第 29 卷 第 1 期
2002 年 1 月

中 国 激 光
CHINESE JOURNAL OF LASERS

Vol. A29, No. 1
January, 2002

文章编号:0258-7025(2002)01-0047-05

色散控制 WDM 孤子通信系统中的定时抖动

徐 铭[1],杨祥林[1],胡 渝[2]

([1] 南京邮电学院光纤通信研究所,江苏 南京 210003,[2] 电子科技大学物理应用研究所,四川 成都 610054)

提要 采用拉格朗日变分法在同时考虑本信道放大自发辐射(ASE)噪声、相邻信道信号对本信道信号和 ASE 噪声等多种因素影响的情况下,分析了色散控制孤子的传输演化特性,给出了准稳态色散控制孤子传输动力学方程和定时抖动解析表达,并给出了三种扰动因素影响程度的比较。

关键词 色散控制孤子,波分复用,放大自发辐射噪声,交叉相位调制

中图分类号 TN 929.11 **文献标识码** A

Timing Jitter in Wavelength-division-multiplexed Dispersion-managed Soliton Communication Systems

XU Ming[1], YANG Xiang-lin[1], Hu Yu[2]

([1] *Institute of Optical Fiber Communication, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing* 210003
[2] *Institute of Physical Applying, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu* 610054)

Abstract In this paper, the influences of multi-perturbations originating from amplifier spontaneous-emission (ASE) noise and cross-phase modulation (XPM) in wavelength-division-multiplexed (WDM) are simultaneously considered by using the variational method to analyze evolvement characteristics of dispersion-managed soliton transmission. Simple analytical expressions for dynamics equations of dispersion-managed soliton and timing jitter are obtained. At last, the degrees of effect to system for three perturbations are given.

Key words dispersion-managed soliton, wavelength-division-multiplexing (WDM), amplifier spontaneous-emission (ASE) noise, cross phase modulation

光孤子通信是下一代高速、长距离全光通信的理想方案,其研究已取得巨大进展[1]。光孤子通信系统中采用掺铒光纤放大器(EDFA)补偿孤子传输过程中的能量损耗,延长通信距离。但 EDFA 的放大自发辐射(ASE)噪声将干扰孤子的稳定传输,导致孤子脉冲定时抖动,即 G-H 抖动[2],限制通信距离。通常采用在线频域或离线时域控制方法抑制 G-H 抖动,延长通信距离[3],但系统结构复杂。如果交替改变系统传输光纤的色散符号,可构造一种新的色散控制光孤子(DMS)通信系统,这种系统路径平均色散低,孤子脉冲功率强,可有效地抑制 G-H 抖动和提高系统的信噪比,增大通信容量。色散控制孤子系统中依然存在 ASE 扰动,在波分复用(WDM)系统中还存在同信道和异信道孤子间的相互作用,情况比较复杂。Okamawari 等研究了单信道系统中色散控制对 G-H 抖动的影响[4],T. Yu 等研究了单信道系统中孤子相互作用对定时抖动的影响[5],Kumar 等研究了强色散控制孤子系统中单信道孤子相互作用[6],Ablowitz 和 Sugahara 研究了色散控制对 WDM 系统中相邻信道孤子间的相互作用的影响[7,8],但未考虑 ASE 的影响。这些研究都是分别孤立地分析一种影响,缺乏普遍性,实际系统中总

收稿日期:2000-09-04;收到修改稿日期:2000-10-30

基金项目:国家自然科学基金(编号:60072046)资助项目。

作者简介:徐铭(1970—),男,电子科技大学应用物理研究所,博士,主要从事大容量波分复用、高速光时分复用系统以及全光通信网的研究。E-mail:xum2000@263.net

是多种扰动同时存在的。本文研究几种扰动同时存在时，色散控制对孤子传输特性的影响，讨论色散控制系统的传输特性演化动力学方程以及扰动因素和定时抖动。

1　动力学方程

在集总放大和正负色散交替周期性变化的光孤子通信系统中，归一化场幅复包络演化方程可写成[3]

