

# 新型三激光器结构的混沌同步特性

申翠丽<sup>1</sup> 叶会英<sup>1</sup> 魏富鹏<sup>1</sup> 李勇<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>郑州大学信息工程学院, 河南 郑州 450001)  
(<sup>2</sup>云南大学信息学院, 云南 昆明 650091)

**摘要** 设计了一种新型的闭环双向三激光器混沌保密通信系统, 驱动激光器基于延时外光反馈, 两个参数完全相同的响应激光器在自身延时反馈和驱动激光器的驱动下实现混沌同步。建立了相应的理论模型, 研究了系统的分岔特性、同步性以及内部参数失配对其同步性能的影响, 并与不含自身光反馈的开环系统进行了比较。研究结果表明, 当系统参数满足一定条件时, 两个响应激光器的关联极值接近于 1, 而驱动激光器和响应激光器的相关性很小。与开环系统相比, 该系统的载波带宽拓宽了约 1.99 GHz, 对参数失配比较敏感并具有更好的保密性能。

**关键词** 激光器; 光混沌; 保密通信; 混沌同步; 参数失配

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.101401

## Analysis of Chaos Synchronization in New Three-Laser Scheme

Shen Cuili<sup>1</sup> Ye Huiying<sup>1</sup> Wei Fupeng<sup>1</sup> Li Yong<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>College of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China)  
(<sup>2</sup>College of Information Science and Engineering, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650091, China)

**Abstract** A new closed-loop dual-directionally chaotic system with three lasers for private message transmission is proposed. A pair of twin semiconductor lasers as responses are routed into chaos by delayed optical feedback, and chaos synchronization to each other is realized by means of optical injection of a common chaotic-driving signal generated by a drive laser subject to delayed optical feedback. Appropriate model is built. We investigate the bifurcation and synchronization performance and the effect of internal parameter mismatch, and the results are compared with those of the open-loop system in which the response lasers are not subject to local feedback. The theoretical simulations show that the maximum value of cross correlation coefficient between two responses approximates to 1, however, the maximum value of cross correlation coefficient for response and driver is very low. Compared with the open-loop system, the bandwidth of the designed system is widened by about 1.99 GHz, and this system becomes more sensitive to parameter mismatch. So the closed-loop scheme offers a better privacy level.

**Key words** lasers; optical chaos; private communication; chaos synchronization; parameter mismatch

**OCIS codes** 140.1540; 140.5960; 060.4510

## 1 引言

自从 1990 年 Pecora 等<sup>[1]</sup>提出混沌同步的概念以来, 人们对基于半导体激光的混沌保密通信做了深入研究<sup>[2~5]</sup>。该技术是一种物理层面的硬件加密技术, 适用于高速、长距离、低误码率传输, 同时还可以与现行的软件加密技术和未来的量子密钥兼容, 主要通过发送系统和接收系统的混沌同步实现。

激光混沌同步系统有单向耦合<sup>[4,5]</sup>和双向耦合<sup>[6]</sup>方式, 每种耦合方式都有开环<sup>[4]</sup>和闭环<sup>[5]</sup>结构。传统的混沌同步采用两个激光器的主从机制<sup>[3]</sup>, Annovazzi-Lodi 等<sup>[4,5]</sup>基于 Yamamoto 等<sup>[7,8]</sup>的思想, 提出了三个激光器的同步系统方案。刘宇然等<sup>[6]</sup>研究了开环的双向长距离光纤通信, 发现在同一驱动混沌激光器的混沌光注入下, 两个响应激光器能实现等时同步。文献<sup>[9]</sup>使用基于偏振旋转光反馈 (PROF) 的半导体激光器, 通过控制偏转角度产生驱动信号, 驱动发射端和接收端两个基于偏振旋转光注入 (PROI) 的激光器实现混沌同步。

