

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*

丁 灵 吴加贵 夏光琼 沈金亭 李能尧 吴正茂[†]

(西南大学物理学院, 重庆 400715)

(2010年5月10日收到; 2010年5月18日收到修改稿)

在一个双光反馈半导体激光混沌系统中, 固定其中一个反馈腔镜(固定腔 M_1) 的反馈延迟时间以及反馈强度, 实验研究了另一个反馈腔镜(可变腔 M_2) 的反馈延迟时间以及反馈强度对系统混沌输出的延时反馈特征的影响. 研究表明: 在可变腔 M_2 与固定腔 M_1 的反馈强度相等的条件下, 改变 M_2 的腔长, 当其腔长约等于(但不能严格等于) M_1 的腔长或者腔长的一半时, 系统将呈现较好地抑制延时反馈特征效果; 当 M_2 的腔长与 M_1 的腔长或腔长的一半近似相等时, 适当调节 M_2 的反馈强度还可对混沌输出的延时特征峰进行进一步抑制. 因此采用双光反馈半导体激光混沌系统能很好地隐藏延时参量, 从而可实现更高的安全性.

关键词: 半导体激光器, 双光反馈, 混沌输出, 延时特征

PACS: 42.55.Px, 42.65.Sf

1. 引言

随着当今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获得了极大的关注^[1-8]. 由于半导体激光器(LD)具有在光反馈、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、可产生两个以上正李雅谱诺夫指数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, 因此被认为是最好的混沌发射源之一^[9]. 在光反馈 LD 混沌保密通信系统中, 外腔反馈延迟时间常用作保密通信的密钥之一^[10]. 但是, 随着人们对延时系统分析技术的提高, 从单光反馈 LD 混沌输出中获取其外腔反馈延迟时间从而重构系统已成为可能, 这将对混沌保密通信的安全性带来极大威胁. 另一方面, 最近, 基于外腔延时反馈半导体激光器的混沌输出信号来获取超高速随机码成为研究热点^[11-13]. 在超高速随机码获取中, 外腔反馈延时

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^[11]. 因此, 如何基于纯物理的隐藏反馈延迟时间具有非常重要的意义. Rontani 等人^[14]基于相干光反馈 LD 的理论模型, 对单外腔 LD 系统中外腔反馈强度对其外腔反馈延迟时间特征的影响进行了研究, 结果表明通过选择合适的反馈强度, 外腔反馈延迟时间特征可以得到有效地抑制. 但是, 由于单外腔 LD 混沌系统输出混沌信号的维数与外腔反馈强度相关, 因此单外腔 LD 系统很难达到高维混沌输出的同时还能很好地抑制反馈延时特征峰. 而已有研究表明: 双光反馈 LD 系统产生的混沌关联维数和混沌载波的带宽均比单光反馈系统要高^[15]. 如果双光反馈 LD 系统也能够很好地隐藏外腔反馈延时特征, 那么采用双光反馈 LD 混沌系统作为信息保密通信的发射源将更具应用前景.

在本文中, 利用一个固定腔镜 M_1 和一个可变腔镜 M_2 构成一个双光反馈 LD 混沌系统, 实验观测得到可变腔 M_2 的反馈强度和反馈延迟时间取不同值时, 系统混沌输出的时间序列、功率谱, 并计算其混沌输出的自相关函数谱. 根据不同情形下自相关函数谱的特征, 得出了能较好隐藏系统的反馈延时

* 国家自然科学基金(批准号:60978003, 61078003, 11004161)和西南大学中央高校基本科研业务费专项资金(编号:XDJK2009B010)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: zmwu@swu.edu.cn

特征时对可变腔 M_2 的腔长以及反馈强度的要求.

