

基于偏振旋转耦合 1550 nm 垂直腔面发射激光器环形系统产生多路高质量混沌信号

杨峰 唐曦 钟祝强 夏光琼 吴正茂

Generations of multi-channel high-quality chaotic signals based on a ring system composed of polarization rotated coupled 1550 nm vertical-cavity surface-emitting lasers

Yang Feng Tang Xi Zhong Zhu-Qiang Xia Guang-Qiong Wu Zheng-Mao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 194207 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.194207

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.194207>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I19>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高功率、高效率 808nm 半导体激光器阵列

High-power, high-efficiency 808 nm laser diode array

物理学报.2016, 65(16): 164203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.164203>

可变偏振光注入下 1550nm 垂直腔面发射激光器的偏振开关及双稳特性

Investigations on the polarization switching and bistability in a 1550 nm vertical-cavity surface-emitting laser under variable-polarization optical injection

物理学报.2016, 65(16): 164204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.164204>

894nm 高温垂直腔面发射激光器及其芯片级铯原子钟系统的应用

894 nm high temperature operating vertical-cavity surface-emitting laser and its application in Cs chip-scale atomic-clock system

物理学报.2016, 65(13): 134204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.134204>

1550nm 垂直腔面发射激光器自旋反转模型中关键参量数值的实验确定

Experimental determination of key parameters in the spin-flip model of 1550 nm vertical-cavity surface-emitting laser

物理学报.2016, 65(12): 124203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.124203>

基于有机半导体激光材料的高灵敏度溶液检测传感器件

A highly sensitive chemosensor for solution based on organic semiconductor laser gain media

物理学报.2016, 65(6): 064202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.064202>

基于偏振旋转耦合 1550 nm 垂直腔面发射激光器 环形系统产生多路高质量混沌信号*

杨峰 唐曦 钟祝强 夏光琼 吴正茂†

(西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715)

(2016 年 4 月 5 日收到; 2016 年 7 月 11 日收到修改稿)

提出了一种基于三个单向偏振旋转耦合 1550 nm 垂直腔面发射激光器 (1550 nm-VCSELs) 构成的环形系统获取多路高质量混沌信号的方案. 利用自旋反转模型, 数值研究了该环形系统中三个 VCSELs 的偏振分辨非线性动力学特性; 利用自相关和互信息方法讨论了注入强度和频率失谐对三个 VCSELs 中各偏振分量输出时间序列的时延特征 (TDS) 的影响. 研究表明: 通过选择合适的注入强度和频率失谐, 三个 VCSELs 均可同时输出 X-偏振分量 (X-PC) 和 Y-偏振分量 (Y-PC) 的平均功率可比拟的混沌信号, 而且这些混沌信号的 TDS 通过进一步优化耦合参数可得到较好的抑制. 在此基础上, 进一步对三个 VCSELs 输出的六路混沌信号之间的相关性进行了分析, 给出了除同一 VCSEL 输出的 X-PC 与 Y-PC 之间存在较强的相关性外其他信号之前关联性较弱的参数范围.

关键词: 垂直腔面发射激光器, 偏振旋转, 混沌, 时延特征

PACS: 42.55.Px, 42.65.Sf, 05.45.Tp, 05.45.Pq

DOI: 10.7498/aps.65.194207

1 引言

近年来, 基于半导体激光器 (SLs) 产生的混沌激光因其在高速保密通信^[1,2]、混沌雷达^[3]以及高速随机数产生^[4-7]等方面所展现出的应用前景而受到人们的广泛关注. 前人多年的实验和理论研究表明, 通常采用引入光反馈^[8-10]、光注入^[11,12]、光电反馈等^[13,14]外部扰动机制均可使 SLs 产生混沌激光输出, 其中引入光反馈方式由于具有结构简单、易于控制等特点而成为人们最常采用的方法. 然而, 光反馈系统由于光在外腔中来回反射, 因而导致其输出的混沌信号不可避免地保留了一定的时间延迟特征 (TDS), 这不利于混沌激光在相关领域的应用. 例如, 将具有明显 TDS 的混沌信号用于

混沌通信, 窃听者有可能通过获取混沌信号 TDS 以获取反馈的延时特性, 从而重构混沌系统, 导致混沌保密通信系统的安全性受到威胁; 又如, 若将具有明显 TDS 的混沌信号作为混沌熵源获取随机比特序列, 有可能削弱所获取随机比特序列的统计特性. 因此, 需要采用一些方法对混沌信号的 TDS 进行有效抑制.

迄今为止, 已相继提出不少相关方案以有效抑制外腔反馈 SLs 输出混沌信号的 TDS. 早期的相关研究主要针对边发射半导体激光器 (EELs). 例如, Rontani 等^[9]提出通过将反馈延迟时间设置到 SLs 的弛豫振荡周期附近时, 可得到 TDS 被有效抑制的混沌信号; Li 和 Chan^[15]提出利用分布布拉格反射光栅 (FBG) 作为反射器, 可获得 TDS 被抑制的混沌信号; 本课题组提出采用另一个 SL 作为反射

* 国家自然科学基金 (批准号: 61275116, 61475127, 61575163)、中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: XDJK2016D060) 和重庆市研究生科研创新项目 (批准号: CYB14054) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zmwu@swu.edu.cn

器(即构成一个由两个SLs 互耦合的系统), 理论和实验研究了该系统输出混沌信号的TDS, 确定了获得TDS 被有效抑制的混沌输出所需的参数取值范围^[16]等. 与EELs相比, 垂直腔面发射半导体激光器(VCSELs) 因其结构不同而拥有一些独特的优势^[17–20]: 单纵模光输出、低阈值电流、有源区体积小、光腔短、易集成为激光阵列等. 特别地, 由于VCSELs腔内存在弱各向异性, 在合适的参数条件下VCSELs中可能同时存在X-偏振分量(X-PC)和Y-偏振分量(Y-PC)这两个正交的偏振分量, 这为同时获取双路混沌信号提供了可能. 基于此, 近年来国内外相关学者对光反馈VCSELs混沌系统的TDS抑制问题开展了卓有成效的实验和理论探索. 例如, Xiang等^[21]理论上证实了利用偏振旋转光反馈VCSELs系统获取TDS被抑制的混沌信号的可行性; Lin等^[22]实验实现了基于双可变偏振光反馈VCSELs获取TDS被抑制的混沌信号; 本课题组提出了利用可变偏振FBG反馈VCSELs获取弱TDS的混沌信号方案^[23], 以及理论上预计利用两个VCSELs构成的互耦系统实现弱TDS混沌信号产生的可能性; Hong等^[24]的实验研究则证实了互耦VCSELs系统获取两路TDS被抑制的混沌信号的可行性等. 与此同时, 我们也注意到基于VCSELs的TDS的相关研究大多针对单个VCSEL在外部反馈光以及两个VCSELs构成的互耦系统的情形, 而对于三个以及三个以上VCSELs构成的环形系统获取TDS被抑制的混沌信号的相关研究还鲜有报道. 由于在三个及以上VCSELs构成的环形系统中, 每个VCSEL都有可能同时激励两个偏振分量, 因而理论上来说应可输出多路混沌信号. 如果以其作为混沌熵源, 则具有同时产生多路随机比特序列的可能性. 如果进一步将多路随机比特序列中关联度小的两路进行合并, 则该系统具有产生速率加倍、信道数倍增的多路随机比特序列的潜力. 基于上述考虑, 本文提出了基于三个单向偏振旋转耦合1550 nm-VCSELs构成的环形系统以获取多路高质量混沌信号的方案. 通过选取合适的注入强度和频率失谐, 三个VCSELs中的X-PC与Y-PC两正交偏振分量可同时输出TDS得到较好抑制的六路混沌信号; 通过进一步筛选耦合参数, 可使多路混沌信号之间的相关性降低, 从而可获得高质量的多路混沌信号.

