

光电反馈混沌系统脉冲同步特性研究*

胡汉平 于志良[†] 刘凌锋

(华中科技大学图像识别与人工智能研究所, 武汉 430074)

(2011 年 12 月 31 日收到; 2012 年 4 月 11 日收到修改稿)

提出光电反馈混沌状态下的混沌脉冲同步. 首先, 对激光器的混沌动力学方程进行了数值分析, 通过改变反馈系数和脉冲系数来观测混沌状态的变化, 实现了对混沌激光器的控制; 然后, 对脉冲同步方程进行数值分析, 给出了同步的模拟图. 实验结果表明此方法能实现混沌同步.

关键词: 脉冲, 混沌同步, 光电反馈, 半导体激光器

PACS: 05.45.Gg, 05.45.Pq, 42.65.Sf, 42.55.Px

1 引言

由于混沌信号自身所具有不可预测、初值高度敏感等特性, 使得混沌在保密通信中具有广阔的应用前景, 它已成为目前信息科学界关注和研究的热点之一^[1-3]. 近年来, 半导体激光器由于制作简洁、成本低廉、体积小和易于调制等优点^[4], 它因此作为相干光源广泛应用于光传输和光信息处理等领域. 半导体激光器在光反馈, 光注入, 光电反馈下容易获得光混沌输出. 光注入和反馈他们的操作需要仔细对准不同的光学元件, 一点微小的移位完全可以扰乱他们的行为. 而且对于动力学相位的参与, 使系统对发生的不可避免相位波动和漂移变得敏感. 而基于光电反馈的激光系统便于电信号调制^[5], 反馈信号仅作用于载流子密度而不作用于光场, 因此系统对光相位变化不敏感因而更易于实验实现.

混沌保密通信的研究在国际上已经历了十多年, 在混沌的控制、同步方法等方面已取得许多成果. 但是混沌保密通信一直没有获得广泛应用, 主要有以下两个原因: 受电子器件带宽限制, 混沌电路很难产生高速率的混沌序列^[6], 限制了通信过程中的加解密速度; 激光混沌的同步精度要求高、实

现难度大. 这两个问题一直制约着混沌保密通信的应用. 自 Pecora 和 Carroll^[7] 观察到两个混沌系统的同步现象, 奠定了混沌同步研究的理论基础以来, 混沌同步成了众多学者的热门研究领域. 为了使信息在接收端复原, 必须使发射与接收端达到同步, 同步性的好坏决定着信息复原的质量. 利用混沌系统的同步还可以有效的对混沌系统的参数进行估计^[8].

本文研究光电反馈半导体激光器的非线性动力学特性, 讨论了反馈强度变化时, 激光器产生的各种非线性动力学现象, 并首创性的讨论了脉冲作用下同步现象.

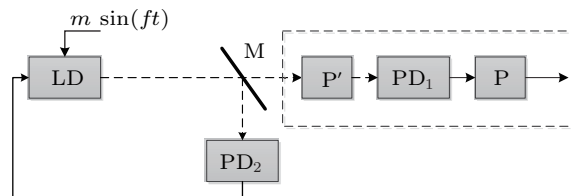


图1 光电反馈模型

2 光电反馈系统模型

2.1 光电反馈系统模型

光电反馈系统模型如图1虚线框之外的所示,

* 国家高技术研究发展计划 (863 计划)(批准号: 2006AA01Z426) 资助的课题.

[†] E-mail: shxboy@gmail.com

其中 LD 为半导体激光器, PD₁ 和 PD₂ 为光电探测器, $\sin(ft)$ 为调制信号, m 为调制指数, M 为分束镜, 虚线箭头所代表的为光路方向, 实线箭头所代表的为电路方向. 光电反馈的原理是: 光电探测器把激光器输出的光信号转化为电信号, 电信号经过延时放大之后, 反馈回激光器的驱动电流, 实际的注入电流就是反馈电流和激光器的偏置电流之和.

