

基于混沌信号非相干光注入下两半导体激光器间的双向混沌通信*

魏月 樊利 夏光琼 陈于淋 吴正茂†

(西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715)

(2012年4月28日收到; 2012年5月25日收到修改稿)

提出了基于同时受到一个驱动混沌信号非相干光注入的两个响应半导体激光器之间的混沌同步以实现双向保密通信的系统方案, 并对系统的混沌同步特性以及两个响应激光器之间的内部参数失配对同步特性的影响进行了研究. 研究表明: 通过选取合适的系统参量, 可以实现响应激光器与驱动激光器之间同步系数较小而两响应激光器之间达到高质量混沌同步; 两响应激光器之间的内部参数失配对它们之间的同步性能虽然有一定的影响, 但影响比较小. 另外, 本文还对两个 2 Gbit/s 的信息在该系统中双向传输时的隐藏和解调效果以及系统的安全性进行了分析.

关键词: 半导体激光器, 非相干光注入, 混沌同步, 参数失配

PACS: 42.55.Px, 05.45.Vx

1 引言

自 1990 年 Pecora 和 Carrol 证明了混沌信号可以实现同步以来^[1], 混沌同步在信息保密传输中的应用越来越受到人们的重视. 由于半导体激光器的非线性动力学行为比较复杂, 在光反馈、光注入、光电反馈等外部扰动下^[2-9] 容易获得混沌光输出, 同时半导体激光器具有高调制带宽和便于封装等诸多优点, 因此基于半导体激光器的混沌同步及保密通信的研究受到相关学者的广泛关注. 2005 年, Argyris 等利用商用光通信网络实现了 1 Gbit/s、传输距离达到 120 km 的单向激光混沌保密通信^[10]. 但是, 信息单向保密传输的局限性也是很明显的, 实现信息的双向乃至多向传输无疑是混沌保密通信发展的必然趋势.

近几年来, 国内外许多学者相继提出了一些半导体激光器的双向混沌保密通信的方案. 这些方案

可分为两种类型: 一种是基于两个直接互耦的半导体激光器间的混沌同步以实现信息双向保密通信的方案^[11-13]; 另一种是基于受同一混沌驱动信号光注入的、无直接耦合的两半导体激光器间的混沌同步以实现双向保密通信的方案^[14-17]. 对于后一种类型, 由于两个受同一混沌信号驱动的激光器(响应激光器)之间没有直接相互耦合, 因此基于两响应激光器之间的混沌同步而实现信息的双向保密传输方案中信息解调无需依靠混沌滤波效应, 从而信息传输的速率不受混沌滤波效应的带宽限制. 目前这方面的相关研究主要集中在两个响应激光器受驱动混沌信号的相干光注入实现混沌同步及保密通信. 如 Yamamoto 等从实验上观察到两个 1550 nm 半导体激光器在同一驱动混沌信号的相干光注入下的混沌同步^[16]; Wu 等实现了相距 40 km 的两响应激光器在受同一混沌信号相干光注入时的高质量混沌同步^[17]. 已有的研究表明, 与相干光注入系统相比, 光混沌信号转换为电混沌

* 国家自然科学基金(批准号: 60978003, 61078003, 61178011, 61275116)和重庆市自然科学基金重点项目(批准号: CSTC2012jjB40011)资助的课题.

† E-mail: zmwu@swu.edu.cn

信号再注入接收激光器的同步系统^[18]对参数失配具有更高的容忍性,但信息传输的容量会受到电子器件带宽的限制.而非相干光注入系统与光电转换后注入的系统具有同样的对光相位变化不敏感的特点使之对参数失配也会具有较好的容忍性^[19],并且其全光特性使系统的传输容量不会受到电子器件带宽的限制.基于此,本文提出了一种新型的基于非相干光注入的双向混沌同步通信系统方案.在该方案中,两个响应半导体激光器在同一驱动混沌信号的非相干光注入下获得混沌输出并实现彼此之间混沌同步,两响应激光器的混沌输出作为混沌载波分别对通信信道中两双向传输的信号进行隐藏,利用响应激光器之间的混沌同步实现信息的解调.本文对系统的混沌同步特性以及激光器内部参数失配对系统同步特性的影响进行了研究,并对 2 Gbit/s 的信息在该系统中的调制和解调效果进行了分析.