2. 实验装置

双光反馈 LD 混沌系统的实验装置如图 1 所示. 实验系统由一个 InGaAsP/InP DFB-LD 与两个平面反射镜 M_1 和 M_2 一起构成, 其中 M_1 固定在光学平台上, M_2 安装在水平光滑导轨上从而构成一个腔长可调的反馈腔. 用精度为 ± 0.01 K 的高精度温控源 (ILX-Lightwave LDT-5412) 将 LD 工作温度控制在 20.14 $^{\circ}\text{C}$, 此时激光器的中心波长为 1549.76 nm. LD 的偏置电流由噪声小于 0.1 μA 的低噪声电源 (ILX-Lightwave LDX-3620) 提供, 整个实验过程中激光器偏置电流保持在 17.0 mA (约 1.6 倍阈值), 此时自由运行的 LD 的弛豫振荡周期 $\tau_{R0} \approx 0.2$ ns. 系统输出信号经过光纤耦合器 FC (分光比为 20:80) 后, 其中 20% 的光进入到精度为 15 pm 的光谱分析仪 OSA (ANDO 6317C), 另外 80% 的光经过带宽为 12 GHz 的光电探测器 PD 转换后输入到采样率为 20 GSa/s, 带宽为 6 GHz 的数字示波器 DO (Agilent 54855A). 光隔离器 OI 用来防止光纤接口处的反馈光反馈回 LD 中. 两个中性滤波器 $\text{NDF}_1, \text{NDF}_2$ 分别改变各反馈腔的反馈强度.

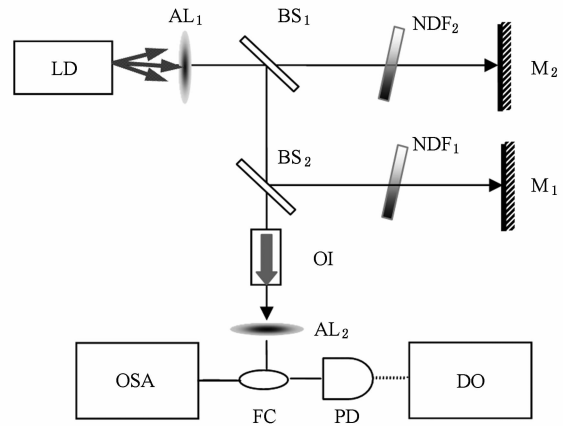


图 1 双光反馈 LD 混沌系统实验装置图 (LD 为半导体激光器, AL 为准直透镜, BS 为分束器, OI 为光隔离器, NDF 为中性滤波器, M 为平面镜, FC 为光纤耦合器, PD 为光电转换器, DO 为数字示波器, OSA 为光谱分析仪)

3. 实验结果和讨论

分析光反馈混沌系统的延迟时间特征的方法有很多, 比如自相关函数、互信息、填充因子分析、局部线性模型等^[16]. 本文采用自相关函数法进行分析, 即通过混沌时间序列的自相关函数谱来获得外腔反馈延迟时间的信息. 自相关函数定义为^[17]

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

式中 $P(t)$ 代表混沌输出时间序列, Δt 代表移动时间, $\langle \rangle$ 表示对时间的平均.

3.1. 可变腔 M_2 的延迟反馈时间对混沌输出延时特征的影响

在整个实验过程中, 固定腔 M_1 的腔长反馈时间为 $\tau_{\text{cav}1} = 3.427$ ns. 实验中 M_1 (M_2) 反馈强度的相对大小通过挡住 M_2 (M_1) 后在图 1 中的 T 位置测得的光功率来标定. 当只有 M_1 存在时或者只有 M_2 存在时, 调节 NDF_1 和 NDF_2 , 在 T 位置测得的功率分别为 $P_{\text{cav}1} = 30.35$ μW , $P_{\text{cav}2} = 98.16$ μW , 此时从光谱分析仪可以看出系统处于相同的状态, 即此时两反馈腔实际反馈回 LD 的强度是相等的. 为了便于比较, 我们把 M_2 的反馈强度对 M_1 的反馈强度进行归一化处理.

