

间歇反馈法实现单模 Lorenz-Haken 激光系统的周期镇定与同步

李春来 杨本珊 黄乐 冯婷 何瑶 邹卯荣

Realization of periodical control and synchronization of single-mode laser Haken-Lorenz system with intermittent feedback

Li Chun-Lai Yang Ben-Shan Huang Le Feng Ting He Yao Zou Mao-Rong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 030504 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.030504

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.030504>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphys.ac.cn/CN/Y2015/V64/I3>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

参数不确定统一混沌系统的鲁棒分数阶比例微分控制

Robust fractional-order proportional-derivative control of unified chaotic systems with parametric uncertainties

物理学报.2015, 64(5): 050503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.050503>

一种分数阶混沌系统同步的自适应滑模控制器设计

Design of an adaptive sliding mode controller for synchronization of fractional-order chaotic systems

物理学报.2015, 64(4): 040505 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.040505>

永磁同步发电机混沌运动分析及最优输出反馈 H_∞ 控制

Analysis of chaos in permanent magnet synchronous generator and optimal output feedback H_∞ control

物理学报.2015, 64(4): 040504 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.040504>

基于量子并行粒子群优化算法的分数阶混沌系统参数估计

Research on particle swarm optimization algorithm with characteristic of quantum parallel and its application in parameter estimation for fractional-order chaotic systems

物理学报.2015, 64(3): 030505 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.030505>

基于快速全线性预测控制的混沌系统控制与同步

Control and synchronization in chaotic systems based on fast linear predictive control

物理学报.2015, 64(1): 010502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.010502>

间歇反馈法实现单模 Lorenz-Haken 激光系统的 周期镇定与同步*

李春来[†] 杨本珊 黄乐 冯婷 何瑶 邹卯荣

(湖南理工学院光电技术及应用物理创新训练中心, 湖南理工学院物理与电子学院, 岳阳 414006)

(2014年7月5日收到; 2014年9月2日收到修改稿)

针对单模 Lorenz-Haken 激光系统中存在的混沌现象, 提出一种单变量间歇反馈控制方案. 数值结果表明, 通过选择不同的控制强度, 可将 Lorenz-Haken 激光混沌系统镇定到1周期态、2周期态、4周期态、6周期态、8周期态等. 同时, 利用该控制方案, 实现了 Lorenz-Haken 激光混沌系统的同步.

关键词: 单模 Lorenz-Haken 激光系统, 间歇反馈, 混沌镇定, 混沌同步

PACS: 05.45.Gg, 05.45.Ac, 05.45.Xt

DOI: 10.7498/aps.64.030504

1 引言

混沌普遍存在于自然界各科学领域, 是确定性的非线性动力系统在没有任何外加随机因素作用下表现出的貌似随机的现象^[1-6]. 混沌性是指非线性系统的动力学行为呈现出的一种局部不稳定性, 且具有整体有界性和遍历性, 其最大特点是对初始条件极为敏感. 1990年, Ott、Grebogi 和 Yorke 提出了著名的 OGY 方法成功地实现了混沌的控制^[7]. 同年, Pecora 和 Carroll 提出了混沌同步的概念^[8]. 此后, 混沌的控制与同步成为混沌领域中两个重要研究内容^[9-11].

在实际激光器系统中, 作为一种不期望的现象, 混沌的出现会使输出光束的质量下降, 频谱变宽. 因此, 如何采用简单的控制方式抑制激光器中的光场混沌, 是一个具有重要意义的研究课题. 虽然已有大量关于混沌控制的方法, 但许多控制方法并不能直接应用于激光混沌的镇定, 原因是激光器系统与一般的非线性系统存在较大区别: 1) 激光器系统作为一个整体, 不能分解为多个子系统; 2) 激光器的内部动力学参数不能随便调整; 3) 载流子密度作为激光器系统的一个动力学变量,

通常不能从外部直接测量得到^[12]. 间歇控制由于控制代价小而得到广泛应用^[13,14]. 文献^[15]提出一种单变量间歇反馈方法实现了 Hindmarsh-Rose 神经系统的混沌控制, 其控制器数学形式为 $U = k(x_{\max} - x)H(x_{\max} - x) + k(x - x_{\min})H(x - x_{\min})$, 其中 x_{\max} , x_{\min} 表示 H-R 系统的阈值, k 为控制增益, H 为 Heaviside 函数. 该间歇反馈控制策略可解释为相空间压缩方法^[16], 其最大特点是根据状态变量与阈值的比较自适应地调节控制输入, 不足之处是需要选择的控制参数较多 (包括 x_{\max} , x_{\min} , k). 所以, 实际执行过程不是很方便.

