

文章编号:1004-4213(2010)05-0811-4

# 飞秒孤子在色散渐增光纤中谱压缩的数值分析\*

梁锐<sup>a</sup>,周晓军<sup>a,b</sup>,张旨遥<sup>a</sup>,秦祖军<sup>a</sup>,李和平<sup>a,b</sup>,刘永<sup>a,b</sup>

(电子科技大学 a. 光电信息学院; b. 宽带光纤传输与通信网技术教育部重点实验室, 成都 610054)

**摘要:**通过数值求解修正了的广义非线性薛定谔方程,研究了孤子在色散渐增光纤中的谱压缩过程.详细分析了入射脉冲峰值功率对输出脉冲的谱宽和中心波长的影响,并描述了脉冲的脉宽、谱宽及啁啾在光纤中的演化过程.计算结果表明,脉宽 200 fs、中心波长 1 550 nm 的基孤子在群速度色散从  $-1 \text{ ps}^2/\text{km}$  至  $-11 \text{ ps}^2/\text{km}$  线性变化的长 100 m 的色散渐增光纤中传输时,脉冲谱宽由 12.6 nm 压缩至 5.2 nm,即可获得最大压缩比为 2.42.

**关键词:**光纤光学;谱压缩;色散渐增光纤;基孤子;非线性薛定谔方程

中图分类号:O43

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103905.0811

## 0 引言

全光模数转换器 (All-Optical Analog-to-Digital Converter, ADC) 是将连续的模拟信号转变为离散的数字信号的器件,可以克服现有电模数转换器的物理极限,在高速光通信、雷达信号处理、图像处理 and 实时监测等系统中有着重要的应用前景.量化准确度是全光 ADC 的重要指标,如何提高全光 ADC 的量化准确度是目前的研究热点之一.自 1979 年 Taylor 提出了用马赫-曾德尔干涉仪阵列来实现光学量化的方案<sup>[1]</sup>以后,人们陆续提出了多种全光量化的系统,如采用四波混频 (Four-Wave Mixing, FWM) 和孤子非线性效应进行全光采样和量化<sup>[2]</sup>、切割超连续谱 (Supercontinuum, SC)<sup>[3]</sup> 和喇曼自频移 (Raman Self-Frequency Shift, RSFS)<sup>[4-8]</sup> 等方式.在基于喇曼自频移的全光量化系统中,量化准确度与脉冲喇曼自频移幅度和频移后脉冲谱宽的比值有关<sup>[4-8]</sup>.当光纤确定时,入射脉冲的喇曼自频移幅度一定,因此,压缩频移后脉冲谱宽是提高量化准确度的有效方法.

利用啁啾脉冲在光纤中的自相位调制效应 (Self-Phase Modulation, SPM) 是目前压缩脉冲谱宽的主要方式.在早期的研究中多选用单模光纤进行谱压缩, R. H. Stolen 和 C. Lin 在 1978 年分析了单模光纤中传输时 SPM 效应对脉冲频谱的影响<sup>[9]</sup>;直至 1993 年才详细描述了处于正常色散区的单模光纤中 SPM 效应对负啁啾入射脉冲的谱压缩作

用<sup>[10-11]</sup>.脉冲首先在棱镜对或反常色散光纤中传输,引入负啁啾;啁啾脉冲在单模光纤或高非线性光纤传输时,SPM 效应使脉冲的能量在频域内重新分布,引起谱压缩<sup>[9-13]</sup>.色散渐增光纤 (Dispersion-Increasing Fiber, DIF) 是一种群速度色散 (Group-Velocity Dispersion, GVD) 参量  $\beta_2$  的绝对值随长度逐渐增加的新型光纤,近年来被应用于脉冲谱宽压缩实验<sup>[5-8]</sup>,但对脉冲在 DIF 中的演化过程并未进行过系统的分析.

本文通过数值求解修正的广义非线性薛定谔方程,模拟了中心波长 1 550 nm、脉宽 200 fs 的基孤子在 DIF 中的谱压缩过程,详细讨论了其在 DIF 中的演化过程,即脉宽、谱宽、啁啾等参量随传输距离变化的关系.研究结果对提高基于喇曼自频移的全光量化系统的量化准确度具有指导意义.

