

· 测试、试验与仿真 ·

## 受控 Gibbs 激光系统动力学行为的仿真研究

顾佳佳, 王周洋, 田 静, 杨 瑶, 李 会, 郭永义, 周效宇

(辽宁师范大学 物理与电子技术学院, 辽宁 大连 116029)

**摘 要:** 研究了受控 Gibbs 激光系统的动力学行为。首先介绍了 Gibbs 激光系统模型, 给出了 Gibbs 激光系统的 Lyapunov 指数随参数的演化图像以及与之对应的系统状态变量与参数的关系曲线。进一步仿真模拟了反馈信号强度对系统动力学行为的影响。结果显示, 通过调节反馈信号强度, 系统存在倍周期分岔、周期并合以及混沌等多种非线性效应。

**关键词:** Gibbs 激光系统; 控制; 数值模拟

中图分类号: O415.5

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2015)-01-0085-04

## Simulation Research on Dynamical Behavior of Controlled Gibbs Laser System

GU Jia-jia, WANG Zhou-yang, TIAN Jing, YANG Yao, LI Hui, GUO Yong-yi, ZHOU Xiao-yu

(School of Physics and Electronic Technology, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

**Abstract:** The dynamical behavior of controlled Gibbs laser system is researched. Gibbs laser system model is introduced at first. The images from Lyapunov exponent of Gibbs laser system changing with incident light intensity parameters and the relationship curve of the relative system state variable and incident light intensity parameters are given. The influence on system dynamical behavior from feedback signal intensity is simulated further. The results show that nonlinear effects such as double periodic bifurcation, periodic combination and chaos through regulating feedback signal strength exist in the system.

**Key words:** Gibbs laser system; control; numerical simulation

自从 Grazyuk 和 Oraevski 研究了单模激光器的模型及其特性, 发现此类激光方程的解具有随机行为以来<sup>[1]</sup>, 有关激光器动力学特性的研究逐步引起了国际国内学者的高度关注。继 Grazyuk 等人的研究之后, Haken 建立了一个均匀加宽激光器的理论模型, 并确定这类激光器产生的随机行为即为混沌效应<sup>[2]</sup>。随着研究的不断深入, 人们发现混沌这种非周期运动不但对初始状态极其敏感, 而且含有非常丰富的信息, 因此, 在许多应用领域有着不可替代的发展潜力, 从而使得激光混沌的特性及其控制研究成为众多领域的研究方向之一<sup>[3-8]</sup>。

虽然激光混沌在许多领域有着广泛的应用, 但它的随机行为有时也是需要控制的, 因此, 对激光系统的有效控制就显得十分重要<sup>[9-12]</sup>。一般来说, 混

沌控制方法可以分为两种: 一种是对混沌系统的参数施加干扰, 并随时间反复调整, 最终使受控系统稳定; 另一种则是对混沌系统的变量进行控制, 从而使系统达到期望的目标。文中通过对 Gibbs 激光系统的变量进行反馈控制, 使系统达到倍周期分岔、周期并合以及混沌等多种控制目标。

### 1 Gibbs 激光系统模型

Gibbs 激光系统可由(1)式<sup>[13]</sup>表示如下

$$\tau \frac{dx(t)}{dt} = -x(t) + I \sin^2[x(t - t_R) - x_b] \quad (1)$$

式中,  $x(t)$  为输出光强;  $I$  为入射光强;  $x_b$  为驱动源的偏压;  $\tau$  为系统的响应时间;  $t_R$  为系统的延迟时

收稿日期: 2015-01-09

基金项目: 辽宁省理论物理重点学科项目资助(905061)

作者简介: 顾佳佳, 女(1990-), 硕士研究生, 从事非线性理论研究。

间。在长延迟情况下,式(1)左端可以忽略不计,这样 Gibbs 激光系统的时间演化方程式(1)可以表示成如式(2)的迭代形式

$$x_{n+1} = I \sin^2(x_n - x_b) \quad (2)$$

式中,  $n$  是时间迭代次数。

由于非线性系统具有混沌的典型特征是具有大于零的 Lyapunov 指数,所以,计算 Gibbs 激光系统的 Lyapunov 指数随参数  $I$  的演化图像。假设系统式(2)的 Lyapunov 指数为  $\lambda_{Ly}$ , 根据 Lyapunov 指数的定义, Gibbs 激光系统的 Lyapunov 指数为

$$\lambda_{Ly} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n \ln |I \sin(2x_n - 2x_b)| \quad (3)$$

根据式(3),取 Gibbs 激光系统的参数  $x_b = 0.85\pi$ , 数值计算的结果如图1所示。与之对应的系统状态变量  $x_n$  与参数  $I$  的关系曲线如图2所示。

