

三阶色散影响下皮秒孤子间的相互作用*

曹文华**

(五邑大学电子工程系, 江门 529020)

刘颂豪 郭 旗

(华南师范大学量子电子学研究所, 广州 510631)

摘 要 对色散位移光纤中三阶色散影响下皮秒孤子之间的相互作用进行了数值计算, 结果表明该类光纤中孤子之间的相互作用比常规光纤中更严重, 前者对通信系统性能的影响比后者更大。研究结果还表明, 用于抑制常规光纤中孤子间相互作用的相邻孤子不等振幅传输方法只能在较短的传输距离内适合于色散位移光纤。为此, 本文还就色散位移光纤中孤子间相互作用的抑制问题提出了新的建议。

关键词 孤子间相互作用, 色散位移光纤, 三阶色散。

1 引 言

由于光孤子具有保形传输的特性, 人们自然会想到通过减小相邻孤子间距的办法来达到增加通信系统容量的目的。但早在 1983 年就已经有人认识到^[1], 当相邻孤子比较靠近时, 孤子之间会发生相互作用, 并由此影响孤子通信系统的性能。从此, 人们便对光纤中孤子之间的相互作用进行了大量的研究^[2~4], 并提出了一系列抑制孤子相互作用的方法^[5~13]。

然而, 迄今为止有关孤子间相互作用的研究绝大部分都集中于常规光纤。近年来, 人们普遍认为采用色散位移光纤传输孤子具有比常规光纤更多的优点^[10, 14, 15], 主要体现在两方面: 1) 基于常规光纤的孤子通信系统对所传输信号的平均功率要求很高, 这无论是对于光孤子源还是光放大器都带来了限制。而采用色散位移光纤可克服上述困难; 2) 与常规光纤相比, 色散位移光纤由于具有较小的二阶色散, 因而在放大器间隔一定的情况下, 可采用较短孤子传输, 从而提高孤子通信系统的容量。但是, 采用色散位移光纤也有其不利的一面, 这就是三阶色散会对孤子传输产生有害的影响^[14, 15]。

已有的关于三阶色散影响孤子传输的研究大部分是针对单孤子传输进行的, 即没有考虑到孤子之间的相互作用。部分研究虽然涉及到了孤子间的相互作用^[9, 10, 13], 但主要是研究如何利用三阶色散与其它办法相结合来抑制孤子间的相互作用的问题。本文通过计算机模拟对

* 广东省自然科学基金(950694)资助课题。

** 现为香港中文大学电子工程系博士后研究员。

收稿日期: 1998-01-12; 收到修改稿日期: 1998-05-04

色散位移光纤中三阶色散影响下孤子间的相互作用进行了详细研究, 并就该类光纤中孤子相互作用的抑制问题提出了新的建议。

2 数值模型

采用周期放大的光纤孤子通信系统中的皮秒孤子传输可由下述含修正项的非线性薛定谔方程描述:

$$i \frac{\partial U}{\partial \xi} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2} + |U|^2 U = i\delta \frac{\partial^3 U}{\partial \tau^3} + i\Delta U, \quad (1)$$

式中 U 、 ξ 、 τ 分别为归一化脉冲包络复振幅、归一化距离和归一化时间, 可分别表示为

$$U = \left[\frac{\gamma T_0^2}{|\beta_2|} \right]^{1/2} A = \frac{A}{\sqrt{P_0}}, \quad \xi = \frac{|\beta_2| z}{T_0^2}, \quad \tau = \frac{t - z/v_g}{T_0}. \quad (2)$$

式中, A 为脉冲的实际振幅, z 为传输距离, t 为时间, v_g 为脉冲群速度, P_0 为输入脉冲峰值功率, $T_0 = T_{\text{FWHM}}/1.76$ (对双曲正割形脉冲) 为脉冲初始半宽度, γ 为光纤的非线性系数。方程 (1) 右边的第一、二项分别代表脉冲在传输过程中的三阶色散效应和扣除光纤损耗后的信号净增益。其中 δ 的表示式为

$$\delta = \frac{\beta_3}{6|\beta_2|T_0}. \quad (3)$$

在光纤输入端, 由两个相位相同的基本孤子组成的孤子对其归一化振幅可表示为

$$U(0, \tau) = \text{sech}(\tau - q_0) + r \text{sech}[\tau(\tau + q_0)], \quad (4)$$

