

色散渐减光纤中自相似脉冲传输区域的研究

吕 华¹ 张巧芬² 吴 肖¹

(¹ 广东工业大学实验教学部, 广东 广州 510006)
(² 广东工业大学信息工程学院, 广东 广州 510006)

摘要 从非线性薛定谔(NLS)方程出发,用分步傅里叶方法结合对数值解的波形分析,确定了色散渐减光纤(DDF)中能实现自相似脉冲传输的区域,并研究了初始脉冲和光纤参数对自相似区域和演化速度的影响。结果表明,初始脉冲能量的减小有利于扩宽自相似区域,但会使自相似演化进程略为减慢;初始脉宽有一个最佳值,在最佳值上自相似区域最宽,演化较快且输出脉冲和啁啾较为稳定;高斯脉冲比双曲正割脉冲更快转化为自相似脉冲,传输区域也更广。选择具有较小非线性参量的 DDF 可以获得较广的自相似区域,同时非线性参量的增大可以加快自相似演化,而群速度色散参量和增益系数必须选择在最佳值附近,才能获得最大自相似区域和最快演化速度。

关键词 非线性光学;自相似区域;分步傅里叶方法;色散渐减光纤;非线性薛定谔方程

中图分类号 O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0619002

Research of Self-Similar Region in a Dispersion-Decreasing Fiber

Lü Hua¹ Zhang Qiaofen² Wu Xiao¹

(¹ *Experimental Teaching Center, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China*)
(² *Information Engineering College, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China*)

Abstract Based on nonlinear Schrodinger (NLS) equation, self-similar region in which pulses can propagate with a parabolic intensity profile in dispersion-decreasing fiber (DDF) is established by split-step Fourier method and waveform analysis, influences of initial pulse and fiber parameters on self-similar region and the speed of evolution are also investigated. Results show that reduction of initial pulse energy can expand self-similar region but slow down the self-similar evolution. Initial pulse width has an optimum value with the widest self-similar region and relatively high evolution speed. Input pulses with Gaussian profile have a faster evolution speed and a wider self-similar region than those with hyperbolic secant profile. To get an extensive region for self-similar propagation, a DDF with smaller nonlinearity parameter can be used, and the increase of nonlinearity parameter can speed up self-similar evolution. In addition, group-velocity dispersion parameter and gain coefficient should be set at its optimum value to get the largest self-similar region and the fastest evolution speed.

Key words nonlinear optics; self-similar region; split-step Fourier method; dispersion-decreasing fiber; nonlinear Schrodinger equation

OCIS codes 190.4370; 060.2310; 060.4370; 320.5520

1 引 言

在正色散增益光纤或光纤放大器中,任何输入脉冲都会演化成能量被显著放大、具有严格线性啁啾且时域形状渐近演变为抛物形的一类脉冲^[1],这类脉冲被称为自相似光脉冲,其特性只与初始脉冲的能量和光纤参数有关,与入射脉冲的形状和宽度

无关^[1,2]。和光孤子在高功率下易产生分裂的特性相比,自相似脉冲很好地解决了在光纤中传输时能量受限的问题,在高功率传输时,自相似脉冲能保持其形状不变并具有抵御光波分裂的能力^[3]。同时,其严格的线性啁啾有利于实现高效的脉冲压缩,获得高能量、无光波分裂的飞秒级超短脉冲^[4~6]。研

收稿日期: 2011-11-30; 收到修改稿日期: 2012-02-02

基金项目: 广东工业大学青年基金(112012)资助课题。

作者简介: 吕 华(1979—),女,硕士,讲师,主要从事非线性光学方面的研究。E-mail: rabhle@yahoo.cn

究表明,自相似脉冲序列具有稳定的传输特性^[7~9],且自相似技术中使用的光学组件非常简单,在市场上有广泛的供应。鉴于这些优良的特性,自相似脉冲的应用非常广泛,包括自相似脉冲光纤激光器^[10]、高功率超短脉冲的产生^[4~6,11,12]、光脉冲合成^[13]、用于电信系统的自相似脉冲序列的再生^[14]等。这些关于自相似脉冲的理论和实验研究已经成为近年来光纤光学领域倍受关注的课题,各种研究成果层出不穷。

国内外关于光纤放大器的研究较为成熟,自从 Fermann 等^[1]首次提出在正常色散区工作的光纤放大器中可以实现抛物形自相似脉冲传输以来,稀土元素掺杂光纤放大器和拉曼光纤放大器中脉冲的传输特性及其应用都得到了广泛研究^[15~20]。但在光纤通信领域,在没有充足的稀土掺杂物或抽运源时,无增益源的被动放大方式显得尤为重要。研究表明,基于色散渐减的非线性薛定谔(NLS)方程可以转化成具有恒定色散和增益的 NLS 方程,因此,利用色散渐减光纤(DDF)的被动绝热放大对自相似激光脉冲同步进行放大和压缩,可以产生光纤通信所需要的高功率、高能量和高质量稳定的自相似超短脉冲序列^[11,20~22]。2011 年, Kruglov 等^[22]提出了在正色散光纤放大器和 DDF 中三色散(TOD)导致自相似脉冲裂化的理论,并首次界定了 TOD 导致脉冲分裂的距离,在此有效传输距离内,脉冲维持准抛物形状传输。在 Kruglov 工作的基础上,本文

