

文章编号:1004-4213(2011)05-0740-6

双光反馈半导体激光混沌系统的外腔 反馈强度对延时特征的影响

丁灵¹, 吴加贵¹, 夏光琼^{1, 2}, 沈金亭¹, 李能尧¹, 吴正茂^{1, 2}

(1 西南大学 物理学院, 重庆 400715)

(2 东南大学 毫米波国家重点实验室, 南京 210096)

摘要:通过构建一个双光反馈半导体激光混沌系统, 本文实验研究了双腔之间不同反馈强度对系统混沌输出的延时特征的影响. 结果表明: 固定一个腔的反馈量, 而适当调节另一个腔的反馈强度, 可实现对混沌输出延时特征的良好抑制. 同时, 在延时反馈特征抑制较好的情况下, 还存在时间漂移(即从混沌输出所提取的特征延时与系统真实延时之差)明显增大的现象. 因此采用双光反馈半导体系统可以很好地隐藏激光混沌的延时参量, 从而显著提升其在相关领域的表现性能.

关键词:半导体激光器; 混沌; 延时特征

中图分类号: O415.6

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114005.0740

0 引言

随着信息化时代对通信容量、信息安全性要求的逐步提高, 高速率、高保密性的激光混沌保密通信技术受到极大的关注^[1-8]. 由于半导体激光器(Semiconductor Laser, SL)在光反馈、光电反馈以及光注入等外部扰动下容易实现混沌光输出、易于封装且已广泛地应用于现代光通信系统等诸多优点, 因而成为激光混沌保密通信系统中发射机和接收机的首选器件. 其中, 光反馈半导体激光器系统由于结构相对简单、可产生复杂的超混沌输出从而具有比一般混沌而言更高的保密性等优点, 被认为是最有价值的混沌发射源之一^[9]. 在光反馈 SL 混沌保密通信系统中, 外腔反馈延迟时间可用作保密通信的密钥^[10]. 同时, 随着混沌序列分析技术的提高, 从混沌中通过重构来获取延迟时间已成为可能^[11-15], 这将对混沌保密通信的安全性以及相关密钥技术带来威胁. 另一方面, 最近, 从外腔延时反馈半导体激光器的混沌信号来获取超高速随机码成为研究热点^[16-18]. 在超高速随机码获取中, 反馈延时特征也导致从混沌序列简单提取的随机码具有周期回归性, 从而严重影响了随机码的统计性能^[16]. 因此, 研究如何消除混沌的延时特征具有重要的意义.

Rontani 等首先对单光反馈 SL 系统的混沌延迟时间特征问题进行了理论分析^[19]. 结果表明通过设置合适的反馈强度和 SL 工作电流, 混沌的延时特征可以得到有效地抑制. 但是同时考虑到单光反馈 SL 系统的混沌信号的维数与外腔反馈强度密切相关^[9], 因此采用单光反馈 SL 系统需要在高维混沌输出和延时特征抑制两方面进行折衷. 而另有研究表明: 双光反馈 SL 系统能够产生比单光反馈系统更高关联维数和载波带宽的混沌^[20]. 因此, 实现良好的延时特征隐藏, 将使双光反馈 SL 混沌系统在光混沌保密通信中具有很好的应用前景.

在本文中, 采用一个固定腔镜和一个可变腔镜构建了一个双光反馈 SL 混沌产生系统, 实验观察得到在不同外腔反馈强度和反馈延迟时间下, 系统混沌输出的时间序列和功率谱. 并通过考察混沌对应的自相关函数谱特征, 得到了延时特征良好抑制对系统外腔长度和反馈强度的要求.

1 实验装置

双光反馈 SL 混沌系统的实验装置如图 1. SL 为半导体激光器, AL 为非球面透镜, BS 为分束器, OI 为光隔离器, NDF 为中性滤波片, M 为平面镜, FC 为光纤耦合器, PD 为光电转换器, DO 为数字示

基金项目:国家自然科学基金(No. 11004161, No. 60978003, No. 61078003)、重庆市自然科学基金(No. 2010BB9125)和东南大学毫米波国家重点实验室开放基金资助

第一作者:丁灵(1984—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为半导体激光器的非线性动力学. Email: dingling186@126.com