**收稿日期**: 2012-06-12; **收到修改稿日期**: 2012-06-21; **网络出版日期**: 2012-08-20

**基金项目**: 国家自然科学基金(60871031)资助课题。

**作者简介**: 申翠丽(1986—), 女, 硕士研究生, 主要从事半导体激光非线性动力学方面的研究。

E-mail: shencuili2006yy@126.com

**导师简介**: 叶会英(1966—), 女, 博士, 教授, 主要从事激光测量、信号处理等方面的研究。E-mail: iehyye@zzu.edu.cn

本文设计了一种新的闭环双向耦合的三激光器光纤通信系统,两个响应激光器在自身的光反馈和光注入驱动下实现混沌同步。传统的双向耦合方式中,发射系统和接收系统直接互耦,相互影响,本研究中发射端和接收端两个激光器不是直接互耦的,而是在共同的混沌信号驱动下实现同步。闭环系统由于对参数比较敏感,难以实现参数匹配,因此具有较高的保密性能,即使驱动激光器突然坏掉,仍然可以隐藏需要传输的信息。基于 Matlab 平台验证了此实验系统的可行性。对三个激光器输出的时序图、相图、频谱、关联函数和同步误差进行了数值分析,并与开环系统进行了详细比较。

## 2 系统模型

设计的通信系统结构如图 1 所示,两个参数完全相同的激光器作为响应激光器(RL),在外腔反馈延时的作用下进入混沌状态,通过注入基于短腔延时反馈的共同驱动激光器(DL)产生的混沌驱动信号实现混沌同步。三个激光器波长相同,具有相同的短腔延时反馈,DL 选用与 RL 部分不同的参数。与开环系统相比,本系统更复杂且难以实现参数匹配,RL 的外腔相位也要严格相同,闭环结构的这些特点对于授权用户防止窃听而言有很大优势。

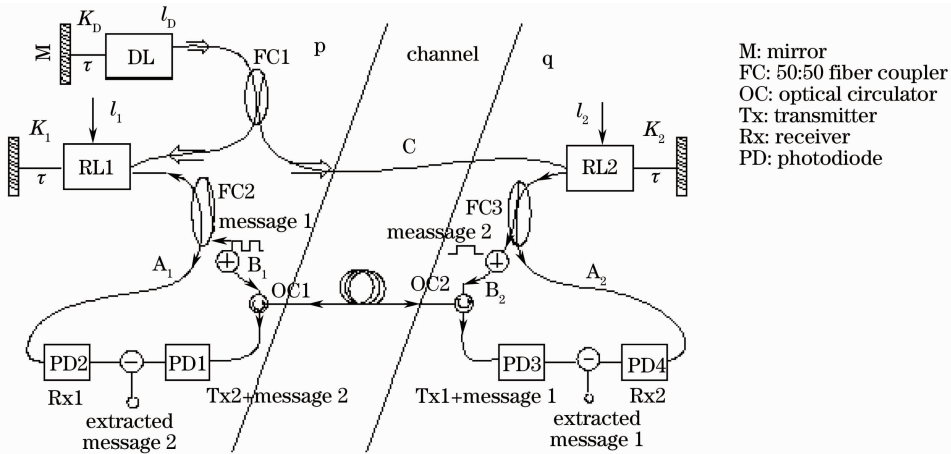


图 1 闭环双向混沌保密通信原理图

Fig.1 Schematic diagram for closed-loop dual-directionally chaotic private data transmission

通过控制 p 端 DL 的参数,使 DL 产生复杂的混沌输出,经过光纤耦合器 FC1 分光后,一半的功率直接注入到 RL1 中,另一半的光经信道 C 注入到 RL2,假设 DL 输出的混沌信号经历的两条光纤的性能参数一致,由于 RL1 和 RL2 的参数完全相同,系统具有良好的对称性,从而实现了两个响应激光器的完全同步。

RL1 到 RL2 的信息传输过程为: message 1 在 p 端通过混沌调制(CM)方式与混沌载波相混合,混合信号(Tx1+message 1)经信道 B1 传输到 q 端,通过光环形器 OC2 被光电探测器 PD3 检测到。精确控制 RL2 的参数使生成高度相关的混沌波形,经光耦合器 FC3 被分成两部分,一部分经信道 A2 传到光电探测器 PD4,PD3 探测到的混合信号(Tx1+message 1)减去 PD4 探测到的本地载波(Rx2),从而恢复被隐藏的信息 message 1。RL2 到 RL1 的信息传输具有相似的过程。

