

偏振旋转光反馈半导体激光混沌系统时延特征的隐藏*

操良平¹, 董晓云², 王 风¹, 梁兴连¹

(1. 重庆师范大学 教育科学学院, 重庆 401331; 2. 重庆师范大学 初等教育学院, 重庆 400700)

摘要: 半导体激光混沌系统的时延特征为混沌通信攻击者重构非法接收机提供了线索, 隐藏系统输出的时延特征能够提高通信的安全性。基于单模半导体激光器的理论模型, 构建了偏振旋转光反馈半导体激光系统的动力学方程, 利用自相关函数及时延特征峰相对高度, 数值研究了该系统输出的时延特征。结果表明, 在激光器合适的参数条件下, 波片快轴方向在 30°和 60°附近一定范围内, 反馈系数较小及偏置电流较大时, 时延特征容易被隐藏。

关键词: 时延特征; 隐藏; 偏振旋转光反馈; 半导体激光器; 混沌激光

中图分类号: TN248.4

文献标志码: A

文章编号: 1672-6693(2014)03-0087-04

自 1990 年 Pecora 和 Carroll 首次提出混沌同步方案以来^[1], 混沌激光由于在保密通信^[2]、快速随机码产生^[3]等领域潜在的应用价值而受到极大关注。因为高维混沌激光比较容易通过在半导体激光器(Semiconductor laser, SL)中引入光反馈、光电反馈等方法而获得, 因而外反馈 SL 混沌系统被认为是最好的混沌发射源之一^[4]。然而, 在外反馈 SL 系统的混沌输出中通常保留着明显的时间延迟特征^[5-6]。在高速随机码发生器中, 时延特征导致随机码具有周期回归性, 它的统计性能将受到不可避免的影响^[7]; 对于混沌保密通信, 外反馈延迟时间常用作密钥之一, 时延特征为攻击者重构非法接收机提供了线索^[8], 威胁通信的安全。因此, 隐藏 SL 混沌输出的时延特征变得至关重要。针对这一问题, 一些抑制或隐藏时延特征的方案被相继提出。文献^[9]指出, 单光反馈 SL 在适当反馈强度下, 通过改变偏置电流使激光器的弛豫振荡周期接近于外腔反馈延迟时间时, 外腔的时延特征能够被完全抑制; 文献^[10-11]理论和实验研究了双光反馈 SL 系统, 发现在两个外腔反馈强度相等的条件下, 当一个腔长接近于另一个腔长或腔长的一半时, 外腔引起的时延特征可以被抑制; 文献^[12]对光电振荡器特性的研究表明, 当调制器的直流偏置相移为 0 时, 可以有效地抑制系统输出的时延特征。在大多数此类研究报道中, 有效抑制或隐藏时延特征所能选择的参数范围较为狭窄, 限制了实际应用。本文采用偏振旋转光反馈方法, 使相干光反馈和非相干光反馈同时作用于 SL, 在适当的参数条件下, 能够在较大的参数范围实现对时延特征的隐藏。

1 理论模型

在单光反馈 SL 混沌系统的反馈光路中插入一个四分之一波片, 即构成偏振旋转光反馈 SL 混沌系统(图 1)。SL 发出的激光经平面镜 M 和四分之一波片反馈回 SL 时, 它的偏振方向发生了一定角度旋转。假设 SL 发射线偏振光的偏振方向沿水平方向, 波片快轴与该方向成 θ 角, 则反馈光的水平偏振分量和垂直偏振分量分别为光强的 $\cos^2\theta$ 倍和 $\sin^2\theta$ 倍。其中, 水平偏振分量对 SL 的作用属相干光反馈, 而垂直偏振分量属非相干反馈。根据单模 SL 的理论模型^[13-14], 并考虑光反馈的作用, 偏振旋转光反馈 SL 系统的动力学状态可用下列方程组描述:



图 1 偏振旋转光反馈 SL 混沌系统示意图

$$\frac{dS(t)}{dt} = (FG - \frac{1}{\tau_p})S(t) + 2 \frac{k}{\tau_{in}} \sqrt{S(t)S(t-\tau)} \cos^2\theta \cos[\zeta(t)] \quad (1)$$

