

文章编号: 0253-2239(2006)04-0491-6

色散补偿光纤通信系统中孤子之间的相互作用*

钟卫平^{1,2} 易 林²

(¹ 广东省顺德学院电子工程系, 顺德 528300
² 华中科技大学物理系激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 采用变分原理与位力定理研究了非线性光通信系统色散补偿方案中, 相邻孤子之间的相互作用对孤子传输特性的影响。结果表明: 在相位匹配与等幅孤子注入时, 在普通单模光纤中这两个孤子先相互吸引, 而后又相互排斥, 显现周期性碰撞的变化规律, 形成束缚孤子态, 而在色散补偿光纤中传输的孤子之间不发生碰撞; 对相位不匹配与等幅孤子注入, 孤子之间发生分离; 对相位匹配和不等幅孤子注入, 在色散补偿光纤中传输的孤子, 如果初始间隔 φ_0 越小, 应注入较大的初始幅值差 η_0 , 以利于孤子的传输。

关键词: 光通信; 光孤子; 变分法和位力定理; 色散补偿光纤; 孤子之间的相互作用; 数值模拟
中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

Interactions of Solitons in Dispersion Compensation Fiber Nonlinear Communication System

Zhong Weiping^{1, 2} Yi Lin²

(¹ Department of Electronic Engineering, Shunde College, Shunde 528300
² State Key Laboratory of Laser Technology, Department of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract: The effect of adjacent solitons interaction on the transmission property of solitons is studied in the nonlinear optical communication dispersion compensation system by using variational method and virial theorem. The results show that, the two solitons attract each other and then repel with periodical collision law, and the bound state is formed, in the common single-mode fiber with phase matching and equal amplitude injection. But under the same condition, the solitons do not collide in dispersion compensation fiber. In dispersion compensation fiber, with phase mismatch and equal amplitude injection, the solitons leave each other; with phase matching and unequal amplitude injection, if the initial positional interval is small, a relatively large initial amplitude difference is necessary for the transmission of solitons.

Key words: optical communication; optical soliton; variational method and virial theorem; dispersion compensation fiber; interaction of solitons; numerical simulation

1 引 言

光孤子通信在理论和实际应用上都取得了重大成果^[1,2]。由于光孤子通信系统非线性的影响, 光孤子之间的相互作用必然引起光纤中载波信号的变形。为减少孤子之间的相互作用, 人们对这方面进行了广泛深入的研究^[2~4]。虽然 Ablowitz 等^[5]较为完整地研究了强色散管理(DM)孤子在波分复用通信系统的相互作用, 但仅分析了孤子参量对整个系统的影响, 未分析孤子在普通单模光纤(SMF)和色散补偿光纤(DCF)中孤子之间相互作用的传输特性。

色散对通信系统尤其是高比特率光传输产生不利的影响, 可以采用一定的措施来降低或进行补偿^[1], 主要是减少孤子波包由于不同群速而导致的时延。对实际的光通信系统, 一般可采用光纤色散补偿技术来压制光脉冲的展宽。研究表明, 采用周期性色散补偿可以有效改进光孤子通信系统的性能, 通过提高载波信号功率来提高系统的信噪比和减少 Gordon-Haus 抖动^[6]。然而, 当单信道的传输速率超过 40 Gb/s 时, 随着载波信号功率的增大, 导致孤子之间的串扰^[7]。有人提出高密度色散补偿方

* 顺德学院科研基金资助项目。

作者简介: 钟卫平(1965~), 男, 江西赣州人, 广东省顺德学院电子工程系教师, 主要从事非线性光纤通信方面的研究。
E-mail: zhongwp4@126.com

收稿日期: 2005-03-12; 收到修改稿日期: 2005-12-09

案(A4DM)可以减少通信系统的孤子之间的相互作用,该技术比一般的色散管理系统具有更好的特性^[8]。因此,研究一个色散周期内单模光纤和色散补偿光纤传输孤子之间的相互作用对实际的孤子通信系统有着重要的意义。

