

# 光纤混沌相位编码保密通信系统理论研究

颜森林<sup>†</sup>

(南京晓庄学院物理系, 南京 210017)

(2004 年 8 月 24 日收到, 2004 年 9 月 24 日收到修改稿)

通过耦合激光混沌相位控制同步系统和光纤信道, 提出外部光注入半导体激光器激光混沌相位控制光纤同步以及混沌相位相移键控外调制光纤保密通信系统理论模型, 数值实现了在相位控制器控制下的远程光纤混沌同步. 理论分析了光纤自相位调制对混沌信号以及对同步的影响, 导出了光纤混沌最大传输距离公式. 通过连续键控调制相位控制器实现了光纤激光混沌相位相移键控编码调制发射, 设置接收系统相位控制器控制激光相位相移实现了光纤激光混沌同步解调. 数值模拟了具有比特率 50Mbit/s 远程光纤混沌数字编码通信系统的应用, 详细地进行了在远距离光纤传输中的系统参数失配以及系统抗噪声能力的数值分析.

关键词: 混沌, 同步, 光纤混沌通信, 半导体激光器, 相位

PACC: 0545, 4255P, 4260

## 1. 引 言

十多年来, 混沌系统在保密通信中的应用取得了重要进展, 各种混沌系统被提出并被证明<sup>[1-4]</sup>. 全光激光混沌系统有大的带宽和低的衰减, 且动力学系统比较复杂以及系统对参数具有极高的敏感性, 具有更高的保密性能, 非常适合高速远程保密通信<sup>[5-11]</sup>. 文献 [5-11] 分别提出了半导体激光器激光混沌开环以及闭环同步通信系统、反馈同步通信系统、延时反馈同步通信系统、电光延时反馈同步通信系统、掺铒光纤激光器混沌通信系统、多模激光混沌同步通信系统以及激光混沌多信道通信系统等. 其中解码接收系统必须是发射系统的复制, 要求和发射系统有相同的参数条件且要求和发射系统同步. 一般来说, 通过两个同步波的相减, 调制信息即可解调分离. 常用的几种方法有混沌隐藏、混沌调制和混沌键控 (CSK) 等<sup>[5-11]</sup>. 半导体激光器 CSK 调制主要是键控激光器的驱动电流等激光器系统的内部参数, 使系统混沌态突变 (或引起混沌吸引子突变), 即可进行激光混沌数字编码<sup>[5-11]</sup>. Heril 和 Mulet 等提出延时反馈半导体激光器混沌相位 ON/OFF 键控通信系统<sup>[7]</sup>, 通过键控调制激光器外部延时反馈腔 (激光器和外部延时反馈腔共同构成了混沌系统) 的距

离调制控制发射系统激光器输出激光和接收系统激光相位差的同步和不同步进行解码. 由于上面所提到的 CSK 系统大部分都是内调制, 激光器使用寿命和工作稳定特性就会下降.

当前, 光纤传输已成为光通信的主要手段, 而且还应用在电视节目传送、计算机互连网络中. 当然, 随着光纤通信技术的发展, 光纤通信的保密性能也格外引人关注. 随着光电子技术的发展, 窃取光纤中的信号已成为可能. 为了满足光纤通信保密性能要求, 研制出高度保密性能的光纤保密通信系统是非常重要的. 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, 所以非常适合于远程光纤保密通信中的应用.

由于在混沌保密通信中要求混沌同步<sup>[1-4]</sup>, 对于激光混沌系统的同步, 也就是要求发射和接收系统中的激光振幅、相位实现同步<sup>[5-11]</sup>. 为了提高通信系统的保密性能, 必须进行混沌编码方法研究, 为了提高系统的应用能力, 必须进行系统抗噪声能力和参数失配等方面的研究. 为了进行远程光纤保密通信, 还需进行光纤信道对混沌信号以及对同步影响的研究.

本文提出有外部相位控制器控制下的光注入半导体激光二极管 (LD)<sup>[12]</sup> 光纤混沌同步系统, 提出了

<sup>†</sup>E-mail: senlinyan@163.com

外部直接调制(E)的 ON/ON 混沌(C)相位(P)相移(S)键控(K) ECPSK)光纤混沌调制解调系统;给出光纤混沌同步模型,数值分析在相位控制器控制下的光纤混沌系统的同步以及噪声和参数失配等影响,给出该系统 ON/ON ECPSK 调制解调在远程光纤保密通信中应用的数值模拟。