式中 r 和 q_0 分别为两个孤子的相对振幅和初始间距。考虑中心波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 、初始宽度(半功率点间的全宽度) $T_{\text{FWHM}} = 2 \text{ ps}$ 的孤子传输, 色散位移光纤的参数值 β_2 、 β_3 分别选取为 $\beta_2 = -0.5 \text{ ps}^2/\text{km}$, $\beta_3 = 0.1 \text{ ps}^3/\text{km}$, 则由 (3) 式可算出 $\delta = 0.03$ 。结合 (4) 式给出的初始条件, 采用分步傅里叶变换对方程 (1) 进行数值求解, 便可考察孤子对的传输情况。

3 计算结果与分析

3.1 无三阶色散情况

在对三阶色散影响下孤子间相互作用进行分析之前, 有必要简单考察一下常规光纤中孤子间相互作用的情形。由于常规光纤二阶色散较大(通常情况下 $\beta_2 \approx -20 \text{ ps}^2/\text{km}$), 故由 (3) 式知 $\delta \approx 0$, 这时方程 (1) 中的三阶色散项可忽略。图 1(a) 示出在净增益为零的情况下(即由

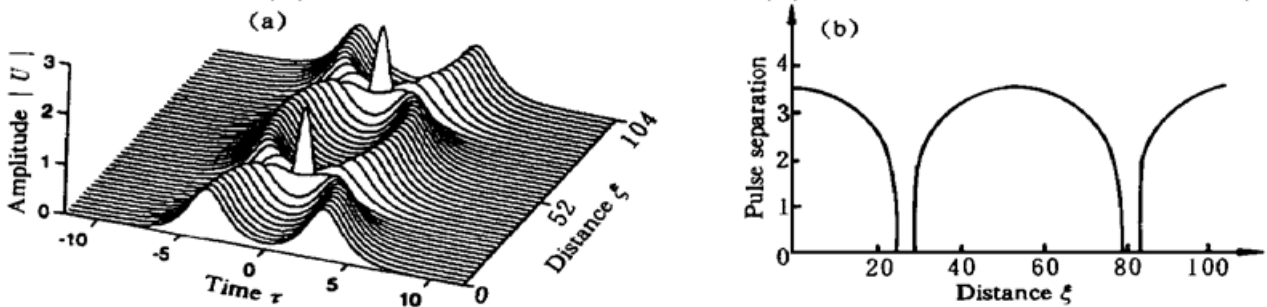


Fig. 1 Soliton interaction with two equal amplitude pulses in a conventional fiber. Initial pulse separation $q_0 = 3.5$. (a) The evolution of the soliton pair; (b) The relationship between the soliton separation and the transmission distance

放大器提供的增益正好与损耗相抵消, 这时方程(1)中 $\Delta = 0$, 初始间距 $q_0 = 3.5$ 的两个等幅基本孤子在常规光纤中的共同传输情况。图 1(b) 示出上述两个孤子在传输过程中的间距与传输距离的关系。可见这种相互作用是周期性的, 在传输过程中两个孤子时而合二为一, 时而又逐渐分开。在这种情况下, 若不采取措施, 要想实现无误码通信显然是不可能的。

3.2 三阶色散对孤子间相互作用的影响

现在研究三阶色散影响下孤子间的相互作用情况。图 2(a) 示出在输入信号与图 1 中完全相同的情况下, 两个基本孤子在色散位移光纤 ($\delta = 0.03$) 中的共同传输结果。可见此时孤子间的相互作用与常规光纤中大不相同。在传输的初始阶段, 两个孤子有相互靠拢的趋势, 但随着传输距离的继续增大, 两个孤子便逐渐分离, 其间距几乎是随着传输距离的增大而线性增大。类似的相互作用在初始孤子间距较大的情况下也能发生, 如图 2(b) 所示(这里初始间距 $q_0 = 4$), 唯一的区别是, 当 q_0 增大后, 孤子间的相互作用便会减弱。