2.2 理论分析

半导体激光的动力学模型可以由以下方程来描述 [4,9,10]:

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{I_1}{qV} - \frac{N_1}{\tau_e} - G(N_1, S_1)S_1, \quad (1a)$$

$$\frac{dS_1}{dt} = \Gamma G(N_1, S_1)S_1 - \frac{S_1}{\tau_p} + \Gamma\beta\frac{N_1}{\tau_e}, \quad (1b)$$

$$I_1 = I \times \left[1 + m \sin(f_m t) + \xi \frac{S_1(t - \tau) - S_0}{S_0} \right], \quad (1c)$$

其中 N 为载流子密度; S 为光子数密度; I 为调

制电流; τ_e 为载流子寿命, τ_p 为光子寿命, β 为自发辐射因子, Γ 为限制因子. f_m 为调制电流的频率, m 为调制强度. G 为增益系数 $G(N_1, S_1) = g(N_1 - N_0)/(1 + \varepsilon S_1)$, g 为微分增益系数, N_0 为初始载流子密度, ε 为非线性增益系数.

由于延时反馈控制项的出现, 原来的激光三动力学系统, 现被改变成为无限维激光动力学系统, 激光的动力学行为必然要随着控制参数的变化而发生改变和调整, 其反馈的光电流强度和延时时间将影响系统的动力学状态.

2.3 控制及数值结果分析

当延时为 3×10^{-12} s, 放大系数为 0.02 时, 我们采用 Matlab 软件仿真所得到控制结果如图 2 所示. 图中的单位经过归一化处理的, 以下类同. 从图 2 可以看到, 混沌已被控制到 3 周期态. 当延时为 3×10^{-12} s, 放大系数为 0.002, 控制结果如图 3 所示. 从图 3 可以看到, 系统进入倍周期状态, 显然放大系数能够明显影响激光动力学特性.

