

双光反馈半导体激光混沌高复杂度优化分析

蒋 龙 夏光琼 吴加贵 肖 平 吴正茂

(西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715)

摘要 基于排列熵(PE)分析,提出了一种基于半导体激光器(SL)在双光反馈作用下获取高复杂度混沌激光的方案。仿真结果表明,当两个光反馈的延迟时间近似相同、而差值约为激光器弛豫振荡周期一半时,混沌光的 PE 特征值达到最大,具有最高的复杂度。调节双光反馈的强度值,混沌光的 PE 特征值将随反馈强度的增加而首先快速增大,然后再缓慢降低。在一定优化双光反馈强度值范围内,PE 特征值可取得最大值,从而得到高复杂度的混沌光输出。与单光反馈 SL 系统相比较,在不同反馈强度下,双光反馈系统所获得的混沌光的 PE 特征值也总是大于单光反馈系统的结果。

关键词 激光光学;半导体激光器;混沌激光;排列熵;复杂度

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1202003

Optimization Analysis on Complex Degree of Optical Chaos in a Semiconductor Laser with Double Optical Feedback

Jiang Long Xia Guangqiong Wu Jiagui Xiao Ping Wu Zhengmao

(School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract By adopting the permutation entropy (PE) analysis, a high complex optical chaos generation scheme based on a semiconductor laser (SL) with double optical feedbacks is proposed. The simulated results show that, when the delay times of two optical feedbacks are close to each other, and have a difference of about a half of the SL relaxation oscillation period, the characteristic value of PE reaches a maximum, and the most complex chaotic output can be obtained. With the increase of the strength of two optical feedbacks, the characteristic value of PE firstly experiences a rapid increasing process and then decreases gradually. Thus, the high characteristic values of PE and high complexity chaos output can be founded within a certain range of feedback strengths. Moreover, under different feedback strength settings, the characteristic value of PE for double optical feedback system is always higher than that for single optical feedback system.

Key words laser optics; semiconductor lasers; chaotic laser; permutation entropy; complex degree

OCIS codes 140.1540; 140.5965

1 引 言

近年来,基于半导体激光器(SL)的混沌激光系统受到了人们的广泛关注,并在保密通信、雷达、超高速随机数产生等领域展现出诱人的应用前景^[1~11]。一般而言,通过引入全光反馈、光注入、光电反馈等多种外部扰动,SL 在合适条件下可实现混

沌输出^[12~16]。相比于其他方式,全光反馈方式的实现装置较简单,易得到各种复杂混沌态,而逐步成为目前基于 SL 获取混沌激光的主要方案之一^[8]。研究如何从这种系统中获得高复杂度的混沌输出,无论是对于提升混沌保密通信的安全性,还是对于改善基于混沌激光产生的超高速随机数的统计性能等

收稿日期: 2012-06-26; 收到修改稿日期: 2012-08-08

基金项目: 国家自然科学基金(60978003, 11004161, 61078003, 61178011, 61275116)和重庆市自然科学基金(CSTC2010BB9125, CSTC2012jjB40011)资助课题。

作者简介: 蒋 龙(1988—),男,硕士研究生,主要从事激光与光通信方面的研究。E-mail: jlxzhq@126.com

导师简介: 吴正茂(1970—),男,博士生导师,教授,主要从事半导体激光非线性动力学等方面的研究。

E-mail: zmwu@swu.edu.cn(通信联系人)

