 数值结果与讨论

根据文献[15-18]中的数据, 本文在数值计算过程中用到的参量的取值分别为: $g = 1.5 \text{ km}^{-1}$, $|\beta_0| = 20 \text{ ps}^2 \cdot \text{km}^{-1}$, $\gamma = 5.8 \times 10^{-3} \text{ W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, $|c_0| = 0.05 \text{ THz}^2$, $\text{FWHM} = 50 \text{ ps}$. 由于只是限于数值上的讨论, 所以为方便起见本文没有提供具体的输入光功率, 只是给出了光束在传播过程中的相对光强度变化^[16].

图 1(a) 为 c_0 与 β_2 同号时埃尔米特高斯光脉冲的四个波包在光纤中的传播过程, 在传播距离达到 $\sim 500 \text{ m}$ 的时候脉冲压缩到达极限. 随着传播距离的继续增加, 尽管此时光纤中仍存在增益, 但是光脉冲由压缩状态开始恢复, 峰值功率也开始回落. 由于

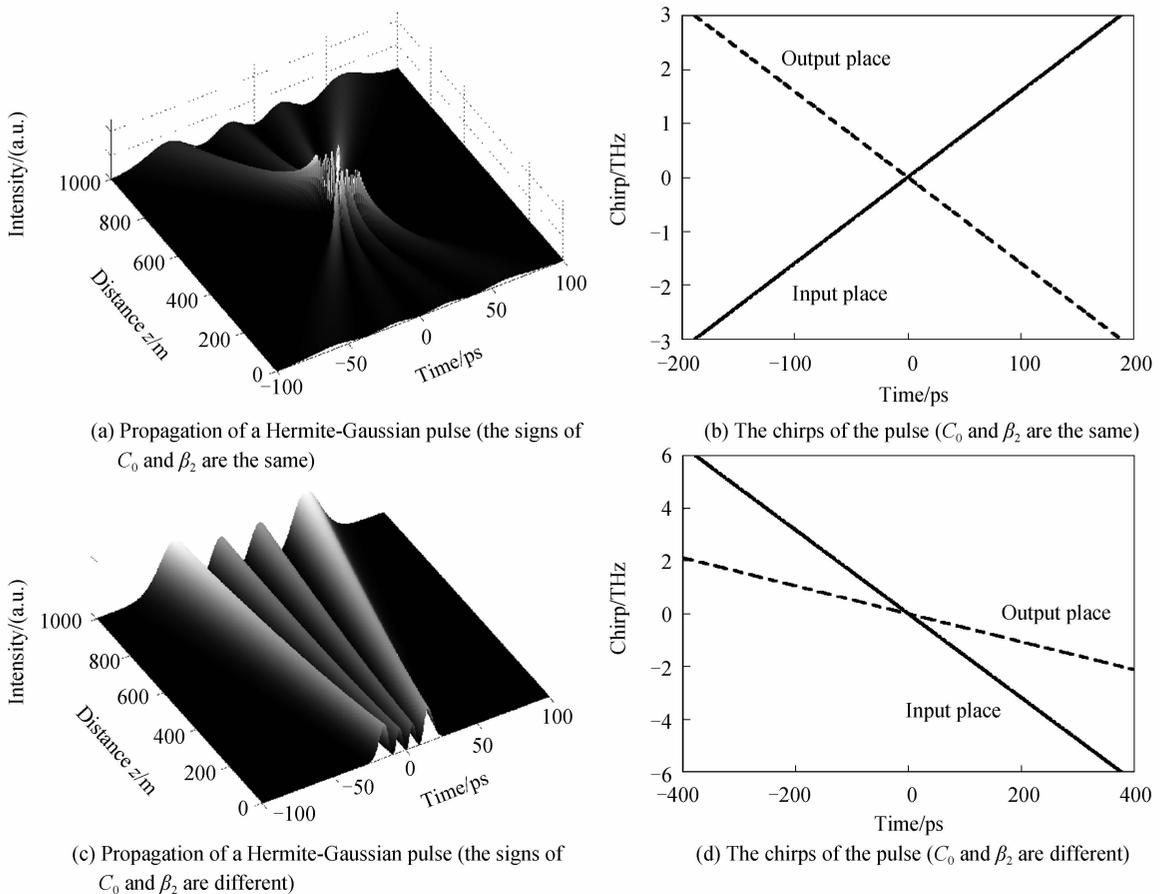


图 1 c_0 与 β_2 同号与异号时 Hermite-Gaussian 光脉冲在光纤中的传播示意图, 以及对应光脉冲发啁啾在输入面和输出面的对比

Fig. 1 Propagation of a Hermite-Gaussian pulse in fiber when the signs of c_0 and β_2 are the same/different, and the chirps of the corresponding pulses at the input and output places