由于 DL 和 RL 的参数不匹配,它们的混沌输出也不相同,窃听者即使同时截获了信道 C 和 B1,C 和 B2,或 B1 和 B2,没有匹配的 RL 也无法获取信息<sup>[6]</sup>。

## 3 理论分析

闭环的三个激光器机制可以用著名的 Lang-Kobayashi 模型<sup>[10]</sup>来描述:

$$\frac{dE_J(t)}{dt} = \frac{1}{2}(1 + i\alpha) \left[ G_J(t) - \frac{1}{\tau_p} \right] E_J(t) + \frac{K_J}{\tau_{in}} E_J(t - \tau) \exp(-i\omega_0 \tau) + \Delta_{D,J} \frac{K_{D,J}}{\tau_{in}} E_D(t - T_{D,J}) \exp(-i\omega_0 T_{D,J}), \quad (1)$$

$$\frac{dN_J(t)}{dt} = \frac{\eta}{eV} I_J - \frac{N_J(t)}{\tau_s} - G_J(t) |E_J(t)|^2, \quad (2)$$

$$G_J(t) = g[N_J(t) - N_0], \quad (3)$$

式中下标  $J=D$  表示 DL 的动态特性;  $J=1,2$  分别表征 RL1 和 RL2 的动态特性。  $J=D$  时, 系数  $\Delta_{D,J}=0$ , 其他情况下  $\Delta_{D,J}=1$ 。(1)~(3) 式中  $E_J(t)$  为激光器的慢变、复合电场,  $N_J(t)$  为载流子密度,  $N_0$  为透明载流子密度,  $K_J$  为外腔的反馈强度,  $J=1,2$  时,  $K_{D,J}/\tau_m$ 、 $T_{D,J}$  分别表示注入率和 DL 到 RL1 或 RL2 的传输时间,  $I_J$  为注入电流,  $e$  为电荷电量。采用四阶龙格-库塔法对速率方程组进行数值求解, 考虑到光纤传输延迟, 假设驱动对响应的注入延时为  $T_{D,1}=T_{D,2}=1.9$  ps, 其他参数的取值如表 1 所示。

表 1 激光器参数

Table 1 Lasers parameters

Parameter	DL	RL
Linewidth enhancement factor $\alpha$	2.8	3.0
Gain coefficient $g / (\text{m}^3/\text{s})$	$7.7 \times 10^{-13}$	$8.1 \times 10^{-13}$
Carrier density at transparency $N_0/\text{m}^{-3}$	$1.16 \times 10^{24}$	$1.10 \times 10^{24}$
Threshold current $I_{\text{th}}$	12.4	11.0
Photon lifetime $\tau_p/\text{ps}$		1.9
Carrier lifetime $\tau_s/\text{ns}$		1.9
Laser cavity roundtrip time $\tau_m/\text{ps}$		8.0
Solitary laser pulsation $\omega_0/(\text{rad}/\text{s})$	$1.2177 \times 10^{15}$	
External cavity roundtrip time $\tau/\text{ns}$		0.3
Active region efficiency $\eta$		1
Active region volume $V/\text{m}^3$		$8.0 \times 10^{-17}$

衡量混沌同步性能的重要参数是关联函数  $C^{[11]}$ , 其定义为

$$C_{ij}(\Delta t) = \frac{\langle [I_i(t - \Delta t) - \langle I_i(t - \Delta t) \rangle] \cdot [I_j(t) - \langle I_j(t) \rangle] \rangle}{\sqrt{\langle |I_i(t - \Delta t) - \langle I_i(t - \Delta t) \rangle|^2 \rangle \cdot \langle |I_j(t) - \langle I_j(t) \rangle|^2 \rangle}}, \quad (4)$$