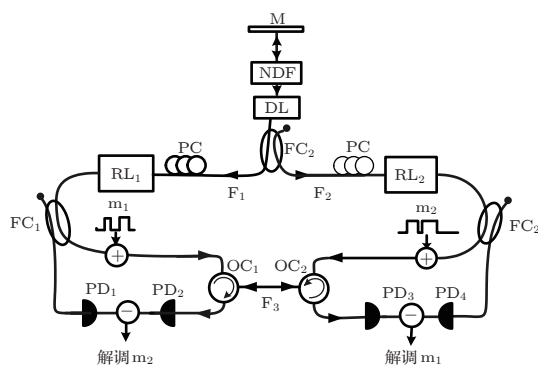


图1 系统结构示意图 (DL 为驱动激光器; RL 为响应激光器; NDF 为中性密度衰减器; M 为反射镜; PC 为偏振控制器; F 为传输光纤; FC 为 50/50 光纤耦合器; OC 为光环形器; PD 为光电探测器)

2 系统模型

系统模型如图 1 所示. 驱动激光器 (DL) 的输出光经平面镜反馈回谐振腔, 通过调节中性密度衰减器 (NDF) 控制反馈强度使 DL 输出混沌信号. 从 DL 输出的混沌信号, 通过 50/50 光纤耦合器 (FC₃) 分成相等的两束光, 经过偏振控制器 (PC) 后对称注入两响应激光器 RL₁ 和 RL₂. 调节 PC, 使注入光的振动方向与 RL₁, RL₂ 输出光振动方向垂直. 通过调节系统参量可使 RL₁ 和 RL₂ 均输出混沌信号, 且彼此能较好同步. 由于 RL₁ 和 RL₂ 之间没有直接的相互耦合, 因此需要增加一条通信信道 (F₃) 以实现信息的双向传输. RL₁ 的输出作为混

沌载波, 与需要传输的信息 1(m₁) 一起进入通信信道 F₃ 以实现信息的掩藏, 经过传输到达 RL₂ 前端但不进入 RL₂, 经过 PD₃ 转换后得到的电信号与 RL₂ 的混沌输出并经过 PD₄ 转化后的电信号相减即可实现 m₁ 的解调. 信息 2(m₂) 的掩藏及解调方式与 m₁ 相似.

在光反馈作用下, 驱动激光器的动力学行为可用下列速率方程描述^[20]:

$$\frac{dE^D(t)}{dt} = \frac{1}{2}(1 + i\alpha^D)[G^D - \gamma_P^D]E^D(t) + \frac{k}{\tau_{in}}E^D(t - \tau)\exp(-i\omega^D\tau), \quad (1)$$

$$\frac{dN^D(t)}{dt} = \frac{I^D}{q} - \gamma_s^D N^D(t) - G^D |E^D(t)|^2. \quad (2)$$

而响应激光器在非相干光注入下的速率方程可表示为^[19]

$$\frac{dP^{R_1, R_2}(t)}{dt} = [G^{R_1, R_2} - \gamma_P^{R_1, R_2}]P^{R_1, R_2}(t) + \beta^{R_1, R_2}N^{R_1, R_2}(t), \quad (3)$$

$$\frac{dN^{R_1, R_2}(t)}{dt} = \frac{I^{R_1, R_2}}{q} - \gamma_s^{R_1, R_2}N^{R_1, R_2}(t) - G^{R_1, R_2} [P^{R_1, R_2}(t) + \kappa^{R_1, R_2} |E^D(t - \tau^{R_1, R_2})|^2]. \quad (4)$$

上述方程 (1)—(4) 中, 上标 D, R₁, R₂ 分别表示 DL, RL₁ 和 RL₂. N 为载流子数, E 为激光器的慢变场振幅, P 为光子数 (= |E(t)|²), α 为线宽增强因子, γ_P 为光子寿命的倒数, γ_s 为载流子寿命的倒数, β 为自发辐射率, ω 为角频率, q 为单位电荷, I 为偏置电流, k 为 DL 的外腔反馈系数, τ_{in} 为光子在 DL 腔内的往返时间, τ 为 DL 的外腔反馈时间, κ^{R₁}, κ^{R₂} 分别为 DL 对 RL₁ 和 RL₂ 注入系数, τ^{R₁}, τ^{R₂} 分别为 DL 对 RL₁ 和 RL₂ 的注入时间. G = G_N(N(t) - N₀)/(1 + εP(t)), 其中 G_N 为微分增益系数, N₀ 为透明载流子数, ε 为饱和增益系数. 为简便起见, 在上述方程中忽略了自发辐射噪声的影响.

