

# 激光混沌串联同步以及混沌中继器系统理论研究

颜森林<sup>1,2)</sup> 汪胜前<sup>1)</sup>

1) 江西科技师范学院通信与电子工程学院, 南昌 330013)

2) 南京晓庄学院物理系, 南京 210017)

(2005 年 4 月 13 日收到, 2005 年 12 月 12 日收到修改稿)

提出混沌通信中继器设想, 建立半导体激光器激光混沌全光中继器物理模型, 理论证明了激光混沌中继器系统的同步. 数值实现了发射系统、中继器系统、接收系统的混沌同步, 分析了系统反馈系数和同步误差以及同步时间的关系. 模拟了中继器系统在激光混沌保密通信中的应用, 分别给出了具有正弦信号调制频率 0.2 GHz 和数字信号 0.2 Gb/s 速率的混沌通信以及同步误差分析, 表明混沌中继器系统确能改善和提高激光混沌通信的解码质量. 分析了中继器系统的带宽和 20 Gb/s 高速率数字信号混沌通信以及同步误差, 给出了具有正弦信号调制频率 0.1—20 GHz 以及调制速率 0.1—20 Gb/s 带宽的数值结果以及同步误差和调制频率的数值关系, 还数值分析了系统的参数失配.

关键词: 混沌, 同步, 激光器, 中继器

PACC: 0545, 4255P, 4260

## 1. 引 言

在远程通信系统中, 信号在传输过程中会产生衰变, 信号的振幅会越变越小以至于接收系统很难接收到信号, 而相位一般也会发生变化, 这样接收系统很难恢复原来的信号. 由于信道和其他因素的影响, 信号也会产生意想不到的变化. 因此, 为了提高通信解码的质量, 在远程通信系统中都要建立中继器系统, 一是对接收到的信号进行放大, 二是对接收的信号整形以力求恢复原来信号的特点, 并对信号进行再生和分配.

混沌具有对初值的敏感特性且能形成无限个致密不同的相空间轨迹, 其波形变化复杂无序, 具有随机振荡特点, 其长期行为是不可预测的<sup>[1-5]</sup>. 所以混沌在保密通信中的应用受得到人们广泛重视<sup>[6-10]</sup>, 首先是混沌电路系统在电保密通信中的应用<sup>[3,4]</sup>, 然后是半导体激光器混沌系统在光保密通信中的应用发展<sup>[11-16]</sup>. 全光激光混沌系统有较大的带宽和较低的衰减, 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, 能够加密更多的数据信息, 同时, 光子很难被窜改, 保密性就更强, 能进一步增加光子侦察和其他方法解密的难度, 所以它非常适合光保密通信和远程高速保密通信方面的应用<sup>[11-16]</sup>.

在混沌远程通信中, 无论是有线通信系统还是无线通信系统, 都必须建立混沌通信中继器系统, 目的二是对接收到的信号进行放大, 二是对接收的信号整形、再生、恢复原来信号. 同时, 建立混沌通信中继器系统与混沌信号自身变化特点有关, 因为混沌对外界干扰非常敏感, 当混沌信号发生畸变时, 接收系统将很难和发射系统同步以至于解调信号不可能实现. 所以, 提出的混沌通信中继器系统设想, 不仅可以应用在光混沌通信中, 也可以应用在电混沌通信系统中, 它的思想还可以应用在其他远程混沌通信中. 本文提出有外部光注入的半导体激光器混沌全光中继器系统物理模型, 理论证明了中继器系统同步以及数值模拟, 进行了中继器系统的编解码应用以及调制带宽和系统的参数失配分析.

## 2. 模 型

有外部光注入的半导体激光器混沌全光中继器系统模块如图 1(a)所示, 发射、中继器和接收系统都是有相同的主(M)、副(S)分布反馈(DFB)激光二极管(LD)<sup>[15-20]</sup>所组成. M-LD 激光场  $E_m \exp[-j(\omega_m t + \phi_m)]$  注入驱动 S-LD 可使激光场  $E(t) \exp\{-j[\omega_m t + \phi(t)]\}$  进入混沌态<sup>[15-20]</sup>, 中继器系统和接收系统 S-LD 都有一负反馈回路, 其中在

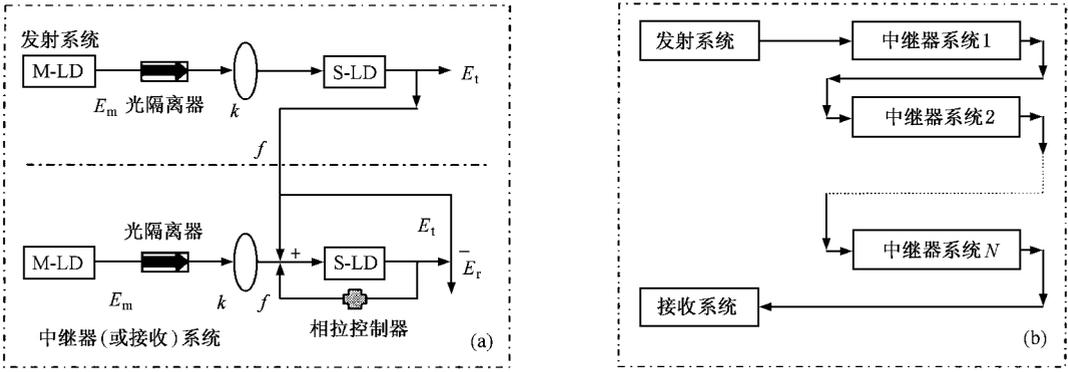


图 1 激光混沌全光中继器系统以及激光混沌发射、中继器和接收同步系统模块 (a) 激光混沌发射和中继器(或接收)同步系统 (b) 激光混沌全光串联中继站通信系统模块

