

混沌信号在光纤传输过程中的非线性演化

颜森林

(南京晓庄学院物理系, 南京 210017)

(2005 年 9 月 24 日收到 2006 年 10 月 26 日收到修改稿)

对光纤混沌传输理论及混沌信号与光纤传输媒介相互作用的物理机制进行了理论研究. 通过耦合激光混沌系统和光纤传输信道, 提出光纤混沌信号传输的非线性演化物理模型. 着重分析光纤自相位调制对激光混沌信号传输与演化的作用. 结果表明: 自相位调制不影响混沌信号脉冲的形状, 但能产生非线性相移使混沌信号频谱展宽; 自相位调制不影响混沌信号脉冲的功率分布和场强分布, 但能影响混沌信号脉冲的功率频谱分布, 影响混沌信号光场以及慢变场的变化. 提出混沌信号在光纤传输中的非线性演化频率啁啾和形式, 数值模拟了混沌信号在光纤传输过程中的相位、频谱、场以及场的慢变部分的相空间等演化形式和特点.

关键词: 混沌, 光纤, 传输, 演化

PACC: 0545, 4255P, 4260

1. 引言

近几年, 混沌在保密通信中的应用受到了人们的广泛重视^[1-6]. 先是混沌电路在无线保密通信中的应用, 然后是半导体激光器混沌在光学保密通信中的应用和发展^[7-10]. 由于带宽限制和高衰减, 使得混沌电路在高速无线保密通信中以及在远程有线保密通信中的应用受到了严重的限制. 当前人们研究的注意力已转移到全光激光混沌系统^[8-10]. 全光激光混沌系统有大的带宽和低的衰减, 且动力学行为复杂以及对参数具有极高的敏感特性, 非常适合高速远程保密通信. 目前各种各样的混沌系统被提出和证明^[4-10], 但很少应用在光纤保密通信中, 而且对激光混沌通信中的传输信道等问题的研究也很少见到, 还没有比较完善的混沌传输理论. 当前光纤传输已成为通信的主要手段, 还应用在电视节目传送、计算机互连网络中. 随着光纤通信的发展, 光纤通信的保密性能也受世人的关注. 另外, 随着光电技术的发展, 窃取光纤中的信号已成为可能. 由于激光混沌信号固有的宽带、类噪声和难以预测的特点, 所以能显著提高系统保密性能, 增加光电子侦察的难度. 我们曾提出了光纤混沌通信的设想^[11], 初步分析了光纤对混沌信号和同步的影响, 但其理论模型及其分析还要作进一步的深入研究. 所以进行混沌信号在光纤传输中的非线性演化及其变化规

律的研究对混沌同步及编码解码是非常重要的, 特别是进行光纤混沌传输理论以及混沌信号与传输媒介光纤相互作用的研究对丰富光波导理论和混沌理论也是有意义的.

目前, 由于色散位移光纤商用以及色散补偿技术成熟, 而光纤的非线性自相位调制 (SPM) 效应还很难消除, 所以本文着重进行 SPM 对混沌信号传输影响的研究. 由于在光纤非线性介质中, 光纤信道的折射率与入射光的强度有关, 这一现象通过光纤的 SPM 来实现, 它将导致光脉冲的频谱展宽, 而 SPM 效应能产生非线性相移, 并将严重影响激光信号. 因此, SPM 效应对激光混沌信号传输的影响显得特别重要.

本文以半导体分布反馈激光器^[10-15]激光混沌系统为例, 先通过耦合激光混沌系统和光纤传输信道, 提出光纤混沌信号非线性演化模型. 然后着重分析光纤 SPM 对激光混沌信号传输的影响, 分析 SPM 所产生的非线性相移和混沌信号在光纤传输中的非线性演化啁啾, 分析混沌信号光场以及慢变场的实部和虚部的演化特点等. 最后给出了数值模拟结果.

2. 模 型

外部光注入半导体激光器激光混沌系统由相同的主 (M)、副 (S) 半导体激光器 (LD)^[10-14] 所组成.

M-LD 激光 $E_m(t) \exp \{-j[\omega_m t + \phi_m]\}$ 注入驱动可使
S-LD 激光 $E(t) \exp \{-j[\omega_m t + \phi(t)]\}$ 进入混沌态。
S-LD 激光场的变化可由下列方程组^[10-15]来描述：

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dt} &= \frac{1}{2}(G - \gamma_p)E \\ &\quad + \frac{k}{\tau_L} E_m \cos(\phi_m - \phi), \\ \frac{d\phi}{dt} &= \frac{1}{2}\beta_c(G - \gamma_p) \\ &\quad + \frac{k}{\tau_L} \frac{E_m}{E} \sin(\phi_m - \phi) - \Delta\omega_m, \\ \frac{dN}{dt} &= \frac{I}{q} - \gamma_e N - G V_p E^2. \end{aligned} \tag{1}$$

这里, E 和 ϕ 分别是激光的振幅和相位; N 是载流子数; ω_m 是中心频率; 模式增益

$$G = \frac{(\Gamma v_g a/V)(N - N_{th})}{\sqrt{1 + E^2/E_s^2}},$$

式中 v_g 是激光腔内光子的群速度, a 是增益常数, $\Gamma = V/V_p$ 是限制因子, V 是激光腔体积, V_p 是激光模式体积, E_s 是饱和光子场强, $N_{th} = n_{th} V$ 是激光透明时的载流子数, n_{th} 是它的密度值; $\gamma_p = v_g(\alpha_m + \alpha_{int})$ 是光子损耗速率, 其中 α_m 是腔光子损耗, α_{int} 是内部光子损耗; $\Delta\omega_m$ 是注入频差; $\tau_L = 2n_g L/c$ 是光在激光腔长 L 内来回一周的时间, 其中 c 是真空中的光速, $n_g = c/v_g$ 是群速折射率; I 是驱动电流; q 是单位电荷; β_c 是光线宽增强因子; $\gamma_e = A_{nr} + B(N/V) + C(N/V)^2$ 是载流子非线性损耗速率, 其中 A_{nr} 是非辐射复合速率, B 是辐射复合因子, C 是俄歇复合因子; k 是光注入指数。

由于混沌信号具有准连续波变化的特点, 当激光混沌信号在光纤中传输时, 其场的慢变包络可由非线性薛定谔方程来描述^[16]

$$\frac{\partial E}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{j}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2}E = \gamma |E|^2 E, \tag{2}$$

