

暗孤子的周期性再生效应

郝瑞宇¹ 周国生^{2,3}

(¹ 长治学院电子信息与物理系, 山西 长治 046011; ² 山西大学物理电子工程学院, 山西 太原 030006)
³ 光学国家重点学科, 山西 太原 030006

摘要 通过数值求解变系数非线性薛定谔方程, 讨论具有有限背景宽度的皮秒暗光脉冲的传输和相互作用。结果表明, 一种新的效应, 即暗孤子的周期性再生效应, 稳定地存在于具有分布参量的光纤系统中, 不会受到孤子间相互作用的影响。并且, 这种再生效应对损耗和有限的扰动(如白噪声)等不敏感。这表明暗孤子的周期性再生效应是稳定的。

关键词 光纤光学; 周期性再生效应; 数值模拟; 暗孤子; 分布系统

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200828s1.0131

Periodic Regeneration Effect of Dark Solitons

Hao Ruiyu¹ Zhou Guosheng^{2,3}

(¹ Department of Electronic Information and Physics, Changzhi University, Changzhi, Shanxi 046011, China)
² College of Physics & Electronics Engineering, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China
³ State Key Subject of Optics, Taiyuan, Shanxi 030006, China

Abstract The evolution and interaction of picosecond dark pulses with finite-width were discussed by solving the nonlinear Schrödinger equation with variable coefficients numerically. The results show that, periodic regeneration effect of dark solitons stably exists in the distributed system. And periodic regeneration of dark solitons is not influenced by the interaction. Further simulations indicate that this effect is less sensitive to both loss and finite perturbations, such as white noise. This reveals that this periodic regeneration effect is stable.

Key words fiber optics; periodic regeneration effect; numerical simulations; dark solitons; distributed system

1 引 言

现代非线性科学发展迅速, 非线性现象出现在物理学的很多分支, 如凝聚态物理和非线性光学等领域。这些非线性问题可用一些波动方程来描述, 有时不同领域的非线性问题也用同样的方程描述。而这些波动方程可以有孤波或孤子解存在。比如, 玻色-爱因斯坦凝聚与非线性光学中的非线性薛定谔(NLS)方程。作为最重要的模型之一, 关于 NLS 方程现已成为很活跃的研究课题^[1~7]。

在光纤通信中, NLS 方程有孤子解, 且孤子解有很好的应用前景^[5,8]。早先, Hasegawa 等^[9,10] 在理论上预言了光纤中光孤子的存在, 而后, 被 Mollenauer 等在实验上观察到^[11]。如今, 光孤子(局域在时域上的光脉冲)被认为将在下一代超高速

光通信系统中发挥重要作用。

依赖于光纤中的反常色散与正常色散, 分别存在亮孤子与暗孤子^[10]。由于亮孤子在低损耗和低色散光纤中较易产生, 所以大部分应用上的设计基于亮孤子。但众所周知, 暗孤子比起亮孤子, 有很多优点。例如, 对光纤损耗不敏感^[12,13]。而且, 对噪声也不敏感, 稳定性更好^[14,15]。然而, 由于暗孤子是常量背景下的一“下陷”, 因此, 作为信息载体, 较难产生。在理论上, 暗孤子有 tanh 的形式。然而, 在实验上, 暗脉冲背景的宽度却是有限的^[16]。这在数学上对应 sech 函数与 tanh 函数的乘积, 这样的乘积可以描述具有有限背景宽度的暗光脉冲^[17]。但这样的脉冲不是 NLS 方程的解^[17]。因此, 对具有有限背景宽度的暗光脉冲的传输问题的

研究,陷入被动。但是,如果在非均匀光纤中考虑此问题,这种被动局面就可以改变。本文通过数值求解变系数的 NLS 方程,讨论具有有限背景宽度的暗光脉冲的传输和相互作用。发现了暗孤子的周期性再生效应。

2 理论模型

1991 年,在光纤中的色散管理孤子就已实现^[18]。一般地,在非线性系统中的孤子管理问题由变系数的 NLS 方程描述^[3,4,19]

$$iq_z + \frac{1}{2}D(z)q_{zz} + R(z)|q|^2q = i\Gamma(z)q, \quad (1)$$

其中 $q(z, t)$ 是电场包络, $D(z)$ 是群速度色散 (GVD), $R(z)$ 是非线性参量, $\Gamma(z)$ 是放大或吸收系数, 它们都是归一化的传输距离 z 的函数, t 是延迟时间。(1) 式描述了在具有分布色散和非线性的单模光纤中光脉冲的传输。当 $\Gamma(z) = 0$ 时, 系统是保守系统。

3 数值结果与分析

一般地,(1)式不可积。考虑初始脉冲

$$q(0, t) = A \operatorname{sech}(\eta t) \tanh(\eta t) \exp(i\xi t), \quad (2)$$

