

文章编号: 1001-3806(2005)01-0109-04

## 初始啁啾补偿光纤色散效应的数值研究

王润轩

(宝鸡文理学院 物理系, 宝鸡 721007)

**摘要:** 以具有初始啁啾的高斯脉冲在单模光纤中的传输为例, 分析、计算了线性初始啁啾对光纤二阶、三阶色散效应的影响, 指出了初始啁啾进行色散补偿的适用范围和条件, 并对二阶、三阶色散完全补偿光纤链路中 40Gbit/s 短脉冲传输效果进行了数值计算, 结果表明, 依据入射功率选择合适的初始啁啾, 能使脉冲稳定传输距离大幅提升。

**关键词:** 初始啁啾; 单模光纤; 色散补偿; 数值模拟

中图分类号: TN929.1 文献标识码: A

### Numerical study of initial chirp compensating for fiber dispersion function

WANG Run-xuan

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

**Abstract** Taking the transmission effect of Gaussian pulse with initial chirp passing through a single-mode fiber as an example, the respective relations between linear initial chirp and first-order and high-order dispersion function of single-mode fiber are discussed systematically by means of theoretical analysis and numerical calculation. The sphere and conditions of applying initial chirp to dispersion compensation are pointed out. In a second order dispersion and third order dispersion compensation optical fiber links system, 40Gbit/s Gaussian pulse transmission is simulated. It is concluded that as the second order dispersion compensation can avoid pulse broadening, the third order dispersion compensation can not only avoid pulse broadening but also eliminate pulse edges oscillating and temporal shift of pulse peak.

**Key words** initial chirp; single-mode fiber; dispersion compensation; numerical simulation

## 引 言

为了满足日益增长的社会信息需求, 光纤通信正朝着高码率、多信道、长距离和全光网络化方向发展, 限制光纤向高速率、大容量、长距离的主要因素是光纤的损耗、色散和非线性。掺铒光纤放大器 (EDFA) 的商用, 使光纤损耗问题基本得以解决, 喇曼放大器的成功研制, 为克服光纤损耗和非线性又开辟了新的途径, 而光纤色散便成为高速光纤通信 (10Gbit/s 以上) 必须解决的重要问题之一。大多数已铺设的光纤是高色散的单模光纤, 在 40Gbit/s 传输速率上, 如不采用色散补偿技术会使传输距离限制在几公里之内, 即使采用孤子传输也只几十公里<sup>[1-3]</sup>。因此, 研究如何在普通单模光纤线路上采用色散补偿技术、传输高速光孤子脉冲、实现系统升级具有重要的理论和现实意义<sup>[4-11]</sup>。鉴于预啁啾技术在补偿光纤色散方面的简

单易行, 本文中就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、数值模拟方法分别就初始啁啾与光纤二阶、三阶色散效应的关系进行全面分析讨论, 并对二阶、三阶色散完全补偿光纤链路的 40Gbit/s 短脉冲传输最远距离与初始啁啾的关系进行了数值计算, 研究表明: 初始啁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, 初始啁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, 初始啁啾与色散共同作用, 使得脉冲在传输过程中波形变得不对称, 峰值发生移动, 脉冲边部振荡加剧, 严重恶化了传输效果; 而对于在二阶、三阶色散被完全补偿的光纤链路中 40Gbit/s 短脉冲传输而言, 依据入射功率选择合适的初始啁啾参量能使脉冲稳定传输距离大幅提升。可为现有光纤网络实现系统升级提供借鉴。

## 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:

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

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

基金项目: 陕西省教育厅专项资助项目 (03jk164)

作者简介: 王润轩 (1953-), 男, 副教授, 主要从事非线性全光通信研究。

E-mail: wangrunxuan2001@yahoo.com.cn

收稿日期: 2003-11-27; 收到修改稿日期: 2004-05-14

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, 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。

若忽略光纤的损耗和非线性效应, 即令 (1) 式中  $\alpha = 0 \quad \gamma = 0$  具有初始啁啾的高斯脉冲经过光纤色散作用后, 输出脉冲的频率响应为<sup>[12]</sup>:

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

式中,  $C_0$  为初始啁啾。利用 (2) 式的结果, 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:

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

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 (2) 式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 (3) 式, 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, 令 (1) 式中  $\beta_3 = 0$  方程 (1) 变为:

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

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, 将具有初始啁啾高斯脉冲输入, 单模光纤中传输脉冲的光波场可以表示为<sup>[11]</sup>:

$$U(Z, T) = \frac{T_0}{[ (T^2 + C_0 \beta_2 Z)^2 + (\beta_2 Z)^2 ]^{1/4}} \times \exp\left[ \frac{-T^2 T^2}{2(T_0^2 + C_0 \beta_2 Z)^2 + (\beta_2 Z)^2} \right] \times \exp\left\{ \frac{i}{2} - \left[ \frac{T^2 (\beta_2 Z - C_0 T_0^2 + C_0^2 \beta_2 Z)}{(T_0^2 + C_0 \beta_2 Z)^2 + (\beta_2 Z)^2} + \tan^{-1} \left( \frac{\beta_2 Z}{T_0^2 + C_0 \beta_2 Z} \right) \right] \right\} \quad (5)$$

