

单端反馈互耦合垂直腔面发射激光器混沌输出的时延特征和带宽分析

张晓旭, 吴天安, 常凯歌, 张胜海*

中国人民解放军信息工程大学理学院, 河南 郑州 450001

摘要 针对无反馈互耦合垂直腔面发射激光器(VCSELs)系统的混沌输出不能同时实现时延特征隐藏和带宽展宽的问题,通过对无反馈互耦合 VCSELs 系统中的一个激光器增加外反馈,数值分析了单端反馈互耦合 VCSELs 混沌输出的时延特征和带宽。结果表明,反馈强度、频率失谐和互耦合强度影响单端反馈互耦合 VCSELs 混沌输出的时延特征和带宽。有反馈端激光器不能同时实现时延特征隐藏和带宽展宽,无反馈端激光器可以在合适的互耦合强度和频率失谐参数区间内同时实现时延特征隐藏和带宽展宽。改变反馈强度不影响无反馈端激光器实现时延特征隐藏质量和带宽,但会影响无反馈端激光器同时实现时延特征隐藏和带宽展宽的频率失谐区域位置,且增大反馈强度时频率失谐区域位置整体向负失谐区域移动。

关键词 激光器;垂直腔面发射激光器;时延特征;带宽

中图分类号 O437 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201744.0501010

Time-Delay Characteristic and Bandwidth Analysis of Chaotic Output from Single-Ended Feedback and Mutually Coupled Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers

Zhang Xiaoxu, Wu Tianan, Chang Kaige, Zhang Shenghai

College of Science, PLA Information Engineering University, Zhengzhou, Henan 450001, China

Abstract The time-delay characteristic concealment and the bandwidth expanding of the chaotic output of mutually coupled vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) without feedback can't be achieved simultaneously, so an external optical feedback is added to one of the lasers of mutually coupled VCSELs without feedback. The time-delay characteristic and the bandwidth of the chaotic output from the single-ended feedback and mutually coupled VCSELs are numerically studied. Results show that feedback intensity, frequency detuning and mutually coupled intensity have effects on the time-delay characteristic and the bandwidth of the single-ended feedback and mutually coupled VCSELs. The laser with feedback can't obtain the time-delay characteristic concealment and the bandwidth expanding simultaneously, but the laser without feedback can obtain the time-delay characteristic concealment and the bandwidth expanding simultaneously in the proper mutually coupled intensity and frequency detuning. Changing the feedback intensity does not effect the quality of the time-delay characteristic concealment and the width of the bandwidth, but can effect the position of the frequency detuning when the time-delay characteristic concealment and the bandwidth expanding are achieved simultaneously. The position of the frequency detuning region moves to the negative frequency detuning region when the feedback intensity increases.

Key words lasers; vertical-cavity surface-emitting lasers; time-delay characteristic; bandwidth

OCIS codes 140.7260; 140.5960; 140.3325

收稿日期: 2017-01-04; 收到修改稿日期: 2017-02-16

基金项目: 河南省重点科技攻关项目(152102210012)

作者简介: 张晓旭(1984—),男,硕士,讲师,主要从事激光混沌方面的研究。E-mail: zhangxx978@163.com

* 通信联系人。E-mail: ccstshz@163.com

1 引 言

半导体激光器可以通过光反馈、光注入和光电反馈等方式获得混沌输出^[1-3],混沌激光在保密通信^[4]、高速物理随机数产生^[5-7]等方面有着广泛的应用。混沌激光的时延特征(TDS)和输出带宽(BW)对其应用具有重要影响。在保密通信中,窃密者根据混沌信号中的 TDS 重构系统,从而对保密通信造成威胁^[8-9];在高速物理随机数的产生中,TDS 会在混沌信号中引入周期特性,从而影响生成随机数的随机性^[5,10]。混沌激光的窄 BW 会限制保密通信的信息传输速率和高速物理随机数产生的比特速率^[11-13]。

目前,已有利用半导体激光器混沌系统进行 TDS 隐藏或 BW 展宽的研究^[14-20],但同时实现 TDS 隐藏和 BW 展宽的研究鲜有报道。Li 等^[21]对单混沌注入半导体边发射激光器进行了实验和数值研究,通过调节合适的参量产生无 TDS 的宽带混沌信号。Li 等^[22]还利用单混沌注入级联半导体边发射激光器模拟产生无 TDS 的宽带混沌信号,在较大的参数区间内同时实现 TDS 隐藏和 BW 展宽。Liu 等^[23]利用单混沌注入级联半导体垂直腔面发射激光器(VCSELs)模拟产生无 TDS 的宽带混沌信号。Hong 等^[24]利用单混沌注入级联 VCSELs 实验产生无 TDS 的宽带混沌信号。杨显杰等^[25]利用单混沌注入级联 VCSELs 模拟了同时实现 TDS 隐藏和 BW 展宽的参数区间。Hong 等^[26]对无反馈互耦合 VCSELs 系统结构进行了实验研究,得出无反馈互耦合 VCSELs 不能同时实现 TDS 隐藏和 BW 展宽的结论。VCSELs 相对半导体边发射激光器而言具有尺寸小、阈值电流低、光束发散角小、可实现单纵模圆形光输出且易与光纤耦合等优点,尤其是可输出包含两个正交的偏振分量,该偏振分量可用于增强激光混沌通信系统的安全性,因此 VCSELs 具有广阔的应用前景^[27]。

