

## OTDM 高速孤子传输系统的稳定性研究

时娟娟 诸波\* 杨祥林  
(南京邮电大学光电工程学院 南京 210003)

**摘要:** 该文首次在同考虑3种高阶效应和孤子互作用的条件下,应用变分法,导出了孤子各特性参数随传输距离的演化方程,基于此方程应用线性扰动法,从理论上导出了稳定性条件,论证了160 Gb/s 高斯准孤子系统零频移稳定传输的可行性,并设计出一个比特率为160 Gb/s 高速长距离孤子通信系统,对其性能进行数值模拟仿真,其结果和理论分析一致。

**关键词:** 光孤子通信; 高阶效应; 孤子相互作用; 传输控制; 稳定传输

中图分类号: TN929.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)-04-874-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00692

## Research on Stability of OTDM High Rate Solitons Transmission System

Shi Juan-juan Zhu Bo Yang Xiang-lin

(College of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts & Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** In this paper, the evolution equations of solitons' performance parameters versus distance are deduced by the use of the variational approach under the condition of both the higher-order effects and interaction between solitons for the first time. Based on this equation, a stable operation condition is revealed from theoretical analysis by using a linearization perturbation method. It is discovered that the stable transmission of the Gaussian quasi-soliton system with zero frequency shift at bit rates up to 160 Gb/s can be realized. A 160 Gb/s high-speed and long-haul soliton transmission system is designed and its performance is numerically simulated. The simulation results are in well accordance with the theoretical analysis.

**Key words:** Optical soliton communication; Higher-order effects; Soliton interaction; Transmission control; Stable transmission

### 1 引言

在高速光通信系统中,光脉冲的传输受到偏振模色散、非线性效应和相邻脉冲之间的相互作用等诸多因素的制约。光孤子通信系统巧妙利用光纤折射率的非线性即自相位调制效应(SPM)对脉冲的压缩与群速度色散(GVD)引起的光脉冲展宽之间的平衡实现了光脉冲的无畸变传输,极大提高了单信道传输速率,其比特率是准线性系统的100-1000倍,适宜于波分复用(WDM)和光时分复用(OTDM)系统<sup>[1]</sup>,被认为是下一代高速、长距离光通信最有前途的传输方式之一。然而,随着通信容量和速率的提高,复用信道数目的增加,比特率越来越大,脉宽变得越来越窄,达到皮秒(ps)甚至飞秒(fs)量级。当脉宽小于5 ps时,光纤传输介质的高阶色散、高阶非线性效应和孤子间复杂的非线性相互作用等影

响因素将不可忽略<sup>[2]</sup>。具体而言,高阶色散导致脉冲展宽,高阶非线性效应中的脉冲内喇曼散射效应能引起孤子自频移,孤子相互作用能导致定时抖动的增加,使传输不稳定,限制光纤通信系统的容量和码率的提高<sup>[3]</sup>。

孤子相互作用按作用距离可分为长程相互作用和短程相互作用<sup>[4]</sup>,按作用频率可分为同频孤子之间的相互作用和异频孤子之间的相互作用<sup>[5,6]</sup>,从物理机制上看这些相互作用均为非线性相互作用,如交叉相位调制(XPM)、四波混频(FWM)等。

文献[2]研究了色散管理孤子在等幅同相、等幅反相、不等幅同相和不等幅反相注入条件下的相互作用,用Auto-Bäcklund变换方法得出孤子的精确解。适当选取孤子参数,色散管理孤子间的相互作用能够被抑制。但文中没有同时考虑自陡效应。文献[3]研究了色散管理系统中由三阶色散和喇曼散射引起的定时抖动,但没有考虑自陡效应和孤子相互作用。该文通过理论分析和数值模拟得出:在定时抖动限制条件下,160 Gb/s孤子系统的最大传输距离

