

文章编号: 1001-3806(2010)02-0218-03

脉冲在非线性渐增光纤中自相似演化的研究

陈海涛¹, 王飞², 邓涛³

(1. 中国人民武装警察部队学院 基础部, 廊坊 065000; 2. 华中科技大学 光电子科学与工程学院, 武汉 430074; 3. 西南大学 物理科学与技术学院, 重庆 400715)

摘要: 为了研究超短脉冲在非线性渐增光纤中自相似演化的特性, 采用理论分析与数值模拟的方法, 对脉冲在非线性渐增光纤中的传输演变进行了数值仿真。结果表明, 脉冲在非线性渐增光纤中的传输与在具有放大增益的光纤或色散渐增光纤中一致, 均能实现脉冲的自相似演化, 最终演化为具有良好线性啁啾特性抛物形脉冲, 仿真结果验证了脉冲在非线性渐增光纤中的传输方程具有渐进解。由于输出抛物脉冲具有良好的线性啁啾, 此研究结果对实现高质量的脉冲压缩是有帮助的。

关键词: 非线性光学; 非线性渐增光纤; 数值模拟; 自相似抛物脉冲; 线性啁啾; 脉冲压缩
中图分类号: TN929.11 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.02.020

Study of the self-similar evolution for optical pulse in nonlinearity-increasing fibers

CHEN Hai-tao¹, WANG Fei², DENG Tao³

(1. Fundament Department, Armed Police Academy, Langfang 065000, China; 2. College of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. School of Physical Science and Technology, South-West University, Chongqing 400715, China)

Abstract: The propagation and evolution characteristics of ultra-short pulses in a nonlinearity-increasing fiber were studied based on theoretical analysis and numerical calculation. Numerical simulation shows that the propagation in a nonlinearity-increasing fiber is similar with that in a gain-amplification fiber or dispersion fiber, i. e., the propagation and evolution accords with the self-similar evolution. Finally the parabolic pulse with linear chirp can be achieved. The result is useful for pulse compression because the parabolic pulse has linear chirp.

Key words: nonlinear optics; nonlinearity-increasing fiber; numerical simulation; self-similar parabolic pulse; linear chirp; pulse compression

引言

避免波分裂获得超短脉冲一直是备受关注的研究课题^[1-2]。FERMANN 等人指出线性啁啾的抛物脉冲是有常数增益的非线性薛定谔方程的渐进解^[3]。在放大器中, 超短脉冲在正常色散和增益以及非线性的共同作用下被同步展宽和放大, 并逐渐演化成具有线性啁啾的抛物脉冲。它在传输过程中能较好地维持抛物形状, 并可实现较长距离的无波分裂传输, 因此又被称为自相似抛物脉冲^[3-8]。由于抛物脉冲具有很好的

线性啁啾, 借助脉冲压缩器可以补偿自相似抛物脉冲的线性啁啾, 从而获得脉宽较窄、近似转换极限的超短脉冲。近年来, 进一步的研究发现, 放大增益不仅可由分布放大(例如喇曼放大)提供, 色散渐减或不同色散值组成的光纤链也可以起到类增益的作用, 从而获得自相似抛物脉冲^[7]。

目前光纤非线性已成为研究的热点, 高非线性在全光开关等领域得到了越来越多的应用。研究还表明^[9]: SiO₂ 光纤的非线性系数大小会随 Ge, Fe 等元素的掺杂程度而变化, 具备了制作非线性渐增光纤的基础和条件。从理论上推导了非线性渐增光纤类增益形式的非线性薛定谔方程, 理论上预测了超短脉冲在非线性和增益光纤中可以演化为自相似抛物脉冲的结论, 并对这一结论进行了数值仿真, 发现仿真结果和理论分析的结论符合较好。

基金项目: 重庆市自然科学基金资助项目(2006BB2405)

