

文章编号: 0258-7025(2009)01-0139-04

基于三维 Wigner 分布的混沌信号判定方法

郭小丹 方 捻* 黄肇明

(上海大学特种光纤与光接入网省部共建重点实验室, 上海 200072)

摘要 提出了基于 Wigner 分布(WD)的判定混沌信号的改进方法。利用混沌信号的窄带特性和三维时频谱图的峰值波动情况判定混沌信号。该方法经洛伦兹系统验证是可行的。计算了混沌信号与高斯噪声的 Wigner 分布, 结果表明可以从三维时频谱直接将两者区分开。计算基于半导体光放大器(SOA)的环形激光器输出光实验数据的三维时频谱, 结果与洛伦兹系统的非常相似, 从而可判定该实验装置产生信号确为混沌信号。Wigner 分布三维时频谱准确地反映了信号的谱特性, 能够将系统的不稳状态与混沌状态以及噪声区分开。无论是由动力学方程产生的混沌还是实验上产生的混沌信号都可直观、有效地进行判定。

关键词 光通信;混沌;Wigner 分布;半导体光放大器环形激光器;洛伦兹方程

中图分类号 O415 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093601.0139

Method of Verifying Chaos Signal Based on Three-Dimensional Wigner Distribution

Guo Xiaodan Fang Nian Huang Zhaoming

(Key Laboratory of Special Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract An improved method of distinguishing chaotic signal based on Wigner distribution (WD) is presented. The narrow band characteristic and the peak value fluctuation of the three-dimensional time-frequency spectrum are used to distinguish chaotic signal. The method is proved to be feasible by the calculation of Lorentz system. The WD of the chaotic signal is compared with that of the Gaussian noise, and the result indicated that their spectra can be distinguished. The WD is used to dispose the output light of the fiber ring laser base on semiconductor optical amplifier (SOA) too, and the result is similar to that of Lorentz system. So it could be verified that the experiment output is chaotic light. Three-dimensional WD accurately shows the spectral characteristic of the signal and can be used to differentiate whether the system is in nonstable state or chaotic state or noise. It is an intuitive and effective method for distinguishing the chaos either generated from dynamic equations or experiment output.

Key words optical communications; chaos; Wigner distribution; semiconductor optical amplifier-ring laser; Lorentz equation

1 引 言

混沌是自然界里确定系统中呈现的复杂与无规则的非线性现象。研究混沌特性的方法有多种, 如相图法、庞加莱 (Poincaré) 图法、李雅普诺夫 (Lyapunov) 指数和关联维等^[1,2], 它们均是在时域中进行分析的。功率谱在描述混沌系统中具有重要的意义, 是研究系统从分岔走向混沌的重要方法, 它

反映了信号的功率密度随频率的变化情况。但混沌信号的频谱也随时间而改变, 因此需要采用二维的时频分布图观测混沌信号的能量谱^[3]。文献[3]仅仅在二维平面中计算了混沌信号的时频分布, 不能区分同一系统不同状态的特性。本文不仅分析了混沌信号频谱的窄带特性, 也引入了三维时频谱图来查看时频分析的峰值变化情况。利用混沌信号的窄

收稿日期: 2008-01-25; 收到修改稿日期: 2008-05-16

基金项目: 国家自然科学基金(60577042)和上海市重点学科(T102)资助项目。

作者简介: 郭小丹(1983—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光混沌保密通信技术。E-mail: guoxiao7311@hotmail.com

导师简介: 黄肇明(1937—), 男, 教授, 博士生导师, 目前主要从事光混沌通信方面的研究。

E-mail: zmhuang@mail.shu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: nfang@staff.shu.edu.cn

带特性和三维时频谱图的峰值波动情况判定混沌信号,并研究了处于不同状态下信号的三维时频谱图,包括混沌信号和高斯噪声。

2 洛伦兹系统的 Wigner 分布

混沌是一种非平稳的非线性过程,而 Wigner 分布(WD)是分析非平稳信号方便而有效的方法,它具有简单的形式和良好的性质,且适合计算频率随时间不断改变的信号。

2.1 Wigner 分布的定义

信号 $x(t)$ 的 Wigner 分布的定义表示为^[3]

$$\omega_x(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j\omega\tau} d\tau. \quad (1)$$

