

# 用变分法研究高阶色散和五阶非线性对高斯脉冲在 光纤中传输特性的影响

甘桂蓉<sup>1,2</sup> 罗开基<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 江西师范大学物理与通信电子学院, 江西 南昌 330022; <sup>2</sup> 江西省宜春学院, 江西 宜春 336000)

**摘要** 从修正的非线性薛定谔方程出发, 采用变分法, 导出了在高阶色散和五阶非线性共同作用下高斯型脉冲参量随传输距离的演化方程组; 求出了振幅与脉宽、频率与啁啾、脉宽与啁啾之间的三个重要约束关系; 并进一步得出了脉宽随传输距离演化的解析解和脉冲中心位置随传输距离的演化规律; 描绘了高阶色散和五阶非线性下, 脉宽随传输距离演化的图形。结果表明: 光纤中的高阶色散和五阶非线性都会影响高斯型脉冲各个参量的演化, 但脉宽和振幅间的绝热关系并未改变。高阶色散使高斯型脉冲的脉宽展宽, 五阶非线性使高斯型脉冲的脉宽压缩, 它们对脉宽或初始啁啾的影响可以在一定程度上抵消, 从而有可能使脉冲近似实现保形传输。

**关键词** 导波与光纤光学; 高斯脉冲; 变分法; 高阶色散; 五阶非线性

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A

## Variational Study on Influence of High-Order Dispersion and Fifth-Order Nonlinearity on Propagation Properties of Gaussian Pulse in Optical Fibers

Gan Guirong<sup>1,2</sup> Luo Kaiji<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Physics and Communication & Electronics, Jiangxi Normal University,  
Nanchang, Jiangxi 330022, China  
<sup>2</sup> Yichun University, Yichun, Jiangxi 336000, China

**Abstract** The evolution equations for the parameters of Gaussian pulse with propagation distance in optical fibers is derived, considering high-order dispersion and the fifth-order nonlinearity by means of variational method from the modified nonlinear Schrödinger (MNLS) equation. Then, the relations between amplitude and width, frequency and chirp, width and chirp are obtained. The analytical solution about the pulse width and pulse center evolution on the propagation distance is obtained. The graph of the pulse width evolution with transmission distance is described. The results show that the high-order dispersion and fifth-order nonlinearity in fiber will affect Gaussian pulse parameters of evolution, but the adiabatic relation between the pulse width and amplitude has not been changed. High-order dispersion causes the compression of Gaussian pulse width spread, and the fifth-order nonlinearity causes Gaussian pulse width, which may offset the pulse width or the influence of the initial chirp in a certain degree, and thus realize the conformal pulse transmission.

**Key words** guided wave and fiber optics; Gaussian pulse; variational method; high-order dispersion; fifth-order nonlinearity

### 1 引 言

当光脉冲的脉宽窄到飞秒量级或载波波长处于光纤零色散波长附近时, 三阶以上色散的影响不可

忽略; 当入射光强较强, 或在有相对较高非线性光学系数的材料中, 即使是中等光强的光入射, 它与物质相互作用过程中必然会出现非线性效应<sup>[1]</sup>, 甚至

收稿日期: 2007-09-10; 收到修改稿日期: 2007-12-13

作者简介: 甘桂蓉(1971—), 女, 硕士研究生, 主要从事导波光学与光纤通信等方面的研究。E-mail: gguirong@163.com

导师简介: 罗开基(1949—), 男, 教授, 主要从事导波光学与光纤通信等方面的研究。E-mail: kaijiluo@sohu.com

需考虑五阶或更高阶非线性折射率的影响<sup>[2,3]</sup>。对于脉冲在光纤中传输的稳定性,人们的研究从只包含低阶色散和低阶非线性(三阶)的情况,发展到包含高阶色散<sup>[1,4~6]</sup>和五阶非线性的情况。

