

混沌光注入垂直腔面发射激光器混沌输出的时延和带宽特性

苏斌斌 陈建军 吴正茂 夏光琼

Performances of time-delay signature and bandwidth of the chaos generated by a vertical-cavity surface-emitting laser under chaotic optical injection

Su Bin-Bin Chen Jian-Jun Wu Zheng-Mao Xia Guang-Qiong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 244206 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.244206

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.244206>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I24>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高斯切趾型光纤布拉格光栅外腔半导体激光器的混沌输出特性

Characteristics of chaotic output from a Gaussian apodized fiber Bragg grating external-cavity semiconductor laser

物理学报.2017, 66(24): 244207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.244207>

大幅度增加弛豫振荡频率来实现毫米级外腔半导体激光器的外腔机制转换

Conversion of external cavity mechanism of millimeter-level external cavity semiconductor laser by significantly increasing relaxation oscillation frequency

物理学报.2017, 66(23): 234204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.234204>

利用混沌激光多位量化实时产生 14 Gb/s 的物理随机数

14-Gb/s physical random numbers generated in real time by using multi-bit quantization of chaotic laser

物理学报.2017, 66(23): 234205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.234205>

InP/InGaAsP 多量子阱自发辐射谱的解析函数

Analytic function for spontaneous emission spectrum of InP/InGaAsP multi-quantum wells

物理学报.2017, 66(13): 134204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.134204>

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>

混沌光注入垂直腔面发射激光器混沌输出的 时延和带宽特性*

苏斌斌¹⁾ 陈建军¹⁾²⁾ 吴正茂^{1)†} 夏光琼^{1)‡}

1)(西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715)

2)(新疆医科大学医学工程技术学院, 乌鲁木齐 830011)

(2017年6月30日收到; 2017年7月21日收到修改稿)

提出并仿真论证了利用一个双光反馈垂直腔面发射激光器(定义为主 VCSEL, M-VCSEL)产生的混沌光平行单向注入到另一个 VCSEL(定义为副 VCSEL, S-VCSEL)使所产生的混沌信号的延时特征(TDS)和带宽特性得以优化的技术方案. 首先, 基于 VCSELs 自旋反转模型, 结合自相关分析方法, 通过对系统参量进行优化, 可使双光反馈 M-VCSEL 的 X 偏振分量(X -PC)和 Y 偏振分量(Y -PC)均输出混沌信号, 且两路混沌信号的平均强度相当、TDS 均较弱; 在此基础上, 将双光反馈 M-VCSEL 在优化条件下得到的混沌信号平行单向注入到 S-VCSEL 中, 以获得两路 TDS 得到抑制、带宽更宽的混沌信号. 通过考察两个偏振分量输出混沌信号的 TDS 以及混沌带宽在注入强度和频率失谐构成的参数空间的演化规律, 确定了系统获取两路 TDS 被抑制、宽带宽的混沌信号所需的注入参数范围.

关键词: 垂直腔面发射激光器, 混沌, 时延特征, 带宽

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

DOI: 10.7498/aps.66.244206

1 引言

半个世纪以来, 混沌因其在基础科学和应用科学领域所展现出巨大的应用前景而受到极大关注. 作为混沌领域的一个重要分支, 激光混沌已广泛应用于混沌保密通信、混沌雷达、高速随机数产生等领域^[1-9]. 已有研究表明: 半导体激光器(SLs)在光反馈^[10,11]、光注入^[12-14]和光电反馈^[15,16]等外部扰动作用下均可获得混沌光输出, 其中光反馈 SLs 混沌系统由于结构简单、易于控制、可产生复杂混沌光而被认为是理想的混沌源之一.

近年来, 随着社会信息化程度的不断提高, 人们对信息传输有着越来越高的要求, 而兼有高保密性、大传输速率的混沌保密通信正日益受到人们的关注. 在混沌保密通信中, 信息传输过程中的安

全性依赖于进行高维混沌吸引子重构时的计算复杂程度^[17]. 相比较其他外部扰动而言, 光反馈 SLs 系统更易产生高维激光混沌. 然而, 由于光在外腔中来回反射, 使系统输出的混沌信号具有明显的延时特征(TDS)^[18], 这可能导致高维混沌在相空间内的投影成为低维混沌, 窃听者可根据此特性将混沌信号重构, 从而严重威胁通信安全^[19]. 因此, 如何获取 TDS 得到抑制的混沌载波是混沌保密通信所需解决的关键问题之一^[20-23]. 已有的研究表明, 单光反馈 SLs 输出混沌信号 TDS 仅在反馈延迟时间与弛豫振荡近似相等时可以得到一定程度的抑制^[20]. 而双光反馈 SLs 系统由于引入了新的自由度, 因而有着更为复杂的混沌信号输出. 相关研究结果已证实, 在合适的反馈参数条件下, 双光反馈 SLs 输出混沌信号的 TDS 可得到更为有效的抑

* 国家自然科学基金(批准号: 61475127, 61575163, 61775184)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zmwu@swu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: gqxia@swu.edu.cn

制^[21]. 上述研究大多是基于边发射分布反馈半导体激光器(DFB-SLs)所开展的.

相比于边发射SLs, 垂直腔面发射激光器(VCSELs)具有单纵模输出、阈值电流低、调制速率高、与光纤耦合损耗小、易于集成激光阵列等独特优点^[24-26]. 特别地, VCSELs腔体结构的圆对称性和腔内增益介质的弱各向异性导致其有可能同时输出两个正交的偏振分量(X-PC和Y-PC), 将其分别用作两路混沌载波有利于提高混沌保密通信系统的通信容量. 最近, Lin等^[27]的实验研究证实VCSEL在双外腔反馈(DOF)作用下, 两个正交偏振分量输出的混沌信号的TDS均可达到较好的抑制. 然而, 由于受限于VCSELs的弛豫振荡的限制, 所获得的混沌带宽较小(几个GHz水平), 使其在高速混沌保密通信中的应用有一定局限性.

