

# 初始啁啾补偿光纤色散效应的适用范围\*

王润轩

(宝鸡文理学院物理系, 陕西宝鸡 721007)

**摘要** 以啁啾高斯脉冲在单模光纤中的传输为例, 分别就线性初始啁啾对光纤二阶和三阶色散的补偿进行了系统的理论分析和数值计算, 结果表明: 线性初始啁啾对光纤的二阶色散(线性色散)有一定的补偿作用, 但不能有效地用于三阶色散的补偿.

**关键词** 初始啁啾; 单模光纤; 色散补偿

**中图分类号** TN929.1 **文献标识码** A

## 0 引言

光纤色散已成为光通信系统进行升级、扩容的主要障碍, 如何解决这一问题是目前光通信领域的研究热点之一<sup>[1,2]</sup>. 人们最初研制了零色散点位移到 1.55 μm 处的色散位移光纤, 继而又研制了兼顾色散和非线性两种要素的 G. 652 光纤, 但由于非线性效应, 这两种光纤在密集波分复用系统中的应用受到限制. 可见, 改变光纤的零色散点并不能从根本上解决色散问题. 要开发已有光通信系统的潜力, 在 G. 652 光纤上开通高速系统, 关键问题是色散补偿, 现已提出许多色散补偿方案. 目前一般是采用色散补偿光纤(DCF)进行色散管理来解决这一问题, 但现有色散补偿光纤进行色散补偿存在大损耗、低色散、容易产生非线性与色散斜率不匹配的缺陷<sup>[3~6]</sup>. 另一种是用外调制产生具有初始啁啾的光脉冲来改善光纤色散, 是在传输前给脉冲加一定的啁啾, 使脉冲进入传输光纤以后以更快的速度散开, 从而降低非线性效应的影响<sup>[6~8]</sup>. 本文以具有初始啁啾的高斯脉冲在普通单模光纤中的传输为例, 用近似解析、数值方法分别就初始啁啾对光纤二阶、三阶色散效应的补偿进行系统的分析研究, 给出了初始啁啾补偿光纤二阶、三阶色散的适用范围和条件, 解析与数值结果相符.

## 1 理论模型与分析

皮秒光脉冲在单模光纤中的传输由下列非线性薛定谔方程支配

$$\frac{\partial A}{\partial Z} + \frac{1}{2}\alpha A + \frac{1}{2}i\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} = i\gamma |A|^2 A \quad (1)$$

式中  $A$  为脉冲的慢变包络复振幅,  $Z$  为传输距离,  $\alpha$

为光纤的损耗系数,  $\gamma$  为非线性系数,  $\beta_2$ 、 $\beta_3$  分别为光纤二阶、三阶色散系数. 为了阐释脉冲初始啁啾补偿单模光纤色散效应的机理、适用范围和条件, 我们选取具有初始啁啾的高斯脉冲作为输入脉冲, 依其在单模光纤中的传输效果进行分析.

归一化具有初始啁啾的高斯脉冲由

$$U(0, T) = \exp\left(-\frac{1+iC_0}{2} \frac{T^2}{T_0^2}\right) \quad (2)$$

表征, 式中  $C_0$  为初始啁啾参量, 因是定值, 故称线性初始啁啾,  $T_0$  为脉冲宽度. 对式(2)进行从时域到频域的傅里叶变换, 可以得到具有初始频率啁啾高斯脉冲的频率响应为

$$U(0, \omega) = \frac{(2\pi T_0^2)^{1/2}}{(1+C_0^2)^{1/4}} \exp\left[-\frac{\omega^2 T_0^2}{2(1+C_0^2)}\right] \cdot \exp\left[i\frac{1}{2}\left(\frac{\omega^2 T_0 C_0}{1+C_0^2} - \arctan C_0\right)\right] \quad (3)$$

为直观脉冲初始啁啾与光纤色散的关系, 这里忽略光纤损耗和非线性效应, 传输方(1)变为

$$i \frac{\partial U}{\partial Z} = \frac{1}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 U}{\partial T^2} + \frac{i}{6}\beta_3 \frac{\partial^3 U}{\partial T^3} \quad (4)$$