## 1 理论基础

采用修正的非线性薛定谔方程来简单描述脉冲在 DIF 中的谱压缩原理<sup>[14]</sup>

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

式中  $A$  是脉冲的慢变包络振幅,  $T$  和  $z$  分别是时间和空间坐标 ( $T = t - z/v_g$ ).  $\beta_2$  和  $\gamma$  分别为光纤的 GVD 参量和非线性系数,其中  $\beta_2$  随传输距离  $z$  变化.

当  $\Delta\beta_2$  很小时可视为微扰,方程(1)可获得近似孤子解,且其孤子数  $N$  可以用式(2)表述

$$N^2 = \gamma \cdot P_0(z) \cdot \frac{T_0^2(z)}{|\beta_2(z)|} = \gamma \cdot (P_0(z) \cdot T_0(z)) \cdot \frac{T_0(z)}{|\beta_2(z)|} \quad (2)$$

\* 国家高技术研究发展计划(2007AA01Z209)和国家自然科学基金重点项目(60736038)资助

Tel:028-83202899

Email:lrui@uestc.edu.cn

收稿日期:2009-08-20

修回日期:2009-10-14

式中  $P_0$  和  $T_0$  分别是脉冲的峰值功率和半宽度(1/e 处), 孤子能量在传输过程中保持不变,  $P_0(0) \cdot T_0(0) = P_0(z) \cdot T_0(z)$ . 当基孤子在色散渐增光纤中传输时, 由于  $|\beta_2|$  随传输长度逐渐增加, 孤子的脉宽展宽以保证脉冲以基孤子状态传输, 同时脉冲谱宽被压缩.

当入射脉冲的脉宽较窄时, 脉冲在光纤中的传输损耗、高阶色散效应和高阶非线性效应(如自陡效应和 RSFS)等不可忽略. 因此, 飞秒孤子在 DIF 中的传输用修正的广义非线性薛定谔方程描述<sup>[14]</sup>

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{\alpha}{2}A + \frac{i\beta_2(z)}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} = i\gamma \left[ |A|^2 A + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial T} (|A|^2 A) - T_R A \frac{\partial |A|^2}{\partial T} \right] \quad (3)$$

式中,  $\omega_0$  是脉冲的中心角频率,  $\alpha$ 、 $\beta_3$  和  $T_R$  分别是光纤的传输损耗、三阶色散(Third-Order Dispersion, TOD)参量、非线性参量和喇曼响应系数.

色散渐增光纤(DIF)是色散渐减光纤(Dispersion-Decreasing Fiber, DDF)的逆向应用<sup>[6]</sup>. 与 DDF 相同, DIF 中的  $\beta_2$  变化趋势有线型、指数型、高斯型、洛伦兹型和双曲型等<sup>[6,15-16]</sup>, 本文中选用较为常见的线型 DIF 进行谱压缩. 用谱压缩比( $=\Delta\lambda_{in}/\Delta\lambda_{out}$ )来表示脉冲的谱压缩程度, 其中  $\Delta\lambda_{in}$  和  $\Delta\lambda_{out}$  分别代表谱压缩前后的脉冲谱宽(FWHM). 表 1 为 DIF 在 1 550 nm 处的参量<sup>[15]</sup>.

表 1 DIF 在 1 550 nm 处的参量

Table 1 Parameters of the DIF @ 1550 nm

Parameter	Value	Unit
Nonlinearity $\gamma$	1.96	$\text{W}^{-1} \text{km}^{-1}$
Loss $\alpha$	0.002	$\text{m}^{-1}$
GVD parameter $\beta_2$	-1 ~ -11	$\text{ps}^2/\text{km}$
TOD parameter $\beta_3$	0.02	$\text{ps}^3/\text{km}$
Length $L$	100	m

## 2 数值结果及讨论

本文的研究目的是压缩经过喇曼自频移(RSFS)后形成的喇曼基孤子的谱宽, 所以选择中心波长 1 550 nm、脉宽(FWHM)200 fs 的无啁啾双曲正割脉冲作为入射脉冲, 其谱宽(FWHM)为 12.6 nm. 采用分步傅里叶方法<sup>[14]</sup>对方程(3)进行数值求解, 时间窗口为  $T_0$  的 1 600 倍、时间离散点数为  $2^{16}$ , 计算步长为 2 mm.

