

基于外光注入互耦合垂直腔面发射激光器的混沌随机特性研究

刘庆喜 潘炜 张力月 李念强 阎娟

Chaotic randomness of mutually coupled vertical-cavity surface-emitting laser by optical injection

Liu Qing-Xi Pan Wei Zhang Li-Yue Li Nian-Qiang Yan Juan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 024209 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.024209

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024209>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I2>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

互注入垂直腔表面发射激光器的多次偏振转换特性研究

Multiple polarization switching in mutually coupled vertical-cavity surface emitting lasers

物理学报.2015, 64(2): 024208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024208>

基于次谐波调制光注入半导体激光器获取窄线宽微波信号的实验研究

Acquiring narrow linewidth microwave signals based on an optical injection semiconductor laser under subharmonic microwave modulation

物理学报.2014, 63(24): 244204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.244204>

多波长红外激光二极管峰值光谱热漂移研究

Research on spectral peaks thermal-drifting in multi-wavelength infrared laser diode

物理学报.2014, 63(15): 154206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.154206>

短外腔偏振旋转光反馈下 1550 nm 垂直腔面发射激光器的动力学特性研究

Dynamic characteristics of 1550 nm vertical-cavity surface-emitting laser subject to polarization-rotated optical feedback: the short cavity regime

物理学报.2014, 63(1): 014203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.014203>

表面液晶-垂直腔面发射激光器温度特性的研究

Temperature characteristics of VCSEL with liquid crystal overlay

物理学报.2013, 62(23): 234206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.234206>

基于外光注入互耦合垂直腔面发射激光器的混沌随机特性研究*

刘庆喜[†] 潘炜 张力月 李念强 阎娟

(西南交通大学信息科学与技术学院, 成都 610031)

(2014年6月16日收到; 2014年7月15日收到修改稿)

通过在互耦合垂直腔面发射激光器 (VCSELs) 系统中增加外光注入, 建立了一种基于偏振可调光反馈 VCSEL 驱动互耦合 VCSELs 混沌系统模型, 分析了增加外光驱动对互耦合激光器随机特性的影响. 以不可预测度作为随机特性的评价指标, 采用信息论中的排列熵作为相应量化工具, 对系统输出混沌信号的不可预测性进行定量分析. 数值研究了光强度、时延、偏振旋转角度以及驱动激光器与耦合激光器间的频率失谐对输出信号随机特性的影响. 结果表明: 外光注入能够增大互耦合 VCSELs 输出混沌信号的排列熵, 即外光注入能够有效提高耦合系统的随机特性; 驱动激光器可调偏振片偏转角度调节到 45° 附近, 注入强度适中, 满足耦合强度大于驱动激光器自反馈强度条件, 系统输出信号的排列熵较大; 在耦合时延与驱动激光器反馈时延不相等的同时, 增加驱动激光器与耦合激光器频率失谐, 外光注入互耦合 VCSELs 的随机特性能够得到进一步提高.

关键词: 垂直腔面发射激光器, 驱动互耦合, 排列熵, 可调偏振光反馈

PACS: 42.55.Px, 42.65.Sf

DOI: 10.7498/aps.64.024209

1 引言

自 2007 年 Vicente 等^[1] 通过两个激光器实现了互耦合混沌系统的同步和双向实时通信以来, 互耦合半导体激光混沌系统由于其在保密通信中的潜在应用而被广泛研究. 对保密通信而言, 混沌激光信号的随机特性决定其作为载波对信息的隐藏能力, 进而影响通信系统的保密程度^[2].

基于光混沌保密通信系统的研究, 学者们主要通过引入附加自由度提高混沌载波信号的随机特性. 通常引入的附加自由度有: 光注入^[3]、光反馈^[4] 和电流调制^[5] 等. 2009 年, 日本 Someya 课题组^[6] 实验验证了采用自反馈混沌主激光器注入从激光器提高系统输出混沌信号随机特性的方法. 2011 年, Oliver 等^[7] 利用旋转偏振光反馈提高输出混沌信号的不可预测性. 鉴于耦合混沌系统输

出混沌信号复杂度较高的特性, 西南大学课题组通过互注入半导体激光器, 得到超宽带混沌种子信号^[8]. 虽然上述方法能够有效提高系统输出混沌信号的随机特性, 但是信号的随机特性仍然不是很强. 研究证明, 垂直腔面发射半导体激光器 (vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL) 丰富的偏振特性能用于增强激光混沌通信系统的安全性^[9-11]. 然而, 有关互耦合 VCSELs 混沌系统输出混沌信号的随机特性分析以及提高其随机性能的研究还较为缺少. 此外, 在混沌信号随机特性的定量分析方面, 排列熵因其简便、有效的特性而引起学者们的关注. 2002 年, 德国的 Bandt 和 Pompe 等基于信息论提出了排列熵, 这种方法通过对比相邻值的大小, 得出一组排列顺序值, 根据这种排列顺序求取概率分布及信息熵^[12,13]. 2010 年, 文献^[14-16] 将排列熵和统计复杂度引入到半导体激光

* 国家自然科学基金 (批准号: 61274042) 和四川省基础科研项目 (批准号: 2011JY0030) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: lqx20071967@163.com

混沌通信系统中, 实现了对混沌信号随机特性的定量分析. 2013年, Xiang等^[17]应用排列熵的方法分析了主-从光注入半导体激光混沌系统输出混沌信号的随机特性.