研究了 DDF 中自相似脉冲的低阶传输特性,指出在忽略高阶色散和高阶非线性基础上,自相似脉冲传输同样只在一定区域内有效,超过有效传输区域时,非线性效应会导致输出脉冲发生扭曲和振荡;应用分步傅里叶方法进行数值模拟,确定了初始脉冲及光纤参数对自相似脉冲有效传输区域的影响,为合理选择初始脉冲和光纤长度、优化光纤参数以输出优质自相似脉冲提供理论指导。

2 低阶近似条件下 DDF 中自相似脉冲的形成和传输特性

当忽略高阶色散和高阶非线性效应时,光脉冲在不计损耗的 DDF 中传输的 NLS 方程为

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

式中 $\psi(z, T)$ 为脉冲包络的慢变振幅, T 为随脉冲以群速度 v_g 移动的参考系中的时间量度 ($T = t - z/v_g$), β_2 是 $z = 0$ 处的群速度色散参量, γ 为非线性参量, $D(z)$ 为色散纵向变化参数,归一化为 $D(0) = 1$ 。这里采用色散为双曲型递减的光纤:

$$D(z) = 1/(1 + g_0 z), \quad (2)$$

式中 g_0 是增益系数。(1)式可以转化成有增益的 NLS 方程,其解是一个具有抛物线强度包络的自相似渐近解^[11]

$$\psi(z, T) = \begin{cases} \sqrt{P(z)} \left\{ 1 - \left[\frac{T}{\tau(z)} \right]^2 \right\}^{1/2} \exp[i\varphi(z, T)], & |T| \leq \tau(z), z \rightarrow \infty \\ 0, & |T| > \tau(z), z \rightarrow \infty \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{式中 } P(z) = \frac{E_0^{2/3}}{4} \left[\frac{2g_0^2}{\gamma\beta_2(1+g_0z)} \right]^{1/3}, \tau(z) = 3E_0^{1/3} \left[\frac{\gamma\beta_2(1+g_0z)}{2g_0^2} \right]^{1/3}, \varphi(z, T) = \varphi_0 + \frac{3\gamma E_0^2}{2g_0} \exp\left(\frac{2}{3}g_0z\right) -$$

$\frac{g_0}{6\beta_2} T^2$, 其中 E_0 为初始脉冲能量。

脉冲的线性啁啾形式为

$$\partial \omega(T) = -\frac{\partial \varphi}{\partial T} = \frac{g_0}{3\beta_2} T. \quad (4)$$

此种自相似抛物形脉冲的典型特征是在对数坐标下具有陡峭的脉冲边缘。当传输距离有限时(中间渐近演化区),脉冲具有指数衰减形状的低振幅边翼;随着演化距离的增大,脉冲演化逐渐完全,指数边翼的振幅减小直至消失;达到完全演化时,在对数坐标下的脉冲两边垂直下降,近似于方形脉冲。利用这些特征,可以判断出脉冲什么时候进入抛物区。一

般认为,在对数坐标下当脉冲边缘的垂直度超过 10 个数量级,脉冲已经较好地实现了自相似演化^[16]。

光纤放大器中自相似脉冲的演化特性及其中间渐近演化区已经进行了较多的研究^[15,16,19,23]。Fermann 等^[1]考虑了低阶近似即忽略高阶色散和高阶非线性时自相似脉冲的传输特性,指出在光纤放大器中,只要经过充分的距离传输,任何入射脉冲都会演变为抛物形的相似子,它在放大过程中保持形状不变,具有良好的线性啁啾,且可以实现较长距离的无波分裂传输。Kruglov 等^[22]进一步讨论了

TOD对自相似脉冲传输的影响,提出了 TOD会在一定距离上导致脉冲裂化,并对自相似脉冲传输的长度区域进行了界定。在此基础上,本文用数值方法研究了低阶近似下自相似脉冲在 DDF 中形成和传输的区域特性。图 1 表示了高斯脉冲输入 DDF,在不同传输距离时输出脉冲波形和啁啾的演化情况。图 1 中从左至右依次为输出脉冲波形的数值解(实线)和解析解(虚线)的比较,对数坐标下的脉冲波形,啁啾的数值解(实线)和解析解(虚线)的比较。所选取的 DDF 在 $z=0$ 时, $\beta_2 = 1.25 \text{ ps}^2/\text{km}$, $\gamma = 3.33 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$, 增益系数 $g_0 = 28 \text{ km}^{-1}$; 输入高斯脉冲能量 $E_0 = 40 \text{ pJ}$, 脉宽 $T_0 = 0.8 \text{ ps}$, 图 1(a)~(c)对应的传输距离分别为 0.5 、 5.2 、 11 km 。可以看到,图 1(a)中自相似脉冲演化不完全,数值解和解析解符合程度较低,对数图中脉冲边缘垂直度尚未达到 10 个数量级,线性啁啾范围较窄;图 1(b)中,输出脉冲的数值解和解析解有很好的符合度,相应的对数坐标图上脉冲形状出现明显的边缘垂直现