反馈回路中设置的光相位控制器主要作用是控制反馈光的相位,使反馈光产生奇数倍  $\pi$  相位变化,目的是控制发射系统、中继器系统、接收系统的同步.例如,使用  $\text{LiNbO}_3$  电光波导相位调制控制器,设置调制控制电压为半波电压就可以产生  $\pi$  相位变化.中继器系统和接收系统有相同特点,它既可以接收信号并与之产生同步,同时又可以把同步后的信号发射给下一路中继器系统,最终形成发射、中继器、接收激光混沌串联反馈控制同步系统.该系统采用了连续变量反馈同步的方法,其原理框图如图 1(b)所示.设接收和负反馈系数均取为  $f$ ,它的平方反映系统光接收和光反馈的强度.发射系统、中继器系统和接收系统的 S-LD 激光场可由下列方程组来描述<sup>[15-20]</sup>:

$$\begin{aligned} \frac{dE_{t,r1}}{dt} &= \frac{1}{2}(G_{t,r1} - \gamma_p)E_{t,r1} \\ &+ \frac{k}{\tau_L}E_m \cos(\phi_m - \phi_{t,r1}) \\ &+ n_r \frac{f}{\tau_L}[E_t \cos(\phi_t - \phi_{r1}) - E_{r1}], \\ \frac{d\phi_{t,r1}}{dt} &= \frac{1}{2}\beta_c(G_{t,r1} - \gamma_p) \\ &+ \frac{k}{\tau_L} \frac{E_m}{E_{t,r1}} \sin(\phi_m - \phi_{t,r1}) \\ &- \Delta\omega_m + n_r \frac{f}{\tau_L} \frac{E_t}{E_{r1}} \sin(\phi_t - \phi_{r1}), \\ \frac{dN_{t,r1}}{dt} &= \frac{I}{q} - \gamma_{et,r1}N_{t,r1} - G_{t,r1}V_p E_{t,r1}^2; \\ \frac{dE_{r2}}{dt} &= \frac{1}{2}(G_{r2} - \gamma_p)E_{r1,r2} \\ &+ \frac{k}{\tau_L}E_m \cos(\phi_m - \phi_{r2}) \end{aligned} \quad (1a)$$

$$\begin{aligned} &+ n_r \frac{f}{\tau_L}[E_{r1} \cos(\phi_{r1} - \phi_{r2}) - E_{r2}], \\ \frac{d\phi_{r2}}{dt} &= \frac{1}{2}\beta_c(G_{r2} - \gamma_p) \\ &+ \frac{k}{\tau_L} \frac{E_m}{E_{r2}} \sin(\phi_m - \phi_{r2}) \\ &- \Delta\omega_m + n_r \frac{f}{\tau_L} \frac{E_{r1}}{E_{r2}} \sin(\phi_{r1} - \phi_{r2}), \\ \frac{dN_{r2}}{dt} &= \frac{I}{q} - \gamma_{er2}N_{r2} - G_{r2}V_p E_{r2}^2. \end{aligned} \quad (1b)$$

这里,下标“t”表示发射系统,对发射系统  $n_r = 0$ ,对其他系统  $n_r = 1$ ;下标“r1”表示中继器系统 1,下标“r2”表示接收系统.对于多个中继器系统,把方程(1b)的下标“r1”变换为下标“r2”,下标“r2”变换为下标“r3”,这样下标“r2”就表示中继器系统 2,下标“r3”就表示中继器系统 3,依次类推,则“rN+1”(其中  $N$  为正整数)表示接收系统,这样可以建立  $N$  个串联的中继器系统.方程(1)中  $E, \phi$  和  $N$  分别表示激光场的振幅、相位和载流子数;模式增益  $G = (\Gamma v_g a/V)(N - N_{th})\sqrt{1 + E^2/E_s^2}$ ,其中  $v_g$  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, $n_{th}$  是其密度值; $\gamma_p = v_g(\alpha_m + \alpha_{int})$  是光子损耗速率, $\alpha_m$  是腔光子损耗, $\alpha_{int}$  是内部光子损耗; $\Delta\omega_m = \omega_m - \omega_{th}$  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, $n_g = c/v_g$  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; $\gamma_e = A_m + B(N/V) + C(N/V)^2$  是载流子

非线性损耗速率,  $A_m$  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. 如选取适当的参数, 可使时间  $\tau \rightarrow \infty$  时, 绝对值  $|E_i - E_{ri}| \rightarrow 0$ ,  $|\phi_i - \phi_{ri}| \rightarrow 0$ ,  $|N_i - N_{ri}| \rightarrow 0$  ( $i = 1, 2, \dots, N+1$ ), 即接收系统、中继器系统和发射系统就实现了同步.

### 3. 系统串联同步

#### 3.1. 系统间混沌同步的证明

混沌保密通信的必要条件是接收系统和发射系统有相同的参数. 所以, 激光器混沌接收系统、中继器系统和发射系统有相同的参数是非常必要的, 这里设它们相互对应的参数都是相同的. 从方程 (1a) 和 (1b) 可知, 如发射系统和中继器系统 1 同步, 则中继器系统 1 将具有和发射系统相同的函数形式, 并具有与发射系统相同的功能. 如中继器系统 2 和中继器系统 1 同步, 则中继器系统 2 将具有和中继器系统 1 相同的函数形式, 并同时具有与发射系统相同的功能. 依次类推, 如中继器系统  $N$  和接收系统同步, 最后发射系统将和接收系统同步. 因此, 要证明发射系统、中继器系统及接收系统的同步, 只需证明发射系统与中继器 1 相互间达到混沌同步即可.