导师(通讯作者):吴正茂(1970—), 男, 教授, 主要研究方向为光通信和半导体激光器的非线性动力学. Email: zmwu@swu.edu.cn

收稿日期:2010-08-09; **修回日期:**2010-11-08

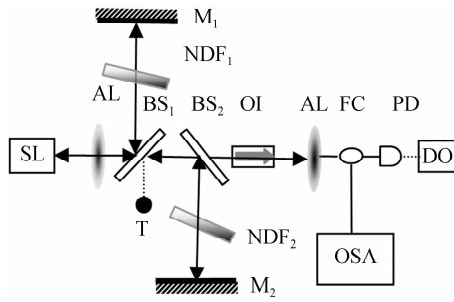


图1 实验装置图
Fig.1 Experimental setup

波器, OSA 为光谱分析仪. 系统由一个 InGaAsP/InP 分布反馈 SL 芯片与两个平面反射镜 M_1 和 M_2 一起构成, 其中 M_1 固定于光学平台上, 而 M_2 安装在水平光滑导轨上从而构成一个腔长可变的反馈腔. SL 的温度由准确度为 $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 的高准确度温控源控制在 20.14°C . SL 的偏置电流由噪音小于 $0.1\ \mu\text{A}$ 的低噪音电源提供. 实验中, SL 偏置电流保持为 $17.0\ \text{mA}$ (约 1.6 倍阈值), 此时 SL 的中心波长为 $1549.76\ \text{nm}$, 对应 SL 的弛豫振荡时间约为 $\tau_{R0} \approx 0.2\ \text{ns}$. 系统光输出经过光纤耦合器 FC (分光比为 20:80) 后, 20% 的光输入到准确度为 $15\ \text{pm}$ 的光谱分析仪 OSA (ANDO 6317C), 另外 80% 的光经过带宽为 $12\ \text{GHz}$ 的光电探测器 PD 转换后输入到采样率为 $20\ \text{GSa/s}$, 带宽为 $6\ \text{GHz}$ 的数字示波器 (Agilent 54855A) 中进行分析. 实验中, 光隔离器用来防止光纤

接口处的光反馈回 SL 中. 中性滤波片 NDF_1 、 NDF_2 分别用来调控腔 1、腔 2 的反馈强度. 通过分别挡住腔 1、腔 2, 以及在图 1 中 T 点的功率监控, 可以对腔 2、腔 1 的有效反馈功率值进行标定.