象,垂直度接近于 20 个数量级,且在整个脉冲范围内具有良好的线性啁啾,表明了输出脉冲的自相似特征;图 1(c)中输出脉冲和啁啾出现了明显的振荡。可见,即使在低阶近似下,脉冲也并不像所预期的,在演化距离增大时保持抛物包络自相似脉冲传输,而是当距离增大到一定程度时,输出脉冲或啁啾出现振荡和扭曲,无法继续实现自相似脉冲传输。图 2 更精确地展示了图 1 中对应的输出脉冲(线性坐标和对数坐标)和啁啾的渐进演化过程,图中从左至右对应的传输距离依次为 0.5 、 2 、 4 、 5.2 、 7 、 9 、 11 km ,各线型的定义同图 1。可以看出输出脉冲从带指数衰减边翼的中间渐近波形逐渐过渡到边缘垂直度明显的自相似脉冲,再到产生明显振荡的非稳定波形。说明即使忽略高阶效应,自相似脉冲的传输也有一定的区域范围。从完成自相似演化到脉冲出现振荡前的这一区域,为有效的自相似脉冲传输区域,或简称自相似区域。

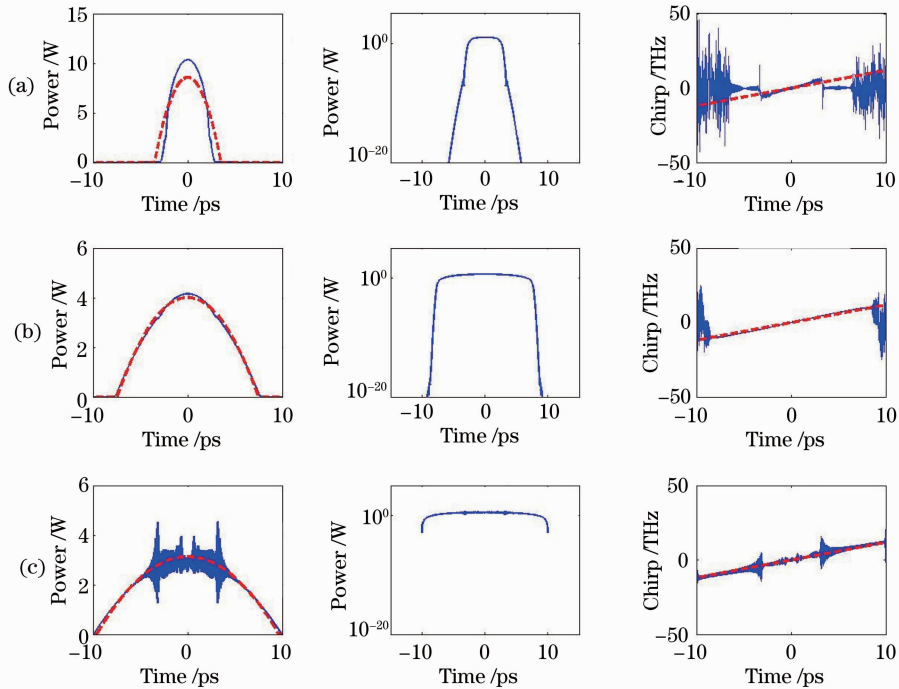


图 1 高斯脉冲在 DDF 中传输距离分别为(a) $z=0.5 \text{ km}$, (b) $z=5.2 \text{ km}$, (c) $z=11 \text{ km}$ 时输出的脉冲波形和啁啾

Fig. 1 Intensities and chirps at (a) $z=0.5 \text{ km}$, (b) $z=5.2 \text{ km}$ and (c) $z=11 \text{ km}$ in DDF with input Gaussian pulse

从孤子数角度可以定性解释观察到的自相似演化现象。图 3 为孤子数 $N(z)$ 在 DDF 中传输时随距离的变化关系,其中孤子数 $N(z) = \sqrt{L_D(z)/L_{NL}(z)}$, $L_D(z) = T_0^2(z)/|\beta_2(z)|$ 和 $L_{NL}(z) = 1/\gamma P_0(z)$ 分别为在不同传输距离上的色散长度和非线性长度。可见,孤子数随着传输距离的增大而增大。在脉冲传输的初

始阶段, $N(z)$ 较小,群速度色散(GVD)起主要作用,自相位调制(SPM)的大小不足以完成自相似演化,脉冲从输入时的高斯形逐步过渡到有明显指数衰减边翼的中间渐近波形,线性啁啾只在中间抛物区有效,边翼区的啁啾呈非线性变化;随着 $N(z)$ 的增大,SPM 的影响增大,当距离增大至 SPM 和