图 2 为单腔 M_1 (A)、单腔 M_2 (B)、双腔 (C) 光

反馈 LD 输出的时间序列, 功率谱以及自相关函数谱, M_2 的延迟反馈时间 $\tau_{\text{cav}2} = 3.333$ ns. 从图中可以看出: 单腔反馈和双腔反馈都使系统处于混沌态输出, 但是单腔反馈输出的功率谱 (A2, B2), 以及由输出时间序列计算得到的自相关函数谱都具有明显的反馈延时特征峰 (A3, B3), 从而导致其外腔反馈延时参量易于获取, 这将使系统的安全性受到威胁. 对于双反馈混沌系统其功率谱以及自相关函数谱应该包含两个反馈延迟时间信息, 但在图 2 (C2, C3) 中却无法准确获得这两个反馈腔的反馈延迟时间信息. 因此, 采用双光反馈有可能实现对反馈延迟时间特征的较好隐藏.

在实验中, 通过大范围改变 M_2 的腔长, 观测 M_2 的延迟时间在 1.1 — 4.1 ns 范围内取不同值时系统输出的时间序列, 并计算输出时间序列的自相关函数, 得到自相关函数谱的反馈延时特征峰值随 M_2

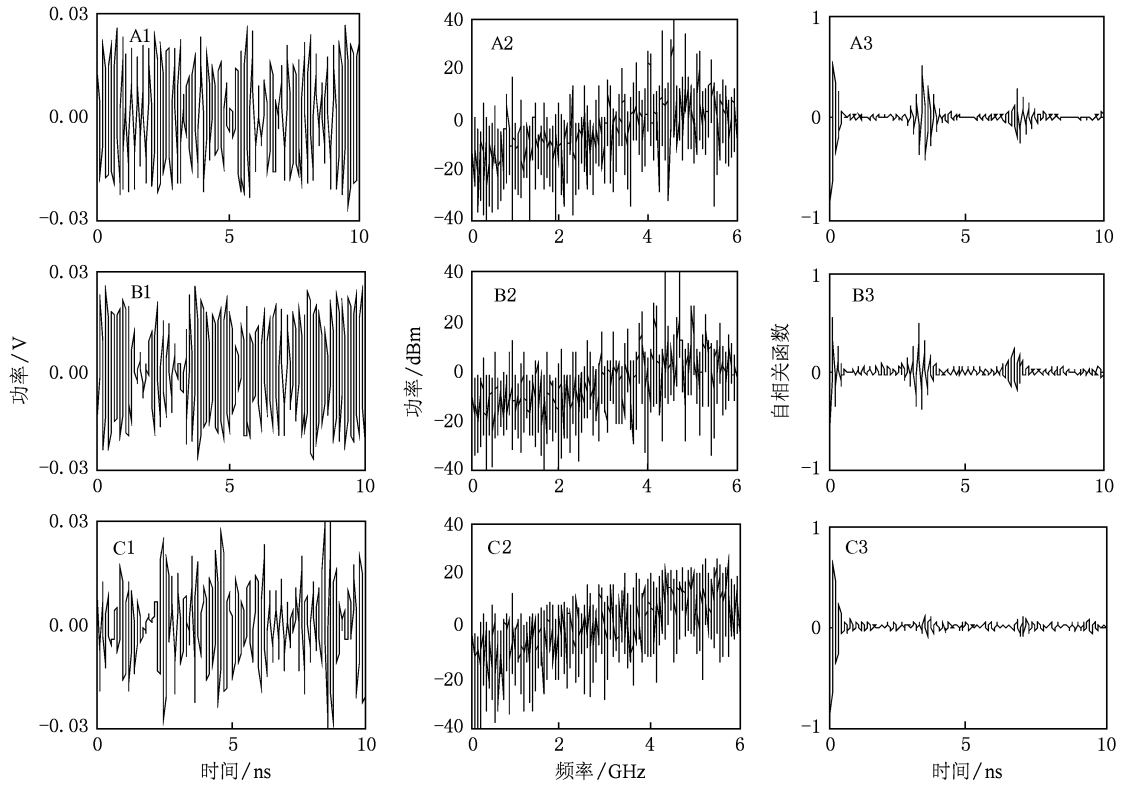


图2 系统输出的时间序列(A1—C1)、功率谱(A2—C2)以及自相关函数(A3—C3)(A,B,C分别对应单腔 M_1 、单腔 M_2 以及双腔反馈)