考虑到互耦合系统输出混沌信号的复杂度较高以及光注入能够提高系统输出混沌信号的随机特性, 本文在互耦合 VCSELs 混沌系统中增加可调偏振光反馈 (variable-polarization optical feedback, VPOF) VCSEL 光注入, 组成 VPOF-VCSEL 驱动互耦合 VCSELs 混沌系统, 采用排列熵分析系统输出混沌信号的随机特性, 数值仿真研究可调偏振片偏转角度、驱动激光器反馈强度和时延、注入强度、耦合激光器耦合强度和耦合时延以及驱动激光器与耦合激光器间的频率失谐对系统输出混沌信号排列熵的影响.

2 系统结构及理论分析

2.1 系统结构

VPOF-VCSEL 驱动互耦合 VCSELs 混沌系统结构如图 1 所示. 系统主要由互耦合 VCSELs 以及一个驱动 VCSEL 组成. 三个激光器内部参数以及工作波长完全相同. 驱动 VCSEL3 通过引入可调偏振自反馈这一自由度使输出的混沌信号较为复杂, 并将其输出注入到互耦合 VCSELs 系统中, 从而提高互耦合 VCSELs 输出混沌信号的随机特性. 当 VCSEL3 注入光强度为零时, 互耦合系统为无外光驱动. 当 VCSEL3 注入光强度过大, 互耦合 VCSELs 将被驱动 VCSEL3 锁存.

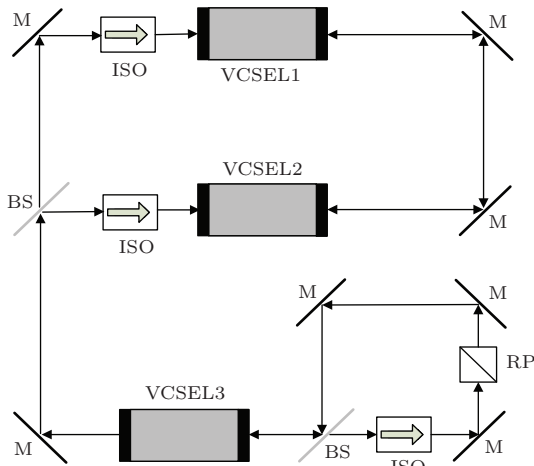


图 1 VPOF-VCSEL 驱动互耦合 VCSELs 混沌系统结构示意图 BS, 分束器; RP, 可调偏振片; M, 平面反射镜; ISO, 光隔离器

2.2 速率方程描述及理论分析

在实际的研究中, 通常采用自旋反转模型 (spin flip model, SFM) 速率方程描述 VCSEL 半导体激光器的输出特性^[18-21]. 通过引入 VPOF 以及链路耦合对自由运行 VCSEL 方程进行拓展, 得到描述基于 VPOF-VCSEL 驱动互耦合 VCSELs 混沌系统的速率方程组为:

耦合 VCSELs 速率方程

$$\begin{aligned} \frac{dE_{1,2x}}{dt} &= k(1+i\alpha)[(N_{1,2}-1)E_{1,2x} + in_{1,2}E_{1,2y}] \\ &\quad - (\gamma_a + i\gamma_p)E_{1,2x} \\ &\quad + \xi_{2,1}E_{2,1x}(t - \tau_{21,12})e^{-i(\omega_{2,1}\tau_{21,12} + \Delta w_{12}t)} \\ &\quad + \xi_3E_{3x}(t - \tau_3)e^{-i(\omega_3\tau_3 + \Delta w_{31,32}t)}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dE_{1,2y}}{dt} &= k(1+i\alpha)[(N_{1,2}-1)E_{1,2y} - in_{1,2}E_{1,2x}] \\ &\quad + (\gamma_a + i\gamma_p)E_{1,2y} \\ &\quad + \xi_{2,1}E_{2,1y}(t - \tau_{21,12})e^{-i(\omega_{2,1}\tau_{21,12} + \Delta w_{12}t)} \\ &\quad + \xi_3E_{3y}(t - \tau_3)e^{-i(\omega_3\tau_3 + \Delta w_{31,32}t)}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dN_{1,2}}{dt} &= \gamma_N[\mu - N_{1,2}(1 + |E_{1,2x}|^2 + |E_{1,2y}|^2) \\ &\quad + in_{1,2}(E_{1,2x}E_{1,2y}^* - E_{1,2y}E_{1,2x}^*)], \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{dn_{1,2}}{dt} &= -\gamma_s n_{1,2} - \gamma_N[n_{1,2}(|E_{1,2x}|^2 + |E_{1,2y}|^2) \\ &\quad + iN_{1,2}(E_{1,2y}E_{1,2x}^* - E_{1,2x}E_{1,2y}^*)]; \end{aligned} \quad (4)$$

驱动 VPOF-VCSEL 速率方程

$$\begin{aligned} \frac{dE_{3x}}{dt} &= k(1+i\alpha)[(N_3-1)E_{3x} + in_3E_{3y}] \\ &\quad - (\gamma_a + i\gamma_p)E_{3x} \\ &\quad + \xi_r E_{3x}(t - \tau_r)e^{-i\omega_3\tau_r} \cos^2(\theta_p) \\ &\quad + \xi_r E_{3y}(t - \tau_r)e^{-i\omega_3\tau_r} \\ &\quad \times \cos(\theta_p) \sin(\theta_p) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{dE_{3y}}{dt} &= k(1+i\alpha)[(N_3-1)E_{3y} - in_3E_{3x}] \\ &\quad + (\gamma_a + i\gamma_p)E_{3y} \\ &\quad + \xi_r E_{3x}(t - \tau_r)e^{-i\omega_3\tau_r} \cos(\theta_p) \sin(\theta_p) \\ &\quad + \xi_r E_{3y}(t - \tau_r)e^{-i\omega_3\tau_r} \sin^2(\theta_p), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \gamma_N[\mu - N_3(1 + |E_{3x}|^2 + |E_{3y}|^2) + in_3(E_{3x}E_{3y}^* - E_{3y}E_{3x}^*)], \quad (7)$$

$$\frac{dn_3}{dt} = -\gamma_s n_3 - \gamma_N[n_3(|E_{3x}|^2 + |E_{3y}|^2) + iN_3(E_{3y}E_{3x}^* - E_{3x}E_{3y}^*)]. \quad (8)$$