## 2. 模型

### 2.1. 模型

基于反馈同步思想构造的有相位控制器控制的半导体激光器混沌同步系统模块组合如图 1 所示,其中发射系统和接收系统的混沌光源都是由相同的主(M),副(S)LD 所组成,研究表明,M-LD 的激光  $E_m \exp[-j(\omega_m t + \phi_m)]$  注入可以使 S-LD 激光趋向混沌态<sup>[7,8,12]</sup>。发射系统外调制相位相移控制子系统主要是相位控制器,相位控制器控制通过它的激光光场相位相移,实时调制通过它的激光光场相位相移,进一步实现对激光混沌相位进行连续调制控制;接收系统的反馈回路和同步相位控制器共同构成控制同步子系统。对于发射系统,S-LD 输出的激光  $E_s(t) \exp\{-j[\omega_s t + \phi_s(t)]\}$  经过相位控制器调制后就有了  $\Omega_e(t)$  相移,其调制发射激光光场形式则变为  $E_e(t) \exp\{-j[\omega_e t + \phi_e(t) + \Omega_e(t)]\}$  (图 1 中用  $E_{tp}$  简单示意)。接收系统接收到发射信号经过接收系统相位控制器后再注入到接收系统 S-LD 中,让接收和反馈系数均取为  $f$ 。为了让接收系统和发射系统同步,设置接收系统相位控制器相移为  $2M\pi - \Omega_r(t)$  其中  $M = 1, 2, 3, \dots$ 。为了书写简便,可令  $\Theta(t) = \Omega_e(t) - \Omega_r(t)$ 。这样发射和接收系统 S-LD 激光可由下面方程组来描述<sup>[7-12]</sup>:

$$\begin{aligned} \frac{dE_{t,r}}{dt} &= \frac{1}{2}(G_{t,r} - \gamma_p)E_{t,r} + \frac{k}{\tau_L} E_m \cos(\phi_m - \phi_{t,r}) \\ &\quad + n_r \frac{f}{\tau_L} [E \cos(\phi - \phi_r + \Theta) - E_r], \\ \frac{d\phi_{t,r}}{dt} &= \frac{1}{2}\beta_c(G_{t,r} - \gamma_p) \frac{k}{\tau_L} \frac{E_m}{E_{t,r}} \sin(\phi_m - \phi_{t,r}) \\ &\quad - \Delta\omega_m + n_r \frac{f}{\tau_L} \frac{E}{E_r} \sin(\phi - \phi_r + \Theta), \\ \frac{dN_{t,r}}{dt} &= \frac{I}{q} - \gamma_{et,r} N_{t,r} - G_{t,r} V_p E_{t,r}^2, \end{aligned} \quad (1)$$

其中脚标“t”和“r”分别表示发射和接收系统,对发射系统  $n_r = 0$ ,对接收系统  $n_r = 1$ ,  $E$  和  $\phi$  是接收系

统接收到的发射系统激光的振幅和相位,其中还包括光纤信道的影响; $N$  是载流子数;模式增益  $G = (\Gamma v_g a / V)(N - N_{th}) \sqrt{1 + E^2/E_s^2}$ ,  $v_g$  是激光腔内光子的群速度,  $a$  是增益常数,  $\Gamma = V/V_p$  是压缩和限制因子,  $V$  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,  $\alpha_m$  是腔光子损耗,  $\alpha_{int}$  是内部光子损耗;  $\Delta\omega_m = \omega_m - \omega_{th}$  是外部注入光频率和激光光场频率的频率差;  $\tau_L = 2n_g L/c$  是光在激光腔长  $L$  内来回一周的时间,  $c$  是真空中光速,  $n_g = c/v_g$  是群速折射率;  $I$  是驱动电流,  $q$  是单位电荷;  $\beta_c$  是光线宽增强因子;  $\gamma_c = A_{nr} + B(N/V) + C(N/V)^2$  是载流子非线性损耗速率,  $A_{nr}$  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。如果选取适当的参数,可使时间  $t \rightarrow \infty$  时,绝对值  $|E_t - E_r| \rightarrow 0$ ,  $|\phi_t - \phi_r| \rightarrow 0$ ,  $|N_t - N_r| \rightarrow 0$ , 即接收系统和发射系统同步就实现了。

### 2.2. 光纤信道

当激光混沌信号在光纤中传输时,可由非线性薛定谔方程来描述<sup>[13]</sup>:

$$j \frac{\partial E}{\partial z} = -\frac{j}{2} \alpha E + \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 E}{\partial T^2} - \gamma |E|^2 E, \quad (2)$$

其中  $E(z, T)$  是激光场脉冲包络的慢变振幅,  $z$  是传输距离,  $T$  是随脉冲以群速度  $v_g$  移动的参考系中的时间量度 ( $T = t - z/v_g$ ),  $\alpha$  是光纤损耗常数,  $\beta_2$  是光纤群速度色散(GVD)常数,  $\gamma$  是光纤非线性 Kerr 效应常数。引入对一个初始脉宽  $T_0$  归一化的时间量  $\tau$

