

# 基于光电负反馈的激光混沌串联同步系统研究<sup>\*</sup>

廖健飞 夏光琼 吴加贵 许 黎 吴正茂<sup>†</sup>

(西南大学物理学院, 重庆 400715)

(2006 年 12 月 29 日收到, 2007 年 3 月 21 日收到修改稿)

提出了一种新的混沌中继系统, 该系统基于光电负反馈的激光混沌串联同步. 对该系统的同步性以及激光器内部参数失配对其同步性的影响进行了研究, 并与基于光反馈的激光混沌串联同步系统进行了比较. 研究结果表明: 当系统参量满足一定条件时, 该系统能实现完全同步; 当激光器内部参数失配时, 其混沌同步性会受到一定的影响, 但该系统的混沌同步性对参数失配的容忍性要比基于光反馈的系统好得多.

关键词: 光电负反馈, 混沌同步, 串联, 参数失配

PACC: 0545, 4255P, 4265

## 1. 引 言

由于光混沌的动力学行为十分复杂且对参数比较敏感, 因此光混沌在保密通信应用中受到人们的广泛关注<sup>[1-23]</sup>. 在远程混沌通信系统中, 光混沌信号在传输过程中会产生衰变, 并且这种衰变会随着传输距离的增加而增大, 这样会导致信号在接收端难于提取. 因此, 为了提高混沌通信系统性能, 需要在远程混沌通信系统中建立混沌中继系统<sup>[11]</sup>. 混沌中继系统可以对信号进行放大、整形和再生.

混沌中继可通过激光混沌串联同步来实现的. 文献 [11] 对外部光注入半导体激光器的激光混沌全光中继器系统进行了研究, Lee 等人以及 Sivaprakasam<sup>[12, 13]</sup> 等人提出了基于光反馈的激光混沌串联同步. 但由于光反馈混沌的同步性对激光器参数失配太敏感, 从实验结果可以看出, 同步的质量不是很好. 本文提出了一种新的混沌中继系统, 该系统是基于光电负反馈的激光混沌串联同步, 并对其同步性及激光器内部参数失配对同步性的影响进行了研究.

## 2. 系统模型

基于光电负反馈环的激光混沌串联同步系统模

型如图 1 所示. 分束器 (BS) 把发射激光器发出的光分成两部分, 一部分经光电探测器 1 (PD<sub>1</sub>) 和宽带放大器 1 (A<sub>1</sub>) 后反馈回发射激光器 (TL), 使其产生混沌; 另一部分经光电探测器 2 (PD<sub>2</sub>) 和宽带放大器 2 (A<sub>2</sub>) 后注入到中间激光器 (IL). 中间激光器 (IL) 发出的光经过光电探测器 3 (PD<sub>3</sub>) 和宽带放大器 3 (A<sub>3</sub>) 后注入到接收激光器. 在此过程中, 光电探测器把激光器产生的光信号转化成电信号, 并用放大器来调整反馈强度和注入强度. 其中, 中间激光器 (IL) 和接收激光器 (RL) 均采用了开环装置. 模型中的虚线表示光信号传输, 实线表示电信号传输.  $\tau$  为发射激光器的反馈延迟时间,  $\tau_1$  为发射激光器到中间激光器的传输时间,  $\tau_2$  为中间激光器到接收激光器的传输时间.

为了使该系统中的三个激光器达到零时间滞后的完全同步, 除了三个激光器的内部参数相同外, 还必须满足三个由光电探测器和放大器组成的系统具有相同的响应函数  $f^L(t) = f^R(t) = f^T(t)$ ; 三个激光器的偏置电流密度相等; 发射激光器的反馈强度与中间激光器、接收激光器的注入强度相等; 发射激光器的反馈延迟时间与发射激光器到中间激光器、中间激光器到接收激光器的传输时间相等.

