

文章编号: 0253-2239(2006)05-0781-6

差分相移键控色散管理孤子多扰动系统的相位抖动^{*}

徐 铭 吉建华

(深圳大学信息工程学院新技术研究中心, 深圳 518060)

摘要: 差分相移键控(DPSK)调制方式和色散管理孤子传输方式的结合能抵制噪声和非线性损伤,在高速(40 Gbit/s以上)多信道系统中具有突出的优点。采用变分法分析了多波长信道的放大自发辐射(ASE)噪声、信号间的非线性串扰(ISI)等多种扰动因素引起差分相移键控色散管理孤子系统的均方根相位抖动,给出了扰动的作用区域以及各扰动的大小。研究发现,放大自发辐射引起的抖动与传输距离成三次方的关系,而交叉相位调制(XPM)引起的抖动与距离近似成线性关系。通过优化选择色散管理图强度范围 1.5~3.5,各种扰动得到了抑制,而以放大自发辐射扰动抑制为最大,此时要远低于交叉相位调制引起的抖动,然后分别是交叉相位调制-放大自发辐射扰动和交叉相位调制,从而波分复用系统主要来自于增加信道数这一客观限制。

关键词: 光纤通信; 差分相移键控; 色散管理孤子; 相位抖动

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

Phase Jitter of Multi-Perturbations in Differential Phase-Shift Keying Dispersion Managed Soliton System

Xu Ming Ji Jianhua

(Research Center of Advanced Technology, Institute of Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060)

Abstract: A combination of differential phase-shift keying (DPSK) modulation format with dispersion managed soliton (DMS) transmission technique can depress the noise and nonlinear damage, and gives additional innovative advantage in densely spaced channels at high bit rates (40 Gbit/s and more) systems. The phase jitter of root of mean square induced by multi-perturbations is analyzed by variational method in differential phase-shift keying dispersion managed soliton system, which includes the amplifier spontaneous emission (ASE) noise, intra-symbol interference (ISI) between the channels. The effect area and magnitudes of multi-perturbations are given. The results declare that phase jitter induced by amplifier spontaneous emission noise is almost cubic relationship with transmission distance and phase jitter induced by cross phase modulation (XPM) is nearly linear with transmission distance. With the optimal dispersion management map strength S from 1.5 to 3.5, the perturbations are restrained. The phase jitter of amplifier spontaneous emission noise which is far below XPMs now is most decreased than the XPM-ASE and XPM. Then wave division multiplexing system is restricted by the external factor of the channel numbers increasing.

Key words: optical fiber communication; differential phase-shift keying; dispersion managed soliton; phase jitter

1 引 言

近些年来,基于差分相移键控(DPSK)的光调制信号在高速大容量光传输系统中的应用受到普遍的关注^[1~3],和传统的开关键控(OOK)相比,该调制方式有 3 dB 的接收信噪比增益、较低的色散和偏振模色散^[2]。同时,由于该系统的固有特性,系统扰动引起光幅度的抖动较低。因此,在高速差分相移

键控传输系统当中,限制该系统的因素主要来自放大自发辐射噪声引起的所谓 Gordon-Mollenauer 效应^[4]以及非线性效应,如四波混频(FWM)、自相位调制(SPM)以及交叉相位调制(XPM)等引起的光相位抖动。而色散管理孤子(DMS)能够有效地抑制这些效应的影响。

目前,研究的差分相移键控系统大多是归零线

^{*} 国家自然科学基金(60502027, 60372088)和广东省自然科学基金(04300855, 530108)资助课题。

作者简介: 徐 铭(1970—),男,江西人,硕士生导师,主要从事高速光孤子通信方面的研究。E-mail: xum@szu.edu.cn

收稿日期: 2006-04-14; 收到修改稿日期: 2006-11-03

性系统^[1,3,5],都基于考虑单一的扰动影响情形^[6~9],且很少涉及多波长系统。本文同时考虑差分相移键控色散管理孤子波分复用系统中多扰动因素,研究多扰动引起相位抖动对系统的影响程度,从而进一步优化系统。

2 扰动差分相移键控色散管理孤子传输演化的变分解

考虑扰动项 $R(U, U^*)$ 时,光场 U 满足扰动非线性薛定谔方程(NLSE),可写成^[10]

