

# 外注入激光同步方程和在保密通信中的应用

颜森林<sup>1,2</sup>, 王泽农<sup>1</sup>, 孙小菡<sup>2</sup>, 张明德<sup>2</sup>

(1. 南京晓庄学院物理系, 江苏南京 210017; 2. 东南大学电子工程系, 江苏南京 210096)

**摘要:** 本文建立了外部光注入半导体激光器的同步系统误差方程, 实现了外部光注入波长 1.31 $\mu\text{m}$  分布反馈激光器的两个激光混沌系统的同步, 其同步误差几乎为零. 成功数值模拟了该同步系统在长距离光纤传输中的同步, 其同步误差随着传输距离而增加, 光纤的自相位调制是限制激光混沌在光纤传输中同步的主要原因, 分析了这种传输的极限, 讨论了在不同传输距离上的强度噪声和相位噪声对同步误差的影响. 在长距离光纤模拟和数字保密通信中应用的数值模拟表明, 无论是在时域还是在频域, 信息在混沌中都难以分离, 确具有很高的保密性能和反破译能力.

**关键词:** 光纤; 激光器; 混沌; 同步; 保密通信

**中图分类号:** TP273, TN918      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2002) 02 0213-05

## Synchronous Equations for External Injected lasers and Its Application for Secure Communications

YAN Sen lin<sup>1,2</sup>, WANG Ze nong<sup>1</sup>, SUN Xiao han<sup>2</sup>, ZHANG Ming de<sup>2</sup>

(1. Dept. of physics, Nanjing Xiaozhuang College, Nanjing, Jiangsu 210017, China;

2. Dept. of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

**Abstract:** A synchronous error equation for semiconductor lasers injected with external light is presented. Two chaotic systems with distributed feedback semiconductor lasers injected with external light at 1.31 $\mu\text{m}$  can be synchronized with little synchronous error. The chaotic synchronous system has been successfully stimulated in a long propagation distance optical fiber. The synchronous error increases with the fiber length. The synchronization is limited by the self phase modulation in the fiber. The influences of intensity and phase noises on the synchronous error are studied in different propagation distances. Both analog and digital secure communications with the system are studied by numerical simulations in the long propagating distances. It is found that the information is hidden in the chaotic signal very well both in time domain and frequency domain and the system shows the good ability of robust security and anti uncoverage.

**Key words:** fiber; laser chaos; synchronization; secure communications

### 1 引言

最近几年, 混沌系统在保密通信中的应用得到了广泛重视, 各种各样的混沌系统被提出并被证明<sup>[1~4]</sup>. 首先是电路混沌系统在无线保密通信中的应用, 然后是半导体激光器混沌系统在光学保密通信中的应用发展<sup>[2~4]</sup>. 解码接收系统必须是发射系统的复制且要求和发射系统同步. 通过两个同步波的相减, 编码信息即可解调分离. 常用的几种方法是: 混沌隐藏, 混沌调制和混沌键控<sup>[2~4]</sup>. 由于电路混沌系统中带宽的限制和较高的衰减, 它在高速无线保密通信中的应用以及在远程有线保密通信中的应用受到严重的限制. 人们的注意力已转移到全光激光混沌系统; 由于, 全光激光混沌系统有较大的带宽和有较低的衰减, 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, 因而, 非常适合高速远程保密通信并可提高系统的保密性能. 文献<sup>[2~4]</sup>基于驱动响应方法利用串

级的思想, 提出半导体激光混沌同步系统, 但并没有给出激光同步方程的证明, 且同步相对幅值误差 (大约  $10^{-4}$ ) 仍较大, 不利于系统的解码, 易增加误码率, 因此, 全光激光混沌同步系统的研究还必须深入和广泛, 而在长距离光纤混沌保密通信中的研究还有待于发展.