2 系统模型和理论

图1为由三个VCSELs单向偏振旋转耦合构成的环形系统结构示意图. VCSEL1输出的激光信号经环形器(OC1)、法拉第旋转器(FR1)、可调衰减器(VA1)和环形器(OC2), 注入到VCSEL2中; VCSEL2输出的激光信号经过环形器(OC2)、法拉第旋转器(FR2)、可调衰减器(VA2)和环形器(OC3), 注入到VCSEL3; 而VCSEL3的输出信号经过类似的路径注入(VCSEL1), 最终形成一个单向偏振旋转耦合的环形系统. 在该系统中, FR用于改变输出激光信号的偏振方向, 使激光器X-PC注入到下一个激光器的Y-PC, 而激光器输出的Y-PC则注入到下一个激光器的X-PC, 即实现偏振旋转耦合. VA用于调节注入强度的大小.

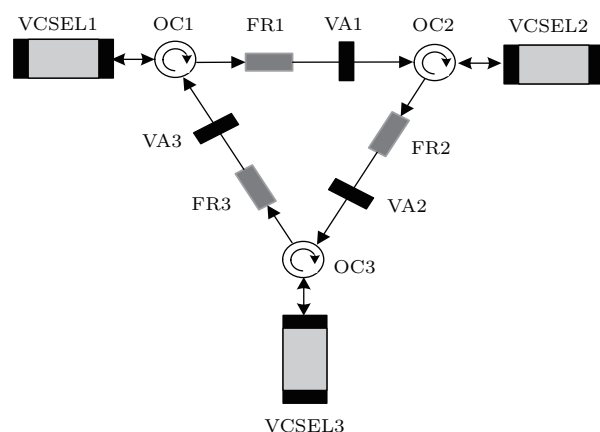


图1 由三个VCSELs单向偏振旋转耦合构成的环形系统结构示意图 OC, 环形器; FR, 法拉第旋转器; VA, 可变衰减器

Fig. 1. Schematic diagram of a ring system composed of three unidirectionally polarization rotated coupled VCSELs. OC, optical circulator; FR, faraday rotator; VA, variable attenuator.

根据自旋反转模型(spin-flip model, SFM)^[25,26], 描述在单向偏振旋转耦合构成的环形系统中的三个VCSELs的速率方程为^[27,28]

$$\begin{aligned}
 & \frac{dE_1^{x,y}}{dt} \\
 &= k(1 + i\alpha)(N_1 E_1^{x,y} - E_1^{x,y} \pm in_1 E_1^{y,x}) \\
 & \quad \mp (\gamma_a + i\gamma_p) E_1^{x,y} + \eta_{31} E_3^{y,x}(t - \tau) \\
 & \quad \times e^{-i(\omega_3 \tau - \Delta\omega_{31} t)} + F_1^{x,y}, \\
 & \frac{dE_2^{x,y}}{dt} \\
 &= k(1 + i\alpha)(N_2 E_2^{x,y} - E_2^{x,y} \pm in_2 E_2^{y,x})
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\mp (\gamma_a + i\gamma_p)E_2^{x,y} + \eta_{12}E_1^{y,x}(t - \tau) \times e^{-i(\omega_1\tau - \Delta\omega_{12}t)} + F_2^{x,y}, \quad (2)$$

$$\frac{dE_3^{x,y}}{dt} = k(1 + i\alpha)(N_3E_3^{x,y} - E_3^{x,y} \pm in_3E_3^{y,x}) \mp (\gamma_a + i\gamma_p)E_3^{x,y} + \eta_{23}E_2^{y,x}(t - \tau)e^{-i(\omega_2\tau - \Delta\omega_{23}t)} + F_3^{x,y}, \quad (3)$$

$$\frac{dN_{1,2,3}}{dt} = \gamma_e[\mu_{1,2,3} - N_{1,2,3}(1 + |E_{1,2,3}^x|^2 + |E_{1,2,3}^y|^2) + in_{1,2,3}E_{1,2,3}^xE_{1,2,3}^{y*} - E_{1,2,3}^yE_{1,2,3}^{x*}], \quad (4)$$

$$\frac{dn_{1,2,3}}{dt} = -\gamma_sn_{1,2,3} - \gamma_e[n_{1,2,3}(|E_{1,2,3}^x|^2 + |E_{1,2,3}^y|^2) + iN_{1,2,3}(E_{1,2,3}^yE_{1,2,3}^{x*} - E_{1,2,3}^xE_{1,2,3}^{y*})], \quad (5)$$

式中, 上标 x 和 y 分别表示 VCSELs 中的 X-PC 和 Y-PC, 下标 1, 2, 3 分别对应于 VCSEL1, VCSEL2 和 VCSEL3; E 表示光场的慢变复振幅, N 表示 VCSELs 导带和价带之间总的反转载流子密度, n 表示自旋向上和自旋向下能级对应的载流子密度之差, k 表示光场的衰减率, α 表示线宽增强因子, γ_α 为线性色散效应, γ_p 为有源介质双折射效应, γ_e 为总载流子衰减速率, γ_s 为自旋反转速率, μ 为归一化偏置电流; η_{31} , η_{12} , η_{23} 分别表征从 VCSEL3 注入到 VCSEL1、从 VCSEL1 注入到 VCSEL2、以及从 VCSEL2 注入到 VCSEL3 的注入强度; τ 为激光器输出信号注入到下一个激光器的延迟时间; ω_1 , ω_2 和 ω_3 分别为 VCSEL1, VCSEL2 和 VCSEL3 的中心频率; $\Delta\omega_{31} = \omega_3 - \omega_1$, $\Delta\omega_{12} = \omega_1 - \omega_2$, $\Delta\omega_{23} = \omega_2 - \omega_3$ 为激光器之间的频率失谐. F 为朗之万噪声源, 可表示为^[19]

$$F_{1,2,3}^x = \sqrt{\beta_{sp}/2}(\sqrt{N_{1,2,3} + n_{1,2,3}}\xi_{1,2,3}^1 + \sqrt{N_{1,2,3} - n_{1,2,3}}\xi_{1,2,3}^2), \quad (6)$$

$$F_{1,2,3}^y = -i\sqrt{\beta_{sp}/2}(\sqrt{N_{1,2,3} + n_{1,2,3}}\xi_{1,2,3}^1 - \sqrt{N_{1,2,3} - n_{1,2,3}}\xi_{1,2,3}^2), \quad (7)$$

其中, ξ 表示平均值为 0、方差为 1 的高斯白噪声, β_{sp} 为自发辐射速率.