本课题组在前期的研究工作中发现: 通过将一个单光反馈作用下的VCSEL(定义为主VCSEL, M-VCSEL)所产生的混沌信号注入到另外一个VCSEL(定义为副VCSEL, S-VCSEL), 在合适的注入参数条件下S-VCSEL输出混沌信号比M-VCSEL输出的混沌信号具有更弱的TDS、更宽的混沌带宽^[28]. 在此基础上, 考虑到DOF比单外腔反馈(SOF)更利于获取弱TDS混沌信号^[27]以及通过混沌光注入可进一步对混沌信号性能提升^[28], 本文提出并仿真论证了由一个双光反馈作用下的M-VCSEL和另一个VCSEL(S-VCSEL)构成的主副混沌系统, 通过将M-VCSEL产生的混沌光注入到S-VCSEL中, 以同时实现混沌信号TDS的进一步抑制以及带宽的增强, 从而达到获取两路高质量的混沌信号的目的.

2 系统与理论模型

图1为主副VCSELs混沌系统的结构示意图. M-VCSEL输出的光信号经准直透镜(AL)后被分束器(BS1)分成两部分. 其中一部分光经中性密度衰减片(NDF1)、平面镜(M1)反馈回M-VCSEL; 另一部分则经另外一个分束器(BS2)再次分成两部分, 其中一部分经过NDF2和M2后反馈回M-VCSEL中, 而另外一部分经光隔离器(ISO)和NDF3后注入进S-VCSEL. 其中, ISO用于确保光单向传输; NDF1, NDF2分别用于调节M-VCSEL两个反馈腔的反馈强度, 而NDF3则用于调节光注入进S-VCSEL的强度. 通过调节M1或M2的位置, 可改变反馈腔1和反馈腔2的反馈延迟时间.

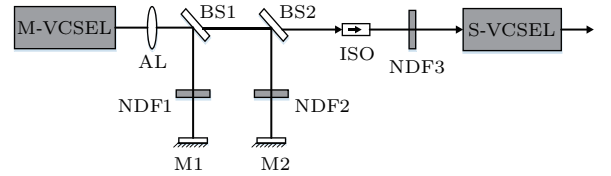


图1 主副VCSELs混沌系统的结构图(M-VCSEL, 主VCSEL; S-VCSEL, 副VCSEL; AL, 透镜; BS, 分束器; M, 平面镜; NDF, 中性密度衰减片; ISO, 光隔离器)

Fig. 1. Schematic diagram of a master-slave VCSELs chaotic system. M-VCSEL, master VCSEL; S-VCSEL, slave VCSEL; AL, aspheric lens; BS, beam splitter; M, mirror; NDF, neutral density filter; ISO, optical isolator.

基于自旋反转模型^[29,30], 双光反馈作用下的M-VCSEL以及光注入下的S-VCSEL的速率方程组可描述为^[31,32]

$$\begin{aligned} \dot{E}_{X,Y}^m &= k^m(1 + i\alpha^m)[(N^m - 1)E_{X,Y}^m \pm in^m E_{Y,X}^m] \mp (\gamma_a^m + i\gamma_p^m)E_{X,Y}^m + F_{X,Y}^m \\ &\quad + f_1 E_{X,Y}^m(t - \tau_1) e^{-i2\pi\nu^m \tau_1} + f_2 E_{X,Y}^m(t - \tau_2) e^{-i2\pi\nu^m \tau_2}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{X,Y}^s &= k^s(1 + i\alpha^s)[(N^s - 1)E_{X,Y}^s \pm in^s E_{Y,X}^s] \mp (\gamma_a^s + i\gamma_p^s)E_{X,Y}^s + F_{X,Y}^s \\ &\quad + \eta E_{X,Y}^m(t - \tau_c) e^{-i2\pi\nu^m \tau_c + i2\pi\Delta\nu t}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\dot{N}^{m,s} = \gamma_e^{m,s}[\mu^{m,s} - N^{m,s}(1 + |E_X^{m,s}|^2 + |E_Y^{m,s}|^2) + in^{m,s}(E_X^{m,s} E_Y^{m,s*} - E_Y^{m,s} E_X^{m,s*})], \quad (3)$$

$$\dot{n}^{m,s} = -\gamma_s^{m,s} - \gamma_e^{m,s}[n^{m,s}(|E_X^{m,s}|^2 + |E_Y^{m,s}|^2) + iN^{m,s}(E_Y^{m,s} E_X^{m,s*} - E_X^{m,s} E_Y^{m,s*})], \quad (4)$$

式中, 上标m和s分别表示M-VCSEL和S-VCSEL; 下标1, 2分别表征反馈腔1和反馈腔2; 下标X, Y分别表示VCSELs的X偏振分量(X-PC)和Y偏