作者简介: 陈海涛(1979-), 男, 讲师, 主要从事激光与光通信的研究。

E-mail: sdrzxiangyu@163.com

收稿日期: 2009-01-12; 收到修改稿日期: 2009-02-16

1 理论推导与分析

在正常色散光纤放大器中,输入脉冲的自相似演化可用有增益的非线性薛定谔方程表示:

$$i \frac{\partial A(z, T)}{\partial z} = \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A(z, T)}{\partial T^2} - \gamma |A(z, T)|^2 A(z, T) + i \frac{g_0}{2} A(z, T) \quad (1)$$

式中, $A(z, T)$ 是脉冲的慢变振幅, z 为传输距离, $T = t - z/v_g$ 为时延系中测得的时间, 即脉冲宽度, t 表示时间, v_g 表脉冲的群速度, β_2 为 2 阶色散系数, γ 为非线性系数, g_0 为光纤的增益系数。在传输演化距离足够时, 可以得到(1)式的一个渐近自相似解^[1]:

$$A(z, T) = A_0(z) \{1 - [T/T_0(z)]^2\}^{1/2} \times \exp[i\varphi(z, T)], (|T| \leq T_0(z)) \quad (2)$$

式中, $A_0(z) = 0.5(g_0 E_{in})^{1/3} (\gamma \beta_2 / 2)^{-1/6} \exp(g_0 z / 3)$, E_{in} 指入射脉冲的能量, T_0 表脉冲在光强度峰值的 1/e 处的宽度, φ 指相位, 其它物理量见参考文献[3]。具有(2)式形式自相似解的脉冲具有抛物形状, 同时具有线性啁啾, 其啁啾表达式为 $\delta\omega(T) = -gT(3\beta_2)$, g 为增益系数。脉冲在 $|T| \leq T_0(z)$ 时, $A(z, T) = 0$ 。而在非线性渐增光纤中脉冲传输可用如下薛定谔方程表示:

$$i \frac{\partial A(z, T)}{\partial z} = \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A(z, T)}{\partial T^2} - \gamma(z) |A(z, T)|^2 A(z, T) \quad (3)$$

式中, $\gamma(z)$ 表示随传输距离发生改变的非线性系数, 定义 $R(z) = \gamma(z) / \gamma(0)$, $u(z, T) = \sqrt{R(z)} A(z, T)$, 变形得: $A(z, T) = u(z, T) / \sqrt{R(z)}$, 代入(3)式:

$$i \frac{\partial [u(z, T) / \sqrt{R(z)}]}{\partial z} = \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 [u(z, T) / \sqrt{R(z)}]}{\partial T^2} -$$

$$\gamma(0) \cdot R(z) \left| \frac{u(z, T)}{\sqrt{R(z)}} \right|^2 \frac{u(z, T)}{\sqrt{R(z)}} = 0, \text{化简变形得:}$$

$$i \frac{\partial u(z, T)}{\partial z} = \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 u(z, T)}{\partial T^2} - \gamma(0) |u(z, T)|^2 \times u(z, T) + i \frac{1}{2} \left[\frac{1}{R(z)} \cdot \frac{dR(z)}{dz} \right] A(z, T) \quad (4)$$

对比(1)式与(4)式可知, 非线性渐增光纤具有类似增益的效果, 当满足类增益系数为常数时, (4)式具有(1)式一致的渐近自相似解。因此, 可以利用非线性渐增光纤实现自相似演化, 产生自相似抛物脉冲。当类增益系数 g 为常数时有:

$$g = \frac{1}{R(z)} \cdot \frac{dR(z)}{dz} \quad (5)$$

解微分方程(5)式得: $R(z) = R(0) \exp(gz)$, 即非线性

系数满足指数渐增时(4)式有渐近自相似解, 脉冲在此光纤传输可演变为自相似抛物脉冲, 且脉冲具有线性啁啾。数值仿真时对(3)式进行计算, 观察仿真结果与理论分析的符合程度。

为了更好地说明问题, 借鉴参考文献[4]中定义入射脉冲在非线性渐增光纤中演化成自相似抛物形脉冲的最短距离为特征距离:

$$z_c(N) = \frac{3}{2g} \ln \frac{Ng}{6|\gamma(0)|A_0^2} \quad (6)$$

$$A_0 = \frac{1}{2} \left[\frac{gE_{in}}{\gamma(0)\beta_2/2} \right]^{1/3} \quad (7)$$