通常可采用自相关 (SF)、互信息 (MI)^[29]、排列熵 (PE)^[30] 等多种方法对时滞系统的时延特征 (TDS) 进行评估. 本文采用 SF 和 MI 来评估系统的

TDS. 其中自相关的定义为^[29]

$$C(\Delta t) = \frac{\langle (S(t + \Delta t) - \langle S(t) \rangle)(S(t) - \langle S(t) \rangle) \rangle}{\sqrt{\langle S(t) - \langle S(t) \rangle \rangle^2 \langle S(t + \Delta t) - \langle S(t) \rangle \rangle^2}}, \quad (8)$$

式中, $S(t)$ 表征输出强度时间序列, $\langle \bullet \rangle$ 表示时间平均值, Δt 表示时移. 而时间序列 $S(t)$ 与 $S(t + \Delta t)$ 之间的 MI 则定义为^[29]

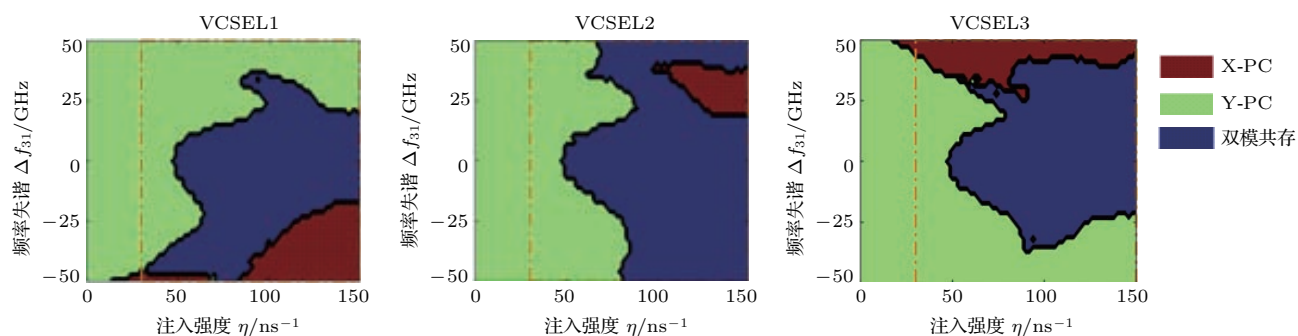
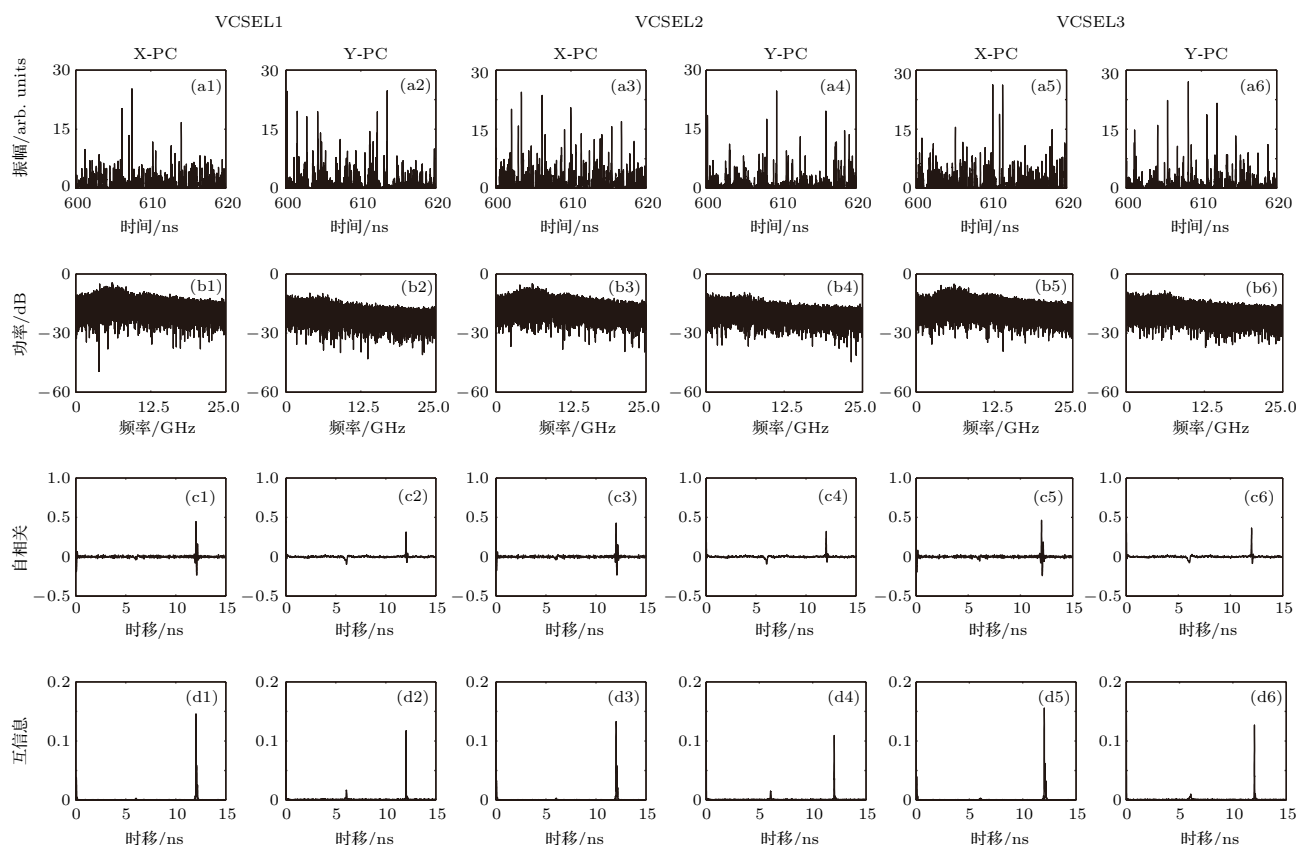
$$M(\Delta t) = \sum_{S(t)S(t+\Delta t)} \delta(S(t), S(t + \Delta t)) \times \log \left(\frac{\delta(S(t), S(t + \Delta t))}{\delta(S(t))\delta(S(t + \Delta t))} \right) \quad (9)$$

式中, $\delta(S(t), S(t + \Delta t))$ 为联合概率密度, $\delta(S(t))$ 和 $\delta(S(t + \Delta t))$ 为边缘概率密度. SF 和 MI 的峰值、以及峰值所在位置呈现了输出信号的 TDS.

3 结果与分析

利用四阶龙格-库塔 (Runge-Kutta) 算法可对速率方程 (1)—(5) 进行数值仿真研究. 在本文的数值模拟中, 所采用的参量值如下^[31]: $\kappa = 300 \text{ ns}^{-1}$, $\alpha = 3$, $\gamma_e = 1 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_s = 1000 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_p = 192.1 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_\alpha = 1 \text{ ns}^{-1}$, VCSEL1 的中心频率为 $f_1 = \omega_1/2\pi = 1.9355 \times 10^{14} \text{ Hz}$ (对应的光波长为 1550 nm), $\tau = 2 \text{ ns}$, $\mu = 3$, $\beta_{sp} = 10^{-6}$, 弛豫振荡频率^[32] $f_{RO} = \sqrt{2k\gamma_e(\mu - 1)}/(2\pi) = 5.51 \text{ GHz}$. 为了便于分析, 在接下来的讨论中, 我们假定 $\omega_1 = \omega_2$, 即 $\Delta f_{12} = 0 \text{ GHz}$, 同时令 $\eta_{12} = \eta_{23} = \eta_{31} = \eta$.