由此可得, 只计色散参量的单模光纤的传递函数为

$$V(Z, \omega) = \exp\left[\frac{i}{2}\beta_2 \omega^2 Z - \frac{i}{6}\beta_3 \omega^3 Z\right] \quad (5)$$

式中  $\omega$  为光频, 经过光纤色散作用, 输出脉冲的频率响为

$$U(Z, \omega) = U(0, \omega) V(Z, \omega) = \frac{(2\pi T_0^2)^{1/2}}{(1+C_0^2)^{1/4}} \cdot \exp\left[\frac{i}{2}\left(\frac{\omega^2 T_0^2}{1+C_0^2} - \arctan C_0\right) + \frac{i}{2}\beta_2 \omega^2 Z - \frac{i}{6}\beta_3 \omega^3 Z\right] \quad (6)$$

利用式(6)的结果, 可以得出具有初始啁啾的高斯脉冲在光纤中传输时的展宽因子

$$Q = \frac{\sigma}{\sigma_0} = \left[ \left[ 1 + \frac{C_0 \beta_2 Z}{T_0^2} \right]^2 + \left[ \frac{\beta_2 Z}{T_0} \right]^2 + (1+C_0) \left[ \frac{\beta_3 Z}{2T_0^3} \right]^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

\*陕西省教育厅(04JK121; 0203011)与宝鸡文理学院(JK2305; ZK2315)基金资助  
Tel: 0917-3364192 Email: wangrunxuan53629@163.com  
收稿日期: 2003-11-03

式中  $\sigma_0$  为啁啾高斯脉冲的初始均方根宽度,  $\sigma$  为传输中的均方根宽度.

对式(6)利用逆快速傅里叶变换进行数值处理,便可给出随传输距离而变化的脉冲波形. 而由式(7),可以给出展宽因子随传输距离变化的图解.

为便于分析讨论,下面把初始啁啾与二阶色散效应关系及三阶色散效应的关系分别予以考虑.

## 2 初始啁啾与单模光纤色散效应的关系

### 2.1 初始啁啾与单模光纤二阶色散效应的关系

几十皮秒的光脉冲在单模光纤中传输时,相对二阶色散而言,三阶色散可以忽略,即令式(4)中  $\beta_3 = 0$ ,方程式(4)变为

$$i \frac{\partial U}{\partial Z} = \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 U}{\partial T^2} \quad (8)$$

这是一个非线性方程,利用傅里叶变换将其变为常微分方程,将式(2)表征的具有初始啁啾高斯脉冲输入,光纤中传输脉冲的光波场为

$$U(Z, T) = \frac{T_0}{[(T^2 + C_0 \beta_2 Z)^2 + (\beta_2 Z)^2]^{1/4}} \cdot \exp \frac{-T_0^2 T^2}{2(T_0^2 + C_0 \beta_2 Z)^2 + (\beta_2 Z)^2} \cdot \exp \left\{ \frac{i}{2} \left[ -\frac{T^2(\beta_2 Z - C_0 T_0^2 + C_0^2 \beta_2 Z)}{(T_0^2 + C_0 \beta_2 Z)^2 + (\beta_2 Z)^2} + \arctan \frac{\beta_2 Z}{T_0^2 + C_0 \beta_2 Z} \right] \right\} \quad (9)$$

式中相位

$$\varphi(Z, T) = \frac{1}{2} \left[ \frac{T^2(\beta_2 Z - C_0 T_0^2 + C_0^2 \beta_2 Z)}{(T_0^2 + C_0 \beta_2 Z)^2 + (\beta_2 Z)^2} + \arctan \frac{\beta_2 Z}{T_0^2 + C_0 \beta_2 Z} \right] \quad (10)$$

与时间有关,隐含了中心频率为  $\omega_0$  的脉冲从中心到两侧有不同的瞬时频率啁啾,频率差  $\delta\omega = \omega - \omega_0 = -\frac{\partial \varphi}{\partial T}$  称之为频率啁啾

$$\delta\omega = \frac{\partial \varphi(Z, T)}{\partial T} = \frac{2T(\beta_2 Z - C_0 T_0^2 + C_0^2 \beta_2 Z)}{(T_0^2 + C_0 \beta_2 Z)^2 + (\beta_2 Z)^2} \quad (11)$$

