

doi: 10.3788/gzxb20124109.1023

# 多延时互耦合半导体激光器的实时混沌同步特性

刘莹莹, 潘炜, 江宁, 项水英

(西南交通大学 信息科学与技术学院, 成都 610031)

**摘要:**针对双延时和三延时互耦合半导体激光器系统,研究了互耦合延时和互耦合强度对实时混沌同步质量的影响,提出了双延时互耦合系统中可将其中一个互耦合延时看作反馈延时的思想,揭示了多延时互耦合半导体激光器系统实时混沌同步条件和规律.研究表明,多延时互耦合系统中,某两条双向链路的互耦合延时比值为 2,是实现高品质实时混沌同步的基本条件;增大互耦合强度,可以改善实时混沌同步品质,且在较低的等效耦合强度条件下,双延时互耦合系统较三延时互耦合系统更易于实现良好的实时混沌同步.

**关键词:**半导体激光器;实时混沌同步;延时互耦合;耦合延时比

**中图分类号:**TN248.4; O415.5

**文献标识码:**A

**文章编号:**1004-4213(2012)09-1023-5

## 0 引言

全外光反馈或外光注入等条件下,半导体激光器(Semiconductor Laser, SL)能很方便地产生混沌光信号,因此被广泛采用作为激光混沌保密通信系统中载波发射机和接收机的重要器件<sup>[1-6]</sup>.

近年来,基于互耦合半导体激光器的混沌同步系统因其能够提高传输的保密性成为了研究的热点之一<sup>[7-9]</sup>,而且已经被应用于共用信道加密通信以及神经网络等领域<sup>[10-12]</sup>.文献[13-16]提出了通过外部光反馈和外部混沌光注入等方式实现互耦合半导体激光器系统的稳定高品质实时混沌同步或引导-延迟同步.但是,在大部分已经报道的互耦合半导体激光器系统中,两个激光器之间只通过一条双向链路进行相互耦合,有关多链路互耦合半导体激光器系统的混沌同步研究还很匮乏.2010年,Englert工作组指出在低频振荡态双延时互耦合孤立半导体激光器系统中,当两个互耦合延时满足一定的比值关系,可以获得实时混沌同步<sup>[17]</sup>.整体来看,对多条链路互耦合半导体激光器系统的混沌同步特性分析还处在起步阶段,其延时关系系统等参量对混沌同步性能的影响仍有待进一步研究.

本文基于多延时互耦合半导体激光器系统及其相关速率方程模型,以双延时耦合系统和三延时耦合系统为例,详细研究了互耦合延时之间的关系及互耦合强度对系统实时混沌同步质量的影响.

## 1 系统结构及数学描述

如图 1 所示,多延时互耦合半导体激光器系统由两个孤立的半导体激光器  $SL_1$  和  $SL_2$  组成,耦合系数为  $1:n$  的光耦合器将  $SL_1$  和  $SL_2$  的输出分别连接到  $n$  条不同长度的双向链路实现多延时互耦合<sup>[18]</sup>.

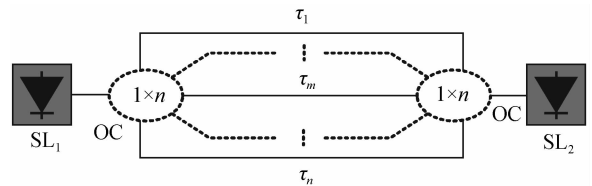


图 1 多延时互耦合半导体激光器系统结构

Fig. 1 Scheme diagram for the system of two mutually coupled semiconductor lasers with multiple time-delayed couplings

半导体激光器是一个复杂的非线性系统,对它的详细描述需要引入复杂的量子理论,但是实际研究中,人们通常用基于平均场理论的 Lang-Kobayashi 速率方程来描述半导体的输出特性.经过拓展可得到描述基于多延时互耦合半导体激光器混沌同步系统的速率方程组为<sup>[18]</sup>

$$\frac{dE_{1,2}(t)}{dt} = \frac{1}{2} (1 + i\alpha) (G_{1,2} - \frac{1}{\tau_p}) E_{1,2}(t) + \sum_{m=1}^n \gamma_m E_{2,1}(t - \tau_m) \exp(-i\omega_{2,1}\tau_m) \cdot \exp(\mp i\Delta\omega t) \quad (1)$$