(1), (2) 式最后一项为外光注入对互耦合 VCSELs 系统输出混沌信号随机特性的影响; (5), (6) 式最后两项为可调偏振自反馈对驱动 VCSEL 输出的注入信号复杂特性的影响; 其中, x, y 为 VCSEL 输出的两个正交线偏振模式 x 偏振和 y 偏振, E, N, n 分别为慢变复电场振幅、导带与价带间载流子总数之差和右旋光激励与左旋光激励对应的载流子之差, 下标 1, 2, 3 分别代表 VCSEL1, VCSEL2 和 VCSEL3; k 为光子衰减速率, α 是线性增强因子; γ_a, γ_p 分别为二色性参数和双折射参数; γ_N, γ_s 分别为总载流子数对应的衰变速度和载流子自旋振荡速度; μ 是归一化注入电流; ω 为 VCSEL 的中心频率, $\omega = 2\pi c/\lambda$; $\xi_r, \xi_3, \xi_{1,2}$ 分别是反馈强度, 注入强度和耦合强度; $\tau_r, \tau_3, \tau_{12,21}$ 分别为反馈时延、注入时延和耦合时延; $\Delta\omega_{31,32}$ 为 VCSEL3 与 VCSEL1, VCSEL2 的失谐频率, $\Delta\omega_{31,32} = \omega_3 - \omega_{1,2}$, $\Delta\omega_{12}$ 为互耦合 VCSEL 频率失谐, $\Delta\omega_{12} = \omega_1 - \omega_2$. 为了使相同外光注入互耦合激光器能够实现较高同步, 需满足 $\xi_1 = \xi_2, \tau_{12} = \tau_{21}, \Delta\omega_{12} = 0$ [22]. 因此, 可令 $\tau_1 = \tau_{12} = \tau_{21}, \Delta\omega = \Delta\omega_{31,32} = 2\pi\Delta f$.

为了定量分析 VPOF-VCSEL 驱动互耦合 VCSELs 输出混沌信号的随机特性, 本文引入便于计算以及有效的排列熵方法 [12,13]. 即将时间序列 $\{x_t, t = 1, \dots, T\}$ 嵌入到一个 d 维空间中得到 $X_t = [x(t), x(t + \tau_e), \dots, x(t + (d-1)\tau_e)]$, 其中 d 为嵌入维数, τ_e 为嵌入延迟. 若存在两个相同的数, $x[t + (r_{t1} - 1)\tau_e] = x[t + (r_{t2} - 1)\tau_e]$, 则按其下标大小区分. 如果满足 $r_{t1} \leq r_{t2}$, 那就认为 $x[t + (r_{t1} - 1)\tau_e] \leq x[t + (r_{t2} - 1)\tau_e]$. 于是, 对于任意 X_t 都可以惟一地映射成“有序图案” $\pi = (r_1, r_2, \dots, r_d)$, 而 π 则是 d 个符号 $(1, 2, \dots, d)$ 组成的 $d!$ 种排列方式中的一种. 对于这 $d!$ 种排列, 其概率分布 $P = \{p(\pi)\}$ 可以定义为

$$p(\pi) = \frac{\#\{t | t \leq T - d + 1; X_t \text{ 的排列方式为 } \pi\}}{T - d + 1}, \quad (9)$$

式中 $\#$ 代表总数. 因此, 排列熵可以定义为 $h[P] = -\sum p(\pi) \log p(\pi)$, 归一化后可以表示为 $H[P] = \frac{h[P]}{h_{\max}} = \frac{-\sum p(\pi) \log p(\pi)}{h_{\max}}$, 其中, $h_{\max} = h[P_e] = \log(d!)$, 而 $P_e = \{1/(d!), \dots, 1/(d!)\}$ 表示均匀分布, 即 $d!$ 种排列出现的概率是相等的. 一个时间序列的 H 值越大, 代表其随机性越强, 不可预测度越高, 而 H 越小, 则该时间序列越规则, 且容易预测.

在分析混沌信号随机特性时, 排列熵的参数可设置为 [17]: 嵌入维 $d = 6$, 嵌入延迟 $\tau_e = 1$, 采样周期 $\Omega_s = 20$ ps. 对于混沌信号时间序列, 为了得到排列熵统计平均值, 对混沌信号 $t = [50 \text{ ns}, 450 \text{ ns}]$ 进行分段处理, 每段的时间序列长度 $T = 5000$, 再对这 4 个排列熵求平均值.

下面, 通过四阶龙格-库塔算法方程 (1)–(8) 进行数值求解, 采用排列熵方法对系统输出混沌信号的随机特性进行分析. 基本仿真参数值详见表 1 [23,24].