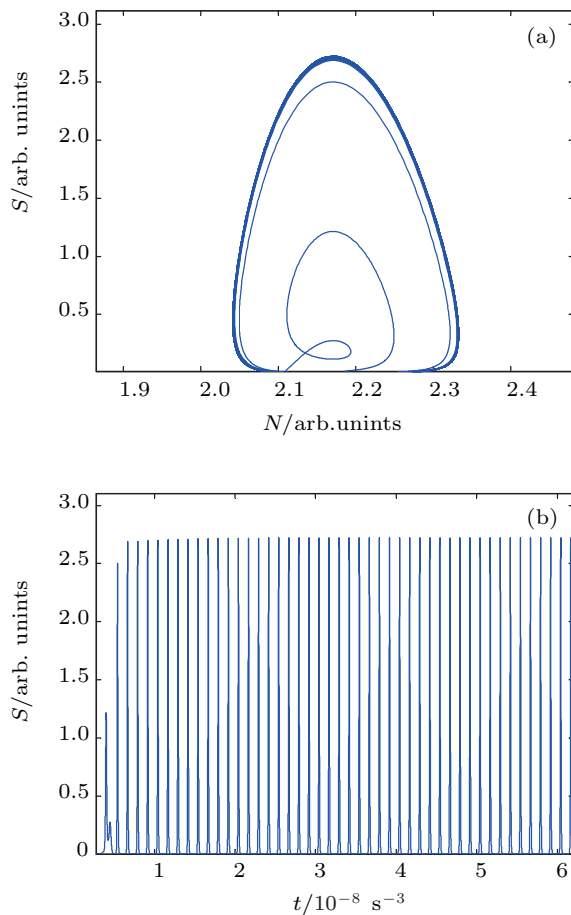


图 2 (a) 图是吸引子图; (b) 是光子密度图

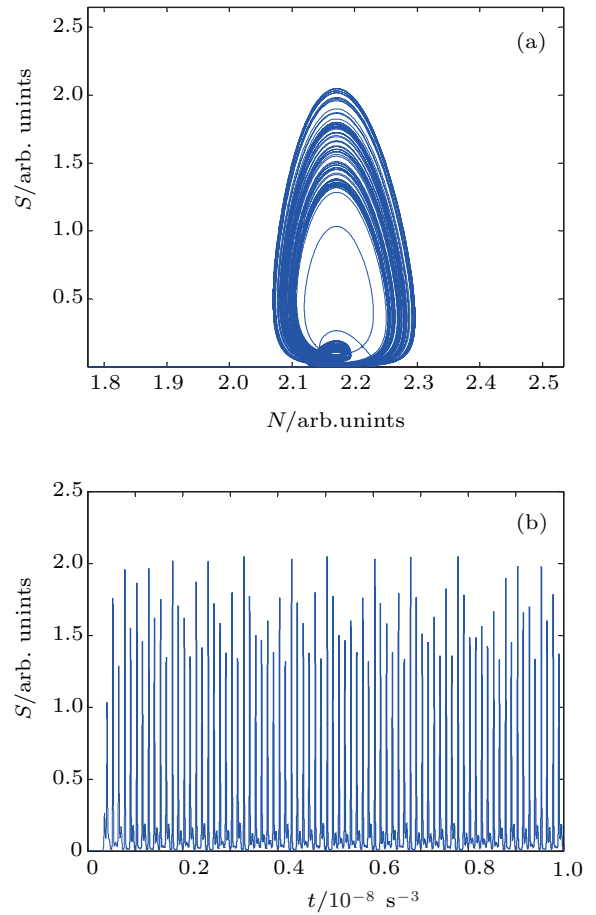


图 3 (a) 图是吸引子图; (b) 是光子密度图

表 1 激光器参数取值

参量	数值
载流子寿命 τ_p/s	6×10^{-12}
光子寿命 τ_e/s	3×10^{-9}
偏置电流 I/A	2.55×10^{-2}
调制电流频率 f_m/Hz	8×10^8
自发辐射因子 β	5×10^{-5}
非线性增益系数 ϵ/cm^3	2.31×10^{-19}
透明载流子浓度 N_0/cm^{-3}	1.5×10^{18}
限值因子 Γ	0.99855
微分增益系数 g/cm^{-3}	2.5×10^{-7}
有源层体积 V/cm^3	1.4705×10^{-10}
自由运转光子数目 S_0/m^{-3}	2×10^{16}

3 基于脉冲同步的光电反馈混沌系统

3.1 系统模型

同步方式一般可分为混沌连续同步和混沌脉冲同步,混沌脉冲同步方式对信道占用小,抗攻击能力强.目前对激光光电反馈的混沌同步的研究集中在连续同步,而且仅仅是通过实验的方式对同步的鲁棒性、安全性进行研究.对激光混沌脉冲同步的研究未见报道.

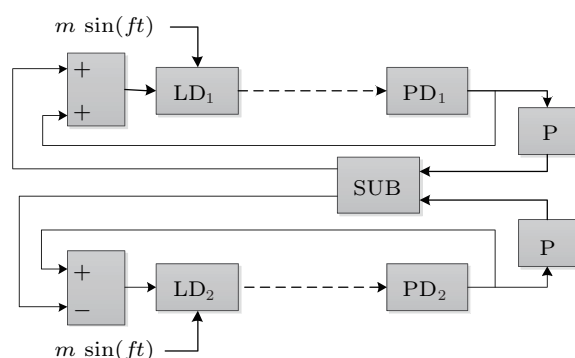


图 4 光电反馈脉冲同步框图

图中的 LD 表示激光器, P 表示采样脉冲, PD 表示光电探测器, SUB 表示减法器. 由于到最后是电信号的相加, 所以采样脉冲可以是光信号的也可以是电信号的 (如图 1 虚线框所示), 图 4 中发射器可以由图 1 得来, 图 1 中的 P' 是对光信号的采样, P 是对电信号的采样, P' 跟 P 取其中一个即可, 不论采用哪一种形式, 其效果是等同的, 以下所说的

采样脉冲与之类似. 图 4 表示脉冲同步的双向耦合形式.

3.2 数值分析

同步耦合模块的数学模型

$$\Delta \tilde{\mathbf{X}}_j|_{t=t_k} = -\mathbf{B} \cdot (\mathbf{X}_j(n_k) - \tilde{\mathbf{X}}_j(t_k)), \quad k = 1, 2, \dots \quad (1)$$