另一方面, 混沌激光输出光场信号具有高的频率, 宽的带宽 (可达几十 GHz), 小的衰减等特性, 特别是其动力学行为高度敏感于系统内部参数. 所以, 基于激光器系统的混沌同步及保密通信的研究具有特定实际意义. 如文献^[17]基于光反馈的单向耦合注入技术实现了垂直腔表面发射激光器的混沌同步, 文献^[18]基于互注入实现了双环掺铒光纤激光器的混沌同步, 文献^[19, 20]基于直接耦合的方法实现了两个半导体激光器 (SL) 间的混沌同步及双向信息保密传输, 文献^[21-23]在驱动混沌激光器所产生的混沌光注入下, 实现了两个响应激光

* 湖南省教育厅科学研究项目 (批准号: 13C372) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: lichunlai33@126.com.

器的混沌同步及其信息的双向保密通信. 以上同步技术的一个共同特点是控制信号连续发射给接收系统. 与此对应, 基于脉冲和间歇控制技术的同步方案, 只在某些离散时间或某些时间段传送控制信号, 从而能节省出更多的信道容量或带宽; 另一方面, 既然信道中减少了同步信息冗余, 混沌保密通信系统的安全性就能得到进一步的提高 [13,24].

本文针对 Lorenz-Haken 激光系统中存在的混沌现象, 提出一种新的单变量间歇反馈控制方案. 与文献 [15] 中的间歇反馈控制方案相比, 本文给出的控制方案使用更为方便, 只需要调整控制增益参数. 数值结果表明, 通过选择不同的控制增益和平衡点, 可将 Lorenz-Haken 激光混沌系统镇定到不同轨道形式的 1 周期态、2 周期态、4 周期态、6 周期态、8 周期态等. 同时, 利用该控制思想, 实现了 Lorenz-Haken 激光混沌系统的同步, 由于同步控制信号间歇地由发送端发射给接收端, 此方案应用于实际通信中时自然地能节省出更多的信道容量和提高通信系统的保密性能.

2 Lorenz-Haken 激光系统

1975 年, Haken 从理论上发现描述均匀加宽单模激光器的麦克斯韦-布洛赫 (Maxwell-Bloch) 方程与 Lorenz 方程在形式上一致, 在光学领域被称为 Lorenz-Haken 激光系统, 其数学方程表示为 [25]

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \eta(y - x), \\ \dot{y} &= \rho x - y - xz, \\ \dot{z} &= xy - bz, \end{aligned} \quad (1)$$

式中, x, y, z 分别表示激光的电场强度、激光工作介质的宏观计划强度和激光工作物质原子的反转离子数密度; $\eta = \bar{\eta}/\gamma_{\perp}$, $\rho = \gamma_{\parallel}/\gamma_{\perp}$, 其中 $\bar{\eta}, \gamma_{\perp}, \gamma_{\parallel}$ 分别表示 x, y, z 的抽运功率; b 为抽运参数. 当 $\eta = 1.4253, \rho = 50, b = 0.2778$, 激光器进入混沌状态, 如图 1.

激光器系统 (1) 的三个平衡点为

$$\begin{aligned} E_0 &= (0, 0, 0), \\ E_+ &= (\sqrt{b(\rho - 1)}, \sqrt{b(\rho - 1)}, \rho - 1), \\ E_- &= (-\sqrt{b(\rho - 1)}, -\sqrt{b(\rho - 1)}, \rho - 1). \end{aligned}$$

当 $\eta = 1.4253, \rho = 50, b = 0.2778$, 激光器系统 (1) 的平衡点及对应的特征值为

$$E_0 = (0, 0, 0)$$

$$\lambda_1 = -9.6572,$$

$$\lambda_2 = 7.2319,$$

$$\lambda_3 = -0.2778.$$

$$E_{\pm} = (\pm 3.6895, \pm 3.6895, 49)$$

$$\lambda_1 = -2.7117,$$

$$\lambda_2 = 0.0043 + 3.7828i,$$

$$\lambda_3 = 0.0043 - 3.7828i.$$

此时, 系统的三个平衡点都不稳定.