基金项目:国家自然科学基金(No. 60976039)和四川省基础科研项目(No. 2011JY0030)资助

第一作者:刘莹莹(1987-),女,硕士研究生,主要研究方向为激光混沌通信. Email: liuyingying63@163.com

导师(通讯作者):潘炜(1959-),男,教授,博士,主要研究方向为半导体激光器和光通信等. Email: weipan80@sina.com

收稿日期:2012-03-26;修回日期:2012-05-03

$$\frac{dN_{1,2}(t)}{dt} = \frac{I}{q} - \frac{N_{1,2}(t)}{\tau_e} - G_{1,2} |E_{1,2}(t)|^2 \quad (2)$$

下标 1, 2 分别代表激光器  $SL_1$  和  $SL_2$ ,  $n$  代表耦合延时的个数. 这里  $E$  是电场强度的缓变部分,  $G$  是光增益,  $\tau_p$  为激光器腔内光子寿命,  $\alpha$  是线宽增强因子,  $\gamma$  是互耦合强度,  $\tau_c$  为激光腔内的载流子寿命,  $\tau$  为耦合延时,  $\omega = 2\pi c/\lambda$  是半导体激光器的工作频率,  $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$  为激光器  $SL_1$  和  $SL_2$  的失谐频率,  $c$  是真空中光速,  $\lambda$  为工作波长,  $N$  为激光腔内载流子数,  $I$  为注入电流,  $q$  是电子电荷. 本文选取光增益  $G$  如式(3), 其中  $N_0$  是透明载流子数,  $g$  为差分增益,  $s$  是增益压缩因子.

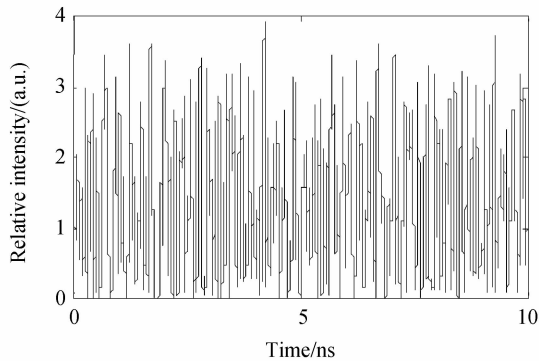
$$G_{1,2}(t) = \frac{g(N_{1,2}(t) - N_0)}{1 + s|E_{1,2}(t)|^2} \quad (3)$$

为了量化同步质量, 定义  $SL_1$  与  $SL_2$  输出的互相关函数  $C_{12}$  如式(4),  $C_{12}$  越接近于 1, 表示同步程度越高, 同步效果越好<sup>[12]</sup>. 其中,  $\langle \cdot \rangle$  代表时间平均值,  $P(t) = |E(t)|^2$  为半导体激光器的输出光强度.

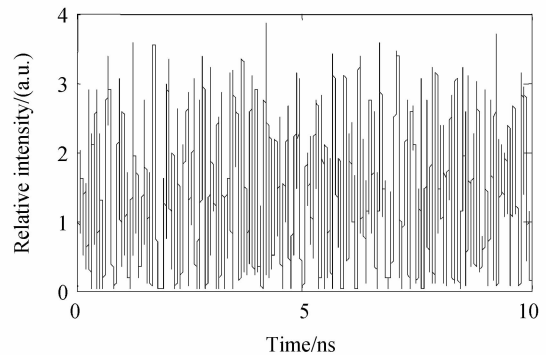
$$C_{12} = \frac{\langle (P_1(t) - \langle P_1(t) \rangle)(P_2(t) - \langle P_2(t) \rangle) \rangle}{\sqrt{\langle (P_1(t) - \langle P_1(t) \rangle)^2 \rangle \langle (P_2(t) - \langle P_2(t) \rangle)^2 \rangle}} \quad (4)$$

