

# 单模光纤正常色散区啁啾演变研究\*

王 晶 苗洪利

(内蒙古师范大学物理系 呼和浩特 010022)

冯启元 刘秀敏

(内蒙古大学物理系)

**提要** 对单模光纤正常色散区,群速度色散所致啁啾、自相位调制所致啁啾以及两者共同作用所致啁啾的演变过程进行了研究。利用傅里叶变换法获得群速度色散所致啁啾、自相位调制所致啁啾的解析解,采用数值法得到了群速度色散效应与自相位调制效应共同起作用时,啁啾演变过程。由啁啾演变结果可得,在正常色散区可形成暗孤子,也可实现对皮秒脉冲压缩。

**关键词** 啁啾,群速度色散,自相位调制

## 1 引 言

光脉冲压缩是光纤中非线性效应的一个最重要应用领域,严格控制同时产生于光纤内部的非线性效应和群速度色散效应(GVD),已经获得几个飞秒的窄脉冲。自八十年代发展起来的利用超短光脉冲在单模光纤中传输时产生的自相位调制(SPM)以及光栅对色散补偿的脉冲压缩方法<sup>[1,2]</sup>,越来越引起人们的关注。有关单模光纤正群速度色散区脉冲压缩已有许多理论上的研究<sup>[3-5]</sup>,这类压缩方法适用于压缩增益开关分布反馈式半导体激光器输出的脉冲。目前,以光纤中非线性效应为基础的脉冲压缩器有两类,一是光纤-光栅对压缩器<sup>[6]</sup>,另一是孤子效应压缩器<sup>[6,7]</sup>。

在光纤-光栅对压缩器中,脉冲在光纤正常色散区传输,然后用一个光栅对进行外部压缩。光纤的作用是通过 SPM 和 GVD 的联合效应,使脉冲产生近似线性的正啁啾,光栅对则提供压缩正啁啾脉冲所需的反常 GVD。而孤子效应压缩器仅由一段长度选取适当的光纤构成,输入脉冲在光纤的反常色散区传输,并且通过 SPM 和 GVD 之间的互作用被压缩。无论哪种压缩脉冲的方法,其思想都归结于如何控制脉冲的啁啾。然而,关于啁啾在光纤正常色散区演变还未见报道,本文从各种角度剖析在正常色散区啁啾的演变过程。

## 2 解析分析

在单模光纤的正常色散区,脉冲传输的基本方程为<sup>[6]</sup>

$$i \frac{\partial U}{\partial Z} = \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 U}{\partial T^2} - \nu P_0 |U|^2 U \exp(-\alpha Z) \quad (1)$$

式中  $U$  为归一化脉冲慢变包络,  $\beta_2$  为群速度色散系数,  $\nu$  为非线性系数,  $P_0$  为脉冲初始峰值功

\* 国家自然科学基金资助项目。

率,  $\alpha$  为光纤损耗系数。(1) 式右边第一项和第二项分别表示脉冲的群速度色散效应和自相位调制效应。

若群速度色散效应与自相位调制效应单独起作用时, 利用傅里叶变换法, 可以得到各自产生啁啾的解析解, 但若同时考虑 GVD 和 SPM 效应, 用数值法得到啁啾演变规律。

如果满足  $L_{NL} \gg L_D < L$ , 其中  $L_{NL}$  为非线性长度,  $L_D$  为色散长度,  $L$  为光纤长度。也就是只考虑脉冲的线性传输, 忽略了 SPM 的作用, 则方程(1)可改写为

$$i \frac{\partial U}{\partial Z} = \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial T^2} \tag{2}$$

采用傅里叶变换法<sup>[6]</sup>求解方程(2)得

$$U(Z, T) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{U}(0, \omega) \exp\left[\frac{i}{2} \beta_2 \omega^2 Z - i\omega T\right] d\omega \tag{3}$$

式中  $\tilde{U}(0, \omega)$  是入射脉冲在  $Z = 0$  处的傅里叶变换

$$\tilde{U}(0, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} U(0, T) \exp(i\omega T) dT \tag{4}$$