针对无反馈互耦合 VCSELs 混沌输出不能同时实现 TDS 隐藏和 BW 展宽的问题^[26],本文对无反馈互耦合 VCSELs 系统中激光器增加外反馈,研究了反馈强度、频率失谐和互耦合强度 3 个因素对单端反馈互耦合 VCSELs 混沌输出的 TDS 和 BW 的影响。

2 理论模型

图 1 为单端反馈互耦合 VCSELs 系统结构模型。反射镜 M 对 VCSELs-1 提供外反馈,中性密度滤波片 NDF1 用来调节反馈强度。VCSELs-1 和 VCSELs-2 相互耦合,耦合强度由中性密度滤波片 NDF2 来控制,L1 和 L2 为准直透镜,BS1、BS2、BS3 为分束器。偏振分束器 PBS1 和 PBS2 分别用来将 VCSELs-1 和 VCSELs-2 的光分成两个正交的线性偏振分量(X_1 、 Y_1 偏振分量和 X_2 、 Y_2 偏振分量)进行探测。

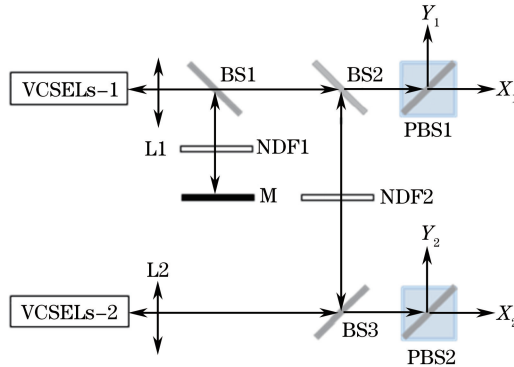


图 1 单端反馈互耦合 VCSELs 系统结构示意图

Fig. 1 Structural schematic of single-ended feedback mutually coupled VCSELs system

基于自旋反转模型^[28-29],单端反馈互耦合 VCSELs 系统速率方程可表示为

$$dE_1^{x,y}/dt = k(1 + i\alpha)[(N_1 - 1)E_1^{x,y} \pm in_1 E_1^{y,x}] \mp (\gamma_a + i\gamma_p)E_1^{x,y} + k_t E_1^{x,y}(t - \tau_1) \exp(-i\omega_1 \tau_1) + \eta E_2^{x,y}(t - \tau_2) \exp(-i\omega_0 \tau_2) - i\Delta\omega E_1^{x,y} + F_1^{x,y}, \quad (1)$$

$$dE_2^{x,y}/dt = k(1 + i\alpha)[(N_2 - 1)E_2^{x,y} \pm in_2 E_2^{y,x}] \mp (\gamma_a + i\gamma_p)E_2^{x,y} + \eta E_1^{x,y}(t - \tau_2) \exp(-i\omega_0 \tau_2) + i\Delta\omega E_2^{x,y} + F_2^{x,y}, \quad (2)$$

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

$$dn_{1,2}/dt = -\gamma_s n_{1,2} - \gamma_N [n_{1,2} (|E_{1,2}^x|^2 + |E_{1,2}^y|^2) + in_{1,2} (E_{1,2}^y E_{1,2}^{x*} - E_{1,2}^x E_{1,2}^{y*})], \quad (4)$$

式中下标 1 和 2 分别对应 VCSELS-1 和 VCSELS-2, 上标 x 和 y 分别表示 X 偏振分量和 Y 偏振分量, 上标 $*$ 表示复共轭, E 为光场的慢变复振幅, t 为时间, N 为导带和价带之间总的反转载流子密度, n 为自旋向上和自旋向下反转载流子密度的差值, k 为光场衰减速率, α 为线宽增强因子, $\mu = J/J_{th}$ 为在阈值时归一化为 1 的归一化注入电流, γ_N 为总载流子的衰减速率, γ_s 为自旋反转速率, γ_a 为有源介质的二向色性系数, γ_p 为有源介质的双折射系数, k_f 为 VCSELS-1 的反馈强度, τ_1 为 VCSELS-1 的反馈延迟时间, η 为两个激光器的互耦合强度, τ_2 为互耦合延迟时间, ω_1 和 ω_2 表示 VCSELS-1 和 VCSELS-2 的角频率, $\omega_0 = (\omega_2 + \omega_1)/2$ 表示中心角频率, $\Delta\omega = (\omega_2 - \omega_1)/2$ 表示角频率失谐, $\Delta f = \Delta\omega/(2\pi)$ 表示频率失谐。 F 为自发辐射噪声, 具体表示为

$$F_{1,2}^x = \sqrt{\frac{\beta_{sp}}{2}} (\sqrt{N_{1,2} + n_{1,2}} \xi_{1,2}^A + \sqrt{N_{1,2} - n_{1,2}} \xi_{1,2}^B), \quad (5)$$

$$F_{1,2}^y = -i \sqrt{\frac{\beta_{sp}}{2}} (\sqrt{N_{1,2} + n_{1,2}} \xi_{1,2}^A - \sqrt{N_{1,2} - n_{1,2}} \xi_{1,2}^B), \quad (6)$$

