

基于非相干光反馈半导体激光器的 双向混沌通信研究*

操良平¹⁾²⁾ 夏光琼¹⁾ 邓 涛¹⁾ 林晓东¹⁾ 吴正茂^{1)†}

1) (西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715)

2) (重庆师范大学初等教育学院, 重庆 400700)

(2009 年 11 月 12 日收到; 2009 年 11 月 19 日收到修改稿)

提出了一种基于非相干光反馈半导体激光器的双向混沌通信系统, 数值研究了该系统的同步特性及通信性能. 结果表明, 当两个激光器参数一致时, 系统能获得无延时的高质量混沌同步, 实现实时双向通信; 当激光器内部参数失配时, 系统的同步性能及通信质量会受到一定的影响, 但该系统对参数失配的容忍性较好, 在一定的参数失配范围内, 系统仍能实现较好的双向混沌通信.

关键词: 非相干光反馈, 半导体激光器, 混沌同步, 双向通信

PACC: 4265T, 4255P

1. 引 言

自 1990 年 Pecora 和 Carroll 首次提出混沌同步以来^[1], 基于半导体激光器的混沌和混沌同步由于在保密通信中潜在的应用价值而受到了人们广泛的关注^[2-28]. 2005 年 Argyris 等人在希腊雅典利用商用光通信网络实现了 1 Gbit/s, 传输距离达 120 km 的单向激光混沌保密通信^[2], 使人们看到了激光混沌保密通信应用于实际的一缕曙光. 尽管早期的相关研究大多基于信息的单向保密传输, 但是实现信息的双向乃至多向保密传输始终是该领域发展的必然趋势. 近年来, 基于半导体激光器的双向混沌通信已逐渐成为了研究的热点^[23-28]. 例如, Klein 等人从理论和实验上研究了互注入光混沌通信系统的公众信道编码技术^[24]; Vicente 等人通过在两个激光器之间加入半反镜实现了系统的同步和双向实时通信^[25], Zhang 等人提出利用非对称双向注入系统实现了光混沌保密通信^[26]; 最近, 我们也从理论上研究了基于光电反馈的双向混沌通信系统^[27]. 目前的这些相关研究大多集中在基于相干光反馈或光电反馈半导体激光器的双向混沌

通信, 而对基于非相干光反馈半导体激光器的双向混沌通信系统的研究还相对比较缺乏. 就非相干光反馈系统而言, 一方面, 系统的输出对相位不敏感, 较光反馈系统容易实现良好的同步; 另一方面, 非相干光反馈系统属全光系统, 不受电子器件带宽的限制, 能满足高速信息传输的需求. 基于此, 本文提出了一种基于非相干光反馈的双向混沌通信系统, 数值研究了该系统混沌同步特性及双向通信性能.

2. 系统模型

基于非相干光反馈半导体激光器的双向混沌通信系统如图 1 所示. 单模半导体激光器 SL_1 发出的水平方向的线偏振光通过法拉第旋转器 FR_1 旋转 45° 后在分束镜 BS_1 处被分为两束. 一束到达部分透射镜 PTM_1 后其透射光通过光隔离器 IO_1 和光电探测器 PD_1 输出, 其反射光被反射回 FR_1 再次旋转 45° 进入 SL_1 , 形成非相干反馈; 另一束通过 BS_3 后在 BS_4 处又被分为两部分, 一部分通过光隔离器 IO_3 和光电探测器 PD_3 输出加载有信息的混沌载波用于解码, 另一部分通过 BS_6 进入 FR_2 旋转 45° 后

* 国家自然科学基金(批准号:60978003)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: zmwu@swu.edu.cn

注入 SL_2 , 实现非相干注入. SL_2 输出光的传输路径与 SL_1 的类似. 信息 m_1, m_2 分别从 BS_2, BS_5 上加入. 在通信过程中, 利用 PD_1, PD_2 输出信号的差值可以

解码恢复加载在 SL_2 上的信号 (恢复后的信号为 m'_2), 利用 PD_3, PD_4 输出信号的差值可以解码恢复加载在 SL_1 上的信号 (恢复后的信号为 m'_1).