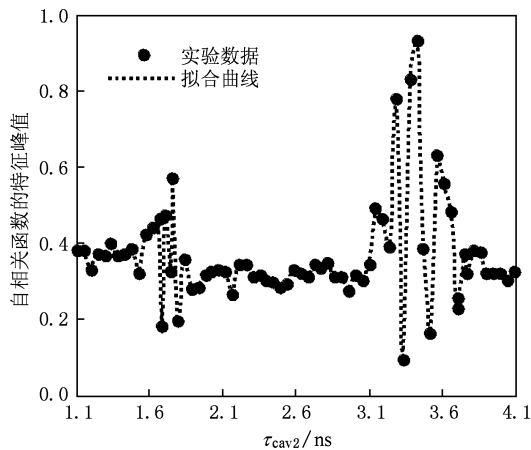


图3 自相关函数的特征峰值随 τ_{cav2} 的变化关系

的延迟反馈时间 τ_{cav2} 的变化关系,如图3所示.从图中可以看出:延时反馈特征峰在 M_2 的腔长严格等于 M_1 的腔长或者腔长的一半时,延迟反馈特征峰非常明显,在其附近区域变化非常剧烈.因此在这两个区域(第一区($\tau_{cav2} \approx \tau_{cav1}$)和第二区($\tau_{cav2} \approx \tau_{cav1}/2$))内通过高精度地调节 M_2 的延迟反馈时间可以得到很好的延迟反馈特征隐藏.

图4、图5分别给出了第一区和第二区范围内 M_2 的反馈时间取不同值时得到的混沌输出时间序列、功率谱分布以及时间序列的自相关函数谱.在第一区,当两个腔的反馈延迟时间近似相等时其反馈特征峰被很好地隐藏(见图4(C));而对于第二区,虽然总是有一个与其中一个反馈延迟时间对应的特征峰存在,但另外一个反馈延迟时间所对应的特征峰能被很好抑制.因此,窃听者无法辨别该系统是双外腔反馈还是单外腔反馈,导致其难于重构系统^[17].

3.2. 可变腔 M_2 的反馈强度对混沌系统延时特征的影响

固定 M_2 的反馈延迟时间,进一步研究 M_2 的反馈强度对混沌系统延迟特征的影响.图6分别给出了 $\tau_{cav2} = 3.375 \text{ ns}$ ($\approx \tau_{cav1}$),和 $\tau_{cav2} = 1.725 \text{ ns}$ ($\approx \tau_{cav1}/2$)时,自相关函数的反馈延时特征峰随 M_2 的反馈强度变化曲线.随着 M_2 反馈强度的增加,自相关函数的反馈特征峰的变化规律在两种情形下是相似的.即变化趋势都是先减小后增加,存在一个优化的反馈强度,可将外腔反馈延时特征峰隐藏得很好.