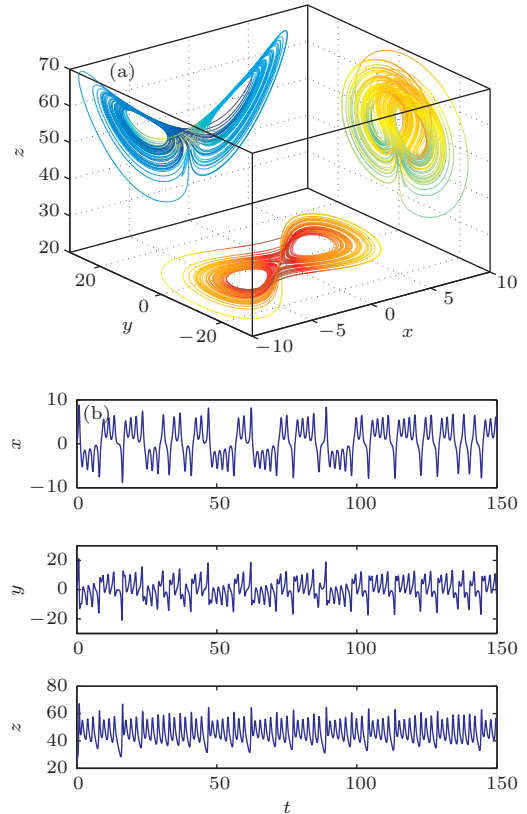


图 1 (网刊彩色) (a) 混沌相图; (b) 时间演化图

3 Lorenz-Haken 激光系统的周期镇定

3.1 间歇反馈控制方案描述

受控激光系统表示为

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \eta(y - x), \\ \dot{y} &= \rho x - y - xz + u, \\ \dot{z} &= xy - bz. \end{aligned} \quad (2)$$

控制器 u 的表达式为 $u = k \cdot (y - y_e) \cdot H(|y - y_e| - \zeta)$, 其中 k 为控制强度; y_e 为系统平衡点 (x_e, y_e, z_e) 的第二个分量; ζ 为一个小的正常数; H 为 Heavside 函数,

$$H(v) = \begin{cases} 1, & v \geq 0, \\ 0, & v < 0. \end{cases}$$

控制方案的实际意义是, 当 $|y - y_e| - \zeta \geq 0$, 施加控制 $u = k \cdot (y - y_e)$, 当 $|y - y_e| - \zeta < 0$, 不施加控制.

3.2 控制结果

首先选取平衡点参数 $y_e = 0, \zeta = 0.05$. 图2表示以控制强度 k 为横坐标, 电场强度 x 为纵坐标的可控参数范围图. 由图2可知, 随着 k 取值增大, 处

于混沌状态的 Lorenz-Haken 激光系统能被镇定到周期1, 周期2轨道上. 图3为 $k = 1.2$ 和 $k = 0.5$ 的控制结果.

当选取平衡点参数 $y_e = -3.6895, \zeta = 0.05$, 可控参数范围如图4所示, 可知, 随着 k 取值增大, Lorenz-Haken 激光混沌系统能够被镇定到周期1, 2, 4, 6, 8 轨道上. 图5为 k 取不同值的控制结果.

而当 $y_e = 3.6895, \zeta = 0.05$ 时, 可控参数范围如图6, 可知, 随着 k 的取值增大, Lorenz-Haken 激光混沌系统能够被镇定到周期1, 2, 4, 8 轨道上. 图7为 k 取不同的值时对应的控制结果.