* 收稿日期: 2013-10-30 修回日期: 2013-12-09 网络出版时间: 2014-5-8 14:38
资助项目: 国家自然科学基金 (No. 11204248); 重庆市教委科学技术研究基金 (No. KJ130621)
作者简介: 操良平, 男, 副教授, 研究方向为光通信, E-mail: clp1999@163.com
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20140508.1438.020.html>

$$\frac{dN(t)}{dt} = [\mu N_{th} - N(t)]/\tau_e - G[S(t) + kS(t-\tau)\sin^2\theta] \quad (2)$$

$$\frac{d\Phi(t)}{dt} = \frac{1}{2}\alpha(\Gamma G - \frac{1}{\tau_p}) - \frac{k}{\tau_{in}}\sqrt{\frac{S(t-\tau)\cos^2\theta}{S(t)}}\sin[\zeta(t)] \quad (3)$$

$$\zeta(t) = \omega_0\tau + \Phi(t) - \Phi(t-\tau) \quad (4)$$

$$G = \frac{g_N[N(t) - N_0]}{1 + \epsilon S(t)} \quad (5)$$

式中 S 和 N 分别是激光腔内光子数和载流子数, μ 为归一化偏置电流, g_N 为微分增益系数, N_0 为透明载流子数, k 为光反馈系数, ω_0 为激光器自由运行时的角频率, Φ 为相位, τ_p 为光子寿命, τ_e 为载流子寿命, τ_{in} 为光在激光器腔内的往返时间, τ 为光在外腔的往返时间, Γ 为限制因子, ϵ 为增益饱和系数, α 为线宽增强因子。

常用于分析光反馈混沌系统时延特性的方法有自相关函数、填充因子分析、互信息、局部线性模型等^[15]。本文采用混沌时间序列的自相关函数来分析外腔反馈的时延特征。自相关函数的定义为

$$C = \frac{\langle [I(t+\Delta t) - \langle I(t+\Delta t) \rangle][I(t) - \langle I(t) \rangle] \rangle}{\sqrt{\langle [I(t+\Delta t) - \langle I(t+\Delta t) \rangle]^2 \rangle \langle [I(t) - \langle I(t) \rangle]^2 \rangle}} \quad (6)$$

式中 I 为 SL 输出的强度, Δt 代表移动的时间, $\langle \cdot \rangle$ 表示对时间求平均。

在自相关函数中, 当实际反馈延迟时间 t_d 附近时延特征峰高度小于或等于周围其他各峰的高度时, 时延特征峰就会被淹没于其他峰之中, 时延特征就不能被识别。因此, 可用时延特征峰相对高度来判断它是否被隐藏。时延特征峰相对高度定义为

$$\Delta H = \max |C(\Delta t)|_{\Delta t \in W1(t_d)} - \max |C(\Delta t)|_{\Delta t \in W2(t_d)} \quad (7)$$

其中 $W1(t_d)$ 表示求时延特征峰的区间 $[(1-m)t_d, (1+m)t_d]$; $W2(t_d)$ 表示 $W1(t_d)$ 之外求其他峰最大值的区间 $[(1-3m)t_d, (1-m)t_d]$ 和 $[(1+m)t_d, (1+3m)t_d]$; m 为失配系数, 在本文中取 10%。(7) 式第一项是时延特征峰高度, 第二项是特征峰区间外左右两侧其他峰的最大值。因此, 当 $\Delta H \leq 0$ 时, SL 输出的时延特征将被隐藏。