强非线性和飞秒孤子脉冲的传输,服从修正的非线性薛定谔方程(MNLS)<sup>[1,4]</sup>。对于非线性光学系统中非线性薛定谔方程的研究,文献[7]用数值的方法给出了高斯光束在晶体中的演化,其结果表明,对于给定的晶体和高斯光束,选择适当的外加电场,能使此高斯光束演化成稳定的亮孤子。近年来,不少文献采用变分法<sup>[6,8~19]</sup>研究孤子的传输特性。本文在利用变分法导出的三阶色散和五阶非线性同时存在的情况下光纤中传输的高斯型脉冲参量演化方程组的基础上,进一步作解析推演和数值计算,求出了振幅与脉宽、频率与啁啾及中心位置、脉宽与啁啾之间的三个重要约束关系和脉宽演化的解析解,然后讨论了三阶色散和五阶非线性及初始啁啾对高斯型脉冲演化特性的影响。

## 2 理论推导

### 2.1 修正的非线性薛定谔方程的描述

孤子在光纤中能保形传输以及基于其绝热特性可实现全光通信的特性使它成为通信的最优信息载体,在光纤孤子传输实验中,孤子源一般采用增益开

关分布式反馈激光二极管或外腔锁模激光二极管,半导体激光二极管输出高斯型光脉冲,这实际上是一种准光孤子源<sup>[1]</sup>。超强超短光脉冲在光纤中的传输由下列修正的非线性薛定谔方程(MNLSE)描述:

$$i \frac{\partial \psi}{\partial Z} + \frac{D}{2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial T^2} + |\psi|^2 \psi = i\epsilon R(\psi), \quad (1)$$

其中  $\psi(Z, T)$  为归一化的脉冲复包络函数,  $Z$  和  $T$  分别为归一化的传输距离和时间。当  $i\epsilon R(\psi) \neq 0$  但可视为微扰项时,(1)式的尝试解可设定为脉冲的函数形式不变,但脉冲参量随传输距离变化。在三阶色散和五阶非线性共同作用情况下,(1)式中的修正项为

$$i\epsilon R(\psi) = i\beta_3 \frac{\partial^3 \psi}{\partial T^3} - \gamma |\psi|^4 \psi, \quad (2)$$

其中  $i\beta_3 \frac{\partial^3 \psi}{\partial T^3}$  为三阶色散项,  $-\gamma |\psi|^4 \psi$  为五阶非线性项。考虑在光纤中注入一具有初始啁啾的高斯型脉冲:

$$\psi(0, T) = A_0 \exp \left[ -\frac{(T - \xi_0)^2}{2a_0^2} + i\omega_0 T + ib_0 T^2 + i\phi_0 \right], \quad (3)$$

其中  $A_0, a_0, b_0, \omega_0, \xi_0, \phi_0$  分别表示初始(即  $z=0$ )时的振幅、脉宽、啁啾、频率、中心位置、相位。当上述修正项可作微扰处理时,可取以下具有啁啾的高斯型脉冲作为方程(1)的尝试解<sup>[6]</sup>:

$$\psi(Z, T) = A(Z) \exp \left\{ -\frac{[T - \xi(z)]^2}{2a^2(z)} + i\omega(z)T + ib(z)T^2 + i\phi(z) \right\}, \quad (4)$$

为简便起见,将  $A(z), a(z), b(z), \omega(z), \xi(z), \phi(z)$  分别记作  $A, a, b, \omega, \xi, \phi$ 。

### 2.2 修正的非线性薛定谔方程的拉氏密度函数

(1)式的拉氏密度函数:

$$L = \frac{i}{2} \left( \psi \frac{\partial \psi^*}{\partial Z} - \psi^* \frac{\partial \psi}{\partial Z} \right) + \frac{D}{2} \left| \frac{\partial \psi}{\partial T} \right|^2 - \frac{1}{2} |\psi|^4 - \frac{i}{2} \beta_3 \left( \frac{\partial \psi^*}{\partial T} \frac{\partial^2 \psi}{\partial T^2} - \frac{\partial \psi}{\partial T} \frac{\partial^2 \psi^*}{\partial T^2} \right) - \frac{1}{3} \gamma |\psi|^6, \quad (5)$$