在压缩最强的时刻,光脉冲的峰值功率远远高于输入光脉冲的峰值功率,所以为了更好地反映传播过程中的光强变化和对比,光脉冲在压缩最强时刻的光强没有在图中表现出来.图 1(b)为埃尔米特高斯光脉冲的啁啾在输入面和输出面上的对比图,光脉冲在传播过程中的啁啾已经发生改变(斜率符号发生变化).考虑到光脉冲在传播过程中主要受自相位调制(Self-Phase Modulation, SPM)和 GVD 的影响,而啁啾又和光脉冲的色散联系在一起,所以光脉冲在传播过程中表现出的现象可以理解为:起始 SPM 效应大于 GVD 所以脉冲在压缩,但是在传播过程中随着 GVD 的增加压缩不断衰减,脉冲展宽. c_0 与 β_2 不同号时埃尔米特高斯光脉冲在光纤中的传播过程如图 1(c),此时光脉冲在传播过程中没有受到压缩一直在展宽.图 1(d)为该脉冲在输入和输出位置处的啁啾,可见啁啾的倾斜变小但是符号没有变化,所以此时光脉冲在光纤传播过程中 GVD 始终表现主要作用,故光脉冲一直在展宽.

图 2(a)是正弦输入光脉冲在光纤中的演化过程.在传播距离达到 ~ 500 m 的时候,正弦脉冲相邻的四个波包受到强烈压缩,当传播距离继续增大时,光束有压缩状态慢慢舒展开.这与图 1(a)中的埃尔米特高斯型输入脉冲的演化过程十分类似.对比可

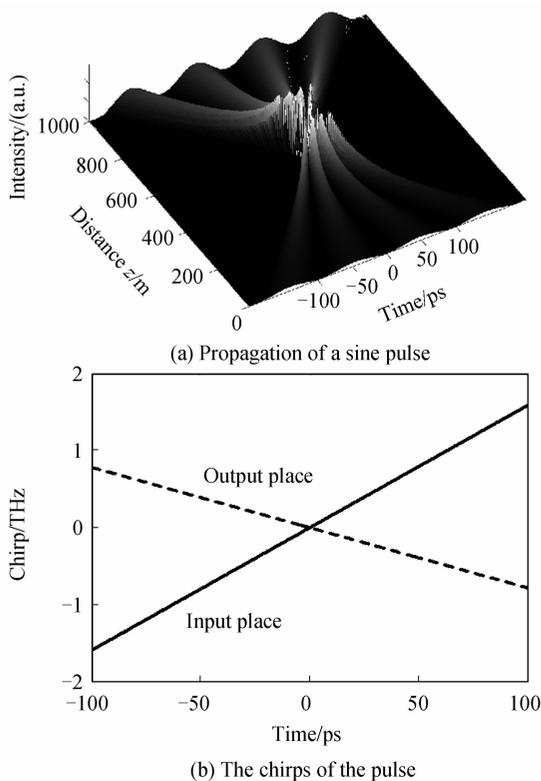


图 2 c_0 与 β_2 同号时正弦光脉冲在光纤中的传播示意图以及该光脉冲的啁啾在输入面和输出面的对比
Fig. 2 Propagation of a sine pulse in fiber when the signs of c_0 and β_2 are the same, and the chirps of the pulse at the input place and output place

见,光脉冲都是在演化到 ~ 500 m 处受到强烈压缩,故而也表现出一种自相似的特性.不过,自相似性与文献[15, 17-18]中光脉冲经过一定距离演化为一个抛物脉冲的自相似性不同.图 2(b)为正弦脉冲在输入和输出位置处的啁啾对比,与图 1(b)类似.故而光脉冲在传播过程中一开始 SPM 起主要作用,脉冲压缩,然后 GVD 起主要作用,脉冲展宽.

