

文章编号: 1001-3806(2003)05-0415-04

## 损耗和啁啾对皮秒脉冲孤子效应压缩的影响\*

王润轩

(宝鸡文理学院物理系, 宝鸡, 721007)

**摘要:** 在计及光纤损耗的前提下, 近似求解非线性薛定谔方程, 分析了单模光纤的负群速度色散区群速度色散(GVD)和自相位调制(SPM)对啁啾脉冲的作用, 定量计算光纤损耗和初始正啁啾对皮秒脉冲孤子效应压缩的影响。结果表明, 初始正啁啾改善了损耗对压缩参量的不良影响, 遏制了最佳光纤长度的增加。若选取适当的光纤长度和初始峰值功率, 可以实现正啁啾脉冲在单模光纤中的有效压缩。

**关键词:** 孤子效应压缩; 啁啾脉冲; 分裂步长傅里叶变换; 光纤损耗

中图分类号: O437 文献标识码: A

## Effect of loss and chirp on picosecond pulse soliton-effect compression

Wang Runxuan

(Department of Physics, Baoji College of Arts and Science, Baoji, 721007)

**Abstract:** Based on the optical fiber loss, solving the modified nonlinear Schrodinger equations, the paper analyses the function affected by GVD and SPM in single mode optical fiber in negative GVD area. It quantitatively calculates soliton effect picosecond pulse compression induced by optical fiber loss and initial orthochirp. The result shows that initial orthochirp improves the bad affect of compression factors due to the loss and stops the increase of the best optical fiber length. If an appropriate optical fiber length and initial peak power is selected, efficient compression of orthochirp pulse can be attained in single mode optical fiber.

**Key words:** soliton effect compression; chirp pulse; split-step Fourier method; optical fiber loss

### 引言

根据脉冲在光纤中经历的 GVD 的正负特性, 通常将脉冲压缩技术分为两类: 光纤光栅对压缩<sup>[1,2]</sup>和孤子效应压缩<sup>[3~6]</sup>, 其中第 1 类压缩是脉冲在光纤中经历正的 GVD, 使脉冲的频率展宽并产生正的频率啁啾, 从光纤输出的脉冲在通过光栅对后, 因负 GVD 而被压缩; 孤子效应压缩是脉冲在光纤中经历负 GVD, 其压缩机制是当输入脉冲的峰值功率高于基态孤子的峰值功率时, 脉冲在光纤中由于 SPM 与 GVD 的相互作用而经历一初始变窄的过程, 适当的选取光纤长度, 即可实现对输入脉冲的压缩, 这类脉冲压缩器就是一根单模光纤, 结构简单、操作方便, 加之较好的压缩效果而被广泛应用。文献[7]~文献[9]中数值计算了皮秒脉冲的孤子效应压缩, 前两者忽略了损耗项, 后者虽计及损耗, 但

都没有计及初始啁啾的影响, 在计及光纤损耗前提下, 笔者同时考虑了 GVD 和 SPM 效应就初始啁啾对脉冲在负 GVD 区的孤子效应压缩的影响进行全面的解析分析和定量的数值计算。

### 1 理论分析和数学模型

皮秒脉冲在单模光纤负 GVD 区的传输由下述非线性薛定谔方程描述:

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

式中,  $A$  为脉冲包络的慢变振幅;  $T$  是脉冲以群速度  $v_g$  移动的参考系中的时间量,  $T = t - z/v_g$ 。(1)式右边 3 项分别对应于光脉冲在光纤中传输时的吸收效应、色散效应和非线性效应。引入归一化振幅  $u$ :

$$A(z, t) = \sqrt{P_0} \exp(-\alpha z/2) u(z, \tau) \quad (2)$$

式中,  $\tau$  为脉冲初始脉宽  $T_0$  的归一化时间量,  $\tau = T/T_0$ ;  $P_0$  为入射脉冲的峰值功率, 指数因子代表光纤的损耗, 由(1)式、(2)式得:

\* 陕西省教育厅专项基金资助项目。

作者简介: 王润轩, 男, 1953 年 8 月出生。副教授。研究方向为非线性光学。

收稿日期: 2003-01-17; 收到修改稿日期: 2003-02-27

$$i \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\text{sgn}(\beta_2)}{2L_D} \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} - \frac{e^{-\alpha z}}{L_{nl}} |u|^2 u \quad (3)$$

