

doi:10.3788/gzxb20184706.0619001

# 非均匀掺铒光纤中的可控呼吸子与多峰孤子

贺锋涛, 湛飞, 石文娟

(西安邮电大学 电子工程学院, 西安 710121)

**摘 要:**研究了耦合广义非均匀非线性薛定谔-麦克斯韦-布洛赫方程所描述的非均匀掺铒光纤系统中不同非线性局域波的色散与非线性管理问题,利用相似变换求解非均匀非线性薛定谔-麦克斯韦-布洛赫方程,得到一个非自治的通解形式,该解在非均匀掺铒光纤系统中包含了众多的非线性局域波结构,从非线性局域波的复现与相移非线性局域波考虑,在色散与非线性管理系统下分析了呼吸子和多峰孤子的动力学特性,结果表明在非均匀掺铒光纤系统中存在新的非线性局域波结构,并且在色散与非线性管理系统下非线性局域波的结构呈现多样性,这对实际的光纤通信理论有参考意义.

**关键词:**非线性局域波;掺铒光纤;相似变换;非线性薛定谔-麦克斯韦-布洛赫方程;管理

中图分类号:TN929.11

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)06-0619001-8

## Controllable Breathers and Multi-peak Solitons in an Inhomogeneous Erbium-doped Fiber System

HE Feng-tao, ZHAN Fei, SHI Wen-juan

(School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

**Abstract:** The dispersion-nonlinearity-managed of different types of nonlinear localized waves was studied in an inhomogeneous erbium-doped fiber system, which is described by the coupled generalized inhomogeneous nonlinear Schödinger-Maxwell-Bloch equation. A united nonautonomous solution was obtained by using similarity transformation from an inhomogeneous nonlinear Schödinger-Maxwell-Bloch equation. The solution includes lots of the structures of nonlinear local wave in this system. The dynamics properties of breathers and multi-peaks solitons are analyzed from two perspectives, including periodically distributed amplification and phase-shifting nonlinear localized waves. The results show that the novelty structure of nonlinear local wave does exist in an inhomogeneous erbium-doped fiber system and appears diversity under the management of dispersion and nonlinearity, and has a guiding significance in practice theoretically for optical fiber communications.

**Key words:** Nonlinear localized waves; Erbium-doped fiber; Similarity transformation; Nonlinear Schödinger-Maxwell-Bloch equation; Management

**OCIS Codes:** 190.4370; 190.5530; 190.7110; 320.7110

## 0 引言

在长距离通信系统中,掺铒光纤在光信号的衰减与放大问题上扮演着非常重要的角色,这也使得掺铒光纤中的孤子型脉冲传输越来越受到重视<sup>[1-2]</sup>.掺铒光纤的放大作用解决了光纤通信传输距离受光纤损耗受限的问题,并使全光通信距离延伸至几千公里<sup>[3-5]</sup>.近年来,研究者相继在掺铒光纤中发现了除孤子型脉冲外新的非线性局域波结构<sup>[3]</sup>,然而在实际的光信号传输过程中掺铒光纤的非均匀性是不可避免的.造成光纤非均匀性的原因有两个:一是光纤晶格参数的改变;二是光纤几何结构的改变<sup>[1]</sup>.因此,非均匀性对掺铒光纤中非

基金项目:国家自然科学基金(No. 61201193)资助

第一作者:贺锋涛(1974—),男,教授,博士,主要研究方向为光电通信技术. Email:hefengtao@xupt.edu.cn

通讯作者:湛飞(1992—),男,硕士研究生,主要研究方向为非线性光纤光学. Email:15229235899@163.com

收稿日期:2017-11-27;录用日期:2018-03-12

<http://www.photon.ac.cn>

线性局域波的传播特性受到人们的重视.基于实际应用的考虑,非均匀掺铒光纤系统要比均匀掺铒系统更能反映实际的光信号传输.在实际的信号传输中,色散与非线性引起的信号的衰减、相位的改变也是不可避免的.通过色散与非线性管理<sup>[6-8]</sup>办法可以很好地控制局域波的振幅大小以及相位的改变.同时,在诸如常耦合非线性薛定谔-麦克斯韦-布洛赫(coupled Nonlinear Schrödinger-Maxwell-Bloch, cNLS-MB)方程这样的耦合系统<sup>[9-10]</sup>中找到了许多新的非线性局域波结构,比如呼吸子<sup>[11]</sup>(Akhmediev Breathers, AB; Kuznetsov-Ma Breathers, K-Ma)、多峰孤子<sup>[12]</sup>(Multi-peak Solitons)、周期波(Periodic Wave)、反暗孤子(Anti-dark Soliton)和 W 型孤子等<sup>[3,11]</sup>.对于广义非均匀掺铒光纤系统(Generalized Inhomogeneous Nonlinear Schrödinger-Maxwell-Bloch, GINLS-MB)来说,文献[1]求解了该系统下单孤子和双孤子解并构建了经典的孤子和呼吸子结构,但没有构建多峰孤子、AB 和 K-Ma.在不同色散与非线性函数操控下,文献[13]研究了双孤子在周期分放大和脉冲压缩下的动力学特性,但是对于多峰孤子和呼吸子却没有进行动力学分析.文献[14]对非均匀掺铒光纤中怪波(Rogue)与呼吸子的碰撞进行了研究,其结果能够控制非自治的呼吸子和怪波,但未研究多峰孤子、AB 和 K-Ma 的动力学特性.本文通过求解 GINLS-MB 方程并基于不同非线性局域波结构<sup>[15-17]</sup>,对新的非线性局域波结构(呼吸子与多峰孤子)做出色散与非线性管理,重点讨论呼吸子与多峰孤子的动力学行为.

