

基于 DDF 的光脉冲绝热压缩和高阶孤子压缩

吴再华¹, 周晓萍², 尹立贤¹

(1. 湖南信息职业技术学院, 湖南长沙 410200; 2. 湖南长沙理工大学, 湖南长沙 410000)

摘要:采用分步傅里叶数值计算方法研究了不同光纤长度、不同色散剖面曲线的色散渐减光纤(DDF)中光脉冲压缩的规律,最后以线性 DDF 为例,研究了光纤长度和孤子阶数对 DDF 中高阶孤子压缩性能的影响。数值计算结果表明,基于 DDF 的光脉冲压缩可以获得低脉座和无频率啁啾的高质量超短光脉冲。特别地给出了光纤长度和色散剖面对脉冲压缩性能如压缩比、峰值功率和脉座等的影响,对 DDF 光脉冲压缩有实际的指导意义。

关键词:色散渐减光纤;光孤子;光脉冲压缩;压缩因子;脉座能量

中图分类号:TN929.11 **文献标识码:**A

The Adiabatic Compression and Higher-order Soliton Compression in DDF

WU Zai-hua¹, ZHOU Xiao-ping², YIN Li-xian¹

(1. Hu'nan College of Information, Changsha 410200, China; 2. Changsha University of Science & Technology, Changsha 410000, China)

Abstract: By split-step Fourier method, the optical pulse compression in DDF was simulated and analyzed, in case of different fiber length and dispersion profile curve. The effect of the high-order soliton compression in linear DDF was detailed, either the fiber length or the soliton order. It shows that high-quality ultra-short optical pulses with little pedestal energy and low frequency chirp can be provided, particularly, several factors mentioned above which has important influence to the pulse compression properties, such as compression ratio, peak power and pulse pedestal energy was considered. These conclusions will be a practical guide of the optical pulse compression in DDF.

Key words: DDF; optical soliton; optical pulse compression; compression factor; pedestal energy

1 引言

对现有光源提供的宽脉冲进行压缩和整形,以获取超短光脉冲是实现现代高速、大容量通信系统的关键技术。常规光纤中高阶孤子压缩所得到的压缩脉冲质量往往不能满足要求。应用基于色散渐减光纤(DDF)的光脉冲绝热压缩技术可以避免在光纤中过早地形成高阶孤子从而将能量转移到脉冲的两翼,较好地消除脉座,达到改善压缩脉冲质量的目的^[1-4]。绝热孤子压缩技术一般仅对脉宽小于 5ps 的脉冲是有效的。

2 DDF 绝热孤子压缩的理论模型

在考虑光纤损耗以及高阶效应的情况下,DDF 中的绝热孤子压缩过程可以用广义非线性薛定谔方程(NLS)描述^[5]:

$$\begin{aligned} & i \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{1}{2} p(\xi) \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + |u|^2 u + i \Gamma u \\ & = i \delta \frac{\partial^3 u}{\partial \tau^3} - i s \frac{\partial}{\partial \tau} (|u|^2 u) + \tau_R u \frac{\partial |u|^2}{\partial \tau} \end{aligned} \quad (1)$$

其中,

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{z |\beta_2(0)|}{T_0^2}, \tau = \frac{t - z/v_g}{T_0}, p(\xi) = \left| \frac{\beta_2(\xi)}{\beta_2(0)} \right|, \\ \delta &= \frac{\beta_3}{6 |\beta_2(0)| T_0}, s = \frac{2}{\omega_0 T_0}, \tau_R = \frac{T_R}{T_0}, \\ \Gamma &= \frac{\alpha}{2} \frac{T_0^2}{|\beta_2(0)|} \end{aligned} \quad (2)$$

作者简介:吴再华(1971-),男,讲师,工学硕士,研究方向为非线性光纤光学,信号与信息处理等。E-mail:wuzaihua@126.com
收稿日期:2007-08-14

式中, $\xi, \tau, u(\xi, \tau)$ 分别表示归一化距离、时间和脉冲包络复振幅; $\beta_2(0)$ 为 DDF 输入端初始 GVD 系数; β_3 为 TOD 系数(一般情况下 β_3 沿 DDF 分布均匀); v_g, ω_0, T_0 分别为脉冲群速度、中心频率和 $1/e$ 功率处的半宽度; T_R 为 Raman 常数; α 为光纤损耗系数; $p(\xi)$ 决定 GVD 系数沿 DDF 的变化情况。式(1)右边与 δ, s, τ_R 有关的项分别表示脉冲传输过程中的 TOD、自陡峭和 RSS 等高阶效应。