式中 $E(z, t)$ 是激光场包络的慢变振幅, z 是传输距离, α 是光纤损耗常数, β_1 是包络群速度的倒数 ($\beta_1 = 1/v_g$), β_2 是光纤群速度色散 (GVD) 常数, γ 是光纤非线性 Kerr 效应常数。这里要说明的是方程 (1) 中的时间是激光器系统的工作时间, 而方程 (2) 中的时间是混沌信号在光纤中传输的时间。方程 (1) 和 (2) 构成了光纤混沌信号非线性演化物理模型。为了简化, 定义 $T = t - z/v_g$, 它是脉冲以群速度 v_g 移

动在参考系中的时间量度, 代入方程 (2) 进行坐标变换后得到

$$j \frac{\partial E}{\partial z} = -\frac{j}{2}\alpha E + \frac{1}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 E}{\partial T^2} - \gamma |E|^2 E. \tag{3}$$

引入对一个初始脉冲宽度 T_0 归一化的时间量 $\tau = T/T_0$, 并令

$$E(z, T) = \sqrt{P_0} \exp(-\alpha z/2) U(z, \tau), \tag{4}$$

式中 U 是归一化振幅, P_0 为入射脉冲的峰值功率。入射光脉冲在形式上可写为

$$E(0, T) = \sqrt{P_0} \exp U(0, \tau). \tag{5}$$

现把 (4) 式代入 (3) 式, 方程 (3) 就变为^[16]

$$j \frac{\partial U}{\partial z} = \frac{1}{2L_D} \text{sgn}(\beta_2) \frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2} - \frac{\exp(-\alpha z)}{L_{NL}} |U|^2 U, \tag{6}$$

式中 $\text{sgn}(\beta_2) = \pm 1$, 根据 GVD 效应参量 β_2 的符号决定。且

$$\begin{aligned} L_D &= \frac{T_0^2}{|\beta_2|}, \\ L_{NL} &= \frac{1}{\gamma P_0}. \end{aligned} \tag{7}$$

这样由混沌系统 (1) 和光纤传输信道 (6) 式就可以得到光纤混沌信号非线性演化归一化模型。本文数值分析时, 激光器参量取表 1 所列的数值, 使 E 对 E_s , N 对 N_{th} 归一化, 取 t 的单位为 ns, 并进一步取激光器稳定态时激光振幅的平均值 $E_0 = 0.126 E_s$ 以及 $E_m = E_0$, $\phi_m = 0$, $k = 0.033$ 和在 2—30 ns 平均取 3300 个数值。图 1 则是由方程 (1) 得到的激光器激光场混沌信号变化形式。

表 1 激光器参数

参 数	取 值	参 数	取 值
腔长 $L/\mu\text{m}$	350	非辐射复合速率 A_{nr}/s^{-1}	1.0×10^8
腔宽 $w/\mu\text{m}$	2	辐射复合因子 $B/\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	1.2×10^{-10}
腔厚 $d/\mu\text{m}$	0.15	俄歇复合因子 $C/\text{cm}^6 \cdot \text{s}^{-1}$	3.5×10^{-29}
限制因子 Γ	0.29	饱和光子场强 $E_s/\text{m}^{-3/2}$	1.6619×10^{11}
群速折射率 n_g	3.8	增益常数 a/cm^2	2.3×10^{-16}
腔光子损耗 α_m/cm^{-1}	29	光线宽增强因子 β_c	6
腔内光子损耗 $\alpha_{int}/\text{cm}^{-1}$	20	频差 $\Delta\omega_m/\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	$2\pi \times 10^9$
载流子密度门限值 n_{th}/cm^{-3}	1.2×10^{18}	驱动电流 I/mA	25

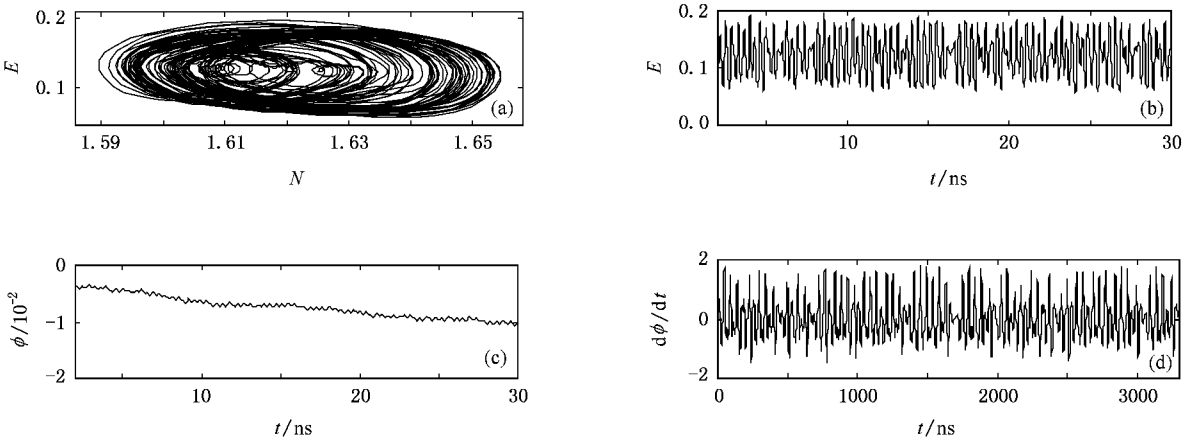


图 1 激光混沌信号 (a)混沌吸引子,(b)场慢变包络时变,(c)相位 ϕ 时变,(d)相位 ϕ 对时间导数的时变

3. 包络和相位的演化

3.1. 包络和相位的演化

这里通过令非线性薛定谔方程中的 $\beta_2 = 0$ 的极限条件下着重考虑光纤的 SPM 效应对混沌信号的影响. 在数值模拟时,所选用波长 $1.31\text{ }\mu\text{m}$ 时色散为零的普通单模光纤(典型值是 $\alpha = 0.44\text{ dB/km}$, $\beta_2 = 0$, $\gamma = 2 \times 10^{-3}\text{ W}^{-1}\text{ m}^{-1}$). 这样方程(3)或(6)中的 $\beta_2 = 0$,则方程(6)就变为

$$\frac{\partial U}{\partial z} = \frac{j}{L_{\text{NL}}} \exp(-\alpha z) |U|^2 U. \quad (8)$$