由于本文的目的是为了得到多路高质量的混沌信号, 因此环路系统中的每个 VCSEL 的两个偏振模式最好能同时激励. 在上述所给的参数条件下, 单个自由运行的 1550 nm-VCSEL 中只有 Y-PC 起振, 而 X-PC 被抑制. 而在基于偏振旋转耦合构成环路系统中, 通过改变注入强度 η 和频率失谐 $\Delta f_{31} (= (\omega_3 - \omega_1)/2\pi)$, 可使激光器中的不同分量被激励或者被抑制, 所得结果如图 2 所示. 图中的蓝色区域表示 X-PC 和 Y-PC 同时激励, 其相对强度之比小于 10 dB, 此时激光器呈现双模共存输出^[33]; 图中的红色区域表示 X-PC 占主导, 而绿色区域表示 Y-PC 占主导. 从图中可以看出: 为了使三个激光器均呈现双模共存, 则耦合强度以及频率失谐需满足: $30 \text{ ns}^{-1} \leq \eta \leq 150 \text{ ns}^{-1}$, $-50 \text{ GHz} \leq \Delta f_{31} \leq 50 \text{ GHz}$. 下面的讨论均基于这个范围.

图2 (网刊彩色) VCSELs输出的偏振分量在 η 和 Δf_{31} 构成的参数空间的演化图Fig. 2. (color online) Evolution of the X-PC and Y-PC in three unidirectionally polarization rotated coupled VCSELs in the parameter space of η and Δf_{31} .图3 $\eta = 145 \text{ ns}^{-1}$, $\Delta f_{31} = -5 \text{ GHz}$ 时, 三个 VCSELs 输出的时间序列 (第一行)、功率谱 (第二行)、自相关 (第三行)、互信息 (第四行)Fig. 3. Polarization-resolved chaotic output from three unidirectionally polarization rotated coupled VCSELs for $\eta = 145 \text{ ns}^{-1}$ and $\Delta f_{31} = -5 \text{ GHz}$. Time series (first row), power spectra (second row), SF curves (third row), MI curves (fourth row).

首先, 我们分析该环形系统中三个 VCSELs 输出的六路时间序列的 TDS 特性. 图 3 给出了 $\eta = 145 \text{ ns}^{-1}$, $\Delta f_{31} = -5 \text{ GHz}$ 时系统输出的六路时序图 (第一行)、相应的功率谱 (第二行), SF (第三行) 以及 MI (第四行). 从图中可以看出: VCSEL1, VCSEL2, VCSEL3 输出的两偏振分量 (X-PC 和 Y-PC) 的时间序列都混乱无序, 相应的功率谱连续,

其主峰出现在 5.50 GHz 附近 (对应激光器的弛豫振荡频率), 说明此时激光器处于混沌状态. 仔细观察功率谱, 可发现功率谱上存在一系列间隔近似相等的峰, 其反映了该环形系统的时延特性. 结合时间序列的 SF 和 MI, 可发现在 $\Delta t = 6\tau$ (即环形系统周期 3τ 的两倍) 时出现特征峰. 由于在偏振旋转耦合系统中, X-PC 输出光是注入到下一个激光器的

Y-PC, 从而导致X-PC输出光需要在环形系统中运行两次才注入该偏振分量中, 因此各VCSEL中的每个偏振分量的延时特征峰值均出现在环形系统

周期的两倍(6τ)处. 对于该图给定的 $\eta = 145 \text{ ns}^{-1}$ 和 $\Delta f_{31} = -5 \text{ GHz}$ 的参数条件下, 延时特征峰较为明显, SF和MI的极大值分别约为0.4和0.15.

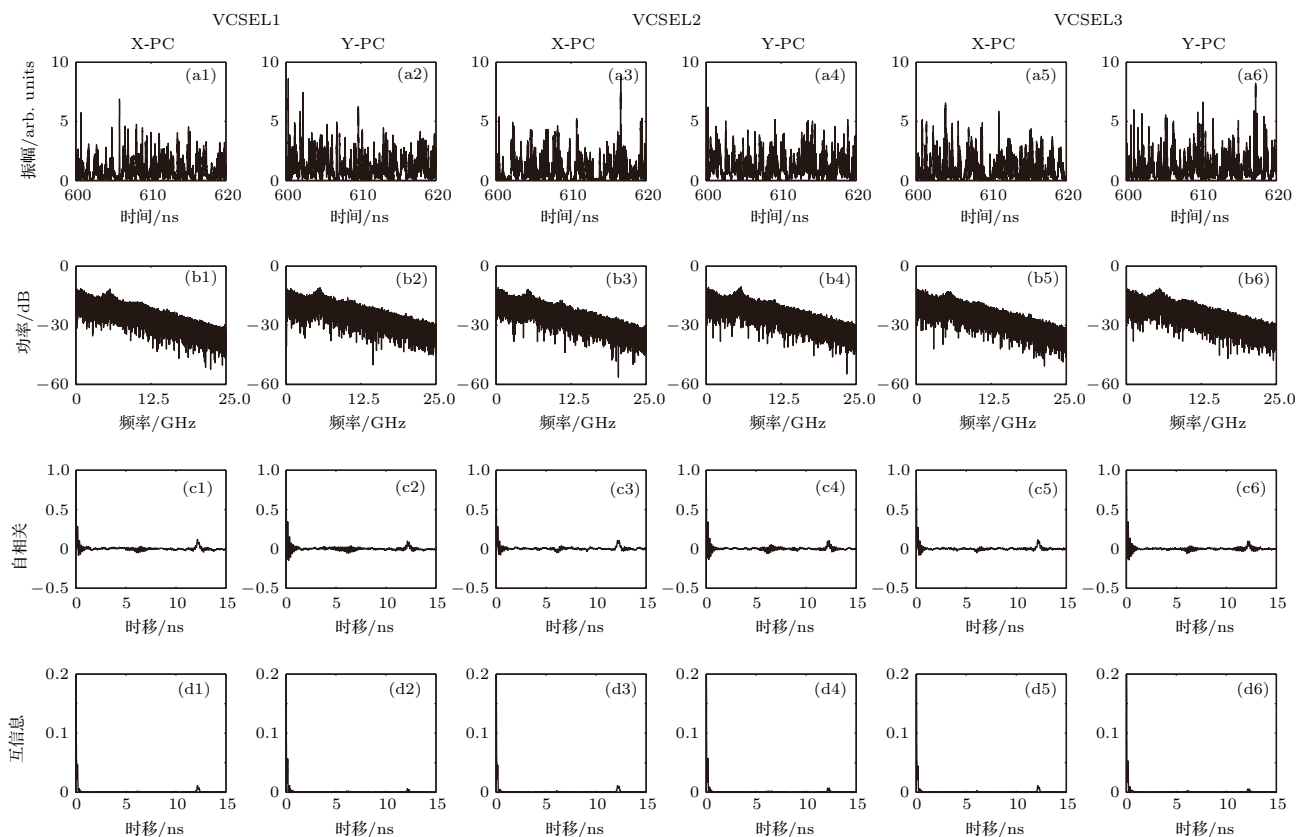


图4 $\eta = 65 \text{ ns}^{-1}$, $\Delta f_{31} = 0 \text{ GHz}$ 时, 三个VCSELs输出的六路信号时间序列(第一行)、功率谱(第二行)、自相关(第三行)、互信息(第四行)

Fig. 4. Polarization resolved chaos output from three unidirectionally polarization rotated coupled VCSELs for $\eta = 65 \text{ ns}^{-1}$, $\Delta f_{31} = 0 \text{ GHz}$. Time series (first row), power spectra (second row), SF curves (third row), MI curves (fourth row).