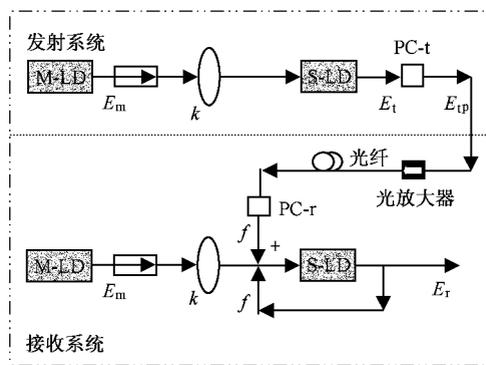


图 1 在外部相位控制器控制下的光纤同步系统模块,其中,PC-t 是发射系统相位控制器,PC-r 是接收系统相位控制器,M-LD 是主激光器,S-LD 是副激光器,□是光隔离器,○是光纤,■是光放大器

$= T/T_0$ , 并令

$$E(z, T) = \sqrt{P_0} \exp(-\alpha z/2) U(z, \tau), \quad (3)$$

这里  $U$  是归一化振幅,  $P_0$  为入射脉冲的峰值功率. 这样, 方程 (2) 变为

$$j \frac{\partial U}{\partial z} = \frac{1}{2L_D} \sin(\beta_2) \frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2} - \frac{\exp(-\alpha z)}{L_{NL}} |U|^2 U, \quad (4)$$

式中  $\text{sgn}(\beta_2) = \pm 1$  根据 GVD 效应参量  $\beta_2$  的符号决定, 且  $L_D = T_0^2/|\beta_2|$ ,  $L_{NL} = 1/\gamma P_0$ . 由同步系统 (1) 和光纤传输信道 (2) 或 (4) 就可以得到受相移控制器控制的光纤混沌同步系统.

由于 GVD 会影响脉冲的形态, 影响激光混沌同步, 限制光纤通信系统的传输距离, 并限制比特率. 所以通过令非线性薛定谔方程中的  $\beta_2 = 0$  来考虑光纤的自相位调制 (SPM) 效应对混沌信号及其同步的影响. 数值模拟时, 选用波长  $1.31 \mu\text{m}$  时色散为零的普通单模光纤 (典型值是  $\alpha \approx 0.44 \text{ dB/km}$ ,  $\beta_2 = 0$ ,  $\gamma = 2 \times 10^{-3} \text{ W}^{-1} \text{ m}^{-1}$ ) 作为信道, 则 (2) 式变为

$$\frac{\partial U}{\partial z} = \frac{j}{L_{NL}} \exp(-\alpha z) |U|^2 U, \quad (5)$$

其解为

$$U(z, T) = U(0, T) \exp[j \phi_{NL}(z, T)], \quad (6)$$

其中  $U(0, T)$  是  $z=0$  处的场振幅, 且非线性相移为

$$\phi_{NL}(z, T) = |U(0, T)|^2 (z_{\text{eff}}/L_{NL}), \quad (7)$$

这里  $z_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha z)]/\alpha$  是有效距离. 由 (6) 式可知,  $|U(z, T)|^2 = |U(0, T)|^2$ , 即由  $|U(0, T)|^2$  决定的脉冲形状保持不变, 这是混沌同步的必要条件. 但由 (7) 式可见, SPM 使得非线性相移随着光强的增大而增大, 最大相移  $\phi_{\text{max}}$  出现在脉冲的中心 ( $T=0$  处), 即  $|U(0, 0)| = 1$ , 因而

$$\phi_{\text{max}} = \frac{z_{\text{eff}}}{L_{NL}} = \gamma P_0 z_{\text{eff}}. \quad (8)$$

显然, 影响激光混沌信号传输和同步的主要原因是光纤的损耗和 SPM. 如果非线性相移小于系统能够同步时的最大相位差  $\Delta\phi$ , 那么就可以得到光纤混沌通信的最大光功率公式

$$P_0 \leq \frac{\Delta\phi}{\gamma z_{\text{eff}}}. \quad (9)$$

目前, 光放大器对光脉冲能很好地进行线性放大, 这样功率损耗可以得到很好的补偿. 在光纤通信中, 每相距一定距离  $z$  设有一光放大器, 总的最大非线性相移为

$$\phi_{NL, \text{max}} = n\gamma P_0 z_{\text{eff}}, \quad (10)$$

其中  $n$  是光放大器的个数. 这样光纤混沌通信最大光功率公式为

$$P_0 \leq \frac{\Delta\phi}{\gamma n z_{\text{eff}}}, \quad (11)$$

最大传输距离为

$$L_{\text{max}} = n z \leq \frac{\Delta\phi}{\gamma z_{\text{eff}} P_0}. \quad (12)$$