方面均具有重要意义。

目前已有多种方法被用来刻画混沌的复杂度,其中最常用的是李雅普诺夫(Lyapunov)指数^[17]。一般认为混沌信号的李雅普诺夫指数越大,混沌也就越复杂。另外,基于李雅普诺夫指数计算,还可以获得 Kolmogorov-Sinai 熵值^[8],从而进一步评估混沌吸引子的复杂程度。然而,李雅普诺夫指数算法本质上是估计混沌吸引子在相空间中的相邻轨道分离速率。由于涉及对相邻轨道的搜索与分析,导致李雅普诺夫指数应用于分析复杂系统时较为困难,往往也导致基于李雅普诺夫指数的 Kolmogorov-Sinai 熵的计算对混沌数据提出很高要求^[18,19]。近年来,源于信息理论的排列熵(PE)被用于混沌的复杂度分析^[20~22]。相比而言,排列熵计算对系统的非线性漂移、噪声干扰具有较强容忍力^[20]。排列熵的分析过程无需邻域搜索,计算量小,在适当情况下,排列熵计算速度可以提升达两个量级^[21]。目前,排列熵已被成功用于分析单光反馈 SL 系统输出的混沌激光复杂度^[22~24]。与单光反馈相比,双光反馈增加了一个自由度,SL 系统的动力学行为将更加复杂多变^[25~28]。然而目前还未见采用排列熵对双光反馈 SL 系统输出的混沌激光复杂度进行分析的相关报道。本课题组已有研究结果表明,采用双光反馈可以对单光反馈导致的延时特征进行有效的抑制^[25]。然而,仅仅对延时特征抑制是不充分的,理想的混沌光信号还应该是高度复杂的信号,从而有利于在应用中确保混沌保密通信的安全性和超高速随机数的统计性。

本文基于排列熵,对双光反馈 SL 系统输出的混沌激光的复杂度进行理论分析,通过改变系统反馈参数,确定了高复杂度混沌光输出的优化参数范围。通过与单光反馈 SL 系统相比较,进一步证实了双光反馈对提升混沌光复杂度的有效性。

2 理论模型

图 1 为双光反馈 SL 混沌系统模型。SL 发出的光经准直透镜 L 后被分束镜(BS)分成两束。其中一束光经过中性密度衰减片(NDF1)、平面镜(M1)反馈回 SL 中;另一束光则经过中性密度衰减片(NDF2)、平面镜(M2)反馈回 SL 中。通过调节中性密度衰减片(NDF)可控制反馈强度,调节 M1 或者 M2 的位置可改变两反馈光的延迟时间。在该系统中,挡住其中的一个平面镜,系统则变为单光反馈系统。

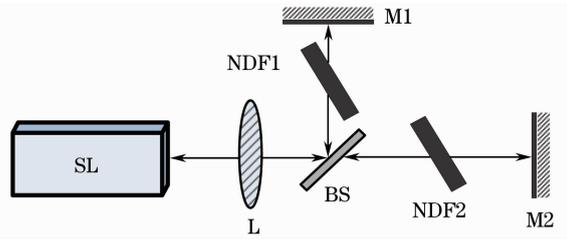


图 1 双光反馈半导体激光器混沌系统模型
Fig. 1 Chaos system model based on SL with double optical feedback

双光反馈半导体激光器的非线性动力学行为可以用 Lang-Kobayashi 速率方程进行表征^[1]:

$$\frac{dE(t)}{dt} = \frac{1}{2}(1 + i\beta) \left[G(t) - \frac{1}{\tau_p} \right] E(t) + \kappa_1 E(t - \tau_1) \exp(-i\omega\tau_1) + \kappa_2 E(t - \tau_2) \exp(-i\omega\tau_2) + F(t), \quad (1)$$

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{I}{e} - \frac{N(t)}{\tau_n} - G(t) |E(t)|^2, \quad (2)$$

式中,下标 1 和 2 分别表示反馈腔 1 和反馈腔 2。 E 为激光器的慢变场振幅, N 为载流子数, β 为线宽增强因子, τ_p 为光子寿命, τ_n 为载流子寿命, κ 为外腔反馈强度, τ 为外腔反馈延迟时间, I 为偏置电流, e 为元电荷所带电荷量, ω 为角频率。 $F(t) = (2\alpha N\zeta)^{1/2}$, 其中 ζ 为高斯白噪声, α 为自发辐射率。 $G(t) = g[N(t) - N_0]/[1 + \rho |E(t)|^2]$, 其中 g 为微分增益系数, N_0 为透明载流子数, ρ 为饱和增益系数。