本文建立了有外部光注入的半导体激光器同步扰动方程, 研究了外部光注入 1.31 $\mu\text{m}$  分布反馈 (DFB) 激光二极管 (LD)<sup>[5,6]</sup> 激光混沌同步系统. 当外部光在中度注入时, 系统同步相对幅值有极小的误差 (大约  $10^{-13}$ ), 而当外部光在深度注入时, 系统同步相对幅值的误差几乎为零, 据我们所知, 其同步品质是目前最好的全光激光混沌同步系统之一. 由于使用在波长 1.31 $\mu\text{m}$  零色散普通单模光纤连接各器件, 保证了该系统激光混沌相位同步的品质, 而零色散 (保证相位零干扰) 是激光混沌同步最重要的条件之一. 研究分析了该系统在长距

离光纤传输中的同步, 光纤的自相位调制(SPM)作用是限制激光混沌信号在光纤传输中同步的主要原因, 分析了混沌信号在光纤中传输的极限, 白噪声对系统同步性能的影响, 表明该同步系统确有较强的抗干扰能力. 并数值模拟了该系统在远距离光纤编码保密通信中的应用.

本文第二部分建立了外部注入相干光场 DFB LD 激光混沌同步的物理模型, 并推导出了激光混沌同步系统误差方程以及它们的数值分析, 提出并分析了在远距离光纤传输中的混沌同步, 证明了光纤的自相位调制是限制激光在光纤传输中混沌同步的主要原因, 分析了该同步系统抗噪声能力, 第三部分是该同步系统在远距离光纤混沌保密通信中应用的数值模拟, 第四部分是结论.

## 2 同步

### 2.1 模型

在基于驱动-响应思想构造的全光激光混沌负反馈同步模块系统如图 1 所示, 发射系统和接收系统由相同的主(M)、副(S) DFB LD<sup>[4-6]</sup>所组成, 且接收系统的 S-LD 有一负反馈回路, 并由普通单模光纤连接各器

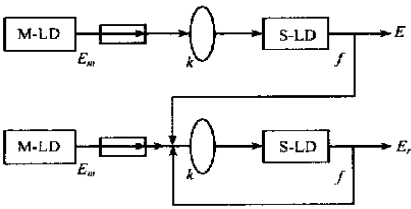


图 1 同步模块组合图. M-LD 为主激光器, S-LD 为副激光器,  $\rightarrow$  为光隔离器,  $k$  是注入指数,  $f$  是接收和反馈系数. 图上部是发射系统, 下部是有负反馈的接收系统

件. M-LD 的激光  $E_m \exp[-j(\omega_m t + \phi_m)]$  注入驱动 S-LD 激光  $E(t) \exp[-j(\omega_m t + \phi(t))]$  进入混沌态. 接收和负反馈的平衡是必要的, 设接收和负反馈系数均取为  $f$ . 这样发射和接收系统的 S-LD 激光可由下面方程组来描述:

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

其中脚标“ $t$ ”和“ $r$ ”分别表示发射和接收系统. 对发射系统  $n_p = 0$ , 对接收系统  $n_p = 1$ .  $E_p$  和  $\phi_p$  是接收系统接收到的发射系统激光的振幅和相位, 包括光纤的影响.  $N$  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,  $a$  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值,  $n_{th}$  是它的密度值;  $E_{sp} \approx n_{sp} G = n_s G / E_s V_p$  是拟合自发辐射速率,  $n_s$  是费密反转因子;  $\gamma_p = \gamma_g(\alpha_m + \alpha_{in})$  是光子损耗速率,  $\alpha_m$  是腔内光子损耗,  $\alpha_{in}$  是腔外

光子损耗;  $\Delta\omega_m = \omega_m - \omega_h$  可认为是外部注入光频率和激光光场频率的频差;  $\tau_L = 2n_g L / c$  是光在激光腔长  $L$  内来回一周的时间,  $c$  是真空中光速,  $n_g = c/v_g$  群速折射率;  $I$  是泵浦电流,  $q$  是单位电荷;  $\beta_c$  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,  $A_{nr}$  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. 这里利用驱动-响应串级思想构造的这样全光激光混沌同步系统, 事实上是物理学的受迫振荡动力学行为. 接收系统的 S-LD 激光由于受到发射系统的 S-LD 激光驱动, 它的激光动力学行为是受迫振荡, 选取适当的参数, 可使当时间  $t \rightarrow \infty$  时, 绝对值  $|E_t - E_r| \rightarrow 0, |\phi_t - \phi_r| \rightarrow 0, |N_t - N_r| \rightarrow 0$ , 接收系统和发射系统激光混沌同步就实现了.