其正确性可由欧拉-拉格朗日方程

$$\frac{\partial}{\partial T} \frac{\partial L}{\partial (\partial \psi / \partial T)} = \frac{\partial L}{\partial \psi} - \nabla \frac{\partial L}{\partial (\nabla \psi)}, \quad (6)$$

导出(1)式[修正项取(2)式形式]而得到验证。用  $\langle L \rangle$  表示平均拉氏密度,它由下式给出:

$$\langle L \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} L dT, \quad (7)$$

由(3)式、(4)式、(6)式,得

$$\langle L \rangle = \sqrt{\pi} a A^2 \left\{ \left( \xi \frac{d\omega}{dz} + \xi^2 \frac{db}{dz} + \frac{d\phi}{dz} + \frac{a^2}{2} \frac{db}{dz} \right) + \frac{D}{2} \left[ \frac{1}{2a^2} + (\omega + 2b\xi)^2 + 2a^2 b^2 \right] - \frac{A^2}{2\sqrt{2}} + \beta_3 \left[ \frac{3(\omega + 2b\xi)}{2a^2} + (\omega + 2b\xi)^3 + 6a^2 b^2 (\omega + 2b\xi) \right] - \frac{1}{3\sqrt{3}} \gamma A^4 \right\}, \quad (8)$$

## 2.3 脉冲参量的演化方程组及其解

$$\frac{\delta \langle L \rangle}{\delta x_i} = 0, \quad (10)$$

利用约化变分原理<sup>[8~11]</sup>

$$\delta \int \langle L \rangle dz = 0, \quad (9)$$

其中  $x_i$  分别表示  $A, a, b, \omega, \xi, \phi$  六个参量。将(7)式、(8)式代入(9)式并整理,得到下列方程组:

可推得脉冲参量的演化方程组为

$$aA^2 = E_0, \quad (E_0 = a_0 A_0^2 \text{ 为常数}), \quad (11)$$

$$\frac{db}{dz} = \left( \frac{D}{2a^4} - \frac{E_0}{2\sqrt{2}a^3} \right) - 2Db^2 + \frac{3(\omega + 2b\xi)\beta_3}{a^4} - 12b^2(\omega + 2b\xi)\beta_3 - \frac{2}{3\sqrt{3}a^2}\gamma A^4, \quad (12)$$

$$\frac{d\xi}{dz} = D(\omega + 2b\xi) + \frac{3\beta_3}{2a^2} + 3(\omega + 2b\xi)^2\beta_3 + 6a^2b^2\beta_3, \quad (13)$$

$$\frac{d\omega}{dz} = -2\xi \frac{db}{dz} - 2Db(\omega + 2b\xi) - \frac{3b\beta_3}{a^2} - 6b(\omega + 2b\xi)^2\beta_3 - 12a^2b^3\beta_3, \quad (14)$$

$$\frac{da}{dz} = 2Dab + 12ab(\omega + 2b\xi)\beta_3, \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\phi}{dz} = & -\xi \frac{d\omega}{dz} - \xi^2 \frac{db}{dz} - \frac{a^2}{2} \frac{db}{dz} - \frac{D}{2} \left[ \frac{1}{2a^2} + (\omega + 2b\xi)^2 + 2a^2b^2 \right] + \frac{A^2}{\sqrt{2}} - \\ & \beta_3 \left[ \frac{3(\omega + 2b\xi)}{2a^2} + (\omega + 2b\xi)^3 + 6a^2b^2(\omega + 2b\xi) \right] + \frac{\gamma A^4}{\sqrt{3}}, \end{aligned} \quad (16)$$