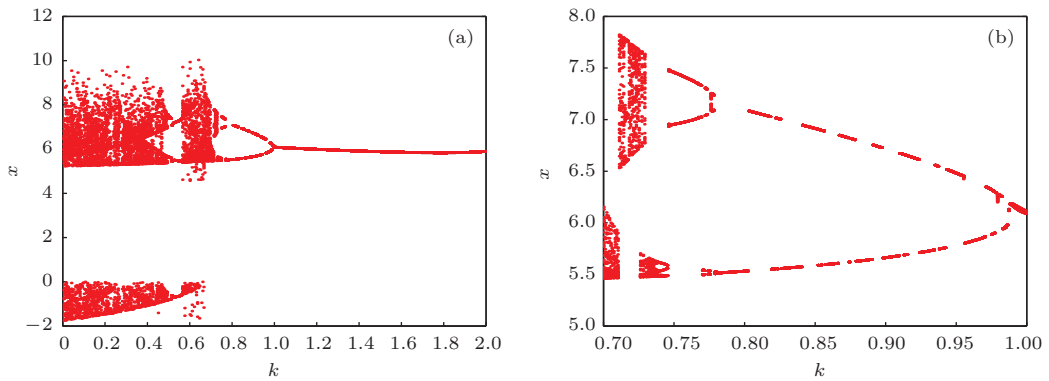


图2 (网刊彩色) $y_e = 0$ 时可控参数范围图 (a) $k \in [0, 2]$; (b) $k \in [0.7, 1]$

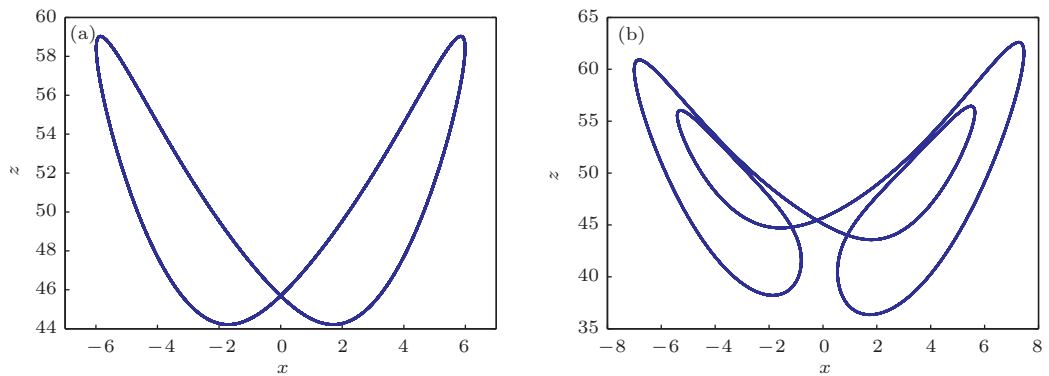


图3 (网刊彩色) $y_e = 0$ 的控制结果 (a) $k = 1.2$ 时镇定到1周期态; (b) $k = 0.5$ 时镇定到2周期态

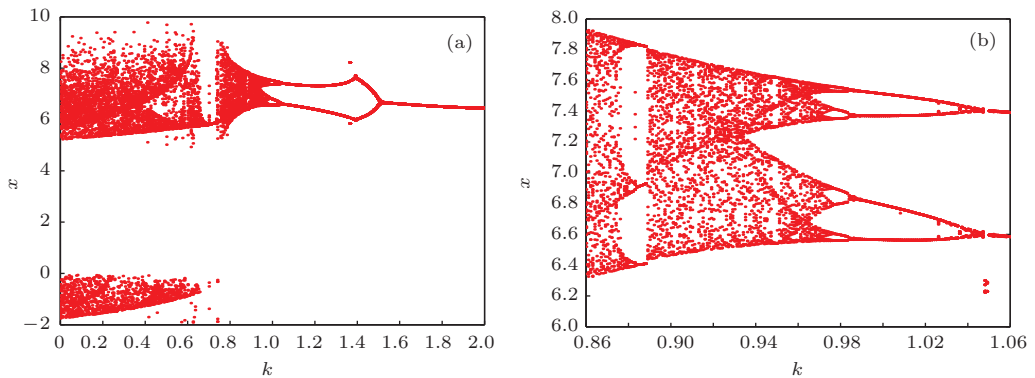


图4 (网刊彩色) $y_e = -3.6895$ 时的可控参数范围图 (a) $k \in [0, 2]$; (b) $k \in [0.86, 1.06]$

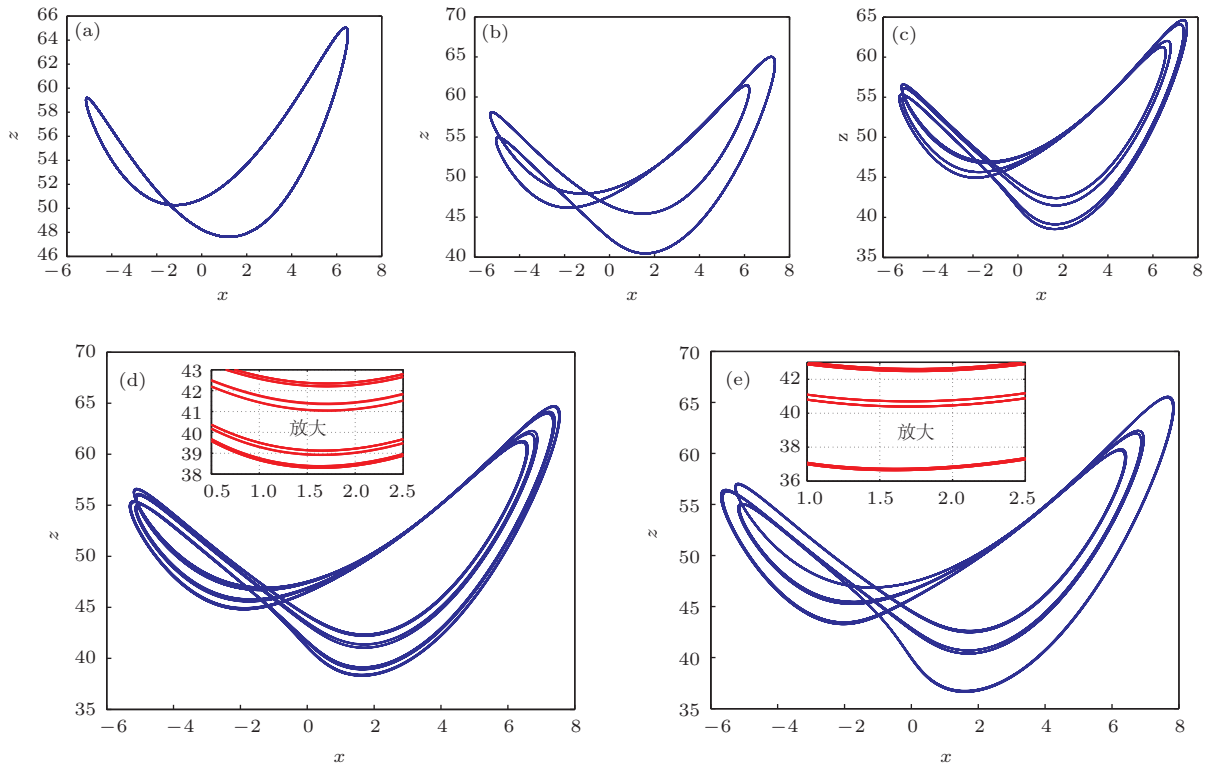


图5 (网刊彩色) $y_e = -3.6895$ 控制结果 (a) $k = 1.8$ 时镇定到1周期态; (b) $k = 1.3$ 