

文章编号: 1001-3806(2014)04-0533-05

色散渐减光纤中自相似脉冲对的演化和压缩

汪徐德, 李素文, 苗曙光, 姜恩华

(淮北师范大学 物理与电子信息学院, 淮北 235000)

摘要: 为了研究了自相似脉冲对在色散渐减光纤中的动力学特性, 采用非线性薛定谔方程对脉冲对的演化和压缩特性进行了模拟, 分析了脉冲对在演化过程中相邻区域产生的相互作用。结果表明, 不考虑3阶色散时, 脉冲对在自相似演化过程中, 相邻的区域将产生对称性的相互振荡, 而脉冲其它区域演化不受影响, 通过色散补偿可以得到脉宽为 128.4fs、压缩因子为 7.8 的压缩脉冲对; 而在考虑3阶色散时, 脉冲对的演化将产生畸变, 相邻区域的振荡呈现不对称性, 通过色散补偿技术, 得到脉宽为 211.6fs、压缩因子为 4.7 的压缩脉冲, 虽然不对称性振荡使得压缩脉冲出现较明显的基座, 但几乎不影响压缩质量。该研究结果对自相似脉冲对的演化的理解具有参考价值。

关键词: 光纤光学; 自相似脉冲; 色散渐减光纤; 3阶色散; 色散补偿

中图分类号: TN253

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.04.019

Evolution and compression of self-similar pulse-pairs in dispersion decreasing fiber

WANG Xude, LI Suwen, MIAO Shuguang, JIANG Enhua

(School of Physics and Electronic Information, Huaibei Normal University, Huaibei 235000, China)

Abstract: In order to study the dynamic characteristics of self-similar pulse-pairs in dispersion decreasing fiber, the evolution and compression of pulse-pairs were simulated theoretically with nonlinear Schrödinger equation. In addition, the interactions between the pulses in the neighboring region were analyzed. The results show that without considering the third-order dispersion, the symmetrical oscillation is created in the overlap region while the evolution of pulses is unaffected outside the overlap region. After dispersion compensation, the compressed pulse-pairs are obtained with the temporal width of 128.4fs and the compression factor of 7.8. When considering the third-order dispersion, the evolution of pulses is distorted and created asymmetrical oscillation in the overlap region. The compressed pulse-pairs have a temporal width of 211.6fs and the corresponding compression factor of 4.7. It is worthy of noticing that the pedestals of compression pulse due to asymmetrical oscillation do not affect the quality of the pulses severely. The results provide references for the evolution of self-similar pulse-pairs.

Key words: fiber optics; self-similar pulse; dispersion decreasing fiber; third-order dispersion; dispersion compensation

引 言

由于光纤非线性和色散相互作用所导致的光波分裂限制了光脉冲功率的进一步提高, 使得在光纤通信领域, 寻求稳定的高功率、高能量超短激光脉冲, 成为国际上研究的热点和难点。自相似脉冲很

好地解决了传输光脉冲的强度限制问题, 它在高功率传播时, 脉冲形状(抛物线型)不改变, 具有抵御光波分裂的能力, 有着严格的线性啁啾, 其特性只与入射脉冲的初始能量和光纤参量有关^[1]。因此其在高功率、高能量超短激光脉冲的产生^[2]、自相似脉冲光纤激光器的设计^[3]、飞秒脉冲光纤放大器的研制^[4]等方面具有广泛的应用。

近年来, 对色散渐减光纤中自相似抛物线脉冲的研究引起了人们的极大兴趣^[5-6], 从非线性薛定谔方程(nonlinear Schrödinger equation, NLSE)推导中可以看出, 色散渐减光纤对脉冲具有等价的放大和脉冲压缩作用, 可以代替掺铒(镱)光纤或喇曼增益

基金项目: 安徽省教育厅高校省级自然科学基金资助项目(KJ2013Z284)