式中 $j = 1, 2$ 分别对应于通信双方的同步耦合模块; $\mathbf{B}$ 是一个 n 阶对角矩阵; t_k 是通信双方的同步耦合模块输出同步脉冲信号的时刻, 并且 $t_k = k \cdot \Delta_1$; $\mathbf{X}_j(t_k)$ 是通信双方各自的混沌系统在 $t = t_k$ 时刻的状态值; $\mathbf{X}_j(n_k)$ 表示第 n_k 次脉冲作用时使用的信号. 收发双方需要根据混沌系统之间保持稳定同步的准则, 构造用于调整 $\mathbf{X}(n_k)$ 与 $\mathbf{X}_j(t_k)$ 之间误差幅度的矩阵 $\mathbf{B}$, 确定同步耦合模块输出同步脉冲信号的时刻 t_k , 对各自本地混沌系统进行同步控制, 使得分离的混沌系统之间在无需传输同步脉冲信号的前提下就能实现稳定的混沌同步; 在光电反馈系统中, 可改变的变量只有注入电流 I , 在此情况下 $\mathbf{B}$ 为一数值.

由于在传统的混沌同步方式下, 模拟混沌系统易受到内部噪声、信道噪声等外界环境因素的影响, 难以实现稳定同步. 因此我们利用本地脉冲信号对混沌系统实施同步控制.

我们采用双向耦合的方法进行脉冲同步同步控制, 于是方程及其注入电流就变成了如下所示:

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{I_1}{qV} - \frac{N_1}{\tau_e} - G(N_1, S_1)S_1, \quad (3a)$$

$$\frac{dS_1}{dt} = \Gamma G(N_1, S_1)S_1 - \frac{S_1}{\tau_p} + \Gamma \beta \frac{N_1}{\tau_e}, \quad (3b)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{I_2}{qV} - \frac{N_2}{\tau_e} - G(N_2, S_2)S_2, \quad (3c)$$

$$\frac{dS_2}{dt} = \Gamma G(N_2, S_2)S_2 - \frac{S_2}{\tau_p} + \Gamma \beta \frac{N_2}{\tau_e}, \quad (3d)$$

$$I_1 = I \times \left[1 + m \sin(f_m t) + \xi_1 \frac{S_1(t - \tau_1) - S_{01}}{S_{01}} + k (S_2(t_i^-) - S_1(t_i^-)) \sum_{i=0}^t \delta(t - t_i) \right], \quad (3e)$$

$$I_2 = I \times \left[1 + m \sin(f_m t) + \xi_2 \frac{S_2(t - \tau_2) - S_{02}}{S_{02}} + k (S_1(t_i^-) - S_2(t_i^-)) \sum_{i=0}^t \delta(t - t_i) \right], \quad (3f)$$

$$G(N_{1,2}, S_{1,2}) = g(N_{1,2} - N_0)/(1 + \varepsilon S_{1,2}), \quad (3g)$$

其中式子的后一项表示脉冲同步控制项. 我们对前面的脉冲控制系数 k 取为 10^{-17} — 10^{-19} , 脉冲信号时间为 10^{-14} s, 分别对前面作用的放大系数和延时进行测试: 当延时为 3×10^{-12} s 放大系数均

为 0.002 时, 控制结果如图 5 所示.

当延时为 3×10^{-12} s 放大系数为 0.02, 控制结果如图 6 所示.

我们采用单向耦合的方法进行脉冲同步同步控制 (图 7), 于是注入电流项就变成了如下所示:

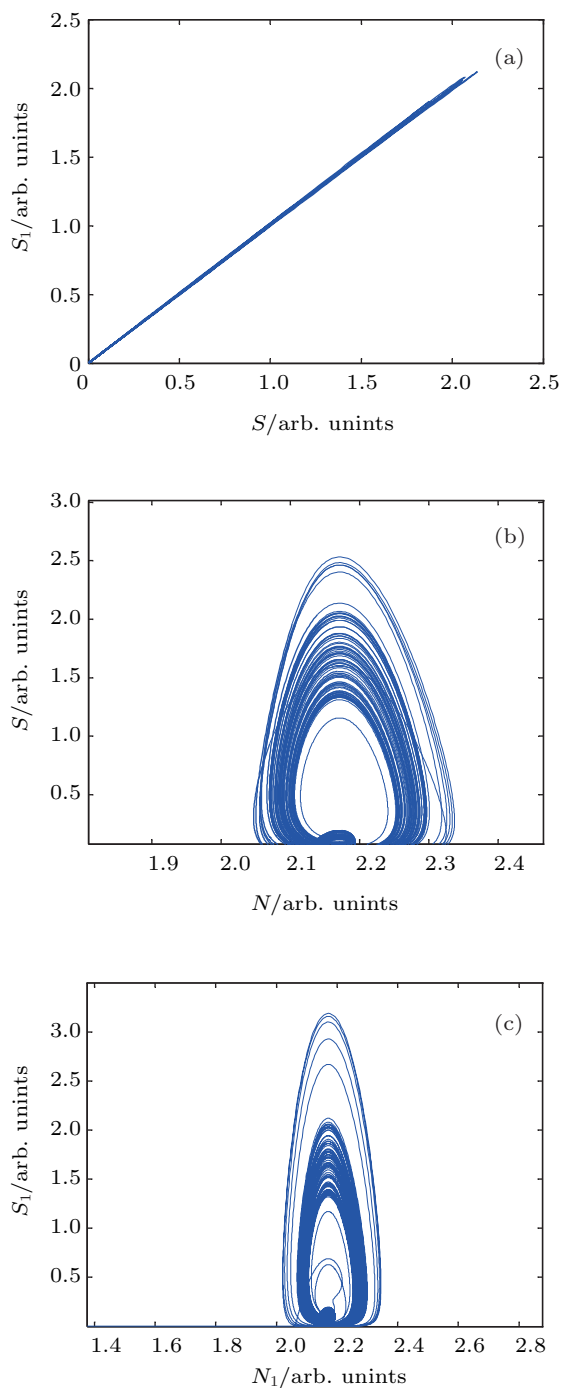


图 5 (a) 是同步效果图; (b) 是发射器的吸引子图; (c) 是接收器的吸引子图

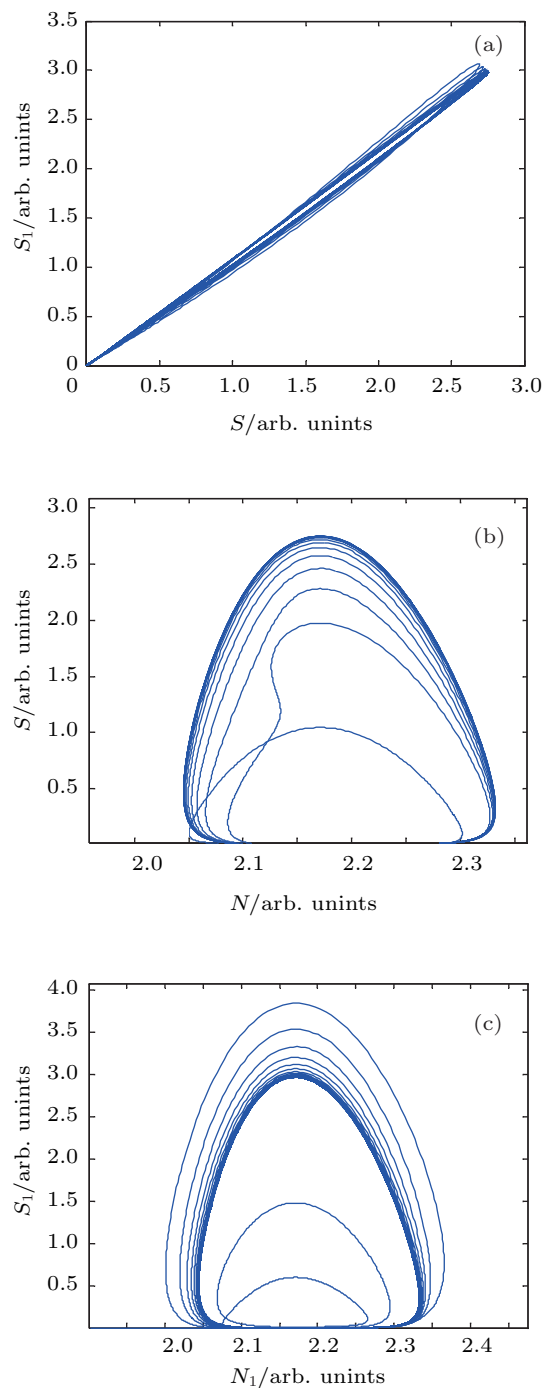


图 6 (a) 是同步效果图; (b) 是发射器的吸引子图; (c) 是接收器的吸引子图

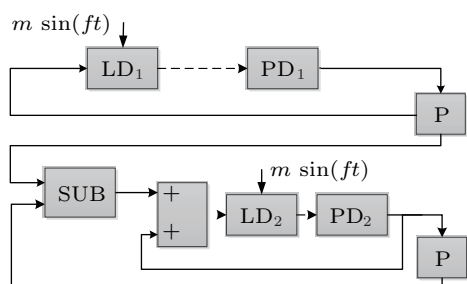


图7 单向耦合脉冲同步

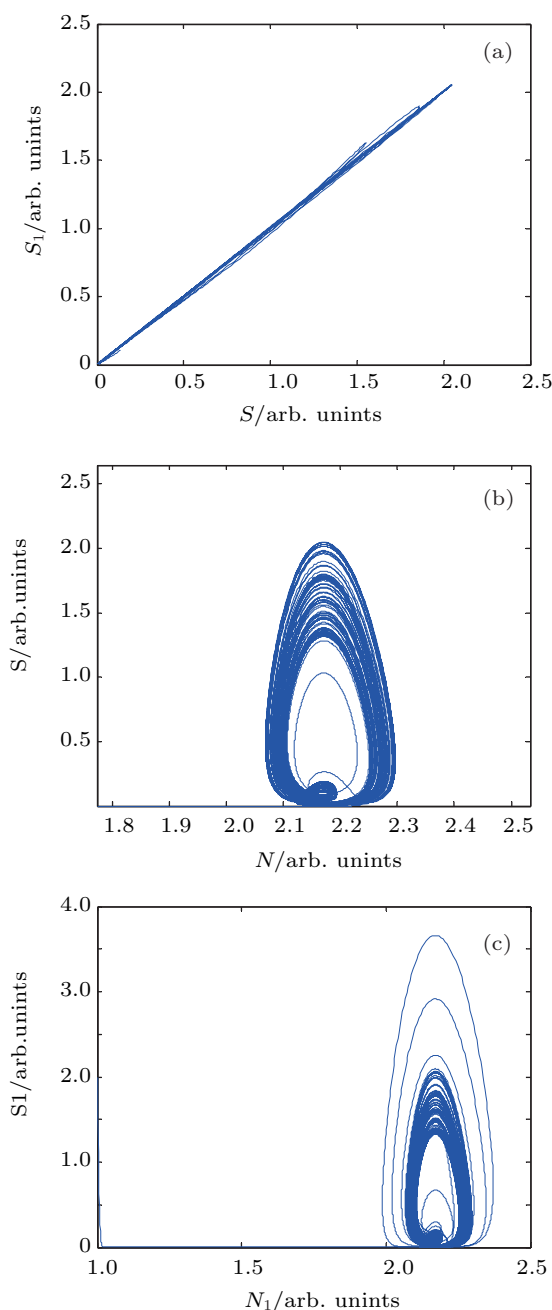


图8 (a) 是同步效果图; (b) 是发射器的吸引子图; (c) 是接收器的吸引子图

$$I_1 = I \times \left[1 + m \sin(f_m t) + \xi_1 \frac{S_1(t - \tau_1) - S_{01}}{S_{01}} \right], \quad (3e')$$

$$I_2 = I \times \left[1 + m \sin(f_m t) + \xi_2 \frac{S_2(t - \tau_2) - S_{02}}{S_{02}} + k (S_1(t_i^-) - S_2(t_i^-)) \sum_{i=0}^t \delta(t - t_i) \right]. \quad (3f')$$

我们对前面的脉冲控制系数 k 同样取 10^{-17} — 10^{-19} , 脉冲信号时间为 10^{-14} s, 实验所得结果如图8所示, 实验表明单向耦合的方法进行脉冲同步同步控制也能使系统达到很好的同步效果。