## 2 仿真结果及讨论

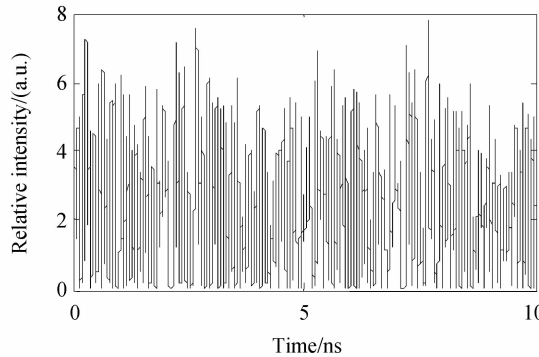
采用四阶龙格-库塔算法, 分别对双延时及三



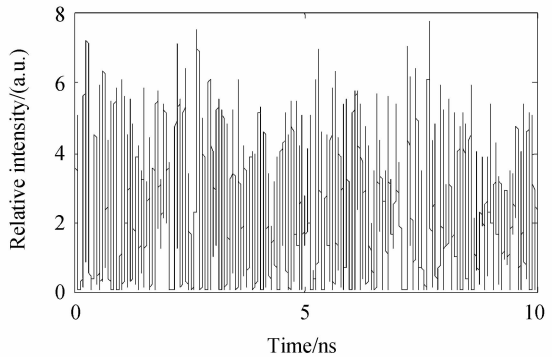
(a) Two time-delayed couplings system of  $SL_1$



(b) Two time-delayed couplings system of  $SL_2$



(c) Three time-delayed couplings system of  $SL_1$



(d) Three time-delayed couplings system of  $SL_2$

图 2 激光器  $SL_1$  和  $SL_2$  输出时序图

Fig. 2 Time series for the output of  $SL_1$  and  $SL_2$

延时互耦合半导体激光器系统的速率方程组进行数值积分. 其中, 互耦合延时和互耦合强度对系统实时同步质量的影响是研究重点, 基本仿真参量值见表 1<sup>[15]</sup>.

表 1 激光器典型参量值

Symbol	Parameter	Value
$\alpha$	Linewidth enhancement factor	5
$g$	Differential gain	$1.5 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$
$\tau_p$	Photon lifetime in active region	2 ps
$\tau_e$	Carrier lifetime in active region	2 ns
$s$	Gain suppression factor	$5 \times 10^{-7}$
$I_{th}$	Threshold current	14.7 mA
$I$	Injection current	$1.3 I_{th}$
$N_0$	Transparency carrier density	$1.5 \times 10^8$
$\Delta\omega$	Detuning frequency	0
$\lambda$	Operation wavelength	656 nm

首先, 给出了双延时和三延时情况下激光器的输出时序图, 如图 2. 其中, 图 2(a) 和图 2(b) 分别为双延时互耦合系统  $SL_1$  和  $SL_2$  的输出时序, 图 2(c) 和图 2(d) 分别为三延时互耦合系统  $SL_1$  和  $SL_2$  输出时序. 仿真过程中, 如文献[17]中所描述, 长时间的时序输出会出现低频振荡, 图 2 截取时间长度为 10 ns. 结果表明, 激光器的输出为混沌状态, 由于三延时互耦合系统比双延时互耦合系统多了一条双向链路的延时互耦合, 故其输出强度相对较高.

图 3 为双延时互耦合系统中  $SL_1$  和  $SL_2$  输出之间相关性随耦合延时比  $\tau_2/\tau_1$  的变化曲线图,仿真过程中令耦合延时  $\tau_1$  的值固定不变,随着耦合延