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

式中 $d(Z)=-\beta_2L_D/t_0^2$，$\sigma(Z)=\gamma(Z)P_0L_D$，$G(Z)=L_D[-\alpha+g(z)\sum_{m=1}^{N}\sigma(Z-mZ_a)]$。$L_D=t_0^2/\langle\beta_2\rangle$ 为路径平均色散长度，$\langle\beta_2\rangle$ 为路径平均色散，$\langle\gamma\rangle=\frac{\langle\beta_2\rangle}{P_0t_0^2}$ 为路径平均非线性系数，α，β_2，γ 和 g 分别为损耗、色散、非线性和增益系数。Z_a 和 N 分别为放大器间距和放大器数。

设系统采用二级周期性色散补偿方案，补偿周期为 $Z_d=Z_1+Z_2$，沿线色散分布为

$$d(Z)=\begin{cases}d_1 & 0<Z-nZ_d<Z_1\\ d_2 & Z_1<Z-nZ_d<Z_d\end{cases} \quad (2)$$

平均色散为：$\langle d(Z)\rangle=\frac{Z_1d_1+Z_2d_2}{Z_d}$，色散变化深度为 $\Delta d=d_1-d_2$，因而有

$$d_1=\langle d\rangle+\Delta d\frac{Z_d-Z_1}{Z_d},\quad d_2=\langle d\rangle-\Delta d\frac{Z_1}{Z_d} \quad (3)$$

当 $|\Delta dZ_d|\leqslant 1$ 称为弱色散控制，$|\Delta dZ_d|\gg 1$ 为强色散控制。

光脉冲沿色散控制系统传输时，呈现周期性展宽和压缩。为实现长距离稳定传输，设在系统一个补偿周期内，孤子效应变化不大，仍满足平均孤子条件，可作平均处理[9]。则式(1)可改写为标准形式的非线性薛定谔方程

$$i\frac{\partial U}{\partial Z}+\frac{1}{2}d(Z)\frac{\partial U^2}{\partial^2 T}+Q(Z)|U|^2U=0 \quad (4)$$

式中 $U(Z,T)=u(Z,T)\exp[\int_0^Z G(Z')\mathrm{d}Z']$，$Q(Z)=\sigma\{\exp[2\int_0^Z G(Z')\mathrm{d}Z']\}$。当光纤损耗完全被放大器补偿时，$Q(Z)=\sigma\frac{2\alpha Z_a\exp[-2\alpha(Z-nZ_a)]}{1-\exp(-2\alpha Z_a)}$。考虑扰动项 $R(U,U^*)$ 时，式(4)变为扰动非线性方程

$$i\frac{\partial u}{\partial Z}+\frac{1}{2}d(Z)\frac{\partial u^2}{\partial^2 T}+Q(Z)|U|^2U=R \quad (5)$$

方程(5)可用逆散射方法精确求解，但很复杂，也可用数值法求解，但物理图像不清晰，下面采用变分方法[10]求近似解析解。

方程(5)的拉格朗日变分为

$$L_0=\int_{-\infty}^{\infty}\left[-\frac{d(Z)}{2}\left|\frac{\partial U}{\partial T}\right|^2+\frac{Q(Z)}{2}|U|^4+\frac{i}{2}\left(\frac{\partial U}{\partial Z}U^*-\frac{\partial U^*}{\partial Z}U\right)\right]\mathrm{d}T \quad (6)$$

在强色散控制孤子传输系统中，孤子脉冲偏离标准双曲正割波形，是一种类高斯准孤子，设方程(5)的解为

$$U(Z,T)=A(Z)f(\tau)\exp(i\phi) \quad (7)$$

$$\begin{cases}\tau=B(Z)[T-T_0(Z)]\\ \phi=\frac{C(Z)}{2}[T-T_0(Z)]^2-k(Z)[T-T_0(Z)]+\theta\end{cases} \quad (8)$$

式中参数 A，B，C，k，T_0，θ 分别表示脉冲的幅度、脉宽、啁啾、频率、中心位置和相位。把(7)式代入(6)式求得的方程(5)拉格朗日变分为

$$L_0=-\frac{d}{2}A^2\left(BI_x+\frac{C^2}{B^3}I_y+\frac{k^2}{B}I_l\right)+\frac{Q}{2}\frac{A^4}{B}I_N-\frac{A^2\dot{C}}{2B^3}I_y-\frac{A^2}{B}I_l(k\dot{T}_0+\dot{\theta}) \quad (9)$$