引入关联函数 C_{ij}(Δt) 来描述系统中任意两个激光器之间的同步质量, 其定义如下:

$$C_{ij}(\Delta t) = \frac{\langle [P^i(t) - \langle P^i(t) \rangle][P^j(t + \Delta t) - \langle P^j(t) \rangle] \rangle}{\langle |P^i(t) - \langle P^i(t) \rangle|^2 \rangle^{\frac{1}{2}} \langle |P^j(t + \Delta t) - \langle P^j(t) \rangle|^2 \rangle^{\frac{1}{2}}}, \quad (5)$$

其中 $i, j (= D, 1, 2)$ 分别代表不同的激光器, $\langle \rangle$ 表示对时间求平均, Δt 是计算关联函数的时移. $|C|$ 的取值范围在 0 到 1 之间, $|C|$ 值越大表明两个混沌信号同步性越好.

另外, 系统的通信质量可引入 Q 因子来评估, Q 因子的定义为

$$Q = \frac{\langle P_1 \rangle - \langle P_0 \rangle}{\sigma_1 + \sigma_0}, \quad (6)$$

其中 $\langle \rangle$ 表示对时间求平均, P_1 和 P_0 分别表示比特“1”和比特“0”的功率, σ_1 和 σ_0 分别表示比特“1”和比特“0”的功率的标准差. Q 因子越高表示通信质量越好.

3 结果与讨论

采用四阶 Runge-Kutta 方法对方程 (1)—(4) 进行求解. 首先假定三个激光器具有相同的参数, 取值如下: $\alpha = 3$, $\gamma_P = 0.5 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$, $\gamma_s = 0.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$, $G_N = 1.5 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$, $\epsilon = 1 \times 10^{-7}$, $\beta = 500 \text{ s}^{-1}$, $N_0 = 1.5 \times 10^8$, $\omega = 1.22 \times 10^{15} \text{ rad/s}$, $q = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$, $\tau_{in} = 1 \times 10^{-12} \text{ s}$, $I = 27 \text{ mA}$, $\tau = \tau^{R_1} = \tau^{R_2} = 5 \times 10^{-9} \text{ s}$. DL 的反馈系数 $k = 3 \times 10^{-2}$, 而响应激光器的注入系

数 $\kappa^{R_1} = \kappa^{R_2} = 0.41$.

3.1 混沌同步

图 2 给出了 DL, RL_1 和 RL_2 输出的时间序列、功率谱及任意两个激光器输出之间的关联函数随时移的变化. 从图中可以看出: DL 和 RL_1, RL_2 的输出存在较大的差异, 相对应的 C_{D1} 和 C_{D2} 的最大值仅为 0.45; 而 RL_1 和 RL_2 输出的时间序列和功率谱都非常一致, 相应的 C_{12} 在时延 $\Delta t = 0$ 处取得最大值 1. 可见, 在 RL_1 和 RL_2 之间无内部参数失配的情况下, RL_1, RL_2 虽然与 DL 的同步效果较差, 但 RL_1 与 RL_2 之间却能够实现高质量的等时混沌同步.

3.2 参数失配对系统同步性能的影响

前面的分析表明, 在 RL_1 与 RL_2 具有相同的内部参数时它们之间可以实现高质量的混沌同步. 但在实际应用中, 不同激光器之间的内部参数总存在一定的失配, 因此我们有必要研究内部参数失配对 RL_1 和 RL_2 之间同步性能的影响. 为计算方便, 我们仅改变 RL_1 的内部参数 $\epsilon, \gamma_P, \gamma_s, G_N, N_0$, 其他参数取值不变, 相应的参数失配定义为