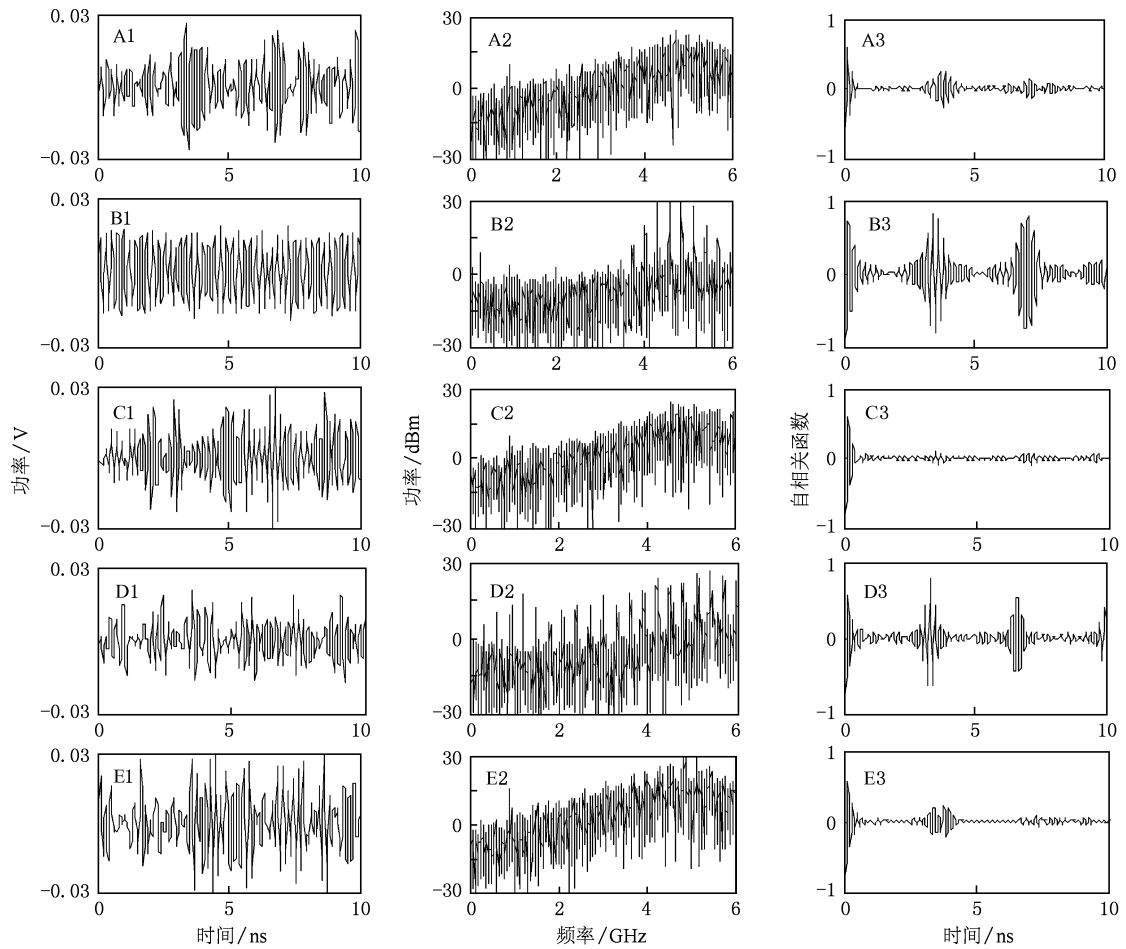


图4 τ_{cav2} 在第一区内取不同值时,系统输出的时间序列(A1—E1)、功率谱(A2—E2)以及自相关函数谱(A3—E3). (A—E 分别对应 $\tau_{cav2} = 3.527$ ns, 3.427 ns, 3.333 ns, 3.193 ns, 3.100 ns)

4. 结 论

针对一个由固定腔 M_1 和可变腔 M_2 构成的双光反馈 LD 混沌系统,实验研究了可变腔 M_2 的反馈时间以及反馈强度对系统混沌输出的延时反馈特征的影响.通过实验获取的混沌输出时间序列和功率谱分布、以及计算所得的时间序列对应的自相关

函数谱等信息,得出了要能很好隐藏外腔反馈延时特征则需要:1)控制可变腔 M_2 的腔长,让其约等于(但不能严格等于) M_1 的腔长或者腔长的一半;2)优化选取反馈强度的大小.总之,通过精细调节可变腔 M_2 的腔长和反馈强度,可以使双光反馈 LD 混沌系统的外腔延时反馈特征得到很好的隐藏,使窃密者很难获得延时反馈时间,从而提高混沌保密通信的安全性.