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

式中 $d(Z)$ 表示色散变化项,其值随传输光纤变化而周期变化, $Q(Z)$ 隐含有光纤的损耗和放大以及光纤的非线性项,如果光纤损耗完全由放大器增益补偿,则 $Q(Z)$ 随光纤的非线性系数 γ 变化。文献[11,12]中研究表明,在平均路径色散较低的情况下,交叉相位调制引起的相位抖动方差约为四波混频的 3~5 倍。因此忽略四波混频,色散管理波分复用(WDM)光孤子系统中仍然存在多种扰动因素,主要表现为放大自发辐射噪声的影响以及邻信道孤子脉冲之间相互作用导致的非线性串扰,文献[9,12]中考虑的是单一信道内的脉冲之间的交叉相位调制(XPM),即单信道交叉相位调制(XPM),当适当选择色散图

参量,色散管理孤子系统中单信道交叉相位调制引起的抖动很小^[12]。探讨不同信道脉冲间的相互作用,其非线性作用实质也主要是交叉相位调制。因此扰动项 $R(U, U^*) = R_1 + R_2$ 可由如下项组成:

孤子相互作用交叉相位调制扰动

$$R_1 = -2Q |U_{\pm 1}|^2 U_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

放大自发辐射-交叉相位调制扰动以及放大自发辐射扰动

$$R_2 = -2Q |U_{\pm 1}|^2 (\delta U_i) - \delta U_i, \quad (3)$$

上式系统的扰动主要来自三个方面:本信道的放大自发辐射扰动项 δU_i , 相邻信道信号 $U_{\pm 1}$ 功率对本信道的交叉相位调制扰动项 $2Q |U_{\pm 1}|^2 U_i$, 以及相邻信道信号功率和本信道的放大自发辐射的交叉相位调制引起对本信道的扰动项(ASE-XPM) $2Q |U_{\pm 1}|^2 \delta U_i$ 。式中, $\delta U_i = \delta(Z - mZ_a) \Delta q(T)$ 为信道 i 中放大自发辐射噪声的扰动^[13], 表示第 m 个放大器产生的噪声场, $\Delta q(T)$ 的傅里叶变换和噪声的功率谱有关, Z_a 为放大间距; n 为波分复用的信道总数。这三项扰动项都会引起信道 i 的孤子脉冲场 U_i 的畸变,对差分相移键控系统来说,其主要表现为引起脉冲相位的随机漂移,这种随机的漂移效应导致平衡判决接收机产生比特误码,从而限制系统的性能。采用拉格朗日变分方法^[10]解(1)式。设脉冲稳态的解满足

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

$$\tau = B(Z) [T - T_0(Z)], \quad \phi = \frac{C(Z)}{2} [T - T_0(Z)]^2 - k(Z) [T - T_0(Z)] + \varphi, \quad (5)$$

式中参量 A, B, C, k, T_0, φ 分别表示脉冲的幅度、脉宽、啁啾、频率、中心位置和相位。经解得孤子各参量的偏微分方程组为:

$$\dot{A} = -\frac{AdC}{2}, \quad (6a)$$

$$\dot{B} = -BdC, \quad (6b)$$

$$\dot{C} = d \left(\frac{B^4 I_x}{2I_y} - C^2 \right) - \frac{B^2 A^2 Q I_N}{2I_y} + \frac{N^2}{A I_y} \int_{-\infty}^{\infty} \text{Re}(\text{Re}^{-i\phi}) (2f_{\tau\tau} + f) d\tau, \quad (6c)$$

$$\dot{k} = -\frac{2B}{A I_l} \int_{-\infty}^{\infty} \text{Re}(\text{Re}^{-i\phi}) f_{\tau} d\tau - \frac{2C}{B A I_l} \int_{-\infty}^{\infty} \text{Im}(\text{Re}^{-i\phi}) f_{\tau} d\tau, \quad (6d)$$

$$\dot{T}_0 = -dk + \frac{2}{A B I_l} \int_{-\infty}^{\infty} \text{Im}(\text{Re}^{-i\phi}) f_{\tau} d\tau, \quad (6e)$$

$$\dot{\varphi} = d \left(\frac{k^2}{2} - \frac{B^2 I_x}{I_l} \right) + \frac{5}{4} \frac{Q A^2 I_N}{I_l} - \frac{1}{2 A B I_l} \int_{-\infty}^{\infty} [4k \text{Im}(\text{Re}^{-i\phi}) f_{\tau} + B \text{Re}(\text{Re}^{-i\phi}) (3f + 2f_{\tau} \phi)] d\tau, \quad (6f)$$