### 2.2 同步系统误差方程

如果, 发射系统和接收系统有相同的参数, 那么, 它们的 S-LD 的稳定态将有相同的解. 这一特点我们将在下节作进一步数值模拟证明. 由于在稳定态时  $E_0 = E_{r0} = E_0, \phi_0 = \phi_{r0} = \phi_0, N_{t0} = N_{r0} = N_0$ . 由方程(1)得到一次近似下的同步系统误差方程:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \delta(E_t - E_r) \\ \delta(\phi_t - \phi_r) \\ \delta(N_t - N_r) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & B_{22} & A_{23} \\ A_{31} & B_{32} & A_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta(E_t - E_r) \\ \delta(\phi_t - \phi_r) \\ \delta(N_t - N_r) \end{pmatrix} \quad (2)$$

这里,  $B_{11} = A_{11} - hf/\tau_L, B_{22} = A_{22} - hf/\tau_L,$

$$\begin{aligned} A_{11} &= \frac{1}{2}(G_0 - \gamma + E_0 G_E) + n_{sp} G_E \\ A_{12} &= \frac{k}{\tau_L} E_m \sin(\phi_m - \phi_0) \\ A_{13} &= (\frac{1}{2} E_0 + n_p) G_N \\ A_{21} &= \frac{1}{2} \beta_c G_E - \frac{k}{\tau_L} \frac{E_m}{E_0^2} \sin(\phi_m - \phi_0) \\ A_{22} &= -\frac{k}{\tau_L} \frac{E_m}{E_0} \cos(\phi_m - \phi_0) \\ A_{23} &= \frac{1}{2} \beta_c G_N \\ A_{31} &= -2G_0 E_0 V_p - E_0^2 V_p G_E \\ A_{32} &= 0 \\ A_{33} &= -\gamma_{e0} - N_0 \gamma_{eN} - E_0^2 V_p G_N \\ G_N &= \frac{\partial G}{\partial N} \Big|_{N=N_0, E=E_0} \\ G_E &= \frac{\partial G}{\partial N} \Big|_{N=N_0, E=E_0} \\ \gamma_{eN} &= \frac{\partial \gamma_e}{\partial N} \Big|_{N=N_0} \end{aligned}$$

设方程(2)的本征值为  $\lambda$ , 其本征值方程为:

$$\lambda^3 + \lambda^2 b_1 + \lambda b_2 + b_3 = 0 \quad (3)$$

这里,

$$\begin{aligned} b_1 &= -(B_{11} + B_{22} + A_{33}) \\ b_2 &= -(A_{31} A_{13} - B_{11} B_{22} + A_{12} A_{21} - A_{33} B_{11} - A_{33} B_{22}) \\ b_3 &= -(A_{31} A_{12} A_{23} - A_{31} A_{13} B_{22} + A_{33} B_{11} B_{22} - A_{33} A_{12} A_{21}) \end{aligned}$$