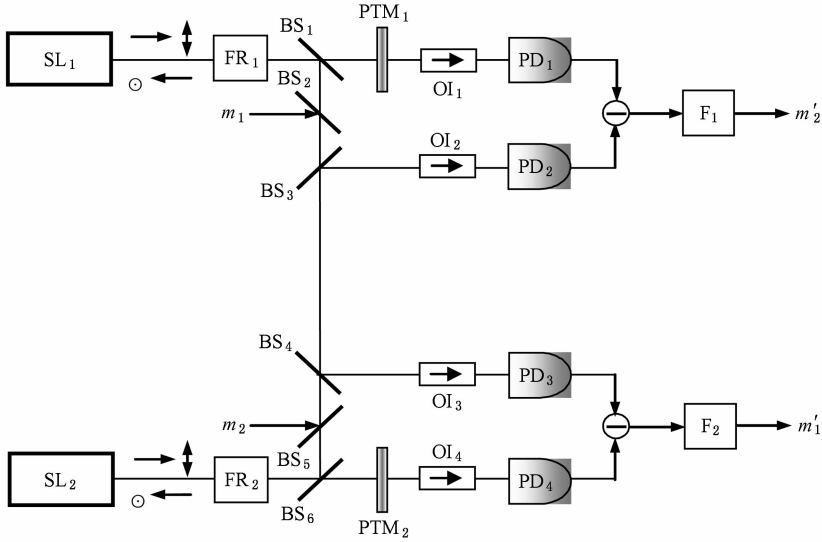


图 1 基于非相干光反馈半导体激光器的双向混沌通信系统示意图. SL 为半导体激光器, FR 为法拉第旋转器, BS 为分束镜, PTM 为部分透射镜, OI 为光隔离器, PD 为光电探测器, F 为滤波器, m 为加载的原始信息, m' 为解码恢复的信息

在以上系统构架中, 激光器的动力学行为可用下列速率方程组描述^[20]:

$$\frac{dP_1}{dt} = (G_1 - \gamma_{p1})P_1(t) + \beta_1 N_1(t) + F_1(t), \quad (1)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{I_1}{e} - \gamma_{s1}N_1(t) - G_1[P_1(t) + \kappa_1 P_1(t - \tau_1) + \sigma_1 P_2(t - \tau_c)], \quad (2)$$

$$\frac{dP_2}{dt} = (G_2 - \gamma_{p2})P_2(t) + \beta_2 N_2(t) + F_2(t), \quad (3)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{I_2}{e} - \gamma_{s2}N_2(t) - G_2[P_2(t) + \kappa_2 P_2(t - \tau_2) + \sigma_2 P_1(t - \tau_c)], \quad (4)$$

式中下标 1, 2 分别对应 SL_1 和 SL_2 , P 为激光腔内的光子数, N 为载流子数, N_0 为透明载流子数, $1/\gamma_p$ 为光子寿命, $1/\gamma_s$ 为载流子寿命, I 为注入电流, e 为电子电量, κ 为反馈系数, σ 为注入耦合系数, τ 为光反馈延迟时间, τ_c 为注入耦合延迟时间, β 为自发辐射速率. F 为朗之万噪声项, 满足关系 $\langle F_i(t) F_j(t') \rangle = 2N_j P_j \beta_j \delta(t - t')$. G 为激光器有源区的增益, 可以表示为

$$G_j = G_{Nj}(N_j - N_{0j}) / (1 + \varepsilon_j P_j) \quad (j = 1, 2), \quad (5)$$

其中 G_N 为增益系数, ε 为饱和系数.

3. 数值分析

3.1. 混沌同步

采用四阶 Runge-Kutta 对方程 (1) — (4) 进行数值求解. 首先假定两激光器具有相同的参数, 即: $1/\gamma_p = 2 \text{ ps}$, $1/\gamma_s = 2 \text{ ns}$, $G_N = 1 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$, $N_0 = 1.1 \times 10^8$, $\beta = 5 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$, $\varepsilon = 7.5 \times 10^{-8}$, $k = \sigma = 0.195$, $\tau = \tau_c = 9 \text{ ns}$, $I = 1.8 I_{th}$ (I_{th} 是激光器自由运行时的阈值电流). 图 2 给出了系统在未加载信息时输出的时间序列、相图及功率谱. 从图中可以看出两个激光器在参数一致的条件下能实现很好的同步.