## 1 模型与解

描述非均匀掺铒光纤系统的 GINLS-MB 方程<sup>[1-2]</sup>为

$$\begin{cases} iQ_z + \frac{D(z)}{2}Q_{tt} + R(z)|Q|^2Q + F_1(z,t) + F_2(z) - 2iA(z)p = 0 \\ p_t = 2ip\omega(2\omega - t\theta) + 2Q\eta \\ \eta_t = \frac{-R(z)}{D(z)}(p^*Q + pQ^*) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $z$  是传输距离, $t$  是持续时间; $D(z)$  代表群速度色散(Group Velocity Dispersion, GVD)函数; $R(z)$  是非线性管理函数; $Q$  表示归一化慢变振幅复合场包络; $Q_z$  表示  $Q$  对传输距离  $z$  的导数; $Q_{tt}$  表示  $Q$  对时间的二阶导数; $F_1(z,t)$  是与时间相关的相位调制函数; $F_2 = \frac{i}{2} \frac{W[D(z), R(z)]}{R(z)D(z)}$ ,  $W[D(z), R(z)] = R_z D - D_z R$ ,  $R_z$  表示非线性管理函数对  $z$  的导数,  $D_z$  表示色散函数对  $z$  的导数;  $A(z)$  为解释硅原子与掺杂原子之间相互作用的一个参数; $p$  为共振介质的极化方式,  $p = \nu_1 \nu_2^*$ ,  $\nu_1$  和  $\nu_2$  为二能级共振原子的波函数; $p_t$  表示  $p$  对时间的导数; $\eta$  为粒子数反转的程度,  $\eta = |\nu_1|^2 - |\nu_2|^2$ ;  $\theta(z)$  为相移函数; $\omega$  为载波频率;“\*”表示复共轭.

用相似变换<sup>[6]</sup>方法求解式(1)首先得知道 cNLS-MB 方程的解,给出 cNLS-MB 形式为

$$\begin{cases} E_z = i\left(\frac{1}{2}E_{tt} + |E|^2E\right) + 2P \\ P_t = 2i\omega P + 2E\eta' \\ \eta'_t = -(EP^* + PE^*) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $E$ 、 $P$ 、 $\eta'$  分别对应式(1)中  $Q$ 、 $p$ 、 $\eta$ .从式(1)中看出,如果取  $D(z) = R(z) = A(z)$  并且为常数时,非均匀掺铒光纤系统将变为由式(2)所描述的均匀掺铒系统.接着利用相似变换求解式(1)的解析解.首先设一个解形式为

$$\begin{cases} Q = \rho(z)E[Z(z), T(z,t)]e^{i\varphi(z,t)} \\ p = \kappa(z)P[Z(z), T(z,t)]e^{i\varphi(z,t)} \\ \eta(z,t) = \varphi(z)\eta'[Z(z), T(z,t)] \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\rho$ 、 $\varphi$ 、 $\kappa$ 、 $\varphi$ 、 $Z$  和  $T$  都是实函数, $\rho$  和  $\varphi$  是  $Q$  组分的振幅和相移, $\kappa$  和  $\varphi$  分别是  $p$  组分和  $\eta$  组分的振幅;其中  $Z(z)$  是归一化距离, $T(z,t)$  是持续时间; $E$ 、 $T$ 、 $P$  和  $\eta'$  分别是式(2)的解析解.

按照相似变换将式(3)代入到式(1)中,可以得到一系列的偏微分方程和约束关系,即

$$\begin{cases} \rho T_z + D\rho T_t \varphi_t = 0 \\ \frac{D}{2}\rho T_{tt} = 0 \\ \rho_z + \frac{D}{2}\rho\varphi_{tt} = 0 \\ F_1 + F_2 = \varphi_z + \frac{1}{2}\varphi_t^2 \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $T_z$ 、 $\rho_z$  以及  $\varphi_z$  分别表示对传输距离  $z$  的偏导,  $T_t$  和  $\varphi_t$  表示对时间的偏导,  $T_{tt}$  和  $\varphi_{tt}$  表示对时间的二阶偏导. 同时有

$$\begin{cases} \rho Z_z : \rho T_t^2 : R\rho^3 : A\kappa = 1 : 1 : 1 : 1 \\ \kappa T_t : \kappa \left(1 - \frac{t\theta + \varphi_t}{2\omega}\right) : \rho\varphi = 1 : 1 : 1 \\ T_t\varphi = \frac{R}{D}\rho\kappa \end{cases} \quad (5)$$