式中,  $\text{sgn}(\beta_2) = \pm 1$ , 由 GVD 参数  $\beta_2$  的符号确定;  $L_D = T_0^2/|\beta_2|$  为色散长度,  $L_{nl} = 1/\chi P_0$  为非线性长度。如果同时考虑 GVD 和 SPM, 方程(3)要用数值解, 若将二者分开考虑则各有解析解, 也更有效地揭示出两种效应在脉冲压缩中所起的作用。

在方程(3)中, 令  $\chi = 0$ , 即先考虑 GVD 效应, 方程退变为线性传输方程:

$$i \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\text{sgn}(\beta_2)}{2L_D} \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} \quad (4)$$

对于具有线性啁啾的高斯脉冲输入:

$$u(0, T) = \exp\left[-\frac{1+ic}{2} \frac{T^2}{T_0^2}\right] \quad (5)$$

式中,  $c$  为啁啾参数。可用傅里叶变换法求解方程(4), 得出光纤任一位置处的脉冲振幅、宽度、相位以及啁啾分别为:

$$u(z, T) = \left[ \frac{T_0^2}{T_0^2 - i\beta_2 z (1+ic)} \right]^{1/2} \times \exp\left\{-\frac{(1+ic)T^2}{2[T_0^2 - i\beta_2 z (1+ic)]}\right\} \quad (6)$$

$$T_1(z) = T_0 \left[ \left(1 + \frac{c\beta_2 z}{T_0^2}\right)^2 + \left(\frac{\beta_2 z}{T_0^2}\right)^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

$$\varphi(z, t) = -\frac{1}{2} \frac{T^2(cT_0^2 + c^2\beta_2 z + \beta_2 z)}{(T_0^2 + c\beta_2 z)^2 + \beta_2^2 z^2} + \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[ \frac{\beta_2 z}{T_0^2 + c\beta_2 z} \right] \quad (8)$$

$$\delta\omega = -\frac{\partial\varphi}{\partial T} = \frac{(cT_0^2 + c^2\beta_2 z + \beta_2 z)T}{(T_0^2 + c\beta_2 z)^2 + \beta_2^2 z^2} \quad (9)$$

(7) 式表明, 当  $c > 0$ , 即初始啁啾为正时, 在  $\beta_2 < 0$  的负 GVD 区, 色散使脉冲经历一初始变窄的过程,  $z = z_{\min} = cT_0^2/[\beta_2(1+c^2)]$  处的脉冲最窄, 其宽度  $(T_1)_{\min} = T_0/(1+c^2)^{1/2}$ 。当  $z > z_{\min}$  时脉冲又渐展宽。 $c > 0$  情况下的脉冲初始变窄过程可以从脉冲啁啾演化的角度予以解释, 由(9)式知, 色散作用的结果导致负啁啾, 在  $z = z_{\min}$  处, 色散导致的负啁啾与初始正啁啾完全抵消, 即  $\delta\omega = 0$ , 从而导致脉冲压缩, 当  $z > z_{\min}$  时, 由于色散引起的负啁啾越来越大, 使得脉冲的净啁啾越来越大, 从而导致脉冲逐渐展宽。

有关 SPM 对脉冲的作用, 在此取  $\beta_2 = 0$ , 方程(3)变为:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{i}{L_{nl}} e^{-\alpha z} |u|^2 u \quad (10)$$

可求得其解:

$$u(z, T) = u(0, T) \exp\left\{\frac{i\chi P_0}{\alpha} |u(0, T)|^2 \times [1 - \exp(-\alpha z)]\right\} \quad (11)$$

对于初始值由(5)式给出的具有线性啁啾的高斯脉冲输入, 光纤任一位置  $z$  处的脉冲振幅、宽度、相位和啁啾分别为:

$$u(z, T) = \exp\left[-\frac{1+ic}{2} \frac{T^2}{T_0^2}\right] \times \exp\left\{\frac{i\chi P_0}{\alpha} [1 - \exp(-\alpha z)] \exp\left[-\frac{T^2}{T_0^2}\right]\right\} \quad (12)$$

$$T_1(z) = T_0 \quad (13)$$

$$\varphi(z, T) = -\frac{cT^2}{2T_0^2} + \frac{\chi P_0}{\alpha} [1 - \exp(-\alpha z)] \times \exp\left[-\frac{T^2}{T_0^2}\right] \quad (14)$$

$$\delta\omega_{\text{SPM}} = -\frac{\partial\varphi}{\partial T} = \frac{cT}{T_0^2} + \frac{2\chi P_0}{\alpha T_0^2} \times [1 - \exp(-\alpha z)] \exp\left[-\frac{T^2}{T_0^2}\right] \quad (15)$$