PE 是一种评估时间序列的复杂程度的有效方法^[15~17]。其基本原理如下:对于一组时间序列 $x_i (i = 1, \dots, T, T$ 为时间序列长度),对 x_i 在相空间中进行重构,其中嵌入的维度为 D ,嵌入延迟为 τ_e , D 维相空间重构为 $\mathbf{S} \rightarrow \{x(s), x(s + \tau_e), \dots, x[s + (D - 2)\tau_e], x[s + (D - 1)\tau_e]\}$,定义一种排列 $\Pi = (r_0, r_1, \dots, r_{D-1})$,其中每个元素与下标 $(0, 1, \dots, D - 1)$ 相对应。对重构后的元素进行降序排列,即: $\mathbf{X}_s = (x_{s-r_0\tau_e} \geq x_{s-r_1\tau_e} \geq \dots \geq x_{s-r_{D-2}\tau_e} \geq x_{s-r_{D-1}\tau_e})$,为了让排列具有唯一性,如果降序排列后的元素有 $x_{s-r_i\tau_e} \geq x_{s-r_{i-1}\tau_e}$,元素下标表示为 $r_i > r_{i-1}$ 。 D 个不同的符号 $[x_{s-r_0\tau_e}, x_{s-r_1\tau_e}, \dots, x_{s-r_{D-2}\tau_e}, x_{s-r_{D-1}\tau_e}]$ 一共有 $D!$ 种不同的排列,符号序列 \mathbf{X}_s 是其中的一种。计算每一种符号序列出现的概率 P_1, P_2, \dots, P_k ,其中 $k \leq D!$ 。此时,PE 值就可以按照香农信息熵的形式定义为

$$H_s(k) = - \sum_{V=1}^k P_V \ln P_V, \quad (3)$$

为了方便,通常将 $H_s(k)$ 用 $\ln(D!)$ 进行归一化处理

理,即

$$0 \leq H_s = \frac{H_s(k)}{\ln(D!)} \leq 1, \quad (4)$$

H_s 值的大小表示时间序列 $\{x_t, t = 1, \dots, T\}$ 的随机程度。 H_s 值越小,说明时间序列越规则;反之时间序列越随机。 H_s 的变化反映并放大了时间序列的微小变化。为了达到统计的目的,时间序列的长度 T 必须满足远大于 $D!$ ^[20]。

3 结果与讨论

(1)、(2)式可以用四阶龙格-库塔法进行数值求解。在数值计算中,相关的参数取值为^[29]: $\beta = 4$, $\tau_p = 4.2$ ps, $\tau_n = 1.6$ ns, $\omega = 1.216 \times 10^{15}$ rad/s, $I = 20.8$ mA, $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C, $g = 2 \times 10^4$ /s, $N_0 = 1.25 \times 10^8$, $\rho = 1 \times 10^{-7}$, $\alpha = 1.5 \times 10^{-5}$ 。数值求解的计算步长设为 2 ps,根据经验^[22],PE 计算时的抽样间隔 Ω_s 设为 20 ps,嵌入维度 D 设为 6,而被抽样的混沌时间序列的点数为 4×10^5 ,满足时间序列的长度必须远大于 $D!$ 的要求。半导体激光器的弛豫振荡周期 $\tau_{RO} \approx 2\pi(gE^2/\tau_p)^{-1/2} \approx 0.2$ ns。下面讨论

中,双光反馈强度定义为两腔反馈强度之和,并假定双腔反馈强度一致。

图 2 为当反馈强度为 18 ns^{-1} 时,单光反馈和双光反馈 SL 系统混沌输出的时间序列、功率谱和 PE,其中 (a)、(c)、(e) 对应单光反馈, $\kappa = 18 \text{ ns}^{-1}$, $\tau = 4$ ns, (b)、(d)、(f) 对应双光反馈, $\kappa_1 = \kappa_2 = 9 \text{ ns}^{-1}$, $\tau_1 = 4$ ns, $\tau_2 = 3.88$ ns。从时间序列和功率谱可以看出,两种情形下 SL 均处于混沌态输出。双光反馈功率谱平滑[如图 2(d)所示],没有单光反馈时的功率谱的明显周期性特征峰[如图 2(c)所示]。同时,单光反馈中的 PE[图 2(e)]在嵌入延迟 τ_e 位于 $\tau/\Omega_s = 200$ 的附近变化剧烈且有一明显的极小值,这一极小值可定义为 PE 的特征值^[22,23](关于该特征值的详细描述请参见文献[22,23])。从图 2(f)可以看出双光反馈系统输出的混沌光的 PE 值在 $\tau_e = \tau/\Omega_s = 200$ 附近仅有微小的波动,PE 的特征值比单光反馈时显著增大,说明输出的混沌光具有了更高的复杂度。因此,相对于单光反馈系统,双光反馈系统输出的混沌信号能较好地隐藏延时反馈的时间特征同时具有更高的复杂度。并且由于 PE 值在 $\tau_e = \tau/\Omega_s = 200$ 附近的显著提升,导致 PE 曲线