Wigner 分布是信号在时间-频率平面上的二维能量分布。由于混沌信号是实信号,在计算实信号的 Wigner 分布时会引入交叉干扰项,因此在计算混沌信号的 Wigner 分布前,首先需要将信号进行希尔伯特(Hilbert)变换^[4]。采用 Choi_Williams 核计算 Wigner 分布。

2.2 洛伦兹方程的三维时频分布

洛伦兹方程的形式为^[1]

$$\begin{cases} \dot{x} = -\lambda x + \lambda y \\ \dot{y} = -xz + \gamma x - y, \\ \dot{z} = xy - bz \end{cases} \quad (2)$$

式中固定 $\lambda = 10, b = 8/3$, 改变 γ 的值。在 $0 < \gamma < 1$ 时,洛伦兹方程仅有一个平衡点,且这个平衡点是稳定的,系统在整体上处于稳定状态。 $\gamma = 1$ 是临界情况, $\gamma > 1$ 时系统有三个平衡点,其中一个不稳定,另外两个是稳定的,此时系统处于稳定对流状态, $\gamma > 24.74$ 时系统通过阵发途径走向混沌。

按照 Wigner 分布的定义,采用 Choi_Williams 核,利用 Matlab 软件计算洛伦兹方程在不同参数下的时频分布。截取计算结果的后 1000 点数据,分别取 $\gamma = 0.1, \gamma = 23$ 和 $\gamma = 28$,画出了洛伦兹方程不同参数下的三维时频谱,如图 1 所示。图 1 中频率轴使用了归一化频率,其值为实际频率相对于输出信号采样频率的比值,时间轴已作离散化处理,使用采样点数代替实际的时间。图 1(a), (b) 和 (c) 分别对应洛伦兹方程的 y 分量信号在一个稳定平衡点、三个平衡点与混沌状态下的三维时频谱。从图 1 中可以看出,洛伦兹系统随时间改变的能量演化。很明显, $\gamma = 0.1$ 时信号频谱主要集中在较窄的低频带和 高频带部分,而在时间轴的末端有较高峰值。 $\gamma = 23$

时系统处于不稳定态,频谱峰值在时间轴上具有恒定幅值,频率上则具有明显的窄带特性。 $\gamma = 28$ 时系统处于混沌状态,信号频谱主要集中在窄带低频中,并且峰值随时间有较大的波动。

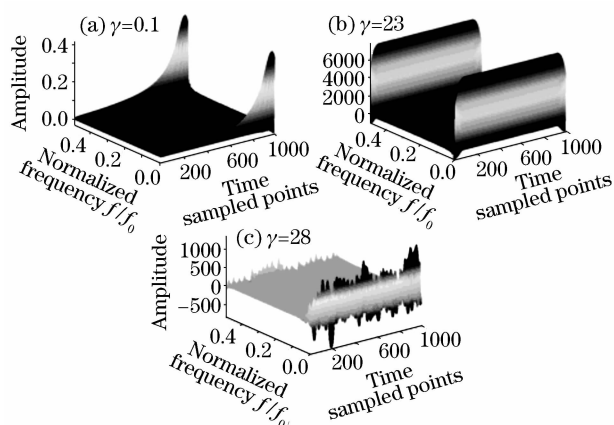


图 1 洛伦兹方程的三维时频谱图

Fig. 1 Three-dimensional time-frequency spectra of a Lorentz system

可见,洛伦兹系统处在不同参数下的各个状态,其三维时频谱图是有明显区别的,因此,可以直接从三维时频谱来区分各个状态。而且,从洛伦兹方程的三维时频谱图可以得出,处于混沌状态的信号其能量谱峰值随时间而波动。基于这一特点,对实验室采得的半导体光放大器(SOA)环形激光器的输出信号进行了鉴别。

3 基于 SOA 的光纤环形激光器输出信号的 Wigner 分布

3.1 基于 SOA 光纤环形激光器的结构

基于 SOA 光纤环形激光器的工作原理与结构已有报道^[5,6],其结构如图 2 所示。在此系统中,主要器件是半导体光放大器,它在环中起到非线性作用。环内传输信号波长由滤波器决定,其中 PC 为偏振控制器,用来改变环内传输信号的偏振状态。OC 为 50:50 耦合器。