由霍尔维茨条件, 全部本征值具有负实部的充要条件是

$$b_1 > 0, b_3 > 0, b_1 \times b_2 - b_3 > 0 \quad (4)$$

则方程(2)的零解是全局渐近稳定的, 这就意味着发射系统和接收系统实现了同步。

### 2.3 数值分析

数值分析时取表 1 的数值, 并让  $E$  对  $E_s$ ,  $t$  对  $ns$ ,  $N$  对  $N_{th}$  归一化。

**2.3.1 稳定点计算** 为了计算简便, 以下均取  $f = 1, \phi_m = 0$ 。当  $k = 0.18, E_m = 0.021E_s$  时, 方程(1)的稳定解是  $E_{i0} = E_{r0} = 0.1256, \phi_{i0} = \phi_{r0} = -1.7151, N_{i0} = N_{r0} = 1.6181$ ; 当  $k = 0.09, E_m = 0.042E_s$  时,  $E_{i0} = E_{r0} = 0.1256, \phi_{i0} = \phi_{r0} = -1.7151, N_{i0} = N_{r0} = 1.6181$ ; 当  $k = 0.2, E_m = 0.1256E_s$  时,  $E_{i0} = E_{r0} = 0.1278, \phi_{i0} = \phi_{r0} = -1.4523, N_{i0} = N_{r0} = 1.6088$ , 即取相同的参数时发射机和接收机的 SLD 确有相同的稳定点。

表 1 波长 1.31 $\mu$ m DFB LD 参数

参数	符号	值	单位
腔长	$L$	350	$\mu$ m
腔宽	$w$	2	$\mu$ m
腔厚	$d$	0.15	$\mu$ m
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	$\alpha_m$	29	$\text{cm}^{-1}$
腔外光子损耗	$\alpha_{int}$	20	$\text{cm}^{-1}$
载流子密度门限值	$n_0$	$1.2 \times 10^{18}$	$\text{cm}^{-3}$
非辐射复合速率	$A_{nr}$	$1.0 \times 10^8$	$\text{s}^{-1}$
辐射复合因子	$B$	$1.2 \times 10^{-10}$	$\text{cm}^3/\text{s}$
俄歇复合因子	$C$	$3.5 \times 10^{-29}$	$\text{cm}^6/\text{s}$
费密反转因子	$n_s$	2.6	
饱和光子场强	$E_s$	$1.6619 \times 10^{11}$	$\text{m}^{-3/2}$
增益常数	$a$	$2.3 \times 10^{-16}$	$\text{cm}^2$
光线宽增强因子	$\beta_c$	6	
频差	$\Delta\omega$	$2\pi \times 10^9$	$\text{rad/s}$
驱动电流	$I$	25	mA

**2.3.2 同步分析** 当  $k = 0.09, E_m = 0.042E_s$  时,  $b_1 = 24.0712 > 0, b_3 = 9346.4 > 0, b_1 \times b_2 - b_3 = 3541.5 > 0$ , 本征值  $\lambda$  为( -

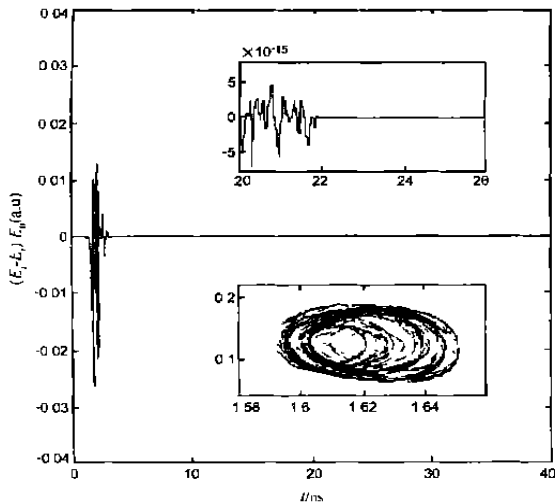


图 2 同步(任意初始条件,  $k = 0.09, E_m = 0.042E_s$ ). 这里同步有一暂态过程, 同步误差在 22ns 后不见了

20.3398, -1.8657 $\pm$ 21.3549j), 方程(2)的零点解是全局稳定的, 发射机和接收机的 SLD 是混沌态的同步, 其混沌同步误差如图 2 所示(由方程(1)数值模拟而得到), 其中上插入图是同步误差的局部放大。可以看到同步误差在 22ns 不见了, 说明这种同步是渐近同步。下插入图(由方程(1)数值模拟而得到)是典型的激光混沌吸引子的盆域。而当  $k = 0.18, E_m = 0.021E_s$  时(以下数值模拟均取此数值),  $b_1 = 44.372 > 0, b_3 = 12989 > 0, b_1 \times b_2 - b_3 = 26969 > 0$ , 本征值  $\lambda$  为( -28.764, -7.8040 $\pm$ 19.765j), 方程(2)的零点解是全局稳定的, 发射机和接收机的 SLD 是混沌态的同步。数值分析显示同步误差几乎为零。