2010-07-02 收到, 2010-09-20 改回

国家自然科学基金(60072046)资助课题

\*通信作者: 诸波 zhubo@njupt.edu.cn

为 500 km。但文中没有给出抑制定时抖动的方案。文献[7]用数值模拟的方法研究了 3 种高阶效应条件下 160 Gb/s 孤子系统的稳定性,但未进行理论证明,且未考虑孤子相互作用。文献[8]介绍了光纤孤子相互作用产生的原因,详细分析了孤子初始参数对孤子相互作用的影响,全面阐述了常见的控制技术抑制孤子相互作用的原理,但对抑制孤子相互作用的方法只做了理论综述,并没有设计实际系统模型进行验证。文献[9]同时用理论分析和数值模拟两种方法研究了喇曼条件下 160 Gb/s 孤子系统的稳定性,但未考虑其它两种高阶效应和孤子相互作用。文献[10,11]研究了色散和非线性管理条件下飞秒光孤子脉冲的稳定传输问题,用 Auto-Bäcklund 变换方法在光纤参数满足 Hirota 条件下得出孤子波解,发现色散和非线性管理有利于飞秒光孤子系统的稳定传输,但不能控制孤子频率红移,而且,实际使用的光纤参数不一定满足 Hirota 条件,缺乏通用性,也未考虑孤子相互作用因素的影响。文献[12]研究了孤子自频移条件下光孤子的传输问题,利用窄带滤波抑制孤子自频移(SSFS),利用非线性增益技术抑制背景的不稳定,用孤子扰动理论研究了稳态孤子解及其存在条件,能减少喇曼自频移量,但未能消除孤子频率红移,且没有考虑三阶色散、自陡效应和孤子相互作用。文献[10-12]均未能消除孤子频率红移,这将造成孤子中心频率不稳定。

可见,上述对高速光孤子通信系统的研究,有的忽略孤子相互作用<sup>[3,7,10,11]</sup>,有的只考虑高阶效应中的一种或两种<sup>[9,12]</sup>。本文首次同时考虑 3 种高阶效应和孤子相互作用因素,应用线性扰动法<sup>[13]</sup>对 160 Gb/s 孤子系统的稳定性进行理论分析和数值模拟,得出稳定传输条件及控制参数。

## 2 高速孤子系统的传输控制模型分析

在研究超短孤子脉冲的传输特性时,高阶色散和高阶非线性效应不可以忽略。考虑高阶效应,脉冲在光纤中的传输可采用以下广延非线性传输演化方程表示<sup>[14]</sup>:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial E}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \\ & = i\gamma |E|^2 E + \frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 E}{\partial t^3} - a_1 \frac{\partial}{\partial t} (|E|^2 E) \\ & - a_2 E \frac{\partial |E|^2}{\partial t} + \left( -\frac{\alpha(z)}{2} + g(z) \sum_{m=1}^n \delta(z - z_a) \right) E \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $E$  为光脉冲包络,  $|E|^2 = P$  为光功率,  $z$  为传输距离,  $t$  为延时坐标系的时间,  $\beta_1 = 1/v_g$ ,  $v_g$  为群速度,  $\beta_2$  为群速度色散,  $\beta_3$  为高阶色散,  $\gamma$  和  $\alpha$  分

别为光纤的非线性系数和损耗系数,  $a_1 = 2\gamma/\omega_0$ ,  $\omega_0$  为光角频率,  $a_2 = i\gamma T_R$ ,  $T_R \approx 5$  fs 与喇曼增益谱的斜率有关。 $g$  为放大器增益系数,通常  $g = \exp(\alpha z_a) - 1$ ,  $z_a$  和  $n$  分别为放大器间距和放大器数。式(1)右边第 2 项代表高阶色散效应,第 3 项代表非线性极化强度的慢变部分引起的脉冲自陡效应,第 4 项代表延迟非线性响应相关的脉冲内喇曼散射导致的脉冲频谱红移效应,即自频移现象(SFS)。通常将上述效应视作一种扰动,应采用一些方法加以抑制,在通常的高速孤子系统中曾采用过多种方法抑制系统中各种扰动对孤子传输的不良影响,称谓孤子传输控制,曾用时域调制器和滤波器来控制孤子传输中的不利影响,取得良好的效果<sup>[13]</sup>。本节将这两种控制技术同时应用于高速孤子传输系统进行研究。对式(1)进行归一化处理并引入时频复合控制的数学模型,在以群速移动的新坐标中分析,可得如下归一化的非线性演化方程:

$$\begin{aligned} & i \frac{\partial U}{\partial Z} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial T^2} + N^2 |U|^2 U = -i\Gamma U + i\delta \frac{\partial^3 U}{\partial T^3} \\ & - iN^2 s \frac{\partial}{\partial T} (|U|^2 U) + N^2 \tau_R \frac{\partial |U|^2}{\partial T} U \\ & + \Delta g U - k_f (i\partial/\partial T - \omega_f)^2 U - b_m T^2 U \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $\delta = \beta_3/(6|\beta_2|t_0)$ ,  $s = 2/(\omega_0 t_0)$ ,  $\tau_R = T_R/t_0$  为 3 个无量纲数,分别表示三阶色散、自陡峭和受激喇曼散射的强度。 $\Gamma = \alpha L_D/2$  为归一化损耗,  $U(Z, T) = E(Z, T)/\sqrt{P_0}$ ,  $P_0$  为输入脉冲峰值功率,  $Z = z/L_D$  为归一化距离,  $T = t/t_0$  为归一化时间,  $N = \sqrt{L_D/L_{NL}}$  为孤子阶数。 $L_D = t_0^2/|\beta_2|$  为色散长度,  $t_0$  为光脉冲初始宽度(光脉冲功率下降到峰值的  $1/e^2$  时的全宽),  $L_{NL} = 1/(\gamma P_0)$  为非线性长度。为补偿调制器和滤波器损耗引入的附加增益  $\Delta g = \Delta G(e^{\alpha z_a} - 1) \sum_{m=1}^n \delta(Z - mz_a/L_D)$ ,  $k_f = (2\pi|\beta_2| \cdot B_f^2 z_f)^{-1}$  为滤波器色散控制系数,  $B_f$  为滤波器通带带宽,  $z_f$  为传输线路上周期插入滤波器的间距,  $\omega_f$  为归一化滤波器中心频率和孤子中心频率之差,  $\omega_f = 2\pi L_D t_0^3 \Delta\omega$ ,  $\Delta\omega$  等于实际滤波器中心频率与孤子中心频率之差,  $b_m = a_m (\Omega_m t_0)^2 (L_D/2z_m)/2$  为调制器参数,  $a_m = (T_B/\pi \Delta\tau_m)^2 \ln 2$  为调制强度,  $\Delta\tau_m$  为幅度调制器传递函数 3 dB 时间通带宽度,  $\Omega_m = 2\pi B_r$  为调制角频率,  $T_B = 1/B_r$ ,  $B_r$  为比特率,  $z_m$  为传输线路上周期插入调制器的间距。

在高速 OTDM 系统中,应再考虑孤子相互作用,式(2)应变为再计入孤子相互作用扰动的非线性薛定谔方程:

$$\begin{aligned} & i\frac{\partial U}{\partial Z} + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 U}{\partial T^2} + N^2|U|^2 U \\ & = R(U, U^*) = R_1(U, U^*) + R_2(U, U^*) \end{aligned} \quad (3)$$

式中

$$\begin{aligned} R_1(U, U^*) & = -i\Gamma U + i\delta\frac{\partial^3 U}{\partial T^3} - iN^2s\frac{\partial}{\partial T}(|U|^2 U) \\ & + N^2\tau_R\frac{\partial|U|^2}{\partial T}U + \Delta g U \\ & - k_f(i\partial/\partial T - \omega_f)^2 U - b_m T^2 U \end{aligned}$$

为高阶效应和控制因素扰动,  $R_2(U, U^*)$  为孤子相互作用扰动。

设式(3)有如下高斯准孤子解:

$$U(Z, T) = A(Z)f(\tau)\exp(j\phi) \quad (4)$$

式中  $\tau = B(Z)(T - T_0(Z))$ ,  $\phi = -[C(Z)B^2(Z)]/2(T - T_0(Z))^2 - k(Z)(T - T_0(Z)) + \theta(Z)$ ,  $f(\tau) = \exp(-\tau^2/2)$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $k$ ,  $T_0$  和  $\theta$  分别为脉冲的归一化幅度、归一化脉宽的倒数、啁啾参数、归一化角频移、归一化中心位置和归一化相位。

在OTDM系统中, 扰动因素  $R_2(U, U^*)$  主要是相邻孤子间的相互作用, 表现为相邻孤子间的XPM。因此扰动项  $R_2$  可写成式(5)的通用非线性XPM效应的形式<sup>[2]</sup>(只考虑相邻两个孤子):

$$R_2 = -2N(Z)|U_{3-i}|^2 U_i, \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