如果以线性啁啾高斯脉冲入射

$$U(0, T) = \exp\left[-\frac{(1+iC) T^2}{2 T_0^2}\right] \tag{5}$$

式中  $C$  为初始啁啾参量,  $C > 0$  为正啁啾,  $C < 0$  为负啁啾,  $T_0$  为  $1/e$  功率处的脉冲半宽度。

把方程(5) 代入(4), (3) 得到光纤任一位置处的啁啾表达式

$$\delta\omega = -\frac{\partial\varphi}{\partial T} = \frac{C + (1 + C^2)(Z/L_D)}{(1 + CZ/L_D)^2 + (Z/L_D)^2} \frac{T}{T_0^2} \tag{6}$$

若  $C = 0$ , 则(6) 表示入射脉冲不带初始啁啾时, GVD 产生的正线性啁啾, 而且, 随着脉冲传输啁啾越来越小, 如图 1 (a)。如果  $C \neq 0$ , 那么入射高斯脉冲带有初始啁啾, (6) 式表明初始啁啾会影响 GVD 产生的啁啾, 使得啁啾在光纤中的演变发生了改变。当  $C = 0.5$  时, GVD 产生的正啁啾在光纤中缓慢变化, 并且始终为正啁啾, 从而导致脉冲展宽, 见图 1 (b)。当  $C = -0.5$  时, GVD 产生的正啁啾抵消了初始负啁啾, 使初始负啁啾变小, 并逐渐趋于零, 在  $C + (1 + C^2)(Z/L_D) = 0$  处, 啁啾等于零, GVD 产生的正啁啾完全与初始负啁啾抵消, 脉冲被压缩到最窄。以后, GVD 产生的正啁啾大于初始负啁啾, 净啁啾为正啁啾, 使脉冲又开始展宽, 见图 1 (c)。

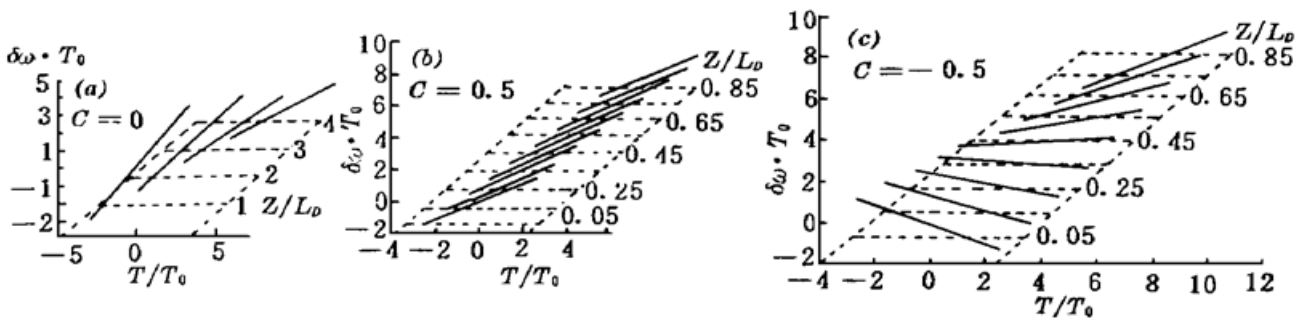


图 1 GVD 产生啁啾演变过程 (a)  $C = 0$ , (b)  $C = 0.5$ , (c)  $C = -0.5$   
 Fig. 1 Evolution of chirps induced GVD with initially chirp parameter of  
 (a)  $C = 0$ , (b)  $C = 0.5$ , (c)  $C = -0.5$