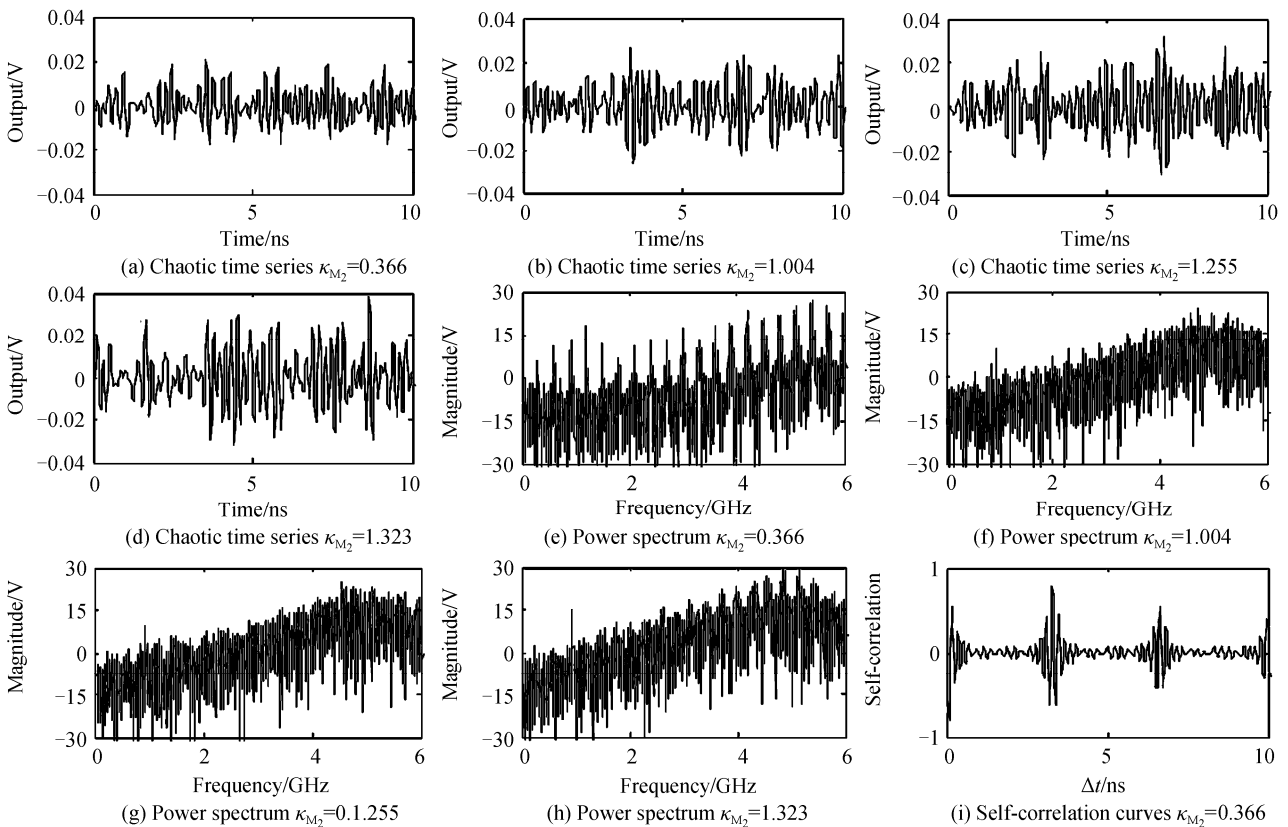
2 实验结果和讨论

获取混沌系统延时特征的方法有很多, 比如自相关函数、互信息、填充因子分析、局部线性模型等^[11-14]. 本文通过计算混沌时间序列的自相关函数谱来获得混沌反馈延时信息. 其中自相关函数可定义为^[21]

$$C(\Delta t) = \frac{\langle (I(t+\Delta t) - I(t))(I(t) - \langle I(t) \rangle) \rangle}{\langle (I(t) - \langle I(t) \rangle)^2 \rangle \langle (I(t+\Delta t) - I(t))^2 \rangle^{1/2}} \quad (1)$$

式中 $I(t)$ 代表混沌时间序列, Δt 代表时移, $\langle \rangle$ 表示对时间进行平均. 实验过程中, 首先将腔 1 的腔长设定为固定长度约为 $525\ \text{mm}$ (对应延时 $\tau_1 \approx 3.50\ \text{ns}$) 和固定反馈功率 $93.5\ \mu\text{W}$. 为了便于比较, 本文将腔 2 的有效反馈功率与腔 1 的有效反馈功率之比进一步定义为无量纲的相对反馈强度 (κ_{M2}).

首先, 固定腔 2 的长度, 并测量其腔长为 $491\ \text{mm}$, 经过换算得到系统的真实延时值为 $\tau_2 \approx 3.375\ \text{ns}$, 然后调节 NDF_2 得到不同的腔 2 反馈强度, 所得结果如图 2. 在如图 2(i) 中, 自相关函数在 τ_2 附近呈现出明显的延时特征峰, 通过计算峰的最大值, 可以提取到系统的延时量. 从图 2 可得, 当腔



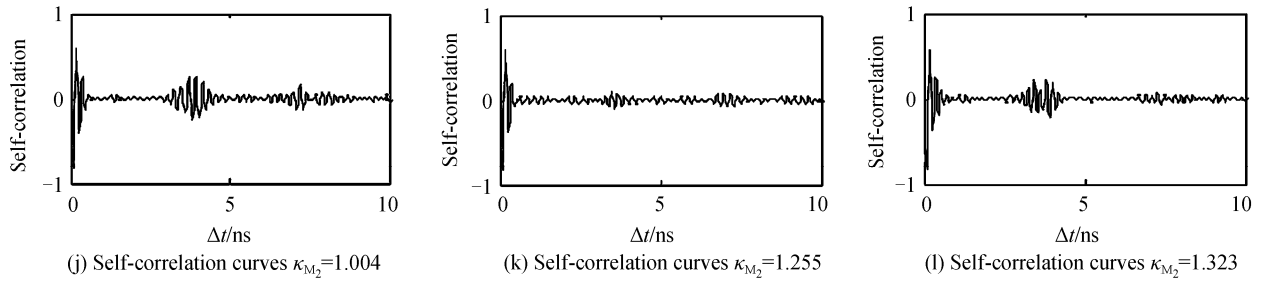


图 2 腔 2 取不同反馈强度时的延时特征演化

Fig. 2 The time delay signature evolution under different feedback strengths of cavity 2

2 的反馈强度增大时,系统的延时特征峰迅速变小. 当腔 2 的 κ_{M_2} 增大到 1.255 时,混沌的延时特征峰被抑制接近背景水平. 而进一步再增大 κ_{M_2} ,混沌的延时特征重新显现出来. 可见,适当调节双腔的反馈量,能够实现对混沌系统延时特征的明显抑制.