由于发射系统和中继器系统具有相同的参数, 所以反馈同步系统 (1a) 的稳定态有相同的解, 即在稳定态时有  $E_{i0} = E_{ri0} = E_0$ ,  $\phi_{i0} = \phi_{ri0} = \phi_0$ ,  $N_{i0} = N_{ri0} = N_0$ . 由 (1a) 式得到一次近似下的同步误差方程

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \alpha(E_i - E_{ri}) \\ \alpha(\phi_i - \phi_{ri}) \\ \alpha(N_i - N_{ri}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & B_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha(E_i - E_{ri}) \\ \alpha(\phi_i - \phi_{ri}) \\ \alpha(N_i - N_{ri}) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

式中,

$$B_{11} = A_{11} - f/\tau_L,$$

$$B_{22} = A_{22} - f/\tau_L,$$

$$A_{11} = \frac{1}{2}(G_0 - \gamma + E_0 G_E),$$

$$A_{12} = \frac{k}{\tau_L} E_m \sin(\phi_m - \phi_0),$$

$$A_{13} = \frac{1}{2} E_0 G_N,$$

$$A_{21} = \frac{1}{2} \beta_c G_E - \frac{k}{\tau_L} \frac{E_m}{E_0^2} \sin(\phi_m - \phi_0),$$

$$A_{22} = -\frac{k}{\tau_L} \frac{E_m}{E_0} \cos(\phi_m - \phi_0),$$

$$A_{23} = \frac{1}{2} \beta_c G_N,$$

$$A_{31} = -2G_0 E_0 V_p - E_0^2 V_p G_E,$$

$$A_{32} = 0,$$

$$A_{33} = -\gamma_{e0} - N_0 \gamma_{eN} - E_0^2 V_p G_N,$$

$$G_N = \left. \frac{\partial G}{\partial N} \right|_{N=N_0, E=E_0},$$

$$G_E = \left. \frac{\partial G}{\partial E} \right|_{N=N_0, E=E_0},$$

$$\gamma_{eN} = \left. \frac{\partial \gamma_e}{\partial N} \right|_{N=N_0}.$$

设  $\lambda$  为 (2) 式的特征值, 其特征方程为

$$\begin{vmatrix} B_{11} - \lambda & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & B_{22} - \lambda & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} - \lambda \end{vmatrix} = 0. \quad (3)$$

如特征值方程 (3) 的全部特征值  $\lambda$  都具有负实部, 则方程 (2) 将有稳定的解, 其零点将是全局稳定的, 就有  $E_{ri} = E_i$ ,  $\phi_{ri} = \phi_i$ ,  $N_{ri} = N_i$ , 即实现同步. 数值计算表明, 当  $0.01 < f < 1$  时, 特征值方程 (3) 全部特征值  $\lambda$  都具有负实部, 即适当调节  $f$  参数, 就可以使  $E_{ri} = E_i$ ,  $\phi_{ri} = \phi_i$ ,  $N_{ri} = N_i$ , 即实现发射系统与中继器系统 1 的同步.

#### 3.2. 数值模拟

定义绝对值同步误差

$$\omega_{t,i} = |E_i(t) - E_{ri}(t)|, \quad (4a)$$

$$\omega_{j,i} = |E_{rj}(t) - E_{ri}(t)|, \quad (4b)$$

式中,  $\cdot$  表示平均值,  $i = 1, 2, \dots, N+1$  和  $j = 1, 2, \dots, N+1$  且  $j \neq i$ . 数值分析时取表 1 所列的参数.

为了简便, 这里仅给出有一个中继器系统的数值分析结果. 图 2 是发射系统、中继器系统和接收系统的激光混沌吸引子 (由方程 (1) 数值模拟得到, 参量取  $k = 0.03$ ,  $f = 0$ ,  $E_{ms} = E_0 = 0.126E_s$ , 以下所有数值模拟中变量单位已归一化), 由于取初值不一样, 它们的相空间轨迹也是完全不一样的. 当  $f = 0.054$  和  $f = 0.54$  时, 从图 3 可以看到接收系统、中继器系统和发射系统相互间分别实现了同步. 图 3 (a)(c)(e) 显示大约在 6 ns 以后实现了同步, 图 3 (b)(d)(f) 显示大约在 4 ns 以后实现了同步. 显

然  $f$  值较大,达到同步的时间就短.数值计算进一步表明,同步是一个渐近过程,在几十纳秒以后同步误差才有可能达到零值,各个系统才能达到完全的同步.