图3是在 $\eta = 145 \text{ ns}^{-1}$, $\Delta f_{31} = -5 \text{ GHz}$ 的条件下得到的, 对于耦合参数取不同值时, 将得到不一样的结果. 图4给出了当 $\eta = 65 \text{ ns}^{-1}$, $\Delta f_{31} = 0 \text{ GHz}$ 时相应的结果. 如图4所示, 三个激光器的六个偏振分量输出的时间序列仍然混乱无序, 但相对于图3而言, 混沌信号的功率谱更加平滑且没有明显的周期峰, 六路混沌信号的SF的最大值均下降到0.11以下, 而MI的最大值均小于0.012, 此时系统输出的六路混沌信号的TDS均得到了较好的抑制.

上述结果显示: 系统中单向偏振旋转耦合的注入强度和频率失谐对该系统输出的多路信号的延时特性具有显著影响. 在接下来的讨论中, 我们采用自相关曲线在时移 $\Delta t \in [11.5 \text{ ns}, 12.5 \text{ ns}]$ 内的最大峰值 σ_1 来标定延时特性的明显程度. σ_1 越

大说明系统输出信号的TDS越明显. 我们首先固定频率失谐 $\Delta f_{31} = 0 \text{ GHz}$, 研究注入强度 η 对系统输出的六路信号的TDS的影响. 图5给出了 η 在 $30\text{--}150 \text{ ns}^{-1}$ 范围内变化时, 三个激光器输出六路信号的延时特征峰 σ_1 随注入强度 η 的变化曲线. 从图中可以看出: 随着 η 的增加, σ_1 总体呈现先减小后增加的趋势, 六路信号的 σ_1 满足小于0.2的范围略有差异, 但当 $43 \text{ ns}^{-1} \leq \eta \leq 84 \text{ ns}^{-1}$ 时, 六路混沌信号的 σ_1 均满足小于0.2.

尽管图5显示当 $\Delta f_{31} = 0 \text{ GHz}$, η 较大时 σ_1 的值较大. 但进一步的研究表明, 对于 η 较大的情形, 通过调整频率失谐仍然可以获得多路具有弱延时特性的输出混沌信号. 图6给出了当 $\eta = 123 \text{ ns}^{-1}$ 时, 三个VCSELs输出的六路信号的特征峰 σ_1 随 Δf_{31} 的变化曲线. 如图所示, 通过选择合适的 Δf_{31} ,