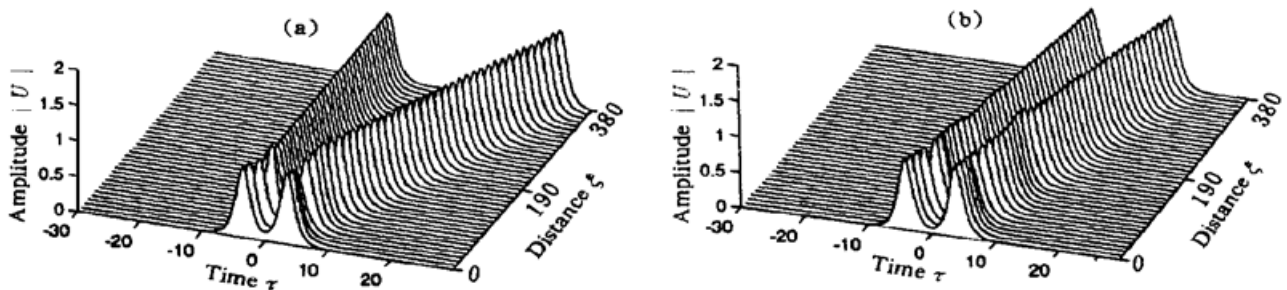


Fig. 2 Soliton interaction with two equal amplitude pulses in a dispersion-shifted fiber ($\delta = 0.03$).

Initial pulse separations are (a) $q_0 = 3.5$ and (b) $q_0 = 4$

显然, 导致图 2 与图 1 大不相同的原因在于三阶色散。已有研究表明^[10, 15], 三阶色散不仅导致孤子传输的群速度发生变化, 而且使得孤子在传输过程中能量不断向外辐射。在这种情况下, 不仅存在孤子之间的相互作用, 也存在孤子与其辐射成份之间的相互作用, 故最终导致如图 2 所示的结果。图 3 示出在初始孤子间距与图 2(a) 中完全相同的情况下, 两个等幅基本孤子在不同程度三阶色散的影响下, 孤子间距与传输距离的关系。由 (3) 式知, 三阶色散不仅与光纤二阶色散的大小(即色散位移量)有关, 而且与所传输孤子的宽度有关。因此, 对于 $\beta_2 = -0.5 \text{ ps}^2/\text{km}$ 以及 $\beta_3 = 0.1 \text{ ps}^3/\text{km}$ 的色散位移光纤, 与 $\delta = 0.01 \sim 0.06$ 相对应的孤子宽度范围为 $6 \sim 1 \text{ ps}$; 或者, 对于脉宽确定 ($T_{\text{FWHM}} = 2 \text{ ps}$) 的孤子传输, 与 $\delta = 0.01 \sim 0.06$ 相对应的色散位移光纤的二阶色散系数 β_2 的变化范围为 $-1.5 \sim -0.25 \text{ ps}^2/\text{km}$ 。图 3 表明, 三阶色散越大, 孤子间的相互作用越突出。具体表现在孤子之间的分离速度随三阶色散的增大而加快, 特别是当三阶色散增大到一定程度后, 孤子间距与传输距离不再近似为线性关系, 而是出现振荡现象。相反, 三阶色散越小(如 $\delta = 0.01$), 孤子间的作用情况越与常规光纤中接近。

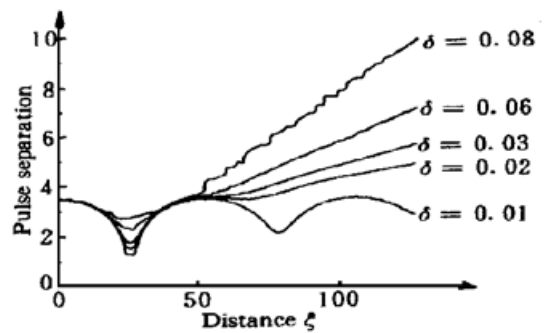


Fig. 3 Separation of two equal amplitude solitons as a function of normalized distance in dispersion-shifted fibers with several values of δ . The third-order dispersion parameters are $\delta = 0.01, 0.02, 0.03, 0.06$ and 0.08 , respectively