<sup>\*</sup> 重庆市自然科学基金和西南大学高新技术培育基金资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: zmwu@swu.edu.cn

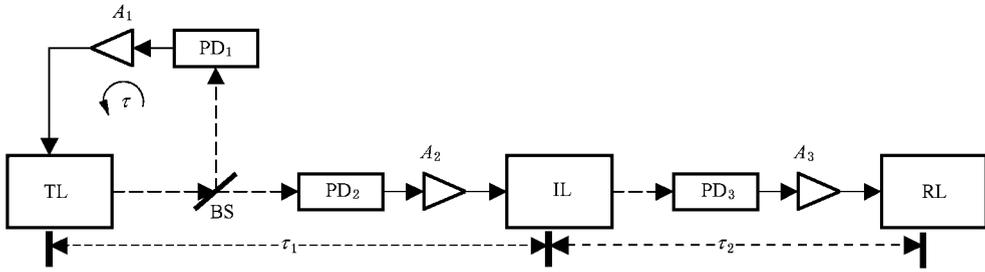


图1 光电负反馈的激光混沌串联同步模型(其中 TL 为发射激光器 ;IL 为中间激光器 ;RL 为接收激光器 ;BS 为分束器 ;PD<sub>1</sub>—PD<sub>3</sub> 为光电探测器 ;A<sub>1</sub>—A<sub>3</sub> 为宽带放大器)

### 3. 理论分析

发射激光器,中间激光器和接收激光器的动力学行为可以使用下列速率方程组描述<sup>[14]</sup>:

$$\frac{dS_T}{dt} = -\gamma_c S_T + \Gamma g_T S_T + 2\sqrt{S_0 S_T} F_s^T, \quad (1)$$

$$\frac{dN_T}{dt} = \frac{J_T}{ed_T} \left[ 1 + \xi \frac{S_T(t - \tau) - S_0}{S_0} \right] - \gamma_s N_T - g_T S_T, \quad (2)$$

$$\frac{dS_I}{dt} = -\gamma_c S_I + \Gamma g_I S_I + 2\sqrt{S_0 S_I} F_s^I, \quad (3)$$

$$\frac{dN_I}{dt} = \frac{J_I}{ed_I} \left[ 1 + \sigma_1 \frac{S_I(t - \tau_1) - S_0}{S_0} \right] - \gamma_s N_I - g_I S_I, \quad (4)$$

$$\frac{dS_R}{dt} = -\gamma_c S_R + \Gamma g_R S_R + 2\sqrt{S_0 S_R} F_s^R, \quad (5)$$

$$\frac{dN_R}{dt} = \frac{J_R}{ed_R} \left[ 1 + \sigma_2 \frac{S_R(t - \tau_2) - S_0}{S_0} \right] - \gamma_s N_R - g_R S_R, \quad (6)$$

其中,下标 T, I, R 分别代表发射激光器、中间激光器、接收激光器,  $S$  是激光腔内光子数密度,  $S_0$  为激光器自由运转时的腔内光子数密度,  $N$  是载流子数密度,  $J$  为偏置电流密度,  $g$  为光学增益,  $\xi$  为发射激光器的反馈系数,  $\sigma_1$  为中间激光器的注入系数,  $\sigma_2$  为接收激光器的注入系数,  $\Gamma$  为限制因子,  $\gamma_c$  为腔内光子衰减速率,  $\gamma_s$  为载流子衰减速率,  $e$  为电子电量,  $d$  为激活层厚度,  $F_s$  为随机噪声。

从方程(1)–(6)可以看出,当参数  $\xi = \sigma_1 = \sigma_2$ , 且忽略随机噪声  $F_s$ , 方程具有同步解。即

$$S_I(t - \tau) = S_I(t - \tau_1),$$

$$S_R(t - \tau) = S_I(t - \tau_2), \quad (7)$$

$$N_R(t) = N_I(t - \tau_2 + \tau) = N_I(t + 2\tau - \tau_1 - \tau_2). \quad (8)$$

这里,当  $\tau = \tau_1 = \tau_2$  时,三个激光器可实现无时间滞后的同步。

为便于计算,我们把速率方程(1)–(6)转化成归一化的速率方程且忽略随机噪声:

$$\frac{d\tilde{S}_T}{dt} = \frac{\gamma_c \gamma_n}{\tilde{J}_T \gamma_s} \tilde{N}_T (\tilde{S}_T + 1) - \gamma_p \tilde{S}_T (\tilde{S}_T + 1), \quad (9)$$