(12) 式、(13) 式表明, SPM 并不导致脉冲形状和宽度的变化, 由(15)式可知, SPM 使脉冲产生一个非线性的频率啁啾  $\delta\omega_{\text{SPM}}$ 。在光纤的负 GVD 区,  $\delta\omega_{\text{SPM}} > 0$  为正频率啁啾, GVD 效应导致的  $\delta\omega_{\text{GVD}}$  为负频率啁啾(相当于(9)式中  $c = 0$  时的  $\delta\omega_{\text{GVD}}$  值), GVD 和 SPM 所致啁啾的相互作用决定着对啁啾脉冲的孤子效应压缩。同时考虑 GVD 和 SPM 方程(3)有近似解<sup>[10]</sup>:

$$u(z, T) = \left[ \frac{T_0^2}{T_0^2 - i\beta_2 z (1+ic)} \right]^{1/2} \times \exp\left\{-\frac{(1+ic)T^2}{2[T_0^2 - i\beta_2 z (1+ic)]}\right\} \times \exp\left\{i\left[-\frac{cT^2}{2T_0^2} + \frac{\chi P_0}{\alpha} [1 - \exp(-\alpha z)] \times \exp\left[-\frac{T^2}{T_0^2}\right] - \frac{1}{2} \frac{T^2(cT_0^2 + c^2\beta_2 z + \beta_2 z)}{(T_0^2 + c\beta_2 z)^2 + \beta_2^2 z^2} + \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[ \frac{\beta_2 z}{T_0^2 + c\beta_2 z} \right]\right]\right\} \quad (16)$$

其与时间有关的相位隐含着中心频率为  $\omega_0$  的脉冲从中心到两侧有不同的瞬时频率, 频率之差  $\delta\omega$  为相对  $T$  的导数, 即:

$$\delta\omega = -\frac{\partial\varphi}{\partial T} = \frac{cT}{T_0^2} + \frac{\chi P_0}{\alpha} [1 - \exp(-\alpha z)] \times \frac{2T}{T_0^2} \exp\left[-\frac{T^2}{T_0^2}\right] + \frac{(cT_0^2 + c^2\beta_2 z + \beta_2 z)T}{(T_0^2 + c\beta_2 z)^2 + \beta_2^2 z^2} \quad (17)$$

(17) 式可进一步改写为:

$$\delta\omega = -\frac{\partial\varphi}{\partial T} = \frac{cT}{L_D |\beta_2| T^2 + \frac{z_{\text{eff}}}{L_{\text{nl}}} \exp\left[-\frac{T^2}{T_0^2}\right] \frac{T}{T_0^2} + \frac{(T_0^2 + c^2\beta_2 z + \beta_2 z) T}{(T_0^2 + c\beta_2 z)^2 + \beta_2^2 z^2} \quad (18)$$

由(18)式可以看出,当 $L_D$ 和 $L_{\text{nl}}$ 一定时, $\delta\omega$ 是 $z$ 和 $T$ 的函数,由于 $L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|}$ , $L_{\text{nl}} = \frac{1}{\gamma P_0}$ ,所以当 $L_D = L_{\text{nl}}$ 时有 $P_0 = \frac{\gamma T_0^2}{|\beta_2|}$ ,即要实现SPM和GVD效应同步作用,对输入功率有一定要求。由(17)式可以看出,脉冲初始峰值功率越高,SPM导致的频率啁啾越显著,SPM对脉冲的影响越大。

## 2 数值计算及结果讨论

方程(1)就是用于计算脉冲孤子效应压缩的数学模型,在同时考虑GVD、SPM、光纤损耗和初始啁啾情况下,可用分裂步长傅里叶变换法对其数值求解<sup>[11]</sup>,计算中选取有初始啁啾的高斯脉冲(当然也可以输入其它脉冲) $u(0, \tau) = N \exp\left[-\frac{1+ic}{2} \frac{\tau^2}{T_0^2}\right]$ , $N$ 为孤子阶数, $c$ 为啁啾参量,取输入脉冲宽度 $T_0 = 10\text{ps}$ ,采用光纤在 $1.32\mu\text{m}$ 处的典型参数值, $\beta_2 = -4.6\text{ps}^2/\text{km}$ , $\gamma = 1.3\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$ , $\alpha = 0.90\text{km}^{-1}$ ,程序中对初始输入脉冲取样点8192,截断 $\pm 8$ ,每孤子色散步长分别为2000步。