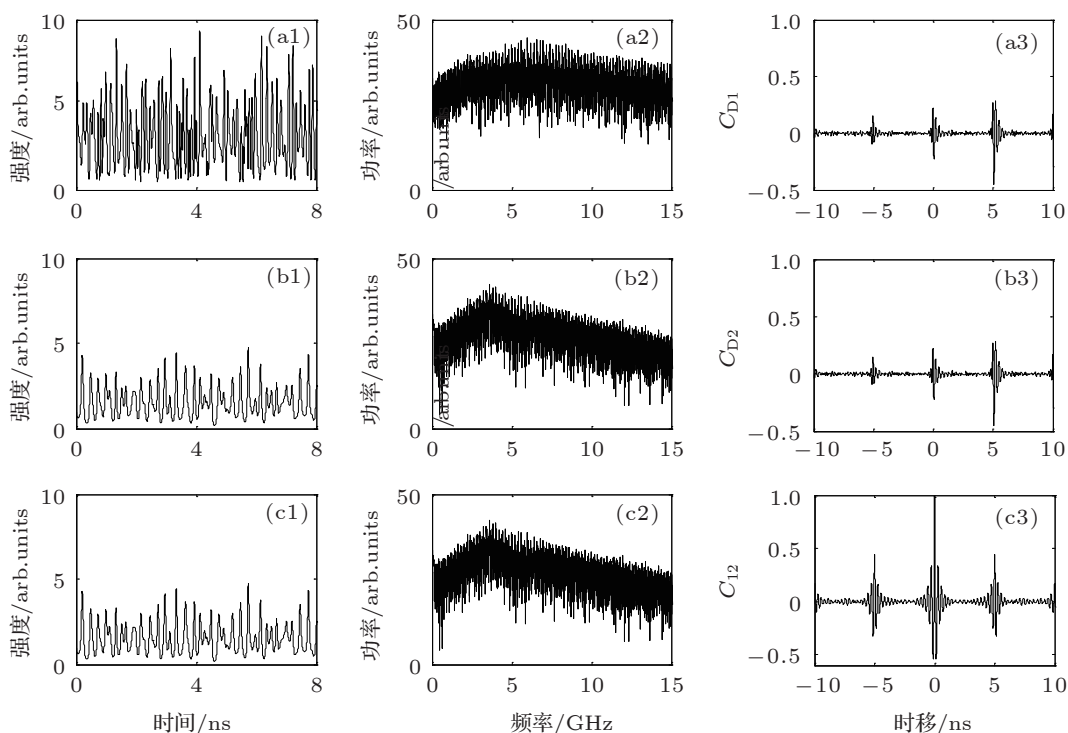


图 2 DL, RL_1, RL_2 输出的混沌时间序列 (a1)—(c1), 功率谱 (a2)—(c2) 以及 C_{D1}, C_{D2}, C_{12} 随时移的变化 (a3)—(c3)

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon &= \frac{\varepsilon^{R_1} - \varepsilon^{R_2}}{\varepsilon^{R_2}}, & \Delta\gamma_P &= \frac{\gamma_P^{R_1} - \gamma_P^{R_2}}{\gamma_P^{R_2}}, \\ \Delta\gamma_s &= \frac{\gamma_s^{R_1} - \gamma_s^{R_2}}{\gamma_s^{R_2}}, & \Delta G_N &= \frac{G_N^{R_1} - G_N^{R_2}}{G_N^{R_2}}, \\ \Delta N_0 &= \frac{N_0^{R_1} - N_0^{R_2}}{N_0^{R_2}}. \end{aligned} \quad (7)$$

和 N_0 的失配对 RL_1 和 RL_2 之间同步质量的影响相对较大, 但 γ_s 失配量在 -10% — 10% 变化时, C_{12} 的最大值总能保证大于 0.84. 可见, 两个响应激光器之间的混沌同步对内部参数失配具有较好的容忍性.

3.3 双向混沌通信

基于 RL_1 和 RL_2 之间高质量的混沌同步, 系统可进行双向保密通信. 本文采用混沌掩藏 (CMS)^[21] 的方法加载信号, 调制深度为 0.05, 调制速率为 2 Gbit/s. 图 4 给出了 RL_1 和 RL_2 的内部参数完全匹配的情况下, 信息加载在混沌载波上的隐藏效果、在接收端解码恢复后的效果及系统解调信息所对应的眼图. 从图 4(b1), (b2) 中可以看出, 信息能很好地隐藏在混沌载波中. 信息和混沌载波一起经过传输到达接收端, 并与接收端的响应激光器所输出的混沌波形相减后经过四阶巴特沃斯低通滤波器处理, 得到图 4(c1), (c2) 解调信息波形图. 与原始信息波形图 4(a1), (a2) 作对比可以看出, 信息在两个接收端都得到了有效解调. 图 4(d), (e) 给出了解调 m_1 和 m_2 对应的眼图, 可以看出眼图非常清晰, 表明系统可以实现高质量的信息双向传输.