$$\frac{d\tilde{N}_T}{dt} = \gamma_s \xi (1 + \tilde{J}_T) \tilde{S}_T(t - \tau) - \gamma_s \tilde{N}_T - \gamma_s \tilde{J}_T \tilde{S}_T - \gamma_n \tilde{N}_T (1 + \tilde{S}_T) + \frac{\gamma_s \gamma_p}{\gamma_c} \tilde{J}_T \tilde{S}_T (1 + \tilde{S}_T), \quad (10)$$

$$\frac{d\tilde{S}_I}{dt} = \frac{\gamma_c \gamma_n}{\tilde{J}_I \gamma_s} \tilde{N}_I (\tilde{S}_I + 1) - \gamma_p \tilde{S}_I (\tilde{S}_I + 1), \quad (11)$$

$$\frac{d\tilde{N}_I}{dt} = \gamma_s \sigma_1 (1 + \tilde{J}_I) \tilde{S}_I(t - \tau_1) - \gamma_s \tilde{N}_I - \gamma_s \tilde{J}_I \tilde{S}_I - \gamma_n \tilde{N}_I (1 + \tilde{S}_I) + \frac{\gamma_s \gamma_p}{\gamma_c} \tilde{J}_I \tilde{S}_I (1 + \tilde{S}_I), \quad (12)$$

$$\frac{d\tilde{S}_R}{dt} = \frac{\gamma_c \gamma_n}{\tilde{J}_R \gamma_s} \tilde{N}_R (\tilde{S}_R + 1) - \gamma_p \tilde{S}_R (\tilde{S}_R + 1), \quad (13)$$

$$\frac{d\tilde{N}_R}{dt} = \gamma_s \sigma_2 (1 + \tilde{J}_R) \tilde{S}_R(t - \tau_2) - \gamma_s \tilde{N}_R - \gamma_s \tilde{J}_R \tilde{S}_R - \gamma_n \tilde{N}_R (1 + \tilde{S}_R) + \frac{\gamma_s \gamma_p}{\gamma_c} \tilde{J}_R \tilde{S}_R (1 + \tilde{S}_R). \quad (14)$$

方程(9)–(14)中归一化的变量定义为如下:  $\tilde{S} \equiv (S - S_0) / S_0$ ,  $\tilde{N} \equiv (N - N_0) / N_0$ ,  $\tilde{J} \equiv (J / ed - \gamma_s N_0) / (\gamma_s N_0)$  其中  $S_0, N_0$  分别表示激光器自由运转时腔内的光子数密度和载流子数密度。

## 4. 结果与讨论

### 4.1. 串联激光器的混沌同步

采用四阶龙格-库塔法对速率方程(9)–(14)进行数值求解. 计算中所用的数据为  $\gamma_c = 2.4 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$ ,  $\gamma_s = 1.458 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ ,  $\gamma_n = 3\bar{J} \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ ,  $\gamma_p = 3.6\bar{J} \times 10^9$

$\text{s}^{-1}$ ,  $\xi = \sigma_1 = \sigma_2 = -0.1$ ,  $\tau = \tau_1 = \tau_2$  和  $\bar{J} = 1/3$ . 激光器自由运转时的弛豫共振频率为  $f_r = (\gamma_c \gamma_n + \gamma_s \gamma_p)^{1/2} / 2\pi$ , 把延迟时间  $\tau, \tau_1, \tau_2$  对  $1/f_r$  进行归一化后为  $\hat{\tau} = \tau f_r, \hat{\tau}_1 = \tau_1 f_r, \hat{\tau}_2 = \tau_2 f_r$ , 其中  $\hat{\tau} = \hat{\tau}_1 = \hat{\tau}_2 = 6.6$ . 在未考虑噪声干扰的情况下, 图 2 给出了 TL, IL, RL 的瞬态波形图、功率谱和相图. 从图中可以看出三个激光器间可以实现非常好的同步.