其中相位:

$$\varphi(Z, T) = \frac{1}{2} \left[ \frac{T^2 (\beta_2 Z - C_0 T_0^2 + C_0^2 \beta_2 Z)}{(T_0^2 + C_0 \beta_2 Z)^2 + (\beta_2 Z)^2} + \tan^{-1} \left( \frac{\beta_2 Z}{T_0^2 + C_0 \beta_2 Z} \right) \right] \quad (6)$$

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:

$$\delta\omega = -\frac{\partial\varphi(Z, T)}{\partial T} = \frac{2T (\beta_2 Z - C_0 T_0^2 + C_0^2 \beta_2 Z)}{(T_0^2 + C_0 \beta_2 Z)^2 + (\beta_2 Z)^2} \quad (7)$$

从 (7) 式可以看出, 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:

$$\delta\omega_{\text{GVD}} = \frac{2T (\beta_2 Z + 0 + 0)}{(T_0^2 + 0) + (\beta_2 Z)^2} = \frac{2 \text{sgn} \beta_2 \frac{Z}{L_{d2}}}{1 + \left( \frac{Z}{L_{d2}} \right)^2} \frac{T}{T_0^2} \quad (8)$$

式中,  $L_{d2}$  为二阶色散长度。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。而当  $C_0 = 0$  时, 即无初始啁啾脉冲随传输距离的增加缓慢展宽。图 1 是

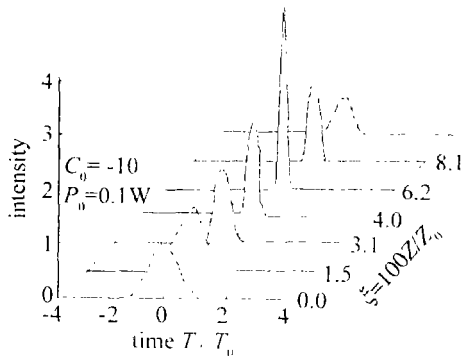


Fig 1 Evolution of Gaussian pulse shape in the fiber

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  $L_{d2} = T_0^2 / |\beta_2| = 100 \text{ km}$  归一化。上述分析、模拟与图 2 按  $C_0 = \pm 10$ ,  $T_0 = 40 \text{ ps}$ ,  $\beta_2 = \pm 16$ ,  $\beta_3 = 0$ ,  $L_{d2} = T_0^2 / |\beta_2| = 100 \text{ km}$  给

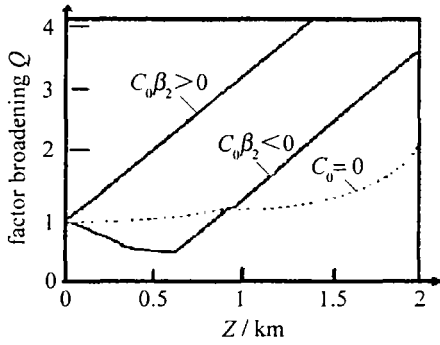


Fig 2 Evolution of factor broadening with transmission distance

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。

### 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 10ps 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  $\beta_2 = 0$  图 3 是取  $\beta_3 = \pm 0.125$ ,  $T_0 = 5\text{ps}$ ,  $L_{D3} = 1000\text{km}$  ( $L_{D3}$  为三阶色散长度), 而  $C_0 = 0$  即无啁啾高

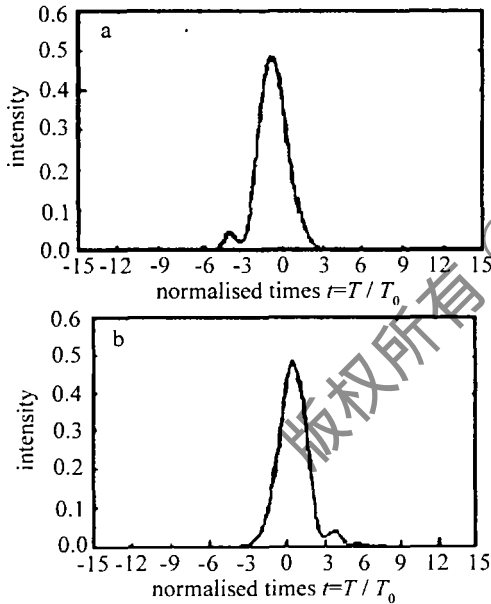


Fig 3 Pulses shape after transmitting over 400km at single-mode optical fiber  $\beta_2 = 0$ ,  $T_0 = 5\text{ps}$ ,  $L_{D3} = 1000\text{km}$ ,  $C_0 = 0$   
a- $\beta_3 = -0.125$  b- $\beta_3 = +0.125$