振分量(Y-PC), X-PC和Y-PC分别沿着VCSEL有源区两个正交的晶轴方向. E 表示光场的慢变复振幅, N 表示VCSELs导带与价带之间总的反

转载流子密度, n 表示自旋向上与自旋向下能级对应的载流子密度之差, k 表示光场衰减率, α 表示线宽增强因子, γ_e 为总载流子的衰减速率, γ_s 为自旋反转速率, μ 为归一化偏置电流. 考虑到 VCSEL 有源区生长过程中弹光效应和电光效应导致激光器的圆形横向对称性被破坏从而导致线性极化呈现各向异性, 其中幅度的各向异性(即二向色性)用 γ_a 描述, 而相位的各向异性(即双折射)用 γ_p 表征, 双折射将导致 X-PC 和 Y-PC 的激光频率存在差异^[33]. f 表征反馈强度, η 表征从 M-VCSEL 注入到 S-VCSEL 的注入强度, τ_1 和 τ_2 为 M-VCSEL 两个反馈腔的反馈延迟时间, τ_c 为 M-VCSEL 输出的混沌光注入到 S-VCSEL 的反馈延迟时间, ν^m 与 ν^s 分别为 M-VCSEL 和 S-VCSEL 的中心频率, $\Delta\nu = \nu^m - \nu^s$ 为频率失谐. F 为朗之万噪声源^[25], 表示为

$$F_X^{m,s} = \sqrt{\frac{\beta_{sp}}{2}} \left(\sqrt{N^{m,s} + n^{m,s}} \xi_1^{m,s} + \sqrt{N^{m,s} - n^{m,s}} \xi_2^{m,s} \right), \quad (5)$$

$$F_Y^{m,s} = -i \sqrt{\frac{\beta_{sp}}{2}} \left(\sqrt{N^{m,s} + n^{m,s}} \xi_1^{m,s} - \sqrt{N^{m,s} - n^{m,s}} \xi_2^{m,s} \right), \quad (6)$$

其中, ξ 为高斯白噪音, 其平均值为 0, 方差为 1; β_{sp} 为自发辐射速率.

本文采用自相关(SF)^[31]分析方法对时滞系统的 TDS 进行评估. 其中, SF 定义为^[34]

$$C(\Delta t) = \frac{\langle [I(t + \Delta t) - \langle I(t + \Delta t) \rangle][I(t) - \langle I(t) \rangle] \rangle}{\sqrt{\langle [I(t + \Delta t) - \langle I(t + \Delta t) \rangle]^2 \rangle \langle [I(t) - \langle I(t) \rangle]^2 \rangle}}, \quad (7)$$

式中, Δt 表示时移, $I(t)$ 表征 VCSEL 混沌输出时间序列, $\langle \cdot \rangle$ 表示时间平均值. σ 为 SF 函数 $C(\Delta t)$ 在时移 Δt 位于反馈延迟时间附近的最大峰值, σ 值越大, 混沌系统的 TDS 越明显. 计算 SF 时所采用的混沌时间序列长度为 2000 ns, 步长 2 ps.

另外, 采用有效带宽(EBW)^[35,36]来标定混沌信号的带宽. EBW 的计算方法为: 将整个频谱中的能量成分依次从高到低排序, 然后累加至整个谱中能量成分的 80%, 此时包含的频率范围即为混沌信号的 EBW.

3 结果与讨论

利用四阶 Runge-Kutta 算法可对速率方程组(1)–(4)进行数值仿真. 在数值仿真过程中, 假定两个 VCSELs 具有相同的内部参数, 所采用的内部参数如下^[37]: $k = 300 \text{ ns}^{-1}$, $a = 3$, $\gamma_s = 50 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_p = 10 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_e = 1 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_a = 0.1 \text{ ns}^{-1}$, $\tau_c = 0 \text{ ns}$, $\beta_{sp} = 10^{-6} \text{ ns}^{-1}$, S-VCSEL 的中心频率 $\nu^s = 3.529 \times 10^{14} \text{ GHz}$ (对应的中心波长为 850 nm).

图 2 给出了自由运行下 VCSEL 两个正交的偏振分量及总的输出平均功率随归一化电流的 $P-\mu$ 曲线. 在数值分析中, 归一化电流 μ 的取值范围为 0–3.5. 由图 2 可知: 当 μ 大于 1 时, X-PC 处于激射状态, Y-PC 被抑制; 当 μ 增加到 1.7 时, Y-PC 也开始起振, 随着 μ 的进一步增加, Y-PC 的功率迅速增加而 X-PC 的功率增长趋势缓慢; 当 μ 增加至 2.7 时, 此时自由运行 VCSEL 输出的两个分量具有相同的功率; 之后, 随着 μ 的增加, Y-PC 的输出功率将大于 X-PC 的输出功率, 系统输出以 Y-PC 为主导. 鉴于 $\mu = 2.7$ 时激光器的两偏振分量具有相同的输出平均功率, 有利于获取两路混沌信号. 因此在下面的讨论中, 取 $\mu = 2.7$, 此时激光器的弛豫振荡频率 ($= \sqrt{2k\gamma_e(\mu - 1)}/(2\pi)$) 为 5.08 GHz, 弛豫振荡周期 $\tau_R \approx 0.19 \text{ ns}$.

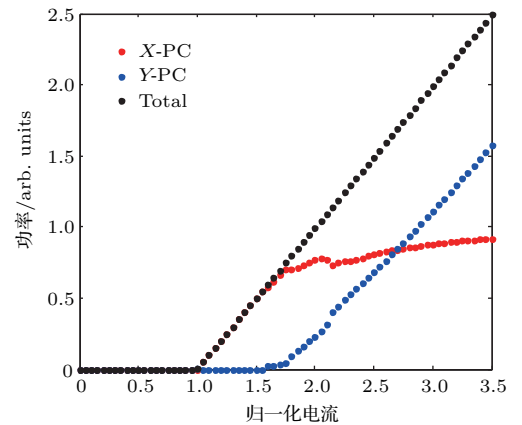


图 2 (网刊彩色) 自由运行 VCSEL 偏振分量的 $P-\mu$ 曲线
Fig. 2. (color online) Polarization-resolved $P-\mu$ curves of free-running VCSEL.