如果说图 1 所示的常规光纤中孤子间相互作用会影响通信系统性能的话, 那么图 2 所示

的色散位移光纤中孤子间相互作用对通信系统性能的影响会更大。因为图 1 所示的孤子间的相互作用是有周期可循的, 而且在每个周期的大部分传输范围内孤子间都近似保持着正常的距离, 只要在这些点上接收信号就不至于产生严重误码。相反, 色散位移光纤中孤子间的相互作用不存在周期性, 孤子间距随传输距离的增加而增大。假设输入端有这样一串数据, $\cdots 011000\cdots$, 则在色散位移光纤中传输一段距离后便会变成 $\cdots 010100\cdots$, 继续传输又会变成 $\cdots 010010\cdots$ 。因此, 色散位移光纤中孤子间的相互作用比常规光纤中更严重, 如不采取抑制措施, 前者对通信系统性能的影响比后者更大。

对于常规光纤中孤子间的相互作用, 目前认为较切实可行的抑制办法是采用相邻孤子不等振幅的传输方法^[7], 即在输入端使得相邻孤子的振幅略有差异[当然孤子宽度也略有差异, 如(4)式所表示的]。本文将该方法应用于色散位移光纤, 看看效果如何。图 4(a) 示出在初始间距 $q_0 = 3.5$ 的情况下, 初始振幅之比为 $1.1 \cdot 1$ 的两个孤子[即(4)式中 $q_0 = 3.5$, $r = 1.1$]在 $\delta = 0.03$ 的色散位移光纤中的共同传输结果。这里除了 $r = 1.1$ 的条件外, 其余条件与图 2(a) 中完全相同。可见该抑制方法对于色散位移光纤只能在较短的传输距离内(大约相当于 470 个色散长度)才有效, 继续传输下去仍然会导致两个孤子间的分离。图 4(b) 示出当两个孤子的振幅之比分别为 $1.15 \cdot 1$ 、 $1.1 \cdot 1$ 、 $1.05 \cdot 1$, 初始间距均为 $q_0 = 3.5$ 时, 这三种情况下孤子间距与传输距离的关系, 表明两个孤子的相对振幅应该选择得当, 否则便不会获得较好的抑制效果。

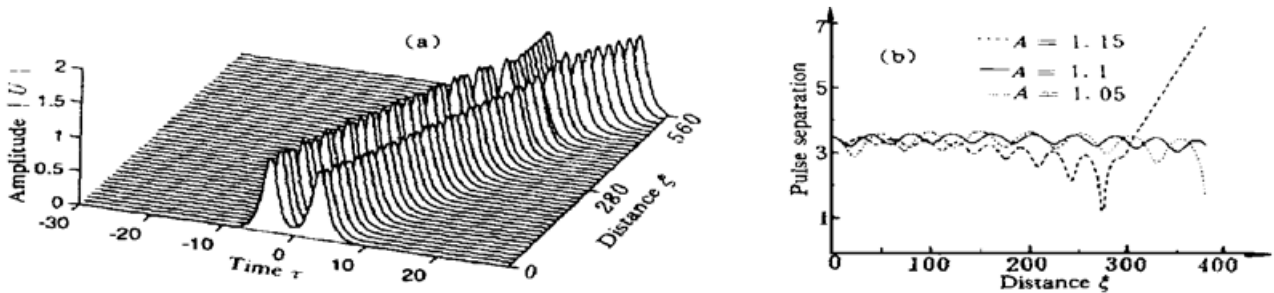


Fig. 4 (a) Soliton interaction with two unequal amplitude pulses, the parameters are $\delta = 0.03$, $A = 1.1$, and $q_0 = 3.5$. (b) Separation of two unequal amplitude solitons as a function of normalized distance. The parameters are $\delta = 0.03$, $q_0 = 3.5$, and $A = 1.05$ (dotted line); $\delta = 0.03$, $q_0 = 3.5$, and $A = 1.15$ (dashed line); and $\delta = 0.03$, $q_0 = 3.5$, and $A = 1.1$ (solid line)