3.2 基于 SOA 环形激光器的输出光信号的时频分布

已经证明该实验装置所产生的光波呈混沌特性^[7]。现在采用改进的 Wigner 分布法来判定该实验数据的混沌性,观察它的时频分布特性。由于输出信号受到噪声影响,因此在计算机进行处理前首先需要进行去噪处理。这里采用小波变换进行信号的去噪。去除噪声后的信号如图 3 所示。

在实验装置中,采样时间间隔为 1 ns,图 3 中所

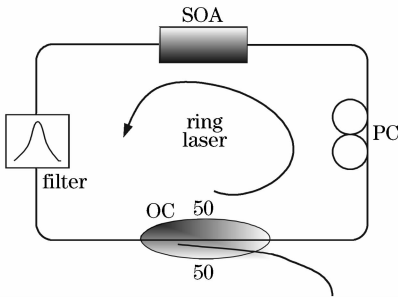


图 2 基于 SOA 的环形激光器

Fig. 2 SOA-based fiber ring laser

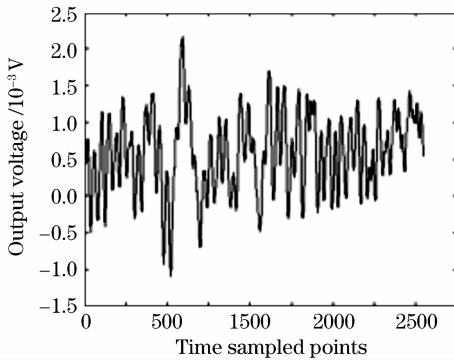


图 3 基于 SOA 的环形激光器输出信号去噪后的信号波形

Fig. 3 De-noised signal of a fiber ring laser based on SOA

标注采样点为实际时间与采样间隔的比值。

基于 SOA 的环形激光器的输出信号经过去噪后,计算其三维时频谱图。对于判定混沌时间序列,

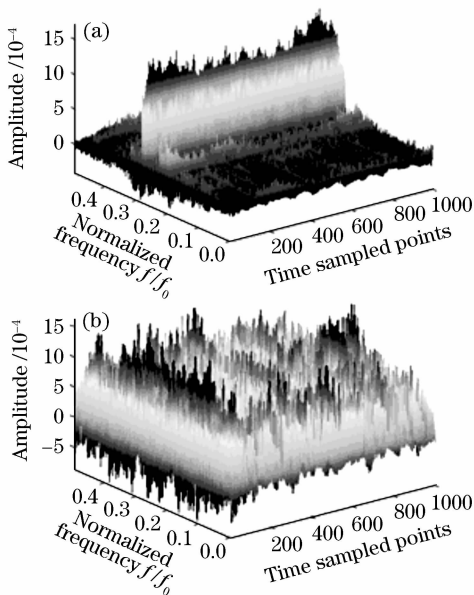


图 4 实验输出信号(a)与高斯噪声(b)的三维时频谱图

Fig. 4 Three-dimensional time-frequency spectra of the signal of SOA-ring laser (a) and Gaussian noise (b)

需要大约 1000 点进行频谱分析。因此采用了 1000 点数据进行计算,结果如图 4(a)所示。可见,基于 SOA 的光纤环形激光器输出信号的三维时频谱图也呈窄带特性,其信号能量集中于中频窄带范围,频谱的峰值则随时间改变而迅速地波动,同时采用吕金虎等^[1]提出的改进的小数据量方法,求得此时 Lyapunov 指数为 $\lambda = 0.025$,说明系统处于混沌状态。这与从经典的洛伦兹混沌系统中得出的三维时频谱特征是一致的,从而再次证明实验系统确实是混沌的。

为了区别于噪声,对高斯噪声的 Wigner 分布的三维时频谱图进行了计算(如图 4(b)),可以看出高斯噪声的谱图覆盖了整个时间和频率区域。与 SOA 环形激光器输出信号的时频谱具有明显不同。因此利用 Wigner 分布可以将混沌与噪声进行区分。

