

具有延迟效应的 Ikeda 激光系统的特性分析

顾佳佳, 高 艳, 荣婷婷, 颜 哲, 刘 倩, 韩昌辉

(辽宁师范大学 物理与电子技术学院, 辽宁 大连 116029)

摘 要:混沌是在确定性系统中产生貌似随机的不规则运动,这种非周期运动对初始条件极其敏感。激光混沌研究是混沌理论研究的重要组成部分。介绍了 Ikeda 激光系统模型。包括模型的建立、动力学方程以及相应的系统特性等。利用 MATLAB 程序仿真模拟系统的状态变量随参数演化的分岔图以及 Lyapunov 指数图。并结合仿真模拟得到的图像,对系统特性进行了简单的分析与讨论。

关键词:激光混沌; Ikeda 模型; Lyapunov 指数; 分岔图

中图分类号: O415.5

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2016)-01-0004-02

Characteristic Analysis of Ikeda Laser System with Delayed Effect

GU Jia-jia, GAO Yan, RONG Ting-ting, YAN Zhe, LIU Qian, HAN Chang-hui

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

Abstract: Chaos is a kind of seemingly random irregular movement arising in a certain system, which is extremely sensitive to initial conditions. Laser chaos is an important part in the reserach of chaos theory. The Ikeda laser system model is introduced, which includes the establishment of the dynamic model, dynamic equation and the corresponding characteristics of the system. The Bifurcation and Lyapunov exponent maps are simulated by MATLAB. And the characteristics of the system are analyzed and discussed with simulation images.

Key words: laser chaos; Ikeda model; Lyapunov exponent; bifurcation map

激光混沌信号以其对初值和系统参数的敏感性、固有的宽带、类噪声和难以预测的特点,在电光通信、保密技术以及远程传输等领域显现出巨大的应用价值。同时,激光混沌也是近年来光学领域一个非常活跃的研究方向。

激光器输出的不稳定性的研究最初由 Haken 完成^[1]。Haken 利用 Maxwell-Bloch 方程通过坐标变换,把描述一个均匀加宽单模激光器的非线性方程等效成 Lorenz 模型,并预言有混沌行为。之后,Weiso 等在 NH₃ 激光器中发现并证实了 Haken 的预言^[2]。随着研究的不断系统深入,又在远红外激光器中进一步证实了激光混沌的存在。特别是 Abraham 等在 He-Ne 激光器中观察到激光模分裂、自脉

动振荡和混沌现象,并且发现系统由倍周期分岔进入混沌^[3]。Ikeda 建立了研究光学双稳态不稳定性的 Ikeda 方程,证明光学双稳态系统混沌的存在^[4]。Gibbs 等人在电光混合型光学双稳态系统观测到混沌^[5]。Arecchi 等人通过调制激光器光学腔内损耗,在实验上观测到 CO₂ 激光器混沌^[6]。

激光混沌具有鲜明的特性。首先是对初值条件的敏感性。给定不同的初值或不同的参数,混沌吸引子的轨道变化将完全不同。其次,激光混沌呈现非周期性。研究表明,混沌现象是确定性系统中局限于有限相空间的不稳定的运动,其长时间的行为呈现混乱性。但在短时间内混沌信号似乎又是有序的。另外,激光混沌还具有类似于噪声信号的

收稿日期: 2015-12-29

基金项目: 辽宁省理论物理重点学科项目(905061)资助

作者简介: 顾佳佳(1990-),女,硕士研究生,从事非线性理论研究。

宽频谱。这些特性使得激光混沌技术在许多领域展现出巨大的应用潜力^[7-10]。

文中介绍了 Ikeda 激光系统模型。包括模型的建立、动力学方程以及相应的系统特性等。利用 MATLAB 程序仿真模拟系统的状态变量随参数演化的分岔图以及 Lyapunov 指数图。并结合仿真模拟得到的图像,对系统特性进行了简单的分析与讨论。