通过解式(4)和(5)可以得到所需的相关参量, 即

$$\begin{cases} \rho = c_0 \sqrt{R/D} \\ Z = c_0 \int_0^z \frac{R}{D} dz + Z_0 \\ T = c_0 \frac{R}{D} t + T_0 \\ F_1 = -F_2 + \varphi_z + \frac{D}{2}\varphi_t^2 \\ F_2 = \frac{i}{2} \frac{DR_z - RD_z}{DR} \end{cases} \quad (6)$$

式中  $Z_0$  和  $T_0$  分别是  $Z$  和  $T$  的初始值,  $c_0$  是一个任意常数. 相移函数  $\theta = 2\omega(1 - T_t) - \varphi_t/t$ . 同时, 式(2)可通过达布变换<sup>[3,14]</sup>解得. 由于在耦合系统中三组分的变换规律相似<sup>[3]</sup>, 因此只讨论  $Q$  组分的特性, 而忽略  $p$  和  $\eta$  的情况.

因此, 整理偏微分方程的解, 可以得到一般的平面波背景上的一阶精确非线性局域波解为

$$Q = C_0 a \sqrt{\frac{R}{D}} \exp \left[ i \left( qT + vZ - \frac{\alpha_z}{2D\alpha} t^2 \right) \right] \cdot \left\{ 1 - \frac{8bm_1 [\sin(\sigma(T + V_2 Z) + \mu_1) - i \sinh(\zeta(T + V_2 Z) + i\mu_1)]}{m_3 \sin[\sigma(T + V_2 Z) + \mu_2] - im_2 \sinh[\zeta(T + V_1 Z) - i\mu_3]} \right\} \quad (7)$$

式中,  $V_1 = v_1 + \frac{b\sigma v_2}{\zeta}$ ,  $V_2 = v_1 - \frac{b\zeta v_2}{\sigma}$ ,  $v_1 = \frac{k\omega}{b^2 + \omega^2} - \frac{q}{2}$ ,  $v_2 = 1 - \frac{k}{b^2 + \omega^2}$ ,  $m_1 = \sqrt{(i\zeta - \sigma)^2 + (2b + iq)^2}$ ,  $m_2 = \sqrt{(\alpha_1 + \alpha_2)^2 - 4(2b\zeta + \sigma q)^2}$ ,  $m_3 = \sqrt{(\alpha_1 - \alpha_2)^2 - 4(2b\sigma - \zeta q)^2}$ ,  $\alpha_1 = 4a^2 + 4b^2 + q^2$ ,  $\alpha_2 = \zeta^2 + \sigma^2$ ,  $\zeta = (\sqrt{\chi^2 + 16q^2 b^2} + \chi)^{1/2} / \sqrt{2}$ ,  $\chi = 4b^2 - 4a^2 - q^2$ ,  $\sigma = (\sqrt{\chi^2 + 16q^2 b^2} - \chi)^{1/2} / \sqrt{2}$ ,  $\mu_1 = \arctan\left(\frac{2b + iq}{\sigma - i\zeta}\right)$ ,  $\mu_2 = \arctan\left(\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{4b\sigma - 2\zeta q}\right)$ ,  $\mu_3 = \arctan\left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2i\sigma q - 4ib\zeta}\right)$ . 这些参量取决于: 背景场的振幅  $a$  和  $k$ 、背景频率  $q$ 、实参数  $b$  ( $\neq 0$ ) 以及载波频率  $\omega$ . 如果参量  $\omega$  确定, 就可以得到其余  $a$ 、 $k$ 、 $q$  和  $b$  的值, 进一步得到多种类型的非线性局域波.

从式(4)可以得到一般呼吸子解, 那么有  $V_1 \neq V_2$  (则  $k \neq b^2 + \omega^2$ ) 且  $a \neq b$ , 并且该呼吸子在时间上具有局域性, 在空间具有周期性<sup>[3]</sup>. Akhmediev 呼吸子是当  $k \neq b^2 + \omega^2$  并且  $a > |b|$  时得到, 其结构具有在时间上周期和空间上局域<sup>[16]</sup>. 同时, Kuznetsov-Ma 呼吸子当  $k \neq b^2 + \omega^2$  且  $a < |b|$  时, 其结构具有空间周期性和时间局域<sup>[17]</sup>. 最后, 多峰孤子被看作是一个孤子和一个周期波叠加形成<sup>[3]</sup>, 当  $k = b^2 + \omega^2$  且  $q \neq 0$ .

## 2 几种非线性局域波的色散与非线性管理

为了说明非线性局域波的特性,列出几种非线性局域波在色散管理下的动力学行为.根据光信号在传播过程中的能量衰减和信号的相位变化,从不同的分布函数中讨论非线性局域波的特性,包括非线性局域波的复现与放大以及相移非线性局域波.

### 2.1 非线性局域波的复现与放大

从式(4)可以看到  $Q$  中包含了两个分布函数  $D(z)$  和  $R(z)$ ,这表明可以通过适当选取  $D(z)$  和  $R(z)$  的形式来研究非均匀掺铒光纤中的非线性局域波的传播特性.以此,考虑具有 GVD 和非线性函数的周期分布放大系统<sup>[7,13]</sup>,可得

$$\begin{cases} D(z) = \frac{1}{d_0} \exp(\delta z) R(z) \\ R(z) = R_0 + R_1 \sin(gz) \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $R_0$  和  $R_1$  为定义科尔非线性参数;  $d_0$  为与初始峰值功率有关的参数.  $\delta$  为与 GVD 相关的参数,当  $\delta=0$  时,表示无任何损耗或增益光纤;当  $\delta<0$  时,对应色散减弱光纤;当  $\delta>0$ ,对应色散增强光纤.因此,将从这三个角度分析非线性局域波的特性.