3.1 M-VCSEL 输出混沌信号的 TDS

已有的研究表明, 双外腔系统混沌信号的 TDS 强烈依赖于两个腔的反馈参量^[21]. 这里假

定两个腔具有相同的反馈强度, 腔1的反馈时间 $\tau_1 = 3 \text{ ns}$ [31], 讨论反馈腔2的反馈延迟时间对 M-VCSEL 输出混沌 TDS 的影响. 图 3 给出了当 $f_1 = f_2 = 10 \text{ ns}^{-1}$ 时, M-VCSEL 输出的 (a) X-PC 和 (b) Y-PC 时间序列的 SF 函数峰值 σ 随 τ_2 的变化曲线. 如图 3 所示, 两个偏振分量输出混沌信号的 SF 峰值 σ 随 τ_2 变化均呈现波动, 且两个偏振分量输出的混沌信号的 SF 峰值 σ 取极小值时所需的 τ_2 的值存在差异. 结合图 3(a) 和图 3(b) 可以看出, 当 $\tau_2 = 3.09 \text{ ns}$ 时, Y-PC 输出的混沌信号的 σ 值非常低, 而同时 X-PC 输出的混沌信号的 σ 值也相对较小. 因此, 在接下来的讨论中, τ_2 的值设定为 3.09 ns .

在双光反馈系统中, 若两个外腔的反馈参数完全一致, 则 DOF 过渡为 SOF. 图 4 给出了 (a) SOF 及 (b) DOF 条件下 M-VCSEL 两个偏振分量输出混沌的时间序列及其对应的 SF 曲线. 从图中可以看出, 尽管 SOF 作用时 M-VCSEL 两个偏振分量输出的时间序列依然为混沌, 但其对应的 X-PC 和 Y-PC 的 SF 曲线在反馈延迟时间附近出现了明显的峰值, 分别为 0.54 和 0.57. 说明此时系统输出的混沌信号具有明显的 TDS; 而对于 DOF 的情形, X-PC 和 Y-PC 输出混沌信号的 SF 峰值相较于 SOF 情形显著减小, 分别为 0.20 和 0.16, 说明此时混沌输出信号具有弱的 TDS.

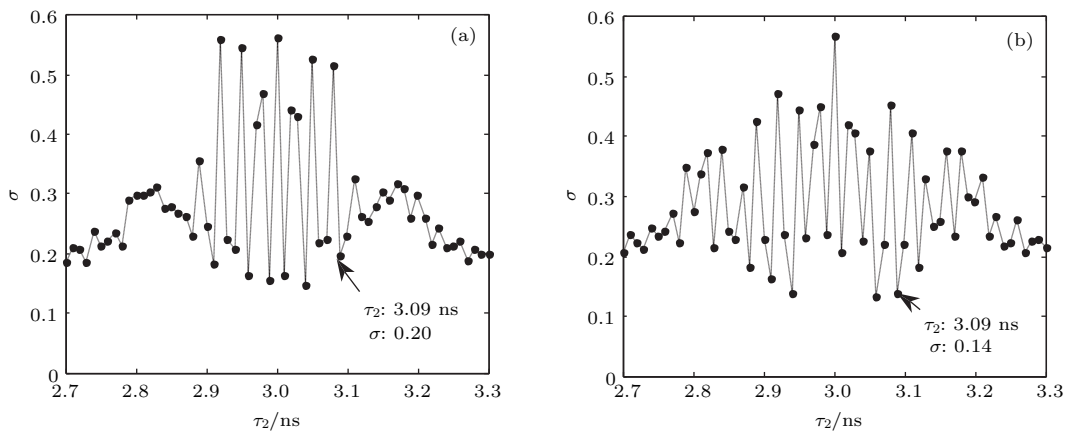


图 3 M-VCSEL 的 (a) X-PC 与 (b) Y-PC 时间序列 SF 峰值 σ 随 τ_2 的变化

Fig. 3. Dependence of characteristic peak of SF of time series on τ_2 for (a) X-PC and (b) Y-PC of M-VCSEL.