(11)式~(16)式即是三阶色散和五阶非线性情况下高斯型脉冲参量演化的微分方程组。将(12)式代入(13)式,可得

$$\frac{d}{dz}(\omega + 2b\xi) = 0, \quad (17)$$

上式满足初始条件的解为

$$\omega + 2b\xi = \omega_0 + 2b_0\xi_0 = M \quad (\text{常数}), \quad (18)$$

(18)式分别代入(12)式、(15)式,则有

$$\frac{db}{dz} = \left( \frac{D}{2a^4} - \frac{E_0}{2\sqrt{2}a^3} \right) - 2Db^2 + \frac{3\beta_3 M}{a^4} - 12b^2\beta_3 M - \frac{2}{3\sqrt{3}a^2}\gamma A^4, \quad (19)$$

$$\frac{da}{dz} = 2Dab + 12ab\beta_3 M, \quad (20)$$

将(19)式除以(20)式,得

$$\frac{db}{da} = \frac{1}{2(6\beta_3 M + D)ab} \left( \frac{6\beta_3 M + D}{2a^4} - \frac{E_0}{2\sqrt{2}a^3} - \frac{2\gamma E_0^2}{3\sqrt{3}a^4} \right) - \frac{b}{a}, \quad (21)$$

进一步可化为

$$\frac{d(b^2)}{da} + \frac{2}{a}b^2 = \frac{1}{(6\beta_3 M + D)a} \left( \frac{6\beta_3 M + D}{2a^4} - \frac{E_0}{2\sqrt{2}a^3} - \frac{2\gamma E_0^2}{3\sqrt{3}a^4} \right), \quad (22)$$

$$\begin{aligned} b^2 = & \frac{1}{a^2} \left[ \int \frac{1}{(6\beta_3 M + D)} \left( \frac{6\beta_3 M + D}{2a^5} - \frac{E_0}{2\sqrt{2}a^4} - \frac{2\gamma E_0^2}{3\sqrt{3}a^4} \right) a^2 da + C \right] = \\ & \frac{1}{a^2} \left[ -\frac{1}{4a^2} + \frac{1}{6(\beta_3 M + D)} \left( \frac{1}{2\sqrt{2}a} + \frac{\gamma E_0^2}{3\sqrt{3}a^2} \right) + C \right], \end{aligned} \quad (23)$$

由初始条件求得(22)式满足的解析解为

$$b^2 = \frac{1}{a^2} \left[ \frac{1}{4} \left( \frac{1}{a_0^2} - \frac{1}{a^2} \right) + \frac{E_0}{2\sqrt{2}(6\beta_3 M + D)} \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{a_0} \right) + a_0^2 b_0^2 + \frac{\gamma E_0^2}{3\sqrt{3}(6\beta_3 M + D)} \left( \frac{1}{a^2} - \frac{1}{a_0^2} \right) \right], \quad (24)$$

或

$$ab = \pm \frac{1}{2a_0 a} \sqrt{Pa^2 + Qa + R}, \quad (25)$$

式中的“±”分别对应于正负啁啾,且有

$$P = 1 + 4a_0^4 b_0^2 - \frac{\sqrt{2}E_0 a_0}{6\beta_3 M + D} - \frac{4\gamma E_0^2}{3\sqrt{3}(6\beta_3 M + D)}, \quad (26)$$

$$Q = \frac{\sqrt{2}E_0 a_0^2}{6\beta_3 M + D}, \quad (27)$$

$$R = \left[ -1 + \frac{4\gamma E_0^2}{3\sqrt{3}(6\beta_3 M + D)} \right] a_0^2, \quad (28)$$

将(25)式代入(20)式,得

$$\frac{da}{dz} = \pm \frac{6\beta_3 M + D}{a_0 a} \sqrt{Pa^2 + Qa + R}, \quad (29)$$

(29)式的解分三种情况:

1) 当  $P < 0$  时,其解为

$$\begin{aligned} \pm Z = & \frac{Qa_0}{2(D + 6\beta_3 M)(-P)^{3/2}} \left[ \arcsin \frac{2Pa_0 + Q}{\sqrt{Q^2 + 4Pa_0^2}} - \arcsin \frac{2Pa + Q}{\sqrt{Q^2 + 4Pa_0^2}} \right] + \\ & \frac{a_0}{(D + 6\beta_3 M)P} \left[ \sqrt{Pa^2 + Qa + R} - \sqrt{Pa_0^2 + Qa_0 + R} \right], \end{aligned} \quad (30)$$