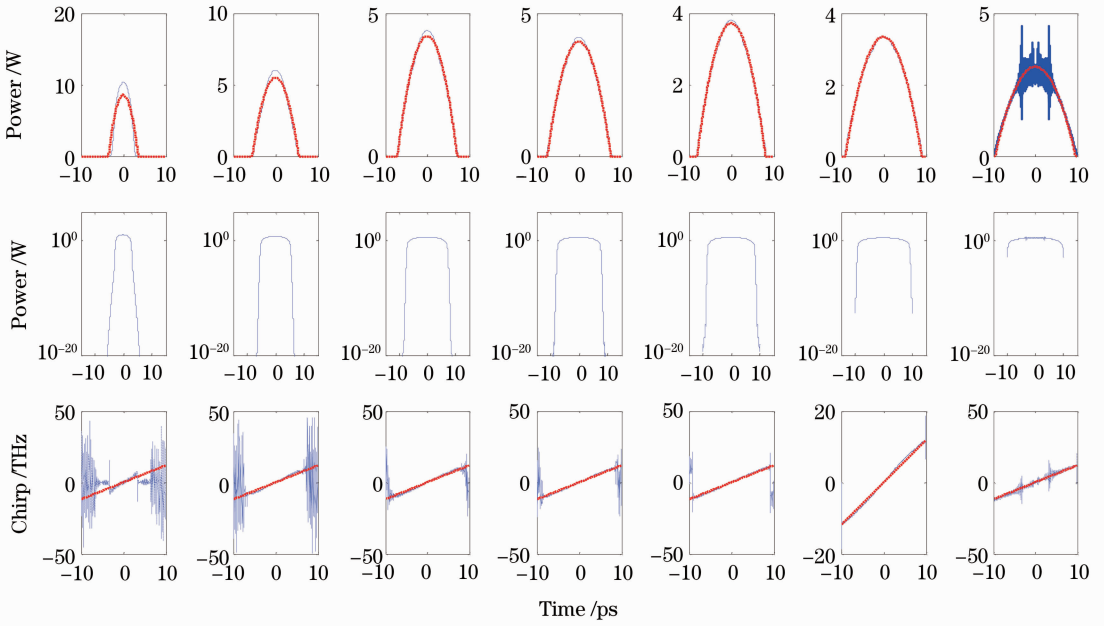


图 2 图 1 对应的输出脉冲和啁啾演化过程(传输距离从 0.5~11.0 km)

Fig. 2 Evolutions of output intensities and chirps from $z=0.5$ km to 11.0 km corresponding to Fig. 1

GVD 满足一定比例时,SPM 产生的非线性啁啾在整个脉冲范围内被正常 GVD 线性化,自相似脉冲演化完全,线性啁啾扩展至整个脉冲范围;当距离继续增大, $N(z)$ 的增大导致非线性效应处于主导地位,这时脉冲和啁啾出现严重扭曲和振荡,脱离自相似区域。若自相似演化进程过慢或非线性效应过大,输入脉冲尚未演化成抛物脉冲便进入非线性振荡区域,导致无法形成良好的自相似脉冲。可见,在自相似脉冲产生的过程中,应满足光纤长度 $L \geq L_D > L_{NL}$,且只有当 GVD 和 SPM 满足一定的比例关系时,才易于产生自相似脉冲。数值模拟表明,当这种比例使得孤子数在几十到几百量级内,较易产生自相似脉冲。

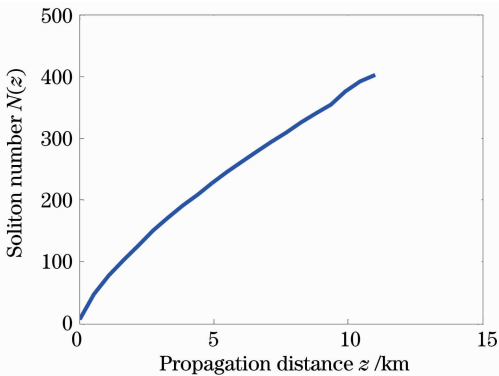


图 3 孤子数在 DDF 中随传输距离的变化

Fig. 3 Evolution of soliton number as a function of propagation distance in DDF

3 关于自相似脉冲传输区域的研究

为了取得良好的自相似脉冲,有必要确定自相似演化较为完全且脉冲尚未产生非线性振荡的自相似脉冲传输区域。首先认为输出脉冲与自相似抛物脉冲形状符合良好,对数坐标下输出脉冲的边缘垂直度超过 10 个数量级,且输出脉冲和啁啾不产生振荡的区域为良好的自相似脉冲传输区域。为了描述输出脉冲和自相似抛物脉冲的符合程度,引入自相似符合因子^[24]

$$C = \frac{\sup_{-\infty < z < \infty} \left| \int_{-\infty}^{\infty} [|\psi(z, T)|^2 - |\hat{\psi}(z, T)|^2] dT \right|}{\sup_{-\infty < z < \infty} \int_{-\infty}^{\infty} |\hat{\psi}(z, T)|^2 dT}, \quad (5)$$