式中  $I_i(t)$ 、 $I_j(t)$  分别表示激光器  $i$  和  $j$  的混沌输出强度,  $\Delta t$  表示时移,  $\langle \cdot \rangle$  表示时间平均。  $|C| \leq 1$ ,  $C$  值越大, 同步质量越高,  $C$  值为 1 时, 系统完全同步。

估计同步误差  $\zeta^{[12]}$  的表达式为

$$\zeta = \frac{\langle |I_i(t) - I_j(t)| \rangle}{\langle |I_i(t)| \rangle}, \quad (5)$$

$\zeta$  越小表明同步性能越好。

## 4 数值仿真与分析

### 4.1 DL 的混沌特性

在图 1 所示系统中, 通过控制驱动激光器的参数, 使 DL 产生复杂的混沌输出。RL1 和 RL2 参数相同, 为了提高通信的保密性, DL 选用一些不同的内部参数。在 DL 的数值仿真中, 取  $I_D=1.887I_{\text{th}}$ ,  $K_D=0.06$ 。

图 2 给出了驱动输出随反馈系数的变化情况。从图中可以看出, 随着反馈系数的增加, DL 表现出不同的非线性动态特性:  $K_D=0.01$  时从稳态进入周期状态,  $K_D=0.03$  时进入准周期,  $K_D=0.04$  时开始出现混沌状态。图 3 是在反馈系数  $K_D=0.06$  时的分岔图, 当  $I=1.84I_{\text{th}}$  时, 系统输出为混沌,  $1.4I_{\text{th}}$ 、 $1.7I_{\text{th}}$  时, 输出表现为倍周期, 可见在不同的注入电流条件下, 系统的混沌动态有很大区别, 注入电流足够大时, 就会进入完全混沌状态。

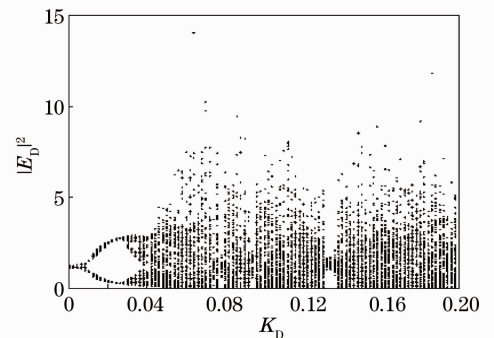


图 2 驱动输出随光反馈系数  $K_D$  的变化  
Fig. 2 Output of the driver for different feedback parameter  $K_D$

$I_D = 1.887I_{th}$ ,  $K_D = 0.06$  时, 驱动激光器处于混沌状态。

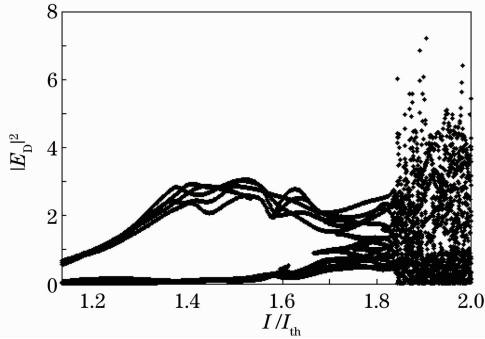


图 3 驱动输出随注入电流的变化情况

Fig. 3 Output of the driver as a function of the pump current

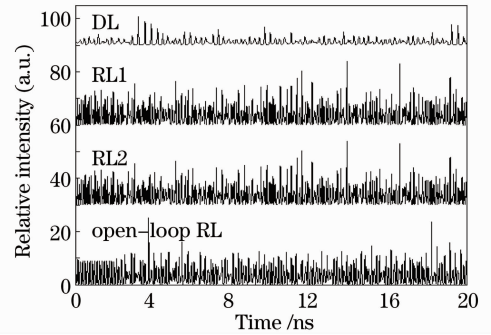


图 4 DL、RL1、RL2 和开环 RL 的时域波形

Fig. 4 Chaotic waveforms in the time domain for DL, RL1, RL2 and open-loop RL

### 4.2 同步特性

在不考虑光纤信道影响的情况下, 两个响应激光器 RL1 和 RL2 参数一致, 系统完全对称, 可以用固定的速率方程来描述, 如(1)~(3)式。设定注入强度  $K_{D,1} = K_{D,2} = 0.32$ , 图 4~6 给出了未加载信息时, 反馈强度  $K_1 = K_2 = 0.15$  时的时序图、相图和频谱图。

