

文章编号 : 0253-2239(2001)06-0652-04

皮秒脉冲传输系统中三阶色散补偿的研究*

郭淑琴¹⁾ 薛文瑞¹⁾ 李仲豪²⁾ 周国生²⁾³⁾

(1), 山西大学物理系, 太原 030006
(2), 山西大学电子系, 太原 030006
(3), 北京大学“区域光纤通信网与相干光纤通信”国家重点实验室, 北京 100871

摘要: 模拟了皮秒高斯光脉冲在理想的二阶和三阶色散都作了补偿的光纤链中的传输。结果表明, 与二阶色散补偿能消除脉冲展宽一样, 三阶色散补偿不仅能防止脉冲展宽, 而且也能有效地消除脉冲边沿部的振荡结构和脉冲峰的时移。文中画出了 100 Gb/s 码率的 64 位高斯光脉冲序列在色散补偿光纤链中传输 2000 km 后的眼图, 由眼图的清晰程度可看出这种补偿系统对改善短脉冲传输的有效性。

关键词: 光通讯; 光纤链; 三阶色散补偿

中图分类号: TN25 文献标识码: A

1 引 言

随着信息时代的到来, 需要传递的信息量在日益增加, 人们对光纤传输的信息容量的要求越来越高, 尽管波分复用、时分复用及二者相结合的技术已经可以使系统容量达 Tb/s 量级, 但人们对如何提高单信道的容量仍保持着浓厚的兴趣。在光纤通讯中, 损耗和色散是影响脉冲传输及信道容量的两大障碍, 使用掺铒光纤放大器实现损耗补偿以后, 色散就成为限制传输距离和传输容量的主要原因。因此, 色散补偿成为光纤传输领域的一个研究热点。为了消除色散导致的脉冲展宽, 已经提出的技术有: 利用色散补偿光纤或啁啾光纤光栅进行色散补偿, 频谱反转, 预啁啾和光纤孤子传输等。这些技术各有优缺点, 其中色散补偿最容易实现, 也是人们研究较多的一种方法^[1,2]。

当几十皮秒的脉冲在标准单模光纤(SMF)和色散补偿光纤(DCF)组成的补偿光纤链中传输时, 由于二阶色散量较大, 人们经常忽略了高阶色散对脉冲传输的影响, 但是随着脉冲宽度下降到 10 ps 以下, 由于较大的本地色散, 脉冲展宽严重, 这种传统的补偿系统不太适用, 必须采用非零色散位移光纤(NZ-DSF)组成的光纤链。在这种新的补偿光纤链中, 由于二阶色散很小, 那么三阶色散对脉冲的影

响就不能忽略了。正如文献[3]中指出的那样, 三阶色散使脉冲在传输过程中展宽, 使脉冲产生峰的时移和边沿部的振荡, 三阶色散的这种作用会大大损伤皮秒脉冲在非零色散位移光纤中传输时的脉冲质量, 造成传输过程中误码率的增高。最近, Takushima 等人^[4]在考虑三阶色散影响的情况下, 在实验上实现了 3 ps 色散控制孤子传输了 80 km 而波形基本不变, Marcuse 等人^[5]也模拟了单信道 100 Gb/s 的高码率传输, 但他们没有讨论高阶色散的补偿问题。本文讨论单信道 100 Gb/s 传输码率的光脉冲在由非零色散位移光纤组成的补偿光纤链中的传输情况, 采用二阶色散和三阶色散量符号都相反(相互补偿)的两种非零色散位移光纤组成补偿光纤链。对三阶色散作了补偿后, 则可在很大程度上减轻三阶色散所带来的损害作用。

2 理论模型及计算方法

皮秒脉冲在光纤中传输的非线性薛定谔方程为:

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

式中 z 为脉冲在光纤中传输的距离, T 为随群速度移动坐标中的时间, α, γ 分别为光纤的损耗和非线性系数, $A(z, T)$ 为脉冲的慢变振幅, 作如下变换:

$$t = \frac{T}{T_0}, \quad \zeta = \frac{z}{L_a}, \quad L_{2D} = \frac{T_0^2}{|\beta_2|},$$