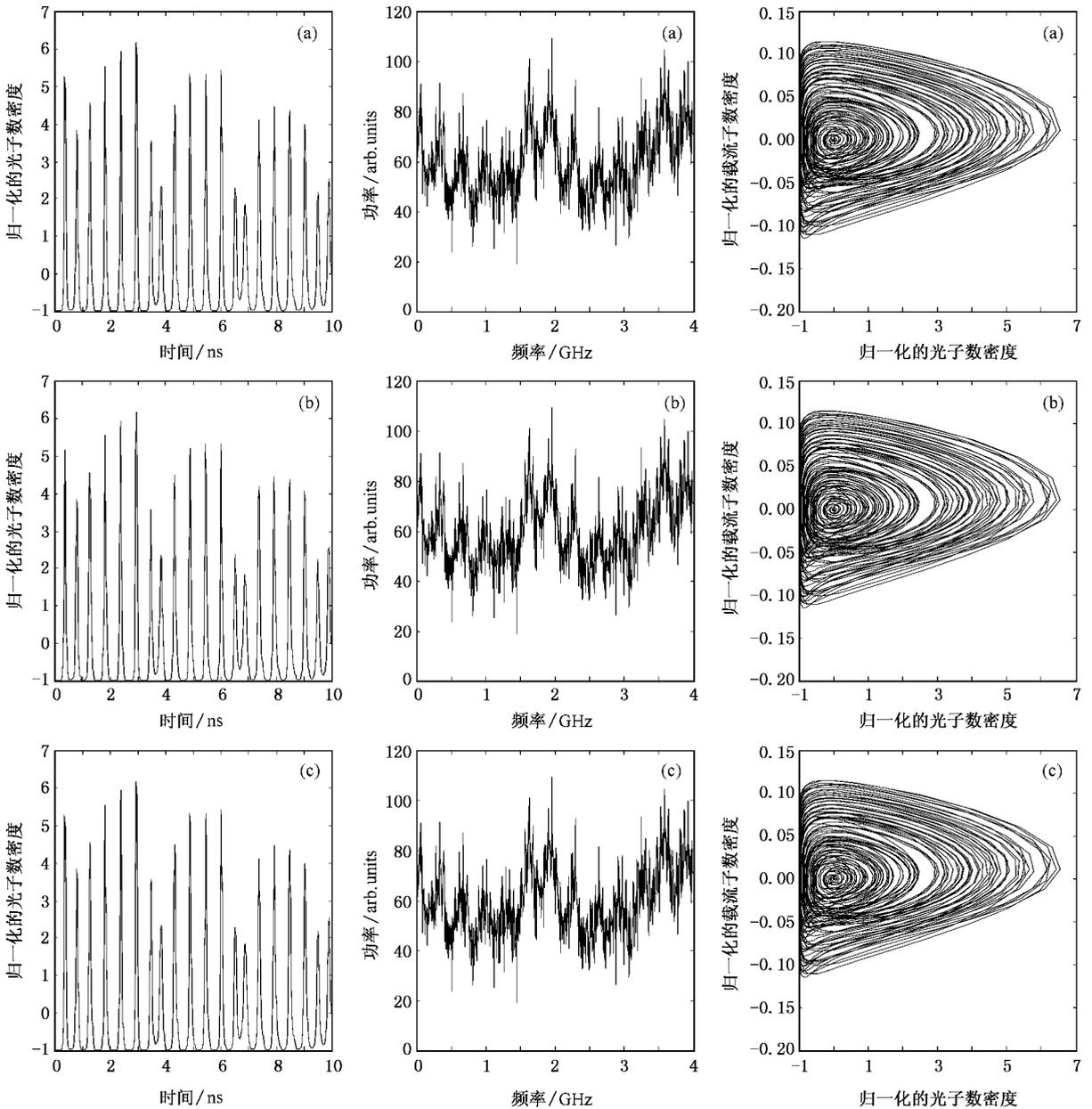


图 2 TL (a), IL (b), RL (c) 输出的瞬态波形、功率谱及相图

为了更好地描述 TL, IL 和 RL 三个激光器之间同步质量的好坏, 引入关联函数  $\rho_c(\Delta t)$  来表示<sup>[15]</sup>:

$$\rho_c(\Delta t) = \frac{[S^T(t) - S^T(t)] [S^R(t + \Delta t) - S^R(t)]}{|S^T(t) - S^T(t)|^{1/2} |S^R(t) - S^R(t)|^{1/2}} \quad (15)$$

$$\rho_2(\Delta t) = \frac{[S^I(t) - S^I(t) \parallel S^I(t + \Delta t) - S^I(t)]}{|S^I(t) - S^I(t)|^{2/2} |S^I(t) - S^I(t)|^{2/2}}, \tag{16}$$

$$\rho_3(\Delta t) = \frac{[S^I(t) - S^I(t) \parallel S^R(t + \Delta t) - S^R(t)]}{|S^I(t) - S^I(t)|^{2/2} |S^R(t) - S^R(t)|^{2/2}}, \tag{17}$$