$R_2$  在OTDM系统中表示的是第  $i$  个孤子脉冲与相邻孤子脉冲尾迹的XPM。设相邻两个光脉冲均为高斯形,  $U_1 = A(Z)f(\tau)\exp(j\phi)$ ,  $U_2 = Af(\tau + B\Delta T) \cdot \exp(j(\phi + \Delta\varphi))$ ,  $\Delta T = T_{01} - T_{02}$  表示两相邻光脉冲中心位置间隔,  $\Delta\varphi$  为相邻两光脉冲的相位差。将  $U_1$ ,  $U_2$  代入式(5)可得

$$R_2 = -2A^3 N f(\tau)(f(\tau + B\Delta T))^2 \exp(j\phi) \quad (6)$$

由此可知, 在 OTDM 准高斯孤子通信系统中, 孤子间相互作用与孤子的初始相位无关。

应用变分法分析, 得高阶效应和相邻信道孤子脉冲影响下孤子参数随传输距离演化的动力学方程组:

$$\begin{aligned} \dot{A} & = \frac{1}{2}AB^2C + A(-\Gamma + \Delta g) - 3\delta AB^2 Ck \\ & - k_f A(B^2 + (k - \omega_f)^2) - Ab_m T_0^2 \end{aligned} \quad (7a)$$

$$\dot{B} = B^3 C - 6k\delta B^3 C - k_f B^3(1 - C^2) + b_m/B \quad (7b)$$

$$\begin{aligned} \dot{C} & = -B^2(1 + C^2) + (\sqrt{2}/2)N^2 A^2 + 6kB^2\delta(1 + C^2) \\ & + (\sqrt{2}/2)N^2 A^2 ks - 2\sqrt{2}A^2 e^{-B^2\Delta T^2/2} \\ & \cdot (1 + B^2\Delta T^2/2) - 2k_f B^2 C(1 + C^2) - 2b_m C/B^2 \end{aligned} \quad (7c)$$

$$\begin{aligned} \dot{k} & = (\sqrt{2}/2)N^2 s A^2 B^2 C - (\sqrt{2}/2)N^2 \tau_R A^2 B^2 \\ & + \sqrt{2}A^2 B^2 \Delta T e^{-B^2\Delta T^2/2} - 2k_f B^2(1 + C^2) \\ & \cdot (k - \omega_f) - 2b_m C T_0 \end{aligned} \quad (7d)$$

$$\begin{aligned} \dot{T}_0 & = -k + 3k^2\delta + (3/2)B^2\delta(1 + C^2) \\ & + (3\sqrt{2}/4)N^2 s A^2 - 2k_f C(k - \omega_f) \\ & - 2b_m T_0/B^2 \end{aligned} \quad (7e)$$

式中参数上方的“ $\bullet$ ”表示对  $Z$  的微分, 式中5个孤子特征参数是相互关联的。式(7a)-式(7e)完整地描述了光脉冲参数在高阶效应和孤子相互作用条件下, 时域和导频滤波复合控制下光链路中的演化规律, 可用来分析光纤的喇曼自频移、自陡峭、高阶色散、非线性参数、孤子相互作用、光滤波器和光调制器等对系统传输性能的影响。

式(7a)右边前3项分别代表啁啾、光纤损耗和放大器增益和三阶色散对幅度的影响, 光纤的非线性性能能够影响孤子间相位、振幅和时间间隔, 进而影响到孤子相互作用。后两项分别代表光滤波器和光调制器对幅度的控制作用。

式(7b)右边前两项分别代表啁啾和三阶色散对脉宽演化的影响, 后两项分别代表光滤波器和光调制器对脉宽的控制作用。

式(7c)右边前5项分别代表脉宽倒数、幅度、三阶色散、自陡峭和孤子相互作用对啁啾演化的影响, 后两项分别代表光滤波器和光调制器对啁啾的控制作用。

式(7d)右边前3项分别代表受激喇曼散射、自陡峭和孤子相互作用对孤子中心频率演化的影响, 后两项分别代表光滤波器和光调制器对孤子中心频率的控制作用。由第2项可知, 喇曼散射效应导致孤子中心频率的红移, 提高第5项中滤波器的中心频率可使孤子中心频率蓝移, 可有效地抵消喇曼自频移。由第3项可知, 孤子相互作用可使孤子中心频率蓝移, 导致孤子中心频率不稳定。