其解是

$$U(z, T) = U(0, T) \exp[j\phi_{\text{NL}}(z, T)]. \quad (9)$$

这里 $U(0, T)$ 是 $z = 0$ 处的场振幅,非线性相移是

$$\phi_{\text{NL}}(z, T) = |U(0, T)|^2 \frac{z_{\text{eff}}}{L_{\text{NL}}}, \quad (10)$$

式中

$$z_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha z)]/\alpha$$

是有效距离. 由(9)式可知,混沌信号脉冲慢变包络在光纤中的演化形态是

$$|U(z, T)|^2 = |U(0, T)|^2, \quad (11)$$

即由 $|U(0, T)|^2$ 决定的脉冲形状保持不变. 这说明光纤的 SPM 不改变混沌信号慢变包络形态,但 SPM 能产生非线性相移,使得相移随光强的增大而增大,但这种变化完全是由入射光信号所决定,其本质上仍由激光器混沌特性所决定. 可见光纤的非线性不影响信号的强度,混沌信号的时变特性仍然存在并被保持,其损耗是影响信号强度的唯一因素. 而当

$z \rightarrow \infty$ 时,(10)式可以写为

$$\begin{aligned} \phi_{\text{NL}}(z, T) &= \frac{|U(0, T)|^2}{\alpha L_{\text{NL}}} \\ &= \frac{\gamma}{\alpha} P_0 |U(0, T)|^2 \\ &= \frac{\gamma}{\alpha} |E(0, T)|^2. \end{aligned} \quad (12)$$

非线性相移的最大值 ϕ_{max} 出现在脉冲的中心($T = 0$)处,即 $|U(0, 0)| = 1$ 处,因而

$$\phi_{\text{max}} = \frac{z_{\text{eff}}}{L_{\text{NL}}} = \gamma P_0 z_{\text{eff}}. \quad (13)$$

当 $z \rightarrow \infty$ 时,(13)式可表示为

$$\phi_{\text{max}} = \frac{1}{\alpha L_{\text{NL}}} = \frac{\gamma}{\alpha} P_0. \quad (14)$$

如把光纤当作理想无损耗介质来处理,(12)式也可表示为

$$\phi_{\text{NL}}(z, T) = |U(0, T)|^2 \frac{z}{L_{\text{NL}}}. \quad (15)$$

当 $z \rightarrow \infty$ 时,(13)式可以写为

$$\phi_{\text{max}} = \gamma P_0 z. \quad (16)$$

为了进一步分析混沌信号相位演化的特点,令入射激光初始相位为

$$\Phi(t) = \omega_m t + \phi(t), \quad (17)$$

传输到光纤 z 处的光场相位为

$$\Phi(z, t) = \omega_m t + \phi(t) + \phi_{\text{NL}}. \quad (18)$$

所以混沌信号相位演化形式表示为

$$\Phi(z, t) = \omega_m t + \phi(t) + |U(0, T)|^2 \frac{z_{\text{eff}}}{L_{\text{NL}}}, \quad (19)$$

式中

$$T = t - z/v_g.$$

3.2. 频率啁啾

SPM 致频谱展宽 $\phi_{NL}(z, T)$ 与时间和路程有关, 它瞬时变化的相位说明光脉冲的中心频率与两侧有不同的瞬时光频率, 其差值由 (15) 式得到,

$$\begin{aligned}\delta\omega(T) &= -\frac{\partial\phi_{NL}}{\partial T} \\ &= \frac{\partial |U(0, T)|^2}{\partial T} \frac{z_{eff}}{L_{NL}}.\end{aligned}\quad (20)$$

$\delta\omega(T)$ 的时间依赖关系是频率啁啾, 它是由 SPM 引起的, 随着传输距离的增加而增加, 这就说明当脉冲沿着光纤传输时, 新的频率分量会不断地出现, 即由 SPM 产生的频率分量展宽了频谱, 最终使脉冲超过 $z=0$ 处的初始宽度. $\delta\omega(T)$ 的最大值可以令 $\delta\omega(T)$ 的时间导数为零得到.

定义混沌频率啁啾

$$\delta\phi = -\frac{d\phi}{dt}.\quad (21)$$

频率啁啾的演化形式就可以是

$$\delta\Omega(z, t) = \delta\phi(t) + \delta\phi_{NL}.\quad (22)$$

由方程 (1) 可得

$$\begin{aligned}\delta\phi(t) &= -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{1}{2}\beta_c(G - \gamma_p) \\ &\quad - \frac{k}{\tau_L} \frac{E_m}{E} \sin(\phi_m - \phi) + \Delta\omega_m.\end{aligned}\quad (23)$$

频率啁啾演化特点是

$$\begin{aligned}\delta\Omega(z, t) &= -\frac{1}{2}\beta_c(G - \gamma_p) \\ &\quad - \frac{k}{\tau_L} \frac{E_m}{E} \sin(\phi_m - \phi) \\ &\quad + \Delta\omega_m - \frac{\partial |U(0, T)|^2}{\partial T} \frac{z_{eff}}{L_{NL}}.\end{aligned}\quad (24)$$

3.3. 频谱形状演化

在光纤中传输的混沌信号频谱的真实形状演化可以通过傅里叶变换得到 (在光纤 z 处还应包含常数项 $\exp(j\beta_0 z)$, 其中 β_0 是波数, 由于该常数项不影响场变, 故可忽略)

$$\begin{aligned}S(z, \omega) &= |\tilde{E}(z, \omega)|^2 \\ &= \left| \int_{-\infty}^{\infty} E(T) \exp(-\alpha z/2) \exp\{[j\Phi(z, T) + \omega T]\} dT \right|^2 \\ &= \left| \int_{-\infty}^{\infty} E(T) \exp[-\alpha z/2 - j\phi - j\phi_{NL}] \right.\end{aligned}$$

$$\left. + j(\omega - \omega_m) T] dT \right|^2.\quad (25)$$

而入射混沌信号的频谱形状是

$$\begin{aligned}S(\omega)_0 &= |E(\omega)|^2 \\ &= \left| \int_{-\infty}^{\infty} E(T) \exp[-j\phi + j(\omega - \omega_m) T] dT \right|^2.\end{aligned}\quad (26)$$

定义均方根谱宽

$$\begin{aligned}(\Delta\omega)_{rms} &= \langle (\omega - \omega_m)^2 \rangle \\ &\quad - \langle (\omega - \omega_m) \rangle^2,\end{aligned}\quad (27)$$

其中角括号表示 SPM 所致展宽频谱范围内的平均值, 即

$$\langle (\omega - \omega_m) \rangle = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (\omega - \omega_m) S(z, \omega) d\omega}{\int_{-\infty}^{\infty} S(z, \omega) d\omega},\quad (28)$$

$$\langle (\omega - \omega_m)^2 \rangle = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (\omega - \omega_m)^2 S(z, \omega) d\omega}{\int_{-\infty}^{\infty} S(z, \omega) d\omega}.\quad (29)$$

定义频谱展宽因子

$$\bar{\omega} = \frac{(\Delta\omega)_{rms}}{(\Delta\omega)_0},\quad (30)$$

式中 $(\Delta\omega)_0$ 是初始均方根谱宽.