式中参数上方的‘·’表示对 Z 微分，$I_x=\int_{-\infty}^{\infty}f^2\tau\mathrm{d}\tau$，$I_y=\int_{-\infty}^{\infty}f^2\tau^2\mathrm{d}\tau$，$I_N=\int_{-\infty}^{\infty}f^4\mathrm{d}\tau$，$I_l=\int_{-\infty}^{\infty}f^2\mathrm{d}\tau$。将上式代入如下哈密顿运动方程

$$\frac{\partial L_0}{\partial X}-\frac{d}{\mathrm{d}Z}\left(\frac{\partial L_0}{\partial\dot{X}}\right)=i\int_{-\infty}^{\infty}\left(R^*\frac{\partial U}{\partial X}+R\frac{\partial U^*}{\partial X}\right)\mathrm{d}T \quad (10)$$

式中 $X=A$，B，C，k，T_0 和 θ，R^* 为 R 的共轭。当代入具体的扰动项 R 后就可导出具体的孤子参数演化的动力学方程。

2　扰动因子与定时抖动

设每通道速率不很高，ASE 噪声功率相对强度较低，忽略同信道相邻孤子的相互作用(相邻孤子脉冲之间的间隔大于 3～5 倍的脉冲宽度[3])和邻信道 ASE 噪声的影响，只需考虑本信道的 ASE 及邻信道孤子脉冲对本信道孤子脉冲和 ASE 的影响。在忽略四波混频和偏振模色散影响的情况下，邻信道孤子脉冲的影响表现为由非线性导致的交叉相位调制(XPM)，这样在双信道系统中，扰动项 R 可写成

$$R = -2Q|U_{3-i}|^2(U_i + \delta U_i) - \delta U_i \quad (11)$$

式中,$\delta U(Z,T) = \delta(Z - mZ_a)\Delta q(T)$ 为 ASE 噪声的扰动[11],表示第 m 个放大器产生的噪声场,$2Q|U_{3-i}|^2 U_i$ 为相邻信道孤子 U_{3-i} 通过 XPM 对本信道孤子 U_i 的作用,$2Q|U_{3-i}|^2\delta U_i$ 为 U_{3-i} 对 δU_i 的作用。

在 $|\Delta dZ_d| \gg 1$ 的强色散控制系统中,设信道 1 中光脉冲近似为高斯形 $f(\tau) = \exp(-\tau^2)$[12],则信道 2 中的光脉冲可表示为 $U_2 = Af(\tau + B\Delta T)\exp(i\phi)$,$\Delta T = T_{01} - T_{02}$ 表示两相邻信道中脉冲中心位置间隔。将式(11)代入式(10),可得在 ASE 噪声和相邻信道孤子脉冲影响下,光孤子参数的动力学方程

$$\dot{A} = -\frac{1}{2}AdC \quad (12a)$$

$$\dot{B} = -BdC \quad (12b)$$

$$\dot{C} = d(2B^4 - C^2) - \sqrt{2}QB^2A^2 + 2\sqrt{2}QB^2A^2(2B^2\Delta T^2 - 1)\exp(-B^2\Delta T^2) - \frac{8\sqrt{2\pi}}{\pi}QAB^2\int_{-\infty}^{\infty}\mathrm{Re}[\delta U\exp(-i\phi)]\exp[-2(\tau + B\Delta T)^2 - \tau^2](1 - 4\tau^2)\mathrm{d}\tau + \frac{4\sqrt{2\pi}}{A\pi}B^2\int_{-\infty}^{\infty}\mathrm{Re}[\delta U\exp(-i\phi)]\exp(-\tau^2)(1 - 4\tau^2)\mathrm{d}\tau \quad (12c)$$