式(7e)右边前3项分别代表孤子中心频率、三阶色散与啁啾和自陡峭对孤子时间位置的影响, 后两项分别代表光滤波器和光调制器对孤子时间位置的控制作用。由式(7e)中的第1项和式(7d)中的第3项可知, 孤子相互作用通过影响孤子中心频率来影响孤子中心位置。

由上述分析可知, 对给定光纤参数和孤子特征参数的系统, 通过调整光滤波器的中心频率和滤波强度、光调制器的调制系数和通带宽度, 可抑制孤子的自陡峭、自频移、定时抖动和相互作用, 实现孤子的稳定传输。

### 3 稳定性分析

对扰动项包含高阶效应、孤子相互作用和传输控制因素的复杂系统, 稳定性分析非常困难, 光孤子理论中常用一种有效的线性扰动法进行分析<sup>[13]</sup>。

为分析稳定性, 先求出式(7a)-式(7e)的平衡点, 令式(7a)-式(7e)的右边=0, 假定得到平衡点  $X_b[A_b, B_b, C_b, k_b, T_{0b}]$ , 为保证该点是稳定平衡点, 将式(7a)-式(7e)在  $X_b$  上作线性展开得

$$\begin{pmatrix} \frac{d\Delta A}{dz} \\ \frac{d\Delta B}{dz} \\ \frac{d\Delta C}{dz} \\ \frac{d\Delta k}{dz} \\ \frac{d\Delta T_0}{dz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta A \\ \Delta B \\ \Delta C \\ \Delta k \\ \Delta T_0 \end{pmatrix} = \mathbf{M} \begin{pmatrix} \Delta A \\ \Delta B \\ \Delta C \\ \Delta k \\ \Delta T_0 \end{pmatrix}$$

式中  $\mathbf{M} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} \end{pmatrix}$

其中

$$\begin{aligned} a_{11} &= B_b^2 C_b / 2 - \Gamma + \Delta g - 3A_b B_b^2 C_b k \delta \\ &\quad - k_f (B_b^2 + (k - w_f)^2) - b_m T_{0b}^2 \\ a_{12} &= A_b B_b C_b - 6A_b B_b C_b k \delta - 2A_b B_b k_f \\ a_{13} &= A_b B_b^2 / 2 - 3A_b B_b^2 k \delta \\ a_{14} &= -3A_b B_b^2 C_b \delta - 2A_b k_f (k - w_f) \\ a_{15} &= -2A_b b_m T_{0b} \\ a_{21} &= 0 \\ a_{22} &= 3B_b^2 C_b - 18B_b^2 C_b k \delta - 3B_b^2 (1 - C_b^2) k_f - b_m / B_b^2 \\ a_{23} &= B_b^3 (1 - 6k \delta + 2C_b k_f) \\ a_{24} &= -6B_b^3 C_b \delta \\ a_{25} &= 0 \\ a_{31} &= \sqrt{2} A_b N^2 + \sqrt{2} A_b N^2 s k - 4\sqrt{2} A_b e^{-B_b^2 \Delta T^2 / 2} \\ &\quad \cdot (1 + B_b^2 \Delta T^2 / 2) \\ a_{32} &= -2B_b (1 + C_b^2) + 12B_b k \delta (1 + C_b^2) \\ &\quad + \sqrt{2} A_b^2 B_b^3 \Delta T^4 e^{-B_b^2 \Delta T^2 / 2} \\ &\quad - 4B_b C_b k_f (1 + C_b^2) + 4C_b b_m / B_b^3 \\ a_{33} &= -2B_b^2 C_b + 12B_b^2 C_b k \delta - 2B_b^2 k_f (1 + 3C_b^2) - 2b_m / B_b^2 \\ a_{34} &= 6B_b^2 \delta (1 + C_b^2) + \sqrt{2} N^2 A_b^2 s / 2 \end{aligned}$$

$$a_{35} = 0$$

$$a_{41} = \sqrt{2} N^2 A_b B_b^2 (s C_b - \tau_R) + 2\sqrt{2} A_b B_b^2 \Delta T e^{-B_b^2 \Delta T^2 / 2}$$