表 1 VCSEL 典型参数值

线宽增强因子	α	3
光场衰变速度	k/ns^{-1}	300
线性二色性	γ_a/ns^{-1}	0.5
线性双折射性	γ_p/ns^{-1}	30
总载流子数对应的衰变速度	γ_N/ns^{-1}	1
载流子自旋振荡速度	γ_s/ns^{-1}	50
VCSEL 的工作波长	λ/nm	850
光速	$c/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	3×10^8
归一化电流	μ	1.5

3 仿真结果与分析

当外光驱动互耦合 VCSELs 混沌系统时, 能够出现驱动 VPOF-VCSEL3 锁存互耦合 VCSELs 现象. 所以, 本文先分析了反馈强度及偏振旋转角度 (RP) 对驱动激光器 VCSEL3 信号排列熵的影响, 如图 2 所示.

从图 2 可以看到, 当反馈时延 τ_r 取 3 ns 时, 随着反馈强度的逐渐增强, VCSEL3 排列熵有着明显的增加趋势. 当反馈强度达到一定程度时, 排列熵增强趋势受到一定程度的抑制. 此外, 可调偏振片

偏转角度对 VCSEL3 排列熵也有着明显的影响, 在 RP 角度调到 45° 附近时, 排列熵取得较大值.

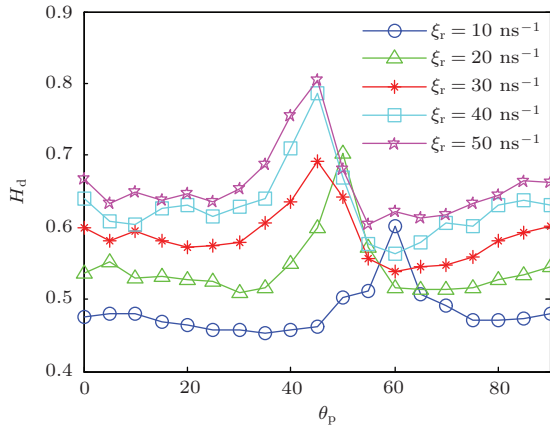


图2 不同反馈强度 VCSEL3 排列熵与 RP 角度的关系

外光注入对互耦合 VCSELs 系统输出混沌信号随机特性的影响如图 3 所示. 其中, 反馈强度 $\xi_r = 20 \text{ ns}^{-1}$, 耦合强度 $\xi_1 = 30 \text{ ns}^{-1}$, 反馈、注入和耦合时延取 3 ns , 驱动 VCSEL3 与互耦合 VCSELs 频率失谐 $\Delta f = 0$, 注入强度 $\xi_3 = 60 \text{ ns}^{-1}$, $\xi_3 = 0 \text{ ns}^{-1}$ 分别为有无外光驱动互耦合 VCSELs 系统. 由于外光注入互耦合两激光器强度和时延

相等, VCSEL1 与 VCSEL2 参数设置相同, 所以可将 VCSEL1 输出作为系统输出的混沌信号. 从图中可看出, 在有外光注入时, 互耦合系统输出混沌信号的排列熵有较大提高, 并在 $\theta_p = 45^\circ$ 时, 排列熵取得最大值, 即此时 VPOF-VCSEL 驱动互耦合 VCSELs 系统输出的信号随机性最大.

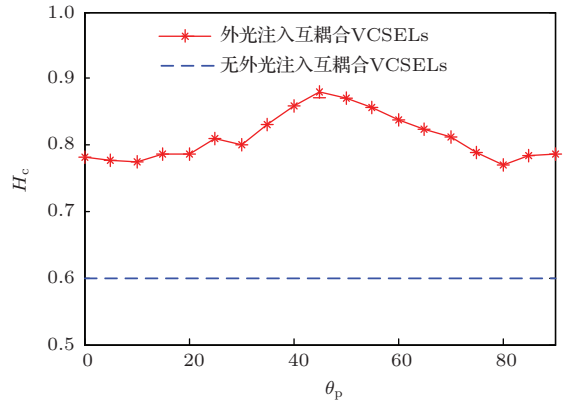


图3 有无外光注入系统输出信号排列熵随 RP 角度的变化

图 4 从信号时序方面说明 VPOF-VCSEL3 注入对互耦合 VCSELs 输出混沌信号随机特性的影响.