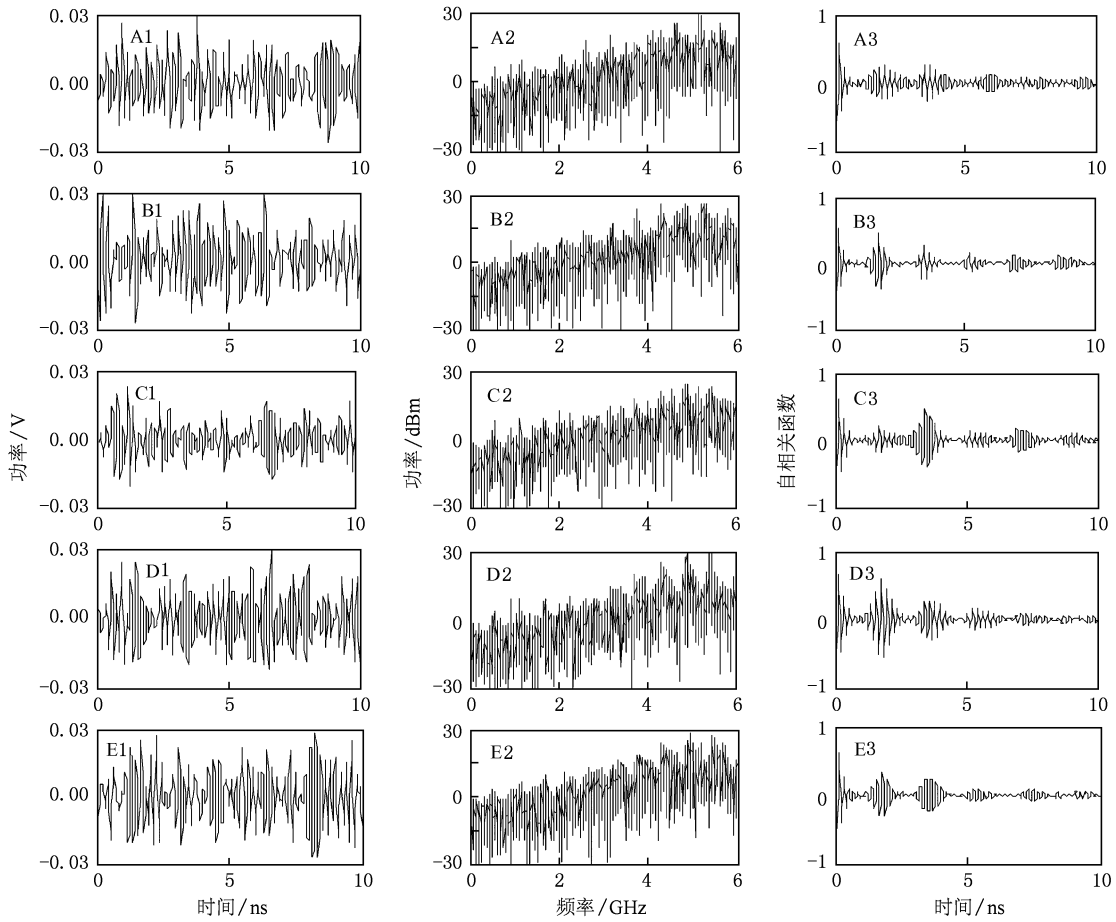


图5 τ_{cav2} 在第二区内取不同值时,系统输出时间序列 (A1—E1)、功率谱 (A2—E2) 以及自相关函数谱 (C3—E3) (A—E 分别对应 $\tau_{cav2} = 1.760$ ns, 1.713 ns, 1.667 ns, 1.573 ns, 1.527 ns)

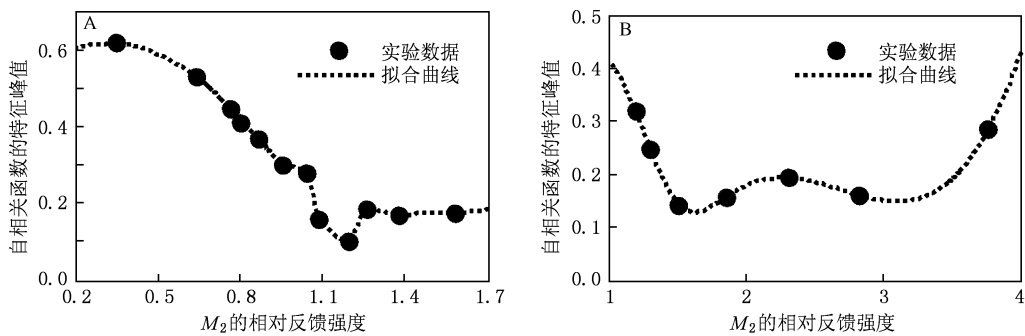


图6 双光反馈 LD 系统输出时间序列的自相关函数延时特征峰值随 M_2 的相对反馈强度的变化 (A, B 分别对应 $\tau_{cav2} = 3.375$ ns 和 $\tau_{cav2} = 1.725$ ns)