2) 当  $P = 0$  时,其解为

$$\pm Z = \frac{2a_0}{3(D + 6\beta_3 M)Q^2} \left[ (Qa - 2R) \sqrt{Qa + R} - (Qa_0 - 2R) \sqrt{Qa_0 + R} \right], \quad (31)$$

3) 当  $P > 0$  时,其解为

$$\begin{aligned} \pm Z = & \frac{a_0}{(D + 6\beta_3 M)P} \left[ \sqrt{Pa^2 + Qa + R} - \sqrt{Pa_0^2 + Qa_0 + R} \right] - \\ & \frac{a_0 Q}{2(D + 6\beta_3 M)P^{3/2}} \ln \frac{2Pa + Q + 2\sqrt{P} \sqrt{Pa^2 + Qa + R}}{2Pa_0 + Q + 2\sqrt{P} \sqrt{Pa_0^2 + Qa_0 + R}}, \end{aligned} \quad (32)$$

将(18)式和(25)式同时代入(13)式,得

$$\frac{d\xi}{dz} = DM + 3\beta_3 M^2 + \frac{3\beta_3}{2a_0^2} + \frac{3E_0\beta_3}{\sqrt{2}(6\beta_3 M + D)} \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{a_0} \right) + \frac{2\beta_3\gamma E_0^2}{\sqrt{3}(6\beta_3 M + D)} \left( \frac{1}{a^2} - \frac{1}{a_0^2} \right) + 6a_0^2 b_0^2 \beta_3, \quad (33)$$

(33)式积分有下列形式:

$$\xi = X[a(z)] + Yz + \xi_0, \quad (34)$$

式中

$$X[a(z)] = \frac{3E_0\beta_3}{\sqrt{2}(6\beta_3 M + D)} \int \frac{1}{a} dz + \frac{2\beta_3\gamma E_0^2}{\sqrt{3}(6\beta_3 M + D)} \int \frac{1}{a^2} dz, \quad (35)$$

$$Y = DM + 3\beta_3 M^2 + \frac{3\beta_3}{2a_0^2} + 6a_0^2 b_0^2 \beta_3 - \frac{3E_0\beta_3}{\sqrt{2}(6\beta_3 M + D)a_0} - \frac{2\beta_3\gamma E_0^2}{\sqrt{3}(6\beta_3 M + D)a_0^2}. \quad (36)$$

### 3 分析与讨论

(11)式~(16)式描绘了高阶色散和五阶非线性情况下高斯型脉冲各参量随传输距离演化的规律。当忽略五阶非线性,即  $\gamma=0$  时,(11)式~(16)式可化为文献[6]所讨论的问题。(11)式是振幅和脉宽之间的一个重要关系,说明存在三阶色散和五阶非线性微扰的情况下,光纤中的高斯型脉冲的振幅参量  $A$  和脉宽  $a$  间满足绝热关系,它们间此消彼长。

(12)式~(16)式表明,三阶色散直接影响到啁啾、中心位置、频率、脉宽、相位的演化,并且通过约

束关系  $aA^2 = E_0$  影响到振幅的演化。而五阶非线性(即  $\gamma$ )只直接影响到啁啾  $b$  和相位  $\phi$  的演化方程,并且通过约束关系(11)式、(13)式、(14)式、(15)式间接影响到中心位置、频率、脉宽和振幅的演化;五阶非线性扰动对相角  $\phi$  的影响同三阶非线性效应应有类似的结果,即造成相位调制效应<sup>[1]</sup>,且这种效应一般造成孤子脉冲发生压缩而变窄。