### 2.1 入射脉冲峰值功率的影响

计算中选用的入射脉冲峰值功率在 10~80 W 之间变化, 对应入射脉冲为基孤子( $0.5 < N < 1.4$ )的情况, 图 1 为输出谱宽随入射脉冲峰值功率变化的关系. 由图可知, 输出脉冲的谱宽随入射脉冲峰值

功率的增加而减小; 且当入射脉冲峰值功率在 65~80 W 之间变化时, 输出谱宽的变化趋于平缓. 图 2 为输出中心波长随入射脉冲峰值功率变化的关系. 当入射脉冲峰值功率较小时, 输出中心波长保持 1 550 nm 不变. 随着入射脉冲峰值功率的提高, 由于脉冲的喇曼自频移效应, 输出中心波长逐渐红移, 并且红移速率增加. 入射脉冲峰值功率为 80 W 时, 输出中心波长红移约 1.15 nm.

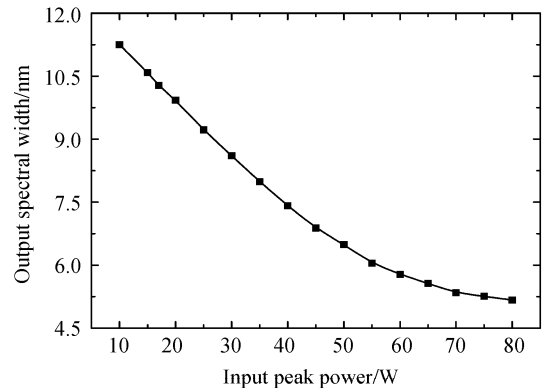


图 1 输出脉冲谱宽随输入脉冲峰值功率变化的关系

Fig. 1 The relationship between the output spectral width and the input peak power

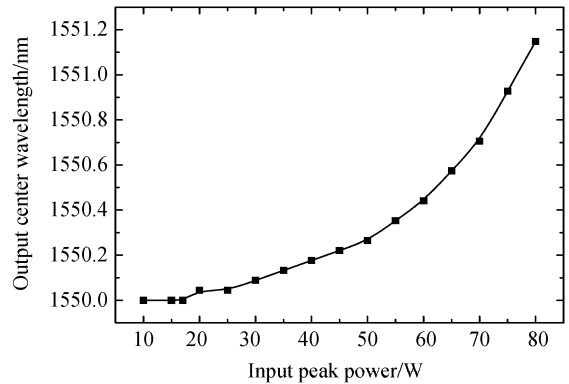


图 2 输出脉冲中心波长随输入脉冲峰值功率变化的关系

Fig. 2 The relationship between the output center wavelength and the input peak power

### 2.2 孤子在 DIF 中的演化

当入射脉冲峰值功率分别为 30 W、40 W 和 80 W 时, 入射脉冲对应孤子数分别是 0.87、1 和 1.4. 图 3 为不同入射脉冲峰值功率的情况下, 孤子脉宽和谱宽沿 DIF 传输方向的演化曲线. 由图 3 可以看出, DIF 中脉冲脉宽和谱宽的演化情况与入射脉冲峰值功率有关. 当入射脉冲峰值功率为 30 W 和 40 W 时, 在 DIF 中脉冲的脉宽持续增加, 谱宽持续减小; 当入射脉冲峰值功率为 80 W 时, 在 DIF 中脉冲的脉宽先减小后增加, 谱宽先增加再减小. 图 4 为不同入射脉冲峰值功率的情况下, 脉冲啁啾沿 DIF 传输方向的演化曲线, 其中假设脉冲啁啾为线性. 脉冲啁啾在 DIF 中的变化趋势与谱宽相同, 根据方程(1), 其物理过程上可解释为:

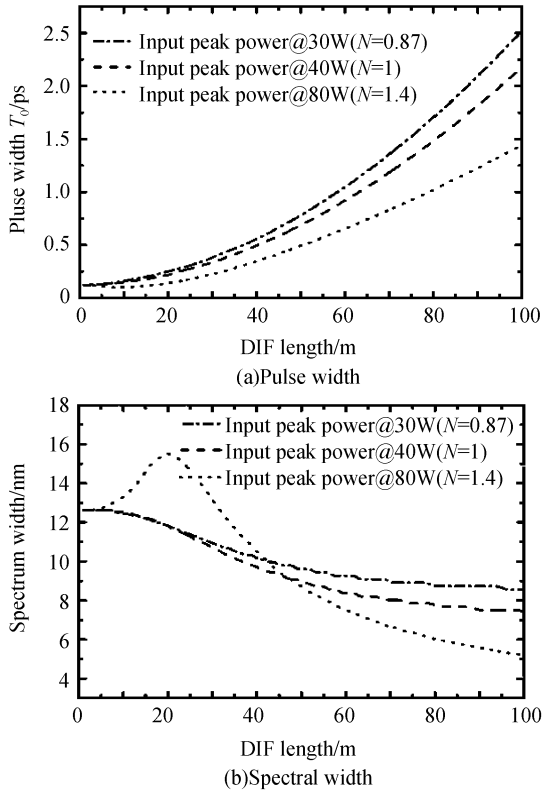


图3 不同入射脉冲峰值功率的情况下,脉冲脉宽和谱宽沿 DIF 长度的演化曲线

Fig. 3 The evolutions of the pulse widths and spectral widths in the DIF at different input peak powers

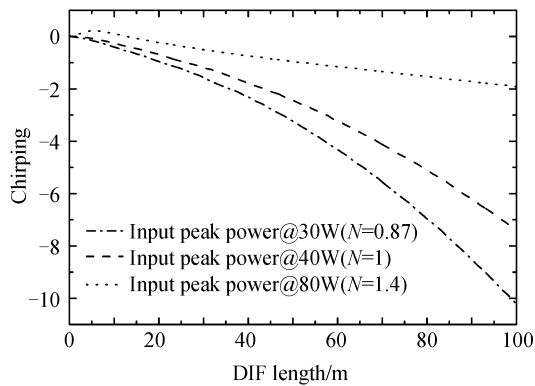


图4 不同入射脉冲峰值功率的情况下,脉冲啁啾沿 DIF 长度的演化曲线

Fig. 4 The evolutions of the chirpings in the DIF under three different input peak powers

1) 当入射脉冲峰值功率为 30 W 和 40 W 时,  $N \leq 1$ , 在脉冲传输过程中 GVD 效应占优势, 持续引入负啁啾, 脉宽逐渐展宽, 谱宽逐渐压缩。

2) 当入射脉冲峰值功率为 80 W 时,  $N = 1.4 > 1$ , 在初始的一段距离内, SPM 效应占优势并引入正啁啾, 脉宽压缩, 谱宽展宽。随着 GVD 参量的逐渐增加, GVD 效应引起的负啁啾逐渐补偿并过补偿 SPM 效应引起的正啁啾, 脉冲谱宽压缩, 脉宽展宽。因此, 当  $N > 1$  时, 脉冲谱宽沿传输距离脉宽先减小后增加, 先增加后减小。