另外,将从自相关函数中提取的延时峰位置与系统真实延时进行仔细比较,会进一步发现二者之间存在一定的偏差,可定义为时间漂移. 图 3(其中 ρ 为延时峰的高度值)进一步给出了当腔 2 的延时分别取 $\tau_2 = 3.375$ ns 和 $\tau_2 = 1.725$ ns,腔 2 反馈强度

取不同值时,实验提取得到的延时峰的高度(ρ)值,延时峰的位置以及时间漂移与腔 2 的 κ_{M_2} 的关系. 可见,对于这两个腔 2 长度情况,延时峰的变化存在相似的总体规律:即变化趋势都是先减弱再增强,都存在一个最优的反馈强度,可以使混沌的延时特征得到很好的隐藏. 进一步地,从图 3(b)和(e)还可知当延时峰被优化抑制时,同时还存在着相对较大的时间漂移. 因此,通过设定合适的双腔长度和调控双腔的反馈强度,可对延时特征从特征的强弱和位置的准确性两个方面进行很好地隐藏.

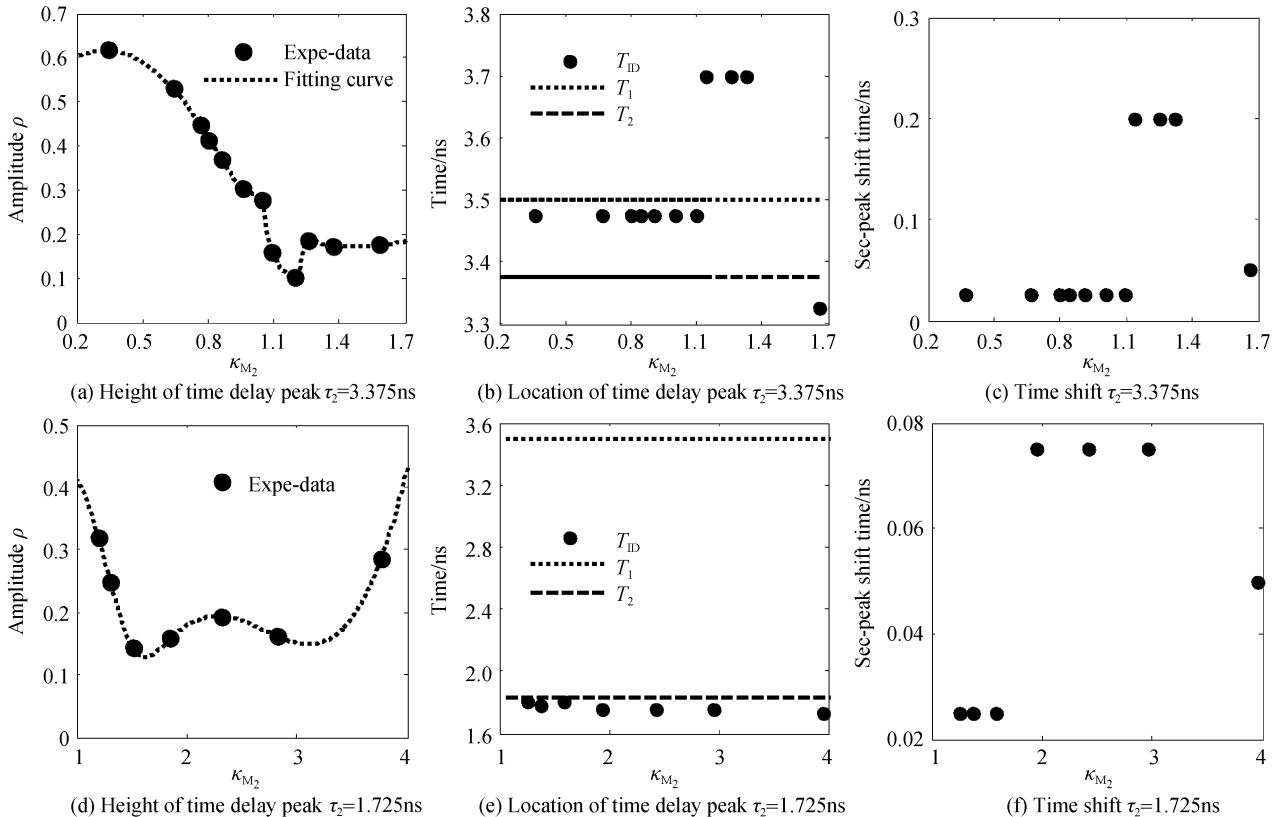


图 3 测量得到的延时特征随腔 2 相对反馈强度的变化关系

Fig. 3 Experimental measured the relationship between the time delay signature and the relative feedback strengths of cavity 2

