

孤子效应脉冲压缩中的三阶色散抑制*

曹文华* *

(五邑大学电子工程系 广东江门 529020)

刘颂豪

(华南师范大学量子电子学研究所 广州 510631)

提要 提出并通过数值计算证明,若周期性地改变光纤的三阶色散系数,则可有效地抑制三阶色散对色散位移光纤中孤子效应脉冲压缩的影响。

关键词 孤子,脉冲压缩,三阶色散

1 引 言

近年来,人们对单模光纤中超短光脉冲的孤子效应压缩进行了很详细的数值研究^[1-5]。这是由于该类压缩方法不仅提供了一种简便的在近红外区获取飞秒光脉冲的途径,而且在不同的场合下,各种高阶效应(三阶色散、非线性色散、受激拉曼散射)会对脉冲的压缩产生不同程度的影响。对于常规光纤中的孤子效应脉冲压缩,人们已经认识到脉冲内部的受激拉曼散射(ISRS)是影响压缩结果的主要高阶效应^[1,4]。ISRS 效应不仅能提高脉冲压缩比,而且能有效地改善脉冲压缩质量。但由于使用的是常规光纤,因而对输入脉冲的峰值功率往往要求很高,以至于即使借助掺铒光纤放大器,也很难从普通的半导体激光器获得。这一困难可通过采用色散位移光纤来克服^[3]。

然而,正如 Chan 等所指出^[3],采用色散位移光纤进行孤子效应脉冲压缩有一个很大的缺陷,这就是三阶色散会对脉冲压缩产生很不利的影响。通常情况下,光纤的三阶色散系数 $\beta_3 > 0$,但最近的研究表明^[6-8],采用多包层制做方法也可使 $\beta_3 < 0$ 。本文通过数值计算表明,若让光纤的三阶色散系数 β_3 沿纵向正负交替变化,则可有效地抑制三阶色散对超短光脉冲孤子效应压缩的影响。尽管交替变化光纤二阶色散极性的方法已经有人提出并已被采用^[9,10],但据我们所知,通过交替改变光纤三阶色散极性来抑制三阶色散的办法尚未见报道。

2 理论模型

在计及 ISRS 效应和三阶色散效应的情况下,光纤中的超短光脉冲传输由下述修正后的非线性薛定谔方程描述

$$i \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - i\delta \frac{\partial^3 U}{\partial t^3} = -N^2 \left[|U|^2 U - \tau_R U \frac{\partial}{\partial t} |U|^2 \right] \quad (1)$$

* 广东省自然科学基金(950694)资助课题。

* * 现为香港中文大学电子工程系博士后研究员。

收稿日期: 1997-09-08; 收到修改稿日期: 1997-12-30

其中 U 为归一化脉冲包络复振幅,

$$\xi = \frac{|\beta_2|z}{T_0^2} \quad \tau = \frac{t - z/v_g}{T_0} \quad N^2 = \frac{n_2\omega_0 P_0 T_0^2}{cA_{\text{eff}}|\beta_2|} \quad (2)$$

$$\delta = \frac{\beta_3}{6|\beta_2|T_0} \quad \tau_R = \frac{T_R}{T_0} \quad (3)$$

(2), (3) 两式中, β_2 为群速色散(GVD) 系数, β_3 为三阶色散系数, v_g 为脉冲群速度, n_2 为非线性折射率系数, ω_0 为脉冲中心频率, c 为光速, A_{eff} 为光纤有效芯径面积, P_0 为输入脉冲峰值功率, $T_0 = T_{\text{FWHM}}/1.76$ (对双曲正割形脉冲) 为脉冲初始半宽度, T_R 为与拉曼增益曲线有关的非线性响应系数。