埃尔米特高斯型输入光脉冲和正弦输入光脉冲的光强分布是对称的,它们在光纤中传播时光强也是对称分布的.与上两种光脉冲的强度分布不同,拉盖尔高斯型输入光脉冲的光强为非对称分布,其在光纤中的传播过程如图 3(a).该光脉冲也在 ~ 500 m 处受到强烈压缩,峰值功率达到最大,随着传播距离的增加,光脉冲由压缩状态慢慢展宽,体现出本文提及的自相似性.然而,该光脉冲的光强度随着传播距离的增加而发生偏转,为非对称分布.光脉冲发生偏转的原因在于拉盖尔高斯型输入光脉冲的光强分布是不对称的(图 4 中的实线),这两个光波包在传播过程中发生相互作用产生能量交换(图 4 中虚线).而根据传播过程中的体现出的自相似性要求:1) 光脉冲在传播到 ~ 500 m 处实现最大化压缩,其原因与图 1(a)和图 2(a)类似(见图 3(b)中脉

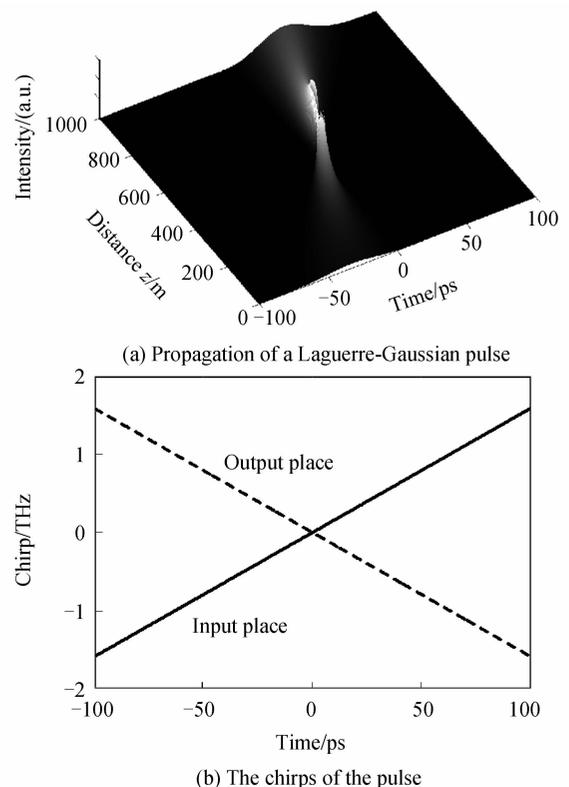


图 3 c_0 与 β_2 同号时 Laguerre-Gaussian 光脉冲在光纤中的传播示意图,以及该光脉冲的啁啾在输入面和输出面的对比
Fig. 3 Propagation of a Laguerre-Gaussian pulse in fiber when the signs of c_0 and β_2 are the same, and the chirps of the pulse at the input place and output place

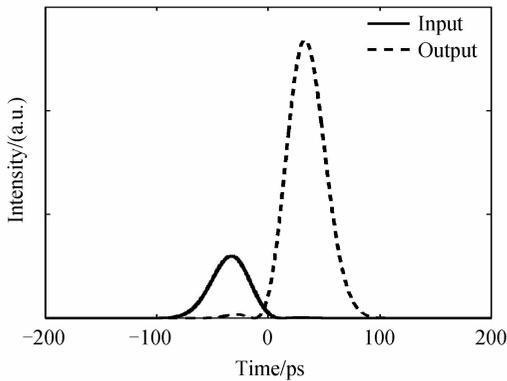


图 4 c_0 与 β_2 同号时 Laguerre-Gaussian 光脉冲在输入面和输出面上的光强对比

Fig. 4 The input and output of the Laguerre-Gaussian pulse when the signs of c_0 and β_2 are the same

冲在输入和输出位置的啁啾对比); 2) 压缩后的光脉冲的峰值光强应该在 $t \approx 0$ ps 处. 可以说, 这种偏转现象的产生正是源于这种光脉冲传播的自相似性, 是光脉冲自相似传播特性的最有力的证明.