4. 场的演化

4.1. 慢变场以及场的演化

由混沌信号慢变包络的演化形状 (11) 式可知, 由 $|U(0, T)|^2$ 决定的脉冲仍能保持原来形状, 光纤的 SPM 不改变混沌信号的慢变包络形状, 即混沌信号的慢变包络形状在传输过程中的演化是不变的. 但由于光纤 SPM 产生的非线性相移要影响场的相位变化, 即影响到场分量的变化, 所以这里要研究混沌激光慢变场分量的演化. 令入射激光场为

$$E(t) \exp[-j\Phi(t)] = E_R(t) + jE_I(t),\quad (31)$$

式中的实部和虚部的形式分别为

$$\begin{aligned}E_R(t) &= E(t) \cos(\Phi) \\ &= E(t) \cos(\omega_m t + \phi),\end{aligned}\quad (32)$$

$$\begin{aligned} E_1(t) &= E(t) \sin(\Phi) \\ &= E(t) \sin(\omega_m t + \phi). \end{aligned} \tag{33}$$

光场在光纤中的演化形式是

$$\begin{aligned} E(t) \exp[-\alpha z/2 - j\Phi(z, t)] \\ = E_R(z, t) + jE_1(z, t), \end{aligned} \tag{34}$$

其中实部和虚部分别是

$$E_R(z, t) = E(t) \exp(-\alpha z/2) \cos(\omega_m t + \phi + \phi_{NL}), \tag{35}$$

$$E_1(z, t) = E(t) \exp(-\alpha z/2) \sin(\omega_m t + \phi + \phi_{NL}). \tag{36}$$

显然,非线性相移叠加在混沌信号的相位上,影响混沌场分量的变化,场的实部和虚部要受到 SPM 所产生的非线性相移的影响. 设入射光场在 $z = 0$ 处场的实部慢变部分和虚部慢变部分可分别写为

$$E_x(t) = E(t) \cos(\phi), \tag{37}$$

$$E_y(t) = E(t) \sin(\phi). \tag{38}$$

当混沌光信号在光纤中传输时,在 z 处光场的实部慢变部分和虚部慢变部分形式就可分别写为

$$E_x(z, t) = E(t) \exp(-\alpha z/2) \cos(\phi + \phi_{NL}), \tag{39}$$

$$E_y(z, t) = E(t) \exp(-\alpha z/2) \sin(\phi + \phi_{NL}). \tag{40}$$

显然,场的实部慢变部分和虚部慢变部分都受到

SPM 的影响.

4.2. 场强的演化

为了分析场强的变化特点,先看入射光场强

$$\begin{aligned} I(0, T) &= |E(0, T)|^2 = P_0 |U(0, T)|^2 \\ &= |E(t)|^2, \end{aligned} \tag{41}$$

故在光纤 z 处的场强为

$$\begin{aligned} I(z, T) &= |E(z, T)|^2 \\ &= P_0 \exp(-\alpha z) |U(z, T)|^2 \\ &= I_0 \exp(-\alpha z). \end{aligned} \tag{42}$$

由于光纤的损耗,使光的强度随光纤传输长度的增加而减少,虽然光纤 SPM 产生的非线性相移使相位、光场及其慢变场的分量都随光纤传输的距离而发生变化,但并不影响混沌光的强度分布,即光场强度的混沌时变特性仍能保持,这一特点在光纤混沌保密通信中是非常重要的. 这样,光纤混沌通信从光的强度变化上来实现混沌同步及解码是有可能的.

5. 数值模拟

下面主要对混沌场的相位、频谱、场以及场慢变部分演化做出数值模拟. 图 2 是由(1),(2),(4)和(10)式得到的相位($\phi + \phi_{NL}$)随光纤传输距离演化的

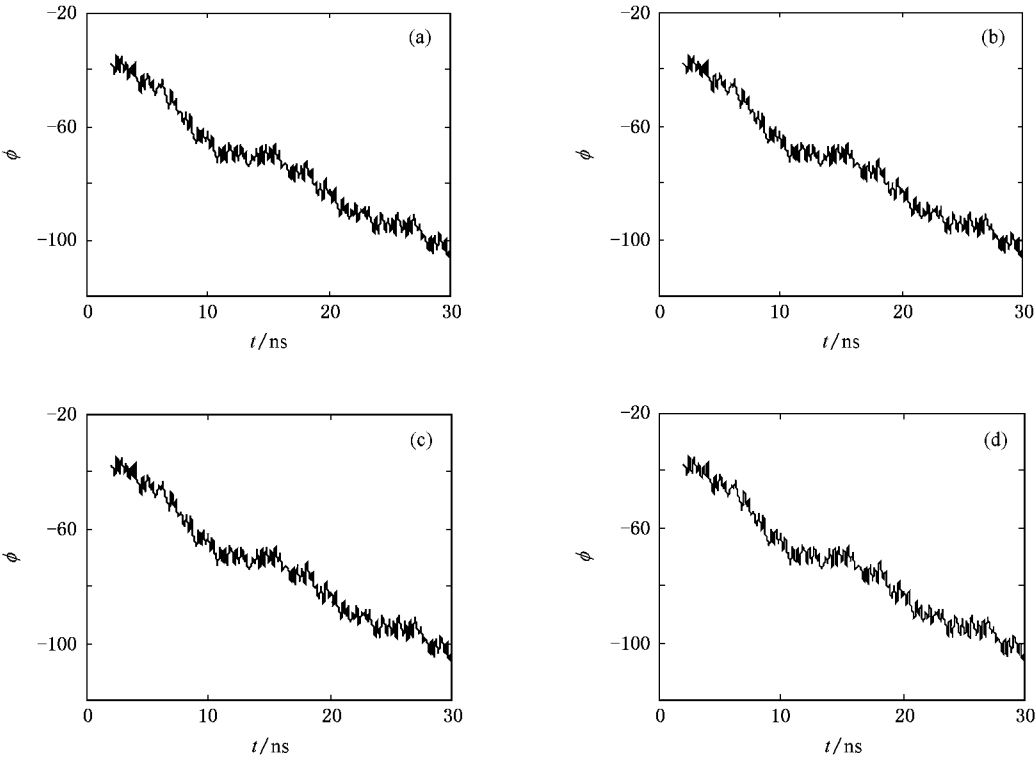


图 2 入射光功率为 2.7 mW 时相位的演化 (a) $z = 0$ km, (b) $z = 50$ km, (c) $z = 100$ km, (d) $z = 150$ km