其中 A 是脉冲振幅, η 和 ξ 分别与脉冲宽度, 孤子速度有关。它们是实常量。(2) 式是具有有限背景宽度的暗光脉冲。当 $D(z) = R(z) = 1$, 也就是说, 在均匀光纤中传输时, 初始脉冲是不能传输的。然而, 在分布光纤系统中, 情况就不同了。考虑到暗光脉冲对光纤损耗不很敏感, 讨论一保守的分布光纤系统^[3,4]

$$D(z) = d \cos(kz), \quad (3)$$

$$R(z) = r \exp(-\mu z), \quad (4)$$

这里 d 和 k 是描述 GVD 的参量, 而 r 和 μ 是相应于克尔非线性的参量。这里取 $d = r = 1, k = \mu = 0, 1$ 。由 (3) 式和 (4) 式给定的分布系统中, 具有有限背景宽度的暗脉冲的传输行为。图 1 为当 $\xi = 0$ 时, 初始脉冲的强度图和演化图。可以看出, 光脉冲的传输行为是周期的。而且, 尽管暗脉冲在 $|D(z)| < 1$ 处弥散, 却能在大约 $D(z) = \pm 1$ 处, 周期性地再生。图 2 给出了 $\xi \neq 0$ 的情况, 可以看出暗孤子的周期性再生效应仍然存在。并且孤子弥散的方式是有趣的。这主要是由于暗脉冲内在的频率漂移引起的。

从图 3 可以看出, 两个具有有限背景宽度的暗孤子(脉冲间隔为 6)相互作用的过程, 暗孤子的周期性再生效应没有受到相互作用的影响。

进一步的数值计算表明, 暗孤子的周期性再生

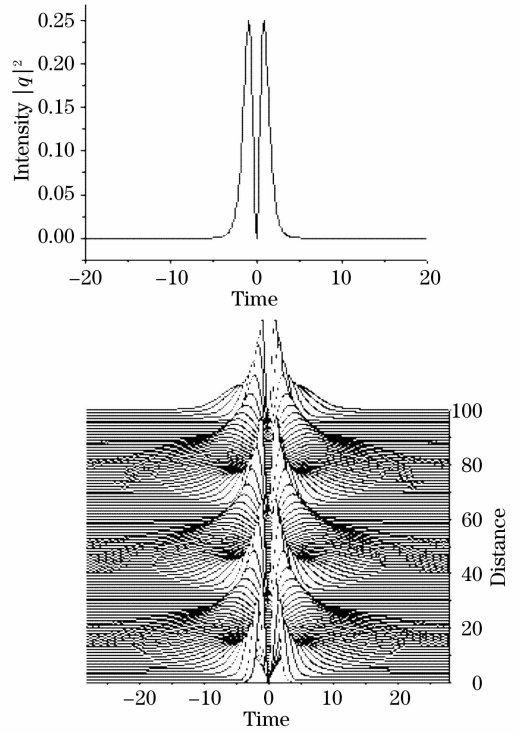


图 1 (a) 初始脉冲强度图, (b) 脉冲演化图

Fig. 1 (a) Intensity plot of initial pulse with $\xi=0, A=\eta=1$, (b) pulse evolution plot in the system given by Eqs. (3) and (4)

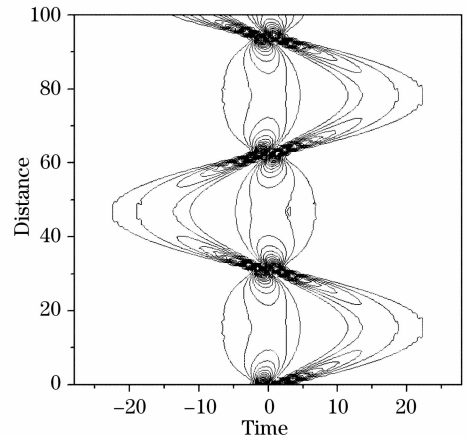


图 2 脉冲传输等高图

Fig. 2 Contour plot of the propagation of initial pulse with $\xi=0.8, A=\eta=1$

效应对克尔非线性不敏感。即便 $R(z) = 1$, 此效应仍存在, 只不过传输距离不能很长。而且, 此效应对损耗和有限的扰动, 如白噪声等也不敏感。表明暗孤子的周期性再生效应应该是稳定的。

该效应主要是由周期性改变的色散引起的。越来越多的通信线路采用具有周期可变色散的光纤。在文献[17]中的均匀光纤中, 色散要补偿才能形成该暗脉冲, 相反, 在分布系统中, 却能在色散最强处