[1] Argyris A, Syvridis D, Larger L, Annovazzi-Lodi V, Colet P, García-Ojalvo J, Mirasso C R, Pesquera L, Shore K A 2005 *Nature* **437** 343

[2] Li X F, Pan W, Ma D, Luo B, Zhang W L, Xiong Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5094 (in Chinese) [李孝峰、潘伟、马冬、罗斌、张伟利、熊悦 2006 物理学报 **55** 5094]

- [3] Liu H J, Feng J C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1484 (in Chinese) [刘慧杰、冯久超 2009 物理学报 **58** 1484]
- [4] Yan S L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6878 (in Chinese) [颜森林 2008 物理学报 **57** 6878]
- [5] Zhang J Z, Wang Y C, Wang A B 2008 *Chin. Phys. B* **17** 3264
- [6] Fan L, Xia G Q, Wu Z M 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 989 (in Chinese) [樊利、夏光琼、吴正茂 2009 物理学报 **58** 989]
- [7] Xia G Q, Wu Z M, Wu J G 2005 *Opt. Express* **13** 3445
- [8] Liu J, Wu Z M, Xia G Q 2009 *Opt. Express* **17** 12619
- [9] Vicente R, Daudén J, Colet P, Toral R 2005 *IEEE J. Quantum Electron.* **41** 541
- [10] Zhang X J, Wang B J, Yang L Z, Wang A B, Guo D M, Wang Y C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3203 (in Chinese) [张秀娟、王冰洁、杨玲珍、王安帮、郭东明、王云才 2009 物理学报 **58** 3203]
- [11] Uchida A, Amano K, Inoue M, Hirano k, Naito S, Someya H, Oowada I, Kurashige T, Shiki M, Yoshimori S, Yoshimura K, Davis P 2008 *Nature Photon.* **2** 728
- [12] Reidler I, Aviad Y, Rosenbluh M, Kanter I 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 024102
- [13] Kanter I, Aviad Y, Reidler I, Cohen E, Rosenbluh M 2010 *Nature Photon.* **4** 58
- [14] Rontani D, Locquet A, Sciamanna M, Citrin D S 2007 *Opt. Lett.* **32** 2960
- [15] Zhao Y F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6058 (in Chinese) [赵严峰 2009 物理学报 **58** 6058]
- [16] Ortín S, Gutiérrez J M, Pesquera L, Vasquez H 2005 *Physica A* **351** 133
- [17] Wu J G, Xia G Q, Wu Z M 2009 *Opt. Express* **17** 20124

Suppression of time delay feedback signatures in a semiconductor laser with double optical feedback*

Ding Ling Wu Jia-Gui Xia Guang-Qiong Shen Jin-Ting Li Neng-Yao Wu Zheng-Mao[†]

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

(Received 10 May 2010; revised manuscript received 18 May 2010)

Abstract

In a double optical feedback semiconductor laser chaotic system, by fixing the feedback time and feedback strength of the one mirror (named as fixed cavity M_1), the influences of the feedback time and feedback strength of the other mirror (named as tunable cavity M_2) on the time delay feedback signatures of the chaotic system have been investigated experimentally. The results show that, for the case of the two cavities with identical feedback strengths, time delay feedback signatures of chaotic output can be suppressed efficiently when the cavity length of M_2 is approximately equal (but can not exactly equal) to the cavity length of M_1 (or half of the cavity length of M_1). Fixing the length of M_2 to approximately equal to the cavity length of M_1 (or half of the cavity length of M_1), the time delay feedback signature suppression can be further improved through adjusting the feedback strength of M_2 carefully. Therefore, adopting a double optical feedback semiconductor laser chaotic system can make the system behave with higher security due to the efficient hiding of delay feedback parameter of the system.

Keywords: semiconductor laser, double optical feedback, chaotic output, delay time signatures

PACS: 42.55. Px, 42.65. Sf

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60978003, 61078003, 11004161) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No. XDJK2009B010).

[†] Corresponding author. E-mail: zmwu@swu.edu.cn