从式(11)可以看出,初始啁啾与脉宽是线性关系. 这里存在着频率啁啾的相互作用. 当  $C_0 = 0$ , 即无初始频率啁啾的高斯脉冲在单模光纤中由线性群速度色散(GVD)所致频率啁啾为

$$\delta\omega_{\text{GVD}} = \frac{2T(\beta_2 Z + 0 + 0)}{(T_0^2 + 0) + (\beta_2 Z)^2} = \frac{2 \text{sgn} \beta_2 \frac{Z}{L_{\text{d}}} T}{1 + \left(\frac{Z}{L_{\text{d}}}\right)^2} \frac{T}{T_0^2} \quad (12)$$

在反常色散区( $\beta_2 < 0$ ),  $\delta\omega_{\text{GVD}} < 0$  是负频率啁啾,它与

高斯脉冲初始具有的频率啁啾  $\delta\omega = -\frac{\partial \varphi(0, T)}{\partial T} = C_0$

相互作用有两种结果:当  $C_0 > 0$  时,即  $C_0 \beta_2 < 0$  的情况是脉冲净啁啾减小了,脉冲有一窄化过程,随着传输距离的增加,线性群速度色散所致频率啁啾相对脉冲初始正频率啁啾占主导地位,脉冲展宽;另一种情况是,当  $C_0 < 0, C_0 \beta_2 > 0$ ,即线性群速度色散所致的频率啁啾与脉冲初始频率啁啾同号,结果是脉冲净啁啾增加了,脉冲迅速展宽,传输效果急剧恶化,在光纤正色散区亦然. 当  $C_0 = 0$  时,即无初始啁啾脉冲随传输距离的增加缓慢展宽. 图1是初始峰值功率  $P_0 = 0.1 \text{ W}, T_0 = 40 \text{ ps}, \beta_2 = -16, \beta_3 = 0$  情况下  $C_0 = -10$  的高斯脉冲的传输,其中初始脉宽和频率均用  $T_0$  归一化,传输距离以  $L_{\text{d}} = T_0^2 / |\beta_2| = 100 \text{ km}$  归一化. 上述分析、模拟与图2按  $C_0 = \pm 10, T_0 = 40 \text{ ps}, \beta_2 = \pm 16, \beta_3 = 0, L_{\text{d}} = T_0^2 / |\beta_2| = 100 \text{ km}$  给出的展宽因子图解完全相符. 研究表明:只有在  $C_0 \beta_2 < 0$  的情况下,初始线性啁啾对二阶色散(线性色散)有一定补偿作用.

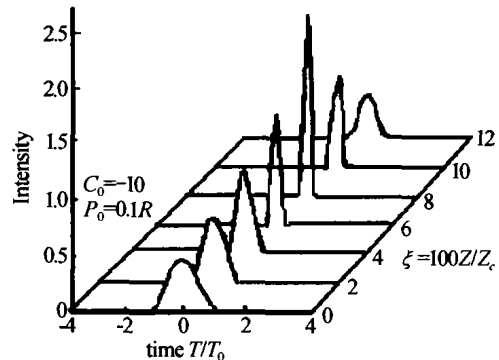


图1 初始啁啾  $C_0 = -10$  的高斯脉冲波形的演化  
Fig. 1 Evolution of Gauss pulse share, which has a linear chirp with chirp parameter of  $C_0 = -10$

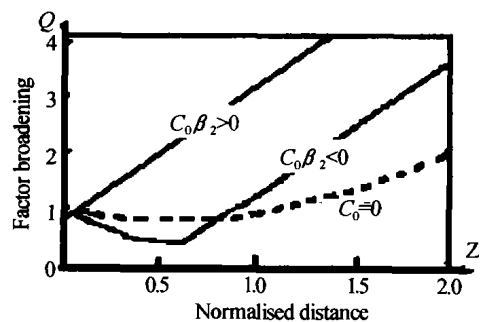


图2 展宽因子随传输距离的变化  
Fig. 2 Evolution of factor broadening with transmission distance