图 5 是入射脉冲峰值功率为 30 W、40 W 和 80 W

时的时域图和频域图。表 2 为三种入射脉冲峰值功率下, 输出脉冲的中心波长、脉宽、谱宽和谱压缩比。

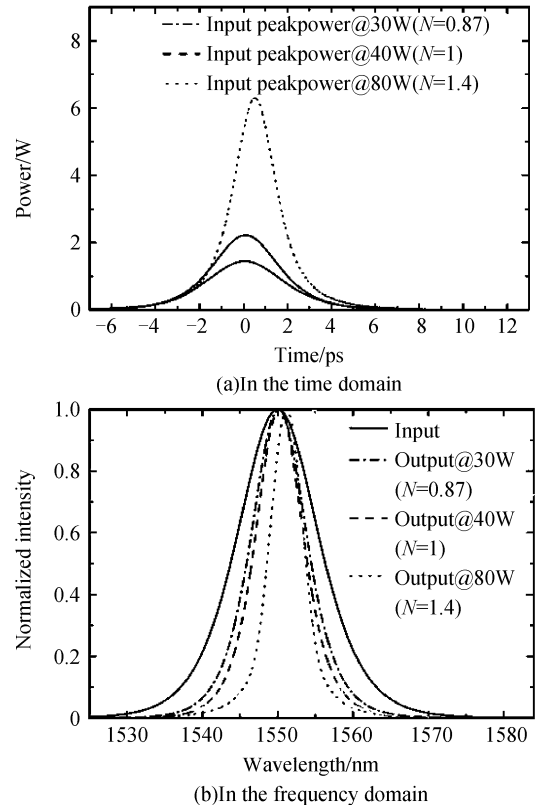


图5 不同入射脉冲峰值功率下的输出脉冲的时域和频域图  
Fig. 5 The normalized input spectrum and output spectra at three different input peak powers

表 2 不同入射脉冲峰值功率下, 输出脉冲的各参量  
Table 2 The characteristics of the output pulses under different input peak powers

Input peak power/W	Soliton number $N$	Output center wavelength/nm	Output spectral width/nm	Spectral compression ratio
30	0.87	1 550.09	8.6	1.47
40	1	1 550.18	7.4	1.7
80	1.4	1 551.15	5.2	2.42

### 3 结论

本文详细分析了中心波长在 1 550 nm、脉宽为 200 fs (谱宽为 12.6 nm) 的基孤子在长 100 m 的色散渐增光纤 (DIF) 中的谱压缩过程。计算结果表明, 入射脉冲峰值功率和 DIF 长度的增加均会引起输出脉冲谱宽的减小。入射脉冲峰值功率 80 W ( $N = 1.4$ ) 时输出脉冲的谱宽为 5.2 nm, 获得大小为 2.42 的谱压缩比。一般来说, 高入射脉冲峰值功率和长 DIF 可以获得谱宽更窄 (谱压缩比更高) 的脉冲输出, 同时中心波长的红移量也较大。这样在基于喇曼自频移的全光量化系统中, 可分辨的量化状态数增加, 量化准确度得以提高。