3 理论模拟

利用修正后的 L-K 速率方程,可以对双光反馈 SL 系统进行数值模拟^[21]. 其速率方程为

$$\dot{E}(t) = \frac{1}{2}(1 + i\beta)(G(t) - 1/\tau_p)E(t) + \kappa_1/\tau_L E(t - \tau_1) + \kappa_2/\tau_L E(t - \tau_2) + F(t) \quad (2)$$

$$\dot{N}(t) = J - N(t)/\tau_N - G(t) |E(t)|^2 \quad (3)$$

式中, E 为 SL 的慢变场振幅, N 为有源区内平均载流子数. κ_1 和 κ_2 分别为反馈腔 1 和腔 2 的反馈强度, τ_1 和 τ_2 分别为腔 1 和腔 2 的反馈延时, τ_p 和 τ_N 分别为光子寿命和载流子寿命. β 为线宽增强因子, ω_0 为激光器角频率, τ_L 为光在 SL 腔内的往返时间. $G(t) = g(N(t) - N_0) / (1 + \epsilon E(t)^2)$ 为增益系数, g 为微分增益系数, N_0 为透明载流子数, ϵ 为增益饱和系数. 运用四阶龙格库塔法可对方程(2)和(3)进行数值求解, 其中各参量的值取为: $\tau_p = 4.2$ ps, $\tau_N = 1.6$ ns, $\tau_L = 8.5$ ps, $\beta = 4$, $\omega_0 = 1.216 \times 10^{15}$ rad/s, $g = 2 \times 10^4$ s⁻¹, $N_0 = 1.25 \times 10^8$, $\epsilon = 1 \times 10^{-7}$, $F(t) = 0$, J 取为 1.6 倍阈值.

当外腔延时取 $\tau_1 = 3.333$ ns, $\tau_2 = 3.427$ ns 时, 图 4 给出了理论模拟得到的当 κ_{M_2} 取值为 0.02、0.07、1.1、1.3 时, 对应的时间序列、功率谱和自相关

函数. 从图 4 可知随着 κ_{M_2} 的不断增加, 延时特征的变化呈现先减弱后增强的趋势, 这与前面的实验结果相似. 另外, 通过设定 $\tau_1 = 3.333$ ns 及 $\kappa_1 = 0.045$, 图 5(其中 ρ 为延时峰的高度值) 分别给出了腔 2 取 $\tau_2 = 3.427$ ns 和 $\tau_2 = 1.720$ ns 两种情况下, κ_{M_2} 在大范围(0~4)变化时的延时特征的演变情况. 图 5(a)和(d)表明对于两种腔 2 的腔长取值, 都存在一个优化反馈强度可以对延时特征进行明显的抑制, 这与前文实验结果定性吻合. 而进一步对比图 5(a)、(d)和(c)、(f)可以清晰发现, SL 混沌系统发生延时特征优化抑制的同时, 也伴随产生了大范围的时间漂移. 而大范围的时间漂移对隐藏混沌系统的真实延时量, 帮助提高相应混沌保密通信应用的安全性同样具有重要意义.