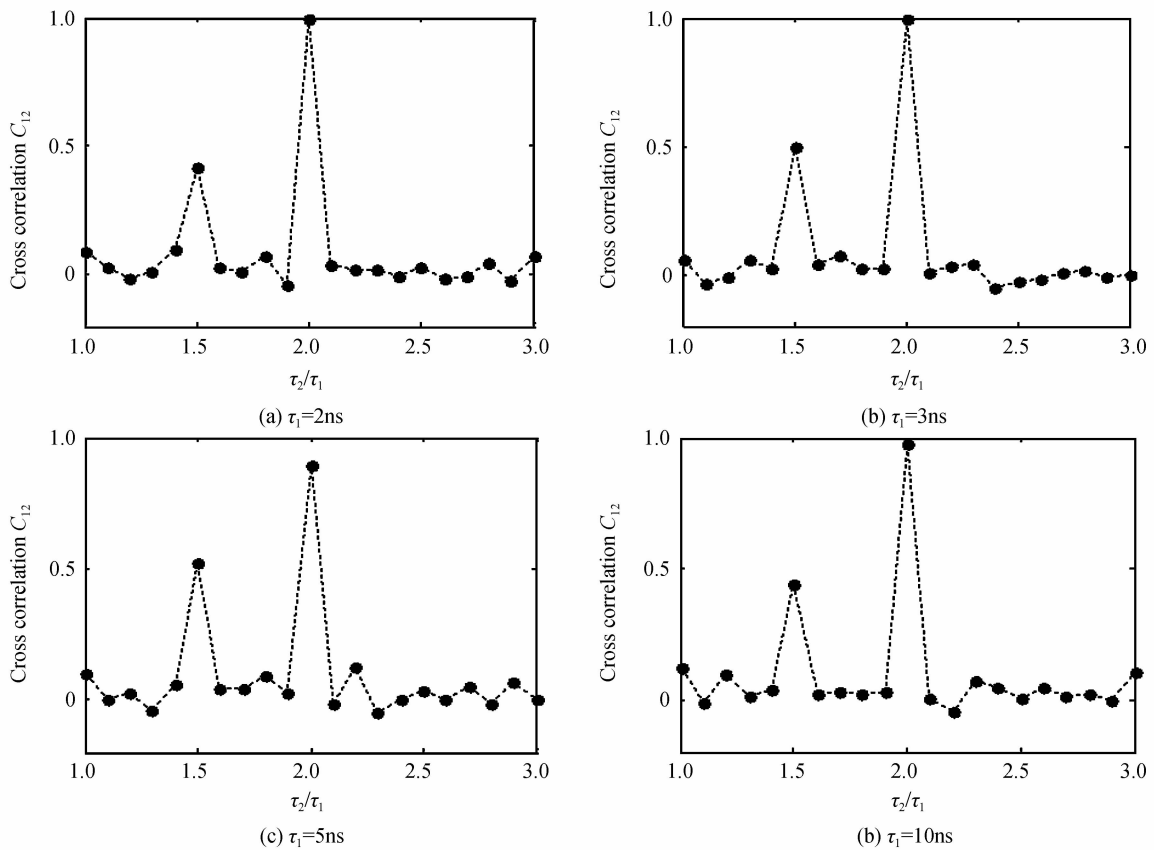


图 3 双延时互耦合系统互相关函数随耦合延时比变化

Fig. 3 Correlation coefficient versus the ratio of  $\tau_2$  and  $\tau_1$  of two time-delayed couplings system

如图 3 所示,  $C_{12}$  均在耦合延时  $\tau_2/\tau_1$  为 2 时取得最大值接近并等于 1. 易知, 基于双延时互耦合半导体激光器系统在耦合延时满足特定条件即延时比  $\tau_2/\tau_1 = 2$  时, 可以获得良好的实时同步. 此结论在一定程度上与文献[17]相一致.

该结论可以这样解释: 由  $SL_1$  发出的信号经过一个耦合延时  $\tau$  到达  $SL_2$ , 从  $SL_2$  再次经过延时  $\tau$  返回到  $SL_1$ , 由于系统满足对称条件,  $SL_1$  与  $SL_2$  的原始输出状态相同, 故可以理解成由  $SL_1$  经过延时  $2\tau$  反馈回  $SL_1$  本身, 即将这个互耦合延时  $\tau$  看作是激光器的自身反馈延时  $2\tau$ , 根据互耦合延时与反馈延时相等这个实现实时同步的条件<sup>[13]</sup>, 可以推出另一个互耦合延时为  $2\tau$ , 即延时关系  $2\tau/\tau = 2$  时, 系统能够达到实时同步.

图 4 为三延时互耦合系统中  $SL_1$  和  $SL_2$  输出之间相关性随耦合延时比  $\tau_3/\tau_1$  的变化曲线图. 基于三延时互耦合系统, 根据上述分析, 令其中两个耦合延时比  $\tau_2/\tau_1 = 2$  时, 分析互耦合延时与同步质量

时  $\tau_2$  变化, 计算互相关函数  $C_{12}$  的值. 为了说明结果的普适性, 选取了四组数据, 图 3(a)~(d) 分别为  $\tau_1$  等于 2 ns、3 ns、5 ns、10 ns 时的情况.