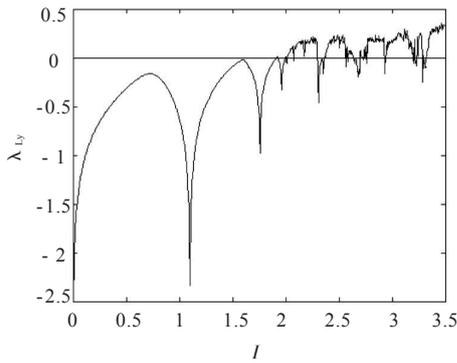


图1 系统(2)的 Lyapunov 指数随参数  $I$  的演化

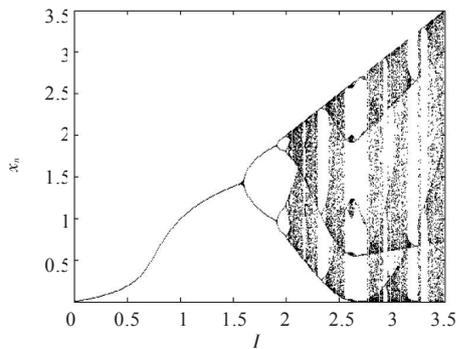


图2 状态变量  $x_n$  与参数  $I$  的关系曲线

## 2 受控激光系统的仿真分析

对 Gibbs 激光系统(式(2))进行变量控制,有效的方法之一是直接对系统施加反馈信号  $kS_{\text{sign}}$ , 即

$$x_{n+1} = I \sin^2(x_n - x_b) + kS_{\text{sign}} \quad (4)$$

式中,  $k$  代表反馈信号的强度;  $S_{\text{sign}}$  表示反馈信号。

这种控制方法的优势不但是简单易实现,而且反馈信号的类型一般不受限制。这些优势通过下面的仿真分析可以验证。首先取反馈信号  $S_{\text{sign}}$  为 Gibbs 激光系统的状态变量  $x_n$ , 即  $S_{\text{sign}} = x_n$ 。数值模拟反馈信号强度  $k$  对系统动力学行为的影响。仿真模拟反馈信号强度  $k=0.25$  时受控激光系统状态变量的演化如图3所示。通过图3系统状态变量  $x_n$  与参数  $I$  的关系曲线可以看出,它与未加反馈信号的  $x_n - I$  关系曲线(图2)相比有明显的变化和差别。除了仍存在倍周期分岔这种原有的动力学行为以外,还增加了周期合并以及跳跃等多种非线性效应。当改变反馈信号强度为  $k=0.8$  时,受控激光系统状态变量的演化如图4所示。由图4显示,系统在参数  $I$  所取的区域内倍周期分岔仍存在,但混沌态消失。因此可以通过简单地调节反馈信号强度获得所需要的动力学行为。

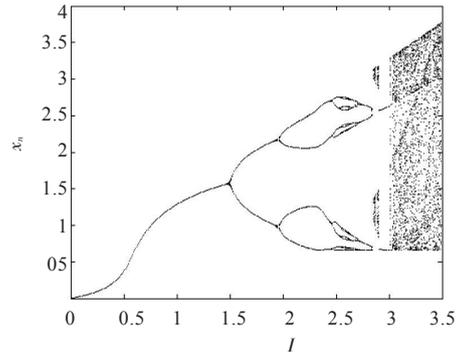


图3 系统状态变量的演化图 ( $k=0.25$ )

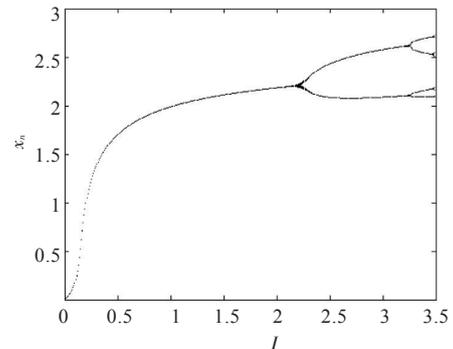


图4 系统状态变量的演化图 ( $k=0.80$ )

其次,取反馈信号  $S_{\text{sign}}$  为外部信号,如新映射的状态变量  $y_n$  作为反馈信号,即  $S_{\text{sign}} = y_n$ 。数值模拟反馈信号强度  $k$  对系统动力学行为的影响。