#### 2.1.1 非线性局域波在周期非线性函数下的管理

首先讨论在没有放大效果条件下的呼吸子与多峰孤子的传输特性,即  $\delta=0$ .  $D(z)$  和  $R(z)$  的三种函数形式为

$$D(z) = R(z) = \sin(gz) \quad (9)$$

图 1 为  $Q$  组分的强度分布图.图 1(a)表示一般呼吸子的周期性行为,由于色散与非线性函数取三角形式使得一般呼吸子在传播方向具有周期性震荡,沿  $z$  轴周期性复现;又因为一般呼吸子可以由多峰孤子在当  $k=1$  时得到,因此  $t$  轴方向横截面是一个多峰孤子的形状.从图 1(b)看出 Akhmediev 呼吸子在整个时空域

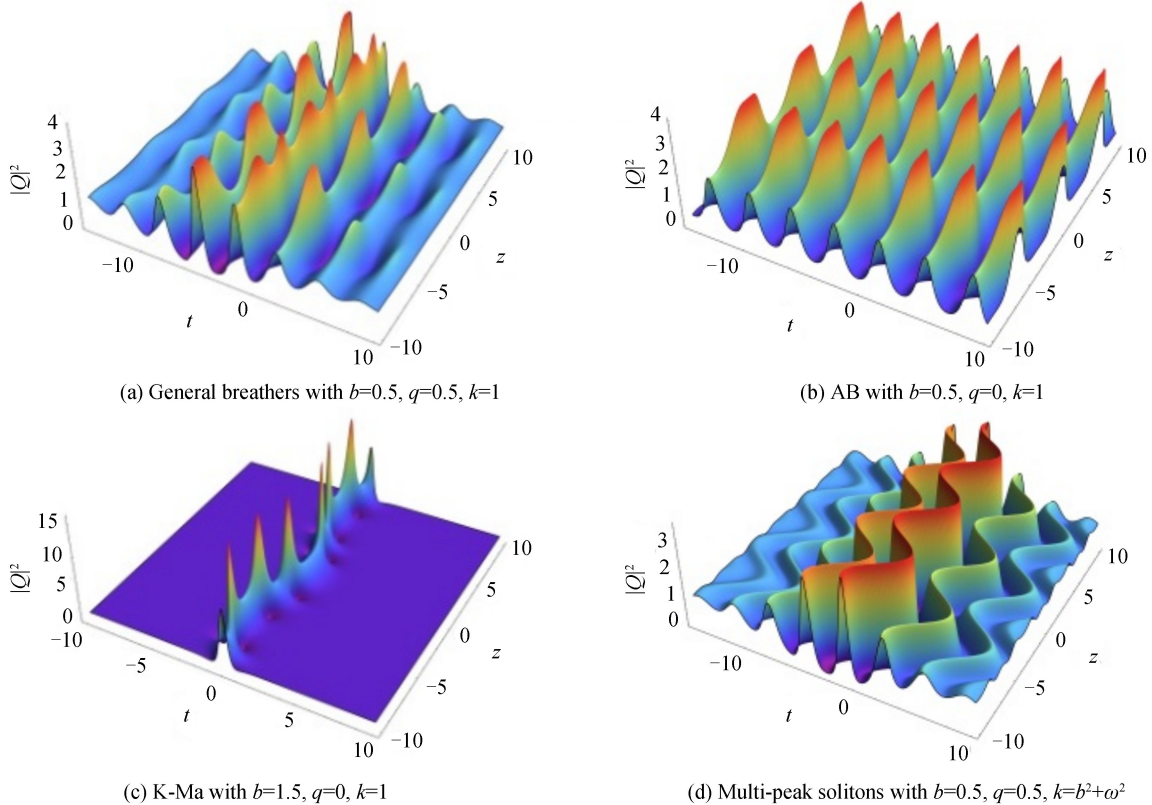


图 1 周期非线性管理下几种呼吸子和多峰孤子的强度分布 ( $\omega=2, \delta=R_0=0, c=d_0=R_1=g=1$ )

Fig.1 Intensity distribution of nonlinear local wave under periodic nonlinearity management

( $\omega=2, \delta=R_0=0, c=d_0=R_1=g=1$ )

上具有局域周期性.不加操控时, $D$  和  $R$  是一个常数,Akhmediev 呼吸子本身在时间上周期传播方向局域; $D$  和  $R$  取三角函数形式时,由式(6)得到  $Z$  和  $T$  也是一个周期函数,振幅  $\rho=1$ ,因此在时空域中都表现出周期性.图 1(a)刻画了 Kuznetsov-Ma 呼吸子的强度图,由于其本身在传播方向具有周期性时间上局域,因此加入操控后传播方向发生周期性震荡,与文献[1-2]中的“蛇形震荡”相似.图 1(d)为多峰孤子在式(9)条件下的强度分布,由于式(6)中  $\rho=c\sqrt{R/D}$  变为常数,使  $Z=-1/g[\cos(gz)-1]$ ,因此多峰孤子在传播方向震荡但振幅不发生改变.特别地,若式(7)中当  $\omega=q/2$ ,有  $V_1=V_2=0$ ,则多峰孤子速度消失,震荡也随即消失.