### 2.3. 同步

数值分析时让  $E$  对  $E_s$ ,  $t$  对  $ns$ ,  $N$  对  $N_{\text{th}}$  归一化, 系统取表 1 的参数值<sup>[12]</sup>, 并取  $E_m = 0.1256$ ,  $f = 0.12$ ,  $\phi_m = 0$ ,  $k = 0.03$  以及取  $\Omega_i(t)$  和  $\Omega_r(t)$  有相同的任意数值, 或控制使  $\Theta = 2i\pi$  (其中  $i = 0, 1, 2, 3, \dots$ ). 数值结果如图 2 所示, 发射系统和接收系统在

表 1 LD 参数

腔长 $L/\mu\text{m}$	350
腔宽 $w/\mu\text{m}$	2
腔厚 $d/\mu\text{m}$	0.15
压缩和限制因子 $\Gamma$	0.29
群速折射率 $n_g$	3.8
腔内光子损耗 $a_{\text{in}}/\text{cm}^{-1}$	29
腔外光子损耗 $a_{\text{out}}/\text{cm}^{-1}$	20
载流子密度门限值 $n_{\text{th}}/\text{cm}^{-3}$	$1.2 \times 10^{18}$
非辐射复合速率 $A_{\text{nr}}/\text{s}^{-1}$	$1.0 \times 10^8$
辐射复合因子 $B(\text{cm}^3/\text{s})$	$1.2 \times 10^{-10}$
俄歇复合因子 $C(\text{cm}^6/\text{s})$	$3.5 \times 10^{-29}$
饱和光子场强 $E_s/\text{m}^{-3/2}$	$1.6619 + 10^{11}$
增益常数 $a/\text{cm}^2$	$2.3 \times 10^{16}$
光线宽增强因子 $\beta_c$	6
频差 $\Delta\omega/\text{rad/s}$	$2\pi \times 10^9$
驱动电流 $I/\text{mA}$	25

同步之前存在着一个弛豫振荡过程. 其中  $a$  和  $b$  分别表示激光慢变部分以及相位同步,  $c$  表示场同步 (数值模拟中用  $\hat{E}(t) = E(t) \exp\{-j[\phi(t) + \Omega(t)]\}$  表示激光光场). 其中  $\alpha(t)$  和  $\theta(t)$  分别表示激光慢变部分同步误差和相位同步误差, 同步误差达到零的同步时间分别是  $T_E = 8.5 \text{ ns}$ ,  $T_p = 9.7 \text{ ns}$  和  $T_{E_p} = 9.7 \text{ ns}$ . 即在  $9.7 \text{ ns}$  后, 发射系统调制后的信号和接收系统就实现了完全同步. 定义平均绝对值同步误差

$$\hat{e} = |E_s(t) - E_r(t)|, \quad (13)$$

$$\Delta = |\cos(\phi_i + \Omega_i) - \cos(\phi_r + \Omega_r)|, \quad (14)$$

$$\Xi = |\hat{E}(t) - \hat{E}_r(t)|, \quad (15)$$

其中,括号表示平均值.数值模拟时在 30—40ns 中取 1000 个点平均.当然,由于光纤的存在,同步误差是不可能达到零的.其中光纤 500km 处(数值模拟

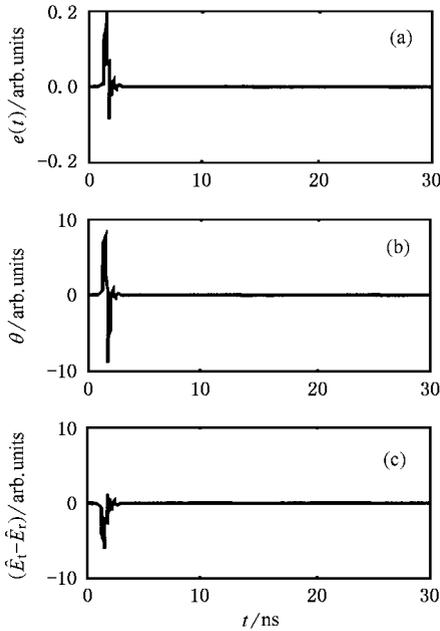


图 2 同步.(a)是场慢变部分同步 (b)是相位同步 (c)表示场同步

中取每 100km 有一光放大器,激光器平均功率为 0.27mW)同步误差  $\Delta = 0.019$ ,  $\Xi = 0.0026$ ,  $\hat{e} = 3.2 \times 10^{-4}$ ,而当  $f=0$  时,非同步时, $\Delta = 0.79$ ,  $\Xi = 0.1$ ,  $\hat{e} = 4.4 \times 10^{-2}$ ,但  $4.5 \times 10^{-2} / 3.2 \times 10^{-4} = 150 \gg 1$ ,同步与非同步是可以识别的,这意味着在光纤编码通信中同步解码是有可能实现的.而在光纤 1000km 处同步误差是  $\Delta = 0.031$ ,  $\Xi = 0.0056$ ,  $\hat{e} = 7.6 \times 10^{-4}$ ,且  $4.5 \times 10^{-2} / 7.6 \times 10^{-4} = 59.2 \gg 1$ ,即同步可以在公里长的光纤系统中实现.