3.3 三阶色散影响下多孤子间的相互作用

在研究孤子间的相互作用时, 人们习惯于只研究两个孤子间的相互作用。假设有这样一串数据 $\cdots 01101110011110\cdots$, 这里不仅存在两个孤子间的相互作用, 也存在三个和四个孤子间的相互作用。因此, 对多孤子间的相互作用进行研究是必要的。图 5(a) 和图 5(b) 分别示出三个孤子和四个孤子在色散位移光纤中的传输结果。这里均为等振幅孤子, 初始间距均为 $q_0 = 3.5$, 三阶色散与图 2(a) 中相同。可见多孤子间的相互作用更为复杂, 特别是两两之间的作用结果各不一样。但共同的一点是, 三阶色散使得孤子间互相排斥, 而且这种相互作用不具有周期性。图 6 是采用相邻孤子不等振幅的传输方法所计算的结果。在图 6(a) 中, 经适当选择, 从左至右三个孤子的振幅之比为 $1 \cdot 1.2 \cdot 1.1$; 图 6(b) 中从左至右四个孤子的振幅之比为 $1.2 \cdot 1.1 \cdot 1 \cdot 1.2$ (较佳选择)。两种情况下初始间距均为 $q_0 = 3.5$, 三阶色散与图 5 中相同。可见当相邻孤子数目增加时, 该抑制方法所适用的有效传输距离便会缩短。

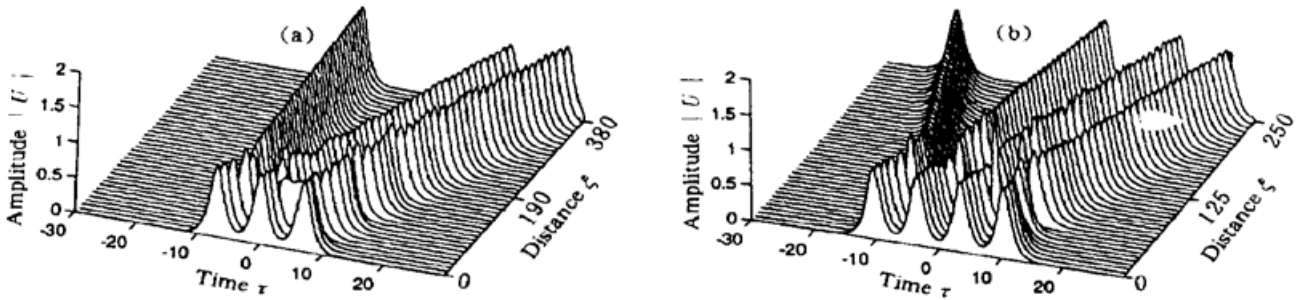


Fig. 5 Interaction of (a) three and (b) four solitons with equal amplitude in a dispersion-shifted fiber ($\delta = 0.03$). Initial pulse separation $q_0 = 3.5$ in both cases

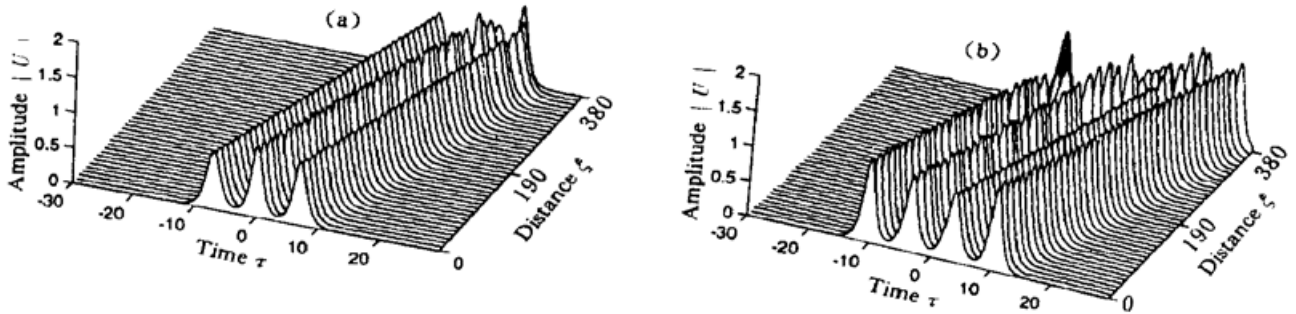


Fig. 6 Interaction of (a) three and (b) four solitons with unequal amplitude in a dispersion-shifted fiber ($\delta = 0.03$). The parameters are $q_0 = 3.5$, $A_1 = 1$, $A_2 = 1.2$, and $A_3 = 1.1$ for three solitons, and $q_0 = 3.5$, $A_1 = 1.2$, $A_2 = 1.1$, $A_3 = 1$, and $A_4 = 1.2$ for four solitons