方程(1) 中与参数 δ 和 τ_R 有关的项分别表示脉冲在传输过程中的三阶色散效应和 ISRS 效应。这里忽略了脉冲自变陡(非线性色散) 效应, 因为对于初始宽度为 1 ps 左右的脉冲传输, ISRS 或三阶色散相对于自变陡效应起主要作用^[1~4]。方程(1) 还忽略了光纤损耗对脉冲演化的影响^[11], 这是由于现有的光纤损耗可以做得很低(可低于 0.15 dB/km), 而且这里用于孤子效应脉冲压缩的光纤长度较短。例如, 对于初始宽度为 1 ps 的 8 阶孤子压缩, 若采用 $\beta_2 = -1 \text{ ps}^2/\text{km}$ 的色散位移光纤, 则所需光纤约为 36 m, 若采用 $\beta_2 = -25 \text{ ps}^2/\text{km}$ 的常规光纤, 则所需光纤仅为 1.44 m。因此, 在这种情况下, 光纤损耗相对于其他效应对脉冲压缩的影响可忽略不计。

为叙述方便起见, 将输入脉冲表示成以下形式

$$U(0, \tau) = N \text{sech}(\tau) \quad (4)$$

其中 N 可以是整数或非整数, $N = 1$ 表示输入脉冲为基本孤子, $N > 1$ 的整数表示输入脉冲为高阶孤子。对于中心波长为 $1.55 \mu\text{m}$, 初始宽度为 1 ps 的输入脉冲, 色散位移光纤的各项参数值一般选为 $\beta_2 = -1 \text{ ps}^2/\text{km}$, $\beta_3 = 0.1 \text{ ps}^3/\text{km}$, $n_2 = 3.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$, $T_R = 6 \text{ fs}$ 。由此可算得(3) 式中的两个参数分别为 $\delta = 0.03$, $\tau_R = 0.01$ 。结合(4) 式给出的初始条件, 可利用分步傅里叶变换对方程(1) 进行数值求解。

3 计算结果与分析

作为例子, 首先计算 8 阶孤子的压缩情况。图 1(a) 和图 1(b) 分别示出只考虑 ISRS 效应和同时考虑 ISRS 及三阶色散效应后 8 阶孤子的压缩情况。这里的传输距离已用色散长度 L_D ($L_D = T_0^2/|\beta_2| \approx 323 \text{ m}$) 归一化。与图 1(a) 中未计及三阶色散的情况相比, 图 1(b) 表明三阶色散对脉冲压缩的影响很大, 它不仅导致脉冲压缩比和压缩脉冲峰值功率的严重下降, 而且还使得脉冲压缩所需的最佳光纤长度有所增加。

但如果让光纤的三阶色散系数 β_3 沿纵向正负交替变化, 则压缩结果会有所不同。图 2(a) 示出在输入脉冲与图 1 中相同、并同时计及 ISRS 和三阶色散效应的情况下, 脉冲在如图 2(b) 所示的三阶色散正负交替变化的色散位移光纤中的压缩结果。与图 1(b) 中的结果相比, 图 2(a) 表明脉冲压缩得到了很明显的改善。具体表现在脉冲压缩比由图 1(b) 中的 10.8 提高到 23.8, 压缩后的脉冲峰值功率与初始峰值功率之比也由图 1(b) 中的 5.6 提高到 11.9, 而且在相当长的一段传输距离内均可获得优质(即脉座很小, 脉冲形状清晰) 的压缩脉冲。对上述结果可从两方面进行解释:(1) 采用图 2(b) 所示的光纤相当于大大减小了整段光纤的平均三阶

色散(尽管局部三阶色散的大小仍相同),而且由于三阶色散作正负交替变化,这就使得三阶色散对脉冲前半部和后半部的影响是对称的,而不象图 1(b) 中正三阶色散只是导致脉冲后半部的分裂和振荡;(2) 单一极性的三阶色散会导致脉冲在传输过程中产生共振边频带(resonance sidebands)^[12]。由于不同频率成份其传输的群速度也不相同,因而导致脉冲的分裂。相反,如果让三阶色散的极性交替变化,则可有效地抑制共振边频带的增长,从而减轻脉冲在传输过程中能量向外辐射。