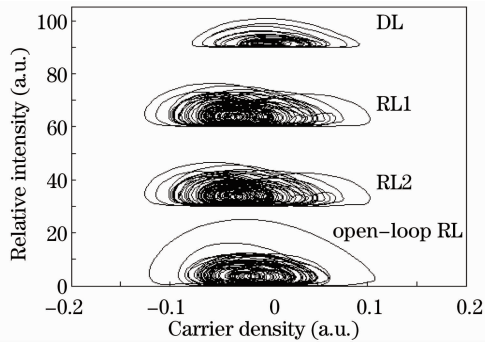


图 5 DL、RL1、RL2 和开环 RL 的相图

Fig. 5 Phase diagrams for DL, RL1, RL2 and open-loop RL

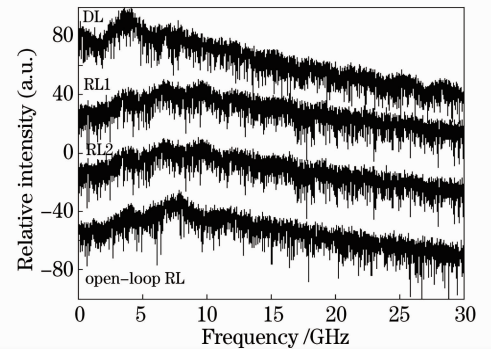


图 6 DL、RL1、RL2 和开环 RL 的频谱图

Fig. 6 Frequency spectra for DL, RL1, RL2 and open-loop RL

可以看出 DL 的输出时间序列[图 4(a)]和相图[图 5(a)]与 RL 的相应输出[图 4(b), (c)及图 5(b), (c)]差别很大, RL1 和 RL2 却可以很好地实现同步。驱动的频谱[图 6(a)], 峰值振荡频率为 4.2 GHz, 带宽为 4.33 GHz; RL1 和 RL2 的频谱[图 6(b), (c)], 峰值振荡频率为 9.69 GHz, 带宽为 10.76 GHz; 开环 RL 和 DL 同样差别很大, 开环系统 RL 的频谱图[图 6(d)]峰值振荡频率为 8.07 GHz, 频带宽度为 8.77 GHz, 可见闭环系统载波的峰值振荡频率变大, 频带展宽约 1.99 GHz。

图 7(a)为 DL 的自相关曲线, 在延时为 0 时, 得到相关最大值 1; 图 7(b)为 DL 和 RL1 的互相关曲线, 在接近 1.9 ns 时出现相关的最大值, 该时间点对应于 DL 到 RL1 的注入延迟时间; 图 7(c)为 RL1 和 RL2 的互相关曲线, 在相对时移为 0 时相关值最大, 接近于 1, 随着时移的增大, 相关性急剧减小。由图 8 所示 DL 和 RL 的同

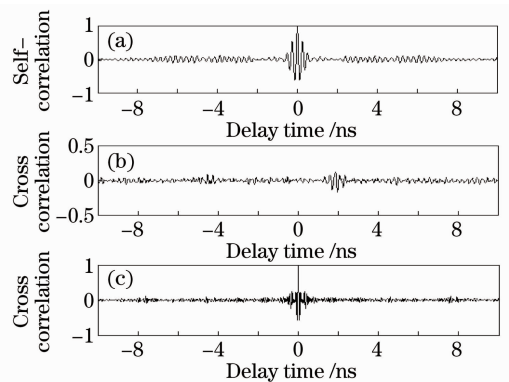


图 7 关联函数时间序列。(a) DL 自相关曲线; (b) DL 与 RL1 互相关曲线; (c) RL1 与 RL2 互相关曲线  
Fig. 7 Temporal waveforms of correlation function. (a) Self-correlation of DL; (b) cross correlation between DL and RL1; (c) cross correlation between RL1 and RL2