3.4 三阶色散的影响程度与实际通信系统的关系

如上所述, 三阶色散对孤子传输的影响程度不仅与光纤二阶色散的大小有关, 而且与所传输孤子的宽度有关。因此, 对于不同的光纤孤子通信系统, 三阶色散的影响程度也是不一样的。目前人们普遍认为, 为了补偿光纤损耗导致的孤子功率的衰减, 比较可行的办法是采用周期放大的方式。但在这种工作方式下, 必须要求放大器的间隔小于孤子周期, 以保证信号在多次放大过程中能实现平均孤子传输(即处于所谓的平均孤子传输区域)。但这样一来对所传输的孤子宽度造成了限制。例如, 对于二阶色散系数 $\beta_2 = -1 \text{ ps}^2/\text{km}$ 的色散位移光纤, 若放大器间隔为 30 km, 则所传输的基本孤子宽度 T_{FWHM} 必须大于 15 ps。显然, 在这样的孤子通信系统中, 三阶色散的作用是很小的, 因为由(3)式可估计出 $\delta \approx 0.002$ 。

然而, 最近的研究表明, 在采取适当措施后上述放大器间隔与孤子宽度之间的矛盾可得到很大程度的缓解。例如, 若在通信线路上插入类似于快速饱和吸收体的元件^[16~18], 则可在很多孤子周期内实现脉宽为 1~5 ps 的基本孤子的稳定传输, 而且放大器间隔可达到 20 km。又如, 通过沿传输方向适当裁剪色散位移光纤的二阶色散^[13], 则可在 500 km 的传输范围内实现脉宽为 3 ps 的基本孤子稳定传输, 其中放大器的间隔可达 80 km。显然, 在这样的孤子通信系统中, 三阶色散是需要考虑的。因此, 本文的研究特别是对于超短孤子通信系统具有一定的意义。

4 关于抑制方法的讨论

综上所述, 在色散位移光纤中, 三阶色散使得孤子间的相互作用比常规光纤中更严重, 并由此对通信系统性能产生更加有害的影响。虽然采用相邻孤子不等振幅的传输方法可较好

地抑制色散位移光纤中孤子间的相互作用, 但该方法只适合于较短的传输距离。因此, 对于色散位移光纤中孤子间的相互作用, 有必要寻求更理想的抑制方法。

对于常规光纤中孤子间的相互作用, 至今已提出了众多的抑制方法。包括高斯脉冲传输法^[5], 相邻孤子不等相位传输法^[6], 相邻孤子不等振幅传输法^[7], 利用高阶非线性效应的抑制方法^[8], 利用三阶色散与限带放大和非线性滤波相结合的抑制方法^[9, 10], 相邻孤子不同偏振态的抑制方法^[11, 12], 以及采用参量放大器的光学共轭法^[13], 等等。目前普遍认为比较切实可行的抑制方法是采用相邻孤子不等振幅的传输方法。但从以上的计算可知, 该方法并不十分适合于色散位移光纤, 其根本原因在于三阶色散效应。

作者认为, 要想成功地抑制色散位移光纤中孤子间的相互作用, 关键是要对三阶色散进行有效的抑制。最近, 作者曾提出过一种三阶色散抑制方法, 并将该方法应用于色散位移光纤中的孤子效应脉冲压缩^[19], 取得了满意的效果。其基本原理是交替改变光纤的三阶色散极性, 即让三阶色散系数 β_3 沿传输方向作正负交替变化(最近的一系列研究表明^[20], 采用多包层制作方法可以使得 $\beta_3 < 0$)。在这种情况下, 尽管从局部上看光纤仍然保持着同样大小的三阶色散, 但从整体上看光纤的平均三阶色散却大大降低, 而且正负三阶色散起到了相互补偿的作用。显然, 对于色散位移光纤中孤子间相互作用的抑制, 仅仅依靠这一方法还是不够的。因为它仅仅是将色散位移光纤中孤子间的相互作用近似等效为常规光纤中孤子间的相互作用。因此, 一种可能更有效的方法是将上述方法与常规光纤中的抑制方法(如相邻孤子不等振幅传输法)结合起来, 从而同时达到既抑制三阶色散又进一步抑制孤子间相互作用的目的。关于这方面的详细研究, 将另作报道。