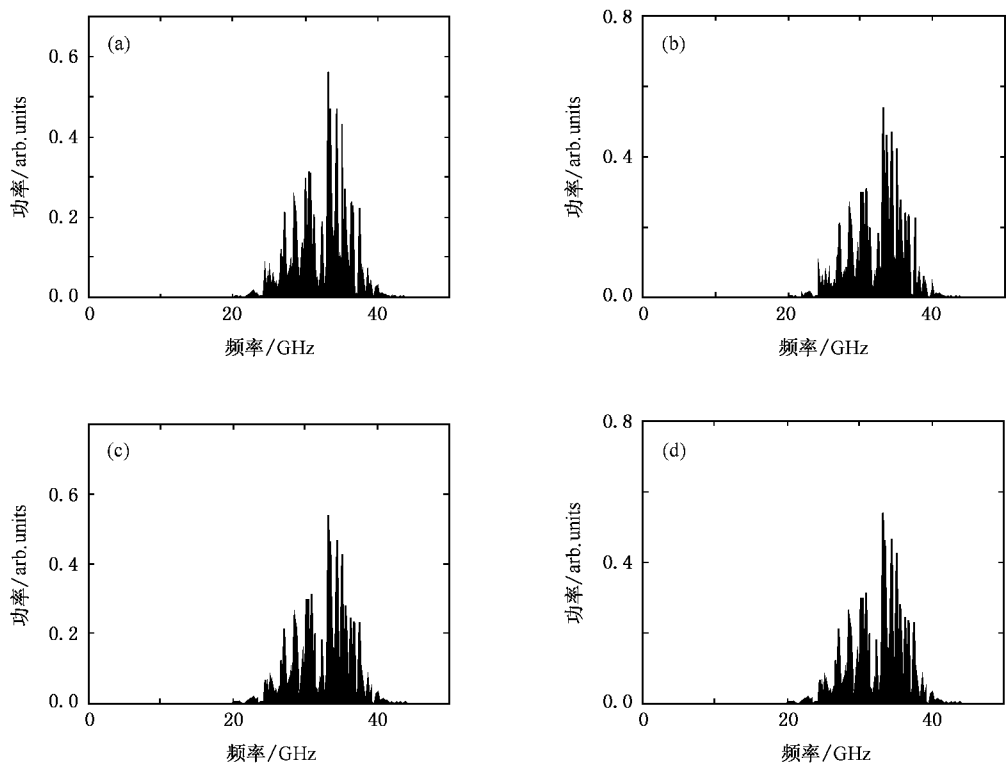


图 3 入射光功率为 2.7 mW 时功率频谱的演化 (a) $z = 0$ km, (b) $z = 50$ km, (c) $z = 100$ km, (d) $z = 150$ km

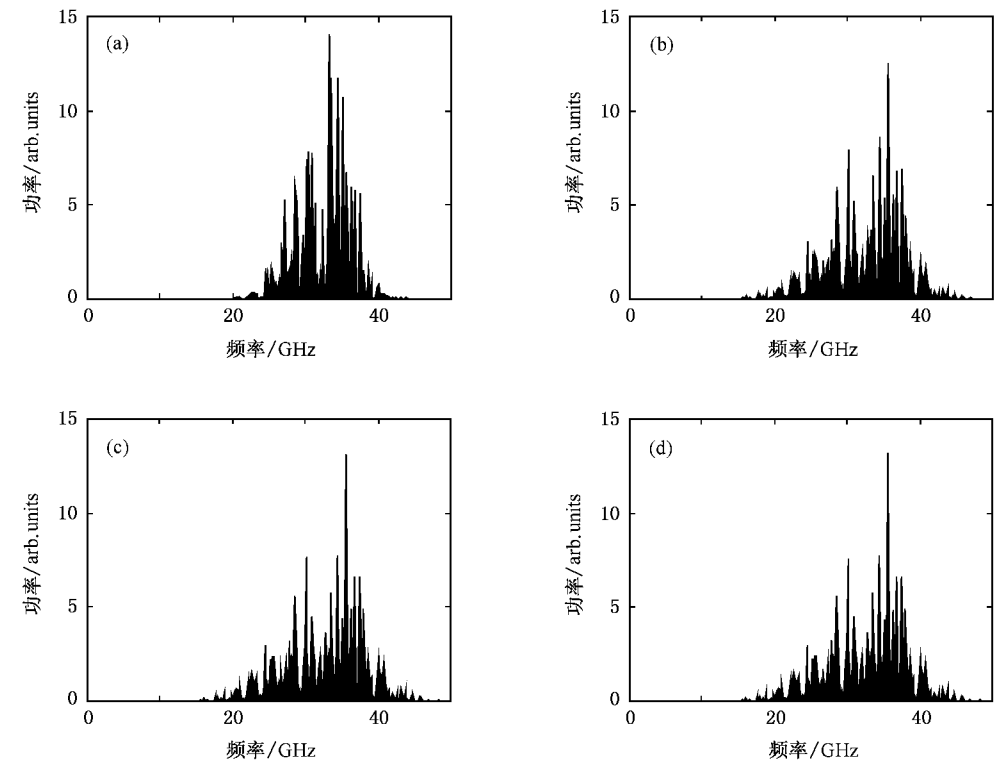


图 4 入射光功率为 67.5 mW 时功率频谱的演化 (a) $z = 0$ km, (b) $z = 20$ km, (c) $z = 50$ km, (d) $z = 100$ km

数值结果. 由于入射功率是毫瓦级的, 所以相位 ($\phi + \phi_{NL}$) 变化并不明显, 但仍然可从图 2 看到这种

变化,而这种变化从频谱演化图(图 3)的精细结构上也可以发现. 图 3—图 5 表明(由(25)和(26)式得

到),随着入射功率的增加,场的频谱展宽随着光纤传输距离的增加更加明显了.