式中 $I_x = \int_{-\infty}^{\infty} f_x^2 d\tau$, $I_y = \int_{-\infty}^{\infty} f_y^2 \tau^2 d\tau$, $I_N = \int_{-\infty}^{\infty} f^4 d\tau$, $I_t = \int_{-\infty}^{\infty} f^2 d\tau$ 。这组方程完整地描述了色散管理孤子系统中扰动项 R 对孤子脉冲传输演化规律的影响。

将(2)式,(3)式,(4)式代入(6)式可求得各扰动影响下引起的相位抖动。稳态的色散管理孤子脉冲形状近似为高斯形 $f(\tau) = \exp(-\tau^2)$, $E_{\text{DMS}} = \int |U|^2 dT = \sqrt{\pi}A^2/B$, 且假定放大自发辐射噪声谱统计特性满足 $\langle \eta(\omega')\eta(\omega'') \rangle = 0$, $\langle \eta(\omega')\eta^*(\omega'') \rangle \approx S_\eta \delta(\omega' - \omega'')$, $\eta(\omega) = \mathcal{F}\{\Delta q(\tau)\}$, $S_\eta = N_{\text{sp}}(G-1)/(2\pi N_0)$ 为噪声功率谱, N_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。第 m 个放大器处放大自发辐射噪声项, 交叉相位调制-放大自发辐射项以及交叉相位调制项导致的孤子相对均方根(RMS)相移与其积累相位抖动:

$$\langle \Delta \varphi_{\text{ASE}}^2 \rangle = \frac{N_{\text{sp}} T_0^2 (G-1)}{\sqrt{2\pi} N_0} Q^2 \left(\frac{C_m^2 + 4B_m^4}{A_m^2 B_m} \right), \quad (7a)$$

$$\langle \Delta \varphi_{\text{XPM-ASE}}^2 \rangle = \frac{64\pi \sqrt{6\pi}}{81} Q^2 A_m^2 B_m^3 \frac{N_{\text{sp}} T_0^2 (G-1)}{N_0} \left(\frac{C_m^2}{4B_m^2} + 1 \right) \left(\frac{144a^2 + c^2}{3b} + 1 \right) \times \exp\left(-8a^2 + 48 \frac{a^2}{b} + \frac{c^2}{3b}\right), \quad (7b)$$

$$\langle \Delta \varphi_{\text{XPM}}^2 \rangle = 8Q^2 B^4 A^4 \Delta T^2 T_0^2 \exp(-2B^2 \Delta T^2), \quad (7c)$$

$$\langle (T_{01m})^2 \rangle_R = \sum_{m=1}^N \langle \Delta \varphi_R^2 \rangle \left[\int_{mZ_d}^{NZ_d} D(Z') dZ' \right]^2, \quad (7d)$$

其中 $a = B_m \Delta T$, $b = 9 + \frac{C_m^2}{4B_m^4}$, $C = \frac{2C_m \Delta T}{B_m}$, $\Delta T = T_{01} - T_{02} = -\int \Delta B_0 D(Z') dZ$ 表示两相邻信道中脉冲中心位置间隔, ΔB_0 为信道初始间隔。 $\langle (T_{01m})^2 \rangle_R$ 为扰动 R 在放大器 m 处信道 1 上积累的相位抖动。(7)式的解析结果和文献[6,7]中恒色散普通孤子系统相似, 同时与文献[8]中采用矩量法解析结果一致。当在 $Z = nZ_d$ 点计算时, 可假设 $C_d \approx 0^{[14]}$, C_d 表示每个色散管理周期末点处的啁啾, (7b)式还可以简化为

$$\langle \Delta \varphi_{\text{XPM-ASE}}^2 \rangle = \frac{64\pi \sqrt{6\pi}}{81} Q^2 A_m^2 B_m^3 \frac{N_{\text{sp}} (G-1)}{N_0} \left(\frac{16B_m^2 \Delta T^2}{3} + 1 \right) \exp\left(-\frac{8}{3} B_m^2 \Delta T^2\right), \quad (8)$$