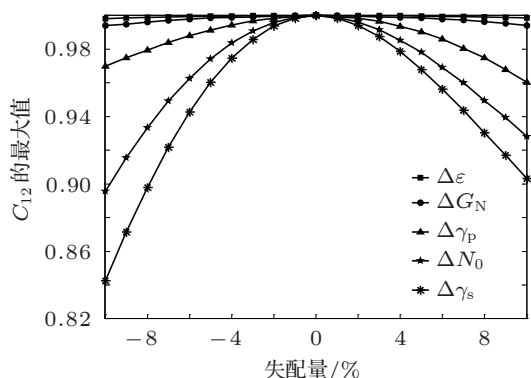


图 3 C_{12} 的最大值随 RL_1 和 RL_2 之间内部参数失配的变化

图 3 给出了 C_{12} 的最大值随参数失配的变化. 可以看出, 随着参数失配的增大, 系统的同步性能逐渐下降, 并且不同参数的失配对同步质量影响不同. 参数 ε , G_N 失配对系统同步性能的影响不大, 在失配 $\pm 10\%$ 的范围内, C_{12} 的最大值均大于 0.99. γ_s

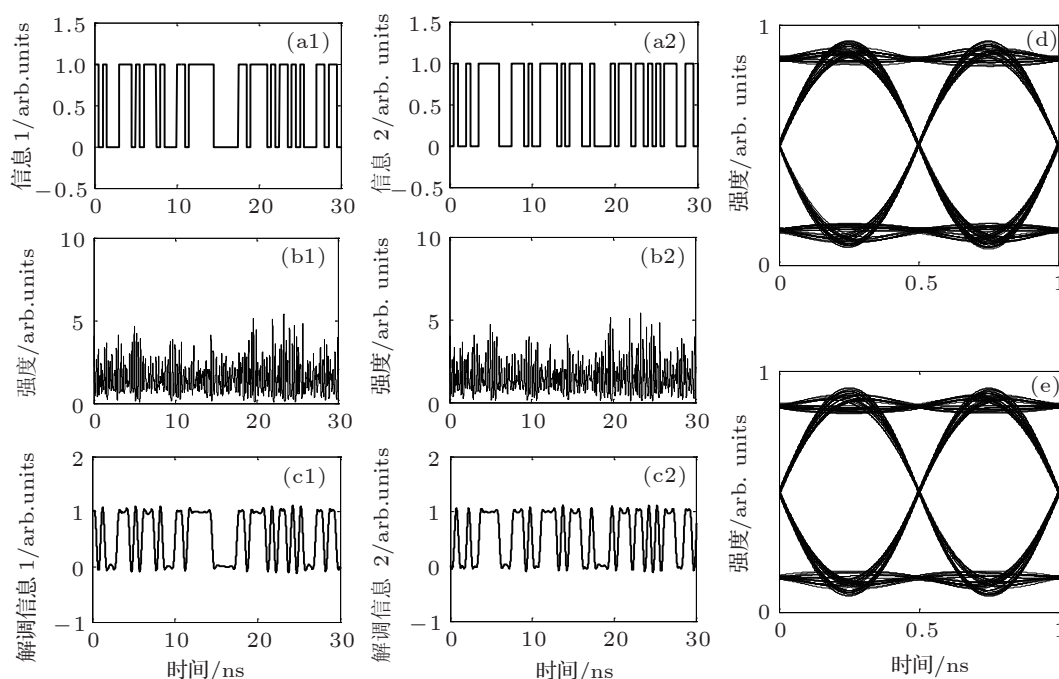


图 4 信息的双向加载与解调 (a1), (a2) 分别为原始信息 m_1, m_2 ; (b1), (b2) 为加载信息后的混沌信号; (c1), (c2) 为解码恢复后的信息; (d) 和 (e) 为解调 m_1 与 m_2 的眼图

由于在实际应用中两响应激光器之间不可避免地存在内部参数失配,因此下面将进一步分析 RL_1 和 RL_2 之间的内部参数失配对信息解调质量的影响.图 5 给出了解调信息的 Q 因子随参数 ε , G_N 和 γ_P 失配的变化以及失配量为 5% 时所对应的眼图.从图 5(a) 可以看出参数失配使信息的解调质

量呈下降趋势,这主要是因为参数失配会降低两响应激光器之间的同步性能,进而导致通信质量下降.但在参数失配的 $\pm 5\%$ 范围内,解调信息的 Q 因子仍可维持在 6 以上,结合图 5(b)—(d) 所示眼图可以看出信息仍能得到有效解调,这主要得益于系统的同步性能具有对内部参数失配较好的容忍性.