作者简介: 汪徐德(1980-), 男, 讲师, 硕士, 主要从事光纤非线性传输特性及其器件研究。

E-mail: wangxudemail@126.com

收稿日期: 2013-08-21; 收到修改稿日期: 2013-09-03

等主动放大光纤而获得自相似脉冲^[7],许多学者对具有正常色散的色散渐减光纤(normal dispersion-decreasing fiber, ND-DDF)中单个自相似脉冲演化做了详尽的研究^[8],但作为高重复率的超短脉冲源,当脉冲之间间隔足够小时,对自相似脉冲对相互作用现象的研究显得尤为重要^[9-10]。作者采用数值方法研究了 ND-DDF 中抛物线自相似脉冲对的演化特性,自相似脉冲对在 3 阶色散(third-order dispersion, TOD)作用下相邻区域相互作用的情况,随后,通过相应的色散补偿机制,对自相似脉冲对进行压缩。研究结果对于了解自相似脉冲的动力学特性有一定的借鉴价值。

1 理论分析

正常色散下色散渐减光纤的传输特性由 NLSE 来描述^[11],形式如下:

$$i \frac{\partial A}{\partial z} - \frac{\beta_2(0)}{2} D(z) \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + \gamma |A|^2 A = 0 \quad (1)$$

式中, A 表示脉冲的缓变包络; $\beta_2(0)$ 和 γ 分别表示初始 2 阶色散值和克尔非线性系数,且认为其值沿 ND-DDF 保持不变; T 是随脉冲以群速度 v_g 移动的参考系中的时间量度 ($T = (t - z)/v_g$)。对于本文中的脉冲对,用一个总体的包络 $A = A_1 + A_2$ 来表示,因此输入脉冲的缓变包络表示为:

$$A(0, t) = \sqrt{P_0} \exp\left[-\frac{(t - q)^2}{2T_0^2}\right] + \sqrt{P_0} \exp\left[-\frac{(t + q)^2}{2T_0^2}\right] \exp(i\theta_0) \quad (2)$$

式中, P_0 表示初始输入脉冲的峰值功率, t 表示静止坐标中的时间量度, $2q$ 是两个单独脉冲的初始间隔, θ_0 为两脉冲的初始相位差, T_0 为脉冲强度的 $1/e$ 值, $D(z)$ 表示沿光纤方向 z 变化的色散值,且具有双曲线的变化形式,定义 $D(z) = 1/(1 + g_0 z)$,值得注意的是,由于系数增益 $g_0 > 0$,因此 $D(z)$ 为递减的方程。通过一系列的变换, (2) 式就变成了具有恒定色散和增益的 NLSE 的形式:

$$i \frac{\partial A}{\partial z} - \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + \gamma |A|^2 A - i \frac{g_0}{2} A = 0 \quad (3)$$

在 $z \rightarrow \infty$ 时,其传输的渐进解为:

$$A(z, T) = \begin{cases} \sqrt{P(z)} \left\{ 1 - \left[\frac{T}{\tau(z)} \right]^2 \right\}^{1/2} \exp[i\varphi(z, T)], & (|T| \leq \tau(z), z \rightarrow \infty) \\ 0, & (|T| > \tau(z), z \rightarrow \infty) \end{cases} \quad (4)$$

式中, $P(z) = \frac{E_0^{2/3}}{4} \left[\frac{2g_0^2}{\gamma\beta_2(1 + g_0 z)} \right]^{1/3}$, $\tau(z) = 3E_0^{1/3} \left[\frac{\gamma\beta_2(1 + g_0 z)}{2g_0^2} \right]^{1/3}$, $\varphi(z, T) = -\frac{g_0}{6\beta_2} T^2 + \gamma \times \int_0^z P(z') dz'$ 。其中, E_0 为初始脉冲能量。从 (4) 式中可以看出,脉冲在正常色散渐减光纤中传输最终演化为具有抛物线强度包络的自相似形式,且其啁啾 $\delta\omega(T) = -\frac{\partial\varphi}{\partial T} = \frac{g_0}{3\beta_2} T$ 具有严格的线性特点。