新映射可以表示为<sup>[14]</sup>

$$y_{n+1} = y_n \sqrt{\frac{a}{y_n - 2}} \tag{5}$$

其中,  $a$  为参数,且  $a \in [0.5, 1]$ 。

新映射的 Lyapunov 指数以及系统状态变量  $y_n$  与参数  $a$  的关系曲线如图 5、图 6 所示。

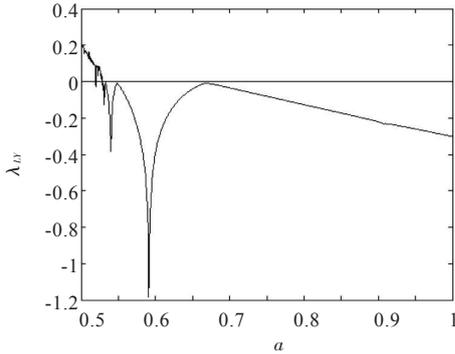


图 5 新映射的 Lyapunov 指数随参数  $a$  的演化

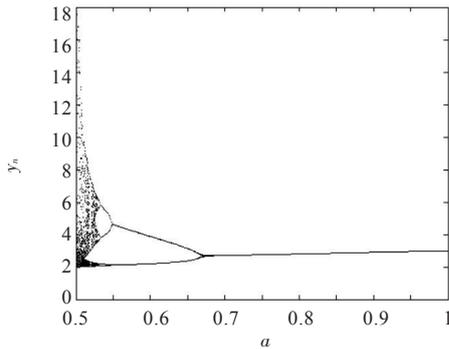


图 6 状态变量  $y_n$  与参数  $a$  的关系曲线

比较 Gibbs 激光系统(式(2))和作为反馈信号的新映射(式(5)),可以看出,它们属于异结构系统,动力学行为差别很大。但通过仿真模拟可以看出,它对 Gibbs 激光系统的调控仍非常有效。模拟时,取参数  $a=0.52$ ,反馈信号强度仍取  $k=0.25$  和  $k=0.8$ ,此时系统状态变量的演化如图 7、图 8 所示。

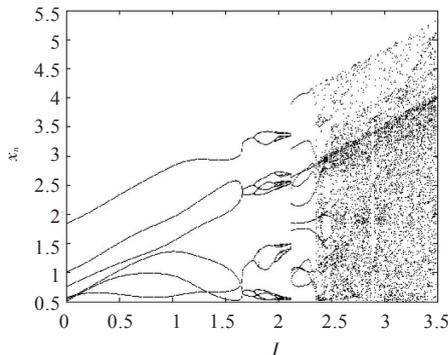


图 7 系统状态变量的演化图 ( $k=0.25$ )

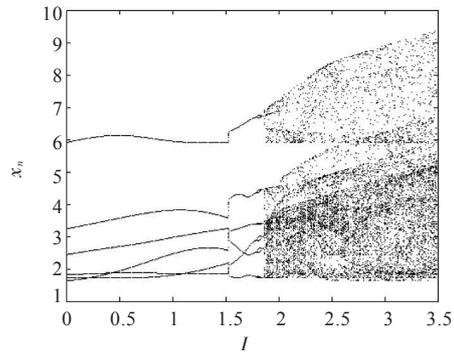


图 8 系统状态变量的演化图 ( $k=0.80$ )

由图 7、图 8 可以看出,单一周期稳态在参数  $I$  所取的区域内消失,增加了多周期态。周期并合以及混沌态仍然存在。

### 3 结 论

仿真研究了在反馈信号作用下,受控 Gibbs 激光系统动力学行为的变化。在介绍 Gibbs 激光系统模型特性的基础上,对 Gibbs 激光系统施加了不同的反馈信号。仿真结果显示,取反馈信号为 Gibbs 激光系统的状态变量,当反馈信号强度数值较小时,受控 Gibbs 激光系统存在倍周期分岔、周期并合以及混沌等多种非线性效应。当反馈信号强度较大时,在相同的参数区域内,系统仅存在倍周期分岔。当反馈信号为新映射时,单一周期稳态在所取的参数区域内消失,存在多周期态、周期并合以及混沌态。因此,不同的外部反馈信号对 Gibbs 激光系统的影响是不同的。

### 参考文献

- [1] 沈柯.光学中的混沌[M].长春:东北师范大学出版社, 1999.
- [2] Haken H. Analogy between higher instabilities in fluids and lasers. Phys Lett A, 1975, 53(1): 77-78.
- [3] Kanter I, Gross N, Klein E, Kopelowitz E, Yoskovits P, Khaykovich L, et al. Synchronization of mutually coupled chaotic lasers in the presence of a shutter[J]. Phys. Rev. Lett., 2007, 98(15):154101-4.
- [4] Aviad Y, Reidler I, Kinze W, et al. Phase synchronization in mutually coupled chaotic diode lasers[J]. Phys. Rev. E, 2008, 78(2):025204-4.
- [5] 赵振华,张胜海,杨华,等.电光双稳态系统的混沌特性