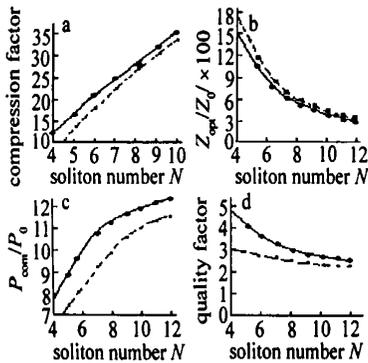


Fig. 1 Calculated properties of the first optimal narrowing by means of the soliton effect in single mode fibers as a function of soliton number  $N$

图1a~图1d给出了在初始啁啾脉冲宽度一定、初始啁啾 $c = 1.0$ 时,通过改变孤子阶数得出的脉冲压缩比、最佳光纤长度、压缩后脉冲的峰值功率比和脉冲质量的变化。这里的压缩比是指入射脉冲与压缩后脉冲的全宽度(半功率点处)之比;最佳光纤长度 $Z_{\text{opt}}$ 指脉冲第1次压缩到最窄时的光纤长度;脉冲压缩质量定义为压缩后脉冲半功率点之间

的能量与输入脉冲半功率点之间能量之比。

图1a~图1d中虚线和实线分别代表有光纤损耗有初始啁啾的情况和无损耗无初始啁啾下的计算值。由图1a中可以看出,当初始啁啾 $c = 1.0$ 时,低阶孤子的压缩比增大不是很显著,按理说,初始正啁啾附加于SPM所致的正频率啁啾上增强了SPM相对于GVD的作用,脉冲压缩比应明显增大,正由于损耗的存在,使入纤脉冲在振幅衰减的同时又展宽,SPM的作用因脉冲幅度的衰减在一定程度上被削弱,而脉冲的展宽又强化了GVD的作用,相当于GVD负啁啾的增大,从而使得低阶孤子压缩比增大不显著。随着入纤脉冲峰值功率的增大,即孤子阶数的增大,损耗在入纤峰值功率中所占的权重减小,SPM随入纤峰值功率的增大而增强,初始正啁啾在SPM中所占的权重减小,总体结果是脉冲峰值功率增大,损耗和初始正啁啾对压缩比的影响变得越来越小。图1b示出在相同条件下,最佳光纤长度随孤子阶数变化的关系,与图1a情况类似,在低阶孤子输入时,因损耗对SPM的削弱以及脉冲的展宽使得最佳光纤长度较无损耗无啁啾时有所加长,随着孤子阶数的增大,这种加长因SPM的增强而得到遏制,好在孤子效应压缩入纤脉冲峰值功率都较高,即孤子阶数都要求较大,最佳光纤长度在高阶孤子时非常接近无损耗无啁啾情况。这里的计算结果和理论是相符的。这正是损耗导致脉冲展宽、最佳光纤长度增加的作用被初始正啁啾导致光纤最佳长度减小的作用相互抵消的结果。随着孤子阶数的增加最佳光纤长度几乎无变化。图1c表明,损耗对压缩后的峰值功率与入射初始峰值功率的比值在低阶孤子输入时影响较明显,而且在无损耗无初始啁啾时此比值的极大值出现在附近,而有损耗有初始啁啾时出现在附近。这正说明了损耗导致脉冲峰值功率损失,从而导致SPM相对GVD对脉冲作用比不计损耗时有所减弱,为了抑制损耗对脉冲孤子效应压缩的影响,必须在适当提高入纤脉冲的峰值功率的同时预制脉冲的初始正啁啾以改善压缩效果。图1d给出的是压缩质量与脉冲初始峰值功率的关系:损耗对压缩质量的不良影响被初始正啁啾抑制。压缩质量与无损耗无初始啁啾的理想情况差别不大。同样,随着孤子阶数增大,二者对压缩质量的影响逐渐减小。

图1a~图1d的共同点是当损耗一定时,对于给定的初始啁啾,随着孤子阶数增大,对压缩参量的影响越来越小。这是由于随着孤子阶数的增大,光

纤的非线性效应相对于损耗和初始啁啾的影响越来越占主导地位。

图2是在计及损耗条件下初始正啁啾对给定的初始峰值功率脉冲孤子效应压缩的影响。图2a~图2d是当 $N=6$ 时,各压缩参量随初始啁啾的变化关系。从图2a和图2c中可明显看出,脉冲压缩比和压缩后脉冲峰值功率与初始峰值功率比随初始啁啾增大几乎成线性增加。图2b表示最佳光纤长度随初始啁啾增大而减小,图2d中,初始啁啾的增大则导致压缩质量的明显提高。当初始啁啾大于10以后,压缩质量向1趋近。