本文采用变分原理与位力定理和数值模拟,对光纤色散补偿方案中传输孤子之间的相互作用进行了研究,得到了一些有意义的结果。

2 光脉冲相互作用的动力学分析

色散管理方案中,光纤中光脉冲的传输可用非线性薛定谔耦合方程(NLS)来描述。其归一化形式为^[1,3]

$$i \frac{\partial u_n}{\partial z} + \frac{1}{2} D(z) \frac{\partial^2 u_n}{\partial t^2} + |u_n^2| u_n = - (2 |u_{3-n}|^2 u_n + u_n^2 u_{3-n}^*), \quad (1)$$

式中 $n = 1$ 或 2 。考虑最简单二段光纤色散补偿,系统色散关系可表示为 $D(z) = D_1 (mL \leq z < L_1 + mL)$, 单

模光纤) 和 $D(z) = D_2 (L_1 + mL \leq z < L + mL)$, 色散补偿光纤), $L = L_1 + L_2$ 为光纤的周期长度 (L_1 为单模光纤的长度, L_2 为色散补偿光纤的长度), m ($m = 1, 2, \dots$) 为光纤补偿的周期数。在光纤中孤子传输的形状一般取为标准孤子^[1~4]:

$$u_n(z, t) = \eta_n \operatorname{sech}(\eta_n t - \varphi_n) \exp(i\theta_n - i\delta_n t),$$

其中孤子参量 $P_n = \{\eta_n, \varphi_n, \theta_n, \delta_n\}$ 分别代表幅值、位置、相位和速度。通过变分原理^[9,10] 可以得到

$$\frac{d\Delta\eta}{dz} = \eta_+^3 \exp(-\Delta\phi) \sin(\Delta\theta), \quad (2)$$

$$\frac{d\Delta\delta}{dz} = \eta_+^3 \exp(-\Delta\phi) \cos(\Delta\theta), \quad (3)$$

$$\frac{d\Delta\theta}{dz} = \eta_+ \Delta\eta + \frac{1}{2} D(z) [-\eta_+ \Delta\eta + \delta_+ \Delta\delta], \quad (4)$$

$$\frac{d\Delta\varphi}{dz} = -\eta_+ \Delta\delta + \frac{1}{2} D(z) [\delta_+ \Delta\eta + \eta_+ \Delta\delta], \quad (5)$$

式中 $\eta_+ = \eta_1 + \eta_2$, $\delta_+ = \delta_1 + \delta_2$, $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$, $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$, $\Delta\eta = \eta_1 - \eta_2$, $\Delta\delta = \delta_1 - \delta_2$, $\eta_+ = \text{constant}$, $\delta_+ = \text{constant}$ 。从以上各式可以得到

$$\frac{d^2\Delta\theta}{dz^2} = \eta_+^4 \exp(-\Delta\varphi) \sin(\Delta\theta) + \frac{D}{2} [-\eta_+^4 \exp(-\Delta\varphi) \sin(\Delta\theta) + \delta_+ \eta_+^3 \exp(-\Delta\varphi) \cos(\Delta\theta)], \quad (6)$$

$$\frac{d^2\Delta\varphi}{dz^2} = \eta_+^4 \exp(-\Delta\varphi) \cos(\Delta\theta) + \frac{D}{2} [\delta_+ \eta_+^3 \exp(-\Delta\varphi) \sin(\Delta\theta) + \eta_+^4 \exp(-\Delta\varphi) \cos(\Delta\theta)], \quad (7)$$