表 1 激光器参量取值

参 量	取 值
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 $a_m/\text{cm}^{-1}$	29
腔外光子损耗 $a_{im}/\text{cm}^{-1}$	20
载流子密度 $n_{th}/\text{cm}^{-3}$	$1.2 \times 10^{18}$
非辐射复合速率 $A_m/\text{s}^{-1}$	$1.0 \times 10^8$
辐射复合因子 $B/\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$1.2 \times 10^{-10}$
俄歇复合因子 $C/\text{cm}^6 \cdot \text{s}^{-1}$	$3.5 \times 10^{-29}$
饱和光子场强 $E_s/\text{m}^{-3/2}$	$1.6619 \times 10^{11}$
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 $\Delta\omega_m/\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	$2\pi \times 10^9$
驱动电流 $I/\text{mA}$	25

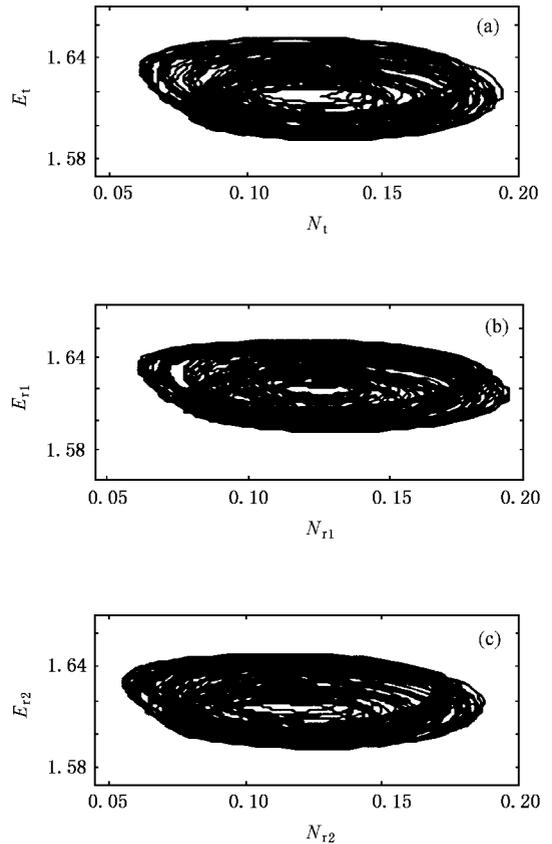


图 2 激光混沌吸引子 (a)发射系统 (b)中继器系统 (c)接收系统

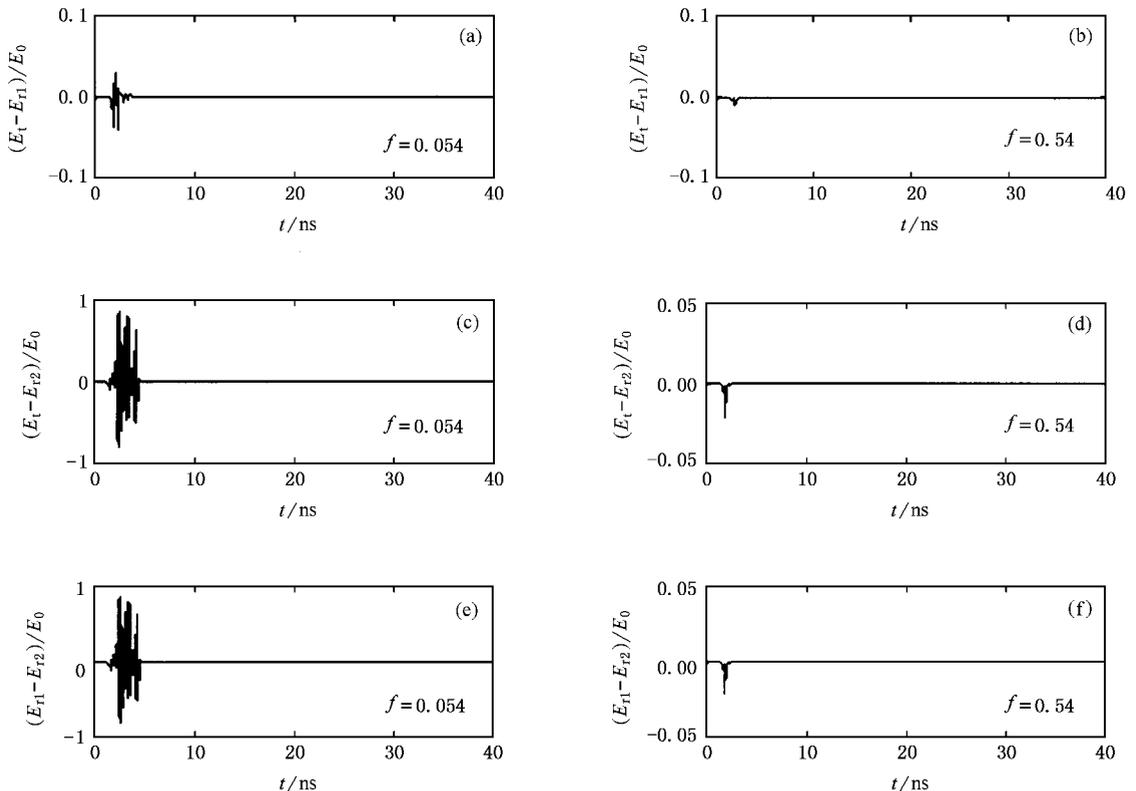


图 3 系统间的同步 (a)和(b)发射系统和中继器系统同步 (c)和(d)接收系统和中继器系统同步 (e)和(f)发射系统和接收系统同步

## 4. 中继器系统在混沌编码通信中的应用

有中继器系统的混沌编码和无中继器系统的混沌编码是非常相似的. 设调制信号为  $S(t)$ , 且隐藏在混沌波中, 它们同时发射并被中继器系统 1 接收并解调出信号  $S(t)$ ; 接着使解调再生的信号  $S(t)$  隐藏在在中继器系统 1 所发射的混沌波中, 然后它们一同发射给中继器系统 2 接收, 依次类推, 直到接收系统终端. 数值模拟时取调制发射信号  $S(t)$  为正弦函数, 振幅为  $0.5\% E_0$ , 频率为 200 MHz, 参量  $f = 0.54$ . 数值结果如图 4 所示, 图 4(a)(b)(c) 分别表