的关系. 为了说明结果的普适性, 同样选取了四组数据, 图 4(a)~(d) 分别代表  $\tau_1 = 2\text{ ns}$ 、 $\tau_2 = 4\text{ ns}$ 、 $\tau_1 = 3\text{ ns}$ 、 $\tau_2 = 6\text{ ns}$ 、 $\tau_1 = 5\text{ ns}$ 、 $\tau_2 = 10\text{ ns}$ 、 $\tau_1 = 7\text{ ns}$ 、 $\tau_2 = 14\text{ ns}$ .

如图 4 所示, 互相关函数  $C_{12}$  最小值约为 0.91, 整体上接近或等于 1, 系统同步质量均处于良好状态, 也就是说, 基于三延时互耦合系统, 满足任意两个耦合延时比值为 2 时, 可获得良好的实时同步, 第三个耦合延时对同步质量的影响不大. 当耦合延时比  $\tau_3/\tau_1 = 2$  时,  $C_{12}$  均为最大值 1, 系统具有较好的同步品质, 进一步验证了上述结论.

在  $n=4, 5$  等多个延时互耦合系统中, 数值仿真得出, 当某两个互耦合延时比为 2 时, 互相关函数值  $C_{12}$  均接近并等于 1, 与其他耦合延时比值情况下的互相关函数值相比较, 同步品质相对较高. 即在多延时互耦合半导体激光器系统中, 满足某两个双向链路的互耦合延时比为 2, 可以实现高品质的实时混沌同步.

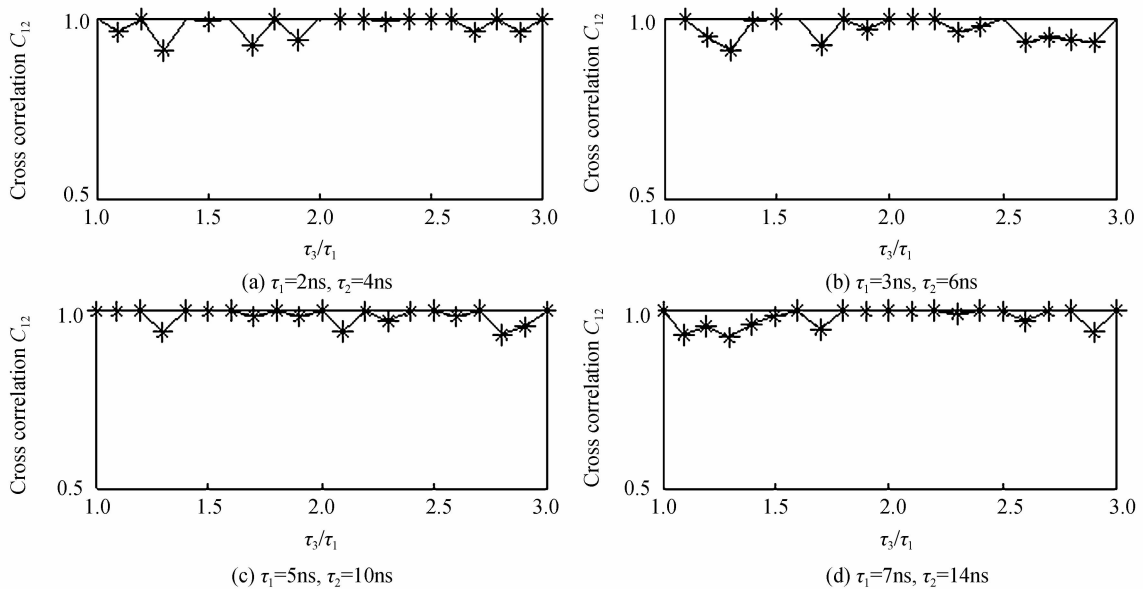


图4 三延时互耦合系统互相关函数随耦合延时比  $\tau_3/\tau_1$  变化

Fig. 4 Correlation coefficient versus the ratio of  $\tau_3$  and  $\tau_1$  of three time-delayed couplings system

图5为  $SL_1$  和  $SL_2$  输出之间相关性随单链路互耦合强度  $\gamma$  的变化曲线图. 令每条链路的互耦合强度相同, 由于双延时和三延时互耦合系统的双向链路个数  $n$  不同, 采用等效耦合强度  $R_n = n\gamma$  来分析, 双延时互耦合系统的等效耦合强度为  $R_2 = 2\gamma$ , 三延时互耦合系统的等效耦合强度为  $R_3 = 3\gamma$ .