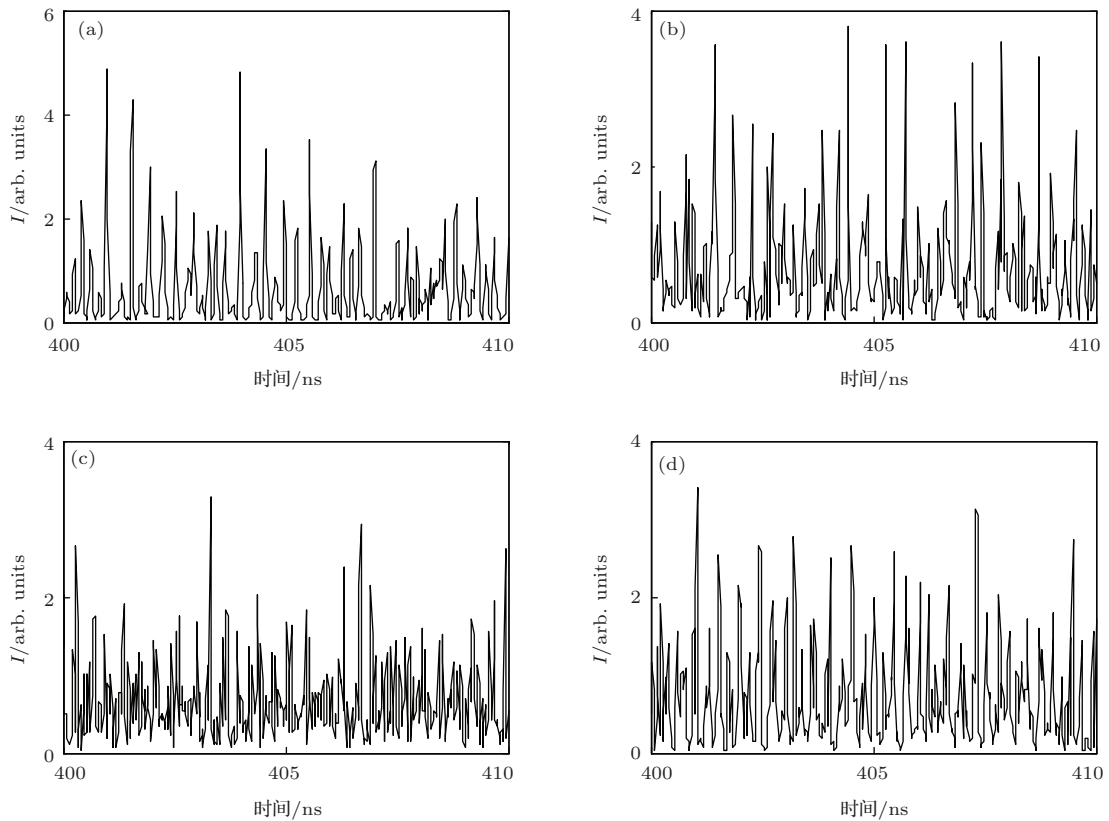


图4 有无外光注入系统输出信号时序图 (a) 无外光注入; (b)—(d) 有外光注入且 θ_p 分别为 0° , 45° 和 90°

从图4可以看出, 外光注入能够使互耦合 VCSELs 系统输出混沌信号变得复杂, 并且通过恰当的旋转偏转角度能够进一步增强系统的随机特性. 图4系统输出混沌信号的时序图进一步验证了图3得出的结论.

下面主要围绕光强度(驱动 VCSEL 反馈强度、注入强度和耦合强度)、时延(反馈时延、注入时延和耦合时延)和驱动 VCSEL 与互耦合 VCSELs 的频率失谐对互耦合 VCSELs 系统输出混沌信号排列熵的影响进行分析.

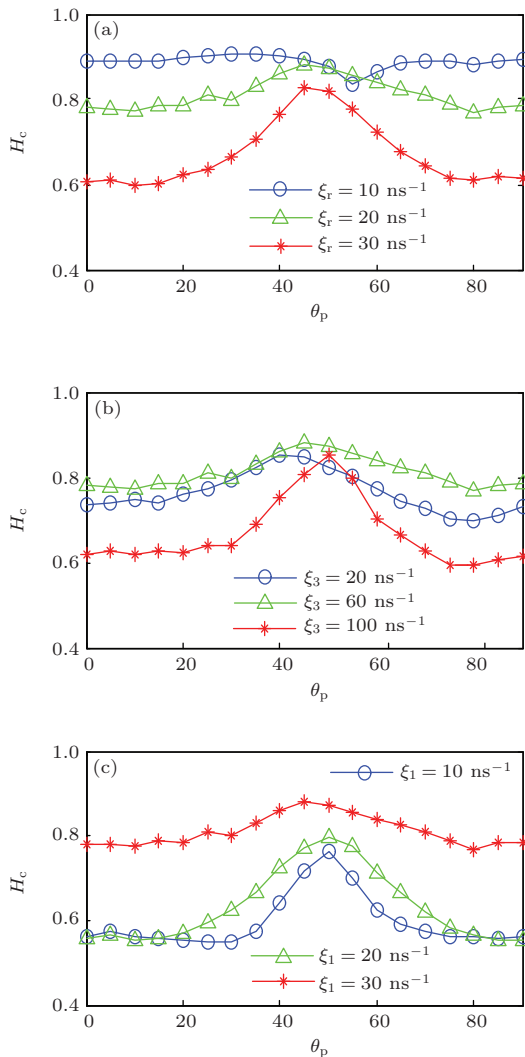


图5 VCSEL1 输出信号的排列熵与强度和 RP 角度的关系 (a) 反馈强度不同; (b) 注入强度不同; (c) 耦合强度不同

图5对比了在不同强度条件下外光注入互耦合 VCSELs 混沌系统输出信号排列熵随偏转角度变化的关系, 时延取 3 ns, 频率失谐 $\Delta f = 0$. 图5(a), (c)表明: 当耦合强度大于驱动 VCSEL 反馈强度时, 外光注入互耦合 VCSELs 系统能够提高

系统的排列熵, 使输出信号有更强的随机特性. 然而, 当耦合强度小于反馈强度时, 系统输出信号排列熵与图2驱动激光器注入信号的排列熵近似. 图5(b)表明: 驱动 VCSEL 注入强度大于反馈、耦合强度时, 耦合系统输出信号的排列熵有所提高, 但注入强度过大时, 耦合系统输出信号的排列熵有减小趋势, 这主要是因为注入强度过大, 耦合系统易于被驱动激光器锁存.

为了更好地说明耦合系统排列熵随反馈强度、注入强度和耦合强度的变化关系, 下面分别给出排列熵与反馈强度和耦合强度、反馈强度和注入强度以及耦合强度和注入强度的二维关系图, 见图6.