示发射出的混沌波、信号隐藏在发射波中、信号隐藏在在中继器波中. 图 4(d)(e)(f) 分别表示中继器系统和发射系统同步解码、接收系统和发射系统同步解码、接收系统和中继器系统同步解码. 显然, 同步误差叠加在信号上, 同步误差分别为  $\omega_{1,1} = 1.58 \times 10^{-4}$ ,  $\omega_{1,2} = 2.76 \times 10^{-4}$  和  $\omega_{1,2} = 1.39 \times 10^{-4}$ . 从图 4 可以发现, 利用中继器系统解码其同步误差最小. 图 4(g)(h)(i) 是滤波后经解码的信号, 它们分别对应图 4(d)(e)(f) 其中虚线是原始信号, 实线是解码滤波后的信号, 它们已相对于原始信号向下平移了  $0.5 \times 10^{-3}$ . 从图 4 可以看到, 由于使用中继器系统, 叠加在解调出来信号上的同步误差明显减小, 解码的质量明显提高了.

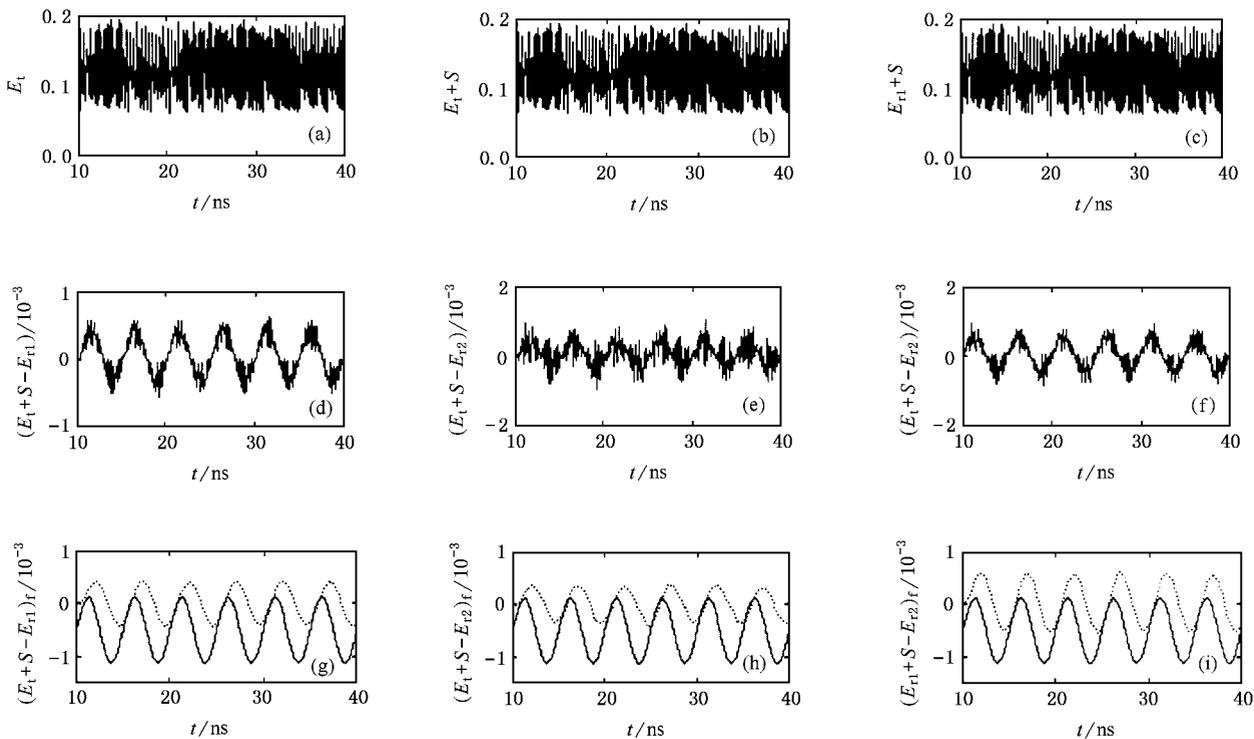


图 4 模拟通信的数值结果 (a)混沌波 (b)信号隐藏在发射波中 (c)信号隐藏在在中继器波中 (d)中继器系统和发射系统同步解码 (e)接收系统和发射系统同步解码 (f)接收系统和中继器系统同步解码 (g)(h)(i)是滤波解码后的信号, 分别对应(d)(e)(f)

图 5 是数字信号解调结果(其中编码信号方波振幅为  $0.5\% E_0$ , 速率为 200 Mb/s). 图 5(a)(c)(e) 分别表示中继器系统和发射系统同步解码、接收系统和发射系统同步解码、接收系统和中继器系统同步解码. 图 5(b)(d)(f) 是滤波解码后的结果. 由信号所产生的同步误差分别为  $\omega_{1,1} = 2.58 \times 10^{-4}$ ,  $\omega_{1,2}$

$= 4.32 \times 10^{-4}$  和  $\omega_{1,2} = 2.22 \times 10^{-4}$ . 显然, 方波信号产生的同步误差要比模拟信号产生的同步误差大, 因为方波信号变化比模拟信号突然, 对混沌解码的影响更加明显. 同样, 从图 5 可以看到, 由于使用中继器系统, 叠加在解调出来信号上的同步误差明显减小了, 数字信号解码的质量也明显得到改善、提高.