- 分析[J].光子学报,2011,40(10):1459-1463.
- [6] 胡西多,罗诗裕,邵明珠. 掺杂超晶格光学双稳态系统的混沌行为[J].半导体光电,2010,31(1):79-82.
- [7] 赵建利,王京,王慧. 洛伦兹-哈肯激光混沌系统有限时间稳定主动控制方法研究[J].物理学报,2012,61(11):110209-9.
- [8] 李文琳,李淑凤. 泵浦光强对激光相位共轭波非线性效应的影响[J].光学技术,2011,37(2):253-256.
- [9] 牛永迪,马文强,王荣. 电光双稳态系统的混沌控制与同步[J].物理学报,2009,58(5):2934-5.
- [10] 丁灵,吴加贵,夏光琼,等. 双光反馈半导体激光混沌系统中外腔延时反馈特征的抑制[J].物理学报,2011,60(1):01421-6.
- [11] Li C, Sun J C, Ren X D, et al. Parameter identification and synchronization between uncertain stimulated Raman scattering and  $\text{NH}_3$  laser[J]. Optics Communications, 2012, 285(17):3665-3668.
- [12] 李文琳,李淑凤. 激光相位共轭波信号同步传输的仿真研究[J].半导体光电,2012,33(2):280-282.
- [13] Gibbs H M, Hopf F A, Kaplan D L, et al. Observation of chaos in optical bistability[J]. Phys Rev Lett, 1981, 46(7):474-477.
- [14] Alpar O. Analysis of a new simple one dimensional chaotic map[J]. Nonlinear Dyn, 2014, 78(2):771-778.

(上接第10页)

研领域提供一种扫描的新思路,并将得到广泛的应用。

#### 参考文献

- [1] LIU L, XIE H K. Three-dimensional confocal scanning microscope using an MEMS mirror for lateral scan and an MEMS lens scanner for depth scan [C]//2012 International Conference on Optical Mems and Nanophotonics (Omn), 2012:158-159.
- [2] Wildanger D, Medda R, Kastrop L, et al. A compact STED microscope providing 3D nanoscale resolution [J]. J Microsc-Oxford, 2009, 236(1):35-43.
- [3] Horiuchi T, Ishii H, Shinozaki Y, et al. Laser lithography using a half-vacuum support guide for fabricating micro-coils [J]. Microelectron Eng, 2011, 88(8):2567-2570.
- [4] Fischer J, Wegener M. Three-dimensional optical laser lithography beyond the diffraction limit [J]. Laser Photonics Rev, 2013, 7(1):22-44.
- [5] Gould T J, Burke D, Bewersdorf J, et al. Adaptive optics enables 3D STED microscopy in aberrating specimens [J]. Opt Express, 2012, 20(19):20998-21009.
- [6] Vaishnavi V, Varghese L, Ali B M J. A stage-scanning laser confocal microscope and protocol for DNA methylation sequencing [J]. Journal of Biomedical Science and Engineering, 2010, 3(5):496-500.
- [7] 李明周,王昭,赵宏. 点扫描激光共焦测量研究 [J]. 工具技术, 2003, 37(6):39-41.
- [8] 杜睿. 双光子轴向随机扫描方法研究 [D]. 武汉:华中科技大学, 2011.
- [9] 张运波,侯文玫,郑继红. 采用变焦液体透镜的共焦检测系统的设计与仿真 [J]. 应用光学, 2012, 33(1):14-18.
- [10] 张瑞宇,刘立衡. 灭菌牛乳中脂肪酶活性变化的研究 [J]. 食品科学, 2009, 30(17):221-224.
- [11] Lopez C A, Hirs A H. Fast focusing using a pinned-contact oscillating liquid lens [J]. Nat Photonics, 2008, 2(10):610-613.
- [12] Olivier N, Mermillod-Blondin A, Arnold C B, et al. Two-photon microscopy with simultaneous standard and extended depth of field using a tunable acoustic gradient-index lens [J]. Opt Lett, 2009, 34(11):1684-1686.
- [13] Chang T M, Dupont G, Enoch S, et al. Enhanced control of light and sound trajectories with three-dimensional gradient index lenses [J]. New J Phys, 2012, 14:035011.
- [14] Krishnamurthi M, Ramirez M O, Denev S, et al. Two dimensional dynamic focusing of laser light by ferroelectric domain based electro-optic lenses [J]. Appl Phys Lett, 2007, 90(20):201106.
- [15] Richards B, Wolf E. Electromagnetic diffraction in optical systems II structure of the image field in an aplanatic system [J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A Mathematical and Physical Sciences, 1959, 253(1274):358-379.
- [16] Deng S, Liu L, Cheng Y, et al. Effects of primary aberrations on the fluorescence depletion patterns of STED microscopy [J]. Opt Express, 2010, 18(2):1657-1666.