斯脉冲传输 400km 时的波形, 图 4 在图 3 其它参量不变, 而  $C_0 = \pm 5$  时高斯脉冲传输 400km 的波形。图 5 是展宽因子图解。分析由图 3~ 图 5 所示的演化过程可以得出如下结论: 当初始啁啾为 0 时, 三阶色散使脉冲展宽很小; 但以具有初始啁啾高斯脉冲输入时, 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, 初始啁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

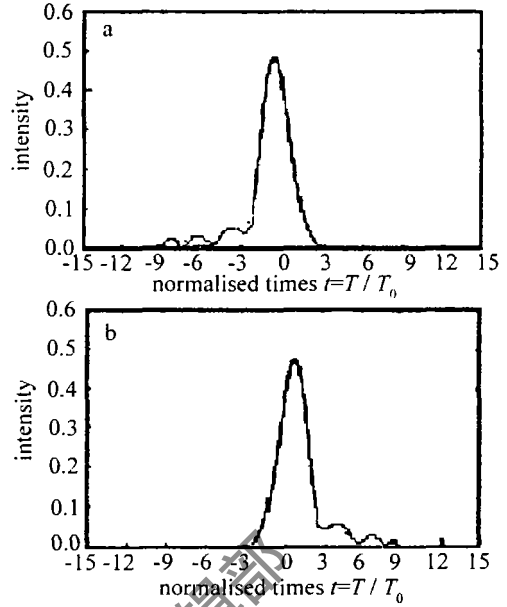


Fig 4 Pulses shape after transmitting over 400km at single-mode optical fiber  $\beta_2 = 0$ ,  $T_0 = 5\text{ps}$ ,  $L_{D3} = 1000\text{km}$ ,  $C_0 = \pm 5$   
a- $\beta_3 = -0.125$  b- $\beta_3 = +0.125$

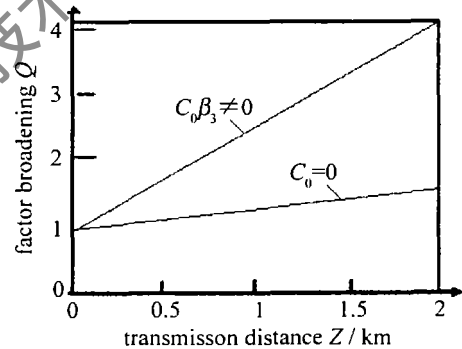


Fig 5 Evolution of factor broadening with transmission distance

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, 初始啁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啁啾是非线性的, 演化过程极为复杂, 简单的用线性啁啾难以实现对其补偿。MARCUSE 等人<sup>[13]</sup>模拟了单信道 100Gbit/s 的传输, 由于三阶色散的影响, 传输距离只有几十公里; MURAKAMI 等人<sup>[14]</sup>在传输系统中, 通过三阶色散补偿, 有效提高了高比特率的传输距离和性能; 郭淑琴等人<sup>[15]</sup>的数值研究结果表明, 预啁啾和色散管理相结合的方法可使短脉冲很好的传输。图 6 中示出二阶、三阶色散完全补偿光纤链路的 40Gbit/s 短脉冲传输最远距离与初始啁啾的关系。光纤链路分别由两段正负二阶和正负三阶依次级联而成。图 6 中的 3 条曲线分别相应入射脉冲平均功率为 0dBm, 4dBm, 8dBm 的情况, 由图可以看出, 每种情况都对应

着一个初始啁啾参量的最佳值,且该值随入射功率的不同而变化。依据入射功率选择合适的初始啁啾参量

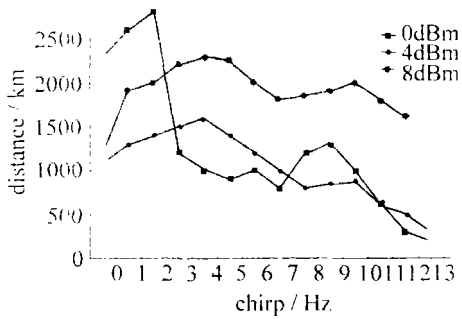


Fig 6 Function of the maximum transmission distance and pulse chirping

能使传输距离大幅提升,如图 6中,当脉冲平均功率为 4dBm时,在  $C_0 = 3$  处有初始啁啾脉冲传输距离近乎是无初始啁啾脉冲的 2倍。但应注意到,初始啁啾也不可太大,不然会增大脉冲的相互作用,而降低系统的传输性能。