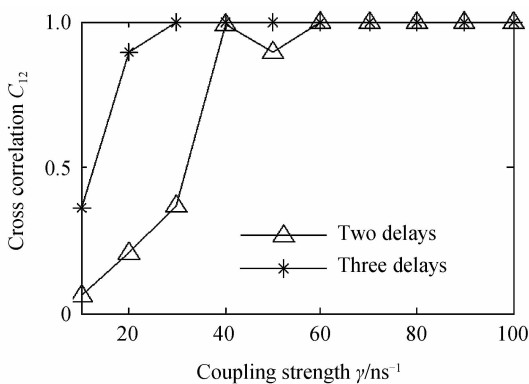


图5 互相关函数随单链路互耦合强度变化曲线

Fig. 5 Correlation coefficient versus coupling strength

如图5所示, 随着耦合强度的增大, 互相关函数  $C_{12}$  的值基本上呈逐渐增大趋势, 系统同步品质逐渐增强. 在双延时互耦合系统中,  $\gamma = 40 \text{ ns}^{-1}$  即等效耦合强度为  $R_2 = 2\gamma = 80 \text{ ns}^{-1}$  时,  $C_{12}$  值可达到最大值 1. 三延时互耦合系统在  $\gamma = 30 \text{ ns}^{-1}$  即等效耦合强度  $R_3 = 3\gamma = 90 \text{ ns}^{-1}$  时,  $C_{12}$  值才达到 1. 即等效耦合强度较低时, 双延时互耦合系统较三延时互耦合系统更易于实现良好的实时混沌同步.

### 3 结论

基于多延时互耦合半导体激光器混沌同步系统结构及其相关速率方程模型, 详细讨论了互耦合延

时及互耦合强度对实时混沌同步的影响. 结果表明, 在多延时互耦合半导体激光器系统中, 某两个双向链路的互耦合延时比为 2, 互相关函数值接近并等于 1, 是实现高品质的实时混沌同步的基本条件. 此外, 随着互耦合强度增大, 互相关函数值逐渐增大并等于 1, 系统同步品质逐渐增强, 当等效耦合强度较低时, 双延时互耦合系统较三延时互耦合系统更易于实现良好的实时混沌同步.

### 参考文献

- [1] NING J, WEI P, BIN L, *et al.* Influence of injection current on the synchronization and communication performance of closed-loop chaotic semiconductor lasers[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(16): 3197-3199.
- [2] HU Ju-ju, ZHOU Xiao-yong, MA Jun-shan. Multiplexed chaos synchronization communication system with nonlinear delayed optoelectronic feedbacks[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(1): 55-60.  
胡菊菊, 周小勇, 马军山. 非线性光电延时反馈混沌同步复用通信系统研究[J]. *光子学报*, 2011, **40**(1): 55-60.
- [3] WANG Yun-cai, LI Yan-li, WANG An-bang, *et al.* High frequency message filtering characteristics of semiconductor laser as receiver in optical chaos communications[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(8): 4686-4693.  
王云才, 李艳丽, 王安帮, 等. 激光混沌通信中半导体激光器接收机对高频信号的滤波特性[J]. *物理学报*, 2007, **56**(8): 4686-4693.
- [4] DING Ling, WU Jia-gui, XIA Guang-qiong, *et al.* Effect of external optical feedback strength on time delay signatures in a semiconductor laser with double optical feedback[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(5): 740-745.  
丁灵, 吴加贵, 夏光琼, 等. 双光反馈半导体激光混沌系统的外腔反馈强度对延时特征的影响[J]. *光子学报*, 2011, **40**(5): 740-745.
- [5] LI Xiao-feng, PAN Wei, MA Dong, *et al.* Effects of spontaneous emission noise in semi-conductor lasers on chaotic optical communication systems[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(10): 5094-5104.