$$\Delta\dot{k} = \frac{4\sqrt{2\pi}B}{A\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\left\{\frac{C}{2B^2}\mathrm{Im}[\delta U\exp(-i\phi)] - \mathrm{Re}[\delta U\exp(-i\phi)]\right\}\tau\exp(-\tau^2)\mathrm{d}\tau + 2\sqrt{2}QB^2A^2\Delta T\exp(-B^2\Delta T^2) + \frac{8\sqrt{2\pi}QAB}{\pi}\times \left\langle\int_{-\infty}^{\infty}\left\{\frac{C}{2B^2}\mathrm{Im}[\delta U\exp(-i\phi)] - \mathrm{Re}[\delta U\exp(-i\phi)]\right\}\times\tau\exp[-2(\tau + B\Delta T)^2 - \tau^2]\mathrm{d}\tau\right\rangle \quad (12d)$$

$$\Delta\dot{T} = -(\Delta k + \Delta B_0)d \quad (12e)$$

这组方程完整地描述了色散控制孤子系统中扰动项 R 对孤子脉冲传输演化规律的影响。式中 Δk,ΔB_0 分别表示相邻信道孤子的相对频移以及初始信道间隔。

式(12d)由三部分构成:$\Delta k = \Delta k_1 + \Delta k_2 + \Delta k_3$,$\Delta k_1$ 代表本信道 ASE 噪声导致的频率漂移,Δk_2 代表由相邻信道脉冲通过 XPM 效应导致的频率漂移,Δk_3 代表由相邻信道孤子脉冲通过 XPM 效应对 ASE 影响导致的频率漂移(简写为 XPM-ASE 项)。当不考虑相邻信道的影响时,第二、三项为零,第一项则为文献[4]的单信道系统中的 G-H 效应导致的频移。当只考虑 XPM 而不考虑本信道 ASE 的影响时,第一、三项为零,第二项则为文献[8]中相邻信道孤子碰撞导致的频移。

下面首先对式(12d)中较复杂的 XPM-ASE 项进行运算得到如下形式

$$\Delta k_3 = \frac{8\sqrt{2\pi}QA_dB_d}{\pi}\left[\frac{C_d}{2B_d^2}\mathrm{Im}\int_{-\infty}^{\infty}\Delta q(\tau)g(\tau)\exp\left(i\frac{k_d\tau}{B_d}\right)\mathrm{d}\tau - \mathrm{Re}\int_{-\infty}^{\infty}\Delta q(\tau)g(\tau)\exp\left(i\frac{k_d\tau}{B_d}\right)\mathrm{d}\tau\right] \quad (13)$$

式中 $g(\tau) = \tau\exp\left[-i\left(\frac{C_d\tau^2}{2B_d^2} + \theta\right) - 2(\tau + B_d\Delta T)^2 - \tau^2\right]$,下角标 d 表示参数在每个 Z_d 点的值。根据傅里叶变换的性质,令 $\omega = k_d/B_d$,$g(\omega) = F\{g(\tau)\}$,$\eta(\omega) = F\{\Delta q(t)\}$。则 Δk_3 的频谱为

$$\Delta k_3(\omega) = 16\sqrt{2\pi}QA_dB_d\left[\frac{C_d}{2B_d^2}\mathrm{Im}\int_{-\infty}^{\infty}g\left(\frac{\omega - \omega'}{B_d}\right)\eta(\omega')\mathrm{d}\omega' - \mathrm{Re}\int_{-\infty}^{\infty}g\left(\frac{\omega - \omega'}{B_d}\right)\eta(\omega')\mathrm{d}\omega'\right] \quad (14)$$

假定 ASE 噪声谱统计特性满足[2]

$$\langle\eta(\omega')\eta(\omega'')\rangle = 0, \qquad \langle\eta(\omega')\eta^*(\omega'')\rangle \approx S_\eta\delta(\omega' - \omega'') \quad (15)$$

式中 $S_\eta = N_{\mathrm{sp}}(G - 1)/(2\pi N_0)$ 为噪声功率谱,$N_0 = Pt_0/\hbar\omega_0 = \frac{1.763\langle d\rangle\lambda^4A_{\mathrm{eff}}}{2\pi^2c^2hn_2t_0}$ 为单位能量中的光子数,N_{sp} 和 G 分别为自发辐射因子和放大器增益。把(15)式代入(14)式积分得

$$\langle\Delta k_3^2\rangle = \frac{64\pi\sqrt{6\pi}}{81}Q^2A_d^2B_d^3\frac{N_{\mathrm{sp}}(G - 1)}{N_0}\left(\frac{C_d^2}{4B_d^4} + 1\right)\left(\frac{144a^2 + c^2}{3b} + 1\right)\times\exp\left(-8a^2 + 48\frac{a^2}{b} + \frac{c^2}{3b}\right) \quad (16)$$