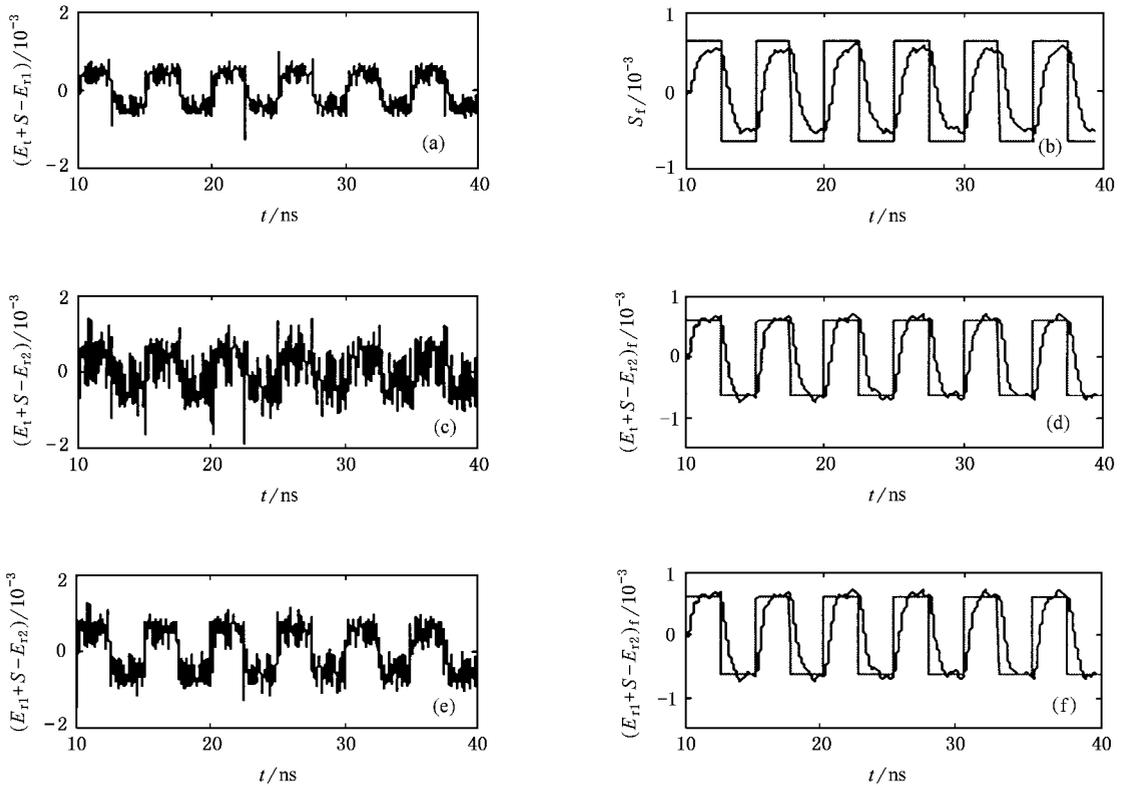


图5 数字通信的信号解调结果 (a)中继系统和发射系统同步解码 (c)接收系统和发射系统同步解码 (e)接收系统和中继系统同步解码 (b)(d)(f)是滤波解码后的结果,分别对应(a)(c)(e)其中的方波是原始信号

## 5. 调制带宽

中继器系统须有较大的调制带宽,以满足不同通信速率的要求.类似于上述编码解码的具有 20 GHz 频率、振幅  $1\% E_0$  的正弦信号和 20 Gb/s 速率、振幅  $1\% E_0$  的数字信号的数值模拟结果如图 6 所示,正弦信号所产生的同步误差分别为  $\omega_{1,1} = 3.36 \times 10^{-4}$ ,  $\omega_{1,2} = 3.93 \times 10^{-4}$  和  $\omega_{1,2} = 1.19 \times 10^{-4}$ . 数字信号所产生同步误差分别为  $\omega_{1,1} = 4.69 \times 10^{-4}$ ,  $\omega_{1,2} = 5.46 \times 10^{-4}$  和  $\omega_{1,2} = 1.87 \times 10^{-4}$ . 这里需要说明的是,图 6 并没有进行滤波,但解调出来的信号还是比较好.在没有使用滤波器的条件下能有比较好的解码结果,其原因还要作进一步的研究.这里给出同步误差随调制频率(正弦信号振幅是  $1\% E_0$ )变化关系(表 2).从表 2 可以发现,高频率(20 GHz)调制同步误差要比低频率(0.1 GHz)调制的同步误差小,而在中频率(1 GHz)调制时同步误差最大.从表 2 还可以看出,由于中继器系统的使用,每个频率波

段所产生的同步误差明显地下降了.同样,还给出了同步误差随调制数字信号速率(数字信号振幅为  $1\% E_0$ )变化关系(表 3),由于中继器系统的使用,同步误差也明显地下降了.由此可见,该中继器系统可以满足较大带宽范围内混沌模拟和数值通信的需要.