这里  $\Delta t$  表示两混沌波形的时移,  $\rho_1(\Delta t)$  表示发射激光器和接收激光器的关联函数的时间序列,  $\rho_2(\Delta t)$  表示发射激光器和中间激光器的关联函数的时间序列,  $\rho_3(\Delta t)$  表示中间激光器和接收激光器

的关联函数的时间序列.  $\rho$  值越大, 同步质量越高;  $\rho$  值为 1 时, 系统完全同步. 对方程 (15)–(17) 进行数值求解, 结果如图 3 所示. 图中 (a), (b), (c) 分别表示  $\rho_1(\Delta t)$ ,  $\rho_2(\Delta t)$ ,  $\rho_3(\Delta t)$ . 从这三幅图中可以看出三个激光器之间的同步质量与时移  $\Delta t$  有密切关系. 当时移  $\Delta t = 0$  时,  $\rho_1(0) = \rho_2(0) = \rho_3(0) = 1$ , 即三个激光器实现零时延完全同步. 当时移  $\Delta t$  不为零时, 其同步性明显变差.

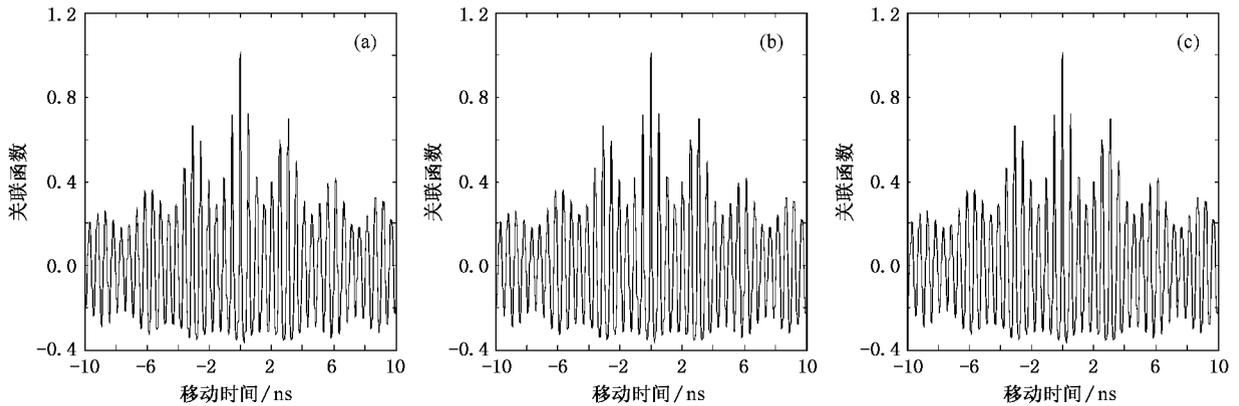


图 3 TL 和 RI (a), TL 和 II (b), IL 和 RI (c) 的关联函数的时间序列

### 4.2. 内部参数失配对系统同步性能的影响

要使 TL, IL 和 RL 达到精确的同步, 要求三个激光器的参数完全一致. 虽然外部参数  $J, \xi, \sigma$  等比较容易控制, 但内部参数受激光器本身结构以及环境的影响, 在实际应用中不易准确控制, 难以达到完全一致, 因此有必要研究参数失配对系统同步性能的影响.

为了更好地说明该系统的优越性, 我们研究了

参数失配对系统同步性能的影响, 并同时模拟了全光反馈时的参数失配对同步性的影响. 图 4 给出了当其他参数相等而光子寿命失配 1% 时的同步图; 图 5 给出了当其他参数相等而载流子寿命失配 1% 时的同步图. 两图中的 (a) 表示光电负反馈时参数失配的不同步图, 而两图中的 (b) 则表示全光反馈时参数失配的不同步图. 从这两图中我们不难发现, 参数失配对光电反馈和全光反馈时的混沌同步都有影响, 尤其在载流子衰减速率失配时对同步性的影响更大.