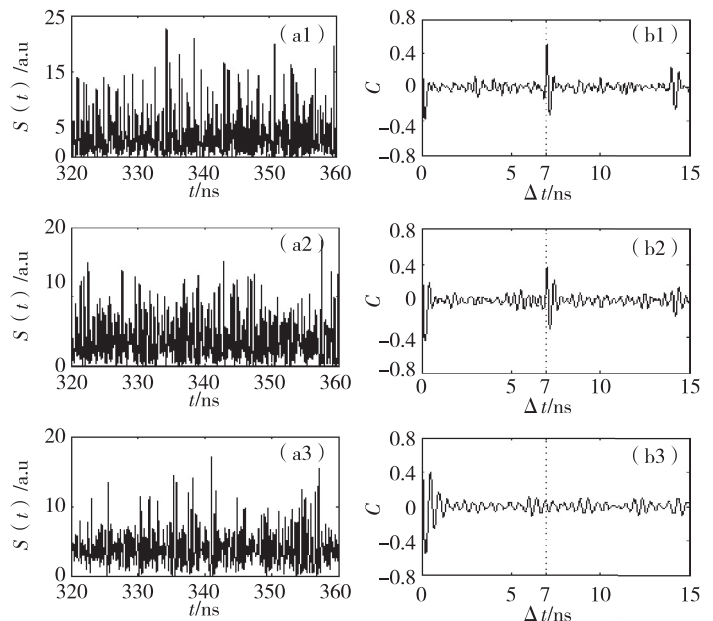
2 结果与分析

运用四阶龙格-库塔方法对方程(1)~(5)进行数值求解, 除特别说明外, 所用参数为: $g_N = 1 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$, $N_0 = 1.36 \times 10^8$, $\alpha = 4.5$, $\tau_p = 2 \text{ ps}$, $\tau_e = 2 \text{ ns}$, $\tau_{in} = 8 \text{ ps}$, $\Gamma = 0.55$, $\epsilon = 7.5 \times 10^{-8}$, $\beta = 1 \times 10^{-5}$, $\tau = 7 \text{ ns}$ 。

2.1 反馈系数对时延特征的影响

SL 的输出状态会随光反馈强度的变化而改变, 同时也会使输出所携带的时延特征受到影响。图 2 是 $\mu = 1.6$, $\tau = 7 \text{ ns}$, $\theta = 28^\circ$ 情况下, 反馈系数 k 分别为 0.2 (第一行)、0.15 (第二行)、0.07 (第三行) 时 SL 输出的时间序列和自相关函数。由图 2 (a1)~(a3) 可知, 在不同的反馈系数条件下, SL 的输出均处于动力学混沌态。由图 2 (b1) 可以看出, 当 $k = 0.2$ 时, SL 输出的自相关函数在 $\tau = 7 \text{ ns}$ 和 2τ 处存在较强的特征峰, $\Delta H = 0.413$, 时延特征不能被隐藏; 当 k 减小为 0.15 时, 时延特征峰仍存在, 但强度减弱 (图 2 (b2)), $\Delta H = 0.242$; 当 k 进一步减小为 0.07 时, 在 $\tau = 7 \text{ ns}$ 处, 特征峰已被淹没于周围其他峰之中, $\Delta H = -0.017$, 时延特征得到有效隐藏 (图 2 (b3))。

为了更好地了解不同 k 和 θ 对系统时延特征的影响, 这里采用一种直观方法来描述时延特征所处的两种状态——隐藏和不能隐藏。当 $\Delta H \leq 0$ 时, 时延特征被隐藏, 就用“黑色”表示; 当 $\Delta H >$



$\mu = 1.6$, $\tau = 7 \text{ ns}$, $\theta = 28^\circ$; 第 1~3 行, k 分别为 0.2、0.15 和 0.07

图 2 不同反馈强度时 SL 输出的时间序列和自相关函数

0 时, 时延特征不能被隐藏, 就用“白色”表示。

图 3 给出了 $\mu=1.6, \tau=7 \text{ ns}$ 时, 时延特征状态与 k 和 θ 间的关系。由图 3 可知, 当 $k \geq 0.175$ 时, 无论 θ 为多大, 全部为白色区域; 当 $k < 0.175$ 时, 在 θ 为 $18^\circ \sim 42^\circ$ 及 $48^\circ \sim 72^\circ$ 区间, 随 k 的减小, 黑色区域逐渐增大。因此, 当 θ 在 $18^\circ \sim 42^\circ$ 及 $48^\circ \sim 72^\circ$ 区间内, 反馈系数 k 较小时, SL 输出的时延特征越容易被隐藏。

2.2 偏置电流对时延特征的影响

在不同的偏置电流下, SL 输出的动力学状态会发生较大变化, 也会对时延特征产生较大影响。图 4 是 $k=0.2, \tau=7 \text{ ns}, \theta=60^\circ$ 情况下, 不同偏置电流时 SL 输出的时间序列和自相关函数。由图 4 可知, 当 $\mu=2$ (第一行) 时, 在 $\tau=7 \text{ ns}$ 处有较强的特征峰, $\Delta H=0.162$, 时延特征不能被隐藏; 当 μ 增大为 3 (第二行) 时, 时延特征峰强度减小, $\Delta H=0.083$, 时延特征仍不能被隐藏; 当 μ 进一步增大到 4.5 (第三行) 时, 时延特征峰被淹没在周围其他峰之中, 此时 $\Delta H=-0.020$, 时延特征被完全隐藏。

图 5 给出了 $k=0.20, \tau=7 \text{ ns}$ 时, SL 输出的时延特征状态随 μ 和 θ 的变化关系。由图 5 可以看出, 黑色主要集中在 $\mu > 3, \theta$ 为 $22^\circ \sim 38^\circ$ 和 $52^\circ \sim 68^\circ$ 所在的区域。因此, 当 θ 在 $22^\circ \sim 38^\circ$ 和 $52^\circ \sim 68^\circ$ 区间内, 偏置电流较大时, SL 输出的时延特征容易被隐藏。