### 3 结 论

利用初始啁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,线性初始啁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,线性初始啁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啁啾变化是极其复杂的,不能简单地用初始线性啁啾予以补偿。在实际光纤通信系统中,要综合考虑二阶及三阶

色散效应的影响,进行合理配置,以达到最佳补偿效果。

### 参 考 文 献

- [1] 李琳,蔡海文,赵玲 *et al*. 动态色散补偿技术的研究进展 [J]. 激光技术, 2002, 26(3): 194~197.
- [2] 何琼,王晶. 色散管理孤子的传输特性 [J]. 激光技术, 2002, 26(5): 367~372.
- [3] 毛幼菊,汪学强. WDM + EDFA + DCF 光纤传输系统中色散补偿方案的分析 [J]. 激光杂志, 1999, 20(6): 26~31.
- [4] HASEGAWA A. Soliton-based optical communications: an overview [J]. Selected Topics in Quantum Electron, 2000, 6(6): 1161~1171.
- [5] 吴强,余重秀,辛雨 *et al*. 16×10Gbit/s啁啾光纤光栅色散补偿系统性能研究 [J]. 光子学报, 2003, 32(4): 451~453.
- [6] 刘宏展,袁明辉,曹文华. 光纤中基于互相位调制效应的超短光脉冲的产生 [J]. 光子学报, 2003, 32(6): 731~734.
- [7] 张书敏,徐文成,罗爱平 *et al*. 色散缓变光纤中飞秒光脉冲的增强压缩 [J]. 中国激光, 2001, 28(7): 599~602.
- [8] AGRAWAL G P. Effect of intrapulse stimulated Raman scattering on soliton-effect pulse compression in optical fibers [J]. Opt Lett 1990, 15(4): 224~226.
- [9] 徐文成,廖常俊,郭旗 *et al*. 色散缓变光纤对皮秒孤子的压缩效应 [J]. 光子学报, 1994, 23(3): 233~239.
- [10] 张银英,戴恩光,吴德明 *et al*. 光脉冲初始啁啾对单模光纤色散效应的影响 [J]. 光通信研究, 2002, 109(1): 41~48.
- [11] 林宁,洪小斌,张晓光 *et al*. 色散补偿技术中超短脉冲传输特性的研究 [J]. 光子学报, 1999, 28(12): 1091~1095.
- [12] 王润轩. 皮秒正啁啾脉冲的孤子效应压缩 [J]. 量子电子学报, 2003, 20(6): 741~745.
- [13] MARCUSE D, MENVUK C R. Simulation of single-channel optical systems at 100 Gbit/s [J]. J Lightwave Technol 1999, 17(4): 565~567.
- [14] MURAKAM IM, MAI M T. Long-haul 16×10Gbit/s WDM transmission experiment using higher order fiber dispersion management technique [J]. IEEE Photon Technol Lett 1999, 11(7): 898~900.
- [15] 郭淑琴,李仲豪,肖燕 *et al*. 啁啾光脉冲在高阶色散控制光纤链中的稳定传输 [J]. 中国激光, 2001, 28(7): 645~649.
- [16] metric particles [J]. JO S A, 1991, A8(6): 871~882.
- [17] AO Ch O, KONG JA. Analytical approximations in multiple scattering of electromagnetic waves by aligned dielectric spheroids [J]. JO S A, 2002, A19(6): 1145~1156.
- [18] SKAROPOULOS N C, RUSSCHENBERG W J. Light scattering by arbitrarily oriented rotationally symmetric particles [J]. JO S A, 2002, A19(6): 1583~1591.
- [19] LOCK JA. Role of the tunneling ray in near-critical-angle scattering by a dielectric sphere [J]. JO S A, 2003, A20(3): 499~507.
- [20] deHULSTH C. Light scattering by small particles [M]. New York: John Wiley & Sons, 1957, 128~130.
- [21] BOHREN C F, HUFFMAN D R. Absorption and scattering of light by small particles [M]. New York: John Wiley & Sons, 1983, 100~101.
- [22] MUNDY W C, ROUX J A, SMITH A M. Mie scattering by spheres in an absorbing medium [J]. JO S A, 1974, 64(12): 1593~1597.
- [23] CHYLEK P. Light scattering by small particles in an absorbing medium [J]. JO S A, 1977, 67(4): 561~562.

(上接第 67页)

### 3 Conclusion

It is very interesting to study the scattering of a spherical particle. In this simulation, the scattering intensity distribution is obtained when the size and the complex refractive index were changed. The polarization properties of different size particles were also analyzed. From these properties, it is feasible to detect and distinguish from different particles.

### References

- [1] PROBERT-JONES J R. Resonance component of backscattering by large dielectric spheres [J]. JO S A, 1984, A1(8): 822~830.
- [2] MISHCHENKOM. Light scattering by randomly oriented axially sym-