式中 $\psi(z, T)$ 为输出脉冲的数值解, $\hat{\psi}(z, T)$ 为自相似抛物脉冲渐近解。 C 越小,输出脉冲形状越接近于自相似脉冲。大量的数值模拟表明,当 $C \leq 15\%$ 时,输出脉冲具有明显的自相似抛物脉冲特征,自相似演化完成,同时输出脉冲无明显振荡。类似地,用啁啾符合因子表征输出啁啾和理论啁啾的符合程度

$$F = \frac{\sup_{-\infty < z < \infty} \left| \int_{-\infty}^{\infty} [|\delta(z, T)|^2 - |\hat{\delta}(z, T)|^2] dT \right|}{\sup_{-\infty < z < \infty} \int_{-\infty}^{\infty} |\hat{\delta}(z, T)|^2 dT}, \quad (6)$$

式中 $\delta(z, T)$ 为输出啁啾的数值解, $\hat{\delta}(z, T)$ 为理论啁啾 $\hat{\delta}(T) = -\frac{1}{2\pi} \frac{\partial \phi}{\partial T} = \frac{1}{2\pi} \frac{g_0}{3\beta_2} T$, 当 $F \leq 15\%$ 时, 输出啁啾与理论线性啁啾符合度良好且无明显振荡。利用以上分析, 可以用分步傅里叶数值算法结合对数值解的波形进行观察分析, 得出 DDF 中能实现自相似脉冲传输的区域范围。

3.1 初始脉冲参数对自相似脉冲传输区域的影响

以高斯脉冲输入正色散 DDF 为例, 分别研究了初始脉冲的能量和脉宽对自相似脉冲传输区域的影响。图 4(a) 描述了自相似区域和初始脉冲能量的

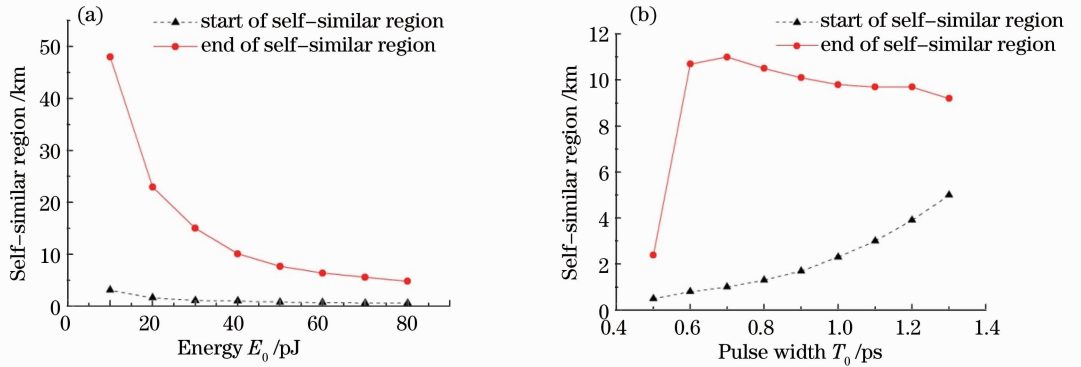


图 4 初始脉冲的参数对自相似区域的影响。(a) 初始脉冲能量的影响; (b) 初始脉宽的影响

Fig. 4 Influence of initial pulse parameters on self-similar region. (a) Influence of initial pulse energy; (b) influence of initial pulse width

图 4(b) 则描述了初始脉宽对自相似区域的影响, 所选取的 DDF 参数和图 4(a) 相同, 输入高斯脉冲能量 $E_0 = 40$ pJ, 初始脉宽 T_0 从 0.5 ps 变化到 1.3 ps。可见, T_0 过小或者过大都会使自相似区域缩小。数值模拟表明, 在 $T_0 = 0.9 \sim 1.3$ ps 范围内, 尽管在自相似区域内输出脉冲和自相似抛物脉冲有较好的符合度, 但在演化距离增大时啁啾很快出现振荡, 自相似区域会变得狭小, 不利于产生自相似脉冲。在自相似区域以外, 甚至根本无法产生自相似脉冲。 T_0 和自相似演化区域的关系可以定性解释如下: T_0 的变化能改变孤子数 $N(z)$ 即色散长度和非线性长度的对比关系, 从而决定自相似脉冲能否在某一距离上产生。当 T_0 很小时, $N(z)$ 很小, 脉冲主要受 GVD 影响, 非线性效应过小, 不足以产生自相似脉冲; 当 T_0 增大至 GVD 和 SPM 满足合适的比例关系, 两者共同作用产生演化良好的自相似脉冲, 在自相似区域内对数坐标下输出脉冲波形的垂直度均超过 10 个数量级; 当 T_0 继续增大, GVD 的减小使 SPM 的影响处于主要地位, 当这种非线性效应影响过大时, 输出脉冲、啁啾及频谱出现扭曲和振荡, 无法产生自相似脉冲。