* 国家自然科学基金(10074041)和山西省青年基金资助课题。

$$L_{3D} = \frac{T_0^2}{|\beta_3|}, \quad U = \frac{A \exp(\alpha z/2)}{\sqrt{p_0}},$$

其中 T_0 为脉冲的初始宽度, L_a 为色散补偿周期, L_{2D} 为二阶色散长度, L_{3D} 为三阶色散长度, p_0 为脉冲的入射峰值功率。经上述变换后 (1) 式变为:

$$\frac{\partial U}{\partial \zeta} + \frac{i}{2} \operatorname{sgn}(\beta_2) \frac{L_a}{L_{2D}} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - \frac{1}{6} \frac{L_a}{L_{3D}} \operatorname{sgn}(\beta_3) \frac{\partial^3 U}{\partial t^3} = i \gamma p_0 [\exp(\alpha - \alpha L_a \zeta)] |U|^2 U. \quad (2)$$

用数值法解 (2) 式, 采用分步傅里叶变换法, 将 (2) 式写为

$$\left. \begin{aligned} \partial U / \partial \zeta &= (D + N)U, \\ D &= -\frac{i}{2} \operatorname{sgn}(\beta_2) \frac{L_a}{L_{2D}} \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \\ &\quad \frac{1}{6} \frac{L_a}{L_{3D}} \operatorname{sgn}(\beta_3) \frac{\partial^3}{\partial t^3}, \\ N &= i \gamma p_0 [\exp(-\alpha L_a \zeta)] |U|^2. \end{aligned} \right\} (3)$$

光脉冲在光纤中由 ζ 传输到 $\zeta + \Delta\zeta$ 可分两步计算, 在前半步中只有色散算符起作用, 在后半步中也只有色散算符起作用, 将整个长度 $\Delta\zeta$ 上的非线性作用在中点一并给以考虑。这样,

$$U(\zeta + \Delta\zeta, t) =$$

$$\mathcal{F}^{-1} \left(\exp\left(\frac{h}{2} D\right) \mathcal{F} \left\{ \exp(h * N) \times \mathcal{F}^{-1} \left[\exp\left(\frac{h}{2} D\right) \mathcal{F}\{U(\zeta, t)\} \right] \right\} \right), \quad (4)$$

对任意给定的初始脉冲 $U(0, t)$, 由线性算符 D 和非线性算符 N 可通过 (4) 式求出其传输一定距离后的脉冲形状。

3 计算结果及分析

本文主要讨论三阶色散在短脉冲传输中的损害作用以及三阶色散补偿对这种损害作用的改进, 因此对二阶色散的补偿没有作最优化设计。在补偿光纤链中考虑二阶色散完全被补偿, 即二阶色散的路径平均为零, $\beta_2 = 0$ 。在每个补偿周期末端加放大器对损耗作补偿。为清楚起见, 将光纤链中所用的参数列在下面:

色散补偿周期 $L_a = 20$ km。

第一段非零色散位移光纤 1: $\beta_2 = 0.5$ ps²/km, $\beta_3 = -0.1$ ps³/km, 长度 $L_1 = 5$ km。

第二段非零色散位移光纤 2: $\beta_2 = -0.5$ ps²/km, $\beta_3 = 0.1$ ps³/km, 长度 $L_2 = 10$ km。

第三段非零色散位移光纤 3: $\beta_2 = 0.5$ ps²/km,

$\beta_3 = -0.1$ ps³/km, 长度 $L_3 = 5$ km。

在整个光纤链中, $\alpha = 0.2$ dB/km, $\gamma = 1.27$ /(W·km)。

输入脉冲波形 $U = \exp[-(1+iC)T^2/2T_0^2]$, C 为脉冲的啁啾, 为简单起见, 认为 $C = 0$ 。初始脉宽 $T_0 = 1$ ps, 入射脉冲的峰值功率 $p_0 = 1$ mW。这样, 二阶色散长度 $L_{2D} = 2$ km, 三阶色散长度 $L_{3D} = 10$ km, 非线性长度 $L_{NL} = 787$ km, 在一个补偿周期内, 由 $L_{NL} \gg L_{2D} > L_{3D}$ 可知, 二阶色散和三阶色散的作用都相当大, 而非线性作用很弱。