式中 $\xi_{1,2}^A$ 和 $\xi_{1,2}^B$ 为两个相互独立的、平均值为 0、方差为 1 的高斯白噪声, β_{sp} 为自发辐射速率。

采用自相关函数 (ACF) 对混沌激光的 TDS 进行分析^[11], 自相关函数 $C(\tau) = (1/N) \sum [I(t)I(t+\tau)]$, 其中 $I(t)$ 为混沌激光强度的时间序列, τ 为时移。采用 80% 能量的 BW 对混沌激光的 BW 进行分析^[10]。

3 结果与讨论

利用 4 阶 Runge-Kutta 算法对 (1)~(4) 式进行数值求解, 模拟中采用的参数为^[30]: $k = 300 \text{ ns}^{-1}$, $\alpha = 3$, $\gamma_a = 0.1 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_p = 10 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_N = 1 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_s = 50 \text{ ns}^{-1}$, $\tau_1 = 3 \text{ ns}$, $\tau_2 = 2 \text{ ns}$, VCSELS-1 对应中心波长为 850 nm。设定 $\mu = 2.7$, 以保证激光器 X 和 Y 偏振方向有相同的激光强度, 此时弛豫振荡频率 $f_{R0} = \sqrt{2k\gamma_N(\mu-1)}/(2\pi) = 5.08 \text{ GHz}$ 。

3.1 影响 TDS 和 BW 的因素

对 VCSELS-1 引入外光延时反馈, 取不同的反馈强度、频率失谐和互耦合强度, 使两个激光器都能同时实现混沌输出, 因 X 、 Y 偏振分量有相同的结果, 这里仅研究 X 偏振分量。

图 2 为在 $k_f = 30 \text{ ns}^{-1}$ 、 $\Delta f = 0 \text{ GHz}$ 、 $\eta = 30 \text{ ns}^{-1}$ 的情况下, 单端反馈互耦合 VCSELS 的功率谱和 TDS。由图 2(a) 和 (b) 可以看出两个激光器的混沌激光 BW 基本一致。由图 2(c)、(d) 可知, 两个激光器在 $|m_1\tau_1 \pm 2m_2\tau_2|$ (m_1, m_2 为非负整数) 处都出现了 TDS, 只是在 $3 \text{ ns}(\tau_1)$ 和 $4 \text{ ns}(2\tau_2)$ 处 VCSELS-1 的 TDS 峰值比 VCSELS-2 的 TDS 峰值更明显, VCSELS-1 和 VCSELS-2 在 $3 \text{ ns}(\tau_1)$ 处由外光延时反馈引起的 TDS 峰值约为 0.5 和 0.15, 在 $4 \text{ ns}(2\tau_2)$ 处由互耦合引起的 TDS 峰值约为 0.3 和 0.2。产生这种现象的原因是: 对 VCSELS-1 而言, 可将 VCSELS-2 看作它的非线性延时反馈镜, 加上外光延时反馈镜 M , VCSELS-1 得到了两个不同的延时反馈, 因此其在 $3 \text{ ns}(\tau_1)$ 和 $4 \text{ ns}(2\tau_2)$ 处出现了峰值较大的 TDS, 并在 $|m_1\tau_1 \pm 2m_2\tau_2|$ 处出现了 TDS。对于 VCSELS-2 而言, 将 VCSELS-1 看作它的非线性延时反馈镜, 同时由于 VCSELS-1 在 $|m_1\tau_1 \pm 2m_2\tau_2|$ 处具有 TDS, 从而使 VCSELS-2 也在 $|m_1\tau_1 \pm 2m_2\tau_2|$ 处具有相似的 TDS, 只是此时 VCSELS-2 的 TDS 比 VCSELS-1 的 TDS 弱的多。

图 3 所示为单端反馈互耦合 VCSELS 的 TDS 和 BW。由图 3(a)、(d) 可知, 在 $k_f = 50 \text{ ns}^{-1}$ 、 $\Delta f = 0 \text{ GHz}$ 、 $\eta = 30 \text{ ns}^{-1}$ 的情况下, VCSELS-1 的 BW 大于 30 ns^{-1} [图 2(a)], 也大于 VCSELS-2 的带宽。出现这种现象的原因在于: 外光延时反馈仅作用于 VCSELS-1, 若反馈强度增大, 则 VCSELS-1 的 BW 变宽。VCSELS-1 在 $3 \text{ ns}(\tau_1)$ 处外光延时反馈引起的 TDS 峰值增大至 0.8, 也正是由于在 $3 \text{ ns}(\tau_1)$ 的 TDS 较大, VCSELS-1 在 $|m_1\tau_1 \pm 2m_2\tau_2|$ 处的 TDS 峰值明显; VCSELS-2 在 $|m_1\tau_1 \pm 2m_2\tau_2|$ 处由外光延时反馈和互耦合引起的 TDS 峰值小于 0.1, 实现了 TDS 隐藏。

由图 3(b)、(e) 可知, 在 $k_f = 30 \text{ ns}^{-1}$ 、 $\Delta f = 8 \text{ GHz}$ 、 $\eta = 30 \text{ ns}^{-1}$ 的情况下, 两个激光器的混沌激光 BW 基本一致, 且 BW 要比 $\Delta f = 0 \text{ GHz}$ [图 2(a)、(b)] 的 BW 宽, 原因在于合适的频率失谐可以提高 BW。VCSELS-1 在 $3 \text{ ns}(\tau_1)$ 处由外光延时反馈引起的 TDS 峰值达到 0.65, 在 $4 \text{ ns}(2\tau_2)$ 处由互耦合引起的 TDS 峰值小于 0.1, 实现了隐藏; VCSELS-2 在 $|m_1\tau_1 \pm 2m_2\tau_2|$ 处由外光延时反馈和互耦合引起的 TDS 峰值小于