4 结 论

提出了基于 Wigner 分布的判定信号混沌特性的改进方法,使用洛伦兹方程进行了论证,给出了洛伦兹系统在各种状态下时频分布的谱图。进一步计算了基于 SOA 环形激光器的输出信号的三维时频谱,该时频谱不仅呈窄带特性,频谱峰值也是随时间而波动的,具有与洛伦兹系统输出信号的三维时频谱相似的特性,从而证明该实验系统确实是混沌的。三维 Wigner 分布能够准确地反映信号的频谱特性,可以将系统的不稳状态与混沌状态以及噪声区分开来,是一种直观、高效的混沌鉴别方法。

参 考 文 献

- Lü Jinhu, Lu Junan, Chen Shihua. Analysis and Application of Chaos Series [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002
吕金虎,陆君安,陈士华. 混沌时间序列分析及其应用[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2002
- Yan Senlin. Controlling chaos in semiconductor lasers by phase conjugation feedback [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1043~1046
颜森林. 半导体激光器混沌相位共轭反馈控制方法[J]. 中国激光, 2006, **33**(8):1043~1046
- Chunyan Nie, Yaowu Shi, Wensuo Yi. Analysis of chaotic system characters based on time-frequency distribution [C]. *Proceeding of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Dalian, China, 2006. 4842~4845
- Ji Yuebo, Qin Shuren, Tang Baoping. Repression of the interference in the Wigner distribution and the algorithm [J]. *Journal of Chongqing University*, 2001, **24**(4):26~30
纪跃波,秦树人,汤宝平. Wigner 分布干扰项抑制及其算法[J]. 重庆大学学报, 2001, **24**(4):26~30
- Lutang Wang, Zhaoming Huang. Optical chaos communication with a dynamical SOA-based fiber ring laser [C]. *SPIE*, 2003,

5281 I:619~627

- 6 Fang Nian, Guo Xiaodan, Wang Chunhua *et al.*. The characteristic of polarization chaos and coherence of semiconductor optical amplifier-based fiber ring laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1):128~131
方 捻,郭小丹,王春华 等. 半导体光放大光纤环形激光器的

偏振混沌与相干性[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1):128~131

- 7 Fang Nian, Wang Lutang, Guo Shuqin *et al.*. Security of polarization-shift keying chaos optical communication system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6):812~817
方 捻,王陆唐,郭淑琴 等. 偏振态移位键控光混沌通信系统的保密性[J]. *光学学报*, 2006, **26**(6):812~817

《激光与光电子学进展》“光学制造”栏目征稿启事

《激光与光电子学进展》是中国科学院上海光学精密机械研究所主办的激光、光电子领域行业性期刊,中国科技核心期刊。该刊1964年创刊,至今已出刊500余期,旨在促进国内外学术交流,沟通科研单位、生产部门与用户的联系。2009年,《激光与光电子学进展》将加大光学制造方向的报道力度,深入研讨光学制造的技术发展及其在工业、科研各方面的应用。主要涉及方向有光学元器件、光学仪器、光学加工、光学设计、光学材料、光学薄膜、光学检测等领域。

欢迎相关的科研、技术、市场人员根据我们栏目内容定位,撰写或向我们推荐涉及上述领域的优秀技术论文。来稿不收取审稿费和版面费,一经录用将优先发表并支付丰厚稿酬。

• 本栏目基本要求:

- 1) 稿件内容应为光学制造领域的最新进展、研究动态、科研和新品开发成果等方面;
- 2) 文章要求内容新颖、论点正确、论据充分、数据可靠、文理通顺;
- 3) 技术文章字数一般为5000字左右;综述文章字数最多不超过10000字,且第一作者需为副教授及以上职称。

• 投稿方式:通过网上投稿系统(<http://www.opticsjournal.net/lop.htm>)直接上传稿件(主题标明“光学制造”投稿),也可以直接将稿件word版发至邮箱:dingjie@siom.ac.cn(主题标明“光学制造”投稿),如有问题欢迎垂询021-69918198与栏目编辑丁洁联系。

《激光与光电子学进展》编辑部