式中, N 为表征脉冲自相似演化发生的一个参量, 选取合适的 N 得到的特征距离能够满足自相似演化的需要, 计算时取 $N = 80$ 。

2 数值仿真与讨论

选取入射脉冲为高斯脉冲, 其脉冲表达式为:

$$A(0, T) = \sqrt{P_0} \exp\left(-\frac{T^2}{2T_0^2}\right) \quad (8)$$

式中, P_0 为入射脉冲的峰值功率, T_0 与半峰全宽 T_{FWHM} 的关系为: $T_{FWHM} = 2(\ln 2)^{1/2} T_0$, 定义色散长度为 $L_d = T_0^2 / |\beta_2(0)|$ 。下面采用了对称分步傅里叶方法对(3)式进行数值计算, 验证上面的理论分析的结论。

在数值计算时选取光纤非线性系数按指数渐增, 图1所示为相对非线性系数 $(\gamma(z) / \gamma(0))$ 随传输距离的变化曲线, 此时类增益系数取 $g = 0.16 \text{ m}^{-1}$ 。在数值仿真计算时选取 $\lambda_0 = 1.550 \mu\text{m}$, $\beta_2 = 25 \text{ ps}^2/\text{km}$, $\gamma(0) = 3 \text{ W/km}$ 。

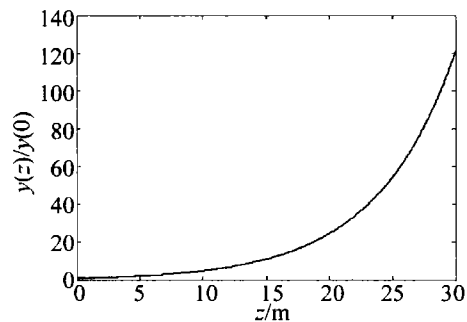


Fig.1 The curve of the nonlinear coefficient with an exponential increase

选取入射脉冲宽度为 1ps, 脉冲能量为 44pJ。经数值计算可得脉冲在非线性渐增光纤中的演化图形, 发现脉冲的演化符合自相似演化的特征, 如图2所示。图2a为脉冲传输 30m 的过程中的脉冲波形的变化, 图中显示脉冲在色散、非线性和类增益的共同作用下逐渐形成抛物脉冲形状, 且在随着传输的进行脉冲形状逐渐变宽, 变宽主要是由于色散的作用引起的。图2b中给出了脉冲分别在 10m, 20m, 30m 处的脉冲形状,

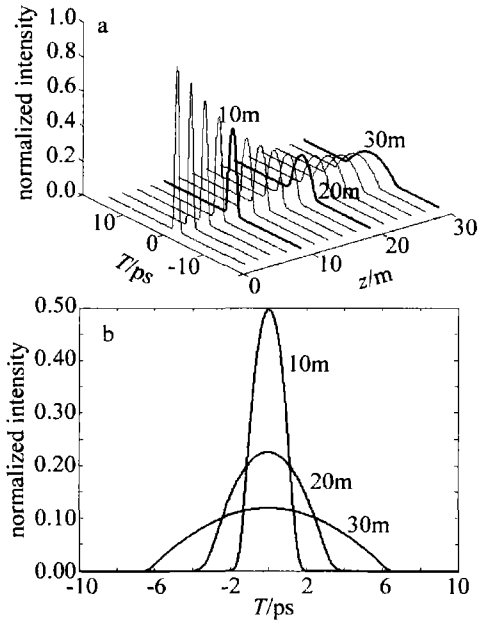


Fig. 2 The self-similar evolution of the pulse in the nonlinearity-increasing fiber

a—the evolution shapes of the pulse in the fiber b—the pulse shapes at the distance of 10m, 20m and 30m