1 Ikeda 激光系统的特性分析

Ikeda 激光系统依据非线性介质的不同可以分为很多种,每一种均呈现丰富各异的倍周期分岔以及混沌行为。这里,以液晶作为非线性介质的系统,其原理装置如图 1 所示。其主要实验仪器包括 He-Ne 激光器、电光调制器、光电探测器、放大器,反馈延迟由微机控制^[11]。

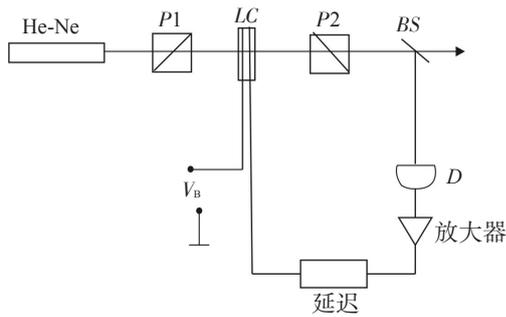


图 1 原理装置图

图 1 中 He-Ne 激光器的输出入射到液晶为非线性介质和一对正交的格兰棱镜组成的电光调制器后,其输出光强由光电探测器 D 接收,电信号经放大和延迟后反馈到非线性介质上。典型的实验结果是在长延迟下,可以观测到倍周期分岔和混沌行为。

下面从理论上分析实验观测到的倍周期分岔和混沌特性。描写图 1 所示装置的系统方程为^[11]

$$\tau \frac{dI_{out}(t)}{dt} = -I_{out}(t) + I_{in}T(V) \quad (1)$$

其中, $T(V)$ 为调制器的透过率; I_{in} 为输入光强; I_{out} 为输出光强; τ 为液晶的弛豫时间; V 为反馈电压与偏压之和,即

$$V = \chi I_{out}(t - t_R) + V_B \quad (2)$$

对于液晶光电系统,透过率 $T(V)$ 与电压的关系为

$$T(V) = T_{max} \sin^2\left(\frac{\pi V}{2U_h}\right) \quad (3)$$

上式中 T_{max} 表示最大透过率; U_h 表示半波电压。

引用 $x(t)$ 表示输出光强; A 表示输入光强; x_b 表示偏压,且令

$$x(t) = \frac{\pi \chi}{2U_h} I_{out}(t) \quad (4)$$

$$A = \frac{\pi \chi T_{max}}{2U_h} I_{in} \quad (5)$$

$$x_b = -\frac{\pi V_B}{2U_h} \quad (6)$$

基于以上各式,式(1)可以改写成下列具有延迟效应的微分方程

$$\tau \frac{dx(t)}{dt} = -x(t) + A \sin^2[x(t - t_R) - x_b] \quad (7)$$

判定系统动力学行为常采用计算系统的 Lyapunov 指数。正的 Lyapunov 指数对应系统具有混沌特征。由 Lyapunov 指数的定义

$$\lambda_{Ly} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \ln \left| \frac{\delta x(t)}{\delta x(0)} \right| \quad (8)$$

其中, $\delta x(t)$ 表示状态 $x(t)$ 与定态的偏差。

利用式(8)计算系统(7)的 Lyapunov 指数以及系统分岔图如图 2、图 3 所示。其中系统参数取 $\tau = 1$, $t_R = 2$, $x_b = \pi/3$ 。

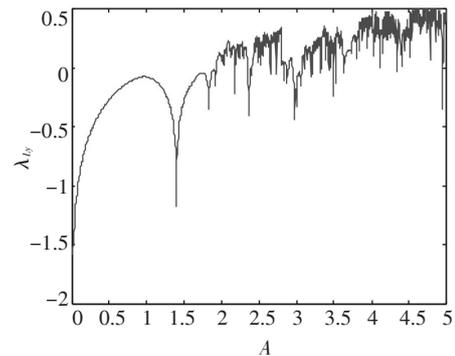


图 2 系统的 Lyapunov 指数

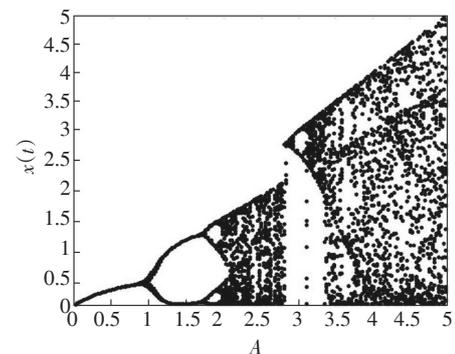


图 3 系统的分岔图

(下转第 34 页)

279-283.