2 模拟和分析

设初始脉冲为无啁啾的高斯型脉冲,初始脉冲能量为 $E_0 = 42 \text{ pJ}$,增益系数 $g_0 = 0.020 \text{ m}^{-1}$,非线性系数 $\gamma = 3.35 \times 10^{-3} \text{ W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, ND-DDF 初始处 2 阶色散值为 $\beta_2(0) = 1.30 \times 10^{-3} \text{ ps}^2 \cdot \text{m}^{-1}$,脉冲强度的半峰全宽(full width at half maximum, FWHM) 值 $T_{\text{FWHM}} = 1.0 \text{ ps}$,对于高斯脉冲,脉冲强度的 $\frac{1}{e}$ 宽度值 $T_0 = 600 \text{ fs}$ ($T_{\text{FWHM}} = 2(\ln 2)^{1/2} T_0$),通过计算可知色散长度 $L_d = \frac{T_0^2}{|\beta_2|} = 0.277 \text{ km}$ 。

2.1 3 阶色散忽略时,自相似脉冲对的演化和压缩情况

图 1 中给出的是相同波长时,自相似脉冲对的演化特性,两个初始独立脉冲的间隔为 6ps,即相对应信道比特率为 160Gbit/s。从演化图中可以看出,在脉冲传输的初始阶段,两个独立的脉冲演化没有明显的差别,各自分别以相同的方式在光纤中展宽,并最终形成自相似抛物线型,但脉冲展宽到一定位置时,两个脉冲相邻的区域将发生相互作用,其强度受到某种调制而产生振荡,而在交叠区域以外部分,每个抛物线脉冲演化形状并没有受相邻脉冲的影响。

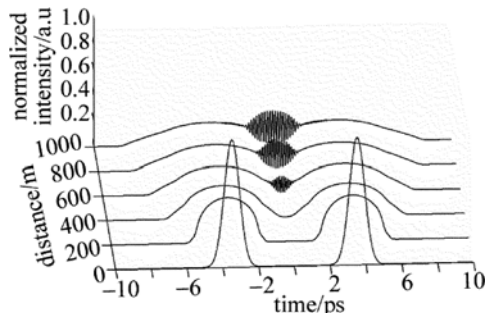


Fig. 1 Evolution of self-similar pulse-pairs in ND-DDF

为了更清楚地了解脉冲对相互作用的区域,图

2 中给出的是自相似脉冲对演化到 800m 处的时域波形图以及其对应的啁啾图。从图 2b 可以看到,在演化过程中,自相似脉冲对的啁啾主体部分仍然保持线性特性,而在两脉冲相互作用的中间区域,啁啾呈现出复杂的结构;在图 2a 时域演化图中,两脉冲交叠的部分出现了强烈的振荡,这是因为抛物线脉冲的啁啾为线性,在两个脉冲的前沿和后沿产生不同的频率差,从而在交叠区域的合成脉冲产生差拍现象,于是两自相似脉冲对的碰撞行为导致了在交叠区域形成正弦波的调制振荡,如果脉冲对在 DDF 中进一步传输的话,这种振荡行为将会使相互作用的区域波形整形为暗孤子序列。

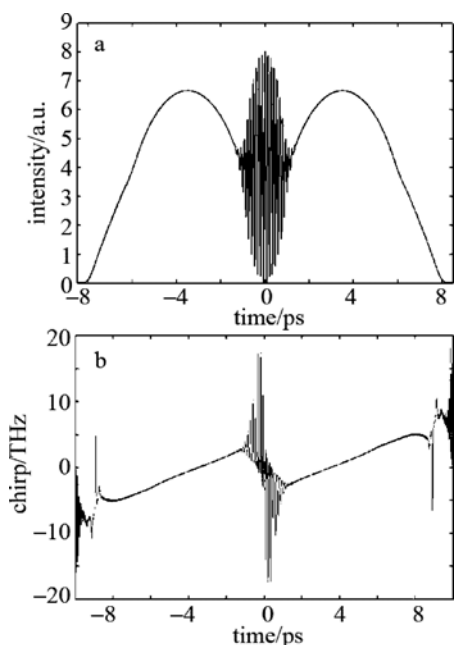


Fig. 2 a—temporal waveform b—corresponding chirp evolution of self-similar pulse-pairs at 800m