$$a_{42} = \sqrt{2} N^2 A_b^2 B_b (s C_b - \tau_R) + \sqrt{2} A_b^2 B_b \Delta T e^{-B_b^2 \Delta T^2 / 2} \cdot (2 - B_b^2 \Delta T^2) - 4k_f B_b (1 + C_b^2) (k - w_f)$$

$$a_{43} = \sqrt{2} N^2 s A_b^2 B_b^2 - 4k_f k B_b^2 C_b + 4k_f w_f B_b^2 C_b - 2b_m T_{0b}$$

$$a_{44} = -2k_f B_b^2 (1 + C_b^2)$$

$$a_{45} = -2b_m C_b$$

$$a_{51} = 3\sqrt{2} N^2 s A_b / 2$$

$$a_{52} = 3\delta B_b (1 + C_b^2) + 4b_m T_{0b} / B_b^3$$

$$a_{53} = 3\delta B_b^2 C_b - 2k_f k + 2k_f w_f$$

$$a_{54} = -1 - 6k \delta - 2C_b k_f$$

$$a_{55} = -2b_m / B_b^2$$

点  $X_b$  为稳定平衡点的条件是: 矩阵  $\mathbf{M}$  的 5 个特征值的实部均小于零<sup>[2]</sup>。

当比特率  $B_r = 160$  Gb/s, 取  $t_0 = 1.125$  ps,  $N = 1$ , 两相邻信道中脉冲归一化中心位置间隔  $\Delta T = 6.25$  ps / 1.125 ps = 5.5556,  $\lambda = 1.55$   $\mu\text{m}$ ,  $\omega_0 = 1.2161 \times 10^{15}$  rad/s, 使用 G.655 光纤, 参数如下:  $\gamma = 4$  / (W · km),  $D = 1.55$  ps / (km · nm),  $T_R = 6$  fs,  $\alpha = 0.2$  dB/km,  $\beta_3 = 0.073$  ps<sup>3</sup>/km, 则  $\beta_2 = -1.98$  ps<sup>2</sup>/km,  $L_D = 0.6392$  km,  $\Gamma = 0.0147$ ,  $\delta = 5.462 \times 10^{-3}$ ,  $s = 1.462 \times 10^{-3}$ ,  $\tau_R = 5.333 \times 10^{-3}$ 。为使传输中频移为零, 根据式(7d)令:  $k_f w_f = \sqrt{2} A^2 N^2 \tau_R / 4$ 。

根据应用速率要求, 取  $\Delta \tau_m = 5$  ps,  $B_f = 180$  GHz,  $z_f = z_m = 100$  km, 则  $k_f = 0.0248$ ,  $b_m = 0.00022$ ,  $\omega_f = 0.1095$ , 取  $\Delta g = 0.05$ , 使其恰好补偿传输光纤、调制器和滤波器引入的损耗。令式(7a)-式(7e)的右边=0 得到唯一的平衡点  $X_b[1.2, 1, 0, 0, 10]$ , 将具体参数代入矩阵  $\mathbf{M}$ , 经计算可得矩阵  $\mathbf{M}$  的 5 个特征值为

$$\lambda_1 = -0.0433 + 0.9901i, \lambda_2 = -0.0433 - 0.9901i,$$

$$\lambda_3 = -0.0788, \lambda_4 = -0.0105 + 0.0332i,$$

$$\lambda_5 = -0.0105 + 0.0332i$$

实部均小于 0, 则  $X_b[1.2, 1, 0, 0, 10]$  为稳定平衡点。可见, 只要适当配置  $k_f$ ,  $\Delta g$ ,  $b_m$ ,  $\omega_f$ , 在高阶效应和孤子相互作用条件下, 实现高斯准孤子的零频移稳定传输是可行的。

### 4 数值模拟与分析

在 1000 km 范围内, 将上节中设置的参数代入式(7a)-式(7e)并进行数值积分即可得到 160 Gb/s 高斯准孤子脉冲传输系统的归一化参数  $A$ ,  $1/B$ ,  $C$ ,  $k$ ,  $T_0$  的演化规律, 如图 1 所示。