### 2.2 初始啁啾与单模光纤三阶色散效应的关系

当脉冲减小到 10 ps 以下时,三阶色散效应对脉冲的影响与二阶色散同等重要,因此有必要讨论脉冲初始啁啾与三阶色散效应的关系,此处,忽略二阶色散效应,即令  $\beta_2 = 0$ ,图3是取  $\beta_3 = \pm 0.125, T_0 = 5 \text{ ps}, L_{\text{d}} = 1000 \text{ km}$  而  $C_0 = 0$  即无啁啾高斯脉冲

传输 400 km 时的波形,图 4 是在图 3 其他参量不变,而  $C_0 = \pm 5$  高斯脉冲传输 400 km 的波形. 图 5 是展宽因子图解. 分析由图 3 ~ 图 4 所示的演化过程可以得出如下结论:当初啾啾为零时,三阶色散使脉冲展宽很小;但以具有初始啾啾高斯脉冲输入时,三阶色散使传输脉冲并未出现类似二阶色散情况下那样的窄化过程,而是脉冲的迅速展宽,初始啾啾加剧了脉冲在单模光纤中传输效果的恶化;三阶色散对传输脉冲的影响是波形变得不对称,峰值发

生移动,边沿部产生振荡结构,继而使脉冲在传输过程中向外辐射能量;改变三阶色散参量  $\beta_3$  的正负,振荡结构在不同侧边沿出现,而展宽因子不变,可见这种不利与三阶色散参量的正负无关;边沿振荡是脉冲展宽的直接原因,初始啾啾强化了三阶色散引起的脉冲边沿振荡,加剧了脉冲传输效果的进一步恶化. 原因在于三阶色散引起的频率啾啾是非线性的,演化过程极为复杂,简单的用线性啾啾难以实现对其补偿.

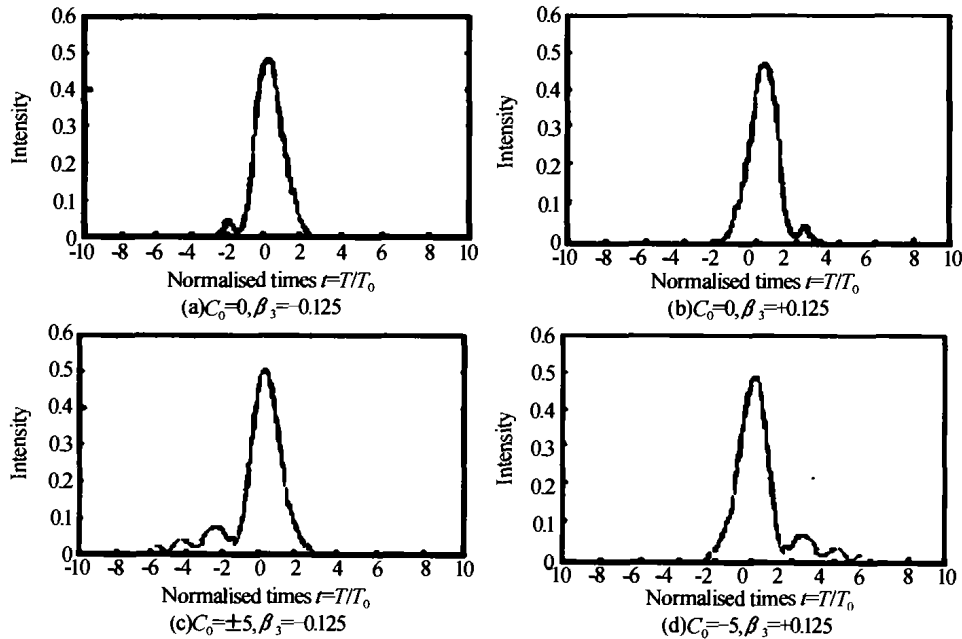


图 3 初始啾啾不同时的高斯脉冲在单模光纤中传输 400 km 后的波形

Fig. 3 The pulses shape of different initial chirp Gauss pulse after transmitting 400 km in single - mode optical fiber

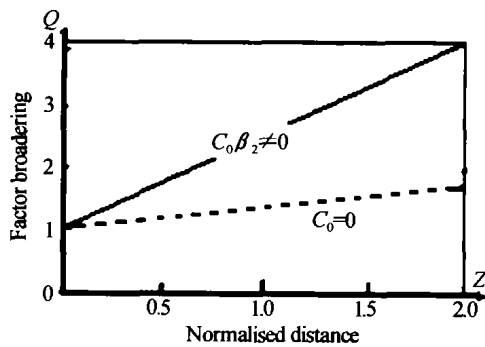


图 4 展宽因子随传输距离的变化

Fig. 4 Evolution of factor broadening with transmission distance

考虑二阶、三阶色散效应,进行系统的合理配置,可望达到最佳补偿.