研究表明,自相似脉冲可以进行有效的压缩,从而获得高强度的峰值功率,其原因为自相似抛物线脉冲具有很强的正的线性啁啾,且几乎分布在整个脉冲之上,因而可以通过负啁啾的色散延迟线对脉冲进行压缩,从而获得质量较好的脉宽很窄的压缩脉冲。为了补偿 ND-DDF 中积累的正的 2 阶色散,通过计算选取色散延迟线中的反常色散数值为 $\beta_2 = -2.0 \times 10^{-3} \text{ps}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ 。图 3 中给出的是相互作用的脉冲对通过负的色散延迟线后,脉冲压缩后的时域演化图。由图可以看出,经过合适的色散补偿,脉冲逐渐被压缩,大约在 70m 处,两脉冲对获得最大的峰值功率;还可以看出,两脉冲对虽然在它们的交叠部分有相互振荡存在,但是几乎不影响它们的压缩,脉冲的压缩对这种对称的畸变并不敏感。

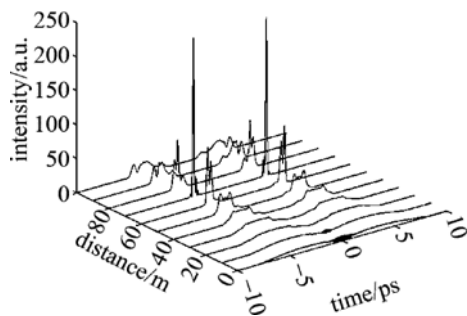


Fig. 3 The compressed process of pulse-pairs by dispersion compensation technology without TOD

同样,为了更明显地比较压缩后的脉冲,图 4 将初始输入脉冲(见曲线 1),经 ND-DDF 展宽后脉冲(见曲线 2)以及压缩后脉冲(见曲线 3)放在归一化坐标中进行比较,可以很清楚地看到,最终的脉冲被大大压缩,压缩后的脉冲为飞秒脉冲,如图中曲线 3 所示,最佳压缩处,其半峰全宽为 128.4fs,对应的压缩因子为 7.8。同时也应注意到,虽然脉冲对的压缩很理想,但是在曲线 3 中仍然存在一个很小基座,这是由于两脉冲对在交叠处的相互作用,使得一部分能量损失,并转化为基座能量。

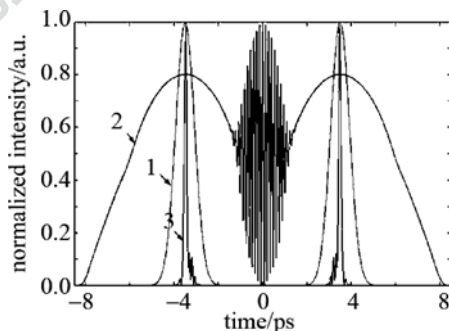


Fig. 4 Waveform of the initial pulses (curve 1), the broadening pulses (curve 2), and the compressed pulses (curve 3) when TOD is ignored

2.2 3 阶色散的情况下,自相似脉冲对的演化和压缩情形

以上阐述的是仅在 2 阶色散情况下,DDF 中自相似脉冲对的演化和压缩情况,然而在 3 阶色散存在的情况,自相似脉冲对的演化将产生畸变。考虑 TOD 时,ND-DDF 中 NLSE 形式的描述将做一个简单的修正:

$$i \frac{\partial A}{\partial z} - \frac{\beta_2}{2} D(z) \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \frac{i\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} + \gamma |A|^2 A = 0 \quad (5)$$

式中, β_3 表示 3 阶色散,在模拟当中选取 $\beta_3 = 3.0 \times 10^{-6} \text{ps}^3 \cdot \text{m}^{-1}$ 。