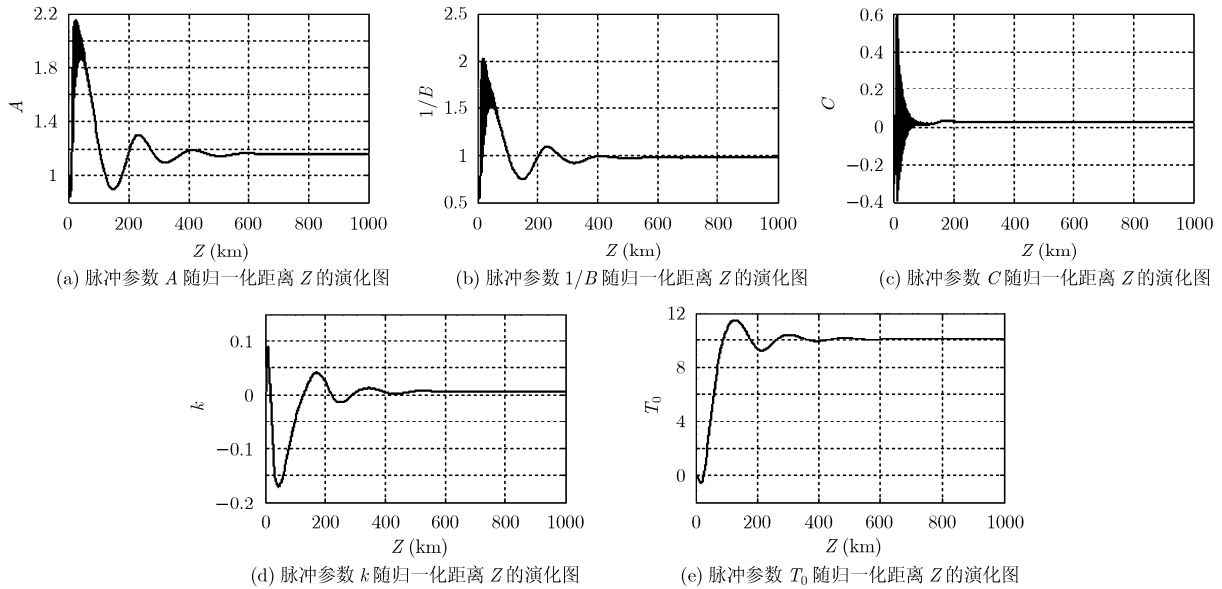


图1 孤子各归一化参数随传输距离的演化

图 1(a)是传输脉冲归一化振幅  $A$  随归一化距离的变化图。观察图 1(a)，在开始一段距离(300 km 以内)的时候，归一化幅度振荡较大，在 300 km 以后，趋于稳定，在接近 1000 km 长距离范围，幅度稳定在 1.2 附近，与理论分析值相符合。

图 1(b)是传输脉冲归一化脉宽的倒数  $1/B$  随归一化距离的变化图。由图 1(b)可见，在 200 km 范围内，脉宽波动比较明显，在 200 km 以后的长距离内，波动变小，在 1000 km 的长距离传输范围内，归一化脉宽稳定在 1 左右，与理论预期相符。

图 1(c)是传输脉冲啁啾参数  $C$  随归一化距离的变化图。分析图 1(c)可知，与归一化幅度  $A$  和归一化脉宽的情况类似，在 200 km 范围内，啁啾参数的波动较大，在 1000 km 的长距离传输范围内，啁啾参数稳定在 0 附近，与理论值相符合。

图 1(d)是传输脉冲归一化角频率  $k$  随归一化距离的变化图。观察图 1(d)可知，在 50 km 范围内， $k$  波动较大且下降明显，是因为喇曼散射效应作用明显，导致孤子中心频率红移。通过适当提高滤波器的中心频率使孤子中心频率蓝移，能够抵消喇曼自频移。所以在 300 km 以后的长距离范围内，角频率  $k$  稳定在 0 附近，稳定效果良好。

图 1(e)是脉冲中心位置随归一化距离的变化图。从图 1(e)可以看出，在 100 km 范围内，由于三阶色散和自陡效应，脉冲延时较大， $T_0$  迅速增大至 11.5，而  $T_0$  值越大，调制器的负反馈作用越强，在 100 km–400 km 范围内， $T_0$  在 10 附近缓慢的抖动，在 400 km 以后的长距离范围内， $T_0$  稳定在 10 附近，稳定效果良好。