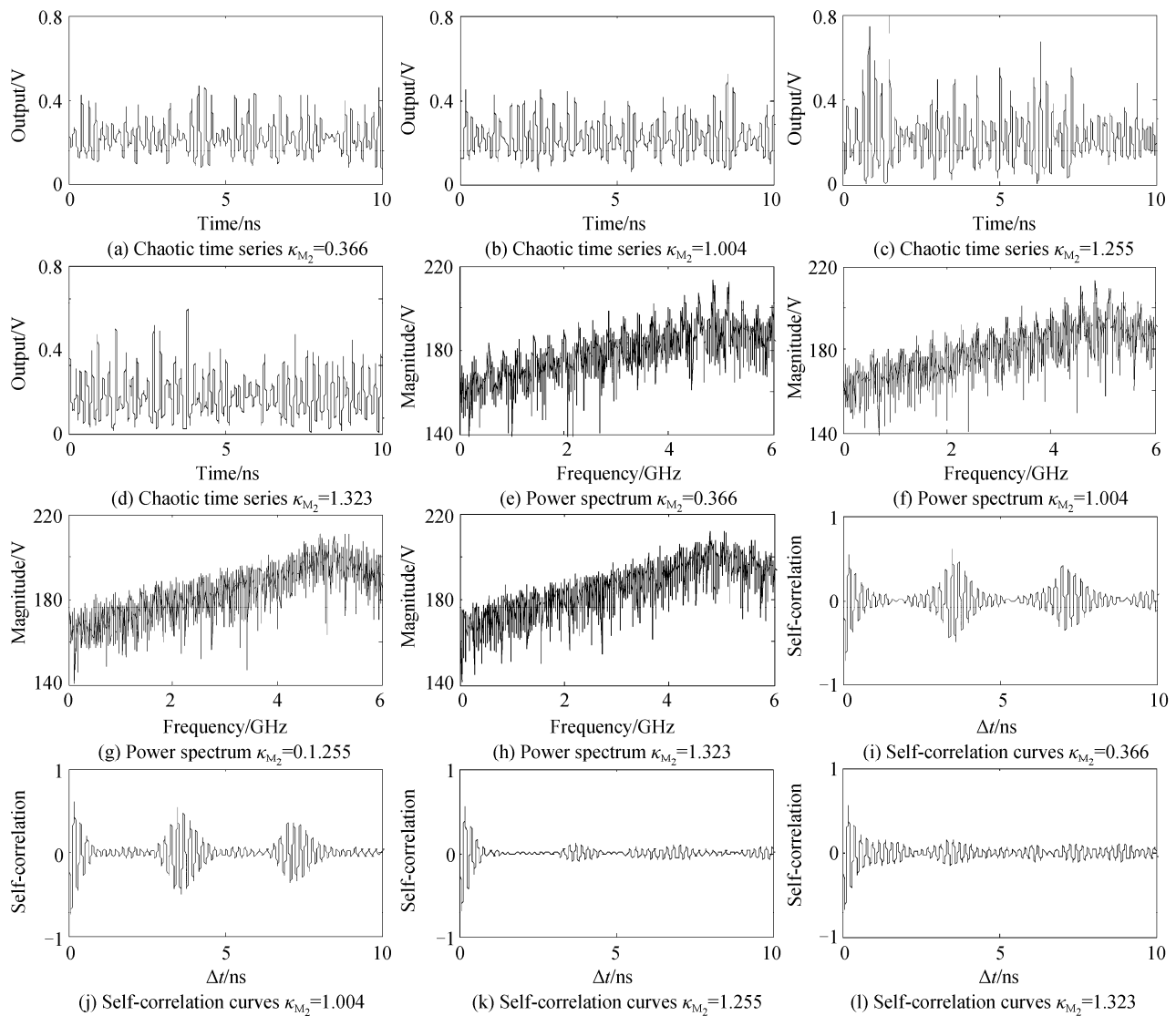


图 4 模拟得到的不同腔 2 反馈强度下的延时特征演化

Fig. 4 Simulated time delay signature evolution under different feedback strength of cavity 2