设 $Y = \Delta\varphi - i\Delta\theta$ 和 $F = -\eta_+^4 + \frac{D}{2} [\eta_+^4 - i\delta_+ \eta_+^3]$, 从以上二式可得

$$d^2Y/dz^2 = F \exp(-Y), \quad (8)$$

在单模光纤与色散补偿光纤交界处,根据位力定理^[11,12] 及取 $m = 0$ 。从(8)式可以得到

$$a^2 \exp(Y) = F_1 [\cosh(az + \psi) + 1] \Big|_{z=0}^{L_1} + F_2 [\cosh(az + \psi) + 1] \Big|_{z=L_1}^{L_2}, \quad (9)$$

式中 a 与 ψ 为积分常数, $F_1 = -\eta_+^4 + \frac{D_1}{2} [\eta_+^4 - i\delta_+ \eta_+^3]$, $F_2 = -\eta_+^4 + \frac{D_2}{2} [\eta_+^4 - i\delta_+ \eta_+^3]$ 。由此可得

$$\Delta\delta + i\Delta\eta = \frac{\eta_+^3 a}{F_1} \tanh \frac{(az + \psi)}{2} \Big|_{z=0}^{L_1} + \frac{\eta_+^3 a}{F_2} \tanh \frac{(az + \psi)}{2} \Big|_{z=L_1}^L, \quad (10)$$

对(9)式二边取绝对值可得

$$\Delta\varphi = \ln \left\{ \frac{|F_1| \{ \cosh[\operatorname{Re}(az + \psi)] + \cos[\operatorname{Im}(az + \psi)] \}^2 \Big|_{z=0}^{L_1}}{|a^2|} + \frac{|F_2| \{ \cosh[\operatorname{Re}(az + \psi)] + \cos[\operatorname{Im}(az + \psi)] \}^2 \Big|_{z=L_1}^L}{|a^2|} \right\}, \quad (11)$$

式中 a 与 ψ 通过(9)式、(10)式的初始条件决定。

3 讨论与分析

以下选取文献^[13]的数据进行数值模拟。对于单模光纤,其色散 $D_1 = 17.0 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$; 对色散补偿光纤 $D_2 = -232.0 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 。研究一个色散周期长度内孤子相互作用的变化情况,讨论束缚

态孤子相互作用的临界点。

3.1 相位匹配与等幅、初始速度相同的两孤子注入

初始条件可以表示为 $\eta_+(0) = 1, \Delta\eta(0) = 0; \delta_+(0) = 0, \Delta\delta(0) = 0; \Delta\varphi(0) = \varphi_0, \Delta\theta(0) = \theta_0 = 0$ 。从(9)式、(10)式可以得到 $\psi = 0, F_1 = -1 + D_1/2, F_2 = -1 + D_2/2, a = \sqrt{|F_1|} \operatorname{ixp}(-\varphi_0/2)$ 。因而

$$\Delta\varphi = \varphi_0 + 4\ln \left| \cos \left[\frac{\sqrt{2F_1}}{2} z \exp\left(-\frac{\varphi_0}{2}\right) \right] \right|, \quad (0 \leq z \leq L_1),$$

$$\Delta\varphi = \varphi_0 + \ln \left\{ \left| \cos^4 \left[\frac{\sqrt{2F_1}}{2} L_1 \exp\left(-\frac{\varphi_0}{2}\right) \right] \right| + \frac{|F_2|}{|F_1|} \left| \cos^4 \left[\frac{\sqrt{2F_1}}{2} z \exp\left(-\frac{\varphi_0}{2}\right) \right] \right| \right\}, \quad (L_1 \leq z \leq L),$$

从前一个表达式可以看到,在单模光纤中,这两个孤

子先相互吸引,而后当它们的间隔达到某临界值时又相互排斥,显现周期性变化的规律,形成束缚孤子态。图 1 是 $\varphi_0 = 7$ 在 $0 \leq z \leq L_1$ 与 $\varphi_0 = 7$ 在 $L_1 \leq z \leq L$ 情况的比较。可以看到,在色散补偿光纤中传输的孤子,这两个孤子先相互吸引,而后当它们之间的间隔达到某临界值时又相互排斥,显现周期性变化的规律,形成束缚孤子态,但孤子之间不发生碰撞。