## 参考文献

- [1] TAYLOR H F. An optical analog-to-digital converter-design and analysis[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1979, **QE-15**(4): 210-216.
- [2] ODA S I, MARUTA A, KITAYAMA L I. All-optical quantization scheme based on fiber nonlinearity[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2004, **16**(2): 587-589.
- [3] ODA S I, MARUTA A. A novel quantization scheme by slicing supercontinuum spectrum for all-optical analog-to-digital conversion[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2005, **17**(2): 165-167.
- [4] NISHITANI T, KONISHI T, ITOH K. Integration of a proposed all-optical analog-to-digital converter using self-frequency shifting in fiber and a pulse-shaping technique[J]. *Opt Rev*, 2005, **12**(3): 237-241.
- [5] NISHITANI T, KONISHI T, ITOH K. Resolution improvement of all-optical analog-to-digital conversion employing self-frequency shift and self-phase-modulation-induced spectral compression [J]. *IEEE J Sel Topics in Quantum Electron*, 2008, **14**(3): 724-732.
- [6] XU C, LIU X. Photonic analog-to-digital converter using soliton self-frequency shift and interleaving spectral filters[J]. *Opt Lett*, 2003, **28**(12): 986-988.
- [7] LIANG Rui, ZHOU Xiao-jun, LI He-ping, *et al.* Optical quantization in all-optical analog-to-digital converter based on Raman self-frequency shift[J]. *Chin J Lasers*, 2009, **36**(2): 383-386.  
梁锐, 周晓军, 李和平, 等. 全光模数转换器中基于喇曼自频移的光量化[J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 383-386.
- [8] LIANG Rui, ZHOU Xiao-jun, ZHANG Zhi-yao, *et al.* Four-bit all-optical quantization based on Raman self-frequency shift and spectral compression[J]. *Optoelectron Lett*, 2009, **5**(6): 437-440.
- [9] STOLEN R H, LIN C. Self-phase-modulation in silica optical fibers[J]. *Phys Rev*, 1978, **A17**(4): 1448-1453.
- [10] OBERTHALER M, HOPFEL R A. Special narrowing of ultrashort laser pulses by self-phase modulation in optical fibers[J]. *Appl Phys Lett*, 1993, **63**(8): 1017-1019.
- [11] PLANAS S A, PIRES MANUS N I, BRITO CRUZ C H, *et al.* Spectral narrowing in the propagation of chirped pulses in single-mode fibers[J]. *Opt Lett*, 1993, **18**(9): 699-701.
- [12] WASHBURN B R, BUCK J A, RALPH S E. Transform-limited spectral compression due to self-phase modulation in fibers[J]. *Opt Lett*, 2000, **25**(7): 445-447.
- [13] SHEN S, CHANG C C, SARDESAI H P, *et al.* Effects of self-phase modulation on sub-500fs pulse transmission over dispersion compensated fiber links[J]. *J Lightwave Technol*, 1999, **17**(3): 452-461.
- [14] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics[M]. 4th ed. London: Academic Press, 2007.
- [15] FATEMI F K. Analysis of nonsadiabatically compressed pulses from dispersion-decreasing fiber[J]. *Opt Lett*, 2002, **27**(18): 1637-1639.
- [16] ZHANG Shu-min, LU Fu-yun, DONG Fa-jie, *et al.* Optimal compression of higher-order soliton with a nonlinear optical loop mirror constructed from dispersion-decreasing fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4): 554-557.  
张书敏, 吕福云, 董法杰, 等. 色散渐减光纤组成的环形镜对高阶孤子的理想压缩[J]. *光子学报*, 2005, **34**(4): 554-557.

## Spectral Compression of Femtosecond Soliton in a Dispersion-increasing Fiber

LIANG Rui<sup>a</sup>, ZHOU Xiao-jun<sup>a,b</sup>, ZHANG Zhi-yao<sup>a</sup>, QIN Zu-jun<sup>a</sup>, LI He-ping<sup>a,b</sup>, LIU Yong<sup>a,b</sup>

(*a.* School of Opto-electronic Information; *b.* Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission & Communication Networks, Ministry of Education, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** The spectral compression performance of the fundamental soliton in a dispersion-increasing fiber is investigated through numerically solving the generalized nonlinear Schrödinger equation. The influence of the input peak power on the output spectral width and the output center wavelength is analyzed, and the evolution of the pulse width, the spectral width and the chirping in the fiber are described. The calculation results show that spectral compression from 12.6 nm to 5.2 nm, i. e. spectral compression rate of 2.42, can be realized for the fundamental soliton with the pulse width of 200 fs and the center wavelength of 1 550 nm propagating in the dispersion-increasing fiber with the length of 100 m whose group-velocity dispersion parameter linearly varies from  $-1 \text{ ps}^2/\text{km}$  to  $-11 \text{ ps}^2/\text{km}$ .

**Key words:** Fiber optics; Spectral compression; Dispersion-increasing fiber; Fundamental soliton; The generalized nonlinear Schrödinger equation



**LIANG Rui** was born in 1983. Now she is studying for her Ph. D. degree, and her current research interests focus on Raman self-frequency shift, pulse compression and spectral compression.



**ZHOU Xiao-jun** was born in 1955. She received the Ph. D. degree in electromagnetic field theory and microwave technology from University of Electronic Science and Technology of China (UESTC) in 1999. Now she is a professor, and her research interests mainly focus on optoelectronics technique and computational electromagnetics.