如果满足  $L_D \gg L_{NL} < L$ , 即忽略了群速度色散效应, 只考虑脉冲在无损耗 ( $\alpha = 0$ ) 非线性光纤中传输, 方程(1) 变为

$$\frac{\partial U}{\partial Z} = -iP_0 |U|^2 U \quad (7)$$

其解为

$$U(Z, T) = U(0, T) \exp[i(Z/L_{NL}) |U|^2] \quad (8)$$

那么, SPM 产生的啁啾为

$$\delta\omega = -\frac{\partial \mathcal{P}}{\partial T} = -\frac{\partial |U(0, T)|^2}{\partial T} \frac{Z}{L_{NL}} \quad (9)$$

如果入射脉冲为带有初始啁啾高斯脉冲

$$U(0, T) = \exp\left[-\frac{(1+iC)T^2}{2T_0^2}\right] \quad (10)$$

则代入(9)得

$$\delta\omega = \frac{2}{T_0} \frac{Z}{L_{NL}} \frac{T}{T_0} \exp\left[-\frac{T^2}{T_0^2}\right] \quad (11)$$

由(11)式可见, SPM 产生的啁啾为一非线性啁啾, 而且与入射脉冲是否带初始啁啾无关。如果入射脉冲带有初始啁啾, SPM 产生的啁啾与初始啁啾线性叠加, 在光纤中共同起作用, 使光纤任何位置的净啁啾不会等于零。

SPM 所致非线性啁啾非常有特点, 在脉冲前沿附近是负的(红移), 而到脉冲后沿附近则变为正的(蓝移), 在高斯脉冲中心附近较大范围内, 啁啾近似为正线性的。随着脉冲传输, 啁啾越来越大, 中心附近的正线性啁啾范围越来越小, 见图 2。

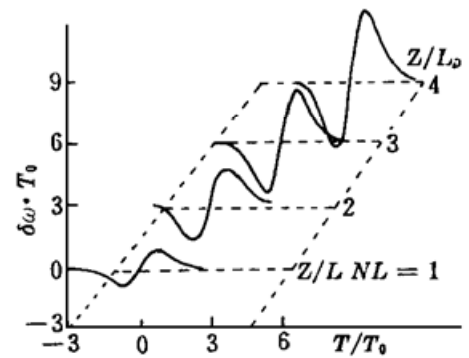


图 2 SPM 产生啁啾演变过程

Fig. 2 Evolution of chirps induced SPM

### 3 数值计算与讨论

单模光纤都是非线性的, 当脉冲在其中传输时, GVD 与 SPM 必同时起作用。方程(1) 需要用数值法求解。以方程(1) 表示的脉冲变化为数学模型, 用分步傅里叶变换法对其数值求解, 得到  $C = 0, C = 0.5, C = -0.5$  时啁啾演变过程, 如图 3(a), (b), (c)。

图 3(a) 给出在正常色散区, 如果入射高斯脉冲无初始啁啾, 由于光纤中非线性效应和群速度色散效应互作用, 产生的啁啾演变过程。开始啁啾很小, 接近于零, 随着传输, 啁啾由线性向非线性过渡, 并且啁啾变大。

图 3(b) 为正常色散区, 正初始啁啾的高斯脉冲入射, GVD 和 SPM 共同作用产生的啁啾演变过程。初始啁啾破坏了原有的 GVD 和 SPM 的互作用, 使净啁啾比初始啁啾大, 由正线性啁啾向非线性啁啾转变, 但在脉冲中心仍近似为正线性啁啾, 从而加快了脉冲展宽速度。

图 3(c) 为负初始啁啾的高斯脉冲入射, 在 GVD 和 SPM 共同作用时产生的净啁啾演变结果。由于在脉冲中心, GVD 与 SPM 产生的啁啾抵消了初始啁啾, 使得净啁啾由负线性啁啾向零啁啾演变, 在  $Z/L_D = 0.35$  附近, 净啁啾等于零, 即 GVD 和 SPM 互相平衡, 此时, 脉冲被压缩到最窄。以后, 啁啾变为近似正啁啾, 随着传输, 啁啾越来越大, 脉冲又不断被展宽。