- 李孝峰,潘炜,马冬,等. 激光器自发辐射噪声对混沌光通信系统的影响[J]. 物理学报, 2006, **55**(10): 5094-5104.
- [6] HU Ju-ju, MA Jun-shan. Research on three cascade chaotic system based on incoherent optical feedback and injection [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(10): 2553-2557.  
胡菊菊,马军山. 基于非相干光反馈与注入的级联混沌系统研究[J]. 光子学报, 2009, **38**(10): 2553-2557.
- [7] HEIL T, FISCHER I, ELSASSER W, *et al.* Chaos synchronization and spontaneous symmetry-breaking in symmetrically delay-coupled semiconductor lasers [J]. *Physical Review Letters*, 2001, **86**(5): 795-798.
- [8] YAN Sen-lin, CHI Ze-ying, CHEN Wen-jian, *et al.* Chaotic synchronization with coupling lasers and its application for secure communications [J]. *Journal of Communications*, 2004, **25**(1): 78-86.  
颜森林,迟泽英,陈文建,等. 激光混沌耦合同步及其在保密通信中的应用[J]. 通信学报, 2004, **25**(1): 78-86.
- [9] WANG Yan-bin, ZHANG Sheng-hai, SHAO Ming, *et al.* Chaos and chaotic synchronization in current-modulated semiconductor lasers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(11): 2167-2171.  
王彦斌,张胜海,邵铭,等. 电流调制半导体激光器的混沌及其同步[J]. 光子学报, 2008, **37**(11): 2167-2171.
- [10] KANTER I, KOPELOWITZ E, KINZEL W, *et al.* Public channel cryptography: chaos synchronization and hilbert's tenth problem[J]. *Physical Review Letters*, 2008, **101**(8): 084102.
- [11] VICENTE R, GOLLO L L, MIRASSO R C, *et al.* Relaying in the brain: a network topology capable of generating zero time-lag neuronal synchrony despite long conduction delays [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, **105**(44): 17157-17162.
- [12] KLEIN E, GROSS N, KOPELOWITZ E, *et al.* Public-channel cryptography based on mutual chaos pass filters[J]. *Physical Review E*, 2006, **74**(4): 046201.
- [13] KLEIN E, GROSS N, ROSENBLUH M, *et al.* Stable isochronal synchronization of mutually coupled chaotic lasers [J]. *Physical Review E*, 2006, **73**(6): 066214.
- [14] VICENTE R, FISCHER I, MIRASSO R C. Synchronization properties of three delay-coupled semiconductor lasers[J]. *Physical Review E*, 2008, **78**(6): 066202.
- [15] NING J, WEI P, BIN L, *et al.* Properties of leader-laggard chaos synchronization in mutually coupled external-cavity semiconductor lasers[J]. *Physical Review E*, 2010, **81**(6): 066217.
- [16] VICENTE R, MIRASSO R C, FISCHER I, *et al.* Simultaneous bidirectional message transmission in a chaos-based communication scheme[J]. *Optics Letters*, 2007, **32**(4): 403-405.
- [17] ENGLERT A, KINZEL W, AVIAD Y, *et al.* Zero lag synchronization of chaotic systems with time delayed couplings[J]. *Physical Review Letters*, 2010, **104**(11): 114102.
- [18] NING J, WEI P, BIN L, *et al.* Isochronal chaos synchronization of semiconductor lasers with multiple time-delayed couplings[J]. *JOSA B*, 2011, **28**(5): 1139-1145.

## Properties of Isochronal Chaos Synchronization of Semiconductor Lasers with Multiple Mutual Time-delayed Couplings

LIU Ying-ying, PAN Wei, JIANG Ning, XIANG Shui-ying

(School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Based on systems of semiconductor lasers with two mutual time-delayed couplings and three mutual time-delayed couplings, the influence of coupling delays and coupling strength to isochronal chaos synchronization was numerically studied. A thought that one coupling delay could be seen as feedback delays was presented in the system with two mutual time-delayed couplings. The condition and law for isochronal chaos synchronization was revealed in the system of semiconductor lasers with multiple mutual time-delayed couplings. The results show that the ratio 2 of two coupling delays is a basic condition to achieve isochronal chaos synchronization with high quality. Increasing coupling strength can improve the quality of isochronal chaos synchronization, and when the coupling strength is lower, the system with two mutual time-delayed couplings is much easier to achieve good isochronal chaos synchronization than system with three mutual time-delayed couplings.

**Key words:** Semiconductor laser; Isochronal chaos synchronization; Mutual time-delayed couplings; Ratio of coupling delays