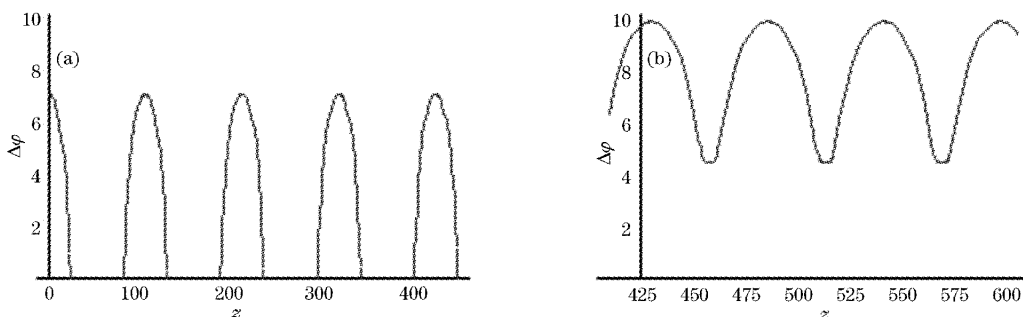


图 1 在 $\varphi_0 = 7$ 条件下,普通单模光纤(a)和色散补偿光纤(b)中孤子之间的间隔与传输距离的比较

Fig. 1 With $\varphi_0 = 7$, the comparison of the intervals and transmission distance of solitons in common single-mode fiber (SMF) (a), dispersion compensation fiber (DCF) (b)

可以选择色散补偿光纤的最佳长度,使光纤中某一点,孤子之间的相互作用最小。图 2 是色散周期长度 500 km 的条件下,相邻孤子之间的间隔与色散补偿光纤长度之间的数值模拟。从图 2 可以看出,选择恰当的补偿光纤的长度,可以减少孤子之间的串扰,提高通信系统的性能指标。

另外,为研究在单模光纤与色散补偿光纤中孤子之间碰撞与初始间隔的演变,选取 $L = 500$ km,固定某一传输位置,绘制了相邻孤子之间的间距随初始间隔的演变(如图 3 所示)。

从图 3(a)中可以看出,当孤子之间的初始间隔增大时,孤子之间的间隔先增大到临界值后又减少,以至发生碰撞($\Delta\varphi = 0$)。并且随着孤子之间初始间

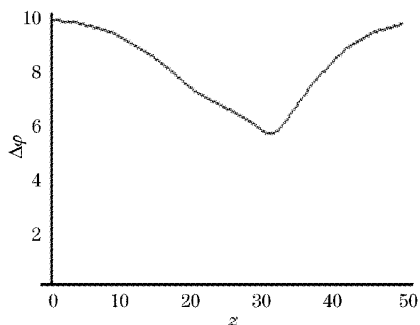


图 2 在 $\varphi_0 = 7$ 条件下,相邻孤子之间的间隔与色散补偿光纤长度之间的数值模拟

Fig. 2 With $\varphi_0 = 7$, the computer simulation between the intervals of adjacent solitons and the length of DCF

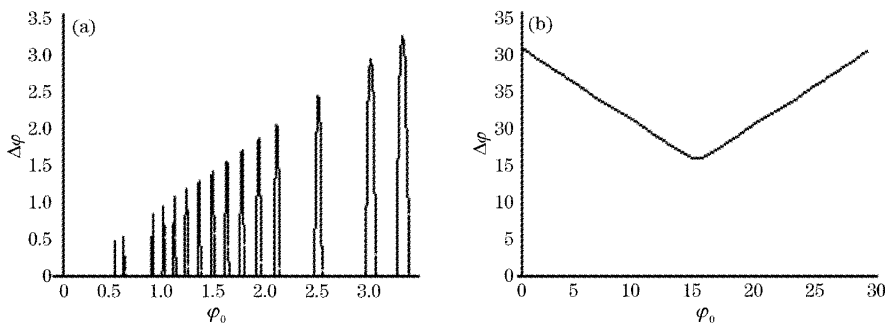


图 3 固定光纤长度相邻孤子之间的间隔随初始间隔的演变图[孤子在 SMF(a)、DCF(b)中的传输情况]