式中 N 为在线放大器的总数, A_m, B_m, C_m 分别为第 m 个放大器处的孤子参量。

上面考察的是两个信道之间行为。如果在具有总数 J 个信道的波分复用系统中, 每第 j 信道产生孤子总抖动为其他 $J-1$ 个信道扰动的结果。因此, 第 j 个信道的孤子均方抖动统计为

$$\langle \Delta \varphi^2 \rangle_j = \sum_{k=1, k \neq j}^j \langle \Delta \varphi^2 \rangle_{jk}, \quad (9)$$

其中以 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 为中心波长的 j 信道波长为

$$\lambda_j = \lambda + \Delta \lambda_{\text{min}} [j - (J+1)/2], \quad (10)$$

$\Delta \lambda_{\text{min}}$ 为相邻孤子信道间隔, j 与 k 信道孤子之间的波长间隔 $\Delta \lambda = |\lambda_j - \lambda_k| = (j-k)\Delta \lambda_{\text{min}}$ 。

从(7)式、(8)式可以看出, 放大自发辐射噪声扰动类型引起的孤子均方相移与脉冲的能量 ($E_{\text{DMS}} = \int |U|^2 dT = \sqrt{\pi}A^2/B$) 成反比, 交叉相位调制扰动类型引起的均方相移同时与初始信道间隔

ΔB_0 、孤子能量有关。而在色散管理系统中, 能量 E_{DMS} 与色散管理图强度 S 有如下关系^[15]:

$$\bar{D} = \frac{D_1 l_1 + D_2 l_2}{z_d}, \quad (11)$$

$$S = \left| \frac{\lambda_0^2 (D_1 - \bar{D}) l_1 - (D_2 - \bar{D}) l_2}{2\pi c t_{\text{FWHM}}} \right|,$$

$$E_{\text{DMS}} = [4.5 \bar{D} / (\gamma t_{\text{FWHM}})] (1 + \alpha S^2), \quad (12)$$

式中 \bar{D} 为路径平均色散参量, t_{FWHM} 为脉冲的半高全宽, γ 为非线性系数, α 一般等于 0.7。另外, 如果考虑放大器增益, 能量 E_{DMS} 还需要乘以能量增强因子 $G \ln G / (G-1)$ 。 l_1 和 l_2 分别为在一个色散补偿周期内传输光纤与补偿光纤的长度, 而 $l_1 + l_2 = z_d$ 为一个色散补偿周期 [归一化 $Z_d = z_d / L_D$, $L_D = 2\pi c t_{\text{FWHM}}^2 / (0.66^2 \lambda_0^2 \bar{D})$ 为色散长度], 对应的色散值为 D_1 (归一化值 d_1) 和 D_2 (归一化值 d_2), 对应的非线性系数为 γ_1 和 γ_2 。此时色散值随传输距离的变化具体可表述为

$$d(Z) = \frac{-D}{D}, \quad d(Z) = \begin{cases} d_1, & 0 < z - nZ_d < l_1/L_D \\ d_2, & l_1/L_D < Z - nZ_d < z_d/L_D, \end{cases} \quad (13)$$

此时,如果放大器刚好补偿光纤的损耗, $Q(Z)$ 也可具体表述为

$$Q(Z) = \begin{cases} a_0 \gamma_1 P_0 Z_a, & 0 < Z - nZ_d < l_1/L_D \\ a_0 \gamma_2 P_0 Z_a, & l_1/L_D < Z - nZ_d < z_d/L_D \end{cases} \quad (14)$$

式中 a_0 为常量,隐含有光纤的损耗和放大项, P_0 与 Z_a 分别为脉冲初始入射功率和归一化放大间距。(11)式、(12)式可用于优化设计色散管理孤子系统。

