

色散控制“呼吸”孤子传输特性的数值研究

徐 铭, 严新民, 吉建华, 杨淑雯, 马君显

(深圳大学信息工程学院 广东 深圳 518060)

【摘要】采用数值计算方法研究了色散控制“呼吸”孤子传输系统稳定传输的特性, 研究结果表明: 脉冲的主体或“内核”部分的演化是稳定的, 而脉冲所受的周期放大损耗以及色散项的扰动在归一化放大间距 $Z_a(Z_d) \ll 1$ 条件下, 该扰动对脉冲主体的影响可以忽略, 从而证明了色散控制“呼吸”孤子传输是一个稳定的传输方案。

关键词 光孤子; 色散补偿; 色散控制孤子; 快速分步傅里叶算法

中图分类号 TN929.11

文献标识码 A

Numerical Analysis of the Dispersion-Managed “Breathing” Soliton Transmission

XU Ming, YAN Xing-ming, JI Jian-hua, YANG Shu-wen, MA Jun-xian

(College of Information Engineer, Shenzhen University Shenzhen Guangdong 518060)

Abstract The characteristic of dispersion-managed “breathing” soliton transmission is studied with numerical methods. The achieved results indicate that the main body or the core of soliton is stable and the perturbation induced from period amplifier and dispersion management can be ignored in condition of $Z_a(Z_d) \ll 1$. This proves that the dispersion managed “breathing” soliton transmission is a stable transmission scheme.

Key words optical soliton; dispersion compensating; dispersion managed soliton, split-step fast Fourier transform

色散控制孤子(Dispersion Managed Soliton, DMS)是近年来提出的一种新的光孤子通信方案, 与普通恒色散孤子通信方案相比, 具有脉冲能量高、路径平均色散低、信噪比高和定时抖动小等特点。该方案传输的脉冲已经不再是经典孤子, 在色散控制强度较大时, 其形状已变成类高斯形的“呼吸”孤子^[1-2], 即色散控制“呼吸”孤子。但是, DMS仍然是描述该类系统传输特性的非线性传播方程的孤立波解, 因此研究经典孤子传输理论的各种研究方法, 基本上都可用来研究DMS系统^[2-5]。文献[6-7]采用导引中心理论研究了有损耗、放大以及光纤本身的色散扰动的经典孤子传输系统的稳定性。和平均导引孤子不同的是, DMS传输系统方案是人为地引入周期变化的色散项, 该系统的稳定性条件、传输基本特性以及传输方案与经典孤子传输方案的不同, 都需进行更深入的研究。本文采用数值计算方法研究了“呼吸”孤子传输系统的稳定传输特性, 据此证明“呼吸”孤子传输的稳定性, 为该传输方案的应用提供依据。

1 色散控制“呼吸”孤子传输方程

对于周期性集总放大的正负色散周期性交替变化的色散补偿系统, 脉冲的传输演化行为可由非线性薛定谔方程(NSL)加以描述^[8]:

$$i \frac{\partial E}{\partial z} - \frac{1}{2} \beta_2(z) \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + \gamma(z) |E|^2 E = i[-\alpha + \exp(\alpha z_a - 1) \sum_{m=1}^N \delta(z - m z_a)] E \quad (1)$$

式中 z 、 t 、 $\beta_2(z)$ 、 α 、 γ 、 N 分别为传输距离、延时时间、群速度色散、光纤损耗、非线性系数以及放大器总数; z_a 为放大周期长度。和经典孤子系统中 $\beta_2(z)$ 恒定不变不同, 在DMS系统中其值随距离而变, 在传输段和补偿段取值不同, 由此导致两种系统中传输的光脉冲具有不同的特征。

收稿日期: 2004-03-01

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(60372088;60132040); 广东省自然科学基金资助项目(04300855;530108)

作者简介: 徐 铭(1970-), 男, 博士, 主要从事高速光纤通信和全光通信网方面的研究。

对式(1)进行归一化处理:令 $P = E/\sqrt{P_0}$, $T = t/T_0$, $Z = z/L_D$, $L_D = T_0^2 / \langle \beta_2 \rangle$ ($\langle \cdot \rangle$ 代表取路径平均), T_0 为脉冲的初始半宽度,则可以得到归一化非线性薛定谔方程:

$$i \frac{\partial P}{\partial Z} + \frac{1}{2} d(Z) \frac{\partial^2 P}{\partial T^2} + \sigma(Z) |P|^2 P = iG(Z)P \tag{2}$$