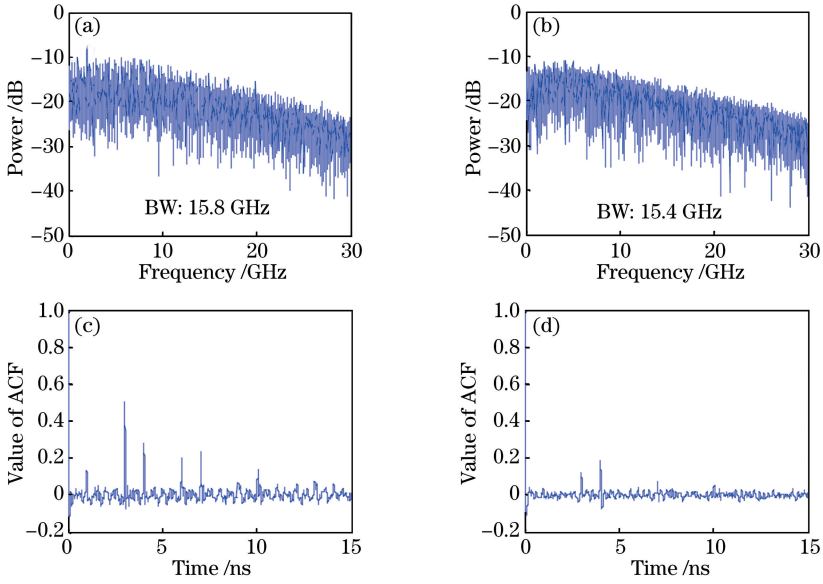


图 2 $k_f=30 \text{ ns}^{-1}$ 、 $\Delta f=0 \text{ GHz}$ 、 $\eta=30 \text{ ns}^{-1}$ 时,单端反馈互耦合 VCSELs 的功率谱和 TDS。

(a) VCSELs-1 的功率谱;(b) VCSELs-2 的功率谱;(c) VCSELs-1 的 TDS;(d) VCSELs-2 的 TDS

Fig. 2 Power spectra and TDS of single-ended feedback mutually coupled VCSELs when $k_f=30 \text{ ns}^{-1}$, $\Delta f=0 \text{ GHz}$ and $\eta=30 \text{ ns}^{-1}$. (a) Power spectrum of VCSELs-1; (b) power spectrum of VCSELs-2; (c) TDS of VCSELs-1; (d) TDS of VCSELs-2

0.1,成功实现了 TDS 隐藏。

由图 3(c)、(f)可知,在 $k_f=30 \text{ ns}^{-1}$ 、 $\Delta f=0 \text{ GHz}$ 、 $\eta=15 \text{ ns}^{-1}$ 的情况下,两个激光器的 BW 小于 $\eta=30 \text{ ns}^{-1}$ [图 2(a)、(b)]时的 BW,原因在于合适的互耦合强度可以提高 BW。VCSELs-1 在 $3 \text{ ns}(\tau_1)$ 处由外光延时反馈引起的 TDS 峰值约为 0.65,在 $4 \text{ ns}(2\tau_2)$ 处由互耦合引起的 TDS 峰值小于 0.1,实现了隐藏;VCSELs-2 在 $|m_1\tau_1 \pm 2m_2\tau_2|$ 处由外光延时反馈和互耦合引起的 TDS 峰值小于 0.1,实现了 TDS 隐藏。