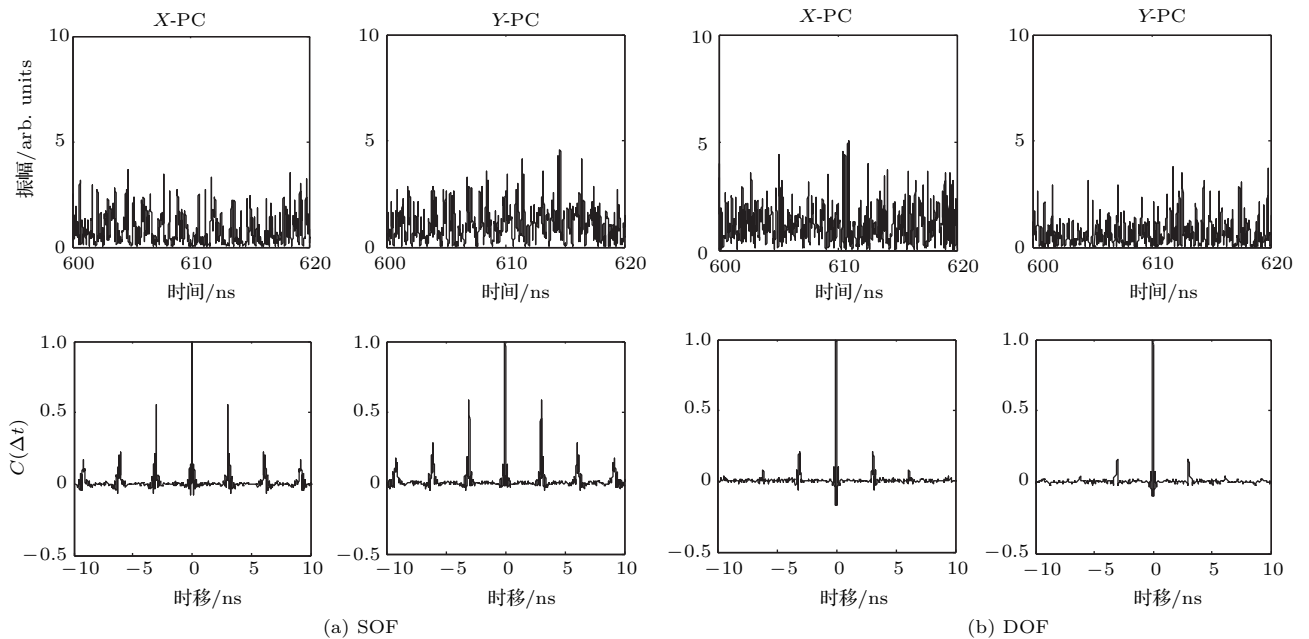


图 4 (a) SOF 和 (b) DOF 条件下 M-VCSEL 的 X-PC 和 Y-PC 输出混沌的时间序列及其对应的 SF 曲线

Fig. 4. Time series and SF curves of X-PC and Y-PC chaotic outputs of M-VCSEL under (a) SOF and (b) DOF.

3.2 混沌光注入下 S-VCSEL 输出混沌信号的 TDS

上述研究结果表明, 通过优化 DOF 的反馈参量, 可使 M-VCSEL 两偏振分量输出混沌的 TDS 得到一定程度的抑制. 接下来研究在优化条件下 M-VCSEL 输出的混沌信号平行注入到另外一个 VCSEL(副 VCSEL, S-VCSEL) 中所获得的两路正交混沌信号的 TDS 随注入参数的演化规律. 图 5 给出了频率失谐 $\Delta\nu$ 取 $-10, 0$ 以及 10 GHz 时, S-VCSEL 两个正交的偏振分量输出混沌信号的

TDS 峰值 σ 随注入强度 η 的变化曲线. 需要指出的是, 由于仅当 $\eta > 4 \text{ ns}^{-1}$ 时, S-VCSEL 的两个偏振分量才呈现混沌输出, 因此只对 $\eta > 4 \text{ ns}^{-1}$ 的情形进行分析. 如图 5 所示, 对于所给的频率失谐下, 当 $4 \text{ ns}^{-1} < \eta < 100 \text{ ns}^{-1}$ 时 X-PC 和 Y-PC 输出的混沌信号的 σ 值均小于由 M-VCSEL 输出的对应偏振分量的 σ 值, 即在该范围内, 两个偏振分量的输出混沌的 TDS 均可得到进一步抑制. 特别地, 当 $4 \text{ ns}^{-1} < \eta < 40 \text{ ns}^{-1}$ 时, S-VCSEL 两偏振分量输出混沌信号的 σ 值均在 0.1 以下, 表明混沌输出信号的 TDS 得到了有效抑制.

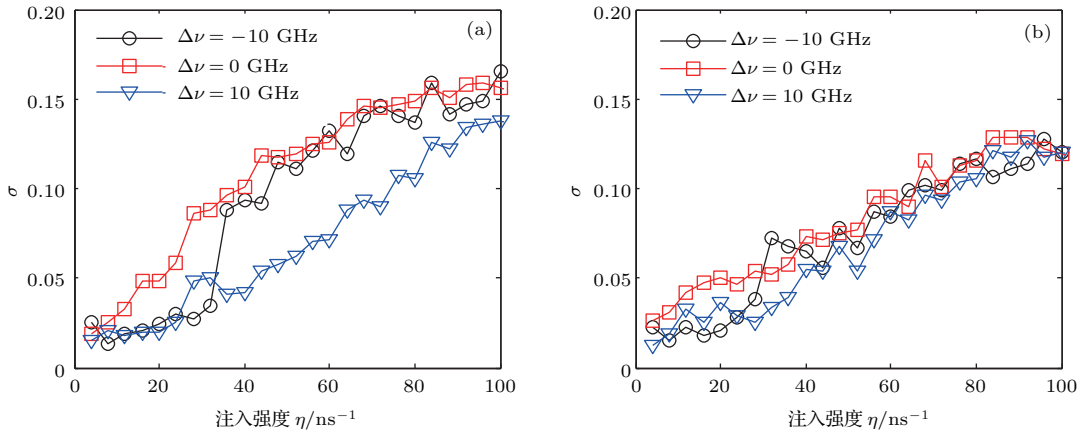


图 5 (网刊彩色) $\Delta\nu = -10, 0, 10$ GHz 时, S-VCSEL 的 (a) X-PC 和 (b) Y-PC 输出混沌 TDS 峰值 σ 随注入强度 η 的变化
Fig. 5. (color online) Relationship between the peak σ and injection strength η for TDS of (a) X-PC and (b) Y-PC chaotic outputs from S-VCSEL under detuning frequency $\Delta\nu = -10, 0, 10$ GHz, respectively.

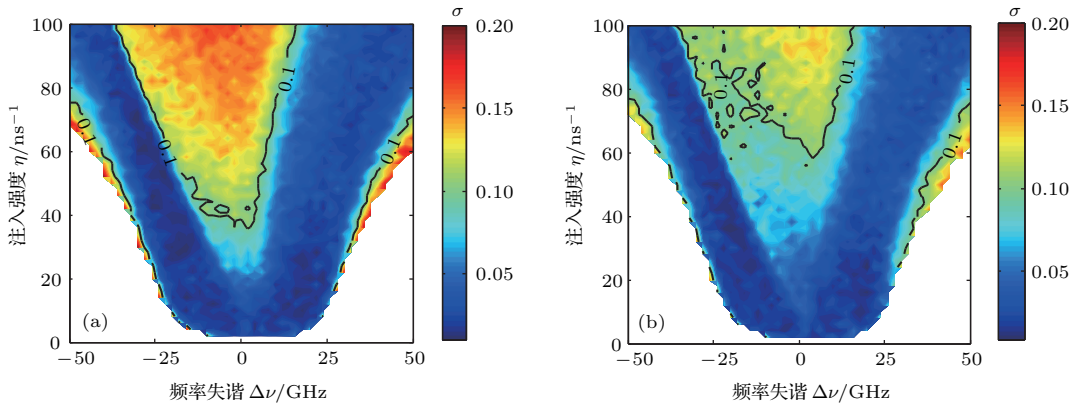


图 6 (网刊彩色) S-VCSEL 的 (a) X-PC 和 (b) Y-PC 的 TDS σ 值随 η 和 $\Delta\nu$ 的演化图
Fig. 6. (color online) Evolution map of σ for TDS of (a) X-PC and (b) Y-PC of the S-VCSEL in the parameter space of η and $\Delta\nu$.