式中 $d(Z) = -\beta_2 L_D / T_0^2 = -\beta_2 / \langle \beta_2 \rangle$ 表示归一化周期色散的变化项; $\sigma(Z) = \gamma P_0 L_D$ 表示归一化非线性项; $P_0 = \frac{\langle \beta_2 \rangle}{\langle \gamma \rangle T_0^2}$ 表示脉冲初始输入功率; $G(Z) = -\Gamma + [\exp(\Gamma Z_a) - 1] \sum_{m=1}^N \delta(Z - mZ_a)$ 表示周期放大及损耗的项; $\Gamma = \alpha L_D$ 为归一化损耗系数。令:

$$U(Z, T) = a(Z)P(Z, T), \quad \frac{da}{dZ} = -\Gamma a + [\exp(\Gamma Z_a) - 1] \sum_{m=1}^N \delta(Z - mZ_a) a \tag{3}$$

则式(2)可改写成以标准非线性薛定谔方程(NLSE)表示的色散控制孤子系统传输方程:

$$i \frac{\partial U}{\partial Z} + \frac{1}{2} d(Z) \frac{\partial^2 U}{\partial T^2} + Q(Z) |U|^2 U = 0, \quad Q(Z) = a(Z) [\sigma(Z)]^{\frac{1}{2}} \tag{4}$$

式中 $Q(Z)$ 是含有周期放大损耗以及非线性变化的项。式(4)可用于研究DMS的传输特性,当不考虑或不考虑非线性时, $Q(Z) = 0$, 方程亦可用于分析线性色散补偿光纤通信系统的性能。假定非线性系数变化较小,从而归一化非线性系数 $\sigma(Z) \approx 1$, 此时 $Q(Z) \approx a(Z)$ 。

2 色散控制“呼吸”孤子传输稳定性数值分析

假定方程(4)的试探解为^[8]:

$$U(\tau, Z) = \sqrt{p(Z)} v(\tau, Z) \exp\left(\frac{i}{2} C(Z) \tau^2\right), \quad \tau = p(Z)T \tag{5}$$

代入(4)式且分离变量, 获得:

$$i \frac{\partial v}{\partial Z} + \frac{p^2 d(Z)}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial \tau^2} + pQ(Z) |v|^2 v - \frac{k(Z)}{2} \tau^2 v = 0 \tag{6}$$

以及:

$$\frac{dp}{dZ} = -Cp^3 d(Z), \quad k(Z) = \frac{dC}{dZ} - C^2 p^2 d(Z) \tag{7}$$

式中 $k(Z)$ 为待定的函数, 表示的是啁啾 C 的变化项, 由变化的色散 $d(Z)$ 所致, 可采用拉氏变分法确定^[9]:

$k(Z) = p^2 d(z) - \frac{E}{\sqrt{2\pi}} p$, $E = |U|^2$ 为非线性脉冲的能量。方程(6)表明, 脉冲的演化由方程左边3部份决定:

第2项周期色散项, 第3项非线性项, 即自相位强度调制项, 以及第4项啁啾项。而式(7)表明了脉宽 p 与啁啾项 k 的演化关系。

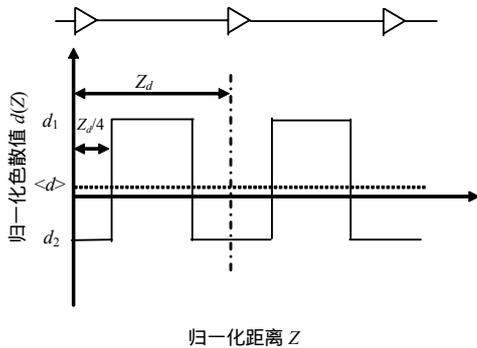


图1 色散补偿方案简图

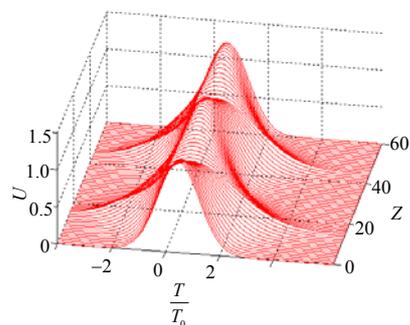


图2 DMS的幅度 U 于欠补偿条件下的一个色散管理周期内的演化图

对于经典孤子传输方案, 平均导引中心理论曾给出的稳定传输条件为 $Z_a(Z_a) \ll 1$ ^[7], 其中 $Z_a = z_a / L_D$; $Z_d = z_d / L_D$ 分别为归一化放大长度以及色散补偿长度。现在采用如图1所示的色散分布图, 对于色散控制“呼

吸”孤子方案在同样的传输条件 $Z_a(Z_d) \ll 1$ 下,采用快速分步傅里叶算法(SSFFT)直接对方程(4)和(6)进行数值积分,以证实系统中光脉冲的传输演化波形的稳定性。