Fig. 3 The intervals between adjacent solitons in a fixed length fiber evolving with the initial intervals [in SMF (a), in DCF (b)]

隔的增加,孤子之间发生碰撞的几率减少。因此在单模光纤中传输的孤子,必须输入较大初始间隔的孤子,以利于孤子的传输。从图 3(b)中可以看出,在色散补偿光纤中传输的孤子,可选取一定的初始间隔,使它们之间相互作用最小。

3.2 相位不匹配与等幅孤子注入

初始条件可以表示为

$$\begin{aligned} \eta_+(0) &= 1, & \Delta\eta(0) &= 0; \\ \delta_+(0) &= 0, & \Delta\delta(0) &= 0; \\ \Delta\varphi(0) &= \varphi_0, & \Delta\theta(0) &= \theta_0 \neq 0. \end{aligned}$$

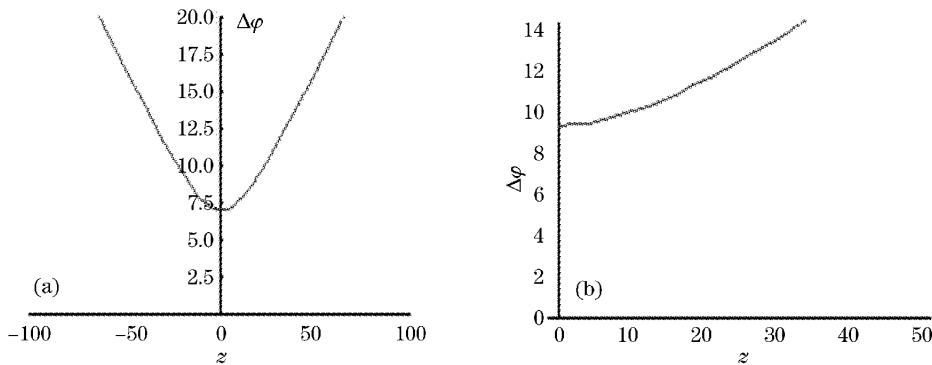


图 4 在 $\varphi_0 = 7$ 和 $\theta_0 = \pi$ 条件下, (a) 为 $0 \leq z \leq L_1$ (SMF), (b) 为 $L_1 \leq z \leq L$ (DCF), 孤子之间的间隔与传输距离的关系

Fig. 4 With $\varphi_0 = 7$ and $\theta_0 = \pi$, the relationship between the soliton intervals and the transmission distance.

(a) is $0 \leq z \leq L_1$ (SMF); (b) is $L_1 \leq z \leq L$ (DCF)

3.3 相位匹配和不等幅孤子注入

初始条件可表示为

$$\begin{aligned} \eta_+(0) &= 1, & \Delta\eta(0) &= \eta_0; \\ \delta_+(0) &= 0, & \Delta\delta(0) &= 0; \\ \Delta\varphi(0) &= \varphi_0, & \Delta\theta(0) &= \theta_0 = 0. \end{aligned}$$

可以得到

$$\begin{aligned} F_1 &= -1 + \frac{D_1}{2}, & F_2 &= -1 + \frac{D_2}{2}, \\ a &= i \left| \sqrt{F_1} \right| \sqrt{2 \exp(-\varphi_0) - \eta_0^2 F_1}, \\ \cosh[\operatorname{Re}(\psi)] &= 1 - F_1 \delta_0^2 \exp(\varphi_0), \\ \operatorname{Im}(\psi) &= 0. \end{aligned}$$