### 2.4 光纤中的非线性相移极限

当激光在光纤中传输时, 可由非线性薛定谔方程来描述<sup>[7]</sup>:

$$j \frac{\partial E}{\partial z} = -\frac{j}{2} \alpha E + \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 E}{\partial T^2} - \gamma |E|^2 E \quad (5)$$

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,  $\beta_2$  是光纤二阶色散常数,  $\gamma$  是光纤非线性 Kerr 效应常数。由于群速色散会限制光纤通信系统的比特率和传输距离, 影响脉冲的形态, 并能影响激光混沌同步。所以, 这里选用波长 1.31 $\mu$ m 时色散为零的普通单模光纤(典型值是  $\alpha \approx 0.44 \text{ dB/km}, \beta_2 = 0, \gamma = 2 \times 10^{-3} \text{ W}^{-1} \text{ m}^{-1}$ )。令:

$$E(z, T) = \sqrt{P_0} \exp(-\alpha z/2) U(z, T) \quad (6)$$

这里  $U$  是归一化振幅,  $P_0$  为入射脉冲的峰值功率, 如腔内、外和其它光子损耗为  $\beta$ , 则

$$P_0 = \frac{\hbar \omega_{th} V_p E^2 \beta}{2 \tau_L} \quad (7)$$

这样, 方程(5)变为

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

其中  $L_{NL} = (\gamma P_0)^{-1}$  是非线性长度。方程(8)的解是

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

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

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

这里  $z_{eff} = [1 - \exp(-\alpha z)]/\alpha$  是有效距离。式(10)表明, SPM 使得相移随光强的增大而增大, 且由  $|U(0, T)|^2$  决定的脉冲形状保持不变。最大相移  $\phi_{max}$  出现在脉冲的中心 ( $T = 0$  处), 即  $|U(0, 0)| = 1$ , 因而

$$\phi_{max} = z_{eff}/L_{NL} = \gamma P_0 z_{eff} \quad (11)$$

由式(6)、(9)和(10)可知, 影响激光混沌同步的主要原因是光纤的损耗和 SPM。当式(11)代入式(1)后, 接收系统和发射系统仍能混沌同步, 则式(11)就是激光混沌在光纤保密通信中的非线性相移极限。而当  $z \rightarrow \infty$  时, 式(11)可写为:

$$\phi_{max} = (\gamma P_0)/\alpha \quad (12)$$

事实上, 由于自发辐射和白噪声等因素的影响, 相移极限数值应当比式(11)(或式(12))要小。目前, 掺铒光纤放大器对光脉冲能很好地进行线性放大。在光纤通信中, 每相距一定距离设

有一掺铒光纤放大器. 这样, 总的最大非线性相移是  $n\gamma P_0 z_{eff}$ , 这里  $n$  是光放大器的个数.

### 2.5 光纤中的同步误差分析

定义在时间  $t$  时的相对同步误差为:

$$\Delta = \langle |E_p(t) - E_r(t)| \rangle / \langle E_0(t) \rangle \quad (13)$$

$\langle E_0(t) \rangle$  是激光稳定态时的振幅均值. 且当  $z = 0$  时,  $E_p(t) = E_r(t)$ . 取表 1 的数值和光纤的典型值, 以下所有同步误差数值模拟中均取 20ns-30ns 中的 1000 个点统计平均, 每相距 200km 有一光纤放大器. 在光纤传输中的相对同步误差如表 2 所示, 200km 以后, 相对同步误差随着在传输距离而增加.

表 2 在光纤传输中的相对同步误差

$z$ (km)	50	100	200	400	600
$\Delta$	0.0017	0.0014	0.0016	0.0029	0.0055

### 2.6 在光纤传输中的噪声影响

由于混沌对参数变化和外界扰动非常敏感. 当混沌信号在光纤中传输以及光放大器的噪声都会影响混沌同步. 设噪声信号是叠加在发射信号上并被接收机一同接收.