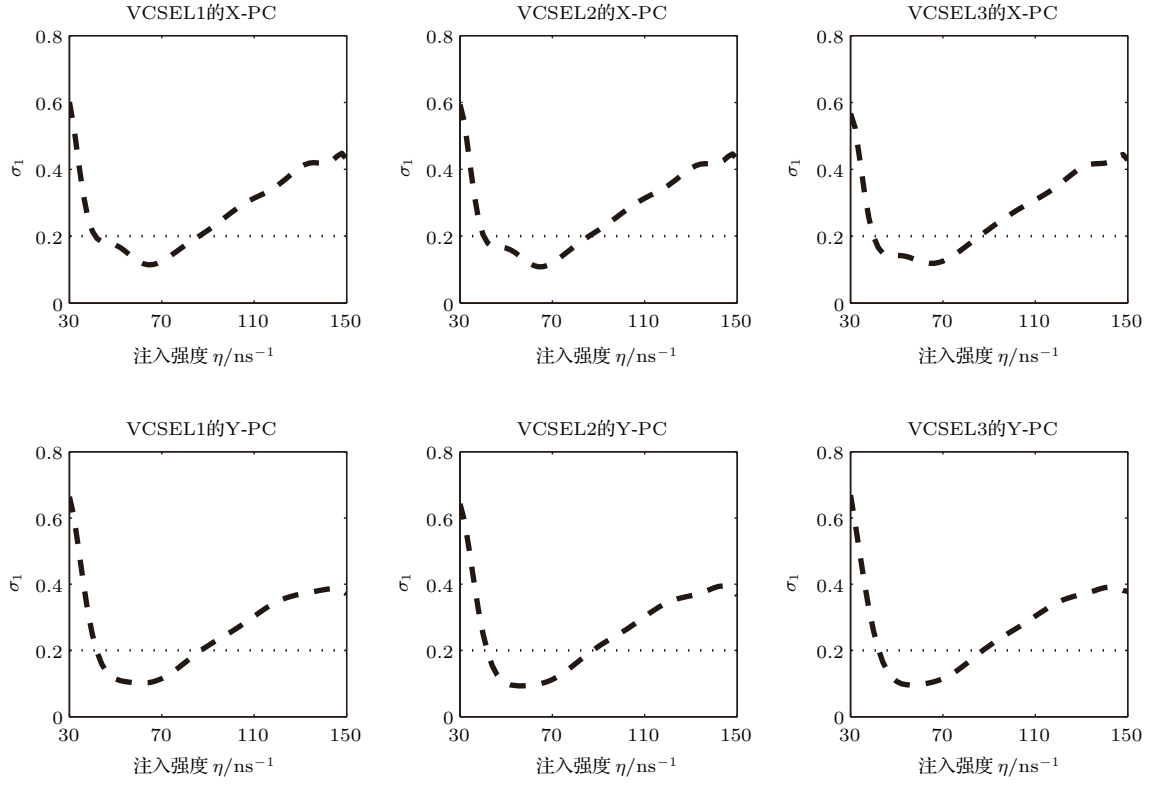

 图5 $\Delta f_{31} = 0$ GHz 时, 六路输出信号的特值 σ_1 随 η 的变化

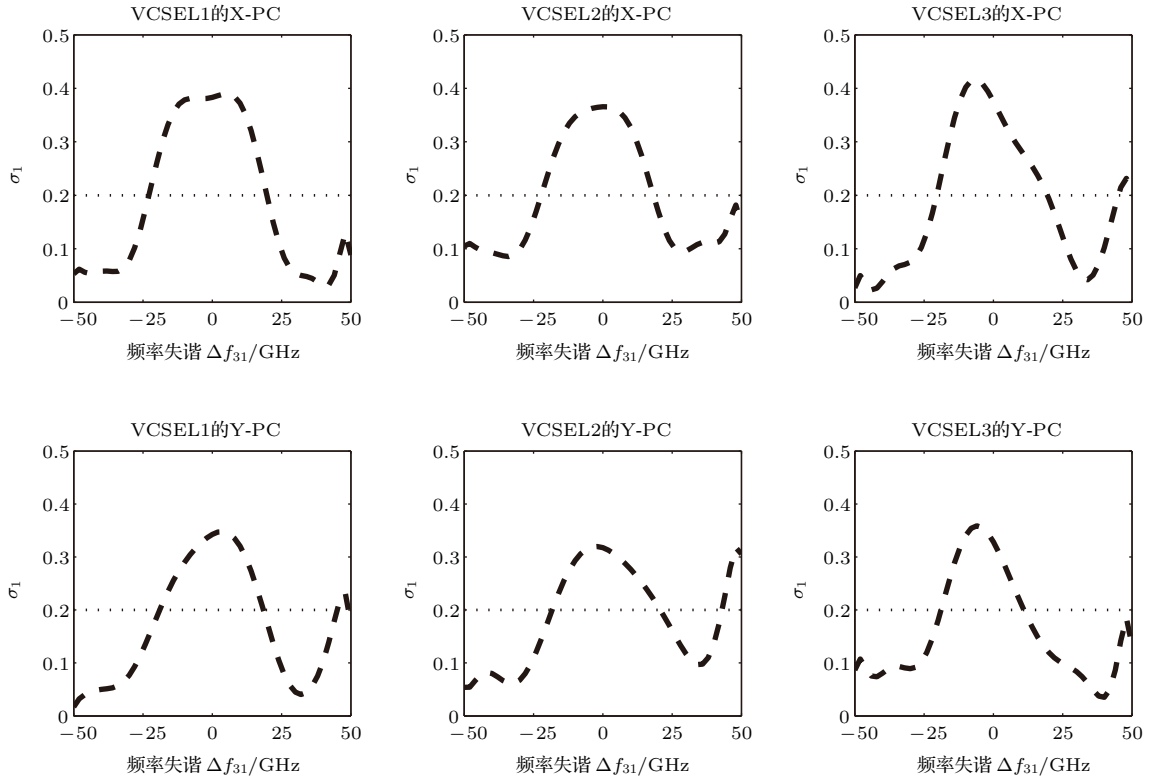
 Fig. 5. Dependences of σ_1 for six signals on the injection strength η under $\Delta f_{31} = 0$ GHz.

 图6 $\eta = 123 \text{ ns}^{-1}$ 时, 六路输出信号的特征峰 σ_1 随 Δf_{31} 的变化

 Fig. 6. Dependence of σ_1 for six signals on the frequency detuning Δf_{31} under $\eta = 123 \text{ ns}^{-1}$.

三个VCSELs输出的六路信号的延时特性均可得到改善, 尽管各路信号的 σ_1 的极小值所对应的 Δf_{31} 不一样, 但当频率失谐位于 $-50 \text{ GHz} \leq \Delta f_{31} \leq -22 \text{ GHz}$ 或 $23 \text{ GHz} \leq \eta \leq 42 \text{ GHz}$ 时, 三个VCSELs输出的六路混沌信号的TDS峰值 σ_1 均可小于0.2, 表明此时系统输出的六路信号的TDS均得到了有效抑制。

为了更好地了解系统输出信号的延时特性随单向偏振耦合的注入强度和频率失谐的变化规律, 图7给出了三个激光器输出的六路信号的特征峰值 σ_1 在由 η 和 Δf_{31} 构成的参数空间的演化图。在

图7中, 不同颜色代表不同的 σ_1 值, 黄色虚线标注的为 $\sigma_1 < 0.2$ 的区域边界, 而红色虚线标注的为X-PC与Y-PC共存的区域边界, 黄色虚线与红色虚线围成的白色阴影区则表征双模共存且TDS得到有效抑制的区域。从图中可以看出, 双模共存且TDS得到有效抑制的区域相对于 $\Delta f_{31} = 0 \text{ GHz}$ 近似呈对称分布。通过仔细对比, 可看出三个激光器均同时输出两个偏振分量且偏振分量的TDS得到有效抑制的参数范围存在较大的重叠区域。因此, 通过选取合适的注入强度和频率失谐的值, 该系统能输出多路TDS得到有效抑制的混沌信号。

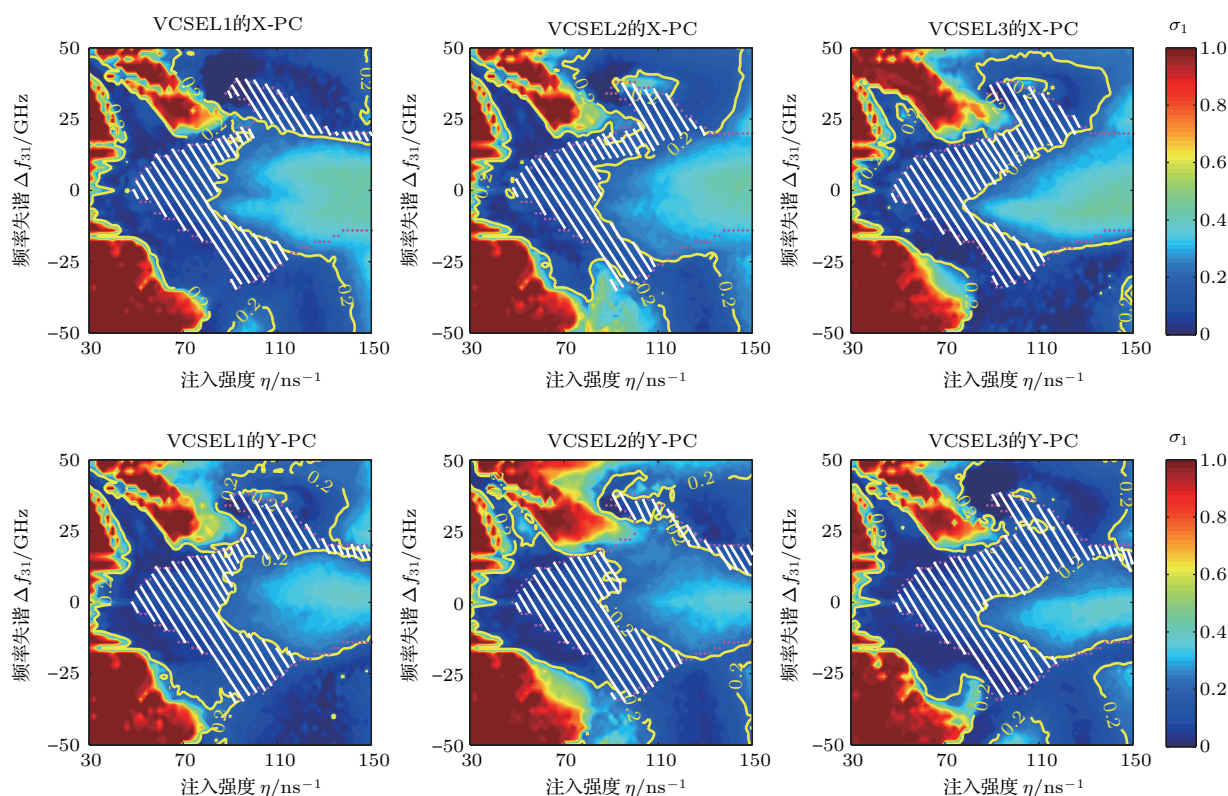


图7 (网刊彩色) 系统输出的六路信号的TDS峰值 σ_1 在 η 和 Δf_{31} 构成的参数空间的演化图 其中, 黄色虚线表示 $\sigma_1 < 0.2$ 的区域边界, 红色虚线表示X-PC与Y-PC共存的区域边界, 白色阴影表征双模共存且TDS得到有效抑制的区域
Fig. 7. (color online) Mappings of the σ_1 for six signals output from the system in the parameter space of η and Δf_{31} , where the yellow dashed lines label the area of $\sigma_1 < 0.2$, the red dashed lines label the area that the X-PC and Y-PC play comparative role, the white shadow label the area where both two modes can co-exist and their TDS can be suppressed effectively.