为进一步更清晰地呈现频率失谐 $\Delta\nu$ 和注入强度 η 对 S-VCSEL 输出混沌信号 TDS 的影响, 图 6 给出了 S-VCSEL 两个偏振分量输出混沌的 SF 函数的 σ 值在由频率失谐 $\Delta\nu$ 和注入强度 η 构成的参数空间演化图. 图中无色区域表征 S-VCSEL 两偏振分量输出的信号并非混沌信号, 有色区域则

对应 S-VCSEL 在混沌光注入的驱动下呈现混沌态, 不同的颜色表征不同的 σ 值. 黑色虚线表示 σ 值为 0.1 , 在黑色虚线围成的深蓝色区域则对应 σ 值小于 0.1 . 从图 6 可以看出, S-VCSEL 两个偏振分量输出混沌信号的 TDS 被有效抑制的参数区域均呈现出“V”字形分布特征, 但 Y-PC 输出混沌信号的

$\sigma < 0.1$ 所需的参数区域更大. 其原因是注入的混沌信号中, X-PC的TDS相对较大所导致的.

3.3 M-VCSEL和S-VCSEL输出混沌信号的EBW特性

接下来讨论将M-VCSEL输出的混沌光注入到S-VCSEL后所产生的混沌信号带宽随注入参数的变化. 图7给出了当注入强度 $\eta = 50 \text{ ns}^{-1}$, $\Delta\nu = -20 \text{ GHz}$ 时, S-VCSEL在M-VCSEL产生的混沌光注入下X-PC与Y-PC输出的时间序列与功率谱. 为了比较, 由M-VCSEL所产生的注入光

的时间序列以及功率谱也在图7中给出. 图中功率谱的阴影区域为EBW的提取区域. 从图7可以看出, 由双光反馈M-VCSEL所提供的注入X-PC和Y-PC混沌信号的EBW分别为10.72 GHz和10.10 GHz, 其平行注入到S-VCSEL后, 所获得的X-PC和Y-PC混沌输出的功率谱更加平坦, EBW分别达到20.13 GHz与18.63 GHz. 这是由于光注入到S-VCSEL中, 注入光与S-VCSEL激光光的拍频效应将在拍频频率处提供一个增益, 导致在拍频频率(20 GHz)附近的功率分布得到加强, 从而导致S-VCSEL输出混沌的带宽得到展宽.

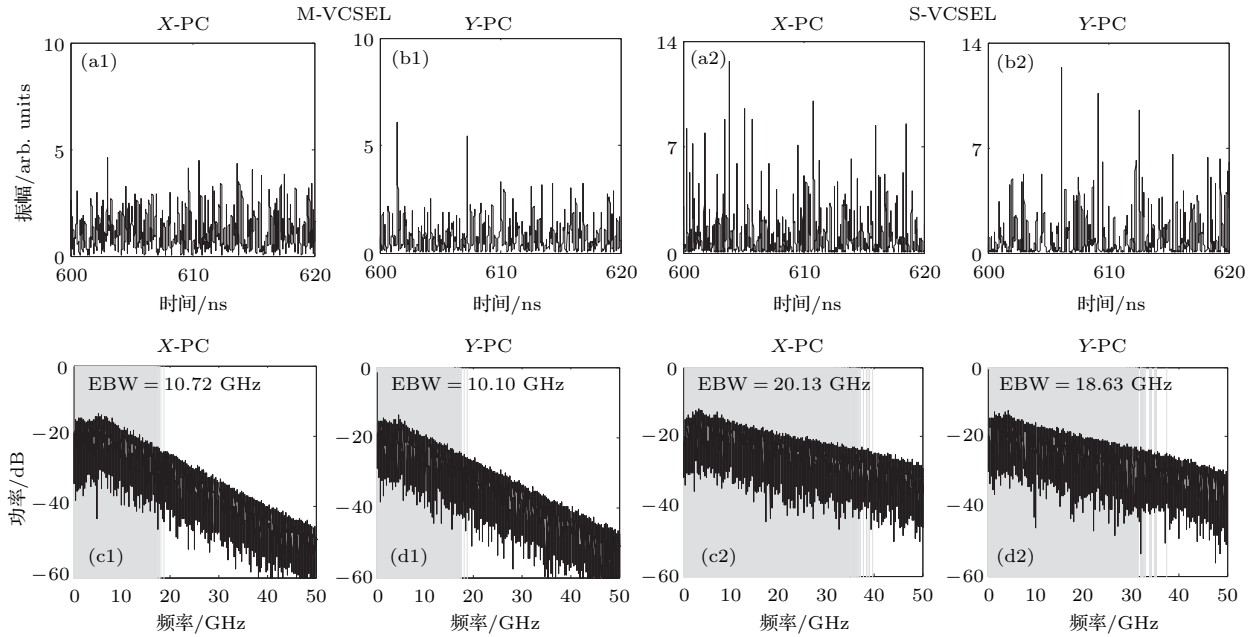


图7 M-VCSEL的X-PC与Y-PC混沌输出的(a1), (b1)时间序列与(c1), (d1)功率谱及当 $\eta = 50 \text{ ns}^{-1}$, $\Delta\nu = -20 \text{ GHz}$ 时, S-VCSEL的X-PC与Y-PC在M-VCSEL产生混沌光注入下其混沌输出的(a2), (b2)时间序列与(c2), (d2)功率谱

Fig. 7. Chaotic outputs (a1), (b1) time series and (c1), (d1) power spectra of X-PC and Y-PC of M-VCSEL; chaotic outputs (a2), (b2) time series and (c2), (d2) power spectra of X-PC and Y-PC of S-VCSEL with $\eta = 50 \text{ ns}^{-1}$ and $\Delta\nu = -20 \text{ GHz}$.