3 结论

本文利用数值方法讨论了线性啁啾光脉冲在光纤中的自相似传播特性. 当 c_0 与 β_2 同号时, 光脉冲传播的自相似性使得光脉冲在光纤中传播一定距离后会受到强烈压缩, 而随着传播距离地继续增加, 压缩会消失, 这是因为光脉冲在传播过程中 SPM 和 GVD 分别其主要作用的缘故. 输入光强对称分布的光脉冲在传播过程中的光强始终呈现对称分布状态, 而输入光强不对称的光脉冲会因为自相似性而在传播过程中发生能量交换而表现出偏转现象. 当 c_0 与 β_2 不同号时, GVD 在传播过程中一直起主要作用, 脉冲一直展宽, 表现不出自相似现象. 本文的结果可能应用于制作光纤放大器和压缩器等光通信器件, 也可能为产生 THz 调制波提供一种新的波源, 具有极大的应用前景.

参考文献

- [1] BARENBLATT G I. Scaling, self-similarity, and intermediate asymptotics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- [2] AFANAS' EV A A, KRUGLOV V I, SAMSON B A, *et al.* Self-action of counterpropagating axially symmetric light beams in a transparent cubic-nonlinearity medium[J]. *Journal of Modern Optics*, 1991, **38**(6): 1189-1202.
- [3] KRUGLOV V I, LOGVIN Y A, VOLKOV V. The theory of spiral laser beams in nonlinear media[J]. *Journal of Modern Optics*, 1992, **39**(11): 2277-2291.
- [4] MENYUK C, LEVI D, WINTERNITZ P. Self-similarity in transient stimulated Raman scattering[J]. *Physical Review Letters*, 1992, **69**(21): 3048-3051.
- [5] MONRO T M, MILLER P D, POLADIAN L, *et al.* Self-similar evolution of self-written waveguides [J]. *Optics Letters*, 1998, **23**(4): 268-270.
- [6] SOLJACIC M, SEGEV M, MENYUK C R. Self-similarity

- and fractals in soliton-supporting systems [J]. *Physical Review E*, 2000, **61**(2): 1048-1051.
- [7] FINOT C, MILLOT G, BILLET C, *et al.* Experimental generation of parabolic pulses via Raman amplification in optical fiber[J]. *Optics Express*, 2003, **11**(13): 1547-1552.
- [8] ILDAY F, BUCKLEY J, CLARK W, *et al.* Self-similar evolution of parabolic pulses in a laser[J]. *Physical Review Letters*, 2004, **92**(21): 213902.
- [9] ANDERSON D, DESAIX M, KARLSSON M, *et al.* Wave-breaking-free pulses in nonlinear-optical fibers[J]. *JOSA B*, 1993, **10**(7): 1185-1190.
- [10] LIMPET J, SCHREIBER T, CLAUSNITZER T, *et al.* High-power femtosecond Yb-doped fiber amplifier[J]. *Optics Express*, 2002, **10**(14): 628-638.
- [11] MOORES J D. Nonlinear compression of chirped solitary waves with and without phase modulation[J]. *Optics Letters*, 1996, **21**(8): 555-557.
- [12] QUIROGA-TEIXEIRO M, ANDERSON D, ANDREKSON P, *et al.* Efficient soliton compression by fast adiabatic amplification[J]. *JOSA B*, 1996, **13**(4): 687-692.
- [13] FENG J, DU G, ZHU R, *et al.* Progress of ultra-short self-similar pulse optical fiber lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(8): 81409.
冯杰, 杜国平, 朱瑞兴, 等. 自相似超短脉冲光纤激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(8): 81409.
- [14] FENG Jie, XU Wen-cheng, ZHANG Qiao-fen, *et al.* Self-similar pulse evolution in optical fibers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(10): 26-36.
冯杰, 徐文成, 张巧芬, 等. 光纤中自相似脉冲研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(10): 26-36.
- [15] FERMAN M E, KRUGLOV V I, THOMSEN B C, *et al.* Self-similar propagation and amplification of parabolic pulses in optical fibers[J]. *Physics Review Letters*, 2000, **84**(26): 6010-6013.
- [16] KRUGLOV V, McCHIN D, HARVEY J. Self-similar solutions of the generalized Schrödinger equation with distributed coefficients[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(25): 6198-6207.
- [17] KRUGLOV V, PEACOCK A, DUDLEY J, *et al.* Self-similar propagation of high-power parabolic pulses in optical fiber amplifiers[J]. *Optics Letters*, 2000, **25**(24): 1753-1755.
- [18] KRUGLOV V, PEACOCK A, HARVEY J, *et al.* Self-similar propagation of parabolic pulses in normal-dispersion fiber amplifiers[J]. *JOSA B*, 2002, **19**(3): 461-469.
- [19] ZHAO W, LU K-Q, ZHANG Y-Q, *et al.* Intermediate self-similar solutions of the nonlinear Schrödinger equation with an arbitrary longitudinal gain profile[J]. *Chinese Physics Letters*, 2009, **26**(4): 044213.
- [20] FENG Jie, XU Wen-cheng, LI Shu-xian, *et al.* Analytical self-similar solution of Ginzburg-Landau equation for the dispersion decreasing fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(11): 5835-5842.
冯杰, 徐文成, 李书贤, 等. 色散渐减光纤中 Ginzburg-Landau 方程的自相似脉冲演化的解析解[J]. *物理学报*, 2007, **56**(10): 5835-5842.
- [21] TU Cheng-hou, LEI Ting, ZHU Hui, *et al.* The ultra-short pulse evolution characteristic in self-similar parabolic pulse fiber amplifier[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5): 879-882.
涂成厚, 雷霆, 朱辉, 等. 自相似抛物脉冲光纤放大器中超短脉冲的演化特性[J]. *光子学报*, 2008, **37**(5): 879-882.
- [22] ZHANG Qiao-fen. Generation of excellent self-similar pulse