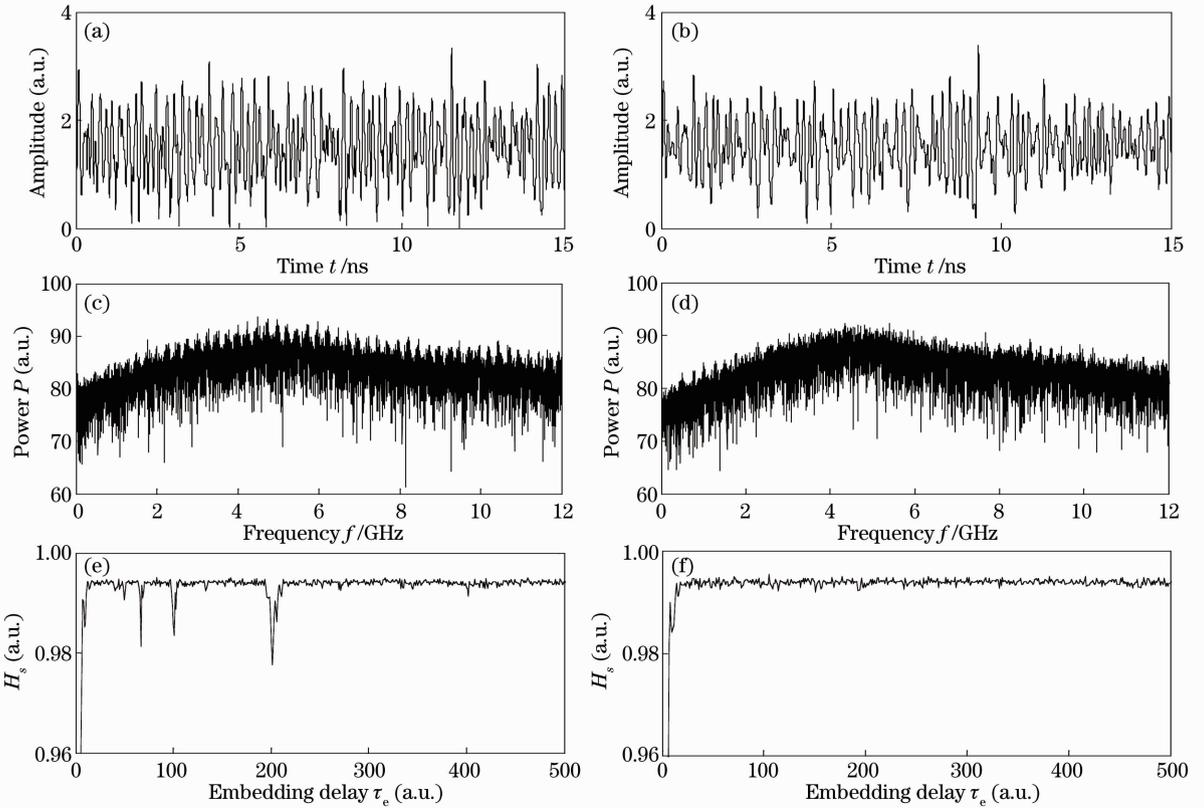


图 2 单光反馈(左)和双光反馈(右)SL 系统混沌输出的时间序列(a、b)、功率谱(c、d)和 PE 曲线(e、f)

Fig.2 (a, b) Chaotic time, (c, d) series power spectra and (e, f) PE curves of chaotic SL system with single optical feedback (left) and double optical feedback (right)