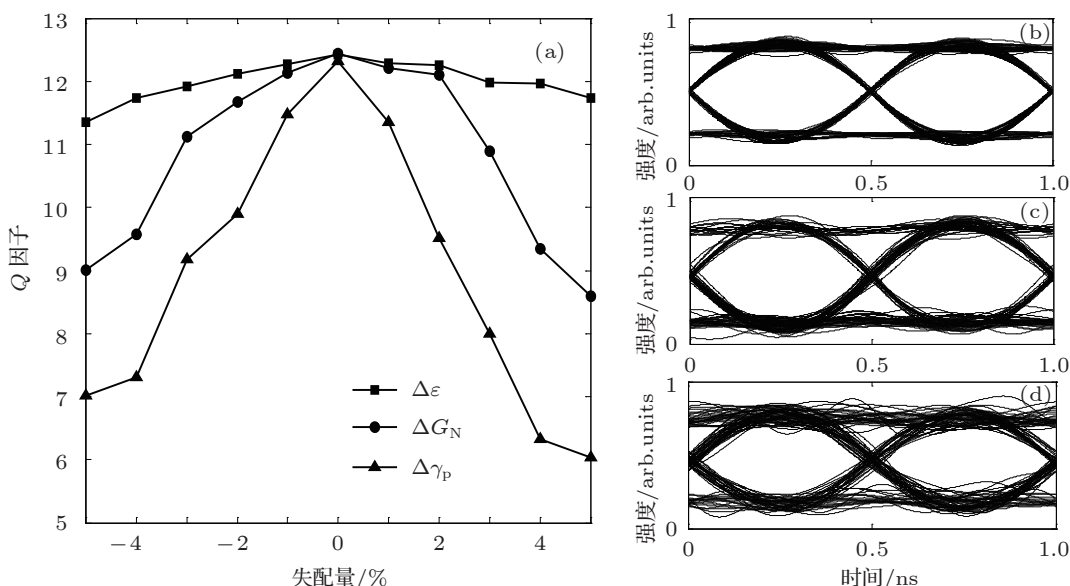


图 5 参数失配时信息的解调效果 (a) 为解调信息的 Q 因子随参数失配的变化; (b)—(d) 分别对应 $\Delta\varepsilon = 5\%$, $\Delta G_N = 5\%$, $\Delta\gamma_P = 5\%$ 时的眼图

最后我们考察该系统的安全性.由于 DL 和 RL_1 、以及 DL 和 RL_2 之间的同步效果较差,因此窃密者无法通过截取 F_1 (或 F_2) 光纤链路和 F_3 光纤链路中传输的混沌信号解调出信息;而窃密者通过截取 F_3 光纤链路中两个沿相反方向传输的信号做“减”操作,虽然能恢复加载在两个响应激光器上信息的差值,但无法恢复信息本身.因此,本文所提的系统方案能确保通信的安全性.

4 结论

本文提出了基于受同一驱动混沌信号非相干光注入的两个响应半导体激光器间的混沌同步以实现双向保密通信的方案,分析了激光器内部参

数失配对系统同步特性的影响,并对两个 2 Gbit/s 信息在系统中双向传输时的隐藏和解调效果进行了研究.研究表明:通过选取合适的系统参量可使 RL_1 和 RL_2 之间实现高质量的混沌同步,同时 RL_1 , RL_2 和 DL 之间的同步质量较差;内部参数失配会降低 RL_1 和 RL_2 之间的同步性能,但在参数失配 $\pm 10\%$ 的范围内, C_{12} 的最大值均维持在 0.84 以上,因此系统具有较好的对内部参数失配的容忍性;基于 RL_1 和 RL_2 之间高质量的混沌同步,两个 2 Gbit/s 的信息可很好地掩藏在 RL_1 和 RL_2 输出的混沌载波中进行传输,并在接收端成功实现解调.最后对窃密者可能采取的途径进行了讨论,分析结果显示该系统具有很高的安全性.