3.1 单个脉冲在色散补偿光纤链中的传输

色散量按上述所给数值, 即 $\beta_2 = 0$, $\beta_3 = 0$ 。在第一个补偿周期内脉冲峰的时间移动 δT , 啁啾 C 以及脉冲半极大全宽 T_{FWHM} 随距离的变化如图 1 中 (a)(b)(c) 所示, 图 1 中 (d)(e)(f) 则是在 $\beta_2 = 0$, $\beta_3 = -0.1$ ps³/km, 即每段都没有对三阶色散作补偿时的情况。由两组图形的对比可知, 三阶色散补偿可大大改善 1 ps 脉冲在非零色散位移光纤链中的传输。

图 2 为三阶色散补偿后, 光脉冲传输 2000 km 时脉冲峰移、半极大全宽以及啁啾三个量的变化情况。由图 2 知, 传输 2000 km 后, 累积的脉冲峰移仅为 0.05 ps, 为初始脉宽的 5%, 半极大全宽压窄了 7% 左右, 可见, 三阶色散补偿对短脉冲的传输是非常有效的, 如果对脉宽、入射脉冲的峰值功率以及色散量作优化配置, 有可能获得皮秒脉冲在非零色散位移光纤链中的稳定或准稳传输。相反, 若不对三阶色散作补偿, 由于脉冲展宽、峰的时移及边沿部的振荡, 则短脉冲难以传输较远距离。

3.2 脉冲对之间的相互作用

由于三阶色散使得脉冲在传输一定距离后产生强烈的前沿或后沿振荡, 当 $\beta_3 > 0$ 时, 振荡出现在脉冲的后沿, 当 $\beta_3 < 0$, 振荡就会出现在脉冲的前沿。这样一个脉冲所产生的振荡叠加在另一个脉冲上, 会使脉冲对之间的相互作用增强。在光纤链中, 如果对二阶色散和三阶色散同时补偿, 则消除了脉冲尾部振荡, 也减弱了脉冲对之间的相互作用。图 3 是入射峰功率为 1 mW、脉宽为 1 ps 的一对间距为 5 倍脉宽的脉冲对在第一个色散补偿周期内脉冲强度随距离演变的等高线图。由图 3 可看出, 三阶色散补偿确实有效地消除了脉冲边沿部的振荡, 减弱了脉冲对之间的相互作用, 使脉冲对传输一个补偿周期后, 波型基本恢复原样。

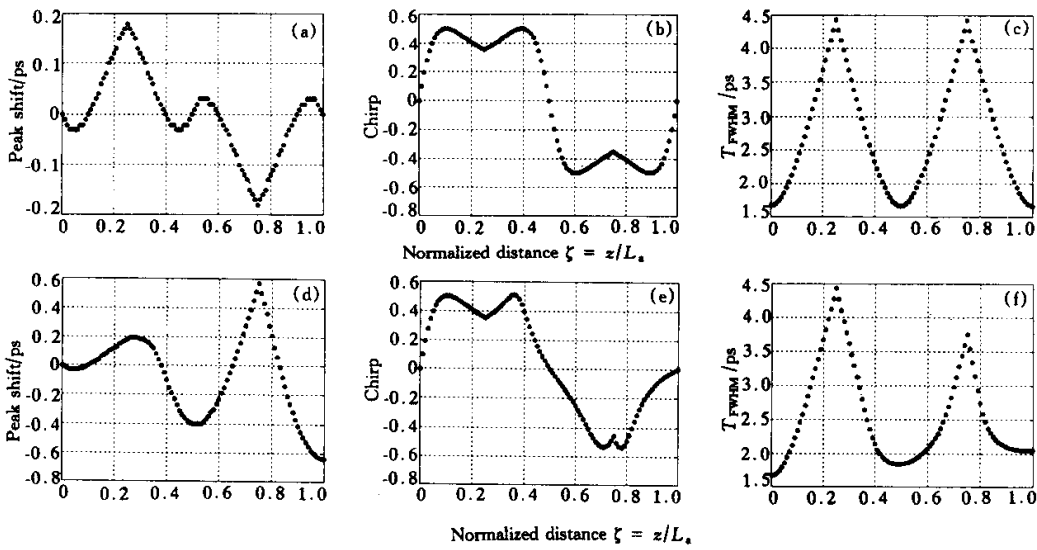


Fig. 1 Pulse's peak shift, chirp and T_{FWHM} variation comparisons in a dispersion compensation period between optical fiber links with third order dispersion compensation (TODC) and without TODC. (a), (b), (c) with TODC. (d), (e), (f) without TODC