步特性可见,两个响应激光器的同步效果很好,而驱动和响应激光器的同步效果很差。

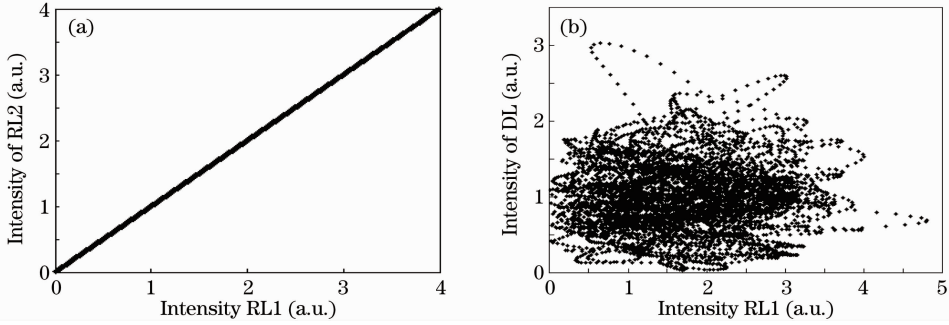


图 8 DL 和 RL 的同步特性

Fig. 8 Synchronization diagram between the DL and RL

### 4.3 参数失配的影响

在实际应用中,不可能通过精确控制使发射端和接收端参数完全相同,因此需要考虑参数失配对发射端和接收端同步性能的影响。

参数失配定义为

$$\Delta g = (g^R - g^T)/g^T, \quad \Delta \alpha = (\alpha^R - \alpha^T)/\alpha^T, \quad \Delta \gamma_p = (\gamma_p^R - \gamma_p^T)/\gamma_p^T, \quad \Delta \gamma_s = (\gamma_s^R - \gamma_s^T)/\gamma_s^T, \quad (6)$$

式中上标 R 和 T 分别对应接收端和发射端,  $\gamma_p = 1/\tau_p$ ,  $\gamma_s = 1/\tau_s$ 。

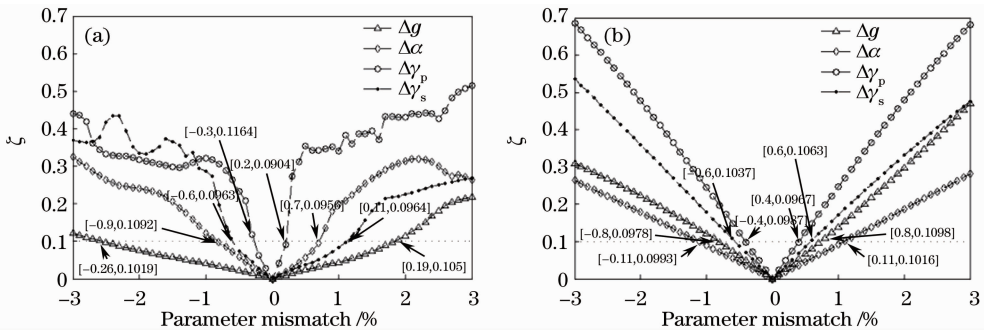


图 9 同步误差随参数  $g, \alpha, \gamma_p, \gamma_s$  失配率的变化情况。(a)闭环系统;(b)开环系统

Fig. 9 Synchronization error as a function of relative mismatch ratio for  $g, \alpha, \gamma_p$  and  $\gamma_s$ .

(a) Closed-loop system; (b) open-loop system

要很好地恢复信号,同步误差应控制在 10% 的范围内<sup>[2]</sup>,下面只考虑同步误差  $\zeta < 10\%$  的参数变化。从图 9 可以看出  $\gamma_p$  对参数失配的容忍度最小, $g$  和  $\alpha$  对参数失配的容忍度较大;与开环系统相比,闭环系统  $g$  的容忍度变大, $\gamma_s$  正的失配范围容忍度变大,其他参数的容忍度都变小。