2.1.2 非线性局域波在指数增加色散函数下的管理

长距离通信系统中,信号的衰减是不可避免的,在掺铒光纤系统中指数增加色散管理系统能解决信号衰减的问题<sup>[6,18]</sup>.色散与非线性关系为

$$\begin{cases} D(z) = \exp(\delta z) \\ R(z) = 1 \end{cases} \quad (10)$$

图 2 为非线性局域波的强度分布.图 2(a)显示了一般呼吸子在时空背景上的强度分布,由于色散取指数形式,使得单个呼吸子的峰值以指数规律变化,加之非线性系数为 1,使得呼吸子在传播方向发生偏转.图 2(b)Akhmediev 呼吸子的强度分布显示,因  $Q$  组分振幅是衰减指数型色散,使得背景振幅会随传播距离减小;又因为非线性系数是一个常数,使得色散与非线性之间的平衡被打破,局域波结构发散.图 2(c)中,随着  $z \rightarrow -\infty$ ,单个呼吸子的振幅趋于消失,类似于图 2(a),图 2(c)在传播时也发生了相位的偏转.图 2(d)中多峰孤子在  $t$  轴方向上保留其形状,由于非线性系数  $R=1$ ,因此沿传播方向局域波结构向两边发散.

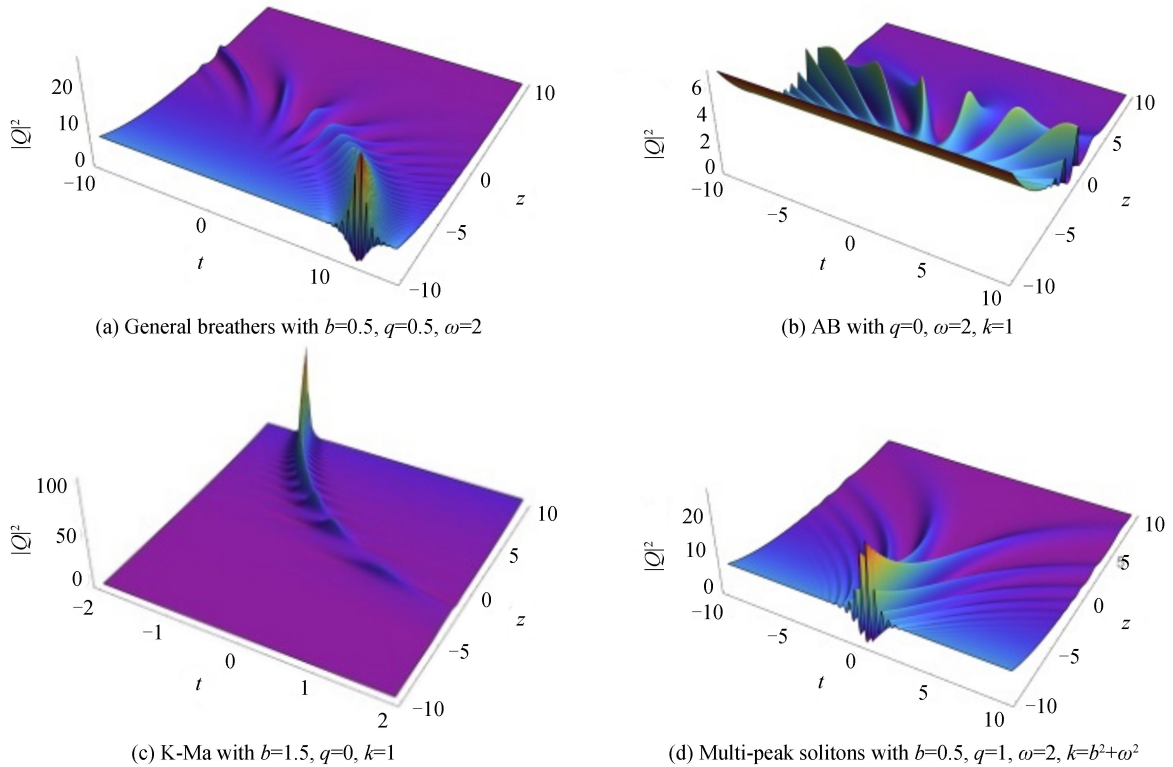


图 2 周期指数增加色散管理下非线性局域波强度图 ( $\delta=0.2, c=1$ )

Fig.2 Intensity distribution of nonlinear local wave under periodic exponential increasing dispersion management ( $\delta=0.2, c=1$ )

2.1.3 非线性局域波在周期非线性函数与指数增加色散函数下的管理

讨论色散与非线性共同存在时非线性局域波的变化规律.色散与非线性关系为

$$\begin{cases} R(z) = \exp(\delta z)D(z) \\ R(z) = \sin(gz) \end{cases} \quad (11)$$

为了简化计算,假设参数  $d_0=1, R_0=1$  和  $g=1$ ,这不会改变非线性局域波的结构特性.