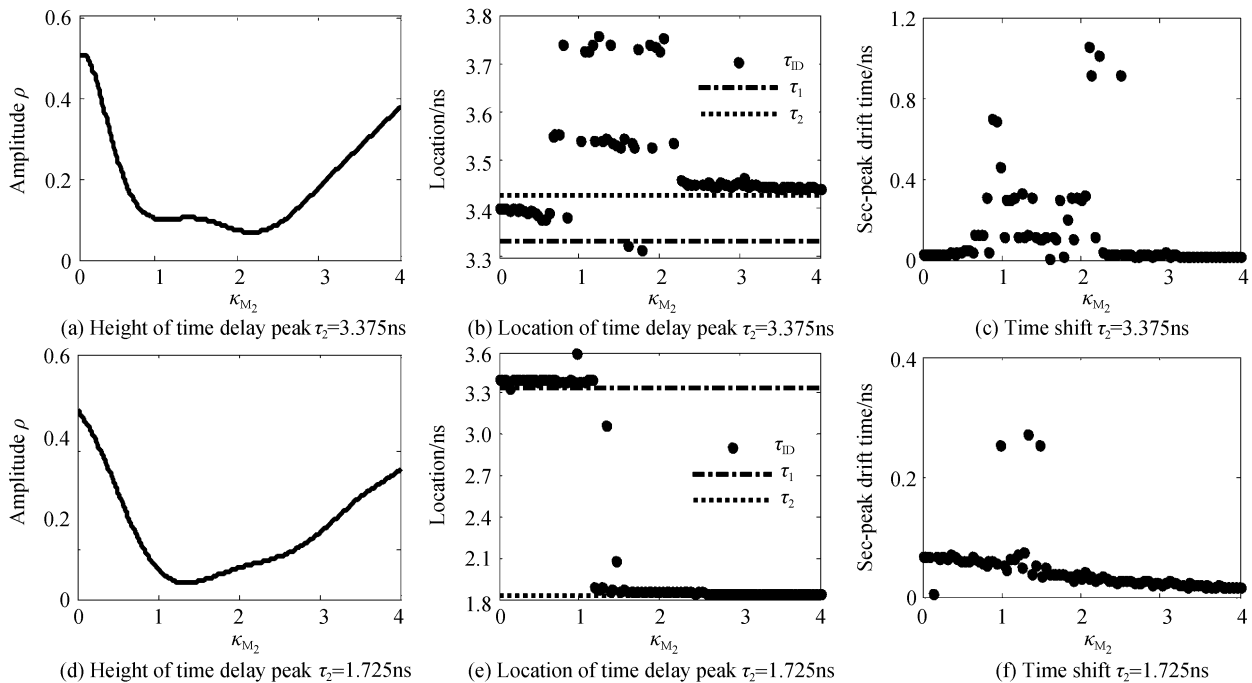


图5 模拟得到的延时特征随腔2相对反馈强度的变化关系

Fig. 5 Simulated the relationship between the time delay signature and the relative feedback strengths of cavity 2

4 结论

本文构建了由固定腔和可变腔构成的双光反馈SL混沌系统,实验研究了不同双腔长度比例和不同双腔反馈强度下,系统输出混沌的延时特征演化规律.结果表明:当可变腔的腔长与固定腔的腔长接近(但不严格相等)时,以及当可变腔的腔长约为固定腔的腔长的一半时,通过优化设置双腔的反馈强度,可以实现对输出混沌延时特征的显著抑制.同时,伴随延时特征的抑制,系统还呈现出明显的延时特征的时间漂移.进一步地,在更大参量范围内的理论模拟定性证实了相关实验结果.本文的结果有望对于发展具有更好抗攻击性,更高保密性的光混沌保密通信系统提供有益支持.

参考文献

- [1] ARGYRIS A, SYVRIDIS D, LARGER L, *et al.* Chaos-based communications at high bit rates using commercial fiber-optic links[J]. *Nature*, 2005, **437**(7066): 343-346.
- [2] LI Xiao-feng, PAN Wei, MA Dong, *et al.* Effects of spontaneous emission noise in semiconductor lasers on chaotic optical communication systems [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(10): 5094-5104.
李孝峰, 潘伟, 马冬, 等. 激光器自发辐射噪声对混沌光通信系统的影响[J]. *物理学报*, 2006, **55**(10): 5094-5104.
- [3] LIU Hui-jie, FENG Jiu-chao. Effect of system gain on optical chaotic communications systems [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(3): 1484-1490.
刘慧杰, 冯久超. 系统增益对光混沌通信系统性能影响的研究[J]. *物理学报*, 2009, **58**(3): 1484-1490.
- [4] YAN Seng-ling. Control of chaos in an external cavity delay feedback semiconductor laser via modulating the polarizing [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(11): 6878-6882.

颜森林. 外腔延时反馈半导体激光器混沌偏振可调制控制方法研究[J]. *物理学报*, 2008, **57**(11): 6878-6882.