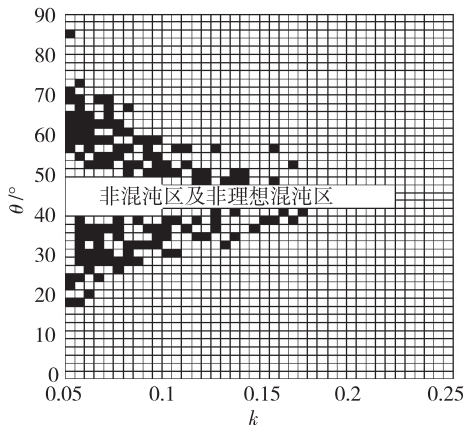


图3 时延特征状态与 k 和 θ 的关系

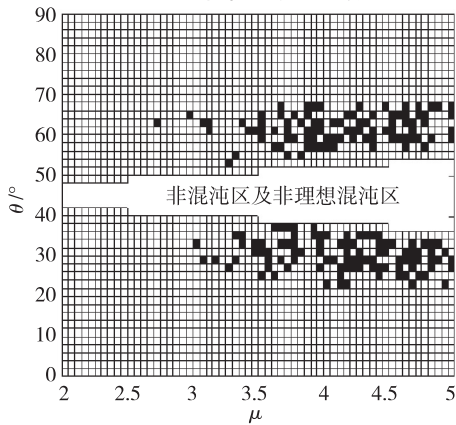
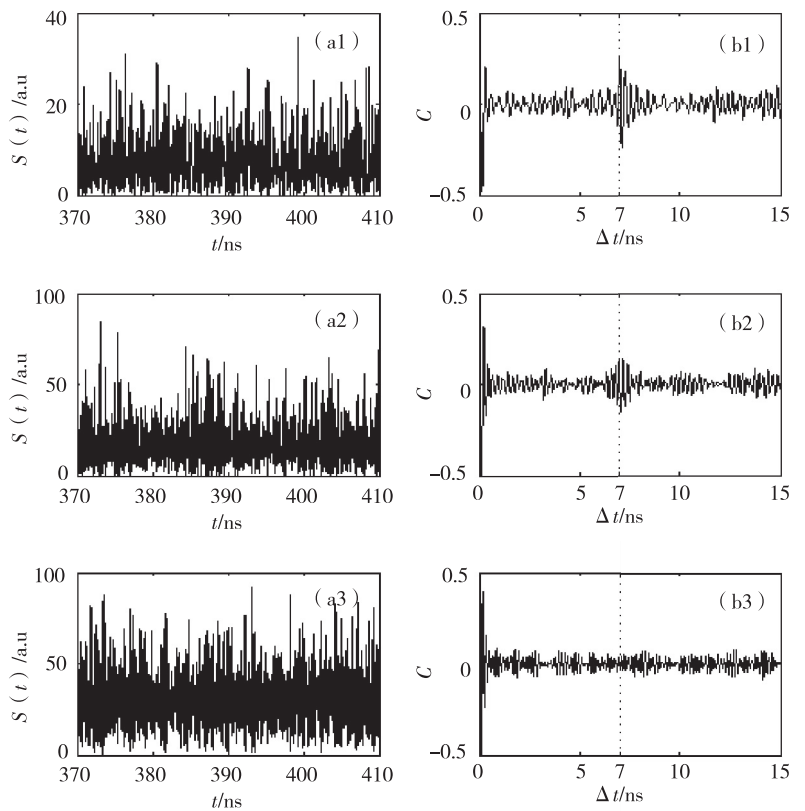


图5 时延特征状态与 μ 和 θ 的关系



$k=0.20, \tau=7 \text{ ns}, \theta=60^\circ$; 第1~3行, μ 分别为2、3和4.5

图4 不同偏置电流时的时间序列和自相关函数

3 结论

本文构建了偏振旋转光反馈 SL 混沌发射源, 利用自相关函数及时延特征峰相对高度, 数值研究了时延特征状态与 k, μ 和 θ 间的变化关系。结果表明, 当 $\mu=1.6, \tau=7 \text{ ns}$ 时, θ 在 $18^\circ \sim 42^\circ$ 及 $48^\circ \sim 72^\circ$ 区间内, 反馈系数较小时, 时延特征容易被隐藏; 当 $k=0.20, \tau=7 \text{ ns}$ 时, θ 在 $22^\circ \sim 38^\circ$ 和 $52^\circ \sim 68^\circ$ 区间内, 偏置电流较大时, 时延特征容易被隐藏。