对于一段对色散长度(L_d) 归一化后长度为 ξ_L 的 DDF^[2-3], 定义其输入端与输出端的 GVD 系数之比 W_{eff} 为有效放大因子(或称色散比率), 即 $W_{\text{eff}} = \beta_2(0)/\beta_2(\xi_L)$ 。通常情况下, W_{eff} 的最大值不超过 20^[2,6]。设输入脉冲为下式表示的基阶孤子:

$$u(0, \tau) = A \text{sech}(A\tau) \tag{3}$$

则可以利用分步傅里叶方法, 对脉冲在 DDF 中的传输进行数值计算。

为了研究问题的方便, 引入几个衡量脉冲压缩质量的参数, 分别是压缩因子 F_c 、压缩品质因子 Q_c 和脉座能量 $P_E(\%)$:

$$F_c = \frac{T_{\text{FWHM}}}{T_{\text{comp}}}, Q_c = \frac{P_{\text{comp}}}{F_c} \tag{4}$$

$$P_E(\%) = \frac{|E_{\text{total}} - E_{\text{sech}}|}{E_{\text{total}}} \times 100\%$$

其中, T_{FWHM} 为初始脉冲的半极大全宽度; T_{comp} 为压缩后脉冲的半极大全宽度; P_{comp} 为压缩后脉冲的峰值功率; E_{total} 为压缩脉冲的总能量; E_{sech} 为双曲正割型输入孤子脉冲能量。

3 不同色散剖面 DDF 绝热压缩的数值分析

3.1 光纤长度对 DDF 脉冲压缩的影响

为方便计, 在此忽略光纤损耗和高阶效应。给定输入脉冲初始宽度 $T_{\text{FWHM}} = 5\text{ps}$, 入射端的色散值 $\beta_2(0) = -20\text{ps}^2/\text{km}$, 色散比率 $W_{\text{eff}} = 18$ 等, 分别计算在不同长度时光脉冲在几种不同色散剖面的 DDF 中的压缩过程。图 1~4 给出了各种色散剖面的 DDF 中脉冲演化时的压缩比、峰值功率、脉座能量和品质因子随所用 DDF 长度的变化而演化的情况。

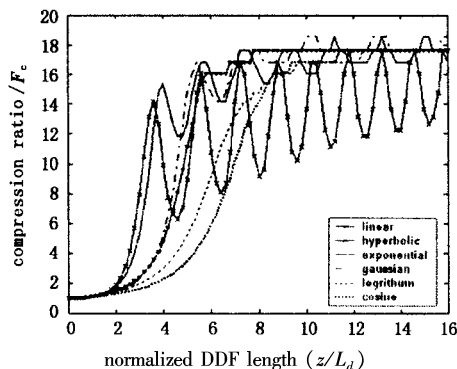


图1 DDF 长度对压缩脉冲压缩比的影响

由图 1 可知, 在前几个 L_d 内, 压缩比上升得比较快, 而其后变化趋缓, 且有不同的振荡形式; 不同色散剖面 DDF 中压缩时, 要达到理想的压缩倍数的长度不少于 8 个 L_d ; 不同色散剖面 DDF 对应的压缩变化情况是不同的: 线性、对数和余弦型对应的压缩比比较平缓上升, 而高斯和双曲型对应的压缩比是以振荡的方式上升的, 当到达一定距离后压缩比有收敛的趋势, 但双曲型时, 即使在 $16L_d$ 时仍然振荡极大, 压缩过程极不稳定。图 2 所描述的脉冲峰值功率的演化情况与图 1 非常类似, 这是由于脉冲压缩过程的绝热性, 压缩比的增大意味着脉宽减小, 而脉宽减小必然导致峰值功率的上升。