- [9] 刘兵,李坚.Gaussian切趾体光栅在光谱合成中的应用研究[J].激光技术,2013,37(5):656-659.
- [10] Datta S, Li C, Stephen R. Modeling of non-ideal volume

Bragg reflection gratings in photosensitive glass using a Perturbed transmission matrix approach[C]//IEEE Journal of Quantum Electronics, 2004, 40(5): 580-590.

(上接第5页)

图3中参数 A 在 $0 \sim 0.85$ 区间,系统给出定态解,对应周期1轨道。参数 A 在 $0.85 \sim 1.75$ 内系统发生分岔,对应周期2轨道。周期4轨道对应参数 A 在 $1.75 \sim 1.9$ 区间。之后,系统经倍周期分岔发展到混沌。在混沌区内有各种周期窗口,周期3切分岔窗口以及由于混沌吸引子危机引起的混沌区突变等丰富的动力学行为。周期态对应图2中Lyapunov指数小于零的区域,混沌态对应图2中Lyapunov指数大于零的区域,图2和图3的结果完全吻合。

2 结 论

介绍了Ikeda激光系统模型的特性。包括模型的建立、动力学方程以及相应的系统特性。利用MATLAB程序仿真模拟系统的状态变量随参数演化的分岔图以及Lyapunov指数图。并结合仿真模拟得到的图像,对系统特性进行了简单的分析与讨论。模拟结果表明,系统可以呈现倍周期分岔以及混沌现象。在混沌区内,还有各种周期窗口,周期3切分岔窗口以及由于混沌吸引子危机引起的混沌区突变等丰富的动力学行为。由于激光混沌具有宽频谱能够加密数据。而且光子很难被窜改,所以保密性极强。同时,激光具有极小的色散,适用于研究信息的获取、传递和存储。因此,Ikeda激光系统所呈现的倍周期分岔和混沌特性将为应用领域提供有益的参考和借鉴。

参考文献

- [1] Haken H. Analogy between higher instabilities in fluids and lasers[J]. Phys. Rev. Lett., 1975, 53:77-78.
- [2] Weiss C O, Klische W, Ering P C, et al. Instabilities and chaos of a single mode NH_3 ring laser[J]. Phys. Rev. Lett., 1985, 55:405-408.
- [3] Weiss C O, Godone A, Olafsson A. Routes to chaotic emission in a cw He-Ne laser[J]. Phys. Rev. Lett., 1983, 28:892-895.
- [4] Ikeda K. Multiple-valued stationary state and its instability of the transmitted light by a ring cavity system[J]. Opt. Commun., 1979, 30:257-261.
- [5] Gibbs H M, Hopf F A, Kaplan D L, et al. Observation of chaos in optical bistability[J]. Phys. Rev. Lett., 1981, 46: 474-477.
- [6] 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.
- [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] Lü L, Li C, Chen L, et al. Diffusion effect of stimulated Raman scattering and synchronous conversion of optical signal[J]. Optik, 2015, 126: 1462-1466.
- [9] Li C, Sun J, Ren X, et al. Parameter identification and synchronization between uncertain stimulated Raman scattering and NH_3 laser[J]. Opt. Commun., 2012, 285: 3665-3668.
- [10] Ikeda K, Daido H, Akimoto O. Optical turbulence: Chaotic behaviour of transmitted light from a ring cavity[J]. Phys. Rev. Lett., 1980, 45(9): 709-712.