由此可见,反馈强度、频率失谐和互耦合强度是影响 TDS 隐藏和 BW 的重要因素。

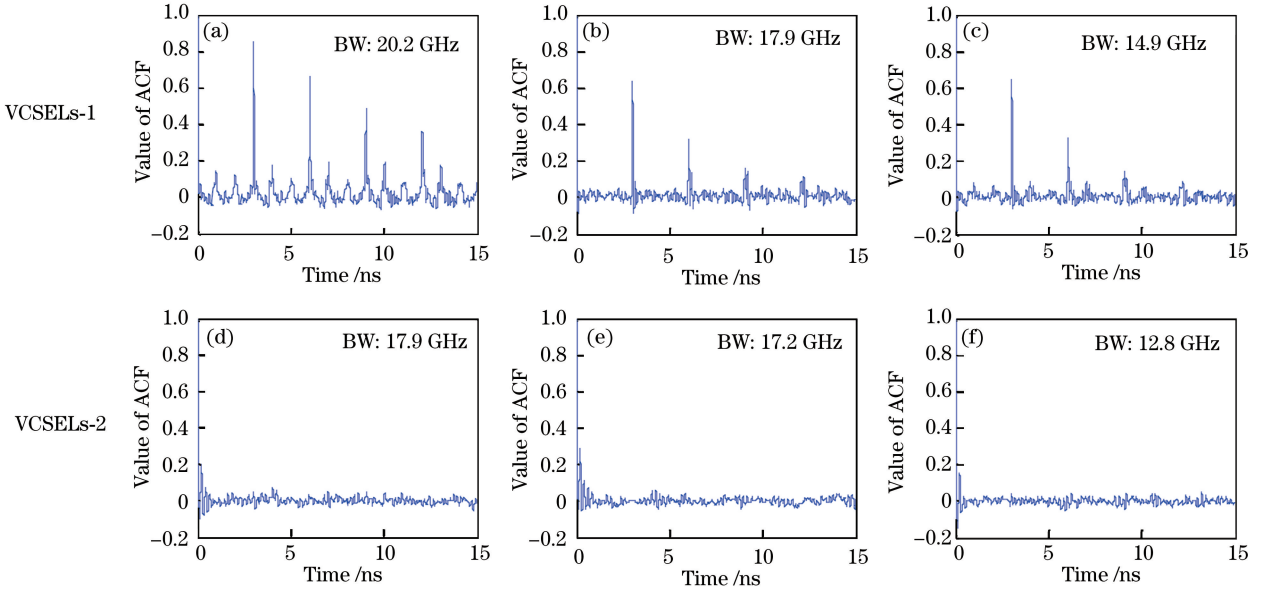


图 3 单端反馈互耦合 VCSELs 的 TDS 和 BW。(a)(d) $k_f=50 \text{ ns}^{-1}$ 、 $\Delta f=0 \text{ GHz}$ 、 $\eta=30 \text{ ns}^{-1}$;

(b)(e) $k_f=30 \text{ ns}^{-1}$ 、 $\Delta f=8 \text{ GHz}$ 、 $\eta=30 \text{ ns}^{-1}$;(c)(f) $k_f=30 \text{ ns}^{-1}$ 、 $\Delta f=0 \text{ GHz}$ 、 $\eta=15 \text{ ns}^{-1}$

Fig. 3 TDS and BW of single-ended feedback mutually coupled VCSELs. (a)(d) $k_f=50 \text{ ns}^{-1}$, $\Delta f=0 \text{ GHz}$, $\eta=30 \text{ ns}^{-1}$; (b)(e) $k_f=30 \text{ ns}^{-1}$, $\Delta f=8 \text{ GHz}$, $\eta=30 \text{ ns}^{-1}$; (c)(f) $k_f=30 \text{ ns}^{-1}$, $\Delta f=0 \text{ GHz}$, $\eta=15 \text{ ns}^{-1}$

3.2 反馈强度对 TDS 和 BW 的影响

用 C_1 和 C_2 来表征外光延时反馈和互耦合在 τ_1 和 $2\tau_2$ 处引起的 TDS 峰值,当 $\eta=30 \text{ ns}^{-1}$ 时,不同反馈强度下的 C_1 、 C_2 和 BW 随频率失谐 Δf 的变化如图 4 表示。

由图 4(d)可知,VCSELS-2 可以在 $k_f=10 \text{ ns}^{-1}$ 、 $-17 \text{ GHz}<\Delta f<-13 \text{ GHz}$ 、 $9 \text{ GHz}<\Delta f<13 \text{ GHz}$ 的参数区间内实现 BW 展宽,并且在负失谐区域获得更宽的 BW。在这两个频率失谐区域, C_1 、 C_2 同时小于 0.1,实现了 TDS 隐藏,原因在于合适的频率失谐增强了带宽,可以实现对 TDS 的抑制^[31]。由图 4(a)可知,VCSELS-1 可以在 $k_f=10 \text{ ns}^{-1}$ 、 $-17 \text{ GHz}<\Delta f<-13 \text{ GHz}$ 、 $9 \text{ GHz}<\Delta f<13 \text{ GHz}$ 的参数区间内实现 BW 展宽,并且在正失谐区域获得更宽的 BW。此时虽然 C_2 小于 0.1,在该参数区间 TDS 被隐藏,但是 C_1 约为 0.2,在该参数区间 TDS 未能被隐藏。 C_1 不能被隐藏的原因是外光延时反馈引起的周期性不能被抑制,因此,VCSELS-1 不能同时实现 C_1 和 C_2 隐藏。

由图 4(e)、(f)可知,VCSELS-2 可以在 $k_f=30 \text{ ns}^{-1}$ 、 $-19 \text{ GHz}<\Delta f<-15 \text{ GHz}$ 、 $6 \text{ GHz}<\Delta f<10 \text{ GHz}$ 和 $k_f=50 \text{ ns}^{-1}$ 、 $-25 \text{ GHz}<\Delta f<-21 \text{ GHz}$ 、 $-2 \text{ GHz}<\Delta f<2 \text{ GHz}$ 的参数区间内, C_1 、 C_2 同时小于 0.1,可同时实现 C_1 、 C_2 隐藏和 BW 展宽,并且在负失谐区域获得更宽的 BW。实现 C_1 、 C_2 隐藏的质量和 BW 宽窄与 $k_f=10 \text{ ns}^{-1}$ 的图 4(d)相比没有明显变化,只是频率失谐区域位置随着反馈强度的增大整体向负失谐区域移动。由图 4(b)、(c)可知,VCSELS-1 不能同时实现混沌输出的 TDS 隐藏和 BW 展宽,因为反馈强度的增大虽然使 VCSELS-1 的 BW 更宽,但使 C_1 明显大于 $k_f=10 \text{ ns}^{-1}$ 时的 C_1 。