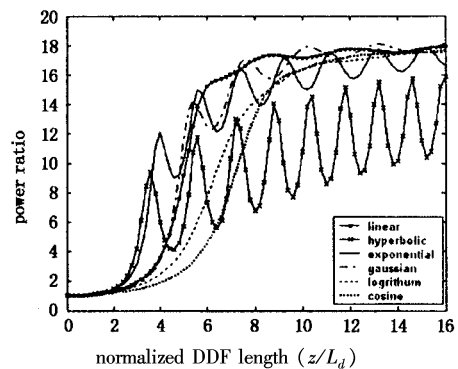


图2 DDF 长度对压缩脉冲峰值功率的影响

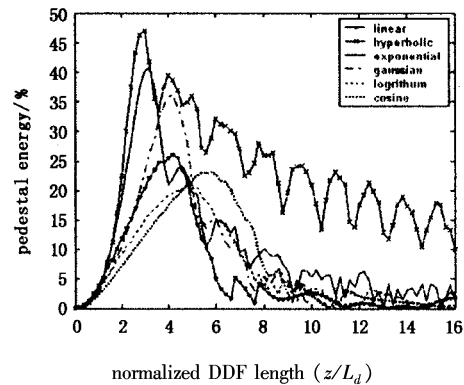


图3 DDF 长度对压缩脉冲脉座能量的影响

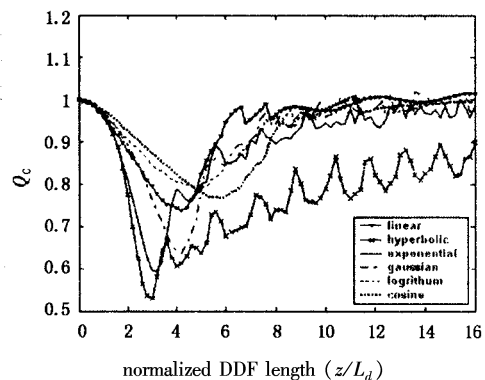


图4 DDF 长度对压缩脉冲品质因子的影响

图 3 给出了不同 DDF 长度对压缩脉冲脉座能量的影响。压缩脉冲的质量并不会随 DDF 长度的增加而增加, 而是经历一个先恶化再改善的过程。

当采用的 DDF 长度达到 $16L_d$ 时,除了双曲型外,各种剖面的 DDF 中得到的压缩脉冲质量都相当好了。对于双曲型 DDF,即使所用长度达到 $16L_d$,脉座能量仍然在 10 ~ 20 之间强烈振荡。图 4 则给出了 DDF 长度对压缩脉冲品质因子的影响,与图 3 类似,但用脉座能量来判定脉冲质量更为直观。

由此我们可以看到,在几种不同剖面的 DDF 压缩脉冲时,双曲型 DDF 的表现与众不同,这是因为在双曲型 DDF 中,GVD 和 SPM 效应是交替发挥作用的,故压缩过程呈现一种非稳定的振荡。

3.2 不同色散剖面 DDF 对脉冲绝热压缩的影响

下面研究给定 DDF 长度时,不同色散变化曲线对脉冲绝热压缩的影响。由于在前面的计算中我们发现获得最大压缩所需的最佳长度为 $16L_d$,故在此亦取长度为 $16L_d$ 。其他参数与上面相同。

图 5 表示的是理想情况下,在给定光纤长度时,脉冲在光纤内的压缩比的增大情况。可以看到此时,压缩比均随光纤长度的增加而增大。对双曲型 DDF,两者是线性关系。其他几种均是先比较缓慢的增加,然后比较快速地增大到理想压缩比为止。

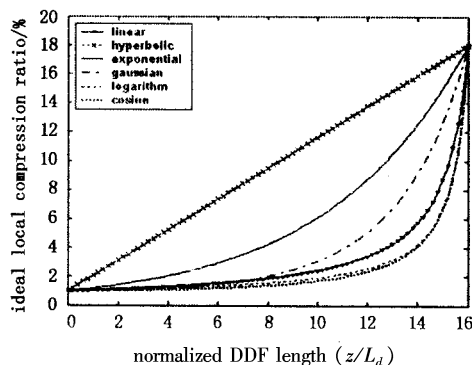


图 5 理想局部绝热压缩因子随传输距离的变化

图 6 和图 7 表明,在实际的脉冲压缩时,双曲型 DDF 在压缩比和功率比均存在着很剧烈的振荡。与双曲型相比,指数型振荡明显减弱,对于高斯型 DDF,它没有双曲和指数型那样的明显振荡上升。其他色散剖面的 DDF 中,在长度为 $12L_d$ 后压缩比和峰值功率比迅速增加。