图2为对NLS方程(4)数值计算的结果,表明孤子在欠补偿情况下(孤子运行在反常平均色散区内),一个色散分布周期内的演化情况。计算中所用的参数为:输入脉冲的宽度 $T_0 = 9$ ps,光纤的色散 $d_1 = 30(-3 \text{ ps}^2/\text{km})$, $d_2 = -28(2.8 \text{ ps}^2/\text{km})$,放大器间距和补偿周期相等,即 $z_a = z_d = 60$ km,此时, $Z_a(Z_d) \approx 0.074 \ll 1$ 。数值为每隔1 km就取一组数值。受色散扰动的影响,脉冲幅度 $U(Z,T)$ 与脉宽 T 在一个色散补偿周期内波动较大,形似“呼吸”状。但是,这种波动是周期性的,脉冲 $U(Z,T)$ 能够以近似高斯形稳定传输,每个周期后恢复初始值。这种情形非常类似于经典孤子系统中的所谓动态孤子^[8]。进一步对图3(参数和图2相同)里的脉冲能量 E 的对数演化情况研究,表明在一个色散管理周期内的DMS尾部有部分能量以色散波的形式耗散掉,但非常小。图4为对NLS方程(6)数值计算的结果,由图可以看出,新变量 v 的演化非常稳定,类似平均孤子区的孤子演化。即色散控制孤子的演化其“外形” $U(T,Z)$ 类似动态孤子传输,而“内核” $v(\tau,Z)$ 类似平均孤子的传输。

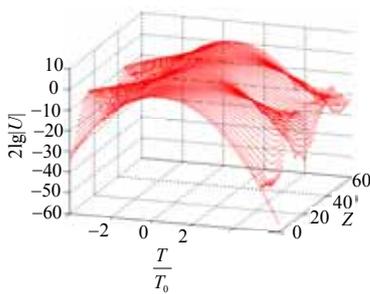


图3 DMS的能量 $E = |U|^2$ 于欠补偿条件下的一个色散管理周期内的演化图

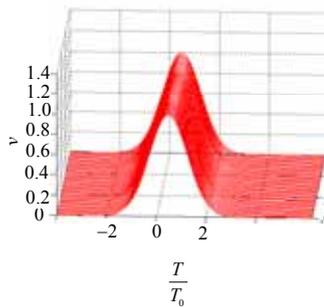


图4 新变量 v 在一个色散管理周期内的演化图

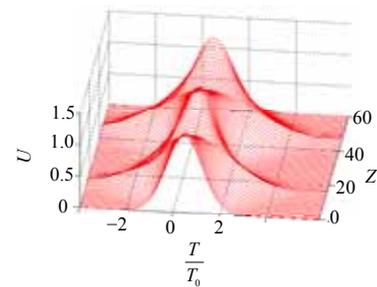


图5 DMS的幅度 U 于过补偿条件下的一个色散管理周期内的演化图

图5为DMS在过补偿情况下,即脉冲运行在正常平均色散区内的情况,经过一个色散管理周期脉冲的 $U(T,Z)$ 的演化,光纤的色散 $d_1 = 30(-3 \text{ ps}^2/\text{km})$, $d_2 = -34(3.4 \text{ ps}^2/\text{km})$ 。图6为DMS在完全补偿情况下,即零路径平均色散区内的传输情况,脉冲初始参数的选择为光纤的色散 $d_1 = 30(-3 \text{ ps}^2/\text{km})$, $d_2 = -30(3.0 \text{ ps}^2/\text{km})$,同时 $z_a = z_d = 120$ km。此时由于 $\langle \beta_2 \rangle \rightarrow 0$,则 $Z_a(Z_d) \rightarrow 0 \ll 1$ 。图中显示脉冲的 $U(T,Z)$ 能够稳定的传输,表明DMS传输方案可运行在正色散区或负色散区,甚至零平均色散区。