[1] Pecora L M, Carroll T L 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 821
 [2] Mork J, Tromborg B, Mark J 1992 *IEEE J. Quantum Electron.* **28** 93
 [3] Simpson T B, Liu J M, Gavrielides A, Kovanis V, Alsing P M 1995

Phys. Rev. A **51** 4181
 [4] Lin F Y, Liu J M 2003 *IEEE J. Quantum Electron.* **39** 562
 [5] Liu H, Feng J C 2009 *Acta. Phys. Sin.* **58** 1484 (in Chinese) [刘慧杰冯久超 2009 物理学报 **58** 1484]

- [6] Yan S L 2010 *Acta. Phys. Sin.* **59** 3810 (in Chinese) [颜森林 2010 物理学报 **59** 3810]
- [7] Wu L, Zhu S, Ni Y 2007 *Eur. Phys. J. D* **41** 349
- [8] Meng L N, Zhang M J, Zheng J Y, Zhang Z X, Wang Y C 2011 *Acta. Phys. Sin.* **60** 124212 (in Chinese) [孟丽娜, 张明江, 郑建宇, 张朝霞, 王云才 2011 物理学报 **60** 124212]
- [9] 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]
- [10] Argyris A, Syvridis D, Larger L, Annovazzi-Lodi V, Colet P, Fischer I, Garc'ia-Ojalvo J, Mirasso C R, Pesquera L, Shore K A 2005 *Nature* **438** 343
- [11] Vicente R, Mirasso C R, Fischer I 2007 *Opt. Lett.* **32** 403
- [12] Cao L P, Xia G Q, Deng T, Lin X D, Wu Z M 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5541 (in Chinese) [操良平, 夏光琼, 邓涛, 林晓东, 吴正茂 2010 物理学报 **59** 5541]
- [13] Deng T, Xia G Q, Cao L P, Chen J G, Lin X D, Wu Z M 2009 *Opt. Commun.* **11** 2243
- [14] Liu Y R, Wu Z M, Wu J G, Li P, Xia G Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 024203 (in Chinese) [刘宇然, 吴正茂, 吴加贵, 李萍, 夏光琼 2012 物理学报 **61** 024203]
- [15] Annovazzi-Lodi V, Aromataris G, Benedetti M, Merlo S 2010 *IEEE J. Quantum Electron.* **46** 258
- [16] Yamamoto T, Oowada I, Yip H, Uchida A, Yoshimori S, Yoshimura K, Muramatsu J, Goto S, Davis P 2007 *Opt. Express* **15** 3974
- [17] Wu J G, Wu Z M, Xia G Q, Deng T, Lin X D, Tang X, Feng G Y 2011 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **23** 1854
- [18] Fan L, Xia G Q, Wu Z M 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 989 (in Chinese) [樊利, 夏光琼, 吴正茂 2009 物理学报 **58** 989]
- [19] Rogister F, Locquet A, Pieroux D, Sciamanna M, Deparis O, M'egret P, Blondel M 2001 *Opt. Lett.* **26** 1486
- [20] Lang R, Kobayashi K 1980 *IEEE J. Quantum Electron.* **16** 347
- [21] Sivaprakasam S, Shore K A 1999 *Opt. Lett.* **24** 1200

Bidirectional chaos communication based on two semiconductor lasers subjected to incoherent optical injection of common-chaotic-signal*

Wei Yue Fan Li Xia Guang-Qiong Chen Yu-Lin Wu Zheng-Mao[†]

(School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

(Received 28 April 2012; revised manuscript received 25 May 2012)

Abstract

Based on the chaotic synchronization between two response semiconductor lasers (RLs) subjected to incoherent optical injection of common-chaotic-signal from a driven laser (DL), a bidirectional chaos communication scheme is proposed, and the chaotic synchronization characteristics and the effects of intrinsic mismatched parameter on the synchronization performances are numerically investigated. The results show that high-quality chaos synchronization between the two RLs can be achieved while the cross-correlation coefficients between the two RLs and the DL are very low under proper operation condition; the intrinsic parameter mismatching between two RLs will destroy the synchronized quality to a certain extent, but the consequence is not severe. Additionally, the bidirectional transmission performances for two messages with 2Gbit/s and the security of the scheme are also analyzed.

Keywords: semiconductor laser, incoherent optical injection, chaotic synchronization, parameter mismatch

PACS: 42.55.Px, 05.45.Vx

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60978003, 61078003, 61178011, 61275116), and the Natural Science Foundation of Chongqing City (Grant No. CSTC2012jjB40011).

[†] E-mail: zmwu@swu.edu.cn