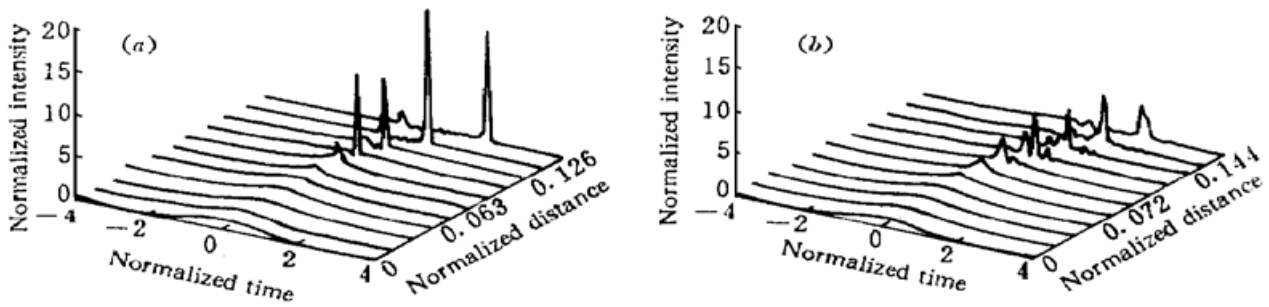


图 1 8 阶孤子在色散位移光纤中的孤子效应压缩结果

(a) 仅计及 ISRS 效应; (b) 同时计及 ISRS 和三阶色散效应

Fig. 1 Soliton-effect compression of the 8th-order soliton in a dispersion-shifted fiber when (a) only ISRS and (b) both ISRS and third-order dispersion are taken into account

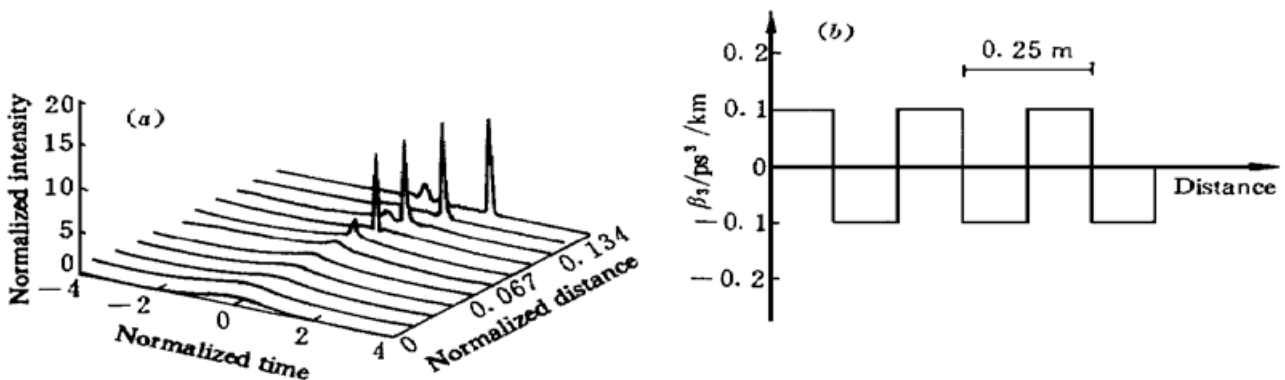


图 2 8 阶孤子在三阶色散正负交替变化的色散位移光纤中的孤子效应压缩结果 (a) 及三阶色散变化曲线(b)

Fig. 2 (a) Soliton-effect compression of the 8th-order soliton in a dispersion-shifted third-order dispersion management fiber when both ISRS and third-order dispersion are taken into account; (b) Third-order dispersion profile used in (a)