**2.6.1 强度噪声** 噪声均值为零、方差为  $0.1\% E_0$ . 这是比较大的噪声强度了. 在这样强的噪声干扰下, 在长距离光纤中同步仍能保持. 数值模拟如表 3 所示. 这里同步误差比表 2 的数值要小, 其主要是强度噪声和同步误差有相互抵消的作用.

**2.6.2 相位噪声** 当相位噪声均值为零、方差为  $0.01 E_0$ . 在长距离光纤中同步仍能保持. 数值模拟如表 4 所示, 同步误差明显比表 2 增加了. 事实上噪声是随着光纤长度的增加而增大的, 表 3 和表 4 中 200km 以后的相对误差还应略大一点. 但该同步系统的确有较强的抗噪声干扰能力. 为了进一步提高

同步的品质, 也可以使用低通数字滤波器对接收到的信号进行滤波, 以减小噪声对同步的干扰.

表 3 强度噪声的影响

$z$ (km)	50	100	200	400	600
$\Delta_{同}$	0.0011	0.0011	0.0012	0.0029	0.0044
$\Delta_{强}$	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
$\Delta_{总}$	0.0016	0.0016	0.0017	0.0034	0.0049

注:  $\Delta_{同}$  是相对同步误差,  $\Delta_{强}$  是相对强度噪声,  $\Delta_{总}$  是总相对误差

表 4 相位噪声的影响

$z$ (km)	50	100	200	400	600
$\Delta$	0.0019	0.0025	0.0024	0.0042	0.0056

## 3 保密通信

激光混沌吸引子无限个致密不同的相空间轨迹所构成的混沌吸引子盆域, 是激光混沌波变化复杂无序随机特点的反应. 编码保密通信正是利用了混沌波变化复杂无序随机的这一特点.

### 3.1 混沌隐藏

编码信息  $S(t)$  直接加到混沌信号中一起被发射, 即信息隐藏在混沌波中, 这样很难从混沌波形上分离信息. 混沌隐藏的接收和发射同步系统其基本结构和图 1 很相似. 现用正弦信号  $S(t) = A \sin(\omega_0 t)$  直接加到混沌波中. 数值模拟中, 取  $A = 0.002 E_0$ ,  $\omega_0 = 2\pi/T$ ,  $T = 5\text{ns}$ . 当接收系统和发射系统达到混沌同步后, 通过下式即可解调出信息  $S(t)$

$$S'(t) = E_p(t) + S(t) - E_r(t) = S(t) \quad (14)$$

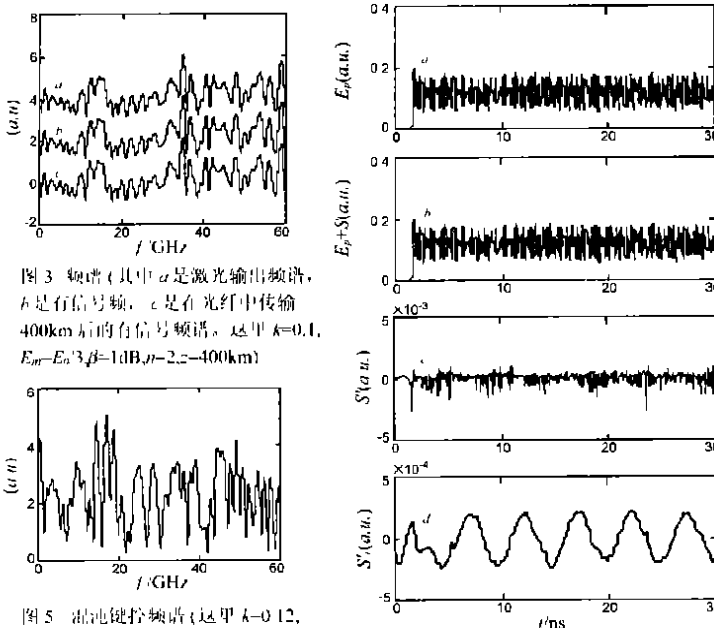


图 3 频谱 (其中  $a$  是激光输出频谱,  $b$  是有信号频,  $c$  是在光纤中传输 400km 后的有信号频谱. 这里  $k=0.1$ ,  $E_m = E_0/3$ ,  $\beta=1\text{dB}$ ,  $\eta=2$ ,  $z=400\text{km}$ )