### 2.4. 噪声

混沌对系统参数变化以及外界扰动非常敏感.由于光纤信道不可避免存在着噪声干扰,所以必须重视噪声对同步的负面影响.假设白噪声非常高于其他噪声,且噪声信号是叠加在发射信号上并被接收机一同接收.

光纤和白噪声同时对同步影响的数值计算结果如表 2、3 和 4 所示,其中白噪声均值为零、方差为  $0.1\% E_0$  ( $E_0 = 0.1256 E_s$ ).表 5 假设噪声仅叠加在振幅上,表 6 假设噪声仅叠加在相位上,表 7 假设噪声

同时叠加在振幅和相位上.可以看到,振幅噪声对同步的负面影响最大,其次是噪声相位振幅,影响较小的是同时叠加在振幅和相位噪声.同时,也可以看到,随着光纤长度的增加,同步误差也随之增加.当然,系统取不同的参数,有白噪声扰动时的同步误差也会有所不同.但该同步系统确有较强的抗噪声干扰能力.

表 2 振幅噪声

$nz/100\text{km}$	0	1	2	3	4	5
$\hat{e}/10^{-4}$	0.65	0.41	1.1	1.9	2.5	3.9
$\Delta/10^{-3}$	3.2	2.2	5.7	10.6	14	20
$\Xi/10^{-4}$	4.1	2.9	7.5	14	18	26

表 3 相位噪声

$nz/100\text{km}$	0	1	2	3	4	5
$\hat{e}/10^{-4}$	0.01	0.7	1.5	2.2	3.2	5.3
$\Delta/10^{-3}$	0.05	3.7	7.7	11.9	16.9	27.7
$\Xi/10^{-4}$	0.06	4.8	9.8	15	22	36

表 4 噪声同时叠加在振幅和相位上

$nz/100\text{km}$	0	1	2	3	4	5
$\hat{e}/10^{-4}$	0.41	0.44	1.1	1.9	2.6	3.3
$\Delta/10^{-3}$	2.1	2.3	5.9	10.6	14.2	19.0
$\Xi/10^{-4}$	2.7	3.1	7.7	14	18	25

### 2.5. 参数失配

在光纤混沌通信应用中应准许发射和接收系统的参数存在着一定的参数失配,这样系统的实际应用才有可能.数值计算结果如表 5 和表 6 所示(光纤传输长度 500km).其中,  $\delta$  表示  $\Omega_r(t)$  和  $\Omega_s(t)$  以及系统驱动电流参数失配的差值.可以看到,由于存在着参数失配,系统的同步误差增加了.但无论是相位控制器参数失配还是驱动电流参数失配,系统的确可以准许在一定范围内存在着参数失配,说明该系统具有一定的实际应用价值.

表 5 相位控制器参数失配(500km)

$\delta/10^{-2}\text{rad}$	1	0.5	0.1	0.05
$\hat{e}/10^{-4}$	6.3	4.6	4.3	4.1
$\Delta/10^{-2}$	3.2	2.5	2.2	2.3
$\Xi/10^{-3}$	4.0	3.2	2.8	2.6

表 6 驱动电流参数失配(500km)

$\delta/\text{mA}$	0.05	0.01	0.005	0.001
$\hat{e}/10^{-4}$	5.5	4.7	4.6	3.5
$\Delta/10^{-2}$	2.9	2.5	2.4	1.9
$\Xi/10^{-3}$	3.6	3.1	3.0	2.6

### 3. 光纤 ECPSK 编码通信

下面利用相位外部调制控制和混沌键控技术<sup>[4-9]</sup>构造出直接调制的 ON/ON ECPSK 光纤混沌编码通信发射和接收解调系统. 由于同步要求控制  $\Omega_i(t)$  和  $\Omega_c(t)$  有相同的任意数值, 或控制使  $\Theta = 2i\pi$  ( $i = 0, 1, 2, 3, \dots$ ), 所以在进行光纤 ON/ON ECPSK 通信时, 系统调制解调的参数有很大的选择余地.

光纤 ON/ON ECPSK 发射和接收系统如图 3 所示. 发射系统相位控制器 PC-t 以 ON/ON 键控形式直接调制相移  $\Omega_i(t)$  分别到  $\Omega_0$  和  $\Omega_1$  (数值模拟时分别取  $\Omega_0 = 0.4\pi$  和  $\Omega_1 = 0.5\pi$  且忽略键控时间, 符号  $\Omega_0$  和  $\Omega_1$  等同于  $\Omega_{0,1}(t)$ , 以下类似相同), 实现光纤混沌 ON/ON ECPSK 调制发射, 这就定义了二进制数字编码“0”和“1”, 调制发射的混沌信号记为  $E_{0,1}(t) \exp[-j[\omega_m t + \phi_{0,1}(t) + \Omega_{0,1}(t)]]$ , 图中, 用  $E_{0,1}$  (当  $\Omega_{0,1}(t)$  分别键控到  $\Omega_0$  和  $\Omega_1$  时) 简单

示意.