- [5] ZHANG J Z, WANG Y C, WANG A B. Improving performance of optical fibre chaotic communication by dispersion compensation techniques [J]. *Chinese Physics*, 2008, **17**(9): 3264-3269.
- [6] FAN Li, XIA Guang-qiong, WU Zheng-mao. Chaotic parallel synchronization of optoelectronic feedback semiconductor lasers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(2): 989-994.
樊利, 夏光琼, 吴正茂. 基于光电反馈的激光混沌并联同步系统研究[J]. *物理学报*, 2009, **58**(2): 989-994.
- [7] XIA G Q, WU Z M, WU J G. Theory and simulation of dual-channel optical chaotic communication system [J]. *Optics Express*, 2005, **13**(9): 3445-3453.
- [8] LIU J, WU Z M, XIA G Q. Dual-channel chaos synchronization and communication based on unidirectionally coupled VCSELs with polarization-rotated optical feedback and polarization-rotated optical injection [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(15): 12619-12626.
- [9] VICENTE R, DAUDÉN J, COLET P, *et al.* Analysis and characterization of the hyperchaos generated by a semiconductor laser subject to a delayed feedback loop [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2005, **41**(4): 541-548.
- [10] ZHANG Xiu-juan, WANG Bin-jie, YANG Ling-zhen, *et al.* Flat broadband chaotic carrier generation and synchronization [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(5): 3203-3207.
张秀娟, 王冰洁, 杨玲珍, 等. 平坦宽带混沌激光的产生及同步[J]. *物理学报*, 2009, **58**(5): 3203-3207.
- [11] BEZRUCHKO B P, KARAVAEV A S, PONOMARENKO V I, *et al.* Reconstruction of time-delay systems from chaotic time series [J]. *Physical Review E*, 2001, **64**(5): 056216(1-6).
- [12] ORTÍN S, GUTIÉRREZ J M, PESQUERA L, *et al.* Nonlinear dynamics extraction for time-delay systems using modular neural networks synchronization and prediction [J]. *Physica A*, 2004, **351**(1): 133-141.
- [13] HEGGER R, BÜNNER M J, KANTZ H. Identifying and

- modeling delay feedback systems [J]. *Physical Review Letters*, 1998, **81**(3): 558-561.
- [14] RONTANI D, LOCQUET A, SCIAMANNA M, *et al.* Time-delay identification in a chaotic semiconductor laser with optical feedback: a dynamical point of view [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2009, **45**(7): 879-891.
- [15] LEE M W, REES P, SHORE K A, ORTIN S, *et al.* Dynamical characterisation of laser diode subject to double optical feedback for chaotic optical communications[J]. *IEE Proceedings, Optoelectronics.*, 2005, **152**(2): 97-102.
- [16] UCHIDA A, AMANO K, INOUE M, *et al.* Fast physical random bit generation with chaotic semiconductor lasers[J]. *Nature Photonics*, 2008, **2**(12): 728-732.
- [17] REIDLER I, AVIAD Y, ROSENBLUH M, *et al.* Ultrahigh-speed random number generation based on a chaotic semiconductor laser [J]. *Physical Review Letters*, 2009, **103**(2): 024102-024105.
- [18] KANTER I, AVIAD Y, REIDLER I, *et al.* An optical ultrafast random bit generator[J]. *Nature Photon*, 2010, **4**: 58-61.
- [19] RONTANI D, LOCQUET A, SCIAMANNA M, *et al.* Loss of time-delay signature in the chaotic output of a semiconductor laser with optical feedback[J]. *Optics Letters*, 2007, **32**(20): 2960-2962.
- [20] ZHAO Yan-feng. Chaos characteristics of the semiconductor laser with double external cavity optical feedback[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(9): 6058-6062.
赵严峰. 双反馈半导体激光器的混沌特性研究[J]. *物理学报*, 2009, **58**(9): 6058-6062.
- [21] WU J G, XIA G Q, WU Z M. Suppression of time delay signatures of chaotic output in a semiconductor laser with double optical feedback[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(12): 20124-20133.

Effect of External Optical Feedback Strength on Time Delay Signatures in a Semiconductor Laser with Double Optical Feedback

DING Ling¹, WU Jia-gui¹, XIA Guang-qiong^{1, 2}, SHEN Jin-ting¹, LI Neng-yao¹, WU Zheng-mao^{1, 2}

(1 School of Physics, Southwest University, Chongqing 400715, China)

(2 State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Through constructing a double optical feedback semiconductor laser chaotic system, the time delay signatures of chaos are investigated experimentally under different working conditions. The results show that, time delay signatures of chaotic output can be suppressed efficiently through adjusting the feedback strength of one cavity carefully and fixing the feedback strength of another cavity. Meantime, there is a big time shift which is the deviation between extracted delay time and real system delay time. Therefore, double optical feedback semiconductor laser chaotic system can efficiently hide the delay time signature of chaotic laser output, and also improve the performance in related application fields.

Key words: Semiconductor laser; Chaos; Time delay signatures