表 2 同步误差和调制频率的关系

频率/GHz	20	15	10	1	0.5	0.1
$\omega_{1,1}/10^{-4}$	3.36	4.42	5.56	6.04	4.40	3.54
$\omega_{1,2}/10^{-4}$	3.93	5.69	8.69	10.7	7.34	5.08
$\omega_{1,2}/10^{-4}$	1.19	1.99	3.37	5.02	3.35	2.69

表 3 同步误差和调制速率的关系

速率/Gb·s <sup>-1</sup>	20	15	10	1	0.5	0.1
$\omega_{1,1}/10^{-4}$	4.69	5.82	6.76	7.02	5.10	4.57
$\omega_{1,2}/10^{-4}$	5.46	6.62	9.61	11.9	8.06	6.67
$\omega_{1,2}/10^{-4}$	1.87	2.43	4.72	6.72	4.54	3.21

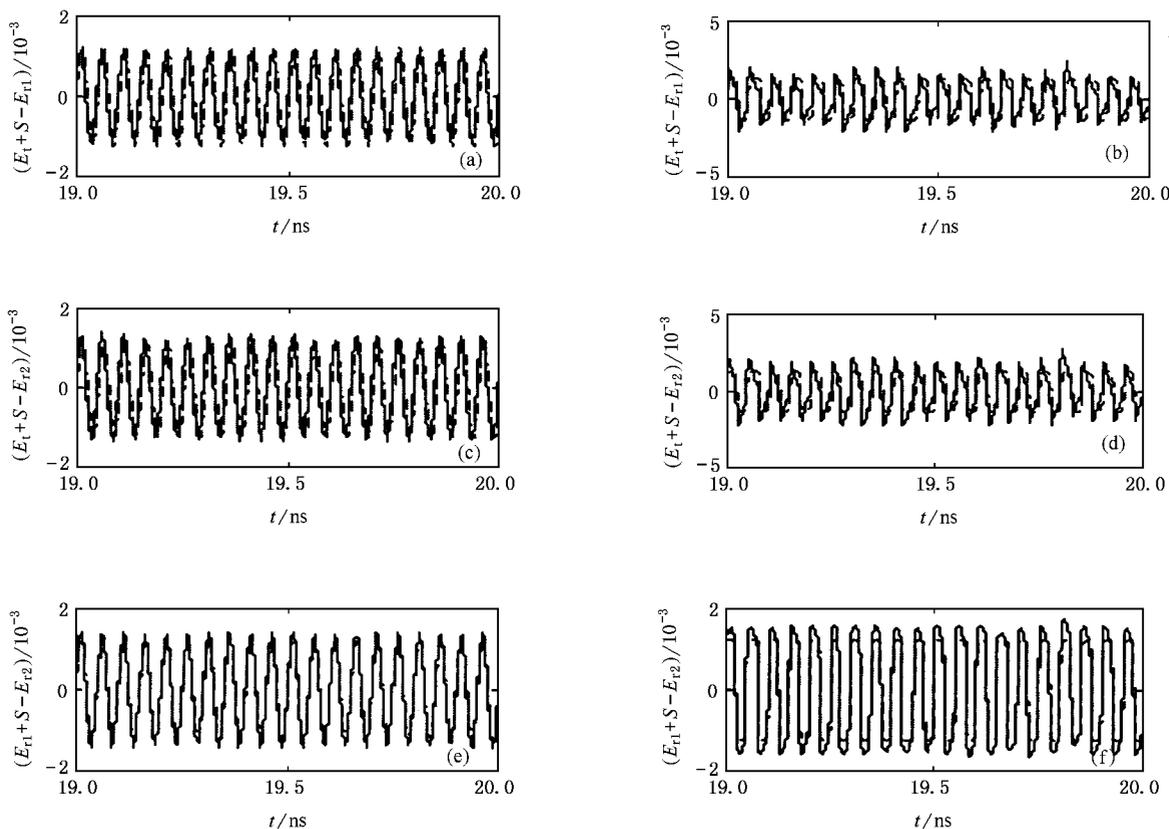


图6 混沌高速模拟信号和数字信号通信的解码 (a)(c)(e)是模拟信号解码 (b)(d)(f)是数字信号解码,其中的虚线是原始信号

### 6. 参数失配

中继器系统应准许在一定范围内有参数失配,系统的实际应用才有可能.数值模拟结果如图7和图8所示,其中  $r_l$ ,  $r_r$  和  $r_k$  分别是驱动电流、光子损耗速率和光注入指数的参数失配比值,它们的变化范围为  $-0.1\%—0.1\%$ .图7是发射系统和中继器

系统驱动的电以及光子损耗速率的参数失配所产生的同步误差.从图7可以看出,光子损耗速率的参数失配对同步误差影响比电流参数失配对同步误差的影响要大.图8是中继器系统和接收系统驱动电流以及光注入指数的参数失配对同步误差的影响.由图8可见,光注入指数的参数失配对同步误差影响比电流参数失配对同步误差的影响要小.与图7相比较,图8显示的同步误差较小.综上所述,中继

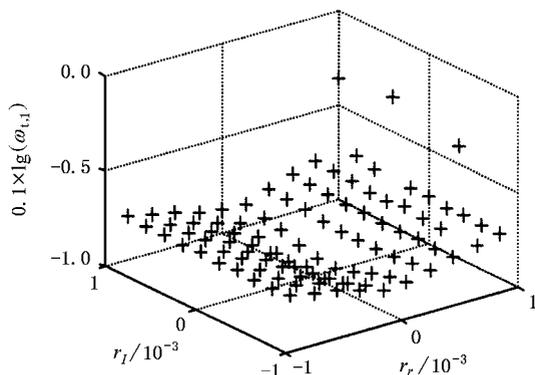


图7 同步误差随电流和光子损耗参数失配的关系

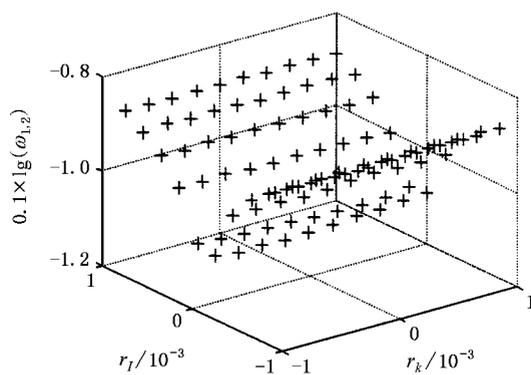


图8 同步误差随电流和光注入参数失配的关系

器系统还是准许有一定的参数失配,这表明该中继器系统确实具有一定的实际应用价值.