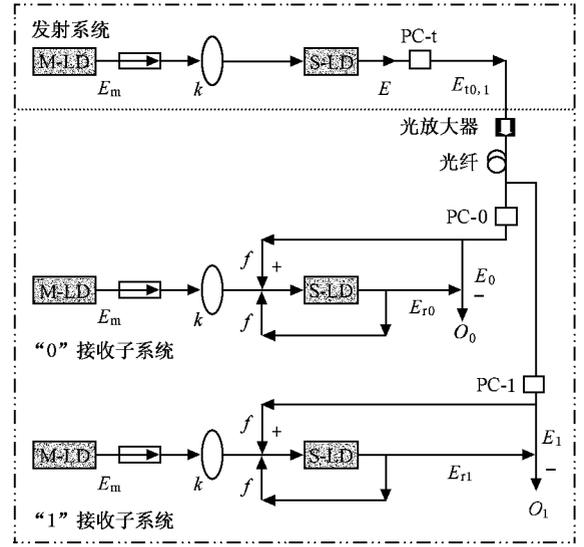


图 3 光纤 ON/ON ECPSK 调制发射和接收系统模块. 其中, 发射系统相位控制器 PC-t 作为相位相移键控调制器, PC-0 是“0”码接收子系统相位控制器, PC-1 是“1”码接收子系统相位控制器

接收解调系统是发射系统的复制且并列组成, “0”接收机的相位控制器设置相位相移为  $\Omega_0$ , “1”接收机设置相位相移为  $\Omega_1$ . 为了同步, 分别取  $\Omega_0 = 0.4\pi$  和  $\Omega_1 = 0.5\pi$ . 这样激光调制信号通过 PC-0 后, 它的形式可以记为  $E_0(t) \exp[-j[\omega_m t + \phi_0(t) + \Omega_0(t) - \Omega_0]]$  (图中用  $E_0$  简单示意), 通过 PC-1 记为  $E_1(t) \exp[-j[\omega_m t + \phi_1(t) + \Omega_1(t) - \Omega_1]]$

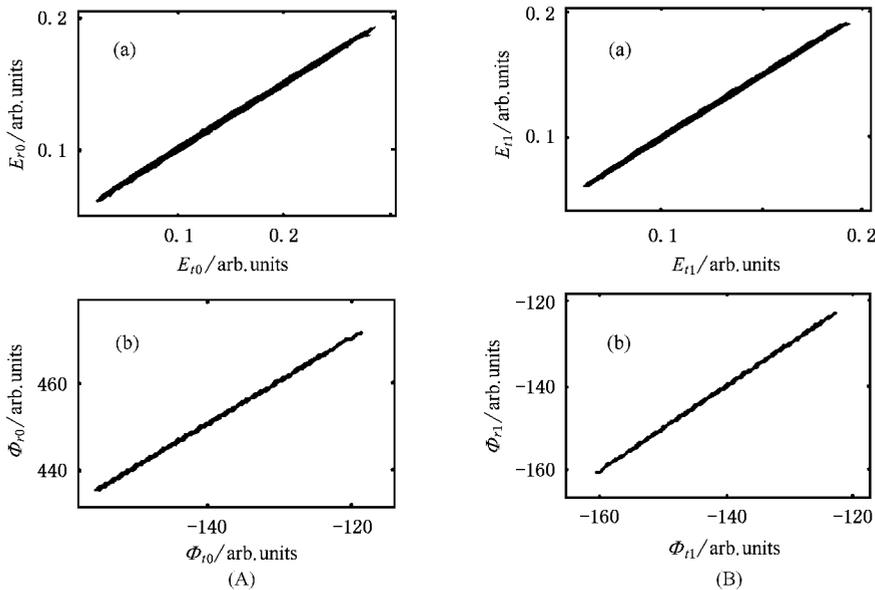


图 4 字节“0”和“1”的同步解调.(A)(B)分别表示在字节“0”和“1”同步 (a)和(b)分别表示场慢变部分以及相位的同步

(图中用  $E_1$  简单示意).