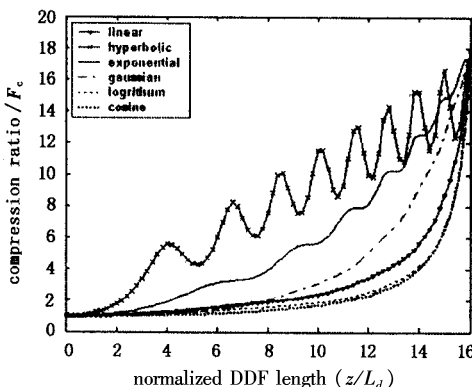


图 6 压缩比随传输距离的演化

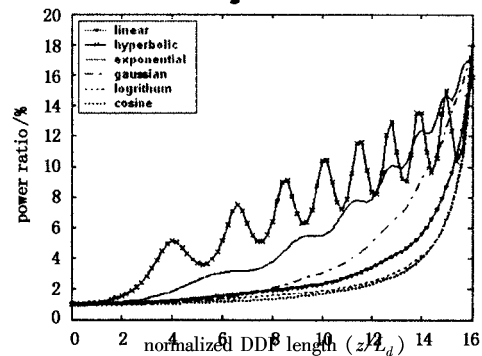


图 7 峰值功率比随传输距离的演化

图 8 表征了脉冲的质量优劣程度。双曲型 DDF 所对应的脉座能量振荡十分厉害,其次,指数型 DDF 振荡也很明显存在。但其脉座能量起伏未能超过 5(%)。余弦型的振荡是最平稳的。

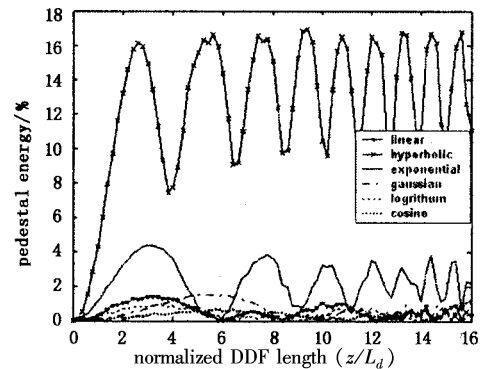


图 8 脉座能量随传输距离的演化

3.3 DDF 损耗对脉冲绝热压缩的影响

由于得到稳定的脉冲压缩比所需的长度为 $16L_d$,脉冲传输的总损耗不可忽略。数值计算的结果表明:考虑到光纤实际损耗时,压缩比下降很多,尤其是对于在无损耗时表现最佳的余弦型 DDF 对损耗最为敏感,压缩比下降到 3 附近,所以实际的余弦型 DDF 用于脉冲压缩是不行的;在几种不同剖面 DDF 中,线性型在压缩比、峰值功率、脉座能量和品质因子等方面是表现最为稳定的。不过,在压缩比和压缩质量方面,高斯型表现不凡,虽然有振荡,但最终的脉座能量可以趋于 2% 之下。综合考虑压缩比、脉座能量和品质因子,首选应为高斯型 DDF,其次是线性型、双曲型和余弦型等。

4 基于 DDF 的高阶孤子压缩

采用 DDF 高阶孤子压缩,能获得较常规光纤压缩更少的脉座能量^[7]。同样采用 NLS 方程进行数值计算,参数选取时仅考虑色散随光纤传输距离的变化。以线性 DDF 为例,输入脉冲的孤子阶数分别取为:1.0,1.1,1.5,1.8,2.1。

由图9可知,DDF中的高阶孤子压缩的压缩比在经历一定光纤长度后不断增加并趋于基本稳定。而且,随着输入脉冲功率增加,也即孤子阶数增大,达到最大压缩所需的光纤长度减小,同时获得的压缩比也越大。但是需要注意的一点是,随着压缩比的增大,它随光纤长度方向上的压缩比振荡也越剧烈,当孤子阶数超过一定值时,这种振荡使得实际的应用十分困难。在对光纤长度的选择上要非常细致。图10所示的功率变化与图9类似,故不赘述。