时镇定到2周期态; (c) $k = 1$ 时镇定到4周期态; (d) $k = 0.98$ 时镇定到8周期态; (e) $k = 0.881$ 时镇定到6周期态

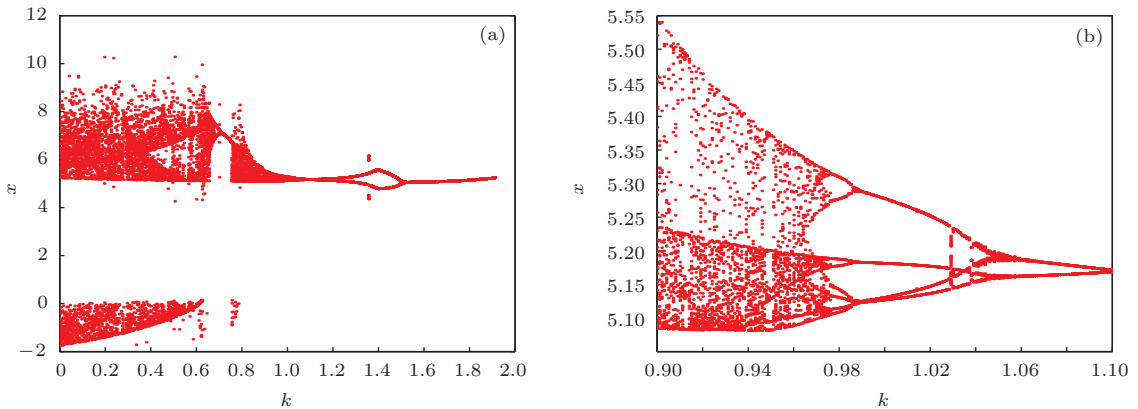


图6 (网刊彩色) $y_e = 3.6895$ 时的可控参数范围图 (a) $k \in [0, 2]$; (b) $k \in [0.9, 1.1]$

3.3 控制结果分析

如图3, 图5, 图7控制结果所示, 当选取不同的平衡点参数时, 周期轨道形式不尽相同. 原因可解释如下:

选取控制器为 $u = k \cdot (y - y_{e-}) \cdot H(|y - y_{e-}| - \zeta)$, 当轨道运行到平衡点 E_- 附近且满足条件 $|y - y_{e-}| - \zeta < 0$, 轨道自由运行, 而当 $|y - y_{e-}| - \zeta > 0$ 时, 控制器对轨道实行限制, 故在 E_- 附近, 轨线运行范围较小, 而在 E_+ 附近轨线运行范围较大.