图 3 示出在以下三种情况下脉冲压缩到最窄时的压缩比与输入脉冲峰值功率(孤子阶数)的关系。这三种情况分别是:(1) 仅计及 ISRS 效应(对应于曲线 (a)); (2) 同时计及 ISRS 效应和正三阶色散效应(对应于曲线 (b)); (3) 同时计及 ISRS 效应和图 2(b) 给出的正负交替变化的三阶色散效应(对应于曲线 (c))。在三种情况中,初始脉冲宽度均与图 1 和图 2 中相同(即均为 1 ps)。与曲线 (a) 中未计及三阶色散的结果相比,曲线 (b) 表明单一极性的三阶色散对脉冲压缩的影响随输入脉冲峰值功率的增大而增大。而曲线 (c) 则表明,三阶色散正负交替变化对脉冲压缩的改善程度与输入脉冲的峰值功率有关。当输入脉冲峰值功率较低时($N = 2$

~ 5), 改善效果很明显(接近于曲线(a) 中的理想情况), 但当输入脉冲峰值功率继续增大后, 对三阶色散的抑制作用则逐渐减弱。这也是不难理解的: 尽管采用图 2(b) 所示的光纤能降低整段光纤三阶色散的平均值, 但局部的三阶色散效应仍然对脉冲的压缩产生影响。而且, 由于脉冲在演化过程中形状不断变化, 因而使得相邻局部段的正负三阶色散对脉冲压缩的影响不能更好地相互抵消, 输入脉冲峰值功率愈高, 局部的三阶色散对脉冲压缩的影响愈大, 因而对三阶色散的抑制也逐渐减弱。

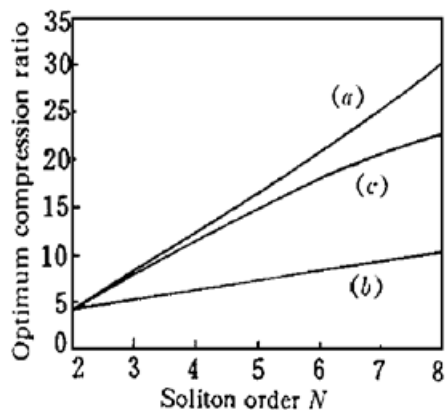


图3 脉冲压缩比与初始峰值功率(孤子阶数)的关系: 仅计及 ISRS 效应 (a); 同时计及 ISRS 和正三阶色散效应 (b); 同时计及 ISRS 和图 2 (b) 给出的正负交替变化的三阶色散效应 (c)

Fig. 3 Optimum compression ratio as a function of soliton order for the case (a) with only ISRS, the case (b) with both ISRS and uniform third-order dispersion ($\beta_3 = 0.1 \text{ ps}^3/\text{km}$), and the case (c) with both ISRS and periodic third-order dispersion (as shown in Fig. 2 (b))

但如果适当减小三阶色散系数 β_3 的变化周期 ($|\beta_3|$ 大小不变), 则可更好地抑制三阶色散对高阶孤子压缩的影响。图 4 是在同时计及 ISRS 效应和三阶色散效应的情况下, 对初始峰值功率分别为 4 阶、6 阶和 8 阶的高阶孤子所计算出的脉冲压缩比与三阶色散系数 β_3 周期的关系。结果表明, 随着 β_3 周期的减小, 脉冲压缩比逐渐提高, 表明对三阶色散的抑制效果愈来愈好。图 4 还表明, 尽管脉冲压缩的改善程度(或对三阶色散的抑制程度) 依赖于 β_3 周期, 但依赖程度随输入脉冲峰值功率的大小而异。对于初始峰值功率较低的脉冲(如 4 阶以下的孤子), 继续缩短 β_3 周期并不能更进一步地改善脉冲压缩效果, 但对于初始峰值功率较高的脉冲(如 8 阶孤子), 继续缩短 β_3 周期则是非常有益的。这一结果与图 3 所示的结果并不矛盾, 因为输入脉冲峰值功率越低, 三阶色散对脉冲压缩的影响越小, 因而继续缩短 β_3 周期的意义就显得不是很大; 反之, 输入脉冲峰值功率越高, 三阶色散对脉冲压缩的影响越大, 因而必须进一步缩短 β_3 周期才能达到更好地抑制三阶色散的目的。