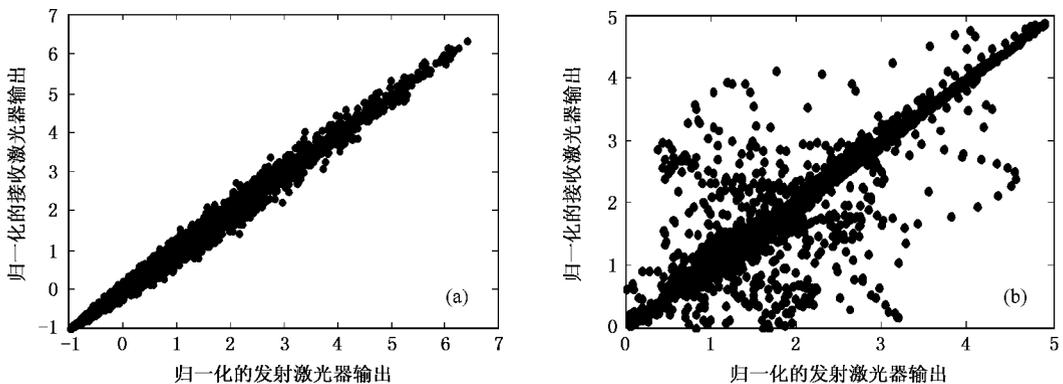


图 4 光子衰减速率失配 1% 时 TL 和 RL 的同步图 (a) 光电反馈; (b) 全光反馈

同时通过比较可明显发现,参数失配对全光反馈时的混沌同步影响更厉害,换句话说,光电反馈式混沌

同步对参数失配的容忍性更好。

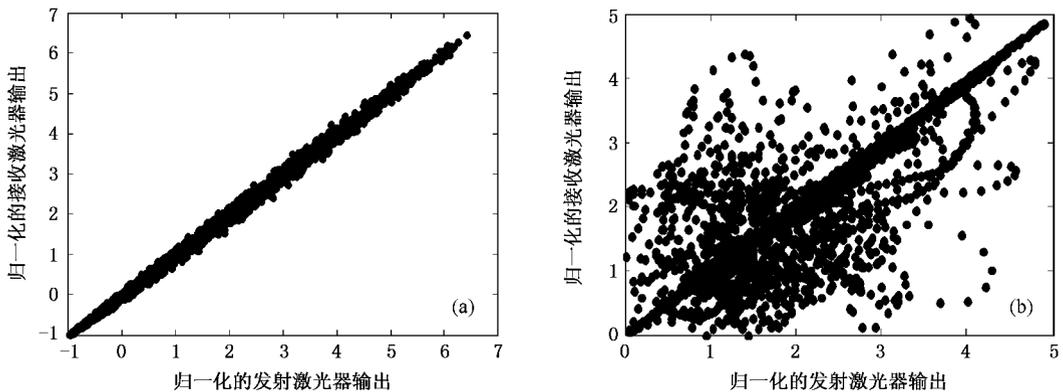


图5 载流子衰减速率失配1%时TL和RL的同步图 (a)光电反馈;(b)全光反馈

## 5. 结 论

提出了基于光电负反馈的激光混沌串联同步系统的模型,并对其同步性以及激光器内部参数失配对其同步性的影响进行了研究.研究结果表明:在一

定条件时,该模型能实现完全同步;当激光器内部参数失配时,其混沌同步性会受到一定的影响,通过与光反馈的激光混沌串联同步比较发现:该系统的混沌同步性对参数失配的容忍性要比基于光反馈的要好得多.我们希望本文所得结果对高性能远程混沌通信系统的建立能有所贡献.