仿真过程中发现，在高阶效应一定的条件下，孤子相互作用对高速长距离光孤子通信系统的稳定性传输有着非常重要的影响，不可忽略，并且两孤子脉冲中心位置间隔越短，孤子相互作用对传输系统的稳定性的影响越明显，在上述仿真系统中，当孤子间距缩短到 6.0629 ps ( $\Delta T < 5.3892$ ) 时，孤子传输的稳定性被破坏。进一步研究发现：当孤子间距一定时，孤子相互作用带来的不稳定性可以通过增大  $\Delta\tau_m$  和降低  $B_f$  来抑制。

## 5 结论

在 OTDM 准高斯孤子通信系统中，孤子间相互作用与孤子的初始相位无关；160 Gb/s 孤子通信系统中，通过使用时域和频域复合控制方法，适当设置控制参数，能够实现孤子零频移稳定传输；在比特率大于 160 Gb/s 的系统中，也可通过降低滤波器的通带带宽和增大幅度调制器传递函数 3 dB 时间通带宽度，有效地抑制高阶效应和孤子间相互作用，使得孤子的中心频率稳定，实现 OTDM 高速孤子通信系统的稳定传输。

## 参考文献

- [1] Ganapathy R, Porsezian K, and Hasegawa A. Soliton interaction under soliton dispersion management[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2008, 44(4): 383–388.
- [2] Agrawal G P 著, 贾东方等译. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002: 94–121.
- [3] Jayanthi Santhanam and Agrawal G P. Raman-induced timing jitter in dispersion-managed optical communication systems[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum*

- Electronics*, 2002, 8(3): 632-639.
- [4] Shahzad A and Zafrullah M. Solitons interaction and their stability based on Nonlinear Schrödinger equation. 2009 Second International Conference on Machine Vision, Dubai, 28-30/12/2009, 2: 305-308.
- [5] Mollenauer L F, Evangelides S G, and Gordon J P. Wavelength division multiplexing with solitons in ultra-long distance transmission using lumped amplifiers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1991, 9(3): 362-367.
- [6] Hamaizi Y and El-Akrmi A. Soliton propagation in fiber systems[C]. ICTON Mediterranean Winter Conference, 2009. University of Angers, France, 12/10/2009-12/12/2009, 3: 1-4.
- [7] Zhu B and Yang X. The influence of higher-order effects on the transmission performances of the ultra-short soliton pulses and its suppression method[J]. *Science China Information Sciences*, 2010, 53(1): 182-190.
- [8] 钟鸣宇, 梁齐爱, 曹文华. 光纤孤子互作用及其抑制[J]. *红外*, 2007, 28(2): 1-6.  
Zhong M Y, Liang Q A, Cao W H. Soliton interaction and its reduction in optical fibers[J]. *Infrared Technology*, 2007, 28(2): 1-6.
- [9] Zhu B and Yang X. High-order nonlinearity influence on performances of high rate soliton communication system and its suppression method[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2009, 30(6): 545-555.
- [10] Porsezian K, Hasegawa A, and Serkin V N, *et al.* Dispersion and nonlinear management for femtosecond optical solitons[J]. *Physics Letters A*, 2007, 361, (6): 504-508.
- [11] Belyaeva T L, Ganapathy R, and Hasegawa A. Dispersion and nonlinear management for femtosecond optical soliton[C]. FMN June 29-July1, Kharkiv, Ukraine, 2006: 421-423.
- [12] Latas S C V and Ferreira M F S. Stable soliton propagation with self-frequency shift. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2007, 74(4): 379-387.
- [13] 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: 47-59.  
Yang X L and Wen Y J. Fundamental Theories of Optical Fiber Soliton Communications [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000: 47-59.
- [14] 杨祥林. 光纤通信系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 256-277.  
Yang X L. Optical Fiber Communication Systems [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000: 256-277.
- 时娟娟: 女, 1985年生, 硕士生, 研究方向为光纤通信与光波技术.
- 诸波: 男, 1962年生, 副教授, 博士, 研究方向为高速大容量光纤通信与全光通信网.
- 杨祥林: 男, 1933年生, 教授, 博士生导师, 长期从事微波电子科技与光波通信教学与科学研究.