3 解析结果讨论

下面将上述理论结果用来分析色散管理孤子传输系统的特性。设系统中放大器位于 nZ_d 处,输入脉冲为高斯形孤子,脉宽 $t_{FWHM} = 5$ ps,在零啁啾点输入(一般位于管理周期的中点)。现将载波波长按照载波波长 $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$ 对称分布,如 $\lambda_1 = \lambda_0 + \Delta\lambda/2$, $\lambda_2 = \lambda_0 - \Delta\lambda/2, \dots$ 。每个波长通道速率 $R = 40$ Gbit/s, $\bar{D} = 0.1$ ps/(nm·km)。假定主传输光纤和补偿光纤的损耗系数相同,均为 $\alpha = 0.2$ dB/km,克尔系数 n_2 均为 3.2×10^{-20} m²/W, $A_{\text{eff}} = 50 \mu\text{m}^2$,这样考虑不影响本文所得的结论。自发辐射噪声因子 $N_{\text{sp}} = 1$ 。对(6)式采用龙格-库塔数值计算。

图1为引起孤子相位抖动的扰动交叉相位调制作用和交叉相位调制-放大自发辐射作用的区域图,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量处于曲线之上,即在信道间隔 $\Delta B_0 > 6.6$ ($\Delta\lambda = 0.8$ nm),归一化功率约小于4等一般情况下,交叉相位调制引起的抖动大于交叉相位调制-放大自发辐射引起的抖动。但当功率较大而信道较窄时,后者引起的抖动大。

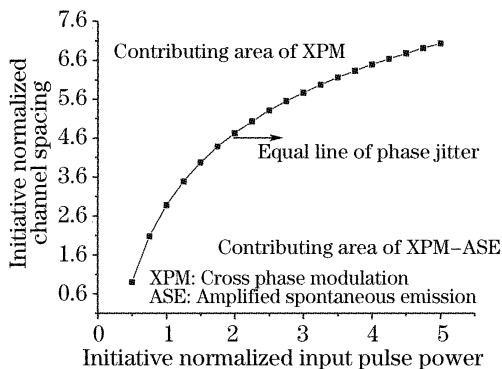


图1 引起孤子相位抖动的扰动起作用的区域
Fig.1 Contributing area of perturbations to solitons phase jitter

图2给出了初始信道间隔 $\Delta B_0 = 6.6$,三种不同扰动因素产生的相位抖动随距离变化的计算结果。可见,在 $Z = 5000$ km处(归一化距离为4)由放大自发辐射噪声引起的均方根相位最大,约0.076 rad,由交叉相位调制单独作用导致的均方根相位抖动在两个与四个信道时分别为0.040 rad和0.055 rad,而由交叉相位调制-放大自发辐射导致的抖动最小。通过快速分步傅里叶算法(Split-step fast Fourier transform, SSFFT)数值计算带有高斯随机分布的放大自发辐射噪声的非线性薛定谔方程,以及三次方函数拟合验证变分解析的结果。参量的选择为:2048个高斯形脉冲链,每个脉冲占1/3比特时隙,即脉宽5 ps,每个比特时隙采样64个点,快速分步傅里叶算法步长1 km。每个色散管理周期为80 km,其末端加入放大自发辐射噪声并通过复幅度计算脉冲的相位,对所有的脉冲计算抖动方差。如图3,可知随着传输距离和放大器数目的增加,解析和数值计算的结果较为接近,并且放大自发辐射引起的抖动与传输距离成三次方的关系,而图2显示交叉相位调制引起的抖动与距离近似成线性关系,这一点在很多文献中得到论证^[7,8],从而表明应用该方法研究的正确性。这种关系和在研究基于幅度(AM)调制的色散管理孤子传输系统中放大自发

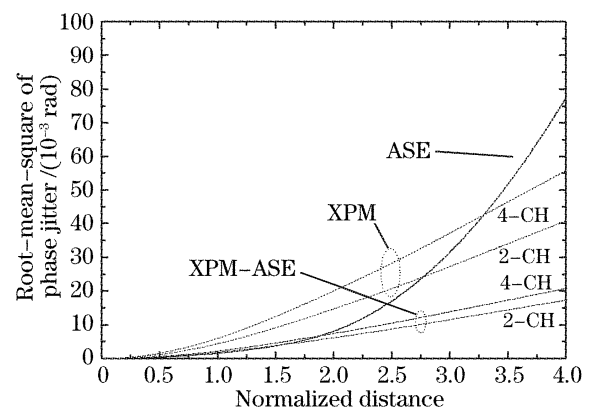


图2 各扰动引起的孤子均方根(RMS)相位抖动,初始分别为两和四个信道,间隔 $\Delta B_0 = 6.6$,峰值功率1.7
Fig.2 RMS phase jitter of several perturbations versus transmission distance. The initial two and four channels spacing is $\Delta B_0 = 6.6$, and peak power is 1.7