同步后(图中同步信号分别用  $E_{0,0}$  和  $E_{0,1}$  简单示意)如发射系统和“0”接收系统同步,就表示“0”码的解调实现,如果发射系统和“1”接收系统同步,就表示“1”码的解调实现,这样光纤混沌通信 ON/ON

ECPSK 解调就完全实现了.图3中“ $O_0$ ”和“ $O_1$ ”分别就是同步解调出来的二进制码“0”和“1”.当“ $O_0$ ”和“ $O_1$ ”归一化后,数字信号接收和解调也就实现了.数值模拟结果如图4所示,其中(a)和(b)分别表示发射系统信号慢变部分和相位与接收系统场慢变

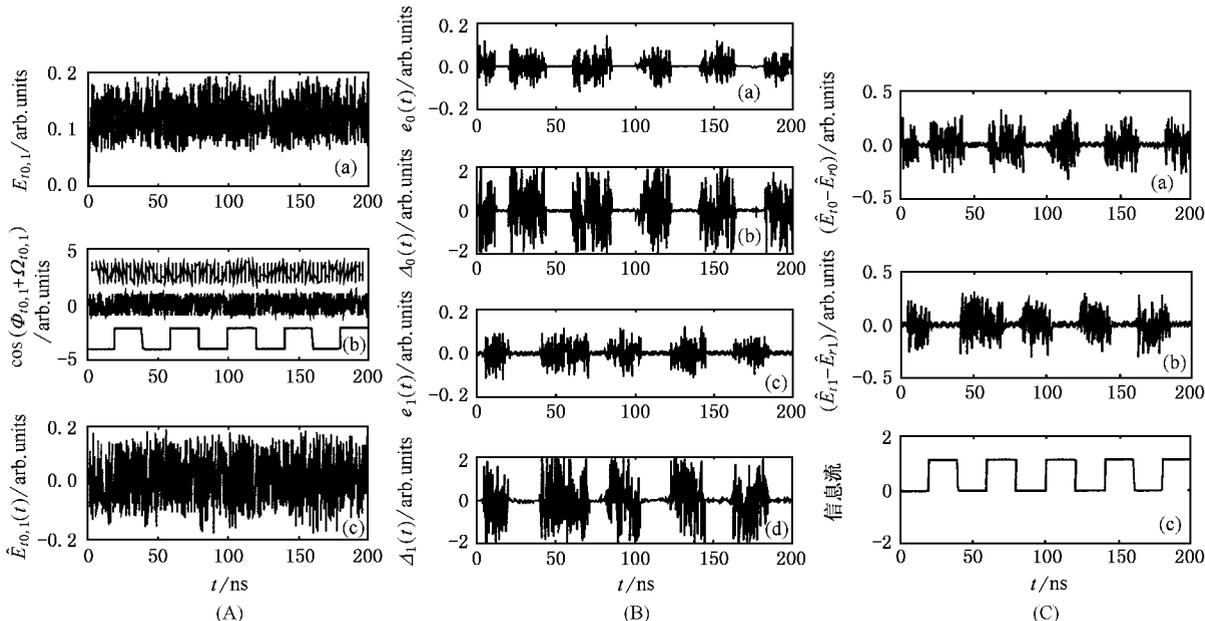


图5 光纤 ON/ON ECPSK 调制解调数值过程 (传输长度 500km)(A) 编码发射 (B)同步 (C)解码

部分和相位分别在字节“0”和“1”同步,事实上这就意味着字节“0”和“1”ON/ON ECPSK 解调的完全实现.

为了更好地了解光纤混沌通信 ON/ON ECPSK 调制解调的全过程,由(1)和(2)式给出了数值结果图5(A)图是信息调制发射,其中(a)是混沌信号调制后的慢变部分的实时变化(b)是它的相位余弦实时变化(上部是0—80ns 相位余弦实时变化放大,下部方波示意的是编码信息),信息已成功地隐藏在混沌相位中,且具有非常好地安全性能(c)是混沌信号按 ON/ON ECPSK 连续调制发射的信息信号,数值模拟时取  $\hat{E}_{0,1}(t) = E_{0,1}(t) \cos[\phi_{0,1}(t) + \Omega_{0,1}(t)]$ .可以看出,如不了解系统的参数,要实时地从波形上分离信息是非困难的.(B)图表示场慢变部分以及相位的同步,其中(a)和(b)以及(c)和(d)分别表示在字节“0”以及字节“1”上的场慢变部分以及相位的同步,且  $\Delta_{0,1}(t) = \cos(\phi_{0,1} + \Omega_{0,1}) - \cos(\phi_{0,1} + \Omega_{0,1})$ .(C)图是同步解码,其中(a)和(b)分别表示在字节“0”以及字节“1”上的场信号的同步.数值模拟时取  $\hat{E}_{0,1}(t) = E_{0,1}(t) \cos[\phi_{0,1}(t) + \Omega_{0,1}(t)]$ ,

$\hat{E}_{0,1}(t) = E_{0,1}(t) \cos[\phi_{0,1}(t) + \Omega_{0,1}(t)]$ (c)是混沌信号分离解调并按二进制码“0”和“1”归一化后实时构成的信息数据流.可以看到,信息信号的解码解调是非常好的.图6是光纤 ON/ON ECPSK 信息调制发射时的功率频谱,从频域上很难发现调制的信息信号,这说明了光纤 ON/ON ECPSK 通信具有很好的保密性能.