其中，$a = B_d\Delta T$，$b = 9 + \frac{C_d^2}{4B_d^4}$，$c = \frac{2C_d\Delta T}{B_d}$。当在 $Z = nZ_d$ 点计算时，可假设 $C_d \approx 0$[4]，(16) 式简化为

$$\langle \Delta k_3^2 \rangle = \frac{64\pi\sqrt{6\pi}}{81} Q^2 A_d^2 B_d^3 \frac{N_{sp}(G-1)}{N_0}\left(\frac{16B_d^2\Delta T^2}{3} + 1\right)\exp\left(-\frac{8}{3}B_d^2\Delta T^2\right) \tag{17}$$

同理可计算出 ASE 作用项导致的均方频移

$$\langle \Delta k_1^2 \rangle = \frac{\sqrt{2\pi}N_{sp}(G-1)}{2\pi N_0}\left(\frac{C_d^2 + 4B_d^4}{A_d^2 B_d}\right) \tag{18}$$

$$\langle \Delta k_1^2 \rangle = \frac{\sqrt{2\pi}N_{sp}(G-1)}{2\pi N_0}\left(\frac{4B_d^3}{A_d^2}\right)\quad (C_d \approx 0) \tag{19}$$

XPM 项导致的均方频移为

$$\langle \Delta k_2^2 \rangle = 8Q_d^2 B_d^4 A_d^4 \Delta T^2 \exp(-2B_d^2\Delta T^2) \tag{20}$$

当考虑所有扰动项影响时在 nZ_d 处总的均方相对频移为

$$\langle \Delta k^2 \rangle = \langle \Delta k_1^2 \rangle + \langle \Delta k_2^2 \rangle + \langle \Delta k_3^2 \rangle \tag{21}$$

则由(12e)得到 1 信道的均方定时抖动为

$$\langle (T_{01})^2 \rangle = \sum_{m=1}^{N}\langle \Delta k_m^2 \rangle \left[\int_{mZ_d}^{NZ_d} \mathrm{d}(Z')\,\mathrm{d}Z'\right]^2 \tag{22}$$

由上述结果可见，不同扰动因子导致的频移和定时抖动均随孤子幅度 A，初始信道间隔 ΔB_0 而变，而 ASE 和 XPM-ASE 导致的频移和抖动还随增益 G 而变，XPM 和 XPM-ASE 作用导致的频移和抖动还随非线性参数 Q 而变。

3 应用与讨论

现将上述理论结果用于分析图 1 所示的色散控制孤子传输系统的特性，脉冲在 $Z_d/4$ 处输入，放大器位于 nZ_d 处，$N_{sp} = 1$。输入两等幅、等宽高斯准孤子脉冲，初始脉宽 $t_0 = 18.6$ ps，载波波长 $\lambda_0 = 1.55$ μm，每个信道的速率 $R = 10$ Gbit/s(脉冲间隔 100 ps $> 5t_0$)，光纤色散值 $d_1 = -3$ ps^2/km(归一化值为 30)，$d_2 = 2.8$ ps^2/km(归一化值为 -28)，色散长度 $L_D = 1250$ km，$Z_a = Z_d = 50.1$ km(归一化 $Z_a = Z_d = 0.04$)，$Z_1 = Z_2 = Z_d/2$，$\alpha = 0.2$ dB/km，$n_2 = 3.2\times10^{-20}$ m^2/W，$A_{eff} = 50$ μm^2，归一化非线性系数 $\sigma(Z) \approx 1$。

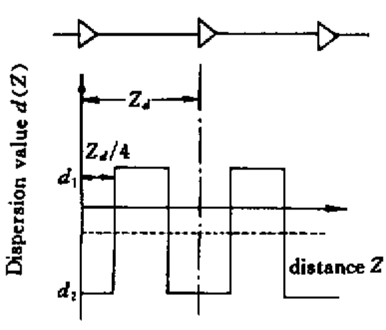

图 1 色散管理示意图

Fig.1 Dispersion managed sketch map

图 2 为引起孤子定时抖动的扰动 XPM 作用和 XPM-ASE 作用的区域图，图中的曲线为两者作用引起的等定时抖动曲线。图中显示，如果选择的初始脉冲功率和信道间隔参数处于曲线之上，即在信道间隔 > 8.3 ($\Delta\lambda = 1$ nm)情况下(这种情况孤子通信通常能满足)，XPM 引起的抖动大于 XPM-ASE 引起的抖动。