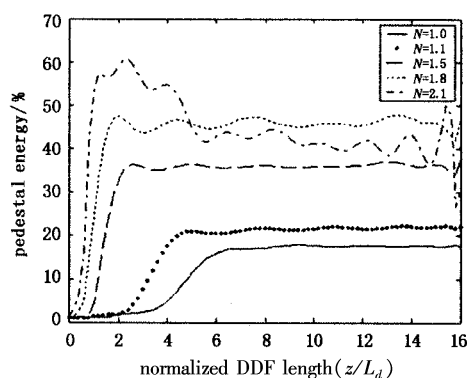


图9 压缩比随长度的演化

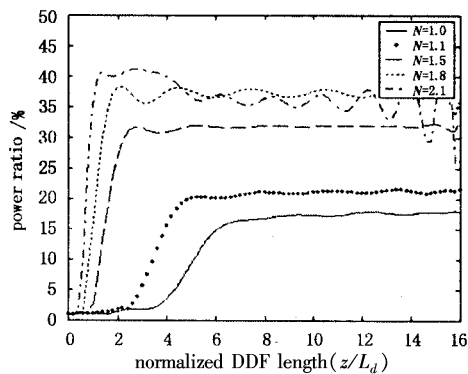


图10 峰值功率比随长度的变化

由图11可知,DDF中的高阶孤子压缩的脉座能量存在一个峰值区域,在某些光纤长度上,脉座能量相对较大。而且,随着输入脉冲功率增加,这个脉座能量的最大值来得更快。脉座能量峰值在25~40之间变化,对比图9和图11我们可以看到,当脉冲压缩刚刚达到趋于稳定值时,往往对应的脉座能量尚大,而此时的压缩脉冲再经历大约1~2个 L_d 的演化后脉座能量大为减少,脉冲的质量得以提高。这可以认为是光纤中的GVD和SPM等非线性效应相互作用而对脉冲的调整。特别注意到,对于输入孤子阶数较低(如 $N=1.1\sim 1.5$)的情形,在传输足

够长度后,脉冲的压缩比可达到或超过20,而对应的脉座能量完全可以控制在10以下。

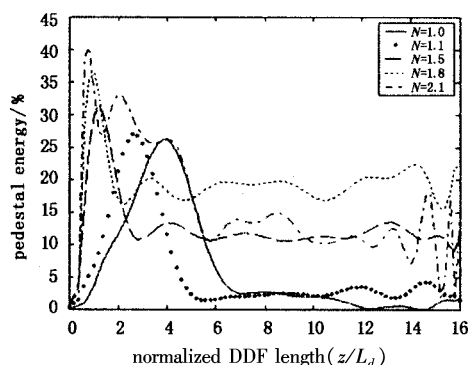


图11 脉座能量随长度的变化

5 结束语

本文采用数值计算的方法,首先对不同长度、不同色散剖面曲线光纤对脉冲绝热压缩的影响进行了仔细的数值模拟和分析,得到了一些有用的结论。最后研究了不同光纤长度和孤子阶数对高阶孤子压缩性能的影响,研究表明,当控制输入孤子脉冲在一定功率范围时,可以进行DDF中的高阶孤子压缩,而且所获得的压缩脉冲可以达到较高的质量。

参考文献:

- [1] Chernikov S V, Dianov E M, Richardson D J, et al. Soliton pulse compression in dispersion-decreasing fiber[J]. Opt. Lett., 1993, 18(7): 476-478.
- [2] Chan Kam-tai, Cao Wen-hua. Enhanced compression of fundamental solitons in dispersion decreasing fibers due to the combined effects of negative third-order dispersion and Raman self-scattering [J]. Opt. Commun., 2000, 184(5-6): 463-474.
- [3] 吴再华,曹文华.色散渐减光纤及其应用[J].激光与红外,2004,34(6):408-411.
- [4] Chernikov S V, Mamyshev P V. Femtosecond soliton propagation in fibers with slowly decreasing dispersion[J]. J. Opt. Soc. Am. B., 1991, 8(8): 1633-1641.
- [5] Agrawal G P. Applications of nonlinear fiber optics[M]. Third Edition. Boston: Academic, 2001. 266-268.
- [6] 陈泳竹,徐文成,等.基于特种光纤的级联组合产生超连续SC谱[J].华南师范大学学报(自然科学版), 2003, (2): 49-53.
- [7] Mark D Pelusi, Hai-Feng Liu. Higher order soliton pulse compress in dispersion-decreasing optical fibers [J]. IEEE. J. Quant. Electron, 1997, 33(8): 1430-1439.