图 5 混沌键控频谱 (这里  $k=0.12$ ,  $L_m = E_0/3$ ,  $I_0 = 25\text{mA}$ ,  $I_1 = 25\text{mA}$ ,  $\beta=1\text{dB}$ ,  $\eta=3$ ,  $z=600\text{km}$ )

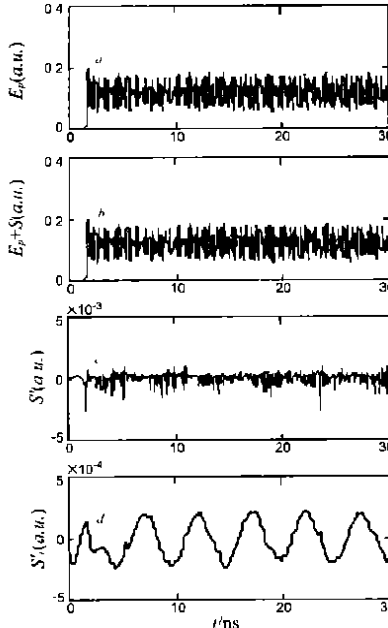


图 1 混沌隐藏 (这里  $k=0.1$ ,  $E_m = E_0/3$ ,  $\beta=1\text{dB}$ ,  $\eta=2$ ,  $z=400\text{km}$ )

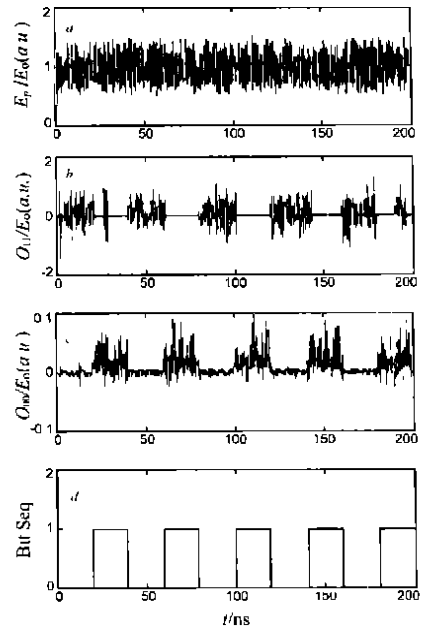


图 6 混沌键控 (这里  $k=0.12$ ,  $E_m = E_0/4$ ,  $I_0 = 25.6\text{mA}$ ,  $I_1 = 25\text{mA}$ ,  $\beta=1\text{dB}$ ,  $\eta=3$ ,  $z=600\text{km}$ )

图 3 中, 混沌波频谱和载有信号的混沌波以及在光纤中传输 200km 后的三种信号频谱, 它们是非常相似的. 图 4(a) 和 (b) 中, 混沌波形和载有信号的混沌波形的变化是非常相

似的. 显然, 这样很难实时的从混沌波形上分离信息. 图 4(c) 是解调出信息  $S'(t) = [E_p(t) + S(t) - E_r(t)]$  的波形图. 解调出来的信息  $S'(t)$  波形明显叠加着同步误差所产生的杂

波, 其原因是信号  $S(t)$  和光纤的 SPM 干扰了混沌同步, 使同步误差增加了。当然, 应用低通数字滤波器对解调信息  $S'(t)$  进行滤波后, 重构的信号就非常完美了, 图 4(d) 和图 4(c) 的比较证实了这一特点。这样, 解码就实现了。

### 3.2 混沌键控

设发射系统 SLD 的驱动电流分别是  $I_0$  和  $I_1$  (对应的光纤传输中的光场  $E_{p0}$  和  $E_{p1}$ ), 以键控形式调制以驱动 SLD 激光到不同的混沌周期轨道上 (即不同的混沌吸引子), 作为二进制码“0”和“1”。当光场  $E_p = E_{p0} + E_{p1}$  在光纤中传输, 也就意味着实现了光纤数字信号编码发射。