如果我们对多个混沌系统进行同步, 系统结构如图所示, 其中发射器是由图1的简化而来的, 图9为了简便我们只画出了两个接收器。

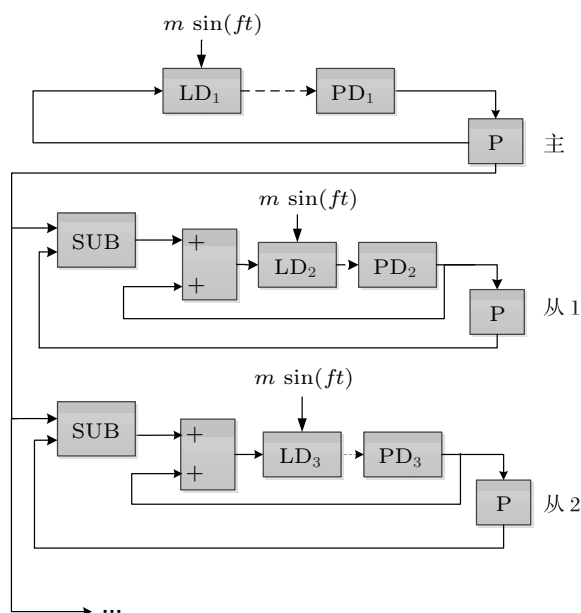


图9 多个混沌系统的脉冲同步

$$I_1 = I \times \left[1 + m \sin(f_m t) + \xi_1 \frac{S_1(t - \tau_1) - S_{01}}{S_{01}} \right], \quad (4a)$$

$$I_2 = I \times \left[1 + m \sin(f_m t) + \xi_2 \frac{S_2(t - \tau_2) - S_{02}}{S_{02}} + k (S_1(t_i^-) - S_2(t_i^-)) \sum_{i=0}^t \delta(t - t_i) \right], \quad (4b)$$

$$I_3 = I \times \left[1 + m \sin(f_m t) + \xi_3 \frac{S_3(t - \tau_3) - S_{03}}{S_{03}} \right]$$

$$+ k (S_1(t_i^-) - S_3(t_i^-)) \sum_{i=0}^t \delta(t - t_i) \Big]. \quad (4c)$$

我们重复进行前面的实验, 其中 k 值维持

在 10^{-17} — 10^{-19} , 脉冲信号时间为不大于 10^{-14} s, S_0 的数量级在 10^{16} 上, 反馈系数均在 0.002 左右, 延迟时间均在几个 ps 之间, 所得结果如图 10 所示.