参 考 文 献

- [1] Gordon J P. Interaction forces among solitons in optical fibers. *Opt. Lett.*, 1983, **8**(11) : 596~ 598
- [2] Desem C, Chu P L. Soliton propagation in the presence of source chirping and mutual interaction in single-mode fibers. *Electron. Lett.*, 1987, **23**(6) : 260~ 262
- [3] Afanasyev V V, Vysloukh V A, Serkin V N. Decay and interaction of femtosecond optical solitons induced by the Raman self-scattering effect. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(9) : 489~ 491
- [4] Yu T, Golovchenko E A, Pilipetskii A N *et al.*. Dispersion-managed soliton interactions in optical fibers. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(11) : 793~ 795
- [5] Chu P L, Desem C. Gaussian pulse propagation in nonlinear optical fiber. *Electron. Lett.*, 1983, **19**(23) : 956~ 957
- [6] Anderson D, Lisak M. Bandwidth limits due to mutual pulse interaction in optical soliton communication systems. *Opt. Lett.*, 1986, **11**(3) : 174~ 176
- [7] Chu P L, Desem C. Mutual interaction between solitons of unequal amplitudes in optical fiber. *Electron. Lett.*, 1985, **21**(24) : 1133~ 1134
- [8] Kodama Y, Nozaki K. Soliton interaction in optical fibers. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(12) : 1038~ 1040
- [9] Chu P L, Desem C. Effect of third-order dispersion of optical fiber on soliton interaction. *Electron. Lett.*, 1985, **21**(6) : 228~ 229
- [10] Kodama Y, Romagnoli M, Wabnitz S *et al.*. Role of third-order dispersion on soliton instabilities and interactions in optical fibers. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(3) : 165~ 167
- [11] Sugawa T, Kubota H, Nakazawa M. Polarization dependence of femtosecond soliton-soliton interactions in dispersion-shifted fiber. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(13) : 1453~ 1455
- [12] Kutz J N, Koehler S D, Leng L *et al.*. Analytic study of orthogonally polarized solitons interacting in highly birefringent optical fibers. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1997, **14**(3) : 636~ 642

- [13] Essiambre R, Agrawal G P. Ultrahigh-bit-rate soliton communication systems using dispersion-decreasing fibers and parametric amplifiers. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(2) : 116~ 118
- [14] Chan K C, Liu H F. Effect of third-order dispersion on soliton-effect pulse compression. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(1) : 49~ 51
- [15] Afanasjev V V, Kivshar Y S, Menyuk C R. Effect of third-order dispersion on dark solitons. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(24) : 1975~ 1977
- [16] Vallee R, Essiambre R J. Long distance soliton transmission with a nonlinear twin-core fiber. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(24) : 2095~ 2097
- [17] Smith N J, Doran N J. Picosecond soliton propagation using nonlinear optical loop mirrors as intensity filters. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(13) : 1048~ 1085
- [18] Essiambre R J, Agrawal G P. Soliton communication beyond the average-soliton regime. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1995, **12**(12) : 2420~ 2425
- [19] 曹文华, 刘颂豪. 孤子效应脉冲压缩中的三阶色散抑制. 中国激光(A), 1999, **26**(1) : 70~ 74
- [20] Chan Kamtai, Cao Wenhua. Improved soliton-effect pulse compression by combined action of negative third-order dispersion and Raman self-scattering in optical fibers. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1998, **15**(9) : 2371~ 2375

Soliton Interaction in Dispersion-Shifted Fibers

Cao Wenhua

(Department of Electronic Engineering, Wuyi University, Jiangmen 529020)

Liu Songhao Guo Qi

(Institute of Quantum Electronics, South China Normal University, Guangzhou 510631)

(Received 12 January 1998; revised 4 May 1998)

Abstract Soliton interaction in dispersion-shifted fibers is studied numerically, including the effect of third-order dispersion. Results show that soliton interaction in dispersion-shifted fibers is stronger and, thence, plays a more detrimental role in soliton communication system than that in conventional fibers. It is also show that launching adjacent pulses with unequal amplitudes does not results in eventual suppression of soliton interaction in dispersion-shifted fibers. Finally, a new method is suggested for suppression of soliton interaction in dispersion-shifted fibers.

Key words soliton interaction, dispersion-shifted fiber, third-order dispersion.