为了进一步准确的描述同步质量, 引入关联函数 $C(\Delta t)$, 其定义如下:

$$C(\Delta t) = \frac{\langle [P_1(t) - \langle P_1(t) \rangle][P_2(t + \Delta t) - \langle P_2(t) \rangle] \rangle}{\sqrt{\langle |P_1(t) - \langle P_1(t) \rangle|^2 \rangle \langle |P_2(t) - \langle P_2(t) \rangle|^2 \rangle}}, \quad (6)$$

其中 Δt 是计算相关函数的时移, $\langle \cdot \rangle$ 表示对时间求平均. 相关函数 $|C(\Delta t)|$ 在域值 $[0, 1]$ 之间,

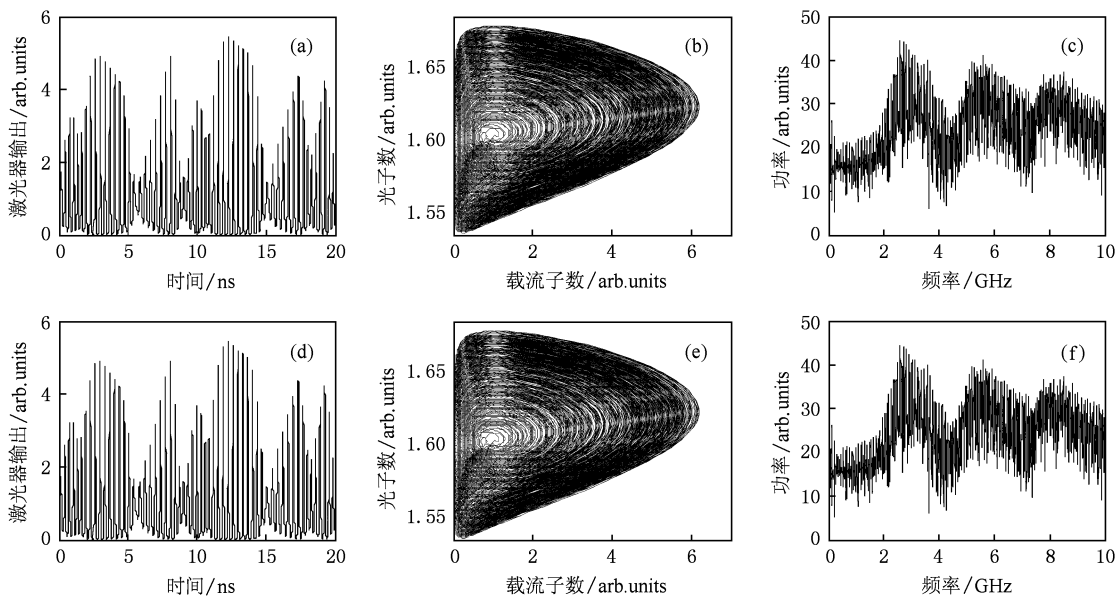


图2 激光器 SL_1 输出的时间序列(a),相图(b)及功率谱(c)和激光器 SL_2 输出的时间序列(d),相图(e)和功率谱(f)

$|C(\Delta t)|$ 的值越大,表示同步质量越好. 当 $|C(\Delta t)| = 1$ 时,系统达到完全同步. 图3给出了相应于图2的两激光器输出的关联函数随时延的变化关系. 从图中可以看出:当时延 $\Delta t = 0$ 时,关联函数达到最大值 0.99,即两个激光器实现零时延高质量同步.