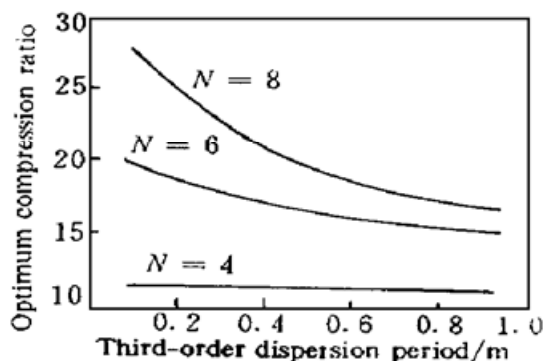


图4 不同峰值功率情况下, 脉冲压缩比与光纤三阶色散系数周期的关系

Fig. 4 Optimum compression ratio as a function of the third-order dispersion period for soliton order $N = 4, 6, 8$

参 考 文 献

- 1 G. P. Agrawal. Effect of intrapulse stimulated Raman scattering on soliton-effect pulse compression in optical fibers. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(4): 224~ 226
- 2 J. M. Hickmann, A. S. L. Gomes. Dynamics of femtosecond soliton-effect optical compression in monomode fibers. *Opt. Commun.*, 1993, **97**(5): 333~ 336
- 3 K. C. Chan, H. F. Liu. Effect of third-order dispersion on soliton-effect pulse compression. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(1): 49~ 51
- 4 Cao Wenhua, Liao Changjun, Guo Qi et al.. Femtosecond soliton generation induced by intrapulse stim-

- ulated Raman scattering in optical fibers. *Chinese J. Lasers*, 1994, **B3**(3): 249~ 256
- 5 Cao Wenhua, Zhang Youwei. The effect of pulse walkoff on the compression of bright optical pulses by dark solitons. *Opt. Commun.*, 1996, **128**(1~ 3): 23~ 29
- 6 M. Yu, C. J. McKinstrie. Modulational instability in dispersion-flattened fibers. In Program of Optical Society of America Annual Meeting, Dallas, Texas, 1994. 56
- 7 C. G. Goedde, W. L. Kath, P. Kumar. Periodic amplification and conjugation of optical solitons. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(12): 1365~ 1367
- 8 S. V. Chernikov, P. V. Mamyshev. Femtosecond soliton propagation in fibers with slowly decreasing dispersion. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1991, **8**(8): 1633~ 1641
- 9 C.-C. Chang, A. M. Weiner, A. M. Vengsarkar *et al.*. Broadband fiber dispersion compensation for sub-100-fs pulses with a compression ratio of 300. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(15): 1141~ 1143
- 10 N. J. Smith, N. J. Doran. Modulational instabilities in fibers with periodic dispersion management. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(8): 570~ 572
- 11 Cao Wenhua, Liao Changjun, Guo Qi *et al.*. Effect of fiber loss on soliton-effect picosecond pulse compression in optical fibers. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1993, **13**(11): 1003~ 1007 (in Chinese)
- 12 Y. Kodama, M. Romagnoli, S. Wabnitz *et al.*. Role of third-order dispersion on soliton instabilities and interactions in optical fibers. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(3): 165~ 167

Soliton-effect Pulse Compression with Third-order Dispersion Suppression in Optical Fibers

Cao Wenhua

(Department of Electronic Engineering, Wuyi University, Jiangmen, Guangdong 529020)

Liu Songhao

(Institute of Quantum Electronics, South China Normal University, Guangzhou 510631)

Abstract Recent studies have shown that the effect of third-order dispersion plays a detrimental role on the soliton-effect pulse compression in dispersion-shifted fibers. In this paper, we propose and numerically show that the effect of third-order dispersion on the soliton-effect pulse compression can be significantly suppressed if third-order dispersion of the fiber is periodically alternated between the normal and anomalous regimes.

Key words soliton, pulse compression, third-order dispersion