图 3(a)为一般呼吸子在周期放大操控下的强度图,由于此时的色散与非线性系数共同影响系统的局域波结构<sup>[13]</sup>,并随着距离发生改变,因此呈现出传播方向具有震荡和振幅衰减的现象.图 3(b) Akhmediev 呼吸子在时空域上产生发散现象,由于此时  $\rho = c \sqrt{R/D}$  是一个单调函数,因此振幅会发生衰减.图 3(c)是 Kuznetsov-Ma 呼吸子的强度图,其结构类似于文献[6,9]中周期操控下的孤子,其振幅会随距离减小.从图 3(d)中可以看到多峰孤子具有一个发散震荡的行为,比较文献[1,2,6]可以得到,其共同点为都是发生了发散震荡并伴随振幅的改变,区别在于此管理下掺铒光纤中存在着新的非线性局域波结构.

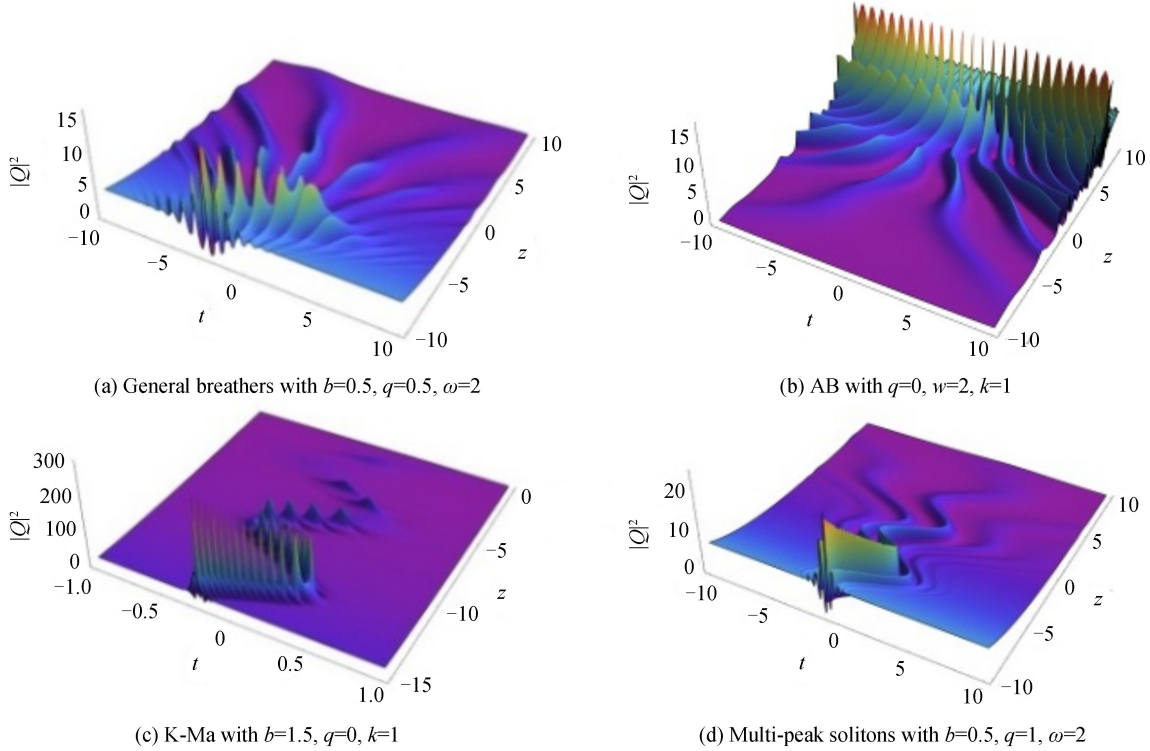


图 3 周期非线性与指数增加色散管理下非线性局域波的强度图( $\delta=0.2, c=1$ )

Fig.3 Intensity distribution of nonlinear local wave under periodic nonlinearity and exponential increasing dispersion management ( $\delta=0.2, c=1$ )

### 2.2 相移非线性局域波

考虑色散与非线性参量为线性函数<sup>[1,2,7]</sup>时非线性局域波的特性,实际上色散与非线性函数取线性函数是一种坐标变换. $D$  和  $R$  的形式为

$$D(z) = R(z) = A(z) = n + lz \tag{12}$$

式中,  $n$  和  $l$  是跟线性函数相关的参数.当色散与非线性函数为式(12)时,呼吸子与多峰孤子具有抛物线形结构,这种结构类似于文献[7]的“回旋孤子”,是一种特殊的暗孤子结构.