最后, 考虑到该系统产生的混沌信号在作为混沌熵源产生高速随机比特序列时有可能会遇到两路信号的合并问题, 因此有必要分析这六路信号之间的相关性。基于文献[34]中互相关的定义, 我们计算了系统中三个VCSELs输出的六路信号之间的互相关峰值 σ_2 随 η 和 Δf_{31} 的变化, 结果如图8所示。在图8中, 不同颜色代表不同的 σ_2 值, 而红色虚线标注的为X-PC与Y-PC共存的区

域边界, 黑色虚线与红色虚线围成的黑色阴影区则表征双模共存且信号之间相关性较小的区域。从图中可以看出: 尽管找不到能使三个VCSELs输出的六路信号彼此之间最大互相关都小于0.4的区域, 但当 $50 \text{ ns}^{-1} \leq \eta \leq 82 \text{ ns}^{-1}$, $-16 \text{ GHz} \leq \Delta f_{31} \leq 13 \text{ GHz}$ 时, 此时只有同一VCSEL的两个模式之间的互相关极大值不满足小于0.4以外, 其余的互相关系数都能满足小于0.4。进一步结合

图7, 可看出在该区域每个信号的TDS都可以得到抑制. 上述的仿真结果表明, 通过选取合适的注入强度和频率失谐的值, 该系统能输出六路TDS都可以得到较好抑制的混沌信号; 如果以其作为混沌

熵源, 则可直接产生六路随机数, 其中三路相关性较弱; 再通过合并六路中相关性弱的两路随机数序列, 则该系统具有获取更多路速率加倍的随机数序列的潜力.

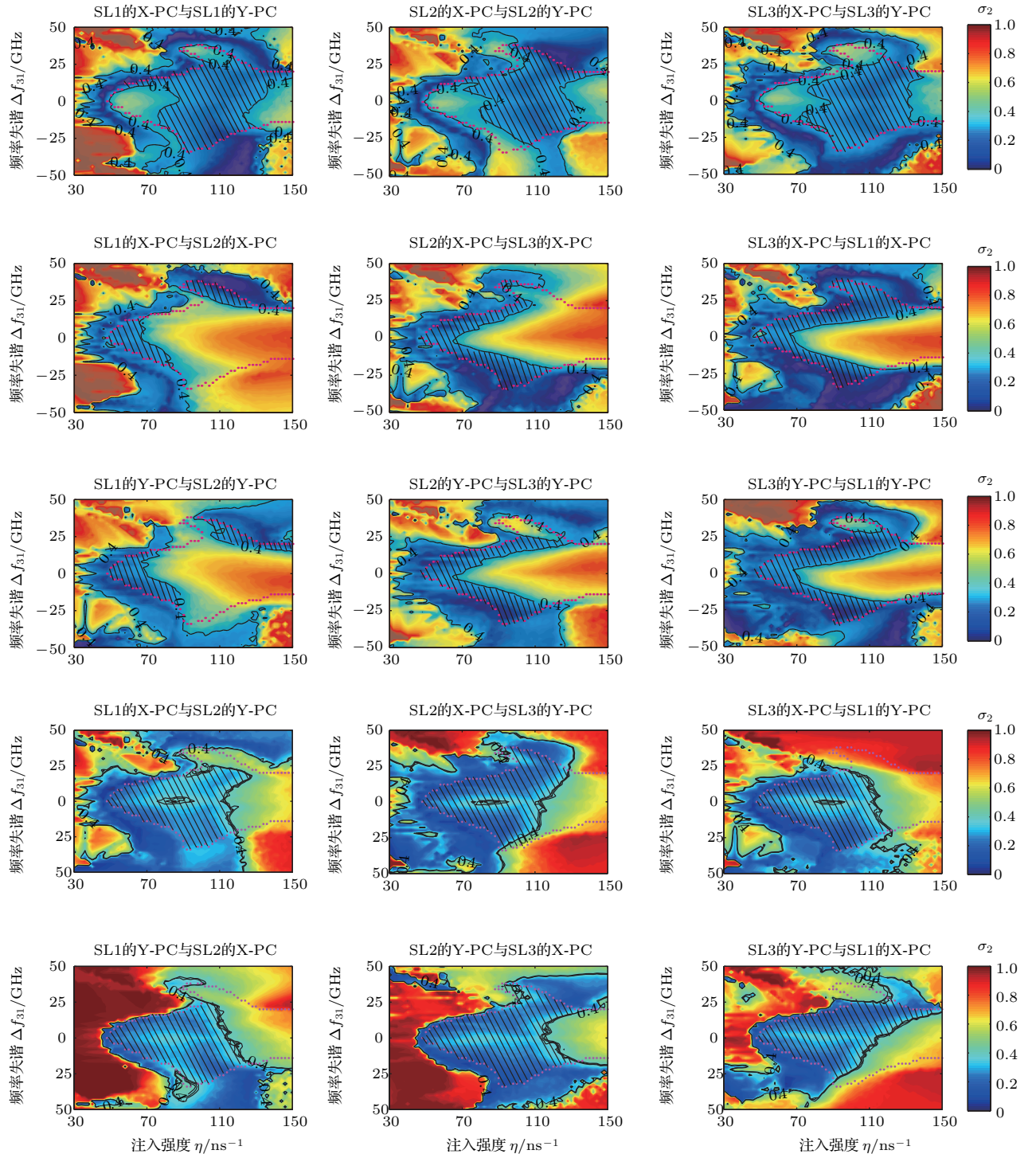


图8 (网刊彩色) 系统各偏振分量输出混沌序列之间的互相关峰值 σ_2 随 η 和 Δf_{31} 变化的演化图 (黑色虚线表示 $\sigma_2 < 0.4$ 的区域边界, 红色虚线表示 X-PC 与 Y-PC 共存的区域边界, 黑色阴影表征双模共存且信号之间相关性较小的区域)

Fig. 8. (color online) Evolution of σ_2 between different polarization components in the parameter space of η and Δf_{31} , where the black dashed lines label the area of $\sigma_2 < 0.4$, the red dashed lines label the area that the X-PC and Y-PC play comparative role, the black shadow label the area where both two modes can co-exist and σ_2 is comparatively low.

4 结 论

本文借助于自相关(SF)和互信息(MI)分析方法,对三个1550 nm-VCSELs单向偏振旋转耦合构成的环形系统中输出的多路信号的延时特性进行了研究.首先,基于自旋反转模型,得到了三个1550 nm-VCSELs均能输出功率相当的两偏振分量所需的注入强度和频率失谐范围;利用SF和MI对输出的六路信号的延时特性(TDS)进行了分析,给出了TDS得到较好抑制的耦合参数的取值范围;最后,分析了六路输出信号之间的相关性.研究结果表明:通过选取适当的注入强度和频率失谐,三个VCSELs可输出平均功率相比拟、TDS被有效抑制的六路信号;通过进一步筛选参数范围,可保证六路输出信号中仅同一VCSEL输出的X-PC与Y-PC之间存在较强的相关性,而其余信号之间的相关性均较弱.因此,该系统具有同时输出六路TDS被有效抑制的混沌信号的能力.如果以这六路混沌信号作为熵源则可直接产生六路随机比特序列,其中三路相关性较弱;如果进一步通过合并两路相关性弱的随机数序列,则有望获取更多路速率加倍的随机数序列.希望本文所提出的多路高性能混沌信号产生方案能为多路高速物理随机数的获取提供一种备选方案.