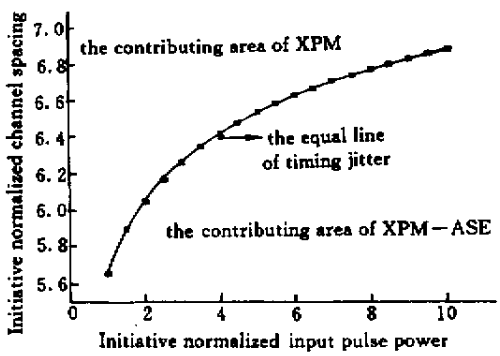

图 2 引起孤子频率抖动的扰动起作用的区域

Fig.2 Contributing area of several perturbations, which leads to solitons timing jitter

图 3 给出了初始信道间隔 $\Delta B_0 = 24$($\Delta\lambda = 2.9$ nm)，输入孤子峰值功率 $p_0 = 1.51$(0.78 mW)时，三种不同扰动因素产生的定时抖动随距离变化的计算结果。可见，在 $Z = 10000$ km 处(归一化距离为 8)由 XPM 单独作用导致的均方定时抖动约 45 ps^2，而由 ASE 和 XPM-ASE 导致的均方定时抖动分别约为 25 ps^2 和 15 ps^2 左右。若抖动服从高斯统计分布，取探测窗口宽 $2t_w = 65$ ps，则本例色散控制孤子系统中由 XPM 导致的误码率为 10^{-5}，而由 ASE 和 XPM-ASE 导致的误码均 $< 10^{-9}$。因此，综合图 2,3 说明，在 WDM 色散控制孤子系统中，XPM 是导致误码的主要因素，但在 $Z \leqslant 6250$ km，由 XPM 导致的误码也 $< 10^{-9}$。为了进一步增大孤子稳定传输距离，需对色散控制系统的结构参数和色散分布进行合理设计。

上节分析还显示，在 Z_d 不变的情况下，系统中扰动导致的频移和定时抖动与初始信道间隔 ΔB_0 及

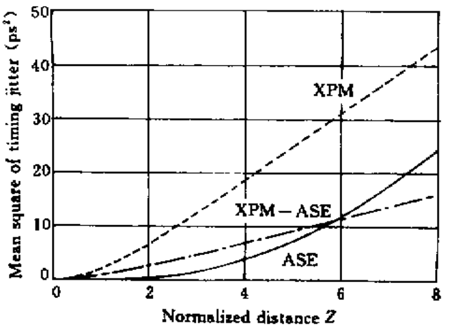

图 3　各扰动引起的孤子的均方定时抖动
初始信道间隔 $\Delta B_0=24$，峰值功率 $P_0=1.51$

Fig.3　Comparing on the solitons mean square of timing jitter led by several perturbations. Initiative channel spacing $\Delta B_0=24$，peak power 1.51

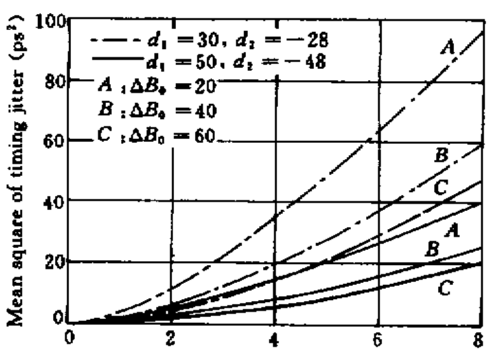

图 4　不同初始信道间隔和色散管理情况下的总定时抖动

Fig.4　Comparing on the total mean square of timing jitter in conditions of different initiative channel spacing and dispersion map