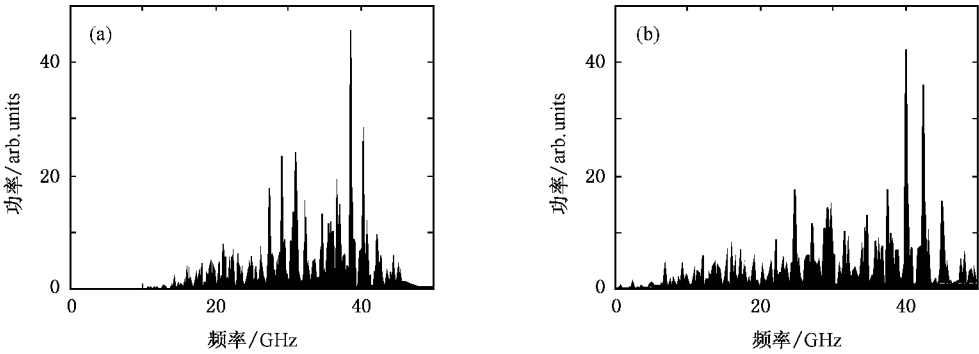


图 5 入射光功率为 270 mW 时功率频谱的演化 (a) $z = 15$ km, (b) $z = 50$ km

图 6 是理想无损耗光纤的数值模拟结果(由(15)和(25)式得到),随着光纤传输距离的增加,频谱展宽越来越明显.

图 7—图 13 说明了混沌激光场及包络在光纤传输过程中的演化特点,具体研究光场及慢变部分随光纤传输距离变化的时变特点,分析混沌吸引子在光纤传输过程中的演化特点. 混沌吸引子能够描述非线性系统在相空间运动轨迹及变化特点,能够

反映出混沌运动的轨迹永不重复性、遍历性和有限空间的稠密性等. 激光混沌吸引子通常用光强(或振幅)和载流子数构成的相空间来描述^[11—13],这里仅分别用场及慢变部分的实部和虚部来构成运动的相空间,在该相空间中去描述激光混沌吸引子在光纤传输过程中的演化特点.

图 7 和图 8 是光场随时间的变化. 从图 7 还看不到有明显的变化,但从图 8 可以看出,随着入射功

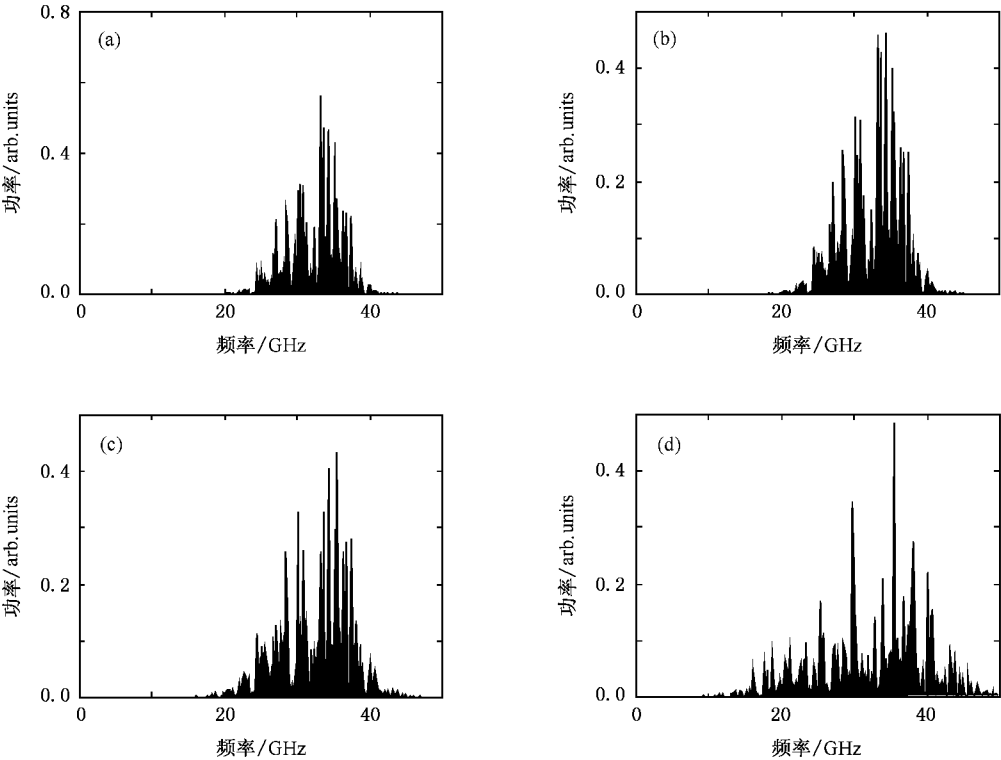


图 6 理想无损耗光纤传输信道混沌功率频谱的演化 入射光功率为 2.7 mW. (a) $z = 0$ km, (b) $z = 50$ km, (c) $z = 150$ km, (d) $z = 500$ km

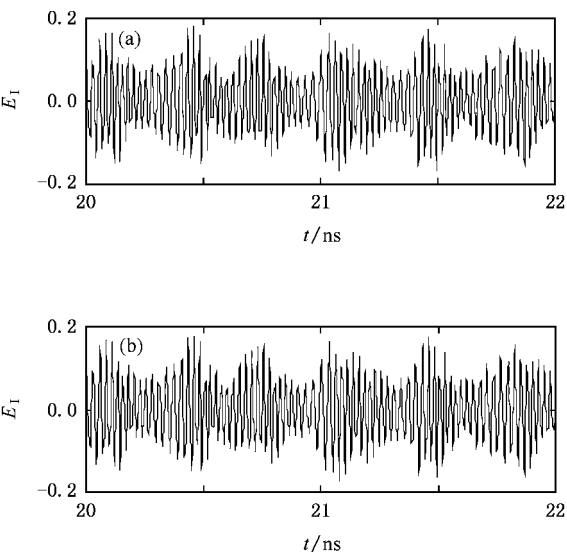


图 7 入射光功率为 2.7 mW 时光场虚部的演化 (a) $z = 0$ km, (b) $z = 50$ km

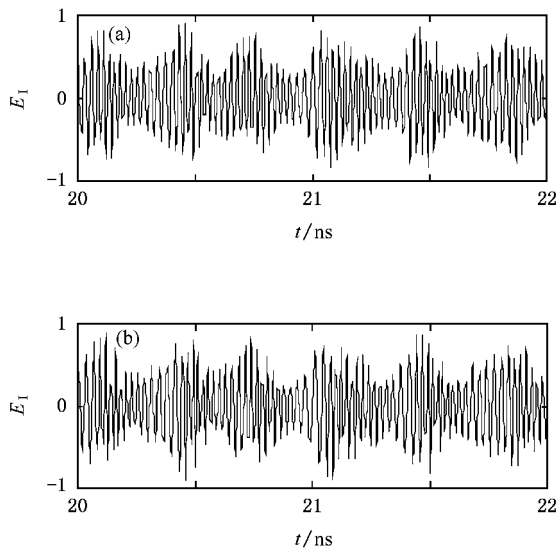


图 8 入射光功率为 67.5 mW 时光场虚部的演化 (a) $z = 0$ km, (b) $z = 50$ km

率的增加,这种变化明显了. 而在相空间上也可以发现这一特点,如图 9 所示,图 9(b)相对图 9(a)顺时针方向旋转了一个角度.