参考文献

- [1] Argyris A, Syvridis D, Larger L, Annovazzi-Lodi V, Colet P, Fischer I, Garcia-Ojalvo J, Mirasso C R, Pesquera L, Shore K A 2005 *Nature* **438** 343
- [2] Wu J G, Wu Z M, Fan L, Tang X, Deng W, Xia G Q 2013 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **25** 587
- [3] Lin F Y, Liu J M 2004 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **10** 991
- [4] 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
- [5] Kanter I, Aviad Y, Reidler I, Cohen E, Rosenbluh M 2010 *Nature Photon.* **4** 58
- [6] Wang A B, Li P, Zhang J G, Zhang J Z, Li L, Wang Y C 2013 *Opt. Express* **21** 20452
- [7] Li X Z, Li S S, Zhuang J P, Chan S C 2015 *Opt. Lett.* **40** 3970
- [8] Avila M J F, Leite J R R 2009 *Opt. Express* **17** 21442
- [9] Rontani D, Locquet A, Sciamanna M, Citrin D S 2007 *Opt. Lett.* **32** 2960
- [10] Hong Y H, Spencer P S, Shore K A 2014 *IEEE J. Quantum Electron.* **50** 236
- [11] Zhang L Y, Pan W, Yan L S, Luo B, Zou X H, Xiang S Y, Li N Q 2012 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **24** 1693
- [12] Yan S L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 160505 (in Chinese) [颜森林 2012 物理学报 **61** 160505]
- [13] Lin F Y, Liu J M 2003 *IEEE J. Quantum Electron.* **39** 562
- [14] Zhang W L, Pan W, Luo B, Li X F, Zou X H, Wang M Y 2007 *Appl. Opt.* **46** 7262
- [15] Li S S, Chan S C 2015 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **21** 1800812
- [16] Wu J G, Wu Z M, Xia G Q, Feng G Y 2012 *Opt. Express* **20** 1741
- [17] Iga K 2000 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **6** 1201
- [18] Koyama F 2006 *J. Lightwave Technol.* **24** 4502
- [19] Xiang S Y, Pan W, Luo B, Yan L S, Zou X H, Jiang N, Li N Q, Zhu H N 2012 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **24** 1267
- [20] Li X F, Pan W, Luo B, Ma D, Zhao Z, Deng G 2004 *Chin. Opt. Lett.* **2** 278
- [21] Xiang S Y, Pan W, Yan L S, Luo B, Zou X H, Jiang N, Wen K H 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 014203
- [22] Lin H, Hong Y H, Shore K A 2014 *J. Lightwave Technol.* **32** 1829
- [23] Li Y, Wu Z M, Zhong Z Q, Yang X J, Mao S, Xia G Q 2014 *Opt. Express* **22** 19610
- [24] Hong Y H 2013 *Opt. Express* **21** 17894
- [25] Miguel M S, Feng Q, Moloney J V 1995 *Phys. Rev. A* **52** 1728
- [26] Regalado J M, Prati F, Miguel M S, Abraham N B 1997 *IEEE J. Quantum Electron.* **33** 765
- [27] Sciamanna M, Gatare I, Locquet A, Panajotov 2007 *Phys. Rev. E* **75** 056213
- [28] Xiang S Y, Pan W, Luo B, Yan L S, Zou X H, Li N Q 2013 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **19** 1700108
- [29] Rontani D, Locquet A, Sciamanna M, Citrin D S, Ortin S 2009 *IEEE J. Quantum Electron.* **45** 879
- [30] Bandt C, Pompe B 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 174102
- [31] Torre M S, Hurtado A, Quirce A, Valle A, Pesquera L, Adams M J 2010 *IEEE J. Quantum Electron.* **47** 92
- [32] Al-Seyab R, Schires K, Khan N A, Hurtado A, Henning I D, Adams M J 2011 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **17** 1242
- [33] Deng T, Wu Z M, Xia G Q 2015 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **27** 2075
- [34] Quirce A, Valle A, Thienpont H, Panajotov K 2016 *J. Opt. Soc. Am. B* **33** 90

Generations of multi-channel high-quality chaotic signals based on a ring system composed of polarization rotated coupled 1550 nm vertical-cavity surface-emitting lasers*

Yang Feng Tang Xi Zhong Zhu-Qiang Xia Guang-Qiong Wu Zheng-Mao[†]

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

(Received 5 April 2016; revised manuscript received 11 July 2016)

Abstract

Optical chaos based on semiconductor laser (SL) has attracted much attention due to its potential application in various fields such as secure optical communication, chaotic radar, fast physical random bit generation, etc. By introducing external perturbations such as optical feedback, optical injection or optoelectronic feedback, SL can be driven into chaotic dynamic state. In general, an obvious time-delay signature (TDS) can be observed in a chaotic SL system with optical feedback, which is undesirable in some applications. So far, several schemes have been reported on the suppression of the TDS in chaotic SL systems, which are mostly based on external cavity feedback systems or mutually coupled systems. In this work, a novel scheme for suppressing TDS to generate multi-channel high-quality chaotic signals is proposed and numerically simulated based on a ring system composed of three unidirectionally polarization-rotated coupled 1550 nm vertical-cavity surface-emitting lasers (1550 nm-VCSELs). In this scheme, the output from the first 1550 nm-VCSEL passes through an optical circulator (OC), a Faraday rotator (FR) and a variable attenuator (VA), and then is injected into the second 1550 nm-VCSEL. The output from the second (third) 1550 nm-VCSEL passes through a similar path mentioned above, and then is injected into the third (first) 1550 nm-VCSEL. The polarization direction and the strength of injection light are controlled by the FR and VA, respectively. Adopting the spin flip model (SFM), the polarization-resolved dynamical characteristics of the three VCSELs in the ring system are analyzed. By the aid of self-correlation function (SF) and mutual information (MI), the influences of the coupled strength and frequency detuning on the TDS of polarization-resolved chaotic signal output from the three VCSELs are discussed. The results show that through selecting suitable coupling strength and frequency detuning, both the X-polarization component (X-PC) and Y-polarization component (Y-PC) in the three VCSELs can simultaneously be lased with comparative output powers, and the TDSs of these polarization components can also be effectively suppressed. Furthermore, we investigate the cross-correlation among the six-channel chaotic signals output from these VCSELs, and determine the region of coupled parameters for generating six-channel chaotic signals, within which satisfied is the weak cross-correlation between two signals from different VCSELs. Theoretically, the six-channel chaotic outputs can be used as physical entropy sources to generate six-channel random number sequences. By further merging the above two channel random bit sequences with weak cross-correlation, more channel random bit sequences with higher rate can be obtained. We hope this work can provide an effective guidance for multi-channel high-rate random bit generation.

Keywords: vertical-cavity surface-emitting semiconductor lasers, polarization rotation, chaos, time delay signature

PACS: 42.55.Px, 42.65.Sf, 05.45.Tp, 05.45.Pq

DOI: 10.7498/aps.65.194207

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61275116, 61475127, 61575163), the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (Grant No. XDJK2016D060) and the Postgraduate Research and Innovation Project of Chongqing Municipality, China (Grant No. CYB14054).

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