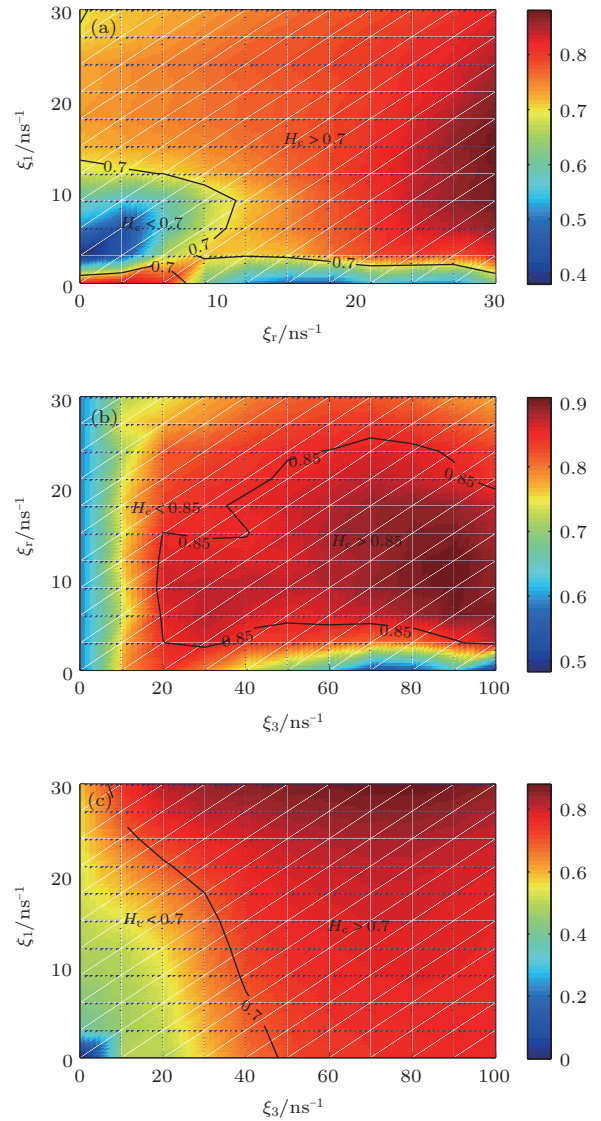


图6 (网刊彩色) VCSEL1 输出信号的排列熵与光强度关系 (a) 排列熵与耦合强度和反馈强度关系; (b) 排列熵与注入强度和反馈强度关系; (c) 排列熵与注入强度和耦合强度关系

图6(a)说明,在注入强度 $\xi_r = 60 \text{ ns}^{-1}$,耦合强度大于驱动VCSEL反馈强度时,外光注入互耦合VCSELs输出信号的排列熵较大,系统输出信号的随机特性较强.从图6(b)可看出,在耦合强度 $\xi_1 = 30 \text{ ns}^{-1}$ 条件下,系统输出信号较高排列

熵分布在驱动VCSEL反馈强度20—30 ns^{-1} 、注入强度60—100 ns^{-1} 组成的区域.从图6(c)可以看到,在外光注入强度取60—80 ns^{-1} 、耦合强度选择20—30 ns^{-1} 时,外光注入互耦合系统输出混沌信号的排列熵较大.

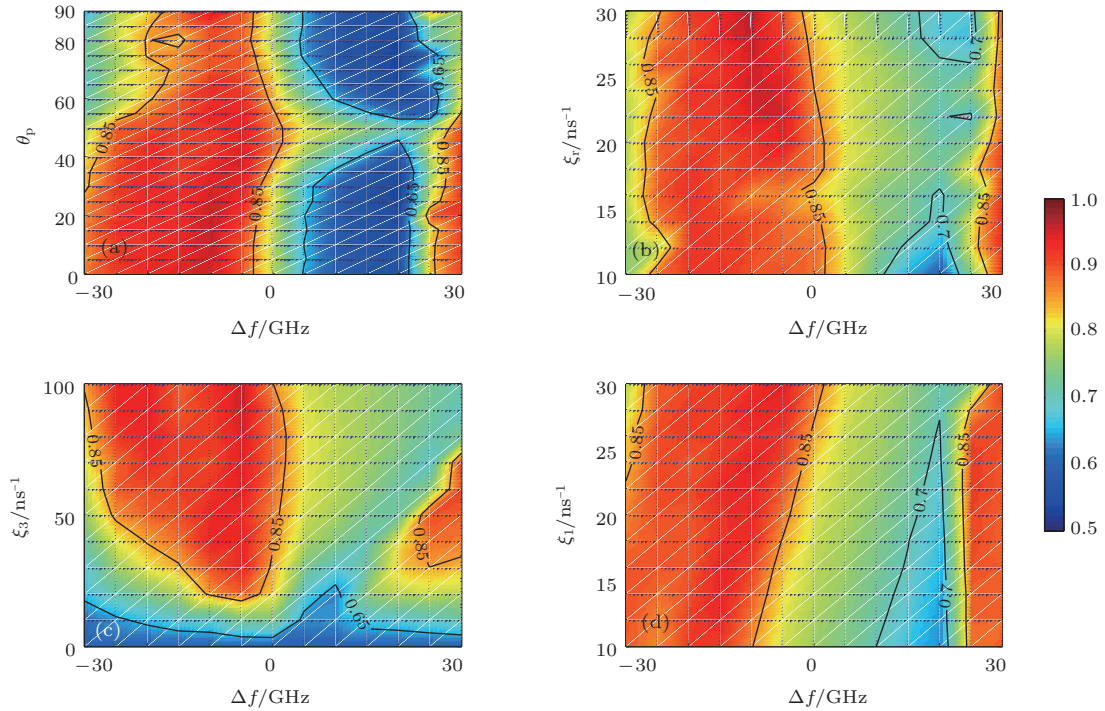


图7 (网刊彩色) VCSEL1 输出信号的排列熵与频率失谐和 RP 角度、光强度关系 (a) 排列熵与频率失谐和 RP 角度关系; (b) 排列熵与频率失谐和反馈强度关系; (c) 排列熵与频率失谐和耦合强度关系; (d) 排列熵与频率失谐和耦合强度关系