从(9)式、(10)式可以得到

$$\begin{aligned} a &= \left| \sqrt{2F_1} \right| \left[i \cos\left(\frac{\theta_2}{2}\right) - \sin\left(\frac{\theta_0}{2}\right) \right] \exp\left(-\frac{\varphi_0}{2}\right), \\ F_2 &= -1 + \frac{D_2}{2}, & F_1 &= -1 + \frac{D_1}{2}, & \psi &= 0. \end{aligned}$$

代入(11)式,能够比较完整地给出二孤子之间相互作用的渐近行为(如图 4 所示),可以看出由于引入了一个相移 $\theta_0 \neq 0$ 后导致了孤子之间的分离。对于 $\theta_0 = \pi$ (两光脉冲反相),可以看到,在色散补偿光纤中,传输孤子之间的分离比普通单模光纤快,色散补偿光纤的引入有利于孤子在光纤中的传输。

若定义临界值 $\eta_c = \left| \sqrt{2/F_1} \right| \exp(-\varphi_0/2)$, 当 $|\eta_c| < \eta$ 时, a 为虚数, 形成束缚态; 而当 $|\eta_c| > \eta$ 时, a 为实数, 由(11)式可知, 导致孤子之间发生分离。以下讨论束缚态的情况。从(11)式可以看到, 孤子之间的间隔是传输距离的周期性函数。在相同初始 φ_0 条件下, 注入光纤二脉冲幅值相同($\eta_0 = 0$), 孤子之间发生周期性的碰撞; 并可以看出注入光纤两脉冲幅值相差越大, 孤子的距离间隔振荡越小, 越有利于孤子的传输。特别是当 $|F_1| \sqrt{2 \exp(-\varphi_0) - \eta_0^2 F_1} z = \pi$ 时, 两脉冲之间的间隔最小。

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{\min} &= \varphi_0 + 2 \ln \frac{-F_1 \eta_0^2 \exp(\varphi_0)}{\sqrt{2 - \eta_0^2 F_1 \exp(\varphi_0)}}, & 0 \leq z \leq L_1 \\ \Delta\varphi_{\min} &= \varphi_0 + \ln \left\{ \left[-F_1 \eta_0^2 \exp(\varphi_0) + \cos^2 \left(\frac{|F_1| \sqrt{2 \exp(-\varphi_0) - \eta_0^2 F_1 L_1}}{2} \right) \right]^2 + \right. \\ &\quad \left. \frac{|F_2|}{|F_1|} \left[-F_1 \eta_0^2 \exp(\varphi_0) z \right]^2 \right\} \frac{1}{2 - \eta_0^2 F_1 \exp(\varphi_0)}, & L_1 \leq z \leq L \end{aligned}$$

对单模光纤中传输的孤子, 给定 φ_0 , 随着 η_0 的增加, 两脉冲之间的间隔越接近 φ_0 。对于较大的 φ_0 , 一个较小的 η_0 足以阻止脉冲幅度过大的振荡; 对于色散补偿光纤中传输的孤子, 如果初始间隔 φ_0 越小, 应注入较大的 η_0 , 以利于孤子的传输。

3.4 相位匹配与等幅、但初始速度不同的两孤子的注入

与 3.1 相似,两孤子在传输过程中形成束缚态,由于注入光纤两孤子的初始速度 $\delta_0 \neq 0$ 和光纤非线性作用,产生了初始相位与位置的漂移。

4 数值模拟

发展了一种对非线性薛定谔(NLS)方程(1)进行数值模拟的有效技术,它已成功应用到非线性相关问题之中^[14]。图 5 是相位匹配与等幅孤子注入条件下非线性薛定谔方程(1)的数值模拟。可以看到,在单模光纤中,孤子之间周期性地发生碰撞,但