图 10 和图 11 是混沌光场慢变部分虚部的演化. 图 10 中的混沌光场慢变部分虚部随光纤传输演化并不明显,但随着激光功率的增加,图 11 中的光场慢变部分虚部有了明显的改变. 图 12 是光场慢变部分在相空间随传输距离的演化,其涡旋结构并

没有明显的变化,而图 13 则显示,随着激光功率的增加,其涡旋有了明显的变化.

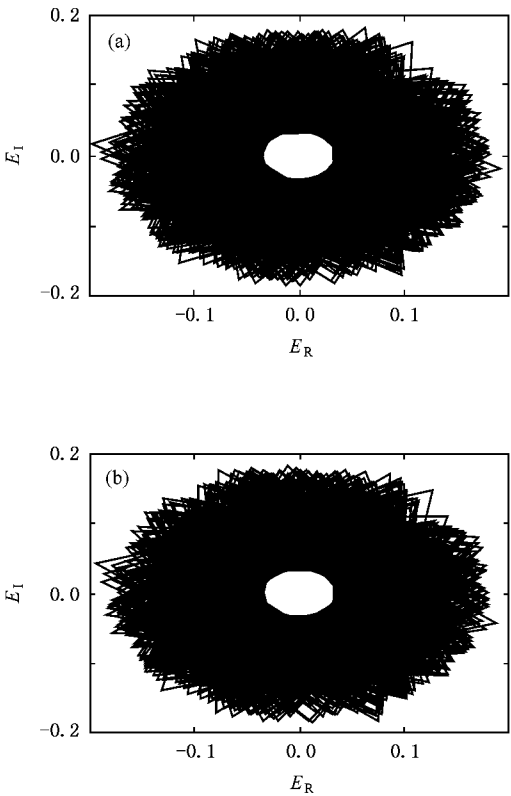


图 9 入射光功率为 2.7 mW 时光场相空间的演化 (a) $z = 0$ km, (b) $z = 50$ km

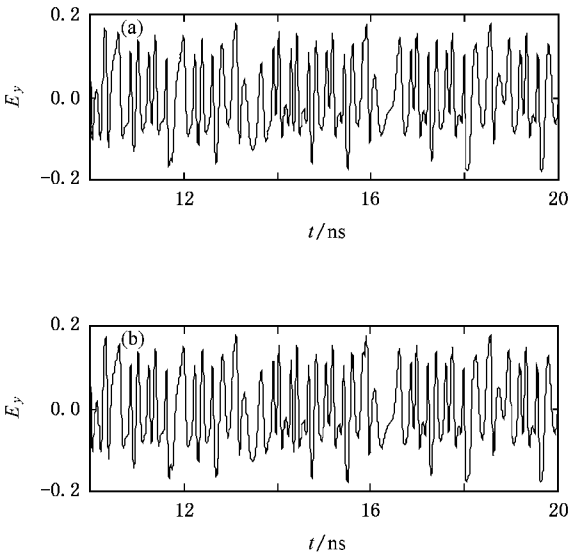


图 10 入射光功率为 2.7 mW 时光场慢变部分虚部的演化 (a) $z = 0$ km, (b) $z = 50$ km

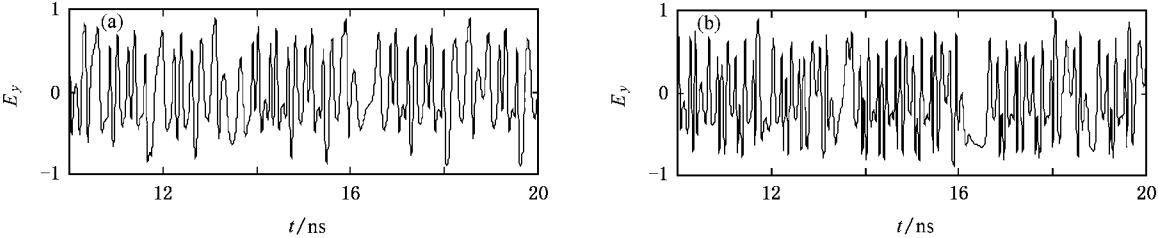


图 11 入射光功率为 67.5 mW 时光场慢变部分虚部的演化 (a) $z = 0$ km, (b) $z = 50$ km

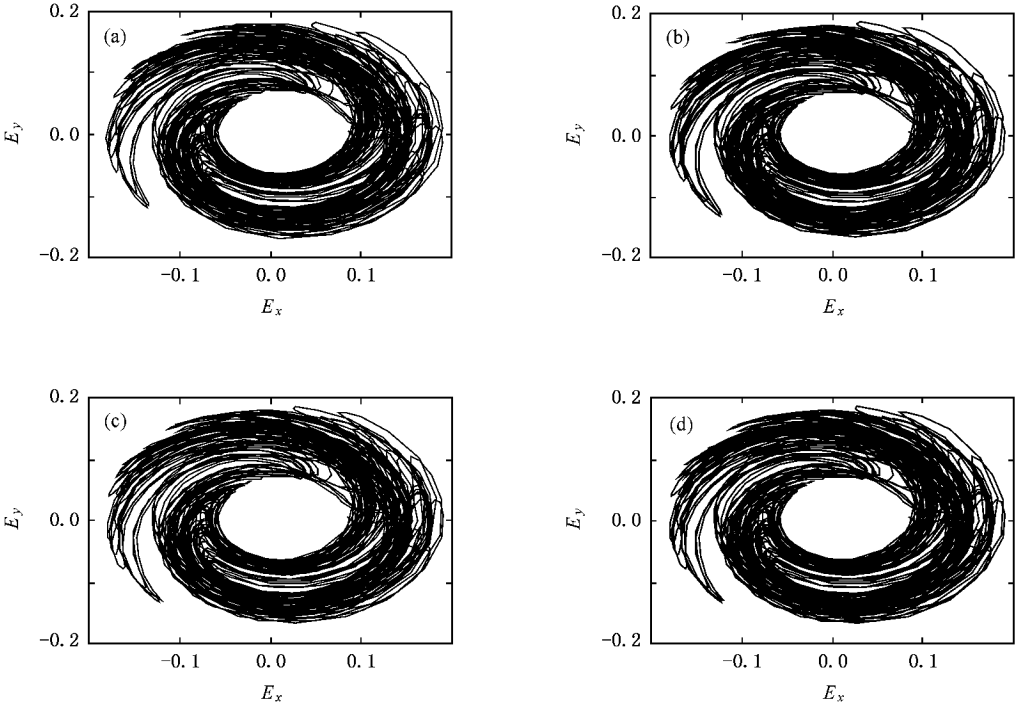


图 12 入射光功率为 2.7 mW 时光场慢变部分的相空间演化 (a) $z = 0$ km, (b) $z = 20$ km, (c) $z = 50$ km, (d) $z = 250$ km

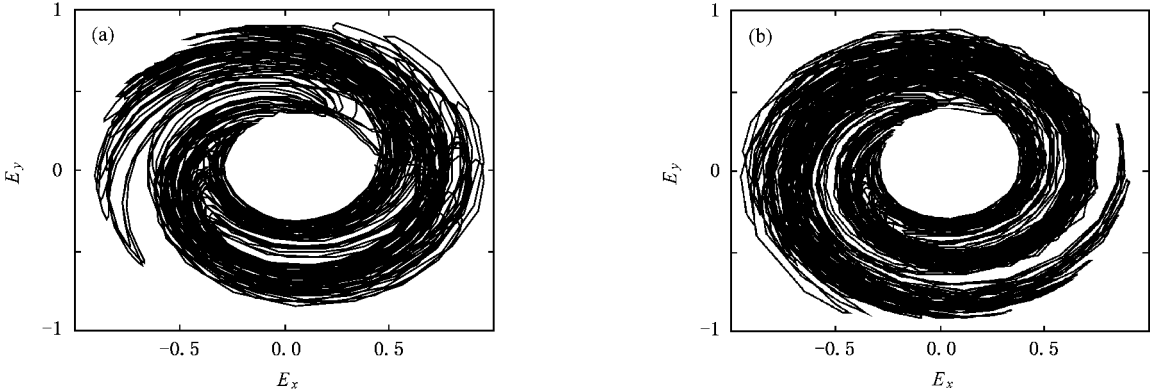


图 13 入射光功率为 67.5 mW 时光场慢变部分的相空间演化 (a) $z = 0$ km, (b) $z = 50$ km



6. 结 论

本文研究了光纤混沌传输的物理机制,提出光纤混沌信号的非线性演化模型,着重分析了光纤 SPM 对激光混沌信号的影响,数值模拟了混沌光场的相位、频谱、光场以及光场慢变部分分量的演化.

混沌信号脉冲慢变包络在演化过程能保持原来的形状,但 SPM 所产生的非线性相移使混沌信号频谱展宽了.SPM 不影响混沌信号脉冲的功率分布和场强分布,但影响混沌信号光场及其慢变场分量的变化.还提出了混沌信号在光纤传输中的非线性演化啁啾和公式等. 这些对混沌的应用是非常重要的.

[1] Kolumban G, Kennedy M P, Chua L O 1997 *IEEE Trans. Circuits Syst.* **44** 927

[2] Luo L G, Chu P L, Liu H F 2000 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **12** 269

[3] Atsushi U, Yun L, Perter D 2003 *IEEE J. Quantum Electron.* **39** 963

[4] Ma W Q, Yang C H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1070 (in Chinese) [马文麒、杨承辉 2005 物理学报 **54** 1070]

[5] Li S H, Cai H X 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1687 (in Chinese) [李世华、蔡海兴 2004 物理学报 **53** 1687]

[6] Chen H F, Lin J M 2000 *IEEE J. Quantum Electron.* **36** 27

[7] Li Y, Yang B J, Du L Z *et al* 2003 *Chin. Phys.* **12** 714

[8] Colet P, Roy R 1994 *Opt. Lett.* **19** 2056

[9] Claudio R M 2005 *IEEE Leos Newsletter* **2** 12

[10] Wu L, Zhu S Q 2003 *Chin. Phys.* **12** 300

[11] Yan S L, Chi Z Y, Chen W J 2004 *Sci. China F* **47** 332