色散变化的深度有密切关系，图 4 给出了在三种不同初始间隔和两种不同色散分布深度时（系统其他参数不变），总均方定时抖动随距离变化的计算结果。由图可见，当初始信道间隔 ΔB_0 从 20（$\Delta\lambda=2.4$ nm）分别增加到 40（$\Delta\lambda=4.8$ nm）和 60（$\Delta\lambda=7.3$ nm）时，定时抖动将依次从曲线 A（虚线）降至曲线 B 和 C 所示的值。当光纤长度不变，而色散变化深度 Δd 或强度 $|\Delta dZ_d|$ 增大，即色散参数由 $d_1=30(-3$ $ps^2/km)$，$d_2=-28(2.8$ $ps^2/km)$ 增大到 $d_1=50(-5$ $ps^2/km)$，$d_2=-48(4.8$ $ps^2/km)$ 时，定时抖动随距离的变化将从虚线 A,B,C 降至实线 A,B,C 的位置，定时抖动将大大降低。例如，采用前一种色散配置，当 $\Delta B_0=20$ 时，孤子无误码或低误码（10^{-9}），传输距离仅达 3750 km，而采用后一种色散配置则可达 7500 km，当 $\Delta B_0=40$ 时，传输距离将更长。所以，初始信道间隔 ΔB_0 和色散变化深度或强度 $|\Delta dZ_d|$ 是影响孤子传输距离的重要参数。

色散控制孤子系统中存在多种扰动因素，影响孤子传输特性。采用拉格朗日变分方法，建立了同时考虑 ASE，XPM 和 XPM-ASE 等三种扰动影响时孤子参数演化的动力学方程，求得了频移和定时抖动的解析结果，分析了三种扰动因素及系统结构参数对定时抖动和系统性能的影响，本项研究结果可供色散控制光孤子通信系统的设计参考。

参　考　文　献

1　M. Suzuki，H. Kubota，A. Suhara *et al*.. 40-Gb/s single-channel optical soliton transmission over 70，000 km using in-line synchronous modulation and optical filters [C]. 1998 Conf. Optical Fiber Communication. San Diego，CA，Th14

2　J. P. Gordon，H. A. Haus. Random walk of coherently amplified solitons in optical fiber transmission [J]. *Opt. Lett*.，1986，**11**(10)：665～667

3　Xiangling Yang，Yangjing Wen. The Fundamental Theory of Optical Fiber Soliton Communications [M]. Beijing：Industrial Publication Company of National Defense，2000 (in Chinese)

4　T. Okamawari，A. Maruta，Y. Kodama. Reduction of Gordon-Haus jitter in a dispersion compensated optical transmission system：analysis [J]. *Opt. Comm*.，1998，**149**：261～266

5　T. Yu，E. A. Golovchenko，A. N. Pilipetskii *et al*.. Dispersion-managed soliton interactions in optical fibers [J]. *Opt. Lett*.，1997，**22**(11)：793～795

6　S. Kumar，M. Wald，F. Lederer. Soliton interaction in strongly dispersion-managed optical fibers [J]. *Opt. Lett*.，1998，**23**(13)：1019～1021

7　M. J. Ablowitz，G. Biondini，S. Chakravarty *et al*.. On timing jitter in wavelength-division multiplexed soliton systems [J]. *Opt. Comm*.，1998，**150**：305～318

8　H. Sugahara，H. Kato，T. Inoue *et al*.. Optimal dispersion management for a wavelength division multiplexed optical soliton transmission system [J]. *J. Lightwave Technol*.，1999，**17**(9)：1547～1559

9　H. A. Haus，K. Tamura，L. E. Nelson *et al*.. Stretched-pulse additive pulse mode-locking in fiber ring lasers：theory and experiment [J]. *IEEE J. Quantum Electron*.，1995，**31**(3)：591～598

10　D. Anderson. Variational approach to nonlinear pulse propagation in optical fibers [J]. *Phys. Rev. A*，1983，**27**(6)：3135～3145

11　S. Kumar，F. Lederer. Gordon-Haus effect in dispersion-managed soliton systems [J]. *Opt. Lett*.，1997，**22**(24)：1870～1872

12　N. J. Smith，F. M. Knox，N. J. Doran *et al*.. Enhanced power solitons in optical fibers with periodic dispersion management [J]. *Electron. Lett*.，1996，**32**(1)：54～55