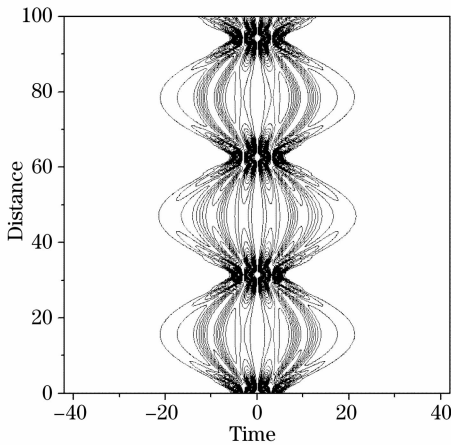


图 3 两个邻近孤子等高图

Fig. 3 Contour plot of two neighboring solitons

$$q(0, t) = \text{sech}(t-3)\tanh(t-3) + \text{sech}(t+3)\tanh(t+3)$$

再生该暗脉冲。这对研究具有有限背景宽度的暗孤子是有用的。

在实际应用中，基于此效应，可以设计光学器件。如图 4 所示，沿着光纤，当 $D(z) = \pm 1$ 时，对应“开”（暗孤子存在），当 $D(z) = 0$ 时，对应“关”（暗孤子弥散）。这对设计实用的光开关是重要的。

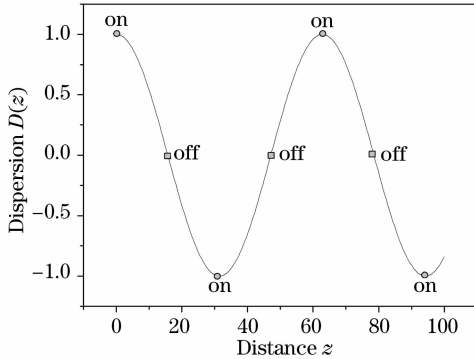


图 4 光学器件设计示意图

Fig. 4 Sketch of optical devices design

4 结 论

讨论了在分布系统中，具有有限背景宽度的暗脉冲的传输行为。结果表明，暗孤子的周期性再生效应稳定地存在于分布系统中，该效应对光学器件的设计非常有用。

参 考 文 献

- 1 A. Hasegawa, Y. Kodama. *Solitons in Optical Communications* [M]. Oxford: Oxford University Press, 1995
- 2 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. New York: Academic Press, 1995
- 3 V. N. Serkin, A. Hasegawa. Exactly integrable nonlinear Schrödinger equation models with varying dispersion, nonlinearity and gain: Application for soliton dispersion managements[J]. *IEEE J. Sel. Top. in Quant. Electron.*, 2002, **8**(3): 418~431
- 4 V. I. Kruglov, A. C. Peacock, J. D. Harvey. Exact self-similar solutions of the generalized nonlinear Schrödinger equation with distributed coefficients [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **90**(11): 113902-1~4
- 5 M. Stratmann, T. Pagel, F. Mitschke. Experimental observation of temporal soliton molecules[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **95**(14): 143902-1~4
- 6 Ruiyu Hao, Lu Li, Rongcao Yang *et al.*. Exact chirped multi-soliton solutions of the nonlinear Schrödinger equation with varying coefficients[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(3): 136~139
- 7 Ruiyu Hao, Guosheng Zhou. Propagation of light in $(2+1)$ -dimensional nonlinear optical media with spatially inhomogeneous nonlinearities[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(3): 211~213
- 8 Liu Shanliang, Zheng Hongjun. Experimental research on solitons evolution of optical pulses in standard single-mode fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(9): 1313~1318
- 9 刘山亮, 郑宏军. 光脉冲在标准单模光纤中演化形成孤子的实验研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(9): 1313~1318
- 9 A. Hasegawa, F. Tappert. Transmission of stationary nonlinear optical pulses in dispersive dielectric fibers. I. Anomalous dispersion[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1973, **23**(3): 142~144
- 10 A. Hasegawa, F. Tappert. Transmission of stationary nonlinear optical pulses in dispersive dielectric fibers. II. Normal dispersion[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1973, **23**(4): 171~172
- 11 L. F. Mollenauer, R. H. Stolen, J. P. Gordon. Experimental observation of picosecond pulse narrowing and solitons in optical fibers[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1980, **45**(13): 1095~1098
- 12 Y. Chen, J. Atai. Absorption and amplification of dark solitons [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(24): 1933~1935
- 13 M. Lisak, D. Anderson. Dissipative damping of dark solitons in optical fibers[J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(24): 1936~1938
- 14 J. P. Hamaide, Ph. Emplit, M. Haelterman. Dark soliton jitter in amplified optical transmission systems[J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(20): 1578~1580
- 15 Y. S. Kivshar, M. Haelterman, P. Emplit *et al.*. Gordon-Haus effect on dark solitons[J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(1): 19~21
- 16 D. Krökel, N. J. Halas, G. Giuliani *et al.*. Dark-pulse propagation in optical fibers[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1988, **60**(1): 29~32
- 17 J. P. Tian, H. P. Tian, Z. H. Li *et al.*. An inter-modulated solitary wave solution for the higher order nonlinear Schrödinger Equation[J]. *Physica Scripta*, 2003, **67**(4): 325~328
- 18 V. A. Bogatyrev, M. M. Bubnov, E. M. Dianov *et al.*. A single-mode fiber with chromatic dispersion varying along the length[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(5): 561~566
- 19 R. Y. Hao, L. Li, Z. H. Li *et al.*. A new approach to exact soliton solutions and soliton interaction for the nonlinear Schrödinger equation with variable coefficients [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **236**(1~3): 79~86