辐射定时抖动情形类似^[12],因此,放大自发辐射噪声在长距离传输时,将成为进一步增大孤子稳定传输距离的主要限制。根据(7)式、(11)式与(12)式,从降低扰动效应出发,为降低色散管理孤子的相位抖动, \bar{D} 取值应低;为降低放大自发辐射类型的扰动,应提高孤子脉冲能量和信噪比,色散管理图强度 S 应取的较大,但过大的 S 会引起色散波的产生,导致系统不稳定,引起交叉相位调制类型的扰动加大,因此需对色散管理系统结构参量和色散分布进行合理设计,即合理选择色散管理图强度 S 。

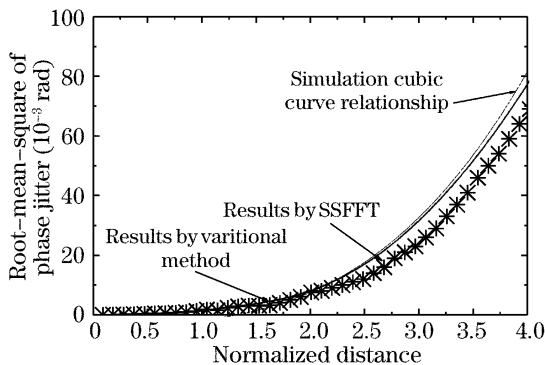


图3 变分解析法(实线)和快速分步傅里叶算法得出的放大自发辐射噪声引起的孤子的均方根相位抖动与其三次方曲线关系的拟合(虚线)

Fig.3 RMS phase jitter of ASE noise with variational method (solid line), SSFFT and the simulation of cubic curve relationship (dash line)

由图4可以看出,在 $1.5 < S < 3.5$ 范围内,总相位抖动均小于 0.1 rad ,可以选择此区域对系统进行设计。比如,选择 $S=3$ 的系统情形,对于主传输光纤为色散位移光纤,色散值为 $D_1 = 2 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$, $z_a = z_d = 80 \text{ km}$,根据(11)式可设计出,在一个色散管理周期内,主传输光纤的长度 $l_1 = 54 \text{ km}$,可以采

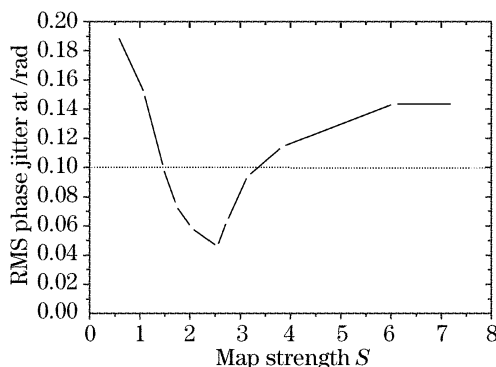


图4 5000 km ($z=4$)处三种扰动引起的孤子总的均方根相位抖动与色散管理图强度 S 的关系

Fig.4 Relationship of total RMS phase jitter of three perturbations with dispersion management map strength S at 5000 km transmission distance (at $z=4$)

用色散补偿器件,补偿的色散累计为 $108 \text{ ps}/\text{nm}$ 。图5中各种扰动得到了抑制,而以放大自发辐射扰动为最,此时要远低于交叉相位调制引起的抖动,然后分别是交叉相位调制-放大自发辐射扰动和交叉相位调制。这样一来,系统主要来自于增加信道数这一客观限制。

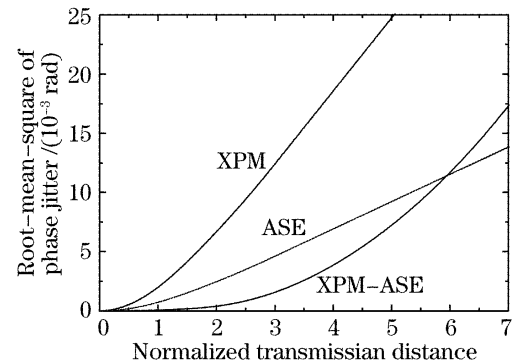


图5 各扰动在优选色散管理图强度 $S=3$ 且有4个信道情形下引起的孤子均方根相位抖动

Fig.5 RMS phase jitter of several perturbations versus transmission distance at optimal dispersion management map strength $S=3$ and four channels