(17)式是频率、啁啾、中心位置之间应满足的解析关系,若把脉冲振幅的总相位记作  $\Phi$ ,等效频率记作  $\Omega$ ,则有

$$\begin{aligned}\Phi(T) &= \omega T + bT^2 + \phi, \\ \Omega(t) &= \frac{d\Phi}{dT} = \omega + 2bT,\end{aligned}\quad (37)$$

因而,任意时刻脉冲中心  $T = \xi$  的等效频率为  $\Omega(\xi) = \omega + 2b\xi$ 。所以(17)式表明:存在直阶色散和五阶非线性微扰的情况下,尽管  $\omega, b, \xi$  随  $z$  变化,脉冲中心的等效频率保持为常量,这是只计及线性啁啾项的结果。

(24) 式是啁啾  $b$  和脉宽  $a$  应满足的一个解析约束条件。可以看出,由于  $a$  随  $z$  变化,因此即使  $b_0 = 0$ ,一般地,  $b \neq 0$ ,说明脉冲在传输过程中会产生啁啾。为了看清这一关系的意义,取  $A_0 = a_0 = 1, \omega_0 =$

$0.2, \xi_0 = 0$ , 利用 MATLAB 软件对(12)式~(15)式采用龙格-库塔法进行数值计算,绘出了当初始啁啾  $b_0 = 0, \beta_3, \gamma$  取不同的值时  $P < 0$  情况下脉宽随传输距离的演化曲线(图 1)。容易看出:高阶色散导致高斯型脉冲展宽,恢复周期变长;五阶非线性导致高斯型脉冲压缩,恢复周期变短。高阶色散不变时,随着  $\gamma$  增大,五阶非线性的压缩作用越来越明显;五阶非线性不变时,随着  $\beta$  增大,高阶色散对脉冲的展宽效应越来越明显。当高阶色散和五阶非线性都增强时,它们对脉冲的影响可以部分相消(如  $\beta = 0.1, \gamma = 0.1$ )。