图5中给出的是在考虑TOD的情况下,自相似脉冲对的演化图。可以看出,脉冲的时域演化波形都产生了明显的不对称变化,脉冲传输不再精确地符合自相似传输原则,同时,对应的脉冲峰值功率将向脉冲边沿偏移,这是由于TOD引入的啁啾在整个脉冲内是非线性,从而导致脉冲啁啾线性变得不对称,偏移的方向依赖于TOD的符号, $\beta_3 > 0$ 时向前沿偏移,而 $\beta_3 < 0$ 时,则向后沿偏移。同时也可以看到,脉冲演化到一定位置时,两脉冲对相邻区域也发生了相互作用,与图1的区别是这种振荡表现为非对称性。

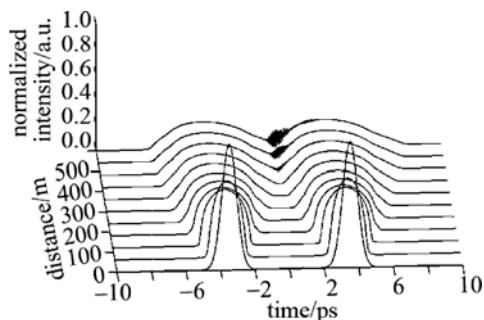


Fig. 5 Evolution of self-similar pulse-pairs in ND-DDF with TOD

接下来,研究利用色散补偿技术对脉冲对的压缩情况。在考虑TOD时,对脉冲的补偿则要复杂的多,要同时考虑群速度色散(group velocity dispersion, GVD)和TOD的补偿。令ND-DDF光纤长度为 L_1 ,色散延迟线光纤的长度为 L_2 ,则GVD和TOD同时能够被补偿的必要条件为:

$$\begin{cases} \beta_{21}L_1 + \beta_{22}L_2 = 0 \\ \beta_{31}L_1 + \beta_{32}L_2 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, β_{2j} 和 β_{3j} 分别表示光纤 L_j ($j = 1, 2$) 的GVD和TOD参量的值。由于ND-DDF色散沿光纤轴线以

$D(z) = \frac{1}{1 + g_0 z}$ 方式变化,则通过积分运算可得 $\beta_{22} = \frac{\ln(1 + g_0 L_1)}{g_0 L_2} \beta_{21}(0)$, $\beta_{32} = \frac{\beta_{31} L_1}{L_2}$, 根据前面给定的参量,可求出补偿光纤的2阶色散值为 $\beta_{22} = -0.002 \text{ ps}^2 \cdot \text{m}^{-1}$, $\beta_{32} = -0.0333 \times 10^{-3} \text{ ps}^3 \cdot \text{m}^{-1}$ 。

图6中给出的是脉冲对经过色散补偿光纤后脉冲压缩过程的演化图,可以清楚看到,随着传输距离的增加,脉冲的形状不断地在改变,在传输距离约为70m处,脉冲被压缩而获得最大的峰值功率,并达到最小的脉宽。

图7中给出的是考虑TOD时,初始脉冲对(见曲线1),经ND-DDF展宽后的脉冲对(见曲线2)和

压缩后的脉冲对(见曲线3)三者比较图形,和初始

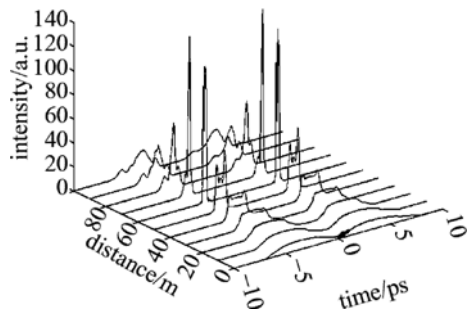


Fig. 6 The compressed process of pulse-pairs with TOD

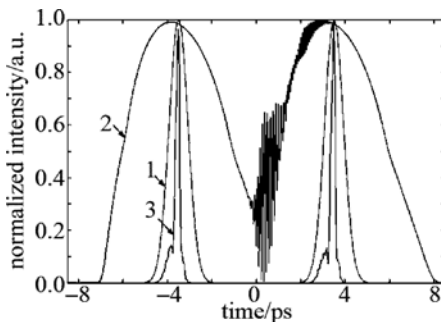


Fig. 7 Waveform of the initial pulses (curve 1), the broadening pulses (curve 2), and the compressed pulses (curve 3) when considering TOD effect