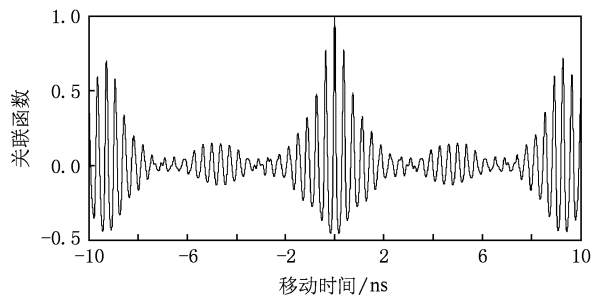


图3 SL_1 和 SL_2 同步关联函数的时间序列

3.2. 参数失配对系统同步性能的影响

要使系统达到完全混沌同步,必须要求两个激光器的参数完全一致,但这在实际应用中是难以做到的. 虽然注入电流、反馈系数、注入系数等外部参数相对容易控制,但激光器的内部参数却难以控制,因此研究系统内部参数失配对混沌同步性能的影响有着重要的意义.

图4给出了 $k + \sigma = 0.195$ 时,同步关联函数的极大值随激光器内部参数 $\varepsilon, G_N, \gamma_p, \gamma_s, N_0$ 失配的变化关系. 从图中可以看出,系统对参数 ε, G_N 失配有

较高的容忍度,在参数失配 $\pm 10\%$ 的范围内,系统关联函数极大值均大于 0.986. 而参数 γ_p, γ_s, N_0 对系统同步性能影响相对更大,在参数失配 $\pm 10\%$ 的范围内相关系数下降幅度可达 14%,但其值均在 0.86 以上,说明系统对内部参数失配具有较高的容忍性.

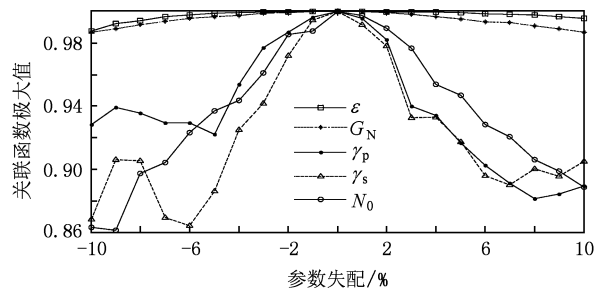


图4 关联函数极大值随内部参数失配的变化

为了进一步说明光互注入的强度对系统同步性能的影响,图5给出了 $k + \sigma = 0.39$,注入系数取不同值时 SL_1 和 SL_2 关联函数的极大值随参数 ε, G_N 失配的变化关系. 从图中可以看出,在 -10% 至 10% 的失配范围内,注入强度越大,关联函数的极大值越大,即系统对参数失配越不敏感. 这可以解释为,随着注入强度的增加,系统进入注入锁定区,因而对参数失配的容忍性更好. 需要指出的是,以上仅仅是考虑单个参数失配得到的结果. 在实际中,往往会同时存在多个参数失配,系统的同步性能可

能会受到更大的影响,因此,为了提高系统的同步

质量,应尽可能选择参数匹配良好的半导体激光器.