由图可以发现,脉冲随着传输距离的增大越来越接近标准的抛物脉冲形状。图3进一步显示了图2中的脉

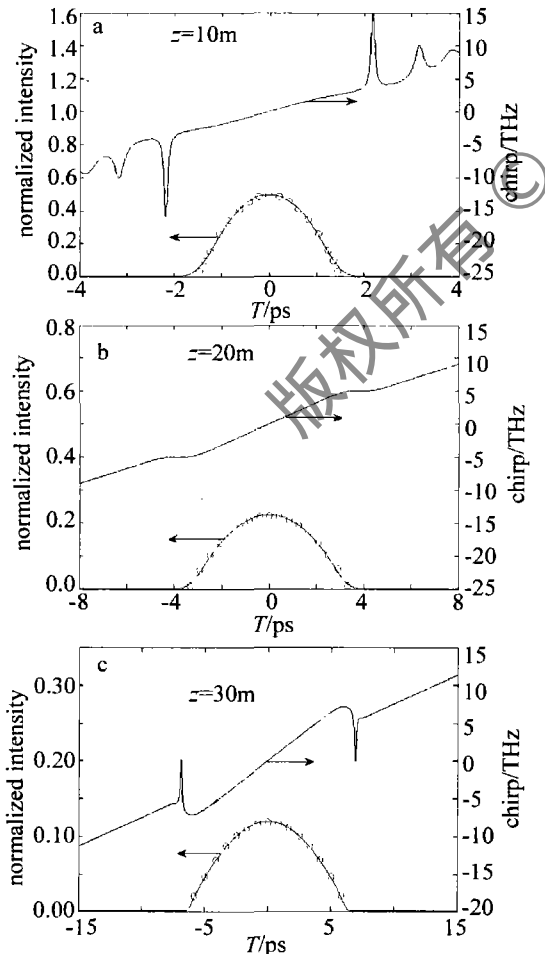


Fig. 3 The evolution pulse, theoretic parabolic pulse and the linear chirp at different distance of 10m, 20m and 30m

冲的形状与理论抛物形状的符合程度及脉冲对应的啁啾情况。从图中对比分析能够发现,在传输距离为10m时脉冲两侧存在不满足抛物形状的边翼,随着传输距离的逐渐增加脉冲经自相似演化逐渐接近抛物脉冲形状,图3b所示传输距离为20m时边翼部分变小;图3c显示传输距离为30m时边缘部分完全消失,脉冲通过自相似演化最终很好的满足抛物形状。脉冲经自相似演化形成抛物脉冲所需要的光纤的长度30m与(6)式和(7)计算的特征距离基本符合(计算结果为30.4m),从而也验证了脉冲在非线性渐增光纤的自相似演化具有与在放大器中和色散渐减光纤中同样的结论,因而也从某种意义上说明脉冲在非线性渐增光纤中的能够发生自相似演化。

进一步分析图3还发现,脉冲具有线性啁啾且随着传输距离的增加变得更加显著,显著的线性啁啾对于脉冲压缩有重要的价值,借助脉冲压缩器可以有效补偿自相似脉冲抛物脉冲的线性啁啾,实现有效脉冲压缩。以上的仿真计算恰好验证了理论分析的结果,即非线性渐增光纤具有类似增益的效果,脉冲在非线性渐增光纤中的非线性薛定谔方程同样具有渐近自相似解,同样可以演化得到线性啁啾抛物脉冲。

3 小结

从理论上推导出非线性渐增光纤中的脉冲传输方程的类增益形式,指出了在满足非线性指数渐增时类增益方程与增益放大和色散渐减光纤一样,也具有渐近自相似解。由仿真模拟计算的结果可知,脉冲经非线性渐增光纤能发生自相似演化,获得具有线性啁啾的抛物脉冲,这充分证实了理论分析的正确性。另外还发现,非线性增长的方式不满足指数增长时也能够基本实现类似的自相似演化的效果,用不同非线性值组成的光纤链也具有类似效果。由于线性啁啾脉冲经脉冲压缩器可实现有效的高质量压缩,因此,这种方法可作为获得超短脉冲的一种方式。