在反馈延迟时间附近无明显低谷出现,从而也有利于SL系统的反馈特征时间的隐藏^[25],有利于提升系统的安全性能。

3.1 延迟反馈时间对双光反馈系统混沌输出复杂度的影响

假定双光反馈系统中反射镜 M1 的反馈时间 τ_1 固定为 4 ns,系统输出混沌光的 PE 特征值随反射镜 M2 的延迟反馈时间 τ_2 的变化曲线如图 3 所示。当 $\tau_1 = \tau_2$ 时,此时双光反馈系统可等效为单光反馈系统,此时 PE 特征值最小,约为 0.981,说明此时输出的混沌光的复杂度相对较低。随着 M2 腔反馈时间 τ_2 适当减小或者增大,PE 的特征值将增大,在 $\tau_2 \approx 3.9$ ns 以及 $\tau_2 \approx 4.1$ ns 时,即 $\tau_1 - \tau_2 \approx \pm 1/2\tau_{RO}$ 时,PE 的特征值最大。继续减小或增大 τ_2 ,PE 特征值出现波动,而且波动的幅度越来越小。考虑到 PE 的特征值在 $\tau_1 - \tau_2 = \pm 1/2\tau_{RO}$ 附近变化比较剧烈,因此在以下的计算中针对不同的反馈强度对 τ_2 做精细的调整,找到系统输出混沌光的 PE 特征值最大时的精确值。另外,对反馈时间 τ_1 取其他值时,PE 特征值随反射镜 M2 的延迟反馈时间 τ_2 的变化也进行了相关数值仿真,结果显示与 $\tau_1 = 4$ ns 时相比具有相似的变化趋势。

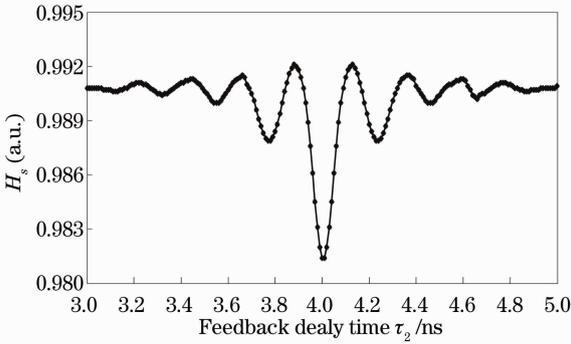


图 3 $\kappa_1 = \kappa_2 = 9 \text{ ns}^{-1}$, $\tau_1 = 4$ ns 时,双光反馈系统输出混沌光的 PE 特征值随 τ_2 的变化曲线

Fig. 3 Characteristic value of PE as a function of τ_2 for double feedback chaotic laser when $\tau_1 = 4$ ns, $\kappa_1 = \kappa_2 = 9 \text{ ns}^{-1}$

3.2 反馈强度对双光反馈系统混沌输出复杂度的影响

图 4 为单光反馈、双光反馈系统混沌输出的 PE 特征值随反馈强度的变化曲线。从图中可看出,随着反馈强度的增大,单腔反馈和双腔反馈的 PE 特征值均先增大后减小,即两种系统的混沌输出复杂度都呈先增大后减小的趋势。图中虚线标示单光反馈系统输出混沌光 PE 特征值的最大值(约为

0.987),虚线与双光反馈时的变化曲线交点所对应的反馈强度变化范围为 $8 \sim 36 \text{ ns}^{-1}$ 。当反馈强度位于这一范围时,双光反馈系统输出混沌光的复杂度高于单光反馈能达到的最大复杂度。由此可见,与单光反馈系统相比,采用双光反馈系统更有利于获取高复杂度的混沌光。

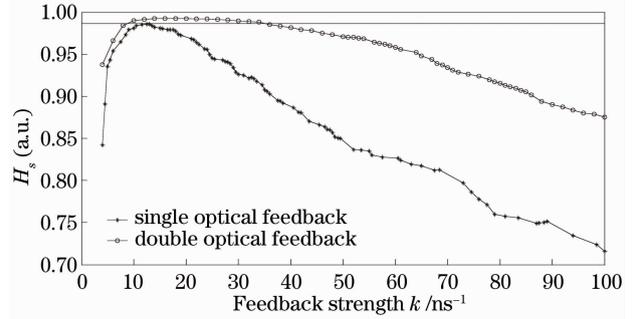


图 4 单光反馈、双光反馈系统混沌输出的 PE 特征值随反馈强度的变化曲线

Fig. 4 Curves of characteristic value of PE evolves with feedback strength for the single optical feedback case and the double optical feedback case