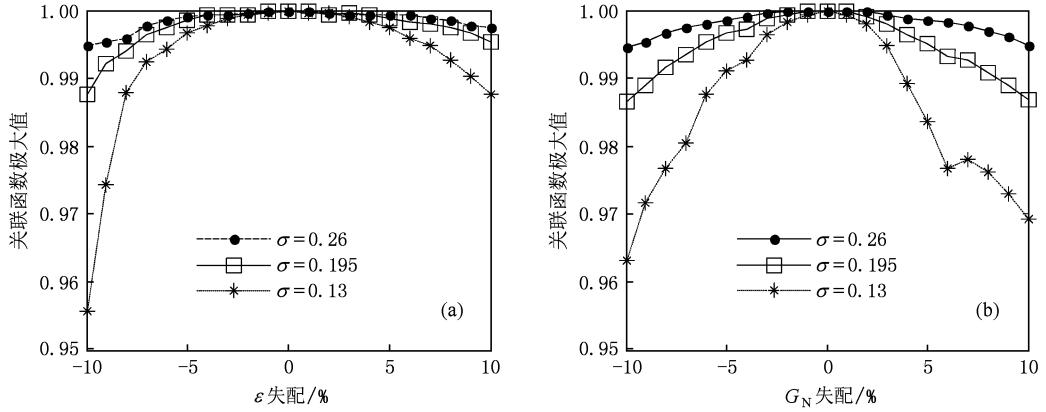


图 5 $k + \sigma = 0.39$ 时不同注入强度下关联函数极大值与参数失配的关系 (a) ϵ 失配; (b) G_N 失配

3.3. 双向混沌通信

在混沌保密通信中,信息的加密方法主要有三种,即混沌键控(CSK)^[17]、混沌隐藏(CMS)^[18]和混沌调制(CM)^[19]. 本文采用 CMS 方法,信息的频率为 1 GHz,其调制深度为 4%.

(a), (c), (e) 对应于 SL_1 , (b), (d), (f) 对应 SL_2 . 从图 6(c), (d) 中可以看出,信息能很好地隐藏于混沌载波之中,如果不了解系统的结构和参数,窃听者难以成功恢复信息;在采用四阶巴特沃斯低通滤波器滤波后,两个激光器都能较好的将对方发送的信息进行解调,即实现了双向实时通信,如图 6(e), (f) 所示.

图 6 是无参数失配时信息的编码和解码,其中,

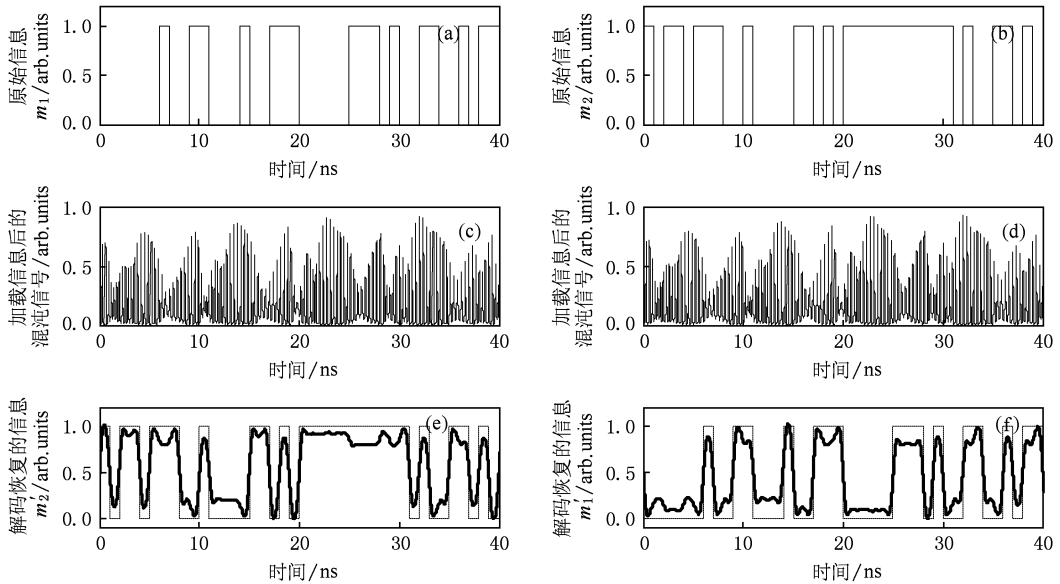


图 6 无参数失配时信息的编码和解码 (a),(b)为原始信息;(c),(d)为加载信息后的混沌信号;(e),(f)为解码恢复后的信息

为了进一步分析激光器内部参数失配对系统通信性能的影响,图 7(c), (d), (e), (f) 分别给出了参数 γ_p, γ_s 失配 2% 时,系统解码恢复信息所对应的眼图,左、右列分别对应于 SL_1 和 SL_2 . 为了进行比较,图 7(a), (b) 给出了无参数失配的情况. 从图

中可以看出,参数失配对系统的通信性能有一定的影响,但在一定的参数失配范围内系统仍能成功的实现双向通信. 这主要是因为参数失配降低了系统的同步性能,进而导致通信质量变差;但此时由于参数失配不太大,系统的同步性能仍能保持较好