由此可见,增大 VCSELS-1 的反馈强度,将会使两个激光器 BW 展宽的频率失谐区域位置整体向负失谐区域移动,可以使 VCSELS-2 同时实现 TDS 隐藏和 BW 展宽,并且不影响实现 TDS 隐藏质量和 BW。VCSELS-1 的 BW 变宽的同时, C_1 也增大,因此不能使 VCSELS-1 同时实现 TDS 隐藏和 BW 展宽。

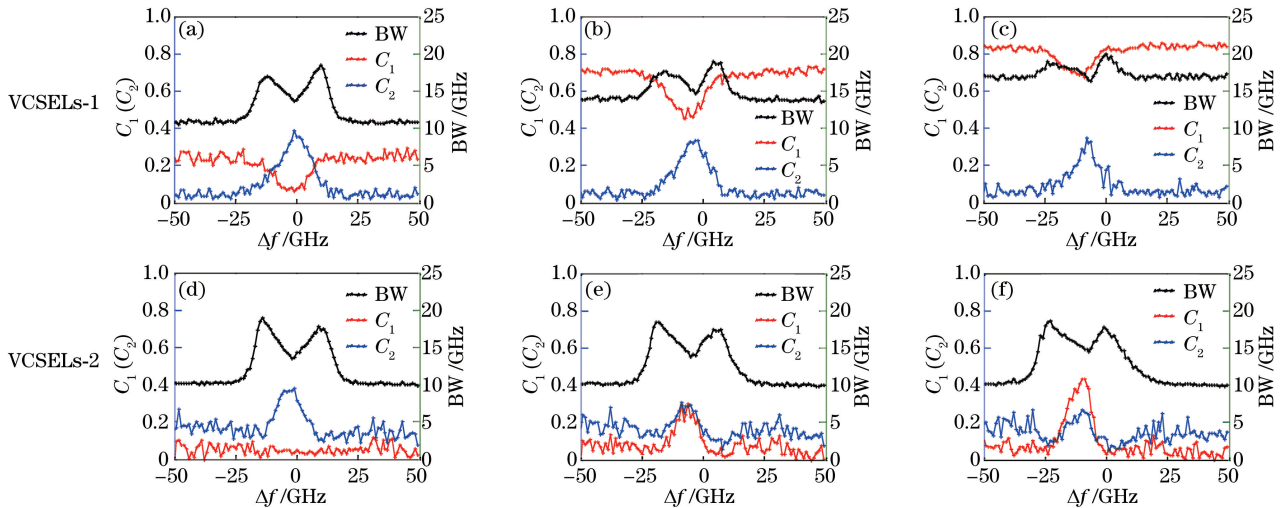


图 4 C_1 、 C_2 和 BW 随 Δf 的变化。(a)(d) $k_f=10 \text{ ns}^{-1}$; (b)(e) $k_f=30 \text{ ns}^{-1}$; (c)(f) $k_f=50 \text{ ns}^{-1}$

Fig. 4 Variations in C_1 , C_2 and BW with Δf . (a)(d) $k_f=10 \text{ ns}^{-1}$; (b)(e) $k_f=30 \text{ ns}^{-1}$; (c)(f) $k_f=50 \text{ ns}^{-1}$

3.3 $k_f=30 \text{ ns}^{-1}$ 时同时实现 TDS 隐藏和 BW 展宽的参数区间

图 5 为 $k_f=30 \text{ ns}^{-1}$ 时 C_1 、 C_2 和 BW 随频率失谐和互耦合强度的变化。由图 5 可知,VCSELS-2 在 $-19 \text{ GHz}<\Delta f<-15 \text{ GHz}$ 、 $6 \text{ GHz}<\Delta f<10 \text{ GHz}$ 和 $\eta>10 \text{ ns}^{-1}$ 参数区间内,随着互耦合强度的增大,BW 明显变宽,且在负失谐区域获得更宽的 BW。在这两个频率失谐区域,当 $10 \text{ ns}^{-1}<\eta<35 \text{ ns}^{-1}$ 时, C_1 和 C_2 小于 0.1 时同时实现了 TDS 隐藏;当 $\eta>35 \text{ ns}^{-1}$ 时, C_1 、 C_2 开始逐渐增大,因此不能同时实现 C_1 、 C_2 隐藏。VCSELS-1 在 $-19 \text{ GHz}<\Delta f<-15 \text{ GHz}$ 、 $6 \text{ GHz}<\Delta f<10 \text{ GHz}$ 、 $\eta>0 \text{ ns}^{-1}$ 参数区间内,随着互耦合强度的增大,BW 明显变宽,且在正失谐区域获得更宽的 BW,BW 可以达到 22 GHz。当 $0 \text{ ns}^{-1}<\eta<35 \text{ ns}^{-1}$ 时, C_1 较大, C_2 小于 0.1 并且得到隐藏;当 $35 \text{ ns}^{-1}<\eta<60 \text{ ns}^{-1}$ 时, C_1 仍然较大,但 C_1 随着 η 的增大逐渐减小,而 C_2 在逐渐增大,相对而言, C_2 仍然较小,原因在于对该反馈强度,互耦合强度的增大对外光延时反馈引入的 TDS 起到了更大的抑制作用。