需要说明的是,上述结果均是在偏置电流 $I = 20.8$ mA 时得到的。一般来说,电流的变化肯定会对混沌输出的复杂度有影响。即使在同样的反馈条件下,不同电流偏置下激光器也可能呈现不同的输出状态(如稳态、单周期、多周期、混沌等)。因此,对于偏置电流取其他值时,反馈参数可能需要做相应调整才能使激光器工作在混沌状态。但只要反馈参数能保证激光器处于混沌态,文中的相关结果仍然适用。

4 结 论

本文提出基于半导体激光器在两个反馈强度相等的双光反馈作用下获取高复杂度混沌激光的系统方案。通过运用 PE 方法对该系统输出的混沌光的复杂度进行了分析并与单光反馈系统的相应结果进行对比,可得出以下结论:在双光反馈的总反馈强度与单光反馈的反馈强度相等的条件下,通过选取合适的双光反馈的延迟反馈时间,可使系统的混沌输出的 PE 值在反馈延时附近显著提升,从而显著提升系统复杂度。进一步通过固定双光反馈的一个反馈延迟时间 τ_1 而改变另一个反馈时间 τ_2 ,PE 的特征值在 $\tau_1 - \tau_2$ 位于 $\pm \frac{1}{2}\tau_{RO}$ 附近时取得最大。随着双光反馈总强度的增加,输出混沌光的 PE 特征值呈现先增大后减小的趋势,单光反馈的规律与之相

似。但在相同的反馈强度下,双光反馈获得的混沌光的复杂度高于单光反馈所获得的混沌光的复杂度,并且在一个较大的反馈强度范围内(8~36 ns⁻¹),双光反馈获得的混沌光的复杂度高于单光反馈时可得到的最高值。因此,与单光反馈系统相比,采用双光反馈系统更有利于获得更高复杂度的混沌激光输出,从而在一定程度上更能确保系统的安全性能。