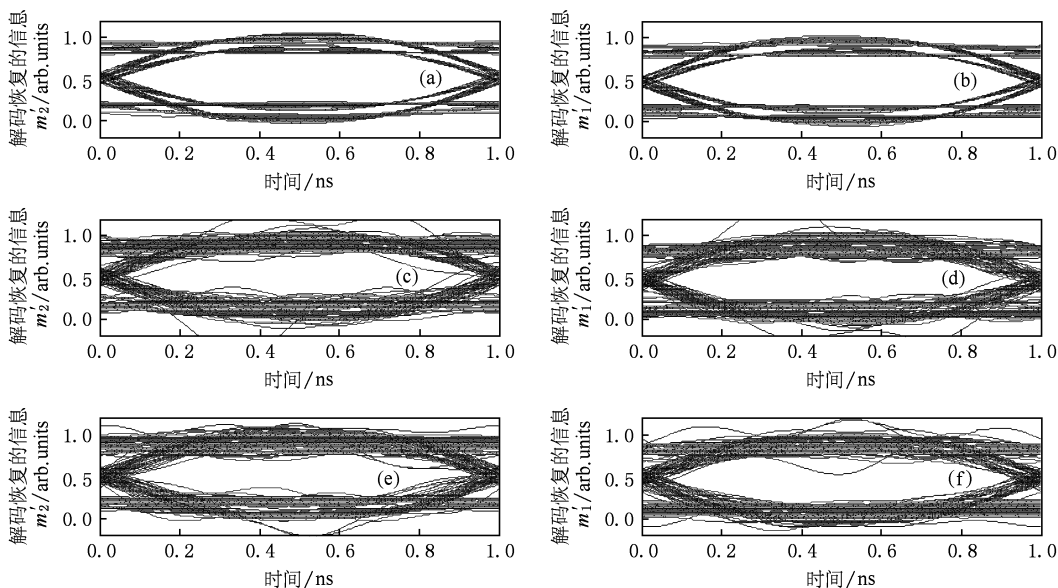


图7 解码恢复的信息对应的眼图 (a,b)为无参数失配;(c,d)为 γ_p 失配;(e,f)为 γ_s 失配

(如图4所示),因而仍能成功的恢复信息.

需要说明的是,通常就系统的实用性而言,系统对参数失配的容忍性越好,越有利于系统的实际应用.然而,随着系统对参数失配容忍性的增加,其安全性一般将会弱化.一般来说,窃密者成功恢复信息的关键在于能否利用激光器主副同步结构重构发射端的混沌载波,但相关研究表明这种窃密方式对互注入结构是不成功的^[24].对于本文提出的双向混沌通信系统,尽管窃密者可能容易获得两个激光器输出的混沌信息,即能够获得两个激光器的输出功率差,但这样仅能够恢复加载在两个激光器上的信号差值,并不能恢复加载在每个激光器上的信号^[25].由此可见,本文提出的系统在允许一定参数

失配的情况下也比较好地确保了通信的安全性.

4. 结 论

本文提出了一种基于非相干光反馈半导体激光器的双向混沌通信系统,并数值分析了该系统的同步特性及通信性能.研究表明,在无参数失配时,系统可以实现无延时的高质量混沌同步,能成功实现双向实时通信;参数失配对系统同步性能和通信质量有一定的影响,但在激光器内部参数失配 $\pm 10\%$ 的范围内,系统相关系数均在0.86以上,具有较好的同步性能,因而系统仍能成功恢复信息,实现双向通信.