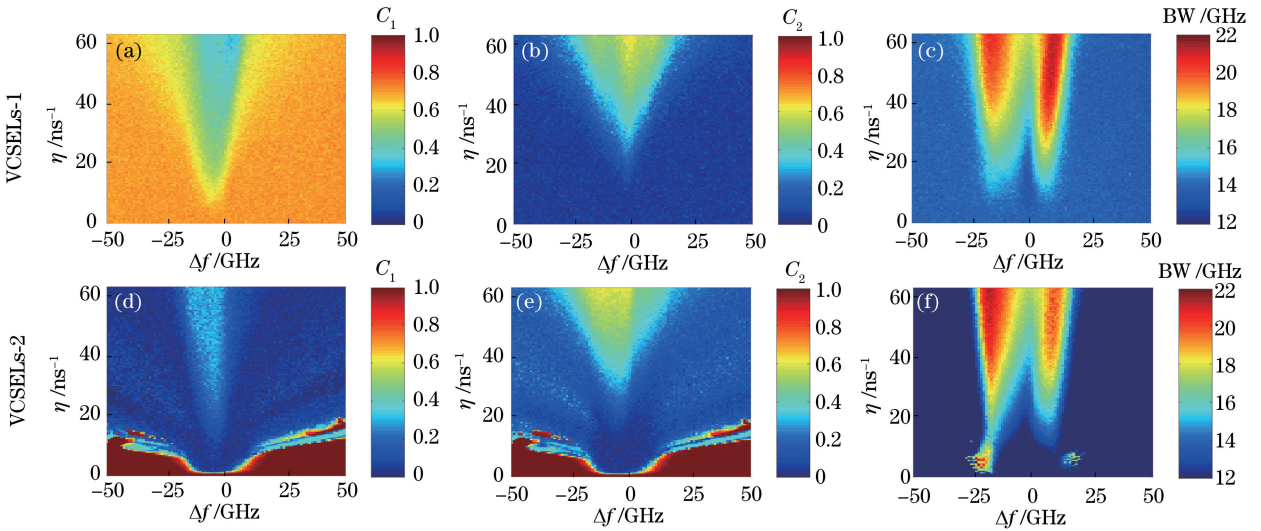


图 5 TDS 峰值和 BW 随 Δf 和 η 的变化。(a)(d) C_1 ;(b)(e) C_2 ;(c)(f) BW

Fig. 5 Variations in peak TDS and BW with Δf and η . (a)(d) C_1 ; (b)(e) C_2 ; (c)(f) BW

4 结 论

针对无反馈 VCSELS 系统的混沌输出不能同时实现 TDS 隐藏和 BW 展宽的问题,提出了一种单端反馈互耦合 VCSELS 混沌系统模型,数值讨论了反馈强度、频率失谐和互耦合强度 3 个因素对单端反馈互耦合 VCSELS 混沌输出的 TDS 和 BW 的影响。模拟结果表明:增大 VCSELS-1 的反馈强度时,无法使反馈端 VCSELS-1 同时实现 TDS 隐藏和 BW 展宽;无反馈端 VCSELS-2 可同时实现 TDS 隐藏和 BW 展宽,并且不影响实现 TDS 隐藏质量和 BW;两个激光器 BW 展宽的频率失谐区域位置整体向负失谐区域移动。当 $k_f = 30 \text{ ns}^{-1}$ 时,有反馈端的 VCSELS-1 在 $-19 \text{ GHz} < \Delta f < -15 \text{ GHz}$ 、 $6 \text{ GHz} < \Delta f < 10 \text{ GHz}$ 、 $\eta > 0 \text{ ns}^{-1}$ 的参数区间内的 BW 明显变大,但 C_1 不能被完全抑制,因此反馈端 VCSELS-1 不能同时实现 TDS 隐藏和 BW 展宽。无反馈端 VCSELS-2 可以在 $-19 \text{ GHz} < \Delta f < -15 \text{ GHz}$ 、 $6 \text{ GHz} < \Delta f < 10 \text{ GHz}$ 和 $10 \text{ ns}^{-1} < \eta < 35 \text{ ns}^{-1}$ 的参数区间内同时实现 TDS 隐藏和 BW 展宽;当 $\eta > 35 \text{ ns}^{-1}$ 时,随着互耦合强度的增大,虽然 BW 越来越大,但是反馈和互耦合引入的 TDS 也会越来越明显。

参 考 文 献

- [1] Lang R, Kobayashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1980, 16(3): 347-355.
- [2] Simpson T B, Liu J M, Gavrielides A, *et al.* Period doubling route to chaos in a semiconductor laser subject to optical injection[J]. Applied Physics Letters, 1994, 64(26): 3539-3541.
- [3] Tang S, Liu J M. Chaotic pulsing and quasi-periodic route to chaos in a semiconductor laser with delayed opto-electronic feedback[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2001, 37(3): 329-336.
- [4] Argyris A, Syvridis D, Larger L, *et al.* Chaos-based communications at high bit rates using commercial fibre-optic links[J]. Nature, 2005, 438(7066): 343-346.
- [5] Uchida A, Amano K, Inoue M, *et al.* Fast physical random bit generation with chaotic semiconductor lasers [J]. Nature Photonics, 2008, 2(12): 728-732.
- [6] Reidler I, Aviad Y, Rosenbluh M, *et al.* Ultrahigh-speed random number generation based on a chaotic semiconductor laser[J]. Physical Review Letters, 2009, 103(2): 024102.
- [7] Li Pu, Wang Yuncai. Research progress in physical random number generator based on laser chaos for high-speed secure communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(6): 060002.
李 璞, 王云才. 面向高速保密通信的激光混沌物理随机数发生器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(6): 060002.
- [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]. Applied Optics, 2009, 48(18): 3515-3520.