其形状保持不变;在色散补偿光纤中,孤子先相互吸引(孤子中心间距减小),当它们之间的间距达到某一临界值(间距最小)时,又相互排斥,显现周期性变化规律,但孤子不发生碰撞(间距不为零)。这个结论与前面理论分析结果一致。

图 6 是相位不匹配与等幅孤子注入条件下非线性薛定谔方程(1)的数值模拟。可以看到,在单模光纤中,孤子分离速度,但其形状保持不变;在色散补偿光纤中,孤子先相互吸引(孤子中心间距减小),它们之间的间距分离比单模光纤中快,但孤子形状没有发生变化。这个结论与前面理论分析结果一致。

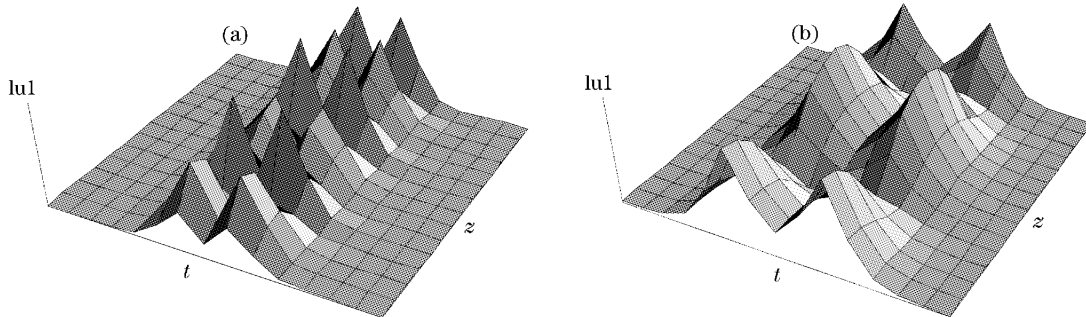


图 5 在 $\varphi_0=7$ 和 $\Delta h=0.02$ 条件下,方程(1)的数值模拟,单模光纤(a)和色散补偿光纤(b)中孤子的传输行为
Fig. 5 With $\varphi_0=7$ and $\Delta h=0.02$, the numerical simulation of Eq. (1). Transmission in (a) SMF and (b) DCF

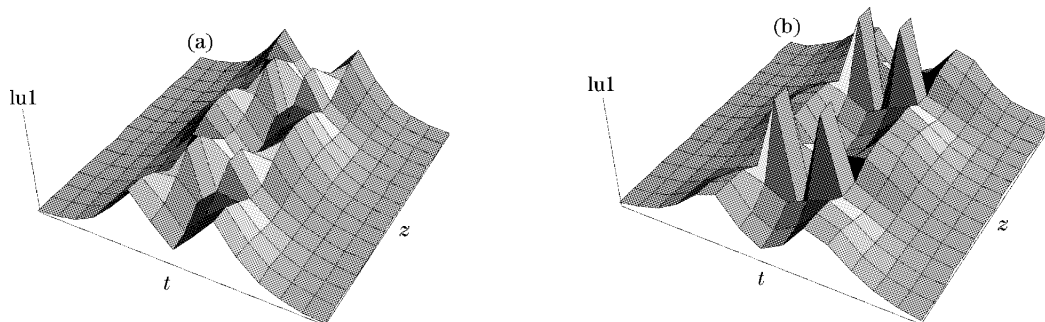


图 6 在 $\varphi_0=7, \theta_0=\pi$ 和 $\Delta h=0.02$ 条件下,方程(1)的数值模拟,单模光纤(a)和色散补偿光纤(b)中孤子的分离行为
Fig. 6 With $\varphi_0=7, \theta_0=\pi$ and $\Delta h=0.02$, the numerical simulation of Eq. (1). Transmission in (a) SMF, (b) DCF