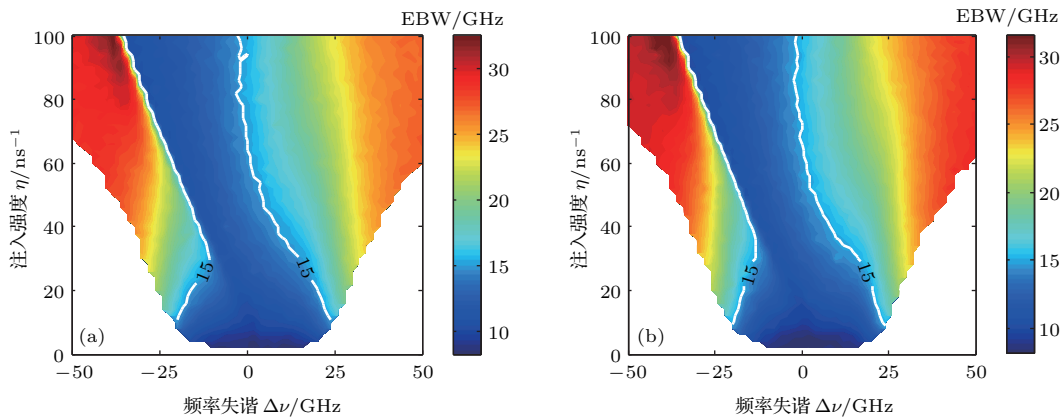


图8 (网刊彩色) S-VCSEL的(a) X-PC和(b) Y-PC的EBW随 $\Delta\nu$ 和 η 的演化图

Fig. 8. (color online) Mappings of EBW evolution of (a) X-PC and (b) Y-PC of the S-VCSEL in the parameter space of $\Delta\nu$ and η .

为了系统分析M-VCSEL产生的混沌光注入到S-VCSEL后最终获取的混沌信号带宽与注入参数的关联关系,图8给出了S-VCSEL的两偏振分量输出混沌的带宽在由 η 和 $\Delta\nu$ 所构成参数空间内的分布图.图中不同的颜色对应于不同的混沌带宽,白色虚线表示带宽为15 GHz的参数位置.这些虚线将参数空间各自分成三个区域,中间的深蓝色区域表示带宽低于15 GHz.在这一区域中频率失谐相对较小,S-VCSEL主要呈现非稳定的注入锁定,即其动力学行为跟随M-VCSEL的动力学行为,因此导致其混沌带宽与M-VCSEL输出的混沌信号带宽相比拟.而对于频率失谐更大以及注入强度更强的区域,X-PC和Y-PC输出混沌的带宽均得到明显增强.通过结合图6的结果,可得到获取两路弱TDS、宽带宽的混沌信号所需的注入参数范围.

4 结 论

基于VCSEL自旋反转模型并结合对时间序列的SF分析方法,数值研究了由一个双光反馈M-VCSEL与另一个S-VCSEL构成的主副混沌系统所产生的混沌信号的TDS和EBW特性.研究结果表明:通过选取合适的双光反馈系统参量,M-VCSEL的两个偏振分量可输出TDS相对较弱的混沌信号;将该信号注入到S-VCSEL中,通过优化注入强度以及频率失谐,可得到TDS进一步弱化、带宽得到显著增强的两路混沌信号;结合S-VCSEL两偏振分量混沌输出的TDS以及带宽在由注入强度以及频率失谐构成的参数空间的演化图,可确定系统同时输出两路具有低TDS、宽带宽的混沌信号所需的参数范围.