## 7. 结 论

本文提出半导体激光器混沌全光中继器系统模型,数值模拟实现了发射系统、中继器系统和接收系

统的同步.由于使用中继器系统,叠加在解调出来信号上的同步误差明显地减小,解码出来的信号质量明显地得到改善和提高,该中继器系统还可以满足较大带宽混沌通信的要求,并且系统准许有一定的参数失配.由于混沌中继器设想的提出,使得远程混沌保密通信以及其他远程混沌通信的实现就有了可能.

- 
- [ 1 ] Pecora L M , Carroll T L 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 821
- [ 2 ] Pecora L M , Carroll T L 1993 *Phys. Rev. Lett.* **71** 3103
- [ 3 ] Douglas R F 1994 *IEEE Trans. Circuits Syst. II* **40** 660
- [ 4 ] Li Y , Yan B J , Lin H B *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1994( in Chinese ) [ 李 月、杨宝俊、林红波等 2005 物理学报 **54** 1994 ]
- [ 5 ] He Y , Jiang Y M , Shen Y *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1071( in Chinese ) [ 何 阅、姜玉梅、申 影等 2005 物理学报 **54** 1071 ]
- [ 6 ] Li M , Ma X K , Dai D *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1084( in Chinese ) [ 李 明、马西奎、戴 栋等 2005 物理学报 **54** 1084 ]
- [ 7 ] Ma W Q , Yang C H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1064( in Chinese ) [ 马文麒、杨承辉 2005 物理学报 **54** 1064 ]
- [ 8 ] 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 ]
- [ 9 ] Tao J W , Shi Y W , Chang W X 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1682( in Chinese ) [ 陶建武、石要武、常文秀 2004 物理学报 **53** 1682 ]
- [ 10 ] Li J F , Li N , Lin H 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1694( in Chinese ) [ 李建芬、李 农、林 辉 2004 物理学报 **53** 1694 ]
- [ 11 ] Colet P , Roy R 1994 *Opt. Lett.* **19** 2056
- [ 12 ] Wang Y G , Ma X Y , Fu S G *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1811 ( in Chinese ) [ 王勇刚、马晓宇、付圣贵等 2004 物理学报 **53** 1811 ]
- [ 13 ] Wu L , Zhu S Q 2003 *Chin. Phys.* **12** 300
- [ 14 ] Yan S L , Chi Z Y , Chen W J *et al* 2002 *Acta Electron. Sin.* **30** 1663( in Chinese ) [ 颜森林、迟泽英、陈文建等 2002 电子学报 **30** 1663 ]
- [ 15 ] Yan S L 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2000( in Chinese ) [ 颜森林 2005 物理学报 **54** 2000 ]
- [ 16 ] Dimitris K , Apostolos A , Syviriadis D J 2003 *Lightwave Technol.* **21** 750
- [ 17 ] Hong Y , Shore K A 1999 *IEEE Quantum Electron.* **35** 32
- [ 18 ] Troger J , Nicati P A 1999 *IEEE Quantum Electron.* **35** 1713
- [ 19 ] Yun L , Perter D , Yoshiro T *et al* 2003 *IEEE Quantum Electron.* **39** 269
- [ 20 ] Mustapha T , Andrei G V , Paul M 2003 *IEEE Quantum Electron.* **39** 216

# Theoretical study of cascade synchronization in chaotic lasers and chaotic repeater

Yan Sen-Lin<sup>1,2)</sup> Wang Sheng-Qian<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> *School of Communication and Electronic Engineering, Jiangxi Science and Technology Normal University, Nanchang 330013, China*

<sup>2)</sup> *Department of Physics, Nanjing Xiaozhuang College, Nanjing 210017, China*

( Received 13 April 2005 ; revised manuscript received 12 December 2005 )

## Abstract

The chaotic repeater is proposed for long-haul chaotic communications. The physical model of all optical chaotic semiconductor laser repeater is presented. The synchronization of chaos repeater system is theoretically demonstrated. Chaos synchronization of a transmitter, a repeater and a receiver is numerically achieved. Relationships of synchronization error and synchronization time with the system feedback coefficient are analyzed. Application of the repeater system is numerically simulated in chaotic laser communications. Chaotic communications and synchronization error analysis with a sinusoidal modulation signal of frequency 0.2 GHz and a digital signal of 0.2 Gb/s rate are given respectively to illustrate that chaotic repeater can improve the decoding quality in chaotic laser communications. The repeater bandwidth, chaotic communications with a high rate digital signal of 20 Gb/s and synchronization error are analyzed respectively. Numerical results of a sinusoidal modulation signal of bandwidth from 0.1 to 20 GHz, and a digital signal of modulation bandwidth from 0.1 to 20 Gb/s are obtained, and numerical relationship of synchronization error to the modulation frequency is also shown. The system parameter mismatch is also numerically analyzed.

**Keywords** : chaos, synchronization, laser, repeater

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