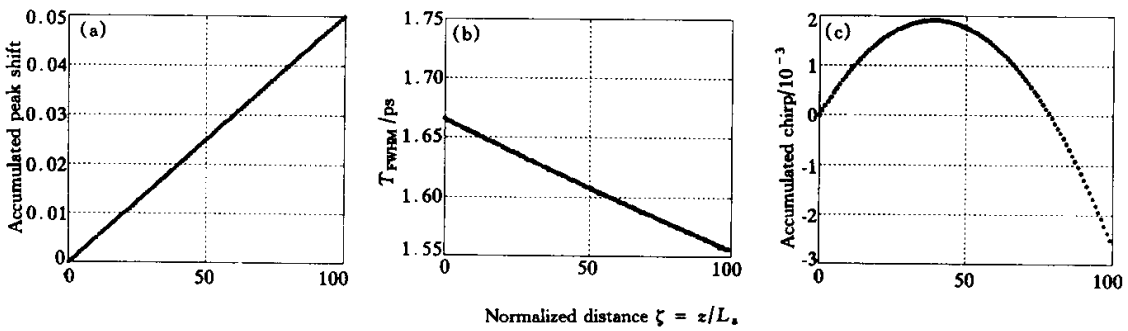


Fig. 2 After TODC, variations of accumulated peak shift (a), T_{FWHM} (b) and chirp (c) in 100 dispersion compensation periods (2000 km)

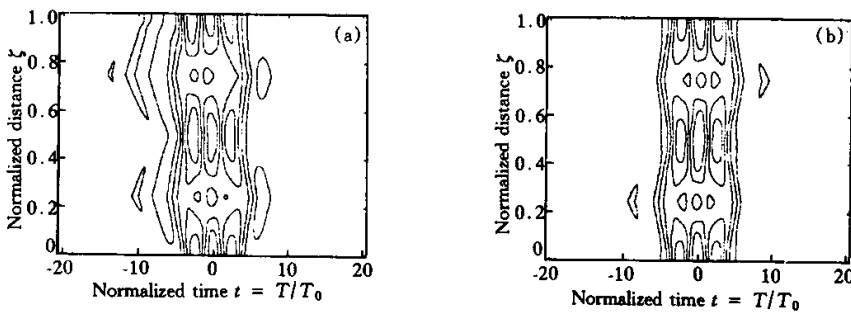


Fig. 3 Contour maps of intensity at a dispersion compensation period. (a) Without TODC, (b) With TODC

图 4 (a) 是 64 位随机码在入射峰功率为 1 mW、脉宽为 1 ps、码间距为 10 倍脉宽 (相当于 100 Gb/s) 的高斯光脉冲序列在 $\beta_2 = 0$ 、 $\beta_3 = 0$ 的光纤链中传输 2000 km 后的眼图,除了脉冲有点压窄外,眼图是相当清晰的。图 4 (b) 则是在 $\beta_2 = 0$ 、 $\beta_3 = -0.1 \text{ ps}^3/\text{km}$,即只对二阶色散进行补偿时脉冲序列传输两个周期后的眼图,可见,三阶色散没有作补偿时,不仅脉冲产生强烈的前沿或后沿振荡,而且脉冲峰值功率大大降低,脉冲展宽严重。

在大量的模拟中发现,对三阶色散补偿时,只有 $\beta_3 = 0$ 能基本上消除脉冲峰的时移, $\beta_3 > 0$ 或 $\beta_3 < 0$,即使很小的三阶色散残留量都会引起较大的脉冲峰移积累。 $\beta_3 > 0$,脉冲峰后移, $\delta T > 0$; $\beta_3 < 0$,脉冲峰前移, $\delta T < 0$ 。可见,要消除三阶色散所产生的脉冲峰移, $\beta_3 = 0$ 是较好的补偿方案。当然,要使短脉冲在非零色散位移光纤链中稳定或准稳定传输,对二阶色散补偿及非线性效应作最优设计是必要的。