参考文献

- [1] Argyris A, Syvridis D, Larger L, Annovazzi-Lodi V, Colet P, Fischer I, García-Ojalvo J, Mirasso C R, Pesquera L, Shore K A 2005 *Nature* **438** 343
- [2] Li N Q, Pan W, Luo B, Yan L S, Zou X H, Jiang N, Xiang S Y 2012 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **24** 1072
- [3] Liu J, Wu Z M, Xia G Q 2009 *Opt. Express* **17** 12619
- [4] Zhong D Z, Deng T, Zheng G L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 70504 (in Chinese) [钟东洲, 邓涛, 郑国梁 2014 物理学报 **63** 70504]
- [5] Lin F Y, Liu J M 2004 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **10** 991
- [6] Oliver N, Soriano M C, Sukow D W, Fischer I 2013 *IEEE J. Quantum Electron.* **49** 910
- [7] 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 *Nat. Photon.* **2** 728
- [8] Sakuraba R, Iwakawa K, Kanno K, Uchida A 2015 *Opt. Express* **23** 1470
- [9] Wang A B, Li P, Zhang J G, Zhang J Z, Li L, Wang Y C 2013 *Opt. Express* **21** 20452
- [10] Rontani D, Locquet A, Sciamanna M, Citrin D S, Ortin S 2009 *IEEE J. Quantum Electron.* **45** 879
- [11] Kong L Q, Wang A B, Wang H H, Wang Y C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2266 (in Chinese) [孔令琴, 王安邦, 王海红, 王云才 2008 物理学报 **57** 2266]
- [12] 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
- [13] Hwang S K, Liu J M 2000 *Opt. Commun.* **183** 195
- [14] Yan S L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 160505 (in Chinese) [颜森林 2012 物理学报 **61** 160505]
- [15] Lin F Y, Liu J M 2003 *IEEE J. Quantum Electron.* **39** 562
- [16] Zhang W L, Pan W, Luo B, Li X F, Zou X H, Wang M Y 2007 *Appl. Opt.* **46** 7262
- [17] Bandt C, Pompe B 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 174102
- [18] Guo Y Y, Wu Y, Wang Y C 2012 *Chin. Opt. Lett.* **10** 061901
- [19] Short K M, Parker A T 1998 *Phys. Rev. E* **58** 1159
- [20] Rontani D, Locquet A, Sciamanna M, Citrin D S 2007 *Opt. Lett.* **32** 2960
- [21] Wu J G, Xia G Q, Wu Z M 2009 *Opt. Express* **17** 20124
- [22] Zhu X H, Cheng M F, Deng L, Jiang X X, Ke C J, Zhang M M, Fu S N, Tang M, Shum P, Liu D M 2017 *IEEE Photon. J.* **9** 6601009
- [23] Ke J X, Yi L L, Hou T T, Hu Y, Xia G Q, Hu W S 2017 *IEEE Photon. J.* **9** 7200808
- [24] Iga K 2000 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **6** 1201
- [25] 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
- [26] Zhang X X, Zhang S H, Wu T A, Sun W Y 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 214206 (in Chinese) [张晓旭, 张胜海, 吴天安, 孙巍阳 2016 物理学报 **65** 214206]
- [27] Lin H, Hong Y H, Shore K A 2014 *J. Lightwave Technol.* **32** 1829
- [28] Yang X J, Chen J J, Xia G Q, Wu J G, Wu Z M 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 224213 (in Chinese) [杨显杰, 陈建军, 夏光琼, 吴加贵, 吴正茂 2015 物理学报 **64** 224213]
- [29] San Miguel M, Feng Q, Moloney J V 1995 *Phys. Rev. A* **52** 1728
- [30] Martin-Regalado J, Prati F, San Miguel M, Abraham N B 1997 *IEEE J. Quantum Electron.* **33** 765
- [31] Xiao P, Wu Z M, Wu J G, Jiang L, Deng T, Tang X, Fan L, Xia G Q 2013 *Opt. Commun.* **286** 339
- [32] Liu H J, Li N Q, Zhao Q C 2015 *Appl. Opt.* **54** 4380
- [33] Sodermann M, Weinkath M, Ackemann T 2004 *IEEE J. Quantum Electron.* **40** 97

- [34] Elsonbaty A, Hegazy S F, Obayya S S A 2015 *IEEE J. Quantum Electron.* **51** 2400309
- [35] Lin F Y, Chao Y K, Wu T C 2012 *IEEE J. Quantum Electron.* **48** 1010
- [36] Kanno K, Uchida A, Bunsen M 2016 *Phys. Rev. E* **93** 032206
- [37] Zhong Z Q, Wu Z M, Wu J G, Xia G Q 2013 *IEEE Photon. J.* **5** 1500409

Performances of time-delay signature and bandwidth of the chaos generated by a vertical-cavity surface-emitting laser under chaotic optical injection*

Su Bin-Bin¹⁾ Chen Jian-Jun¹⁾²⁾ Wu Zheng-Mao^{1)†} Xia Guang-Qiong^{1)‡}

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

2) (School of Medical Engineering Technology, Xinjiang Medical University, Urumqi 830011, China)

(Received 30 June 2017; revised manuscript received 21 July 2017)

Abstract

Time-delay signature (TDS) and effective bandwidth (EBW) are two key performance indexes to evaluate a chaos signal generated by a laser system including delay-time feedback. In this paper, we propose and simulate a technical scheme to optimize the TDS and EBW of chaotic signal generated by a slave vertical-cavity surface-emitting laser (S-VCSEL) under chaotic optical injection from a master vertical-cavity surface-emitting laser (M-VCSEL), which is subjected to double external-cavity feedback. First, based on the spin-flip model of a VCSEL subjected to two double external-cavity feedback, the time series of two orthogonal polarization components (referred to as X -component (X -PC) and Y -component (Y -PC), respectively) in the M-VCSEL can be obtained. Furthermore, with the help of self-correlation function (SF) analysis method, the TDSs of X -PC and Y -PC can be evaluated. The results show that through selecting suitable system operation parameters, X -PC and Y -PC in the M-VCSEL can simultaneously output chaotic signals with equivalently average intensity and weak TDS. Under optimized operation parameters, the peak values of the SF (σ) of the chaotic signal are 0.20 for X -PC and 0.16 for Y -PC, respectively, and the EBWs of the chaotic signal are 10.72 GHz for X -PC and 10.10 GHz for Y -PC, respectively. The chaotic signals output from the M-VCSEL under optimized operation parameters are injected into the S-VCSEL for further weakening TDS and enhancing EBW. Through examining the evolution rules of TDS and EBW of polarization-resolved chaotic signals in the parameter space composed of injection strength and frequency detuning, the ranges of optimizing injection parameters are determined for achieving two-channel chaotic signals with well suppressed TDS ($\sigma < 0.1$) and wide EBW (EBW > 15 GHz).

Keywords: vertical-cavity surface-emitting lasers, chaos, time-delay signature, bandwidth

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

DOI: 10.7498/aps.66.244206

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61475127, 61575163, 61775184).

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

‡ Corresponding author. E-mail: gqxia@swu.edu.cn