在实际应用中,可能出现多个参数失配的情况,这时系统的同步状况变得难以预测,这里分析两个参数失配的情况,如图 10 所示。实线和虚线分别为  $\gamma_s$  失配 -1%、+1% 时,  $\zeta$  随  $\gamma_p$  的变化曲线。可见  $\gamma_s$  失配 -1% 时,  $\zeta$  的最小值对应  $\gamma_p$  负的失配,  $\gamma_s$  失配 +1% 时,  $\zeta$  的最小值对应  $\gamma_p$  正的失配。

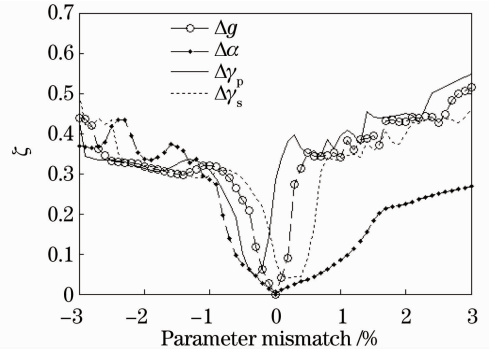


图 10 多参数失配时的同步误差

Fig. 10 Synchronization error for multi-parameter mismatch

## 5 结 论

研究了三个激光器闭环双向信号传输机制,考虑了 DL 对 RL1 和 RL1 的注入延时,并分析了多个参数

失配的情况。研究表明:两个响应激光器参数匹配时,在时域和频域能够实现很好的混沌同步;即使截获了信道上的任何两条传输链路,没有匹配的驱动和响应激光器,也不能成功获取有用信息;参数失配时, $g$ 和 $\alpha$ 对同步性能影响较小, $\gamma_p$ 和 $\gamma_s$ 的影响较大,与开环系统相比,总体来说闭环系统对参数失配变得更加敏感,使该系统具有更好的保密性。

### 参 考 文 献

- 1 L. M. Pecora, T. L. Carroll. Synchronization in chaotic systems[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, **64**(8): 821~824
- 2 H. F. Chen, J. M. Liu. Open-loop chaotic synchronization of injection-locked semiconductor lasers with gigahertz range modulation[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2000, **36**(1): 27~34
- 3 C. R. Mirasso, Raúl Vicente, Pere Colet *et al.*. Synchronization properties of chaotic semiconductor lasers and applications to encryption[J]. *C. R. Physique*, 2004, **5**(6): 613~622
- 4 V. Annovazzi-Lodi, G. Aromataris, M. Benedetti *et al.*. Private message transmission by common driving of two chaotic lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2010, **46**(2): 258~264
- 5 V. Annovazzi-Lodi, G. Aromataris, M. Benedetti *et al.*. Close-loop three-laser scheme for chaos-encrypted message transmission[J]. *Opt. Quantum Electron.*, 2010, **42**(3): 143~156
- 6 Liu Yuran, Wu Zhengmao, Wu Jiagui *et al.*. A new type of bidirectional long distance optical fiber chaotic secure communication system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(2): 024203  
刘宇然, 吴正茂, 吴加贵 等. 一种新型的双向长距离光纤混沌保密通信系统性能研究[J]. *物理学报*, 2012, **61**(2): 024203
- 7 T. Yamamoto, Isao Oowada, Hoipang Yip *et al.*. Common-chaotic-signal induced synchronization in semiconductor lasers [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(7): 3974~3980
- 8 A. Uchida, R. McAllister, R. Roy. Consistency of nonlinear system response to complex drive signals[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **93**(24): 244102
- 9 Nianqiang Li, Wei Pan, Lianshan Yan *et al.*. Chaotic optical cryptographic communication using a three-semiconductor-laser scheme[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2012, **29**(1): 101~108
- 10 R. Lang, K. Kobayashi. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1980, **QE-16**(3): 347~355
- 11 Ning Jiang, Wei Pan, Lianshan Yan *et al.*. Chaos synchronization and communication in mutually coupled semiconductor lasers driven by a third laser[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2010, **28**(3): 1978~1986
- 12 Jiaming Liu, Howfoo Chen, Shuo Tang. Synchronized chaotic optical communications at high bit rates [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2002, **38**(9): 1184~1196