[12] Yan S L 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2000 (in Chinese) [颜森林 2005 物理学报 **54** 2000]

[13] Dimitris K, Apostolos A, Syviridis D J 2003 *Lightwave Technol.* **21** 750

[14] Troger J, Nicati P A 1999 *IEEE Quantum Electron.* **35** 1713

[15] Chembo K Y, Per C, Laurent L *et al* 2005 *IEEE Quantum Electron.* **41** 156

[16] Agrawal G P 1989 *Nonlinear Fiber Optics* (San Diego : Academic)

Nonlinear evolution of chaotic signal transmission in optical fiber

Yan Sen-Lin

(*Department of Physics, Nanjing Xiaozhuang College, Nanjing 210017, China*)

(Received 24 September 2005 ; revised manuscript received 26 October 2006)

Abstract

Theory of chaotic signal transmission in optical fiber and physical mechanism of chaotic signal acting on optical fiber transmission medium are theoretically studied. A physical model of nonlinear evolution of chaotic signal propagation in optical fiber is presented by coupling chaotic laser system with optical fiber channel. Action of self-phase modulation of optical fiber on propagation and evolution of chaotic signal is analyzed in detail. Self-phase modulation of fiber does not affect the pulse shape of chaotic signal, however, its product of nonlinear phase shift can widen the chaotic signal spectrum. Self-phase modulation does not affect the power distribution and field intensity distribution of chaotic pulse signal. However, it can affect the power spectrum distribution, the transformation of optical field of chaotic signal and field's slow-varying part. A frequency chirped model of nonlinear evolution of chaotic signal in fiber is presented. The evolution and characteristic of the phase, spectrum, field and field's slow-varying part in fiber are numerically simulated.

Keywords : chaos, optical fiber, transmission, evolution

PACC : 0545, 4255P, 4260