自相似区域的下限表征了高斯脉冲演化为自相似

关系, 所选取的 DDF 在 $z=0$ 时, $\beta_2 = 1.25$ ps²/km, $\gamma = 3.33$ W⁻¹km⁻¹, 增益系数 $g_0 = 28$ km⁻¹; 输入高斯脉冲脉宽 $T_0 = 0.7$ ps, 能量 E_0 从 10 pJ 变化到 80 pJ。可见, 自相似区域随着 E_0 的增大而缩小, 这是因为当 E_0 增大时非线性效应的影响增大, 初始孤子数更大, 使得输入脉冲更快转化为自相似脉冲, 更快产生非线性振荡而脱离自相似区域。因此, E_0 的增大有利于加快自相似脉冲的演化进程, 但不利于扩宽自相似区域。

抛物脉冲的最小距离, 下限越小, 说明自相似演化进程越快。从图 4(a) 可以看到, 输入脉冲能量的增大可以略微加快自相似演化进程, 但由于自相似区域迅速减小, 较大的能量并不利于在大范围内取得良好的自相似脉冲; 而图 4(b) 表明, 初始脉宽的减小有利于加快自相似演化进程。较为有意义的结果是, 尽管在 $T_0 = 0.5 \sim 1.3$ ps 范围内, 脉冲都能在一定区域内完成自相似演化, 但最佳的初始脉冲宽度取值应在 $T_0 = 0.6 \sim 0.8$ ps 之间, 这时自相似脉冲传输区域最宽, 输出脉冲和啁啾最稳定, 不易于产生非线性振荡, 可利用的自相似区域能达到 10 km 左右; 且高斯脉冲能较快完成自相似演化, 最小演化距离在 0.8~1.3 km 之间。

当输入 DDF 的初始脉冲能量相同, 但时域形状不同时, 自相似脉冲演化的快慢和自相似脉冲形成的区域也会有所差异。图 5 表示了不同形状初始脉冲输入时自相似区域受初始脉冲能量的影响, 所选取的 DDF 参数和图 4 相同, 初始脉冲分别为高斯脉冲和双曲正割脉冲, 初始脉宽 $T_0 = 0.7$ ps, 脉冲能量 E_0 从 10 pJ 变化到 80 pJ。可以看到, 初始脉冲为高斯脉冲时, 自相似区域更大, 自相似演化进程更快; 而双曲正割输入时自相似区域明显缩小, 在 E_0

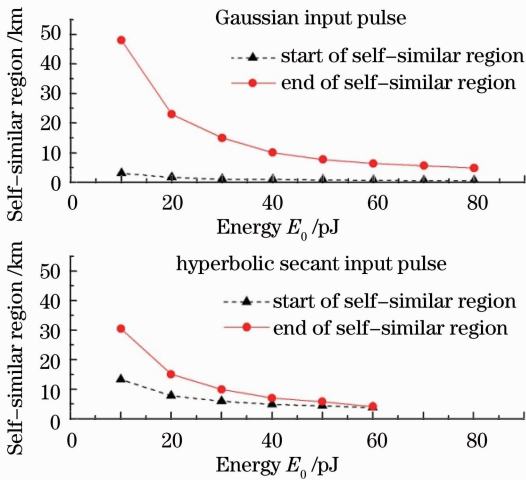


图 5 输入不同形状的初始脉冲对自相似区域的影响

Fig. 5 Influence of input pulse with different profiles on self-similar region

超过 60 pJ 时无法产生自相似抛物脉冲。

3.2 光纤参数对自相似脉冲传输区域的影响

DDF 的参数同样会改变 GVD 和 SPM 的对比关系,从而对自相似脉冲传输区域和自相似脉冲的演化速度产生影响。图 6(a)表示了群速度色散参

量对自相似区域的影响。其中 DDF 在 $z=0$ 时 β_2 取值从 $0.5 \text{ ps}^2/\text{km}$ 变化到 $2.75 \text{ ps}^2/\text{km}$,其他光纤参数和图 4(a) 相同。输入高斯脉冲能量和初始脉宽分别为 $E_0=10 \text{ pJ}$ 和 $T_0=0.7 \text{ ps}$ 。由于 β_2 和 T_0 是制约色散长度的两个因素,从而对 GVD 和 SPM 的相对比例产生影响,故图 6(a)具有和图 4(b)相似的趋势,只有合适的 β_2 值才能使抛物相似子易于生成并在较长距离内稳定无振荡传输。 β_2 最佳取值为 $1.25 \text{ ps}^2/\text{km}$,在最佳值上自相似脉冲演化最快且能在最大距离内维持抛物形状稳定传输。

非线性参量对自相似区域的影响则如图 6(b)所示,其中 $\beta_2=1.25 \text{ ps}^2/\text{km}$, γ 从 $1 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 变化到 $10 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$,其他光纤参数和输入高斯脉冲参数同图 6(a)。可知,随着 γ 的增大,SPM 的影响增大,输出脉冲更快进入自相似演化区域,而非线性效应的增大也使输出脉冲和啁啾更早出现扭曲和振荡,所以自相似区域提前结束。因此随着 γ 的增大,自相似区域范围减小。这一趋势和图 4(a)类似,因为 E_0 和 γ 决定了非线性长度进而对孤子数 N 产生相似的影响。