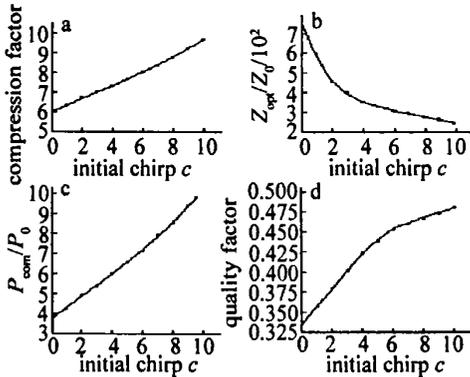


Fig. 2 Calculated properties of the first optimal narrowing by means of the soliton effect in single mode fibers as a function of initial chirp  $c$

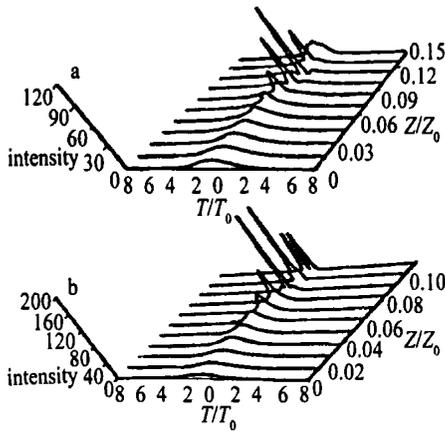


Fig. 3 Evolution of the sixth order soliton in single mode optical fiber

为了比较,图3给出无和有损耗、初始啁啾两种情况下,六阶孤子在单模光纤中的演化。图3a是无啁啾脉冲在无损耗光纤中的演化过程,对于高阶孤子,SPM和GVD共同所致频率啁啾决定着对脉冲

的调制。入纤脉冲呈现出周期性的压缩和展宽,在0.11处得到最佳压缩,随着传输距离增加,SPM与GVD失去平衡,脉峰降低、脉座展宽,在0.15处进一步展宽变形。

图3b示出在有损耗光纤中,初始正啁啾脉冲在0.1处得到最佳压缩,但由于损耗的影响,脉冲底部较宽,但与0.08处相比,脉座明显被压缩。图3b与图3a比较最佳光纤长度无明显加长,应归功于初始正啁啾对SPM的增强,遏制了损耗对最佳光纤长度的加长。至于图3b在0.11处的脉冲对称分裂,笔者认为因损耗强化了GVD与初始正啁啾强化了被损耗有所削弱的SPM二者共同作用失衡而SPM强于GVD所致的结果。

### 3 结论

在计及光纤损耗的情况下,解析分析和定量计算在单模光纤中初始啁啾对脉冲孤子效应压缩的影响。结果表明:初始正啁啾改善了损耗对压缩参量的不良影响,遏制了最佳光纤长度的增加。若选取适当的光纤长度和初始峰值功率,可以实现正啁啾脉冲在单模光纤中的有效压缩。

### 参考文献

- [1] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics. Boston: Academic Press, 1989: 125.
- [2] Gouveia Neto A S, Gomes A S L, Taylor J R. J Mod Opt, 1988, 35 (1): 7~ 10.
- [3] Mollenauer L F, Stolen R H, Gordon J P. Opt Lett, 1983, 8(5): 289~ 291.
- [4] Dianov E M, Nikonova Z S, Prokhorov A M *et al.* Sov Tech Phys Lett, 1986, 12(6): 311~ 313.
- [5] Agtawal G P. Opt Lett, 1990, 15(4): 224~ 226.
- [6] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics. Boston: Academic Press, 1989: 256~ 258.
- [7] Mollenauer L F, Stolen R H, Gordon J P. Opt Lett, 1983, 8(5): 289~ 291.
- [8] 曹文华, 廖常俊, 刘颂豪 *et al.* 光学学报, 1993, 13(11): 1003~ 1007.
- [9] Dianov E M, Nikonova Z S, Prokhorov A M *et al.* Sov Tech Phys Lett, 1986, 12(6): 311~ 313.
- [10] 钱士雄, 王恭明. 非线性光学——原理与进展. 上海: 复旦大学出版社, 2001: 406~ 408.
- [11] 布赖姆 E O. 快速傅里叶变换. 上海: 上海科技出版社, 1979: 85~ 87.