- [1] Pecora L M, Carroll T L 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 821
- [2] Argyris A, Syvridis D, Larger L, Annovazzi-Lodi V, Colet P, Fischer I, García-Ojalvo J, Mirasso C R, Pesquera L, Shore K A 2005 *Nature* **438** 343
- [3] Tang S, Liu J M 2001 *IEEE J. Quantum Electron.* **37** 329
- [4] Troger J, Thevennaz L, Nicati P A, Robert P A 1999 *IEEE J. Lightwave Technol.* **17** 629
- [5] Wu J G, Xia G Q, Wu Z M 2009 *Opt. Express* **17** 20124
- [6] Liu H J, Feng J C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1484 (in Chinese) [刘惠杰,冯久超 2009 物理学报 **58** 1484]
- [7] 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]
- [8] Van Wiggeren G D, Roy R 1998 *Science* **279** 1198
- [9] Liu J M, Chen H F, Tang S 2001 *IEEE Trans. Circuits Syst. I* **48** 1475
- [10] Yan S L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6878 (in Chinese) [颜森林 2008 物理学报 **57** 6878]
- [11] Liu J M, Chen H F, Tang S 2002 *IEEE J. Quantum Electron.* **38** 1184
- [12] Abarbanel H D I, Kennel M B, Illing L, Tang S, Chen H F, Liu J M 2001 *IEEE J. Quantum Electron.* **37** 1301
- [13] Zhang J Z, Wang A B, Wang Y C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3793 (in Chinese) [张建忠,王安帮,王云才 2009 物理学报 **58** 3793]

- [14] Li X F, Pan W, Luo B, Ma D 2006 *IEEE J. Quantum Electron.* **42** 953
- [15] Annovazzi-Lodi V, Donati S, Scire A 1996 *IEEE J. Quantum Electron.* **32** 953
- [16] Lee M W, Shore K A, 2006 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18** 169
- [17] Mirasso C R, Mulet J, Masoller C 2002 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **14** 456
- [18] Ohtsubo J 2002 *IEEE J Quantum Electron.* **38** 1141
- [19] Chen H F, Liu J M 2000 *IEEE J Quantum Electron.* **36** 27
- [20] Rogister F, Pieroux D, Sciamanna M, Megret P, Blondel M 2002 *Opt. Commun.* **207** 295
- [21] Liu J, Wu Z M, Xia G Q 2009 *Opt. Express* **17** 12619
- [22] Lee M W, Paul J, Sivaprakasam S, Shore K A 2003 *Opt. Lett.* **28** 2168
- [23] Yan S L 2005 *Chinese J. Lasers.* **32** 1503 (in Chinese) [颜森林 2005 中国激光 **32** 1503]
- [24] Klein E, Gross N, Kopelowitz E, Rosenbluh M, Khaykovich L, Kinzel W, Kanter I 2006 *Phys. Rev. E* **74** 046201
- [25] Vicente R, Mirasso C R, Fischer I 2007 *Opt. Lett.* **32** 403
- [26] Zhang W L, Pan W, Luo B, Zou X H, Wang M Y, Zhou Z 2008 *Opt. Lett.* **33** 237
- [27] Deng T, Xia G Q, Cao L P, Chen J G, Lin X D, Wu Z M 2009 *Opt. Commun.* **282** 2243
- [28] Jiang N, Pan W, Yan L S, Luo B, Yang L, Xiang S Y, Zheng D 2009 *Opt. Commun.* **282** 2217

Bidirectional chaos communication based on semiconductor laser with incoherent optical feedback*

Cao liang-Ping¹⁾²⁾ Xia Guang-Qiong¹⁾ Deng Tao¹⁾ Lin Xiao-Dong¹⁾ Wu Zheng-Mao^{1)†}

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

2) (Elementary Education College, Chongqing Normal University, Chongqing 400700, China)

(Received 12 November 2009; revised manuscript received 19 November 2009)

Abstract

In this paper, a bidirectional chaos communication system based on semiconductor lasers with incoherent optical feedback is presented, and the synchronization characteristics and the communication performances of such a system are numerically investigated. The results show that when the parameters of the two lasers are matched, the good-quality chaos synchronization with zero lag time and simultaneously bidirectional message transmission can be realized and when the parameters of the two lasers are mismatched, the synchronization quality and communication performance are affected to a certain extent, but this system possesses good robustness against mismatched parameters and can still realize bidirectional chaos communication within a certain mismatched parameter range.

Keywords: incoherent optical feedback, semiconductor laser, chaos synchronization, bidirectional communication

PACC: 4265T, 4255P

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60978003).

† Corresponding author. E-mail: zmwu@swu.edu.cn