- [ 1 ] Cuomo K M , Oppenheim A V , Strogatz S H 1993 *IEEE Trans. Circuits Syst.* I **40** 626
- [ 2 ] Wu J G , Wu Z M , Lin X D , Zhang Y , Zhong D Z , Xia G Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **54** 4169 ( in Chinese ) [ 吴加贵、吴正茂、林晓东、张毅、钟东洲、夏光琼 2006 物理学报 **54** 4169 ]
- [ 3 ] Van Wiggeren G D , Roy R 1998 *Science* **279** 1198
- [ 4 ] Yan S L 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2000 ( in Chinese ) [ 颜森林 2005 物理学报 **54** 2000 ]
- [ 5 ] Liu J M , Chen H F , Tang S 2002 *IEEE J. Quantum Electron.* **38** 1184
- [ 6 ] Zhong D Z , Xia G Q , Wu Z M 2004 *J. Optoelectron. & Adv. Mater.* **6** 1233
- [ 7 ] Tang S , Chen H F , Hwang S K , Liu J M 2002 *IEEE Trans. Circuits Syst.* I **49** 163
- [ 8 ] Paul J , Sivaprakasam S , Spencer P S , Shore K A 2003 *J. Opt. Soc. Am.* B **20** 497
- [ 9 ] Donati S , Mirasso C R 2002 *IEEE J. Quantum Electron.* **38** 1138
- [ 10 ] Uchida A , Rogister F , Garcia-Ojalvo J , Roy R 2005 *Prog. Opt.* **48** 203
- [ 11 ] Yan S L , Wang S Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1687 ( in Chinese ) [ 颜森林、汪胜前 2006 物理学报 **55** 1687 ]
- [ 12 ] Lee M W , Paul J , Masoller C , Shore K A 2006 *J. Opt. Soc. Am.* B **23** 846
- [ 13 ] Sivaprakasam S , Shore K A 2001 *Opt. Lett.* **26** 253
- [ 14 ] Lin F Y , Liu J M 2003 *IEEE J. Quantum Electron.* **39** 562
- [ 15 ] Tang S , Liu J M 2003 *IEEE J. Quantum Electron.* **39** 708
- [ 16 ] Yan S L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6267 ( in Chinese ) [ 颜森林 2006 物理学报 **55** 6267 ]
- [ 17 ] Kong H J , Wu Z M , Wu J G , Lin X D , Xie Y K , Xia G Q 2006 *Chinese J. Lasers* **33** 1490 ( in Chinese ) [ 孔慧君、吴正茂、吴加贵、林晓东、谢瑛珂、夏光琼 2006 中国激光 **33** 1490 ]
- [ 18 ] Colet P , Roy R 1994 *Opt. Lett.* **19** 2056
- [ 19 ] Paul J , Sivaprakasam S , Shore K A 2004 *J. Opt. Soc. Am.* B **21** 514
- [ 20 ] Li X F , Pan W , Ma D , Luo B , Zhang W L , Xiong Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5094 ( in Chinese ) [ 李孝峰、潘炜、马冬、罗斌、张伟利、熊悦 2006 物理学报 **55** 5094 ]
- [ 21 ] Zhang H J 1997 *Optical Chaos* ( Shanghai : Shanghai Science and Technology Education Press ) ( in Chinese ) [ 张洪钧 1997 光学混沌 ( 上海 : 上海科技教育出版社 ) ]
- [ 22 ] Shen K 1999 *Chaos in Optics* ( Changchun : Northeast Normal University Press ) ( in Chinese ) [ 沈柯 1999 光学中的混沌 ( 长春 : 东北师范大学出版社 ) ]
- [ 23 ] Fan W H , Tian X J , Yu Y L , Chen J F , Luo H E 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5105 ( in Chinese ) [ 范文华、田小建、于永力、陈菊芳、罗红娥 2006 物理学报 **55** 5105 ]

# Investigation on the cascade synchronization system based on the optoelectronic negative feedback chaotic lasers<sup>\*</sup>

Liao Jian-Fei Xia Guang-Qiong Wu Jia-Gui Xu Li Wu Zheng-Mao<sup>†</sup>

(*School of Physics, Southwest University, Chongqing 400715, China*)

(Received 29 December 2006; revised manuscript received 21 March 2007)

## Abstract

A novel chaotic repeater system based on the cascade synchronization in optoelectronic negative feedback chaotic lasers is proposed. The synchronization characteristics and the influence of the parameter mismatch on the synchronization have been investigated. The results show that complete synchronization can be realized with suitable system parameters, and the internal parameter mismatch of the lasers have influence on the synchronization quality. But the system has greater robustness to parameter mismatch compared with the cascade synchronization based on the optical feedback.

**Keywords** : optoelectronic negative feedback, chaos synchronization, cascade, parameter mismatch

**PACC** : 0545, 4255P, 4265

---

<sup>\*</sup> Project supported by the Natural Science Foundation of Chongqing City, China, and the High-Tech Nurtured Fund of the Southwest University.

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : zmwu@swu.edu.cn