- [9] Udaltsov V S, Goedgebuer J P, Larger L, *et al.* Cracking chaos-based encryption systems ruled by nonlinear time delay differential equations[J]. *Physics Letters A*, 2003, 308(1): 54-60.
- [10] Zhang Jibing, Zhang Jianzhong, Yang Yibiao, *et al.* Randomness analysis of external cavity semiconductor laser as entropy source[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(11): 7679-7685.
张继兵, 张建忠, 杨毅彪, 等. 外腔半导体激光器随机数熵源的腔长分析[J]. *物理学报*, 2010, 59(11): 7679-7685.
- [11] Uchida A, Heil T, Liu Y, *et al.* High-frequency broad-band signal generation using a semiconductor laser with a chaotic optical injection[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2003, 39(11): 1462-1467.
- [12] Wang A B, Wang Y C, Wang J F. Route to broadband chaos in a chaotic laser diode subject to optical injection[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(8): 1144-1146.
- [13] Wang A B, Wang Y C, He H C. Enhancing the bandwidth of the optical chaotic signal generated by a semiconductor laser with optical feedback[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(19): 1633-1635.
- [14] 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]. *Optics Letters*, 2007, 32(20): 2960-2962.
- [15] Priyadarshi S, Hong Y H, Pierce I, *et al.* Experimental investigations of time-delay signature concealment in chaotic external cavity VCSELs subject to variable optical polarization-angle of feedback[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 19(4): 2557-2559.
- [16] Yang X J, Wu J G, Wu Z M, *et al.* Time-delay signatures hidden in the phase of chaotic output of mutually delay-coupled vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Optics Communications*, 2015, 336: 262-268.
- [17] Sun Weiyang, Zhang Shenghai, Wu Tianan, *et al.* Time delay signature concealment in chaotic semiconductor lasers with double optical feedback and dual-path injection[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(12): 121406.
孙巍阳, 张胜海, 吴天安, 等. 双光反馈双光注入混沌半导体激光器延时特征峰抑制[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(12): 121406.
- [18] Yang L, Pan W, Yan L S, *et al.* Loss of time-delay signature in a ring of three unidirectionally coupled semiconductor lasers[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(4): 041403.
- [19] Xue C P, Jiang N, Lü Y X, *et al.* Time delay signature concealment of chaotic semiconductor laser subject to nonlinear feedback[J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(9): 091404.
- [20] Wang Yuncai, Zhang Gengwei, Wang Anbang, *et al.* Bandwidth enhancement of semiconductor laser as a chaotic transmitter by external light injection[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(8): 4372-4377.
王云才, 张耕玮, 王安帮, 等. 光注入提高半导体激光器混沌载波发射机的带宽[J]. *物理学报*, 2007, 56(8): 4372-4377.
- [21] Li N Q, Pan W, Xiang S Y, *et al.* Photonic generation of wideband time-delay-signature-eliminated chaotic signals utilizing an optically injected semiconductor laser[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, 48(10): 1339-1345.
- [22] Li N Q, Pan W, Xiang S Y, *et al.* Loss of time delay signature in broadband cascade-coupled semiconductor lasers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(23): 2187-2190.
- [23] Liu H J, Li N Q, Zhao Q C. Photonic generation of polarization-resolved wideband chaos with time-delay concealment in three-cascaded vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(14): 4380-4387.
- [24] Hong Y H, Quirce A, Wang B J, *et al.* Concealment of chaos time-delay signature in three-cascaded vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2016, 52(8): 16128864.
- [25] Yang Xianjie, Chen Jianjun, Xia Guangqiong, *et al.* Analyses of the time-delay signature and bandwidth of the chaotic output from a master-slave vertical-cavity surface-emitting laser dynamical system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(22): 0224213.
杨显杰, 陈建军, 夏光琼, 等. 主副垂直腔面发射激光器动力学系统混沌输出的时延特征及带宽分析[J]. *物理学报*, 2015, 64(22): 0224213.
- [26] Hong Y, Spencer P S, Shore K A. Wideband chaos with time-delay concealment in vertical-cavity surface-emitting lasers with optical feedback and injection[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2014, 50(4): 236-242.
- [27] Martin-Regalado J, Prati F, San Miguel M, *et al.* Polarization properties of vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1997, 33(5): 765-783.
- [28] San M M, Feng Q, Moloney J V. Light-polarization dynamics in surface-emitting semiconductor lasers[J]. *Physical Review A*, 1995, 52(2): 1728-1739.
- [29] Vicente R, Mirasso C R. Dynamics of mutually coupled VCSELs[J]. *SPIE*, 2004, 5349: 331-338.
- [30] Zhong Z Q, Wu Z M, Wu J G, *et al.* Time-delay signature suppression of polarization-resolved chaos outputs from two mutually coupled VCSELs[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(2): 1500409.
- [31] Wu T A, Sun W Y, Zhang X X, *et al.* Concealment of time delay signature of chaotic output in a slave semiconductor laser with chaos laser injection[J]. *Optics Communications*, 2016, 381: 174-179.