4 结 论

采用拉格朗日变分方法,建立了同时考虑放大自发辐射、交叉相位调制和交叉相位调制-放大自发辐射等三种扰动影响时孤子参量演化的动力学方程,求得了系统的均方根相位抖动的解析结果。通常情形下,交叉相位调制引起的抖动大于交叉相位调制-放大自发辐射引起的抖动,与传输距离近似呈线性关系。但当功率较大而信道较窄时,后者的效应比较而言影响较大。如果系统为长距离传输系统,则放大自发辐射噪声占据主导地位,与传输距离近似呈三次方关系。通过优化系统的色散管理图强度为 $1.5 < S < 3.5$,各种扰动得到了抑制,从而系统主要来自于增加信道数这一客观限制。本研究结果能为估计高速差分相移键控系统传输性能提供参考。

参 考 文 献

- 1 T. Tsuritani, K. Ishida, A. Agata *et al.*. 70-GHz-spaced $40 \times 42.7 \text{ Gb/s}$ transpacific transmission over 9400 km using prefiltered CSRZ-DPSK signals, all-Raman repeaters, and symmetrically dispersion-managed fiber spans[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(1): 215~224
- 2 J. Wang, J. M. Kahn. Impact of chromatic and polarization-mode dispersions on DPSK systems using interferometric demodulation and direct detection[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(2): 362~371
- 3 A. H. Gnauk, P. J. Winzer. Optical phase-shift-keyed transmission [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(1): 115~130

- 4 J. P. Gordon, L. F. Mollenauer. Phase noise in photonic communications systems using linear amplifier[J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(23): 1351~1353
- 5 J. Leibrich, C. Wree, W. Rosenkranz. CF-RZ-DPSK for suppression of XPM on dispersion-managed long-haul optical WDM transmission on standard single-mode fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(2): 155~157
- 6 C. J. McKinstrie, C. Xie. Phase jitter in single-channel soliton systems with constant dispersion[J]. *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, 2002, **8**(3): 616~625
- 7 C. J. McKinstrie, C. Xie, C. Xu. Effects of cross-phase modulation on phase jitter in soliton systems with constant dispersion[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(8): 604~606
- 8 M. Hanna, D. Boivin, P. A. Lacourt *et al.*. Calculation of optical phase jitter in dispersion managed systems by use of the moment method[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2004, **21**(1): 24~28
- 9 F. Zhang, C.-A. Bunge, K. Petermann. Analysis of nonlinear phase noise in single-channel return-to-zero differential phase-shift keying transmission systems[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(8): 1038~1040
- 10 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 (in Chinese)
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
- 11 K.-P. Ho, H.-C. Wang. Comparison of nonlinear phase noise and intrachannel four-wave mixing for RZ-DPSK signals in dispersive transmission systems [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(7): 1426~1428
- 12 S. Kumar. Analysis of intrachannel impairments in differential phase-shift keying transmission systems[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(16): 2053~2055
- 13 Li Qiliang, Li Qingshan. Calculation and analysis of timing-jitter in dispersion-managed soliton system[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(5): 607~612 (in Chinese)
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
- 14 T. Okamawari, A. Maruta, Y. Kodama. Reduction of Gordon Haus jitter in a dispersion compensated optical transmission system; analysis[J]. *Opt. Commun.*, 1998, **149**(11): 261~266
- 15 J. H. B. Nijhof, N. J. Doran, W. Forsysiak. Energy enhancement of dispersion managed solitons for strong dispersion maps [C]. *Proc. Optical Fiber Communication Conference*, 1998, **THC4**: 268

勘 误

《光学学报》2007年27卷第4期第643页文章《一种可调横向剪切量的新型偏振干涉成像光谱仪》的作者单位有误。更正如下：

简小华¹ 张淳民¹ 孙 尧¹ 吴 磊^{1,2}

1 西安交通大学理学院, 西安 710049

2 西安应用光学研究所, 西安 710065

Jian Xiaohua¹ Zhang Chunmin¹ Sun Yao¹ Wu Lei^{1,2}

1 School of Science, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

2 Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065