控制器形式为 $u = k \cdot (y - y_{e+}) \cdot H(|y - y_{e+}| - \zeta)$ 时控制结果与上述情况相对应. 即当轨道运行到平衡点 E_+ 附近且满足条件 $|y - y_{e+}| - \zeta < 0$, 轨道自由运行, 而当 $|y - y_{e+}| - \zeta > 0$ 时, 控制器对轨道实行限制, 故在 E_+ 附近, 轨线运行范围较小, 而在 E_- 附近轨线运行范围较大.

而当控制器为 $u = k \cdot (y - y_{e0}) \cdot H(|y - y_{e0}| - \zeta)$, 仅在平衡点 E_0 附近, 控制器对轨道有限制作用, 故在非零平衡点 E_- 和 E_+ 附近, 轨线运行范围相当.

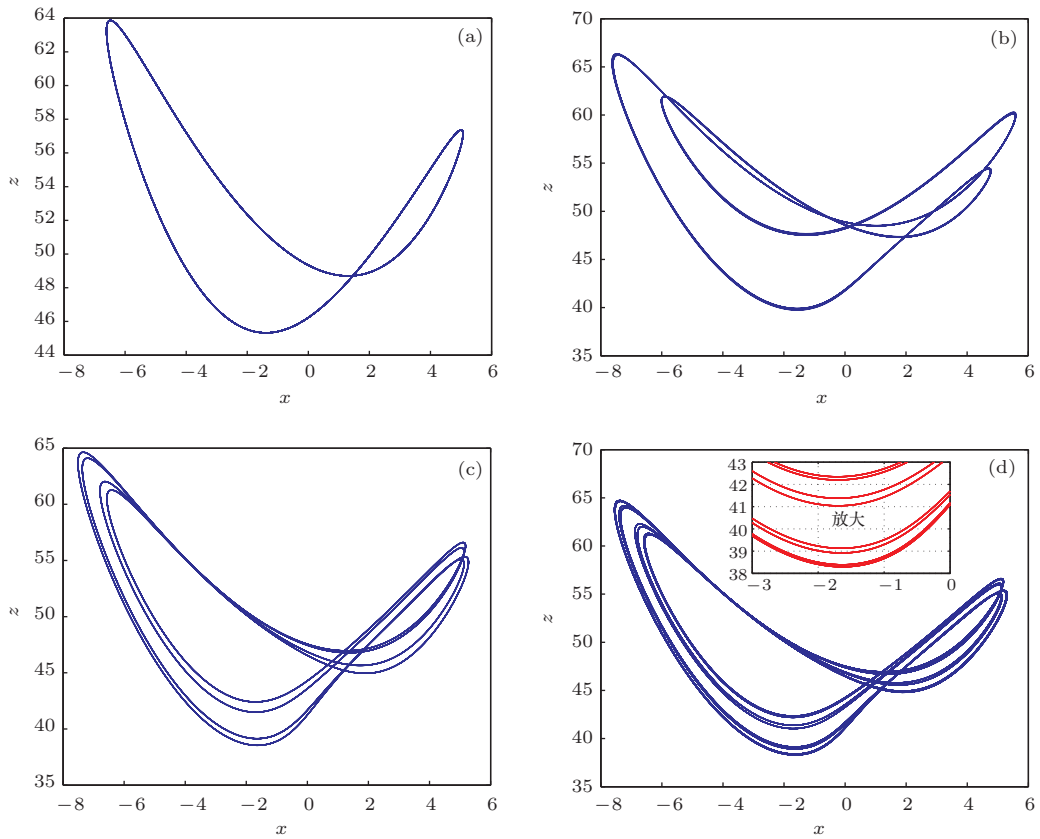


图7 (网刊彩色) $y_e = 3.6895$ 控制结果 (a) $k = 1.6$ 时镇定到1周期态; (b) $k = 1.4$ 时镇定到2周期态; (c) $k = 1$ 时镇定到4周期态; (d) $k = 0.98$ 时镇定到8周期态

4 Lorenz-Haken 激光系统的同步

激光混沌信号具有高的频率, 宽的带宽, 小的衰减和高的参数敏感性等特征. 所以, 基于激光器系统的保密通信具有更高的安全性能. 混沌通信的一个关键技术是混沌系统的同步. 我们将利用前述间歇反馈控制思想实现 Lorenz-Haken 激光混沌系

统的同步.