脉冲相比较,在TOD取值和脉冲畸变不太大的情况下,通过色散补偿,仍然可以获得比较理想的压缩脉冲,此时在约70m处为最佳压缩脉冲,脉宽 $T_{\text{FWHM}} = 211.6 \text{ fs}$,压缩因子为4.7。同时也能看到,与图4相比较,考虑TOD时,展宽的脉冲对(见曲线2)边缘存在强烈的非线性不对称振荡,这种不对称性振荡对脉冲对的压缩产生了一定的影响,在曲线3的底部形成一个较明显的基座。因此,在TOD存在的情况下,即使脉冲失去了精确的自相似特性,但是仍能获得高质量有效的压缩脉冲。

3 小结

研究了自相似脉冲对在色散渐减光纤中的演化和压缩的传输特性,结果表明:不考虑TOD时,脉冲对严格按照自相似展宽规则进行演化,展宽到一定程度时,仅在相邻的区域产生对称的受正弦调制的相互振荡,通过色散补偿可以得到脉宽为128.4fs、压缩因子为7.8的压缩脉冲对;而在考虑TOD时,脉冲对的演化将产生畸变,相邻区域的振荡呈现不对称性,与不考虑TOD效应相比,压缩脉冲出现较明显的基座,但仍能得到脉宽为211.6fs、压缩因子为4.7的压缩脉冲。研究结果对于理解自相似演化

特性具有一定的借鉴价值。

参 考 文 献

- [1] ZHANG Q F, WU L M, LÜ H, *et al.* Influence of stimulated Raman scattering on parabolic pulse propagation in a dispersion decreasing fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(10):2543-2546 (in Chinese).
- [2] KRUGLOV V I, PEACOCK A C, HARVEY J D, *et al.* Self-similar propagation of high-power parabolic pulses in optical fiber amplifiers[J]. *Optics Letters*, 2000, 25(24):1753-1755.
- [3] ILDAY F O, BUCKLEY J R, CLARK W G, *et al.* Self-similar evolution of parabolic pulse in a laser[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(21):213902.
- [4] LIMPET J, SCHREIBER T, CLAUSNITZER T, *et al.* High-power femtosecond Yb-doped fiber amplifier [J]. *Optics Express*, 2002, 10(14):628-638.
- [5] LÜ H, ZHANG Q F, WU X. Research of self-similar region in a dispersion-decreasing fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6):0619002 (in Chinese).
- [6] ZHANG Q F, GAO J. Distortion of parabolic pulse due to higher-order effects in a dispersion-decreasing fiber [J]. *Optik*, 2012, 123(9):823-826.
- [7] WANG X D, ZHOU Zh, LI S W, *et al.* Self-similar pulse evolution in ytterbium doped fiber amplifiers [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(1):8-12 (in Chinese).
- [8] ZHANG S, ZHAO G, LUO A, *et al.* Third-order dispersion role on parabolic pulse propagation in dispersion-decreasing fiber with normal group-velocity dispersion [J]. *Applied Physics*, 2009, B94(2):227-232.
- [9] FINOT C, MILLOT G, Interaction between optical parabolic pulses in a Raman fiber amplifier [J]. *Optics Express*, 2005, 13(15):5825-5830.
- [10] LIU Y L, LUO A P, LUO Zh CH, *et al.* Suppression of parabolic pulse-pair interaction using dispersion managed fiber links with non-zero dispersion [J]. *Journal of Modern Optics*, 2011, 58(12):1004-1011.
- [11] FINOT C, BARVIAU B, MILLOT G, *et al.* Parabolic pulse generation with active or passive dispersion decreasing optical fibers [J]. *Optics Express*, 2007, 15(24):15824-15835.