接收解码系统有两组, “0”信号接收机 SLD 的驱动电流是  $I_0$  接收混沌信息  $E_p$  并和  $E_{p0}$  同步, 即有

$$O_0(t) = E_{p0}(t) - E_p(t) \quad (15)$$

“1”信号接收机的 SLD 的驱动电流是  $I_1$  接收混沌信息  $E_p$  并和  $E_{p1}$  同步, 即有

$$O_1(t) = E_{p1}(t) - E_p(t) \quad (16)$$

这里,  $O_0$  和  $O_1$  分别是解调出来的二进制码“0”和“1”, 数字信号的解码也就实现了。为了保证信息发射的保密性能和有效的解码, 系统参数选择是非常重要的。当混沌周期轨道太接近时, 信息发射系统和接收解码系统参数匹配精度的要求提高了, 但误码率也下降了。当混沌周期轨道空间太大时, 接收解码是方便的, 但系统保密性能下降了, 信息有可能从混沌波形上分离出来。图 5 是混沌波信号  $E_{p0}$  和  $E_{p1}$  被转换发射时的频谱图示, 信息很难从频域上分离出来。图 6 是混沌键控转换发射接收解码的数值模拟图。其中, 图 6(a) 是  $E_{p0}$  和  $E_{p1}$  信号的混沌波被转换发射实时构成的图示,  $E_{p0}$  和  $E_{p1}$  是不同的混沌吸引子 (但很相近)。如果不了解系统参数, 很难分离出二进制码“0”和“1”。图 6(b) 是在字节“1”上同步, 图 6(c) 是在字节“0”上同步, 图 6(d) 是混沌信号由公式 (15) 和 (16) 分离解码并标准化后按二进制码“0”和“1”实时构成的信息流图。

## 4 结论

本文建立了有外部光注入激光器的激光混沌的同步系统误差方程, 成功模拟实现了有外部光注入波长  $1.31\mu\text{m}$  DFB LD 激光混沌在远距离光纤传输中的同步。该系统同步误差小, 同步品质好, 有较强的抗干扰能力。通过在光纤编码保密通信中的应用的数值模拟, 发现该系统具有较高的保密性能和反破译能力。使用在波长  $1.31\mu\text{m}$  上的零色散普通单模光

纤, 保证了该系统激光混沌相位同步的品质。该同步系统为远程光纤保密通信的应用提供了可能。

### 参考文献:

- [1] L M Pecora, T L Carroll. Synchronization in chaotic systems [J]. Phys. Rev. Lett., 1990, 64(10): 821-824.
- [2] V A Lodi, S donati, A Scire. Synchronization of chaotic injected laser systems and its application to optical cryptography [J]. Quantum Electron., 1996, 32(6): 953-959.
- [3] A S D Claudio, R M P Colet, G Fernandez. Encoded Gbit/s digital communications with synchronized chaotic semiconductor lasers [J]. Quantum Electron., 1999, 35(3): 292-297.
- [4] C Juang, T M Hwang. A synchronization scheme using self pulsating laser diodes in optical chaotic communication [J]. Quantum Electron., 2000, 36(3): 300-304.
- [5] Y Hong, K A Shore. Locking characteristic of a side mode injected semiconductor laser [J]. Quantum Electron., 1999, 35(11): 32-38.
- [6] J Troger, P A Nicati. Novel measurement scheme for injection locking experiments [J]. Quantum Electron., 1999, 35(1): 1713-1717.
- [7] G P Agrawal. Nonlinear Fiber Optics [M]. San Diego, CA: Academic, 1989.

### 作者简介:



颜森林 男, 1962 年生于江苏省淮安。博士, 副教授。现从事混沌、波分复用系统、半导体激光器和保密通信研究。



王泽农 男, 1943 年生于江苏。大学本科, 教授。现从事半导体激光器和非线性物理学研究。