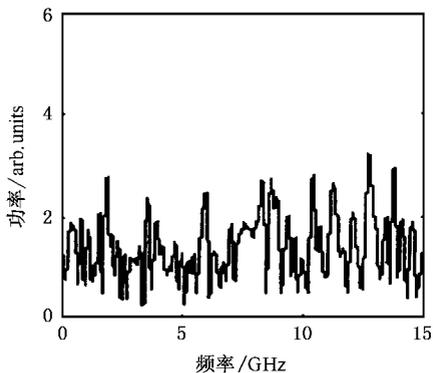


图6 功率频谱

## 4. 结 论

本文通过耦合激光混沌同步系统和光纤信道,建立了外部光注入半导体激光器激光混沌相位控制光纤同步以及混沌相位相移键控外调制光纤保密通

信系统理论模型,数值模拟了远程光纤混沌同步,导出了光纤混沌最大传输距离公式,模拟实现了系统的数字编码解码通信过程,进行了系统参数失配以及噪声和光纤对同步影响的数值分析.该系统确有很强的保密性能和反破译能力,可适合高速率远程光纤保密通信应用.

- |   |   |
|---|---|
| [ 1 ] Guan X P <i>et al</i> 2002 <i>Acta Phys. Sin.</i> <b>51</b> 749 ( in Chinese ) [ 关新平等 2002 物理学报 <b>51</b> 749 ]   | [ 6 ] Chen H F and Lin J M 2000 <i>IEEE J. Quantum Electronics</i> <b>36</b> 27       |
| [ 2 ] Li S H and Cai H X 2004 <i>Acta Phys. Sin.</i> <b>53</b> 1687 ( in Chinese ) [ 李世华、蔡海兴 2004 物理学报 <b>53</b> 1687 ] | [ 7 ] Heril T and Mulet J 2002 <i>IEEE J. Quantum Electronics</i> <b>38</b> 1162      |
| [ 3 ] Li J F <i>et al</i> 2004 <i>Acta Phys. Sin.</i> <b>53</b> 1694 ( in Chinese ) [ 李建芬等 2004 物理学报 <b>53</b> 1694 ]   | [ 8 ] Wu L and Zhu S Q 2003 <i>Chin. Phys.</i> <b>12</b> 300                          |
| [ 4 ] Wang Y G <i>et al</i> 2004 <i>Acta Phys. Sin.</i> <b>53</b> 1811 ( in Chinese ) [ 王勇刚等 2004 物理学报 <b>53</b> 1811 ] | [ 9 ] Wu L and Zhu S Q 2003 <i>Phys. Lett. A</i> <b>308</b> 157                       |
| [ 5 ] Colet P and Roy R 1994 <i>Opt. Lett.</i> <b>19</b> 2056   | [ 10 ] Yun L <i>et al</i> 2003 <i>IEEE J. Quantum Electronics</i> <b>39</b> 269       |
|   | [ 11 ] Wu L and Zhu S 2004 <i>Commun. Theor. Phys.</i> <b>41</b> 225                  |
|   | [ 12 ] Troger J and Nicati P A 1999 <i>IEEE J. Quantum Electronics</i> <b>35</b> 1713 |
|   | [ 13 ] Agrawal G P. <i>Nonlinear Fiber Optics</i> . San Diego, CA : Academic. 1989    |

# Theoretical studies on optical fiber secure communication using chaotic phase encoding

Yan Sen-Lin<sup>†</sup>

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

( Received 24 August 2004 ; revised manuscript received 24 September 2004 )

## Abstract

In this paper, we present the synchronization of chaotic injected semiconductor lasers in an optical fiber system via phase-controllers controlling its lasing phase shift, and a theoretical model for optical fiber chaotic secure communication system via chaos phase shift modulation by coupling a chaotic laser phase controlled synchronization system and an optical fiber channel. Chaotic synchronization is realized numerically under phase-controllers controlling in a long-haul optical fiber system. Optical fiber chaos propagation formula is demonstrated by analyzing theoretically the effect of optical fiber self-phase modulation on chaotic signal and synchronization. Chaotic laser phase shift is controlled and its signal is transmitted via continuous chaos shift keying modulation on end for optical fiber communication encoding. Chaotic laser demodulation is achieved via setting a phase shift of the receiver phase-controllers for optical fiber communication decoding. Application of chaotic digital encoding of 50Mbit/s rate is simulated numerically for long-haul optical fiber secure communication. The system parameter mismatch and robustness of anti-noise are analyzed numerically in long-haul optical fiber propagation, in particular.

**Keywords** : chaos, synchronization, optical fiber chaotic communication, semiconductor laser, phase

**PACC** : 0545, 4255P, 4260

<sup>†</sup>E-mail : senlinyan@163.com