驱动激光混沌系统选取为(1), 响应激光混沌系统为

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \eta(y_1 - x_1), \\ \dot{y}_1 &= \rho x_1 - y_1 - x_1 z_1 + u, \\ \dot{z}_1 &= x_1 y_1 - b z_1. \end{aligned} \quad (3)$$

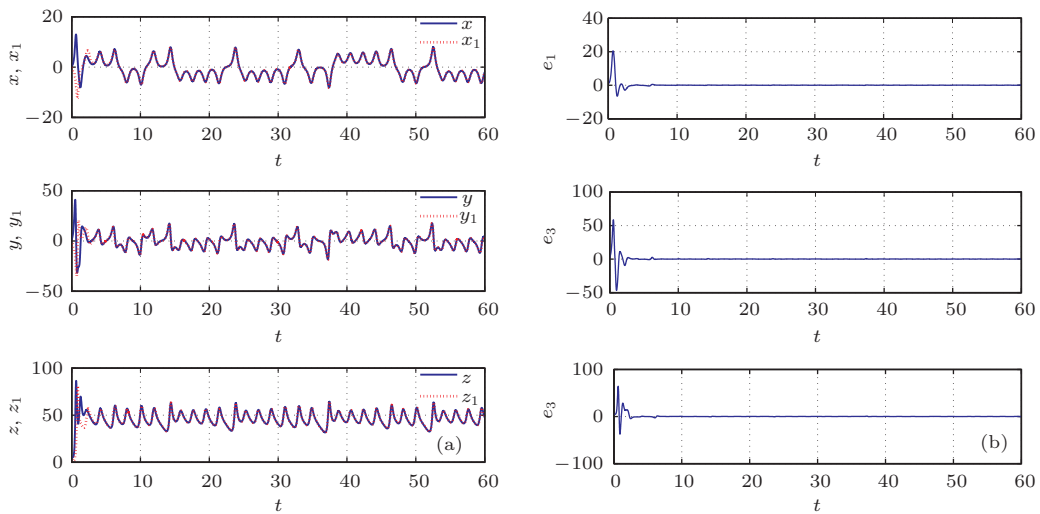


图8 (网刊彩色) 同步结果 (a) 时序图; (b) 同步误差

控制器 u 的表达形式为 $u = k \cdot (y - y_1) \cdot H(|y - y_1| - \zeta)$, 其中 k 为控制强度, 可调整同步速度. 同步误差定义为 $e_1 = x - x_1$, $e_2 = y - y_1$, $e_3 = z - z_1$. 选取驱动系统和响应系统的初始条件分别为 (0.5, 1.01, 5.01) 和 (-0.5, 0.1, 0.5), 控制参数为 $\zeta = 0.05$, $k = 1.5$, 同步仿真结果如图 8. 与一般的单变量耦合反馈控制同步方法相比, 本文所提间歇反馈同步方案只需将控制信号 $k(y - y_1)$ 在某些特定时间段间歇地施加给响应系统, 故在发射端也只需要将输出信号 y 间歇地传送给接收端系统, 这样, 在实际通信中自然地能节省出更多的信道容量和提高通信系统的安全性能.

5 结 论

针对 Lorenz-Haken 激光系统中存在的混沌现象, 提出一种新的单变量间歇反馈控制方案. 与现存的间歇反馈控制方案相比, 所提间歇控制方案使用更为方便, 只需要调整控制增益参数. 数值结果表明, 通过选择合适的控制增益和平衡点, 可将 Lorenz-Haken 激光混沌系统镇定到不同轨道形式的 1 周期态、2 周期态、4 周期态、6 周期态、8 周期态等, 并对镇定到不同形式周期态轨道的本质原因进行了分析. 同时, 利用该控制思想, 实现了 Lorenz-Haken 激光混沌系统的同步, 由于同步控制信号间歇地由发送端发射给接收端, 所以在实际通信中能节省出更多的信道带宽且能提高通信系统的保密性能.