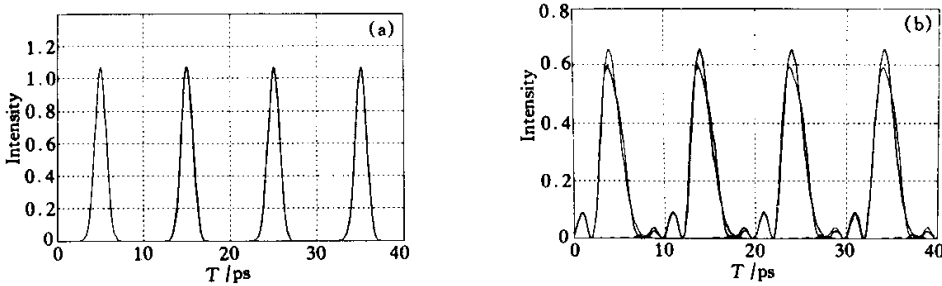


Fig. 4 Eye diagrams after transmission. (a) Optical fiber links with TODC and transmission over 100 compensation periods, (b) Optical fiber links without TODC and only transmission over 2 compensation periods

小结 三阶色散使脉冲在传输过程中形状发生畸变, 前沿或后沿由三阶色散的正负决定, 形成振荡, 部分能量会在传输时向外辐射, 同时还产生波峰的时移。为了消除三阶色散所带来的损害, 本文讨论了由非零色散位移光纤组成的色散补偿光纤链中, 对二阶色散和三阶色散同时进行补偿, 结果在很大程度上减小了脉冲峰移, 显著消除了脉冲边沿部的振荡。计算结果表明, 1 ps 高斯光脉冲在 $\beta_2 = 0$ 、 $\beta_3 = 0$ 的光纤链中传输 2000 km 的过程中, 脉冲波峰的时移、啁啾以及脉宽这几个量的累积变化量都相当小。三阶色散补偿也会使得脉冲间的相互作用减弱, 使脉冲对传输一个色散补偿周期后基本恢复。这说明在短脉冲的传输过程中, 对三阶色散补偿是非常必要的, 而且也是非常有效的。

参 考 文 献

- [1] 周国生, 李学敏, 薛文瑞等. 具有色散补偿及增益平衡的光纤链中的准孤子传输. 光学学报, 1999, 19(10): 1297~1304
- [2] 宋开, 范崇澄. 光纤非线性效应对 10 Gb/s 波分复用色散补偿系统的限制. 光学学报, 1999, 19(4): 520~523
- [3] Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics*. San Diego: Academic Press, Inc., 1989.
- [4] Takushima Y, Wang X, Kikuchi K. Transmission of 3 ps dispersion-managed soliton pulses over 80 km distance under influence of third-order dispersion. *Electron. Lett.*, 1999, 35(9): 739~740
- [5] Marcuse D, Menyuk C R. Simulation of single-channel Optical Systems at 100 Gb/s. *J. Lightwave Technology*, 1999, 17(4): 564~569

Third-Order Dispersion Compensation in Picosecond Pulse Transmission System

Guo Shuqin¹⁾ Xue Wenrui¹⁾ Li Zhonghao²⁾ Zhou Guosheng²⁾³⁾

1), Physical Department of Shanxi University, Taiyuan 030006

2), Electronic and Information Science Department of Shanxi University, Taiyuan 030006

3), Local Fiber Communication Net and Coherent Fiber Communication Key National Laboratory at Peking University, Beijing 100871

(Received 4 January 2000; revised 8 May 2000)

Abstract: In a second order dispersion and third order dispersion compensation optical fiber links system, 1 ps Gaussian pulse's transmission is simulated. It is concluded that as second order dispersion compensation can avoid pulse broadening, third order dispersion compensation not only can avoid pulse broadening, but also eliminate pulse edge's oscillating and temporal shift of pulse peak. The eye diagrams of 64 bit random data pattern of 100 Gb/s Gaussian pulse series after transmitting 2000 km are obtained. It is shown through the clear eye diagram that third dispersion compensation system can efficiently improve the transmission performance of short pulse.

Key words: optical communication; optical fiber link; third order dispersion compensation