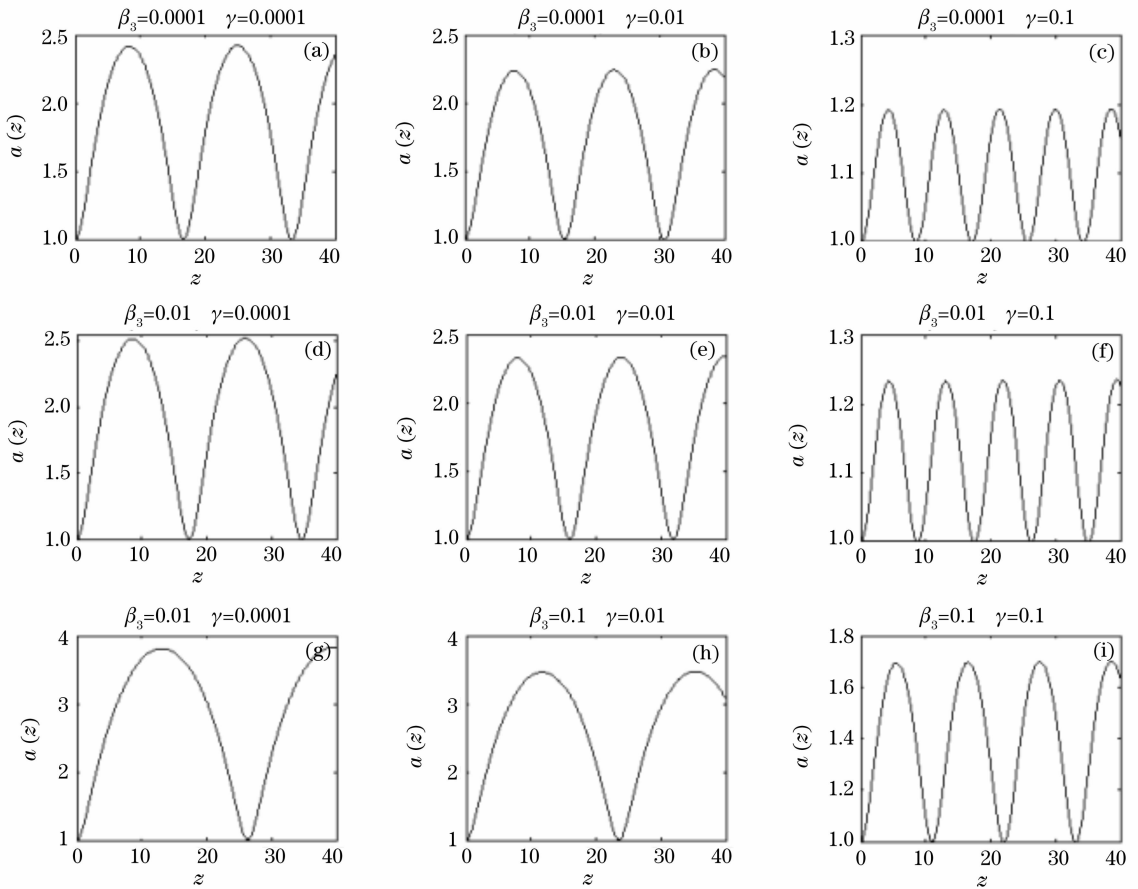


图 1 脉宽随传输距离的演化曲线

Fig. 1 Evolution of pulse-width with propagation distance

(30) 式描述的是脉宽  $a$  随传输距离变化的一个解析结果,它是一个振荡函数,  $a$  近似对称地振荡。由(30)式及(26)式~(28)式可知:除  $\phi_0$  外,其它五个脉冲参量的初始值  $A_0, a_0, b_0, \omega_0, \xi_0$  及高阶色散  $\beta_3$ 、五阶非线性  $\gamma$  对脉宽  $a$  的演化都有影响。(31)式、(32)式都不再是振荡函数,此时随着距离  $z$  的增大脉宽  $a$  也是无限增大的,脉宽被无限展宽,高斯型的振幅将无限衰减,这样的高斯型脉冲无法传出去。

所以考虑高阶色散和五阶非线性时,在光纤中传输的高斯型脉冲实现周期性演化的条件是

$$P = 1 + 4a_0^4 b_0^2 - \frac{\sqrt{2}E_0 a_0}{6\beta_3 2M + D} - \frac{4\gamma E_0^2}{3\sqrt{3}\beta_3 M + D} < 0. \quad (38)$$

(34) 式描述了脉冲中心位置  $\xi$  随  $z$  的演化规律,该式表明了高阶色散和五阶非线性对高斯脉冲中心位置  $\xi$  的影响。

## 4 结 论

在光纤中传输的超强超短高斯型脉冲的演化规律是复杂的。利用变分法求解修正的非线性薛定谔方程,给出了高阶色散和五阶非线性情况下光纤中高斯型脉冲参量随传输距离的演化方程组,求出了振幅与脉宽[式(11)]、频率与啁啾[式(18)]、脉宽与啁啾[式(24)]之间的三个解析约束关系,导出了脉宽随传输距离演化的解析解。研究表明,光纤中的高阶色散和五阶非线性都会影响高斯型脉冲各个参量的演化,但脉宽和振幅间的绝热关系并未改变。高阶色散使高斯型脉冲的脉宽展宽,五阶非线性使高斯型脉冲的脉宽压缩,它们对脉宽或初始啁啾的影响可以在一定程度上抵消,使脉冲近似实现保形传输,这在工程实践中具有一定的实用价值。