图 4(a)为一般呼吸子在式(9)条件下所具有的抛物型结构,通过改变参数  $|l|$  的大小,非线性局域波在传播方向上会发生弯曲,当  $|l|$  增加时弯曲的程度变大,这种结构类似于文献[6]中的“Boomerang solitons”.图 4(b)中,当  $a \neq b$  时, Akmhediev 呼吸子在相移操控下的强度图表现出非常对称的结构,在传播方向上具有两个波峰,由于  $D$  和  $R$  均为一次函数,由式(6)中的  $Z = c_0 \int_0^z \frac{R^2}{D} dz + Z_0$  可以看到,积分结果为  $Z = c_0 \left( nz + \frac{1}{2} lz^2 \right) + Z_0$ ,可见在  $z$  轴上的分布具有对称性的中心坐标是  $z = -2n/l$ .同理对于图 4(c),由于 Kuznetsov-Ma 呼吸子在时间域上具有局域性以及空间域上具有周期性的特点,当色散与非线性函数为式(13)时, Kuznetsov-Ma 呼吸子在传播方向上具有类似抛物线型的结构,在时间轴上具有 W 型孤子的结构.图 4(d)中多峰孤子的形状与文献[1-2]中的相似,当  $l \rightarrow -\infty$  时,多峰孤子弯曲的程度变大. $l$  的正负影响相移的方向,当  $l > 0$  时,非线性局域波朝  $t$  轴负方向传播,相反,当  $l < 0$  时,朝正向传输.若由文献[14]取

$D(z)=R(z)=a_0+a_1z+a_2z^2$ ,则非线性局域波会出现立方多项式形状.因此,通过选取  $D$  的形式可以得到结构丰富的非线性局域波结构.

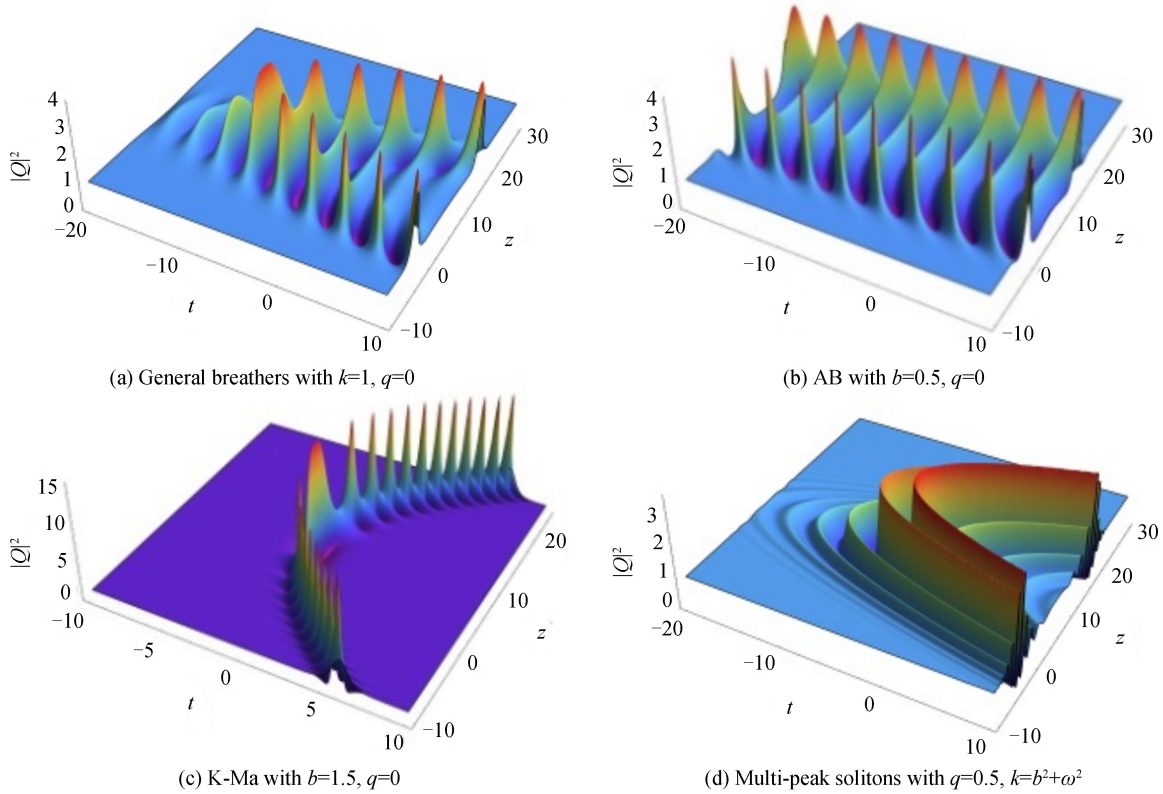


图 4 相移非线性局域波的强度图 ( $a=1, b=0.5\omega=2, l=-0.15$ )

Fig.4 Intensity distribution of phase-shifting nonlinear waves ( $a=1, b=0.5\omega=2, l=-0.15$ )

### 3 结论

本文从广义非均匀非线性掺铒光纤系统所描述的 GINLS-MB 方程出发,通过相似变换的方法求解了方程的解析解,该解析解是一个非自治的形式,包含了诸如呼吸子和多峰孤子丰富的非线性局域波结构.接着从非线性局域波的复现与放大,以及相移非线性局域波两个方面对非线性局域波进行了讨论.通过选取色散函数  $D$  和非线性函数  $R$  得到了非线性局域波在时空域上的强度图.从图中可以看到在非均匀掺铒光纤系统中确实能够存在多结构的非线性局域波.对于复现与放大非线性局域波,可以得到一般呼吸子、Akhmediev 呼吸子、Kuznetsov-Ma 呼吸子和多峰孤子都在时空域中有周期震荡和振幅增减的改变,通过这种手段可以很好地管理周期分布放大系统中的非线性局域波.相移非线性局域波传播方向发生偏转,整体结构类似于抛物线型结构.本文结果可为光纤应用、光开关和光纤通信系统等实际实验提供理论参考.