参考文献

- [1] Zhao Y B, Tse C K, Feng J C, Guo Y C 2013 *Circuits Syst Signal Proces* **32** 1013
- [2] Yin J L, Zhao L W, Tian L X 2014 *Chin. Phys. B* **23** 020204

- [3] Wang G Y, He J L, Yuan F, Peng C J 2013 *Chin. Phys. Lett.* **30** 110506
- [4] Wei D Q, Zhang B, Luo X S, Zeng SY, Qiu D Y 2013 *IEEE. Trans. Circ. Syst. II* **60** 692
- [5] Li Y L, Xu D L, Fu Y M, Zhou J X 2013 *Int. J. Bifurcation and Chaos* **23** 1350096
- [6] He S C, Zhou G H, Xu J P, Bao B C, Yang P 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 110503 (in Chinese) [何圣仲, 周国华, 许建平, 包伯成, 杨平. 2013 物理学报 **62** 110503]
- [7] Ott E, Grebogi C, Yorke J A 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 1196
- [8] Pecora L M, Carroll T L 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 821
- [9] Luo R Z, He L M 2014 *Chin. Phys. B* **23** 070506
- [10] Li C L, Su K L, Wu L 2013 *J Comput Nonlinear Dynam* **8** 031005
- [11] Wen G L, Xu H D, Xie J H 2011 *Nonlinear Dyn* **64** 49
- [12] Huang L Y, Luo X S 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 297
- [13] Huang T W, Li C D, Liu X Z 2008 *Chaos* **18** 033122
- [14] Li C D, Feng G, Liao X F 2007 *IEEE. Trans. Circ. Syst. II* **54** 1019
- [15] Ma J, Wang Q Y, Jin W Y, Xia Y F 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 3582
- [16] Wang C N, Ma J, Liu Y, Huang L 2012 *Nonlinear Dyn* **67** 139
- [17] Zhong D Z, Xia G Q, Wang F, Wu Z M 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 327 (in Chinese) [钟东洲, 夏光琼, 王飞, 吴正茂. 2007 物理学报 **56** 327]
- [18] Li F, Pan W, Luo B 2008 *Acta Sinica Quantum Optica* **14** 207 (in Chinese) [李丰, 潘炜, 罗斌. 2008 量子光学学报 **14** 207]
- [19] Deng T, Xia G Q, Wu Z M, Lin X D, Wu J G 2011 *Opt. Express* **19** 8762
- [20] Zhang W L, Pan W, Luo B, Zou X H, Wang M Y, Zhou Z 2008 *Opt. Lett.* **33** 237
- [21] Wu J G, Wu Z M, Tang X, Fan L, Deng W, Xia G Q 2013 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **25** 587
- [22] Jiang N, Pan W, Luo B, Xiang S Y, Yang L 2012 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **24** 1094
- [23] Zhao Y M, Xia G Q, Wu J G, Wu Z M 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 214206 (in Chinese) [赵艳梅, 夏光琼, 吴加贵, 吴正茂. 2013 物理学报 **62** 214206]
- [24] Li C L, Tong Y N, Li H M, Su K L 2012 *Phys. Scr.* **86** 055003
- [25] Meziane B, Ayadi S 2008 *Opt. Commun.* **281** 4061

Realization of periodical control and synchronization of single-mode laser Haken-Lorenz system with intermittent feedback*

Li Chun-Lai[†] Yang Ben-Shan Huang Le Feng Ting He Yao Zou Mao-Rong

(Innovation Training Center of Photoelectronic Technique and Applied Physics, College of Physics and Electronics, Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414006, China)

(Received 5 July 2014; revised manuscript received 2 September 2014)

Abstract

For the chaos existing in a single-mode Haken-Lorenz laser system, a scheme of intermittent feedback with one variable is proposed. Numerical simulation results show that with the increase of appropriate control intensity, the Haken-Lorenz chaotic system can be suppressed to period 1, period 2, period 4, period 6, and period 8. Meanwhile, the synchronization of Haken-Lorenz chaotic systems is achieved based on the scheme of intermittent feedback.

Keywords: single-mode Haken-Lorenz laser system, intermittent feedback, chaos suppress, synchronization

PACS: 05.45.Gg, 05.45.Ac, 05.45.Xt

DOI: [10.7498/aps.64.030504](https://doi.org/10.7498/aps.64.030504)

* Project supported by the Research Foundation of Education Bureau of Hunan Province, China (Grant No. 13C372).

† Corresponding author. E-mail: lichunlai33@126.com.