参考文献

- [1] CHEN H T, WU Zh M, FAN Y X, *et al.* Numerical studies on the compression and amplification of the fundamental soliton pulse using erbium-doped fiber amplifier [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(2): 202-205 (in Chinese).
- [2] CHEN H T, WU Zh M, WU J W, *et al.* A designed model for pedestal-free ultra-short pulse generation using DCF, DSF and ED-NALM [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(3): 275-277 (in Chinese).
- [3] FERMAN M E, KRUGLOV V I, THOMSEN B C, *et al.* Self-similar propagation and amplification of parabolic pulses in optical fibers [J]. *Phy Rev Lett*, 2000, 84(26): 6010-6013.
- [4] KRUGLOV V I, PEACOCK A C, HARVEY J D. Self-similar propagation of parabolic pulses in normal-dispersion fiber amplifiers [J]. *J*

(下转第223页)

系列必要的简化,并借助于 ORIGIN7.5 作图工具或者最小二乘法线性拟合方法,不需要借助其它仪器设备就可以计算激光雷达常数。对这种方法进行了理论推导和数值模拟,表明该方法是可行的。激光雷达常数的获取将为评估激光系统以及激光雷达方程的数据处理带来极大便利。

参 考 文 献

- [1] LIU H T, WANG Zh Zh, LI Ch, *et al.* Numerical simulation analysis for detectability of spaceborne lidars[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(6):614-615(in Chinese).
- [2] SASSEN K, CHO B S. Subvisible-thin cirrus lidar dataset for satellite verification and climatological research[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1992, 31(11):1275-1285.
- [3] HU Sh X, WANG Zh Zh, XU Q Sh, *et al.* Studies on methods for aerosol optical depth measurements by lidar[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2006, 23(3):305-310(in Chinese).
- [4] ZHANG J B, HU H L. Lidar calibration: a new method[J]. *Appl Opt*, 1997, 36(6):1235-1238.
- [5] FREDERICK G F, BENJAMAN M H, JOHN A R. Determination of aerosol height distribution by lidar[J]. *Applied Meteorology*, 1972, 11(2):482-489.
- [6] KLETT J. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns[J]. *Appl Opt*, 1981, 20(5):211-220.
- [7] FERNALD F G. Analysis of atmospheric lidar observations, some comments[J]. *Appl Opt*, 1984, 23(9):652-653.
- [8] INABA H, KOBAYASI T. Laser-Raman radar——laser-Raman scattering methods for remote detection and analysis of atmospheric pollution[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1972, 4(2):101-123.
- [9] SUN J Q. *Laser atmosphere detect* [M]. Beijing: Science Press, 1986:88-89(in Chinese).
- [10] SUN J Q. *Laser atmosphere detect* [M]. Beijing: Science Press, 1986:26-27(in Chinese).
- [11] SUN J Q. *Laser atmosphere detect* [M]. Beijing: Science Press, 1986:7-8(in Chinese).

(上接第 220 页)

- O S A, 2002, B19(3): 461-469.
- [5] PRACOCK A C, BRODERICK N G R, MONRO T M. Numerical study of parabolic pulse generation in microstructured fibre Raman amplifiers [J]. *Opt Commun*, 2003, 218(1/3):167-172.
- [6] FINOT C, MILLIOT G, BILLET C, *et al.* Experimental generation of parabolic pulses via Raman amplification in optical fiber[J]. *Optics Express*, 2003, 11(13):1547-1552.
- [7] HIROOKA T, NAKAZAWA M. Parabolic pulse generation by use of a dispersion-decreasing fiber with normal group-velocity dispersion [J]. *Opt Lett*, 2004, 29(5):498-50.
- [8] FENG J, XU W Ch, LI Sh X, *et al.* Analytical self-similar solution of Ginzburg-Landau equation for the dispersion decreasing fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(11):5835-5842(in Chinese).
- [9] JIA G M, JIA D F, LI Sh Ch. Highly nonlinear optical fibers and their applications [J]. *Study on Optical Communications*, 2003(1): 43-46(in Chinese).

版权所有 ©

《激光技术》编辑部