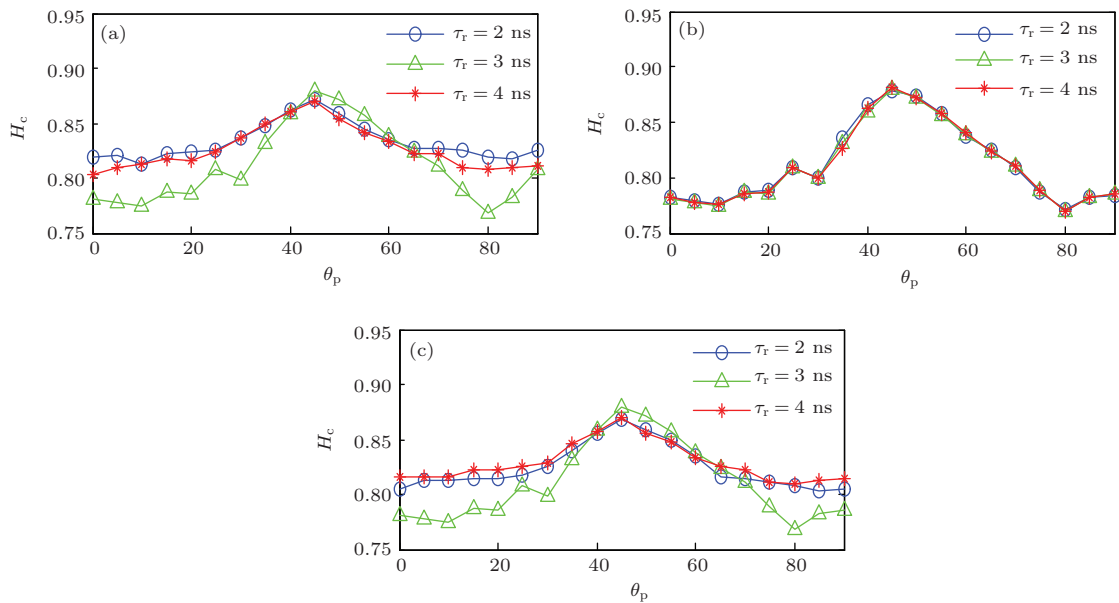


图8 VPOF-VCSEL 驱动互耦合 VCSELs 的排列熵与时延关系 (a) 反馈时延不同; (b) 注入时延不同; (c) 耦合时延不同

当驱动激光器 VCSEL3 与互耦合 VCSELs 的排列熵存在失谐频率时, VCSEL1 输出混沌信号排列熵与偏振片旋转角度、光强度的关系如图 7 所示. 图 7(a) 表明: 驱动 VCSEL-RP 角度在 0° — 60° 范围内取值, 频率失谐选择 -25 — -10 GHz 以及 25 — 30 GHz 时, 系统的排列熵较大. 图 7(b) 和 (d) 表明: 反馈强度和耦合强度在 10 ns $^{-1}$ 到 30 ns $^{-1}$ 之间, 频率失谐选择 -25 — -10 GHz 以及 25 — 30 GHz 时, 外光注入耦合 VCSELs 输出混沌信号的排列熵较大. 图 7(c) 表明: 系统排列熵较大值分布在注入强度 40 — 100 ns $^{-1}$ 、频率失谐 -30 — -5 GHz 以及注入强度从 40 — 60 ns $^{-1}$ 、频率失谐 25 — 30 GHz 所组成的区域.

图 8 给出了在不同的反馈时延、注入时延、耦合时延条件下, 外光注入互耦合 VCSEL 的排列熵随着驱动 VCSEL-RP 角度的关系. 对比图 8(a), (c) 可看出, 驱动 VCSEL 的反馈时延与互耦合 VCSELs 的耦合时延设置不相同, 系统的排列熵较大. 而图 8(b) 说明注入时延对系统输出信号的排列熵影响不明显. 另一方面, 从图 8 还可看出, 不同的时延, 系统排列熵仍在驱动 VCSEL-RP 角度选择 45° 时达到最大值.

4 结 论

本文提出了一种基于 VPOF-VCSEL 驱动互耦合 VCSELs 的混沌系统模型, 利用排列熵量化了系统输出混沌信号的随机特性, 并且数值讨论了偏振旋转角度、光强度、时延以及驱动 VCSEL 和耦合 VCSELs 间的频率失谐对系统输出信号随机特性的影响. 研究表明: 外光驱动能够提高互耦合 VCSELs 的随机特性, 并且在偏振旋转角度设置 45° 以及耦合强度大于驱动 VCSEL 反馈强度时, 系统输出混沌信号的随机特性较强; 驱动 VCSEL 反馈时延与耦合 VCSELs 耦合时延设置不同时, 反馈时延、耦合时延对系统随机特性没有明显的影响; 然而, 驱动 VCSEL 与耦合 VCSELs 之间的频率失谐对系统输出信号随机特性的影响却很显著; 该系统模型通过参数的调节, 能够较大提高互耦合 VCSELs 系统输出信号的随机特性, 从而提升混沌通信系统的安全性能.