参 考 文 献

- R. Lang, K. Kobayashi. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1980, **16**(3): 347~355
- I. Fischer, O. Hess, W. Elsässer *et al.*. High-dimensional chaotic dynamics of an external cavity semiconductor laser[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1994, **73**(16): 2188~2191
- S. Tang, J. M. Liu. Message encoding-decoding at 2.5 Gbits/s through synchronization of chaotic pulsing semiconductor lasers[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(23): 1841~1845
- A. Argyris, D. Syvridis, L. Larger *et al.*. Chaos-based communications at high bit rates using commercial fibre-optic links[J]. *Nature*, 2005, **438**(17): 343~346
- F. Y. Lin, J. M. Liu. Chaotic radar using nonlinear laser dynamics[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2004, **40**(6): 815~820
- A. Uchida, K. Amano, M. Inoue *et al.*. Fast physical random bit generation with chaotic semiconductor lasers[J]. *Nature Photon.*, 2008, **2**(12): 728~732
- I. Kanter, Y. Aviad, I. Reidler *et al.*. An optical ultrafast random bit generator[J]. *Nature Photon.*, 2010, **2**(12): 58~61
- R. Vicente, J. Daudén, P. Colet *et al.*. Analysis and characterization of the hyperchaos generated by a semiconductor laser subject to a delayed feedback loop[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2005, **41**(4): 541~548
- P. Li, J. G. Wu, Z. M. Wu *et al.*. Bidirectional chaos communication between two outer semiconductor lasers coupled mutually with a central semiconductor laser[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(24): 23921~23931
- Yan Senlin. Theoretical studies on chaotic semiconductor laser dual-direction secure communication system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11): 1503~1509
颜森林. 半导体激光器混沌双向保密通信系统理论研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(11): 1503~1509
- Wang Bingjie, Qian Jianjun, Wang Yuncai *et al.*. Anti-jamming performance of chaotic lidar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **28**(5): 0514002
王冰洁, 钱建军, 王云才等. 混沌激光雷达抗干扰性能分析[J]. *中国激光*, 2011, **28**(5): 0514002
- T. B. Simpson, J. M. Liu, A. Gavrielides. Period-doubling cascades and chaos in a semiconductor laser with optical injection[J]. *Phys. Rev. A*, 1995, **51**(5): 4181~4185
- F. Y. Lin, J. M. Liu. Nonlinear dynamics of a semiconductor laser with delayed negative optoelectronic feedback[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2003, **39**(4): 562~568
- Yan Senlin. Studies on bifurcation and period in semiconductor laser due to optical injection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 996~1001
颜森林. 光注入半导体激光器分岔与周期研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 996~1001
- Cao Liangping, Deng Tao, Lin Xiaodong *et al.*. Investigation on nonlinear dynamic behaviors of the distributed feedback semiconductor laser subjected to optical feedback[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 939~943
操良平, 邓涛, 林晓东等. 光反馈分布反馈半导体激光器的非线性动力学动态行为[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 939~943
- Zhang Mingjiang, Liu Tiegeng, Zheng Jianyu *et al.*. Demonstration of ultrawideband chaotic signal generating utilizing external feedback laser diode[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0405002
张明江, 刘铁根, 郑建宇等. 利用光反馈半导体激光器产生超宽混沌脉冲信号[J]. *中国激光*, 2011, **38**(1): 0405002
- H. Kantz, T. Schreiber. *Nonlinear Time Series Analysis*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 58~62
- A. W. Jayawardena, P. Xu, W. K. Li. Modified correlation entropy estimation for a noisy chaotic time series[J]. *Chaos*, 2010, **20**(2): 023104~023116
- M. S. Baptista, E. J. Ngamga, P. R. F. Pinto *et al.*. Kolmogorov-Sinai entropy from recurrence times[J]. *Phys. Lett. A*, 2010, **374**(9): 1135~1140
- C. Bandt, B. Pompe. Permutation entropy: a natural complexity measure for time series[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **88**(17): 174102
- Y. Cao, W. Tung, J. B. Gao *et al.*. Detecting dynamical changes in time series using the permutation entropy[J]. *Phys. Rev. E*, 2004, **70**(4): 046217
- L. Zunino, O. A. Rosso, M. C. Soriano. Characterizing the hyperchaotic dynamics of a semiconductor laser subject to optical feedback via permutation entropy[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2011, **17**(5): 1250~1257
- M. C. Soriano, L. Zunino, O. A. Rosso *et al.*. Time scales of a chaotic semiconductor laser with optical feedback under the lens of a permutation information analysis[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2011, **47**(2): 252~261
- S. Y. Xiang, W. Pan, B. Luo *et al.*. Unpredictability-enhanced chaotic vertical-cavity surface-emitting lasers with variable-polarization optical feedback[J]. *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, 2011, **29**(4): 2173~2179
- J. G. Wu, G. Q. Xia, Z. M. Wu. Suppression of time delay signatures of chaotic output in a semiconductor laser with double optical feedback[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(22): 20124~20133
- F. R. Ruiz-Oliveras, A. N. Pisarchik. Phase-locking phenomenon in a semiconductor laser with external cavities[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(26): 12859~12867
- F. Rogister, D. W. Sukow, A. Gavrielides *et al.*. Experimental demonstration of suppression of low-frequency fluctuations and stabilization of an external-cavity laser diode[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(11): 808~810
- M. W. Lee, P. Rees, K. A. Shore *et al.*. Dynamical characterization of laser diode subject to double optical feedback for chaotic optical communications[J]. *IEE Proc. Optoelectron.*, 2005, **152**(2): 97~102
- Ding Ling, Wu Zhengmao, Wu Jiagui *et al.*. Unidirectional open-loop chaotic synchronization communication based on a semiconductor laser with double optical feedback[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(1): 014210
丁灵, 吴正茂, 吴加贵等. 基于双光反馈半导体激光器的单向开环混沌同步通信[J]. *物理学报*, 2012, **61**(1): 014210