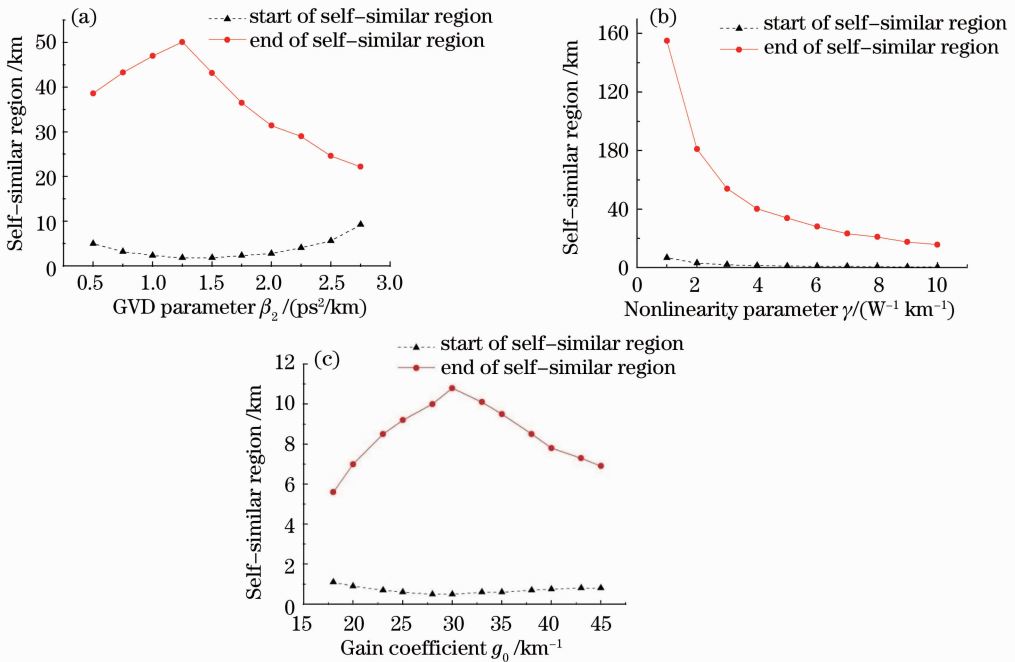


图 6 光纤参数对自相似区域的影响。(a)群速度色散参量的影响;(b)非线性参量的影响;(c)增益系数的影响

Fig. 6 Influence of fiber parameters on self-similar region. (a) Influence of group-velocity dispersion parameter; (b) influence of nonlinearity parameter; (c) influence of gain coefficient

图 6(c)表示增益系数 g_0 在 $18 \sim 45 \text{ km}^{-1}$ 之间取值时自相似区域随 g_0 的变化关系曲线。输入高斯脉冲能量为 40 pJ ,其他光纤参数和初始脉冲参数同图 4(a)。 g_0 的变化直接影响 β_2 的大小 [$\beta_2(z) =$

$D(z)\beta_2(z=0) = \beta_2(z=0)/(1+g_0z)$],故图 6(c)的趋势和图 6(a)相同, g_0 存在最佳值 $g_0=30 \text{ km}^{-1}$,在这个值上自相似区域最大,脉冲也更早地进入自相似区域。

4 结 论

从 NLS 方程出发,采用分步傅里叶算法结合对数值解波形的研究分析,研究了在正色散 DDF 中,输出脉冲与自相似抛物脉冲符合良好、对数坐标下输出脉冲的边缘垂直度超过 10 个数量级、且输出脉冲和啁啾不产生振荡的自相似区域受初始脉冲和光纤参数的影响。研究结果表明,对于不同的初始脉冲参数,初始脉冲能量 E_0 的增大会导致自相似区域迅速缩小,但能略微加快自相似演化进程;初始脉宽 T_0 的减小有利于加速自相似演化,但 T_0 过小或过大都会缩小自相似区域甚至使自相似脉冲难以产生。在文中的 DDF 和初始脉冲参数下,最佳的 T_0 值在 0.6~0.8 ps 之间,这时自相似脉冲传输区域最宽,脉冲波形和啁啾最稳定,且能较快完成自相似演化;初始脉冲为高斯脉冲相对于双曲正割脉冲能取得更宽的自相似区域和更快的演化进程。另一方面,对于不同的 DDF 参数,较小的非线性参量 γ 有利于扩宽自相似区域,但会使自相似演化进程减慢;过大或过小的群速度色散参量 β_2 和增益系数 g_0 都会缩小自相似区域,在文中参数下,获得最大自相似区域和最快演化的最佳值为 $\beta_2 = 1.25 \text{ ps}^2/\text{km}$, $g_0 = 30 \text{ km}^{-1}$ 。对这些影响自相似区域的参量进行分析,得出结论,要获得较宽的自相似区域,应该选择 E_0 较小, T_0 在最佳值附近的高斯脉冲作为初始脉冲;光纤则应选取具有较小 γ 和最佳 β_2 及 g_0 的 DDF。整个研究对于合理选择 DDF 参数和初始输入脉冲来产生优质自相似脉冲,以及扩大自相似脉冲的传输范围,具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- 1 M. E. Fermann, V. I. Kruglov, B. C. Thomsen *et al.*. Self-similar propagation and amplification of parabolic pulses in optical fibers [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**(26): 6010~6013
- 2 C. Finot, G. Millot, J. M. Dudley. Asymptotic characteristics of parabolic similariton pulses in optical fiber amplifiers [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(21): 2533~2535
- 3 D. Anderson, M. Desaix, M. Karlson *et al.*. Wave-breaking-free pulses in nonlinear optical fibers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1993, **10**(7): 1185~1190
- 4 J. Limpert, T. Schreiber, T. Clausnitzer *et al.*. High-power femtosecond Yb-doped fiber amplifier [J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(14): 628~638
- 5 A. Malinowski, A. Piper, J. H. V. Price *et al.*. Ultrashort-pulse Yb³⁺-fiber-based laser and amplifier system producing > 25 W average power [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(17): 2073~2075
- 6 C. Billet, J. M. Dudley, N. Joly *et al.*. Intermediate asymptotic evolution and photonic bandgap fiber compression of optical similaritons around 1550 nm [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(9): 3236~3241
- 7 C. Finot, G. Millot. Interaction between optical parabolic pulses