参考文献

- [1] Vicente R, Mirasso R, Fischer I 2007 *Opt. Lett.* **32** 403
- [2] Zhao Q C, Wang Y C 2010 *Lasers Optoelectron. Prog.* **47** 030602 (in Chinese) [赵青春, 王云才 2010 激光与光电子学进展 **47** 030602]
- [3] Sukow D W, Gavrielides A, Erneux T, Mooneyham B, Lee K 2010 *Phys. Rev. A* **81** 025206
- [4] Yan S L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 050509 (in Chinese) [颜森林 2011 物理学报 **60** 050509]
- [5] Zhang J, Yu J L, Cheng S Y, Lai Y F, Chen Y H 2014 *Chin. Phys. B* **23** 027304
- [6] Someya H, Oowada I, Okumura H, Kida T, Uchida A 2009 *Opt. Express* **17** 19536
- [7] Oliver N, Soriano M C, Sukow D W, Fischer I 2011 *Opt. Lett.* **36** 4632
- [8] Tang X, Wu J G, Xia G Q, Wu Z M 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 110509 (in Chinese) [唐曦, 吴加贵, 夏光琼, 吴正茂 2011 物理学报 **60** 110509]
- [9] Tliidi M, Averlant E, Vladimirov A, Panajotov K 2012 *Phys. Rev. A* **86** 033822
- [10] Zhang W L 2008 *Ph. D. Dissertation* (Chengdu: Southwest Jiaotong University) (in Chinese) [张伟利 2008 博士学位论文(成都: 西南交通大学)]
- [11] Wu J, Cui H Y, Huang M, Ma M L 2013 *Chin. Phys. B* **22** 124203
- [12] Bandt C, Pompe B 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 4102
- [13] Bandt C, Keller G, Pompe B 2002 *Nonlinearity* **15** 1595
- [14] Zunino L, Pérez D G, Martín M T, Garavaglia M, Plastino A, Rosso O A 2008 *Phys. Lett. A* **372** 4768
- [15] Tiana-Alsina J, Torrent M C, Rosso O A, Masoller C, Garcia-Ojalvo J 2010 *Phys. Rev. A* **82** 013819
- [16] Soriano M C, Zunino L, Rosso O A, Fischer I, Mirasso C R 2011 *IEEE J. Quantum Electron.* **47** 252
- [17] Xiang S Y, Pan W, Li N Q, Yan L S, Zhang L 2013 *IEEE J. Quantum Electron.* **49** 274
- [18] Cao T, Xu C, Xie Y Y, Kan Q, Wei S M, Mao M M, Chen H D 2013 *Chin. Phys. B* **22** 024205
- [19] Zheng A J, Wu Z M, Deng T, Li X J, Xia G Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 234203 (in Chinese) [郑安杰, 吴正茂, 邓涛, 李小坚, 夏光琼 2012 物理学报 **61** 234203]
- [20] Wang X F, Li J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 014203 (in Chinese) [王小发, 李骏 2013 物理学报 **62** 014203]
- [21] Miguel M S, Feng Q, Moloney J V 1995 *Phys. Rev. A* **52** 1728
- [22] Jiang N, Pan W, Yan L S, Luo B, Zhang W L 2010 *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.* **28** 1978
- [23] Martin-Regalado J, Prati F, Miguel M S, Abraham N B 1997 *IEEE J. Quantum Electron.* **33** 765
- [24] Sciamanna M, Gatare I, Locquet A, Panajotov K 2007 *Phys. Rev. E* **75** 056213

Chaotic randomness of mutually coupled vertical-cavity surface-emitting laser by optical injection*

Liu Qing-Xi[†] Pan Wei Zhang Li-Yue Li Nian-Qiang Yan Juan

(School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

(Received 16 June 2014; revised manuscript received 15 July 2014)

Abstract

In this paper, a randomness-enhanced chaotic system model of mutually coupled vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) is established by adding another injected VCSEL with variable polarizer optical feedback (VPOF). The randomness of chaotic signals is evaluated quantitatively by an information-theory-based quantifier, the permutation entropy (PE). The influences of VPOF-VCSEL rotating polarizer degree, feedback strength, injection strength, mutual coupling strength, path time delay and frequency detuning about injected VCSEL and coupled VCSELs on chaotic signal permutation entropy are numerically studied. It is shown that the chaotic signal permutation entropy of mutually coupled VCSEL system driven by the third VCSEL is much higher than the mutual system with no-driving VCSEL. That is to say, the randomness of coupled system chaotic signal can be enhanced by optical injection. When the rotating polarizer degree is approximately 45 degrees and the injection strength is saturated at a constant level, the system PE can be increased by coupled strength, which is set to be higher than feedback strength. In addition, unequal delay time between both coupled time and feedback time, and higher detuning frequency between driving VCSEL and coupled VCSELs can contribute to randomness-enhanced chaotic signals.

Keywords: vertical-cavity surface-emitting laser, a driven mutually coupled, permutation entropy, variable-polarization optical feedback

PACS: 42.55.Px, 42.65.Sf

DOI: 10.7498/aps.64.024209

* Project supported by the National Science Foundation of China (Grant No. 61274042) and the Basic Research Program of Sichuan Province, China (Grant No. 2011JY0030).

[†] Corresponding author. E-mail: lqx20071967@163.com