## 参 考 文 献

- G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. Singapore: Elsevier Pte Ltd., 2005
- Zhong Xianqiong, Xiang Anping, Cai Qing *et al.*. Modulation instability induced by cross-phase modulation in case of high-order dispersion and quintic nonlinearity[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(9): 1200~1205  
钟先琼,向安平,蔡青等. 高阶色散和五阶非线性下的交叉相位调制不稳定性[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9): 1200~1205
- Zhong Xianqiong, Xiang Anping. Effects of group-velocity mismatch and cubic-quintic nonlinearity on cross-phase modulation instability in optical fibers[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(9): 534~536
- Yang Xianglin, Wen Yangjin. *Fundamental Theories of Optical Fiber Soliton Communications* [M]. Beijing: Defense Industry Press, 2000. 1~16  
杨祥林,温扬敬. 光纤孤子通信理论基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000. 1~16
- M. Piche, J.-F. Cormier, X. Zhu. Bright optical soliton in the presence of fourth-order dispersion [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(12): 845~847
- Sang Zhiwen, Luo Kaiji, Sang Minghuang *et al.*. Influence of the third-order dispersion on the propagation properties of Gaussian-shaped pulses in optical fibers[J]. *J. Quant. Electron.*, 2005, **22**(6): 946~948  
桑志文,罗开基,桑明煌等. 三阶色散对光纤中高斯型脉冲传输特性的影响[J]. *量子电子学报*, 2005, **22**(6): 946~948
- Zhang Duying, Liu Jinsong, Liang Changhong. The effect of loss on solitary evolution of a Gauss beam in photovoltaic-photorefractive crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(2): 139~143  
张都应,刘劲松,梁昌洪. 晶体损耗对高斯光束孤波演化特性的影响[J]. *光学学报*, 2002, **22**(2): 139~143
- D. Anderson. Variational approach to nonlinear pulse propagation in optical fibers[J]. *Phy. Rev. A*, 1983, **27**(6): 3135~3145
- A. Bondeson, M. Lisak, D. Anderson. Soliton perturbations: a variational principle for the soliton parameters [J]. *Phy. Scripta.*, 1979, **20**: 479~485
- 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  
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
- D. Anderson, M. Lisak, T. Reichel. A symsptotic propagation properties of pulses in a soliton-based optical-fiber communication system[J]. *Opt. Soc. Am. B*, 1988, **5**(2): 207~210
- A. Biswas. Dynamics of Gaussian and super-Gaussian solitons in birefringent optical fibers [J]. *Progress In Electromagnetics Research*, 2001, **33**: 119~139
- Xu Ming, Pu Tao, Yang Shuwen *et al.*. A study of the influence of polarization mode dispersion in dispersion-managed soliton transmission systems[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 215~219  
徐铭,蒲涛,杨淑雯等. 偏振模色散影响色散控制孤子传输的理论研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2): 215~219
- Xu Ming, Yang Xianglin, Hu Yu. Timing jitter in wavelength-division-multiplexed dispersion-managed soliton communication systems[J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **A29**(1): 47~52  
徐铭,杨祥林,胡渝. 色散控制 WDM 孤子通信系统中的定时抖动[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(1): 47~52
- Xu Ming, Ji Jianhua. Phase jitter of multi-perturbations in differential phase-shift keying dispersion managed soliton system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 781~786  
徐铭,吉建华. 差分相移键控色散管理孤子多扰动系统的相位抖动[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 781~786
- Li Qiliang, Li Qingshan, Lin Libin. Soliton-like pulse timing jitter in dispersion-managed systems[J]. *Chin. Phys.*, 2006, **15**(10): 2306~2314
- Li Qiliang, Li Qingshan. Calculation and analysis of timing-jitter in dispersion-managed soliton system[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(5): 607~612  
李齐良,李庆山. 色散管理孤子系统定时抖动的分析计算[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5): 607~612
- Chen Shoumang, Shi Shunxiang, Dong Hongzhou. Gaussian soliton in biased photo refractive crystal [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(3): 1379~1384  
陈守满,石顺祥,董洪舟. 有偏压光折变晶体中的高斯孤子[J]. *物理学报*, 2007, **56**(3): 1379~1384
- Zhong Weiping, Yi Lin. Interactions of solitons in dispersion compensation fiber nonlinear communication system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4): 491~496  
钟卫平,易林. 色散补偿光纤通信系统中孤子之间的相互作用[J]. *光学学报*, 2006, **26**(4): 491~496