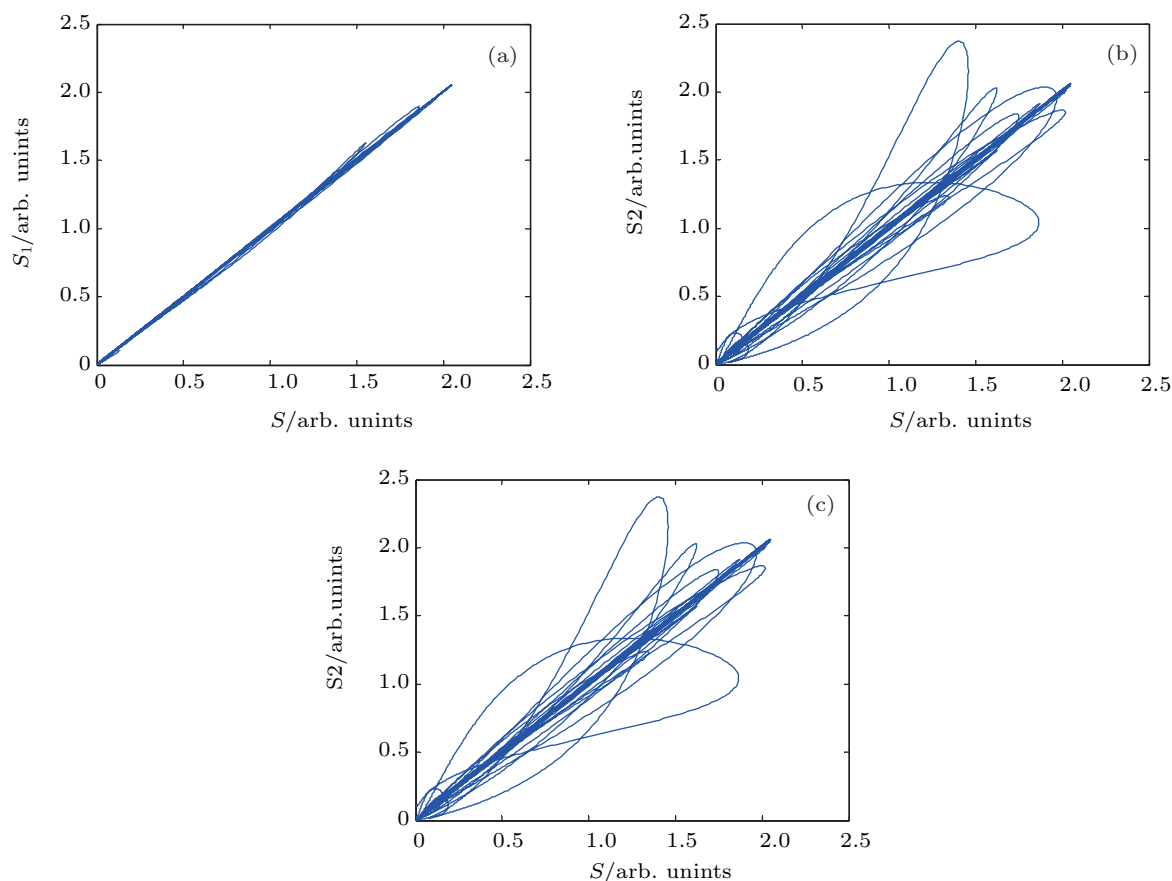


图 10 (a) 是主与从 1 的同步效果图; (b) 主与从 2 的同步效果图; (c) 是主发射器的吸引子图

4 结论

由于激光混沌产生方式为光电反馈, 并且脉冲同步也是将光信号转化为电信号后进行同步, 避免了利用光信号进行同步时易出现的对极化、外部扰动及其敏感导致的同步质量下降等问题.

另外, 本文开创性的使用脉冲同步方式, 即先对混沌信号进行采样, 然后用采样后的信号来达到同步. 这样, 在信道中传输的混沌信号量远远小于

一般混沌同步方法中所传输的混沌信号量, 即使被截取, 通过获得的脉冲信号恢复出混沌系统的难度要大大提高, 所以提高了保密通信的安全性. 本方案对于激光混沌控制的研究及其应用以及提高全光混沌远程通信的传输距离具有重要的意义.

感谢夏光琼教授, 王云才教授和颜森林教授对我的指导和帮助.

- [1] Pecora L M, Carroll T L 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 821
- [2] Pecora L M, Carroll T L 1991 *Phys. Rev. Lett.* **44** 2374
- [3] Cuomo K M, Oppenheim A V 1993 *Phys. Rev. Lett.* **71** 65

- [4] Rajesh S, Nandakumaran V M 2006 *Physica D* **213** 113
- [5] Mark Stamp, Peter Stavroulakis 2010 *Handbook of Information and Communication Security* (German: Springer, Link) p451–478.

- [6] Fang J Q 2010 *Journal of Systems Engineering Sin.* **25**(6) (in Chinese) [方锦清 2010 系统工程学报 **25**(6)]
- [7] Pecora M, Carroll T L 1990 *Phys Rev Lett.* **64** 821
- [8] Wu X G, Wang Z X 2009 *Chaos, Solitons & Fractals* **39** 689
- [9] GHM Van Tartwijk, Lenstra D 1995 *Quantum Semiclass. Opt.* **7** 87
- [10] Lin F Y, Liu J M 2003 *IEEE Journal of Quantum Electronics* **39** 562

Chaotic impulse synchronization of opto-electronic feedback*

Hu Han-Ping Yu Zhi-Liang[†] Liu Ling-Feng

(Institute for Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074 China)

(Received 31 December 2011; revised manuscript received 11 April 2012)

Abstract

In this paper, a chaotic impulse synchronization is proposed by using opti-electronic feedback. The laser chaos dynamical equations are numerically calculated, and the different chaotic states are observed by modulating the coefficient of feedback or impulse which realizes the control of chaotic dynamics. Then, the impulse synchronization equations are numerically calculated, and the simulation image of synchronization is plotted. Experiments show the scheme can achieve the chaotic synchronization.

Keywords: impulse, chaos synchronization, opti-electronic feedback, semiconductor laser

PACS: 05.45.Gg, 05.45.Pq, 42.65.Sf, 42.55.Px

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2006AA01Z426).

[†] E-mail: shxboy@gmail.com