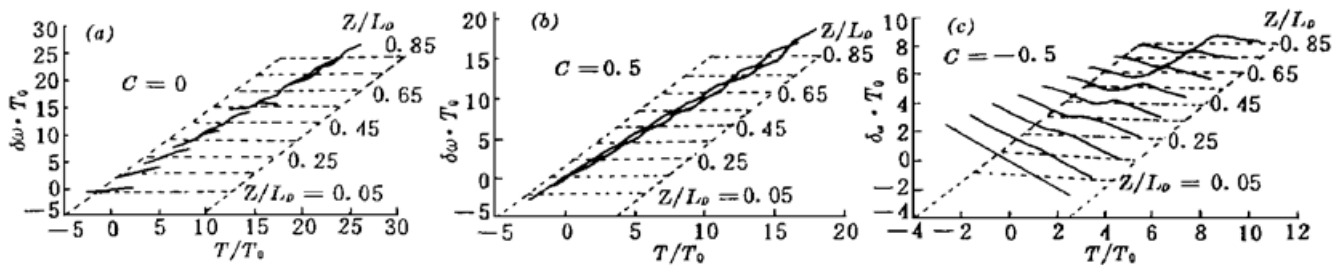


图3 GVD 和 SPM 产生啁啾演变过程 (a)  $C = 0$ , (b)  $C = 0.5$ , (c)  $C = -0.5$

Fig. 3 Evolution of chirps induced GVD and SPM with the initially chirp parameter of  
(a)  $C = 0$ , (b)  $C = 0.5$ , (c)  $C = -0.5$

总而言之, 本文对单模光纤正群速度色散区啁啾演变过程作了解析分析及数值计算。结果表明, 对初始负啁啾脉冲入射, 存在着啁啾变小的区域, 在此区域内可实现脉冲压缩。而对初始正啁啾脉冲入射, 啁啾越来越大, 但变化非常缓慢, 从而导致脉冲展宽。这一结果与文献[6]所讨论的脉冲演变结果相一致。

### 参 考 文 献

- 1 A. Takada, T. Sugie, M. Saruwatari. Picosecond optical pulse compression from gain-switched  $1.3 \mu\text{m}$  distributed-feedback laser diode through highly dispersive single-mode fiber. *Electr. Lett.*, 1985, **21**(21) : 969~ 971
- 2 W. J. Tomlinson, R. H. Stolen, C. V. Shank. Compression of optical pulses chirped by self-phase modulation in fibers. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 1984, **1**(1) : 139~ 149
- 3 C. Pask, A. Vatarescu. Spectral approach to pulse propagation in a dispersive nonlinear medium. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 1986, **3**(7) : 1018~ 1024
- 4 P. V. Mamyshev, S. V. Chernikov. Ultrashort-pulse propagation in optical fibers. *Opt. Lett.*, 1990, **15** (19) : 1076~ 1078
- 5 曹文华, 刘颂豪, 廖常俊 等. 单模光纤中皮秒啁啾脉冲压缩. 光学学报, 1995, **15**(2) : 180~ 185
- 6 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics*. Boston : Academic Press, 1989, 58~ 144
- 7 S. V. Chernikov, E. M. Dianov, D. J. Richardson *et al.*. Soliton pulse compression in dispersion-decreasing fiber. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(7) : 476~ 478

## The Study of the Chirps Evolution

Wang Jing Miao Hongli Feng Qiyuan\* Liu Xioumin\*

(Department of Physics, InnerMongolia Normal University

\* Department of Physics, InnerMongolia University, Huhehaote 010022)

**Abstract** Effects of group-velocity dispersion (GVD) induced chirp evolution and self-phase modulation (SPM) induced chirp evolution as well as the combined GVD and SPM induced chirp evolution in the normal-dispersion regime of single-mode fibers are studied. We get analytic solution of GVD leading chirp and SPM leading chirp using Fourier-transform algorithm. Numerical solution of the combined GVD and SPM leading chirp using numerical methods is obtained. The results show that chirped pulses can be compressed and dark soliton can be formed.

**Key words** chirp, group-velocity dispersion, self-phase modulation