- in a Raman fiber amplifier [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(15): 5825~5830
- 8 C. Finot, G. Millot. Collisions between similaritons in optical fiber amplifiers [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(19): 7653~7665
- 9 C. Finot, J. M. Dudley, G. Millot. Generation of dark solitons by interaction between similaritons in Raman fiber amplifiers [J]. *Optical Fiber Technology*, 2006, **92**(21): 217~226
- 10 F. O. Ilday, J. R. Buckley, W. G. Clark *et al.*. Self-similar evolution of parabolic pulse in a laser [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**(21): 213902
- 11 T. Hirooka, M. Nakazawa. Parabolic pulse generation by use of a dispersion-decreasing fiber with normal group-velocity dispersion [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(5): 498~500
- 12 Liu Yanli, Luo Aiping, Luo Zhichao *et al.*. A method of compression of parabolic self-similar pulses based on fiber link consisting of two segments of fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0519002
- 刘艳丽, 罗爱平, 罗智超等. 一种基于两段光纤链路的抛物自相似脉冲压缩方法 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(5): 0519002
- 13 C. Finot, G. Millot. Synthesis of optical pulses by use of similaritons [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(21): 5104~5109
- 14 C. Finot, S. Pitois, G. Millot. Regenerative 40 Gb/s wavelength converter based on similariton generation [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(14): 1776~1778
- 15 V. I. Kruglov, A. C. Peacock, J. D. Harvey *et al.*. Self-similar propagation of high-power parabolic pulses in optical fiber amplifiers [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(24): 1753~1755
- 16 V. I. Kruglov, A. C. Peacock, J. D. Harvey *et al.*. Self-similar propagation of parabolic pulses in normal-dispersion fiber amplifiers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(3): 461~469
- 17 V. I. Kruglov, A. C. Peacock, J. D. Harvey. Exact self-similar solutions of the generalized nonlinear Schrodinger equation with distributed coefficients [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **90**(11): 113902
- 18 C. Finot, G. Millot. Experimental generation of parabolic pulses via Raman amplification in optical fiber [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(13): 1547~1552
- 19 Xu Dangpeng, Wang Jianjun, Lin Honghuan *et al.*. Self-similar propagation and amplification of high-power pulses in large mode area ytterbium doped fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 2994~2999
- 许党朋, 王建军, 林宏免等. 高功率脉冲在大模场掺 Yb³⁺ 光纤中的自相似传输放大特性 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 2994~2999
- 20 Zhang Qiaofen, Xu Wencheng, 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
- 21 Zhang Qiaofen, Gao Jian. Generation of excellent self-similar pulse in a dispersion-decreasing fiber [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2011, **122**(19): 1753~1756
- 22 V. I. Kruglov, C. Agueraray, J. D. Harvey. Propagation and breakup of pulses in fiber amplifiers and dispersion-decreasing fibers with third-order dispersion [J]. *Phys. Rev. A*, 2011, **84**(2): 023823
- 23 Tu Chenghou, Lei Ting, Li Yongnan *et al.*. Ultra-short pulses self-similar evolution conditions in normal dispersive fiber amplifiers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1512~1516
- 涂成厚, 雷霆, 李勇男等. 正常色散光纤放大器中超短脉冲的自相似演化条件 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(11): 1512~1516
- 24 Li Liping, Zhang Ailing. Study on parabolic self-similar pulse generation in a nonlinearity increasing fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0805006
- 李莉苹, 张爱玲. 基于非线性渐增原理获得抛物线型自相似脉冲的研究 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0805006