参考文献

- 1 Edir S G, Shan X. 40 Gb/s straight line RZ data transmission over 240 km of standard fiber. *Electron Lett*, 2000, **36**(1): 19 ~ 20
- 2 Baghdadi J A, Safaai-Jazi A, Hattori H T. Optical fibers with low nonlinearity and low polarization-mond dispersion for ferabit communications. *Optics & Laser Technology*, 2001, **33**(5): 285 ~ 291
- 3 吴强,余重秀,辛雨,等. 16X10G/S 啾啾光纤光栅色散补偿系统性能研究. *光子学报*, 2003, **32**(4): 451 ~ 453  
Wu Q, Yu C X, Xin Y, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(4): 451 ~ 453
- 4 李宁,洪小斌,张晓光,等. 色散补偿技术中超短脉冲传输特性研究. *光子学报*, 1999, **28**(12): 1091 ~ 1095  
Lin N, Hong X B, Zhang X G, et al. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(12): 1091 ~ 1095
- 5 郭淑琴,肖燕,薛文瑞,等. 皮秒脉冲在零平均色散光纤链的传输的数值模拟. *量子光学学报*, 2000, **6**(3): 105 ~ 109  
Guo S Q, Xiao Y, Xue W R, et al. *Acta sinica Quantum*

3 结论

利用初始啾啾补偿单模光纤色散效应有一定适用范围、受到一定条件限制,仅当  $C_0\beta_2 < 0$  的条件下,线性初始啾啾对于脉冲的二阶色散(线性色散)有一定的补偿作用,而对于三阶色散,线性初始啾啾非但不能进行色散补偿,反而加剧了三阶色散对脉冲传输的不良影响. 这是由于三阶色散效应所致的非线性啾啾变化是极其复杂的,不能简单地用初始线性啾啾予以补偿. 在实际光纤通信系统中,综合

- Optical, 2000, 6(3): 105 ~ 109
- 6 李智红, 娄采云, 高以智. 40 Gb/s 窄脉冲预啁啾归零码色散管理传输. 光学学报, 2002, 22(8): 937 ~ 941  
Li Z H, Lou C Y, Gao Y Z. *Acta Optical Sinica*, 2002, 22(8): 937 ~ 941
- 7 王丽珍, 王晶, 任志君. 色散缓变光纤中不同群色散剖面下的啁啾. 光子学报, 2004, 33(2): 183 ~ 186  
Wang L Z, Wang J, Ren Z J. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(2): 183 ~ 186
- 8 李淑青, 李录, 李仲豪, 等. 含自频移啁啾超短脉冲间相互作用的数值研究. 光子学报, 2004, 33(7): 862 ~ 866  
Li S C, Li L, Li Z H, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(7): 862 ~ 866

## The Applicability Of Initial Chirp Compensating For Fiber Dispersion Function

Wang Runxuan

Dept. Phys., Baoji College of Arts and Science, Shaanxi Baoji 721007

Received date: 2003-11-03

**Abstract** Taking the transmission of Gauss pulse with initial chirp through Single-mode optical fiber as an example, the theoretical analysis and numerical calculation of the compensation the linear initial chirp having on the second-order and third-order dispersion are made. It is shown that the linear initial chirp has some compensation to the second-order dispersion (linear dispersion), but that the third-order dispersion can't be compensated by the initial chirp simply.

**Keywords** Initial chirp; Single-mode fiber; Dispersion compensation



**Wang Runxuan** a professor, was born in 1953 in Shaanxi province. He finished education in Baoji College of Arts and Science. Now his research is optical communication.