- in a dispersion-decreasing fiber with normal group-velocity dispersion[J]. *Laser & Infrared*, 2008, **38**(1): 59-62.
张巧芬. 色散渐减光纤中产生优质自相似脉冲的研究[J]. 激光与红外, 2008, **38**(1):59-62.
- [23] ZHANG Qiao-fen, XU Wen-cheng, FENG Jie, *et al.* Propagation properties of self-similar pulse in a dispersion-decreasing fiber with normal group-velocity dispersion[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(1): 30-34.
张巧芬, 徐文成, 冯杰, 等. 色散渐减光纤中自相似脉冲传输特性研究[J]. 光子学报, 2008, **37**(1):30-34.
- [24] OKTEM B, ULGUDUR C, ILDAY F O. Soliton - similariton fibre laser[J]. *Nature Photonics*, 2010, **4**(5): 307-311.
- [25] DUDLEY J M. Ultrafast optics: Nonlinear attraction[J]. *Nature Photonics*, 2010, **4**(5): 272-274.
- [26] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics [M]. 4th. Singapore: Academic Press, 2009.
- [27] 叶其孝, 沈永欢. 实用数学手册[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2006.

Self-similar Propagation of Linearly Chirped Pulses in Fibers with Longitudinal Gain Profile

REN Li-ping

(Department of Physics and Electronic Technology, Shaanxi Institute of Education, Xi'an 710061, China)

Abstract: Nonlinear Schrödinger Equation is a basic equation for investigating the propagation of optical pulses in fibers. By using the split-step Fourier method, self-similar propagation of linearly chirped pulses in fibers with longitudinal gain profile is studied. It is found that, because the self-phase modulation and group velocity dispersion respectively play the main roles at different propagation distances when the signs of the group velocity dispersion coefficient and the chirp coefficient are the same, no matter what the shapes of the input pulses are, the pulses will be compressed during propagation, and with the further increasing of the propagation distance, the compressed pulses will be broadened again. The intensity distributions of the Hermite-Gaussian input pulse as well as the sine input pulse are symmetric, while that of the Laguerre-Gaussian input pulses deflect during propagation obviously because of energy exchange. When the signs of the group velocity dispersion coefficient and the chirp coefficient are different, group velocity dispersion plays the main role, and the pulse is always broadened during propagation. The results may provide a new theoretical foundation and a new method for the fabrication of pulse compressors, amplifiers and the development of a new source for THz modulated beams.

Key words: Fiber optics; Self-similar; Gain; Chirp; Propagation