为了更加细致地研究DMS的传输特性,对式(7)采用龙格库塔数值计算方法可计算出脉宽与啁啾随距离的演化图以及两者之间的演化关系图,结果如图7a、7b所示。

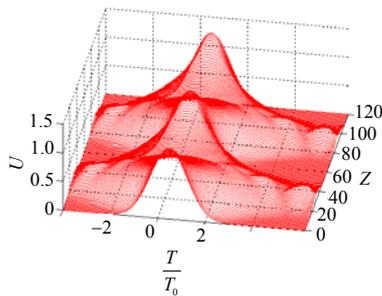


图6 DMS的幅度 U 于完全补偿条件下的一个色散管理周期内的演化图

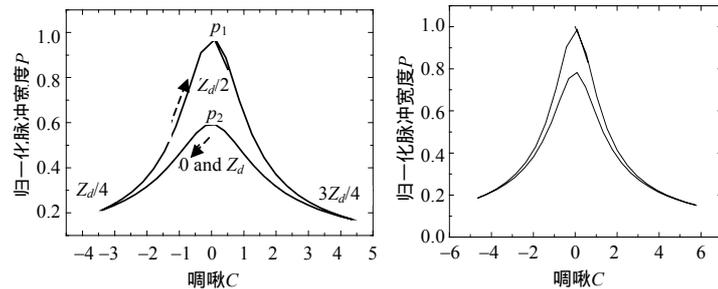


图7 DMS的脉冲宽度与啁啾在10个色散管理周期内的演化关系
a. 归一化能量为1.5 条件下的计算结果
b. 归一化能量为3条 条件下的计算结果

图7为在10个色散管理周期内 $P-C$ 两者之间的演化关系图,除脉冲能量不同外,其他初始参数的选择与图2相同。其中图7a所选的初始脉冲能量为1.5,图7b所选的初始能量为3,两图采用的其他参数相同。图中显示,脉冲即使经过10个色散管理周期后, $P-C$ 的演化关系也是固定、重合的,两者关系为一对称、闭合的曲线(数值计算还证明这种演化关系可维持到50个以上的色散管理周期)。即在色散控制孤子系统中,即使是

欠补偿情况下,脉冲经过很多色散管理周期后,也能恢复到初始参数值,说明该传输系统是稳定传输的。但是,从图中可以发现,系统经过每一个色散管理周期后,参数恢复到初始值的机制是和线性系统中完全补偿情况下的机制不一样。即在经过一个色散管理周期后,在 $Z_d/2$ 处有一个极值点 $(0, p_1)$, p_1 最大,脉冲最窄,在0和 Z_d 处脉冲有第2个极值点 $(0, p_2)$ 。即在反常色散区内的平均脉冲宽度窄于正常色散区内的平均脉冲宽度。图中还显示,不同的脉冲能量条件下,脉冲的演化曲线闭合面积也不一样。

上述结果表明,对于条件 $Z_a(Z_d) \ll 1$ 下,“呼吸”孤子的“内核”新变量 $v(\tau, Z)$ (该变量对应于平均导引孤子理论中的非线性薛定谔方程基态孤子)的演化非常稳定,类似处于平均孤子区的经典孤子演化。而孤子的“外形” $U(T, Z)$ 演化类似动态孤子传输,这种动态演化可看成孤子波形 v 的基础上所受的周期放大损耗以及色散补偿项的扰动,这种扰动在长距离传输后对孤子的“内核”的影响很小。

3 结 论

本文通过数值方法加以验证,在归一化条件 $Z_a(Z_d) \ll 1$ 下,色散控制“呼吸”孤子传输方案系统传输的稳定性。通过合理的系统色散配置,可以获得稳定的光传输方案-色散控制“呼吸”孤子传输方案,该方案不同于经典孤子提出的几种传输方案。从总体上看,“呼吸”孤子类似处于平均孤子区的孤子特点,而局部上又类似于动态孤子区,但不会有明显的色散波产生。但和经典孤子不同的是该传输方案可运行在正色散区或负色散区,甚至零平均色散区。

参 考 文 献

- [1] Smith N J, Doran N J, Forysaik W, et al..Soliton transmission using periodic dispersion compensation[J]. J. Lightwave Technol., 1997, 15(10): 1 808-1 822.
- [2] Xu Ming, Yang Xiang-lin, Yu Hu, et al. Analysis of performance in dispersion managed soliton system schemes(Chinese)[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(1): 31-36.
- [3] Lakoba T I, Kaup D J. Hermite-Gaussian expansion for pulse propagation in strongly dispersion managed fibers[J]. Phys. Rev. E, 1998, 58(5): 6 728-6 741.
- [4] Turitsyn S K, Schafer T, Mezentsev V K. Generalized root mean square momentum method to describe chirped return to zero signal propagation in dispersion managed fiber links[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 1999, 11(2): 203-205.
- [5] Mu R M, Grigoryan V S, Menyuk C R, et al. Timing jitter reduction in a dispersion managed soliton system[J]. Opt. Lett., 1998, 23(12): 930-932.
- [6] Hasegawa A, Kodama Y. Guiding-center soliton in optical fibers[J]. Opt. Lett., 1990, 15: 1 443-1 445.
- [7] Hasegawa A, Kodama Y. Guiding-center soliton in fibers with periodically varying dispersion[J]. Opt. Lett., 1991, 16: 1 385-1 387.
- [8] Yang Xiang-lin. The fundamental theory of optical soliton communications (Chinese)[M]. Beijing: Press of National Defense Industry, 2000.
- [9] Hirooka T, Hasegawa A. Chirped soliton interaction in strongly dispersion-managed wavelength-division-multiplexing systems[J]. Opt. Lett., 1998, 23(10): 768-770.

编 辑 漆 蓉