#### 参考文献

- [1] MAHALINGAM A, PORSEZIAN K., RAJAN S-M, *et al.* Propagation of dispersion-nonlinearity-managed solitons in an inhomogeneous erbium-doped fiber system[J]. *Journal of Physics A-Mathematical and Theoretical*, 2009, **42**(16): 165101.
- [2] MAHALINGAM A, UTHAYAKUNAR A, ANANDHI P. Dispersion and nonlinearity managed multisoliton propagation in an erbium doped inhomogeneous fiber with gain/loss[J]. *Journal of Optics*, 2013, **42**(3): 182-188.
- [3] REN Yang, YANG Zhan-ying, LIU Chong, *et al.* Different types of nonlinear localized and periodic waves in an erbium-doped fiber system[J]. *Physics Letters A*, 2015, **379**(45-46): 2991-2994.
- [4] ZHANG Xu-liang, QIANG Ze-xuan, SHEN Lin-fang, *et al.* Simulation and global analysis for erbium-doped fiber amplifier[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(10): 1256-1260.  
张徐亮,强则焯,沈林放,等. 掺铒光纤放大器的理论模拟与全局分析[J]. 光子学报, 2002, **31**(10): 1256-1260.
- [5] ZHANG Shu-min, LV Fu-yun, DONG Fa-jie, *et al.* Enhanced compression of higher order femtosecond soliton in fibers with slowly decreasing dispersion[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(11): 1360-1363.

- 张书敏,吕福云,董法杰,等. 色散缓变光纤中飞秒高阶孤子脉冲的增强压缩[J]. 光子学报, 2004, **33**(11):1360-1363.
- [6] DAI Chao-qing, WANG Yue-yue, TIAN Qing, *et al.* The management and containment of self-similar rogue waves in the inhomogeneous nonlinear Schrödinger equation[J]. *Annals of Physics*, 2012, **327**(2): 512-521.
- [7] VIJAYALEKSHMI S, RAJAM M-S, MAHALINGAM A, *et al.* Investigation on nonautonomous soliton management in generalized external potentials via dispersion and nonlinearity[J]. *Indian Journal of Physics*, 2015, **89**(9): 957-965.
- [8] HE Jing-song, XU Shu-wei, PORSEZIAN K. N-order bright and dark rogue waves in a resonant erbium-doped fiber system[J]. *Physical Review E*, 2012, **86**(6): 066603.
- [9] RAJAN M. Dynamics of optical soliton in a tapered erbium-doped fiber under periodic distributed amplification system [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2016, **85**(1): 599-606.
- [10] HAO Rui-yu, LI Lu, LI Zhong-hao, *et al.* A new way to exact quasi-soliton solutions and soliton interaction for the cubic-quintic nonlinear Schrödinger equation with variable coefficients[J]. *Optics Communications*, 2005, **245**(1-6): 383-390.
- [11] ZHAO Hui-hui, ZHAO Xiao-juan, HAO Hui-qin. Breather-to-soliton conversions and nonlinear wave interactions in a coupled Hirota system[J]. *Applied Mathematics Letters*, 2016, **61**: 8-12.
- [12] REN Yang, YANG Zhan-ying, LIU Chong, *et al.* Characteristics of optical multi-peak solitons induced by higher-order effects in an erbium-doped fiber system[J]. *The European Physical Journal D*, 2016, **70**: 187.
- [13] RAJAN M, MAHALINGAM A, UTHAYAKUMAR A, *et al.* Observation of two soliton propagation in an erbium doped inhomogeneous lossy fiber with phase modulation[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2013, **18**(6): 1410-1432.
- [14] WANG Lei, LI Xiao, QI Feng-hua, *et al.* Breather interactions and higher-order nonautonomous rogue waves for the inhomogeneous nonlinear Schrödinger Maxwell-Bloch equations[J]. *Annals of Physics*, 2015, **359**: 97-114.
- [15] SERKIN V, BELYAEV T. High-energy optical Schrödinger solitons[J]. *JETP Letters*, 2001, **74**(12): 573-577.
- [16] KIBLER B, FATOME J, FINOT C, *et al.* Observation of Kuznetsov-Ma soliton dynamics in optical fibre[J]. *Scientific Reports*, 2012, **2**: 463.
- [17] VLADIMIR N, AKIRA H. Novel soliton solutions of the nonlinear Schrödinger equation model[J]. *Physics Review Letter*, 2000, **85**(21-20): 4502.

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China (No.61201193)

引用格式: HE Feng-tao, ZHAN Fei, SHI Wen-juan. Controllable Breathers and Multi-peak Solitons in an Inhomogeneous Erbium-doped Fiber System[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(6):0619001

贺锋涛, 湛飞, 石文娟. 非均匀掺铒光纤中的可控呼吸子与多峰孤子[J]. 光子学报, 2018, **47**(6):0619001