5 结论

在相位匹配与等幅孤子注入时,单模光纤中相邻孤子先相互吸引,而当它们之间的间隔达到某临界值时,又相互排斥,显现周期性变化的规律,并形成束缚孤子态;而色散补偿光纤中传输的孤子,孤子之间不发生碰撞,有利于孤子的传输。对相位不匹配与等幅孤子注入,由于引入了一个相移 $\theta_0 \neq 0$,孤子之间发生分离。对相位匹配和不等幅孤子注入,单模光纤中传输的孤子,给定的初始 φ_0 ,随着 η_0 的

增加,二脉冲之间的间隔越接近初始值 φ_0 ;对于较大的初始 φ_0 ,一个较小的 η_0 足以阻止脉冲幅度过大的振荡;对于色散补偿光纤中传输的孤子,如果初始间隔 φ_0 越小,应注入较大 η_0 的光脉冲,以利于孤子的传输。

参 考 文 献

- 1 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics and Applications of Nonlinear Fiber Optics* [M]. third edition, Jia Dongfang, Yu Zhenhong, Tan Bin translated. Beijing: Electronics Industry

- Press, 2002, 87~128 (in Chinese)
- G. P. Agrawal. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 第3版, 贾东方, 余震虹, 谈斌译, 北京: 电子工业出版社, 2002. 87~128
- 2 A. Hasegawa, Y. Kodama. *Solitons in Optical Communications* [M]. Oxford: Academic Press, 1995. 151~172
 - 3 Li Qiliang, Chen Xiangdong, Tang Xianghong *et al.*. Interaction induced timing—displacement analysis in a WDM optical soliton transmission system with dispersion management[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(2): 199~204 (in chinese)
李齐良, 陈向东, 唐向宏等. 波分复用系统中色散管理孤子相互作用诱导时间移动的分析[J]. *中国激光*, 2004, **31**(2): 199~204
 - 4 A. N. Pinto, G. P. Agrawal, J. Ferreira. Effect of soliton interaction on timing jitter in communication systems[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(4): 515~519
 - 5 M. J. Ablowitz, G. Biondini, E. S. Olson. Incomplete collisions of wavelength-division multiplexed dispersion-managed solitons[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2001, **18**(5): 577~583
 - 6 J. Santhanam, G. P. Agrawal. Raman—induced timing jitter in dispersion-managed optical communication systems[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2002, **8**(3): 632~639
 - 7 R. I. Killey, H. J. Thiele, V. Mikhailov *et al.*. Reduction of intrachannel nonlinear distortion in 40 Gb/s-based WDM transmission over standard fiber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(12): 1624~1626
 - 8 A. B. Moubissi, K. Nakkeeran, P. Tchofo Dinda *et al.*. Average dispersion decreasing densely dispersion-managed fiber transmission systems[J]. *IEEE, Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(9): 1279~1281.
 - 9 Xie Yingmao. A variational study on the propagation properties of optical bright soliton like pulses in optical fibers[J]. *Acta. Optica Sinica*, 2004, **24**(4): 452~455 (in chinese)
谢应茂. 类明孤子在光纤中传输特性的变分研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(4): 452~455
 - 10 Jianxin Du, Qihong Lou. Collision-induced time jitter in dispersion-managed WDM soliton system with filtering[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(12): 688~690
 - 11 P. M. Lushnikov. On the boundary of the dispersion—managed soliton existence[J]. *JETP Lett.*, 2000, **72**(3): 163~167
 - 12 P. M. Lushnikov, M. Saffman. Collapse in a forced three-dimensional nonlinear Schrödinger equation[J]. *Phys. Rev. E*, 2000, **62**(4): 5793~5796
 - 13 V. Wongpaibool. Improvement of fiber optic system performance by synchronous phase modulation and filtering at the transmitter [D]. Jan. 2003. 44~45
 - 14 S. H. Chen, D. F. Shi, Lin Yi. Timing jitter of femtosecond solitons in single-moder optical fibers: A perturbation model[J]. *Phys. Rev. E*, 2004, **69**(4): 046602~046614