参考文献:

- [1] Pecora L M, Carroll T L. Synchronization in chaotic systems[J]. Phys Rev Lett, 1990, 64(8): 821-824.
- [2] Argyris A, Syvridis D, Larger L, et al. Chaos-based communications at high bit rates using commercial Fibre-optic links[J]. Nature, 2005, 438: 343-346.
- [3] Kanter I, Aviad Y, Reidler I, et al. An optical ultrafast random bit generator[J]. Nature Photon, 2010, 4: 58 - 61.
- [4] Vicente R, Dauden J, Colet P, 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.
- [5] Ohtsubo J. Chaos synchronization and chaotic signal making in semiconductor laser with optical feedback[J]. IEEE J Quantum Electron, 2002, 38(9): 1141-1154.
- [6] 操良平, 董晓云, 梁兴连, 等. 基于双光延迟反馈装置的双向混沌保密通信系统[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2013, 35(3): 161-167.
- Cao L P, Dong X Y, Liang X L, et al. A bidirectional chaotic secure communication system based on optoelectronic delay devices with double feedback[J]. Journal of Southwest University: Natural Science Edition, 2013, 35(3): 161-167.
- [7] Uchida A, Amano K, Inoue M, et al. Fast physical random bit generation with chaotic semiconductor lasers[J]. Nature Photon, 2008, 2: 728-732.
- [8] Zhao Q C, Wang Y C, Wang A B. Eavesdropping in chaotic optical communication using the feedback length of an external-cavity laser as a key[J]. Appl Opt, 2009, 48(18): 3515-3520.
- [9] 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]. Opt Lett, 2007, 32(20): 2960-2962.
- [10] 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(22): 20124-20133.
- [11] 丁灵, 吴加贵, 夏光琼, 等. 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[J]. 物理学报, 2011, 60(1): 014210-1—014210-6.
- Ding L, Wu J G, Xia G Q, et al. Suppression of time delay signatures in a semiconductor laser with double optical feedback[J]. Acta Phys Sin, 2011, 60(1): 014210-1-014210-6.
- [12] 李凯, 王安帮, 赵彤, 等. 光电振荡器产生宽带混沌光的时延特征分析[J]. 物理学报, 2013, 62(14): 144207-1-144207-8.
- Li K, Wang A B, Zhao T, et al. Analysis of delay time signature in broadband chaos generated by an optoelectronic oscillator[J]. Acta Phys Sin, 2013, 62(14): 144207-1-144207-8.
- [13] Langley L N, Shore K A. The effect of external optical feedback on timing jitter in modulated laser diodes[J]. J Lightwave Technol, 1993, 11(3): 434-441.
- [14] 操良平, 夏光琼, 邓涛, 等. 基于非相干光反馈半导体激光器的双向混沌通信研究[J]. 物理学报, 2010, 59(8): 5541-5546.
- Cao L P, Xia G Q, Deng T, et al. Bidirectional chaos communication based on semiconductor laser with incoherent optical feedback[J]. Acta Phys Sin, 2010, 59(8): 5541-5546.
- [15] Ortin S, Gutierrez J M, Pesquera L. Nonlinear dynamics extraction for time-delay systems using modular neural networks synchronization and prediction[J]. Physica A, 2005, 351(1): 133-141.

Concealment of Time Delay Feature in the Polarization-rotated Optical Feedback Semiconductor Laser Chaotic System

CAO Liang-ping¹, DONG Xiao-yun², WANG Feng¹, LIANG Xing-lian¹

(1. College of Education Science, Chongqing Normal University, Chongqing 401331;

2. Elementary Education College, Chongqing Normal University, Chongqing 400700, China)

Abstract: Time delay signature of semiconductor laser chaotic system can make it possible for the communication attacker to rebuild the illegal receiver. Concealing the time delay signature can enhance the safety of the communication system. Based on the theory model of single-mode semiconductor laser, the kinetic equation is established describing laser chaotic system with polarization-rotated optical feedback. Time delay signature of output in this system is investigated numerically by autocorrelation function and the relative height of time-delay peaks. The results show that when parameters of laser are suitable and the fast axis of wave plate is in a certain range near 30° and 60° , smaller feedback coefficient and higher bias current are beneficial to hide the time delay signature.

Key words: time delay feature; concealment; polarization-rotated optical feedback; semiconductor lasers; chaotic laser